



VNIVERSIDAD D SALAMANCA
ESCVELA TÉCNICA SUPERIOR D INGENIERÍA INDUSTRIAL D BÉJAR
DEPARTAMENTO D FÍSICA, INGENIERÍA Y RADIOLOGÍA MÉDICA

TESIS DOCTORAL

Estudio de las pérdidas en el suministro trifásico de energía eléctrica. Determinación de factores de pérdidas aplicables a las tarifas eléctricas, y su medida

AVTOR

Roberto Carlos Redondo Melchor

DiRECTOR

Prof. Dr. D. Félix Redondo Quintela

ENERO D 2008

Prof. Dr. D. Félix Redondo Quintela, Catedrático de Escuela Universitaria del Área de Conocimiento de Ingeniería Eléctrica, del Departamento de Física, Ingeniería y Radiología Médica de la Universidad de Salamanca

Hago constar

Que don **Roberto Carlos Redondo Melchor**, Ingeniero Industrial, ha realizado, bajo mi dirección, la investigación que ha dado lugar a la tesis de título **Estudio de las pérdidas en el suministro trifásico de energía eléctrica. Determinación de factores de pérdidas aplicables a las tarifas eléctricas, y su medida.**

A mi juicio, este trabajo reúne las condiciones necesarias para que, con él, don Roberto Carlos Redondo Melchor pueda optar al grado de Doctor por la Universidad de Salamanca, por lo que autorizo su presentación para este fin.

Béjar, 16 de enero de 2008
El Director de la Tesis

Prof. Dr. D. Félix Redondo Quintela

A mis padres,
por todo lo que me habéis ayudado.

Reconocimientos

Para investigar hay que aprender. Para redactar una tesis hay que aprender. La persona que más me ha enseñado a ambas cosas ha sido el director de esta tesis, el Dr. D. Félix Redondo Quintela. Él suele decir que los buenos alumnos salen adelante a pesar de los profesores. Se le olvida decir que los buenos profesores hacen también buenos estudiantes. Sin negar mi propio esfuerzo a lo largo de esta investigación, que ha sido mucho más del que creía poder desarrollar, éste es mi caso en gran proporción. Sin su ayuda yo no hubiera podido, ni siquiera, delimitar con precisión los objetivos de esta tesis, ni continuar el trabajo casi sin interrupción, como he hecho, hasta conseguir alcanzarlos. Tampoco hubiera llegado, al menos con la facilidad con que lo he conseguido, a la interpretación correcta de muchos resultados que han ido surgiendo.

La claridad de que he pretendido dotar a la redacción de esta memoria es también, en el grado que haya sido conseguida, consecuencia de años de esfuerzo por progresar hacia la máxima precisión en el lenguaje, que me ha sido constantemente inculcada por el director de esta tesis. Pero no solo el dominio del lenguaje. El conocimiento de lo que se quiere decir es imprescindible para poder decirlo. Catón el Viejo, a quien el Dr. Redondo Quintela gusta citar, decía, incluso, que el conocimiento de lo que se quiere expresar es suficiente para expresarlo bien: "*Rem tene, verba sequentur*", es decir, "conoce la cosa, conoce lo que quieres decir, que las palabras vendrán solas después". Yo, sin embargo, he aprendido, también del director de esta tesis, que ambas cosas, el conocimiento de los conceptos, y la precisión al expresarlos, no son acciones separadas, sino que "...tratar de expresar correctamente lo que se cree conocer es la mejor forma de perfeccionar el conocimiento". Consecuencia de esta preocupación por decir lo más exactamente que se pueda lo que se quiere comunicar, han sido no pocos cambios en la redacción de muchas partes de esta memoria, frutos de frecuentes intercambios de opinión entre los dos.

La investigación de la que se da cuenta en esta tesis, está apoyada en todo un proceso de avance en el conocimiento de temas relacionados con el que aquí se trata. En este proceso estamos implicadas varias personas del Área. A todas ellas, por tanto, expreso también mi reconocimiento por el saber acumulado, del que todos, pero también yo, nos beneficiamos. Quiero agradecer especialmente su aportación al Dr. D. Juan Manuel

García Arévalo, cuyas investigaciones sobre los compensadores estáticos muestran que no solo es posible corregir el factor de potencia de cargas trifásicas, sino también, simultáneamente, equilibrar las intensidades de esas cargas. Su ayuda se extiende, además, a todos los trabajos de laboratorio necesarios para la comprobación de los resultados teóricamente deducidos. Esta ayuda viene de lejos y es permanente, en el sentido de que sé que dispongo de ella cuando sea necesaria. Nuestra colaboración no se detiene ahí, sino que alcanza a toda situación que la requiera.

No olvido que el Prof. D. Luis Redondo Sánchez es nuestro recurso permanente y seguro para todas las dificultades de material que haya que resolver. Basta con darle una idea de lo que se quiere hacer, para que sus sugerencias sobre los aparatos y componentes convenientes, y los distribuidores que pueden servirlos, surjan de inmediato. Tener la seguridad de su ayuda para las dificultades de este tipo, es otro importante nivel de tranquilidad que facilita el planteamiento de casi cualquier objetivo.

Gracias, también, a todos los demás miembros del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca, por el ambiente de respeto y de armonía que hemos sabido crear. El trabajo se facilita así en gran manera.

Esta gratitud se extiende también al departamento de Física, Ingeniería y Radiología Médica, del que el Área de Ingeniería Eléctrica forma parte, especialmente a su equipo directivo y a los servicios administrativos, en los que siempre he encontrado disposición de ayuda.

Muchas gracias a todos.

1. Índice

1. ÍNDICE	9
2. INTRODUCCIÓN	17
3. OBJETIVOS	21
4. FORMA ACTUAL DE EVALUAR LA ENERGÍA QUE SE PIERDE EN EL SISTEMA ELÉCTRICO POR CAUSA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RECEPTORES	23
4.1. INTRODUCCIÓN.....	23
4.2. MEDIDA DE LA ENERGÍA REACTIVA CONSUMIDA DURANTE EL PERIODO DE FACTURACIÓN.....	23
4.3. EJEMPLOS DE INADECUACIÓN DEL MÉTODO DEL COMPLEMENTO POR ENERGÍA REACTIVA PARA EVALUAR LA PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDA A LOS RECEPTORES.....	27
4.4. CRÍTICAS AL MÉTODO DE ENERGÍA REACTIVA.....	29
4.5. DESEQUILIBRIOS DE CARGAS TRIFÁSICAS	29
5. LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGÍA	31
5.1. INTRODUCCIÓN.....	31
5.2. PRIMERAS LÍNEAS DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	31
5.3. TRANSPORTE DE ENERGÍA POR MEDIO DE CORRIENTE CONTINUA “EN PARALELO”	32
5.4. TRANSPORTE DE ENERGÍA POR MEDIO DE CORRIENTE CONTINUA “EN SERIE”	34
5.4.1. Sistemas eléctricos en paralelo.....	35
5.4.2. Transporte de energía eléctrica por medio de corriente continua	36
5.5. CORRIENTE ALTERNA.....	37
5.6. LÍNEAS DE CORRIENTE ALTERNA	37
5.7. DE LOS SISTEMAS MONOFÁSICOS A LOS TRIFÁSICOS	38
6. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y REDES DE ADECUACIÓN DE SEÑALES	41
6.1. INTRODUCCIÓN.....	41
6.2. TARJETA PCI 6071E DE CAPTACIÓN DE DATOS.....	41
6.2.1. Características relevantes	41
6.2.2. Parámetros de la tarjeta.....	43
6.2.2.1. Tensión máxima.....	44
6.2.2.2. Polaridad	45
6.2.2.3. Configuración de los terminales de la entrada analógica	46
6.2.3. Valores escogidos	47
7. ENERGÍA QUE SE PIERDE EN LA RESISTENCIA DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS POR CONSUMO DE POTENCIA DE LOS RECEPTORES	49
7.1. INTRODUCCIÓN.....	49
7.2. ENERGÍA QUE SE PIERDE EN LA RESISTENCIA DE LOS SISTEMAS DE CORRIENTE CONTINUA POR CONSUMO DE POTENCIA	50

7.2.1.	Potencias en un sistema eléctrico de corriente continua.....	51
7.2.1.1.	Potencia máxima de un generador y de una línea de corriente continua.....	53
7.2.2.	Rendimientos en un sistema de corriente continua	54
7.2.3.	Influencia de la potencia del receptor en la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico de corriente continua	55
7.2.3.1.	Influencia de la potencia del receptor en los rendimientos del sistema eléctrico de corriente continua	57
7.2.3.2.	Incremento de la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico de corriente continua por unidad de incremento de su carga.....	58
7.2.3.3.	Disminución de los rendimientos por unidad de incremento de la carga de un sistema de corriente continua.....	59
7.2.4.	Potencia máxima que un sistema eléctrico de corriente continua puede entregar a un receptor	60
7.2.5.	Energía que se pierde en un sistema eléctrico de corriente continua por consumo de potencia.....	61
7.2.6.	Condición de mínima energía perdida.....	62
7.2.7.	Cociente de pérdidas por consumo de potencia de sistemas de corriente continua	63
7.2.8.	Cálculo de la energía que se pierde en la resistencia de un sistema de energía eléctrica de corriente continua cuando la carga no es constante	65
7.2.9.	Medida del cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas de corriente continua.....	67
7.2.10.	Red de adecuación de señales para la medida del cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas de corriente continua	69
7.2.11.	Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas de corriente continua.....	71
7.2.11.1.	Panel frontal	72
7.2.11.2.	Diagrama de conexiones.....	75
7.2.11.2.1.	Estructura principal	76
7.2.11.2.2.	Fotograma 0.....	77
7.2.11.2.3.	Fotograma 1.....	81
7.2.11.2.4.	Fotograma 2.....	98
7.2.11.2.5.	Fotograma 3.....	101
7.2.12.	Sistemas complejos de corriente continua	106
7.3.	ENERGÍA QUE SE PIERDE EN LA RESISTENCIA DE LOS SISTEMAS MONOFÁSICOS POR CONSUMO DE POTENCIA	107
7.3.1.	Sistemas monofásicos	107
7.3.2.	Potencia de dipolos sinusoidales	108
7.3.2.1.	Potencias activas en sistemas monofásicos	109
7.3.3.	Influencia de la potencia activa del receptor en la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema monofásico	110
7.3.4.	Energía que se pierde en la resistencia de un sistema monofásico por consumo de potencia.....	112
7.3.5.	Cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas monofásicos	113
7.3.6.	Medida del cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas monofásicas	115
7.3.7.	Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas monofásicas	117

7.3.8. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas monofásicas.....	118
7.3.8.1. Panel frontal	118
7.3.8.2. Diagrama de conexiones.....	120
7.3.8.2.1. Estructura principal	121
7.3.8.2.2. Fotograma 0.....	121
7.3.8.2.3. Fotograma 1.....	122
7.3.8.2.4. Fotograma 2.....	129
7.3.8.2.5. Fotograma 3.....	130
7.3.9. Sistemas monofásicos complejos	132
7.4. ENERGÍA QUE SE PIERDE EN LA RESISTENCIA DE LOS SISTEMAS TRIFÁSICOS POR CONSUMO DE POTENCIA.....	133
7.4.1.1. Potencias activas en sistemas trifásicos	135
7.4.2. Influencia de la potencia activa del receptor en la potencia activa que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico.....	136
7.4.2.1. Influencia de la potencia activa del receptor en los rendimientos de un sistema trifásico	138
7.4.3. Incremento de la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico equilibrado por unidad de incremento de su carga	139
7.4.4. Disminución de los rendimientos por unidad de incremento de la carga de un sistema trifásico equilibrado.....	140
7.4.5. Potencia máxima que un sistema trifásico equilibrado puede entregar a un receptor	140
7.4.6. Energía que se pierde en un sistema trifásico equilibrado por consumo de potencia	141
7.4.7. Medida del cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas trifásicos	143
7.4.8. Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas trifásicas equilibradas.....	146
7.4.9. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas trifásicas equilibradas	147
7.4.9.1. Panel frontal	148
7.4.9.2. Diagrama de conexiones.....	149
7.4.9.2.1. Estructura principal	149
7.4.9.2.2. Fotograma 0.....	149
7.4.9.2.3. Fotograma 1.....	150
7.4.9.2.4. Fotograma 2.....	153
7.4.9.2.5. Fotograma 3.....	154
7.4.10. Sistemas trifásicos complejos	155
7.5. ENERGÍA TOTAL QUE SE PIERDE EN LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA ELÉCTRICO POR CONSUMO DE POTENCIA.....	155
7.6. RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR CONSUMO DE POTENCIA	157
8. ENERGÍA QUE SE PIERDE EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS SINUSOIDALES POR CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA.....	161
8.1. ENERGÍA QUE SE PIERDE EN LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA SINUSOIDAL POR CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA DE UN RECEPTOR MONOFÁSICO.....	162

8.1.1.	Potencia que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal por causa del factor de potencia de un receptor monofásico	162
8.1.2.	Disminución de la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico por cada unidad que se incrementa el factor de potencia del receptor monofásico	164
8.1.3.	Energía que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal por causa del factor de potencia de cargas monofásicas	166
8.1.4.	Cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas monofásicas	167
8.1.5.	Medida del cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas monofásicas	168
8.1.6.	Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas monofásicas	170
8.1.7.	Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas monofásicas	170
8.1.7.1.	Panel frontal.....	171
8.1.7.2.	Diagrama de conexiones.....	172
8.1.7.2.1.	Estructura principal	172
8.1.7.2.2.	Fotograma 0.....	173
8.1.7.2.3.	Fotograma 1.....	173
8.1.7.2.4.	Fotograma 2.....	174
8.1.7.2.5.	Fotograma 3.....	175
8.1.8.	Potencia que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal por causa de la potencia reactiva de un receptor monofásico	177
8.1.9.	Potencia que se pierde en la resistencia de un sistema monofásico por consumo de potencia activa y por consumo de potencia reactiva	181
8.1.10.	Aumento de la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema monofásico por cada unidad que aumenta el valor absoluto de la potencia reactiva del receptor	182
8.1.11.	Energía que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal por consumo de potencia reactiva de cargas monofásicas.....	183
8.2.	ENERGÍA QUE SE PIERDE EN UN SISTEMA TRIFÁSICO POR CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA	185
8.2.1.	Energía que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico equilibrado por causa del factor de potencia del receptor	186
8.2.2.	Medida del cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas trifásicas equilibradas	188
8.2.3.	Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas trifásicas equilibradas.....	190
8.2.3.1.	Panel frontal.....	190
8.2.3.2.	Diagrama de conexiones.....	191
8.2.3.2.1.	Estructura principal	191
8.2.3.2.2.	Fotograma 0.....	192
8.2.3.2.3.	Fotograma 1.....	192
8.2.3.2.4.	Fotograma 2.....	193
8.2.3.2.5.	Fotograma 3.....	194
8.2.4.	Energía que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico equilibrado por consumo de potencia reactiva de un receptor.....	195

8.3. POTENCIA Y ENERGÍA TOTALES QUE SE PIERDEN EN UN SISTEMA SINUSOIDAL POR CAUSA DE LAS POTENCIAS ACTIVA Y REACTIVA DE SUS RECEPTORES	199
8.4. FORMA ACTUAL DE MEDIR LA ENERGÍA QUE SE PIERDE EN LA RESISTENCIA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEBIDA A LA POTENCIA REACTIVA DE LOS RECEPTORES	200
8.5. ENERGÍA REACTIVA Y DESEQUILIBRIO DE RECEPTORES TRIFÁSICOS.....	205
8.5.1. Potencia y energía de receptores trifásicos	205
8.5.2. Forma actual de evaluar la energía que se pierde por causa de receptores trifásicos desequilibrados	206
8.6. COMPARACIÓN DEL PROCEDIMIENTO ACTUAL DE RECARGO POR CONSUMO DE ENERGÍA REACTIVA CON EL MÉTODO DEL COCIENTE DE PÉRDIDAS QUE AQUÍ SE PROPONE	208
8.7. RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA	210
9. ENERGÍA QUE SE PIERDE EN LA RESISTENCIA DEL SISTEMA ELÉCTRICO POR DESEQUILIBRIO DE LAS INTENSIDADES DE LOS RECEPTORES TRIFÁSICOS	213
9.1. INTRODUCCIÓN.....	213
9.2. EJEMPLO	214
9.3. DESEQUILIBRIO DE CARGAS TRIFÁSICAS COMO CAUSA DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA	216
9.3.1. Desequilibrio y factor de potencia de cargas trifásicas	216
9.4. CONDICIÓN DE MÍNIMA POTENCIA QUE SE PIERDE EN LA RESISTENCIA DEL SISTEMA ELÉCTRICO POR DESEQUILIBRIO DE UNA CARGA TRIFÁSICA DE CUATRO HILOS	218
9.5. CONDICIÓN DE MÍNIMA POTENCIA QUE SE PIERDE EN LA RESISTENCIA DEL SISTEMA ELÉCTRICO POR DESEQUILIBRIO DE UNA CARGA TRIFÁSICA DE TRES HILOS	222
9.6. COCIENTE DE PÉRDIDA DE ENERGÍA POR DESEQUILIBRIO DE UNA CARGA TRIFÁSICA	224
9.6.1. Medida del cociente de pérdidas por causa del desequilibrio de una carga trifásica	226
9.6.2. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por causa del desequilibrio de una carga trifásica	227
9.6.2.1. Panel frontal	228
9.6.2.2. Diagrama de conexiones.....	230
9.6.2.2.1. Estructura principal	231
9.6.2.2.2. Fotograma 0.....	231
9.6.2.2.3. Fotograma 1.....	232
9.6.2.2.4. Fotograma 2.....	239
9.6.2.2.5. Fotograma 3.....	240
9.7. RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR DESEQUILIBRIO DE LAS INTENSIDADES DE LOS RECEPTORES TRIFÁSICOS.....	243
10. ENERGÍA QUE SE PIERDE EN EL SISTEMA ELÉCTRICO POR DEFORMACIÓN DE LA ONDA DE INTENSIDAD DE LOS RECEPTORES	245
10.1. INCREMENTO DE LA ENERGÍA QUE SE PIERDE EN UN SISTEMA ELÉCTRICO SINUSOIDAL POR DEFORMACIÓN DE LA ONDA DE INTENSIDAD DE LOS RECEPTORES	246
10.1.1. Introducción	246
10.1.2. Intensidad rectificada de media onda	248
10.1.3. Síntesis del análisis de Fourier	252

10.1.4. Potencia que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico debida a la deformación de la onda de intensidad de un receptor monofásico.....	254
10.1.4.1. Incremento de potencia que se pierde por deformación de la onda de intensidad de un receptor monofásico	255
10.1.4.2. Cociente de pérdida de potencia por deformación de la onda de intensidad de un receptor monofásico	256
10.1.4.3. Aplicación a una intensidad rectificada de media onda	257
10.1.4.4. Cociente de pérdida de energía por deformación de la onda de intensidad de un receptor monofásico	258
10.1.4.5. Medida del cociente de pérdidas de energía por deformación de la onda de intensidad de cargas monofásicas.....	259
10.1.4.6. Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas de energía por deformación de la onda de intensidad de cargas monofásicas.....	260
10.1.4.7. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas de energía por deformación de la onda de intensidad de cargas monofásicas.....	260
10.1.4.7.1. Panel frontal	260
10.1.4.7.2. Diagrama de conexiones.....	262
10.1.4.7.2.1. Estructura principal.....	262
10.1.4.7.2.2. Fotograma 0.....	262
10.1.4.7.2.3. Fotograma 1	263
10.1.4.7.2.4. Fotograma 2.....	269
10.1.4.7.2.5. Fotograma 3	269
10.1.5. Potencia que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico debida a la deformación de la onda de intensidad de un receptor trifásico	272
10.1.5.1. Incremento de potencia que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico por deformación de las ondas de intensidad de un receptor trifásico	274
10.1.5.2. Cociente de pérdida de potencia de un receptor trifásico por deformación de las ondas de intensidad	276
10.1.5.3. Cociente de pérdida de energía por deformación de las ondas de intensidad de un receptor trifásico.....	276
10.1.5.4. Medida del cociente de pérdidas de energía por deformación de las ondas de intensidad de cargas trifásicas.....	277
10.1.5.5. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas de energía por deformación de las ondas de intensidad de cargas trifásicas	278
10.1.5.5.1. Panel frontal	278
10.1.5.5.2. Diagrama de conexiones.....	280
10.1.5.5.2.1. Estructura principal.....	280
10.1.5.5.2.2. Fotograma 0	280
10.1.5.5.2.3. Fotograma 1	281
10.1.5.5.2.4. Fotograma 2	285
10.1.5.5.2.5. Fotograma 3	285
10.2. PÉRDIDAS EN EL HIERRO	288
10.3. RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR DEFORMACIÓN DE LAS ONDAS DE LAS INTENSIDADES.....	289
11. COCIENTE GLOBAL DE PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDA A LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RECEPTORES TRIFÁSICOS.....	291
11.1. INTRODUCCIÓN.....	291
11.2. COCIENTE DE PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDA AL FACTOR DE POTENCIA Y AL DESEQUILIBRIO DE LAS INTENSIDADES DE RECEPTORES TRIFÁSICOS.....	291

11.2.1. Medida del cociente de pérdida de energía debido al factor de potencia y al desequilibrio de las intensidades de cargas trifásicas	294
11.3. COCIENTE DE PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDA A LA DEMANDA DE POTENCIA, AL FACTOR DE POTENCIA, Y AL DESEQUILIBRIO DE LAS INTENSIDADES DE RECEPTORES TRIFÁSICOS	295
11.3.1. Medida del cociente de pérdida de energía debido al factor de potencia, al desequilibrio, y al consumo de potencia de receptores trifásicos.....	298
11.4. COCIENTE DE PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDA AL FACTOR DE POTENCIA, AL DESEQUILIBRIO Y A LA DEFORMACIÓN DE LAS ONDAS DE LAS INTENSIDADES DE RECEPTORES TRIFÁSICOS	299
11.4.1. Medida del cociente de pérdida de energía debida al desequilibrio, al factor de potencia y a la deformación de las ondas de las intensidades de receptores trifásicos... 300	
11.5. COCIENTE GLOBAL DE PÉRDIDA DE ENERGÍA DE RECEPTORES TRIFÁSICOS	301
11.5.1. Medida del cociente global de pérdida de energía de receptores trifásicos	303
11.5.2. Programa de LabVIEW para obtener el cociente global de pérdida de energía de receptores trifásicos.....	304
11.5.2.1. Panel frontal	304
11.5.2.2. Diagrama de conexiones.....	306
11.5.2.2.1. Estructura principal	306
11.5.2.2.2. Fotograma 0.....	307
11.5.2.2.3. Fotograma 1.....	307
11.5.2.2.4. Fotograma 2.....	308
11.5.2.2.5. Fotograma 3.....	309
11.6. RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE RECEPTORES TRIFÁSICOS	312
12. COMPARACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA SEGÚN LAS CAUSAS QUE LAS ORIGINAN.....	317
12.1. INTRODUCCIÓN.....	317
12.2. COMPARACIÓN ENTRE LA ENERGÍA QUE SE PIERDE POR DESEQUILIBRIO DE LAS INTENSIDADES DE UN RECEPTOR TRIFÁSICO, CON LA QUE SE PIERDE POR SU CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA	317
12.3. COMPARACIÓN ENTRE LA ENERGÍA QUE SE PIERDE POR CONSUMO DE POTENCIA DE UN RECEPTOR TRIFÁSICO, CON LA QUE SE PIERDE POR SU CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA	321
12.4. COMPARACIÓN ENTRE LA ENERGÍA QUE SE PIERDE POR DEFORMACIÓN DE LAS ONDAS DE LAS INTENSIDADES DE UN RECEPTOR TRIFÁSICO, Y LA QUE SE PIERDE POR SU CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA	322
13. OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE RECEPTORES	323
13.1. INTRODUCCIÓN.....	323
13.2. MÍNIMA POTENCIA POSIBLE DE LOS RECEPTORES	323
13.3. UTILIZACIÓN DE RECEPTORES TRIFÁSICOS EN LUGAR DE RECEPTORES MONOFÁSICOS	324
13.4. EQUILIBRADO DE RECEPTORES TRIFÁSICOS.....	325
13.5. CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE RECEPTORES MONOFÁSICOS Y DE RECEPTORES TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS.....	327

13.6.	CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y EQUILIBRADO SIMULTÁNEOS DE RECEPTORES TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS.....	328
13.7.	FILTRADO DE LA INTENSIDAD DEL RECEPTOR	329
13.8.	CORRECCIONES AL INICIO DE LAS INSTALACIONES DE LOS CONSUMIDORES	330
14.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	333
15.	FUTURAS INVESTIGACIONES POSIBLES.....	337
15.1.	INTRODUCCIÓN.....	337
15.2.	INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS DE ADECUACIÓN DE SEÑALES QUE NO DEFORMEN LA ONDA DE INTENSIDAD.....	337
15.3.	DETERMINACIÓN DE LOS COCIENTES DE PÉRDIDAS DE RECEPTORES COMUNES Y RECOMENDACIONES CONSIGUIENTES QUE LOS MEJOREN	338
15.4.	DETERMINACIÓN DE LOS COCIENTES DE PÉRDIDAS DE ALGUNOS CONSUMIDORES DOMÉSTICOS E INDUSTRIALES.....	339
15.5.	MEDIDA DEL GRADO DE DESEQUILIBRIO DE LAS DIFERENTES PARTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO	339
15.6.	INVESTIGACIÓN SOBRE LA CONVENIENCIA O NO DE SUMINISTRO TRIFÁSICO A CIERTAS VIVIENDAS DE NUEVA CONSTRUCCIÓN, Y DE LA FABRICACIÓN DE ELECTRODOMÉSTICOS TRIFÁSICOS	340
15.7.	ORIGEN Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS CONCEPTOS DE POTENCIA REACTIVA Y ENERGÍA REACTIVA, Y DE LA MEDIDA DE LA ENERGÍA REACTIVA PARA EVALUAR LAS PÉRDIDA DE ENERGÍA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO ACHACABLE A LOS RECEPTORES.....	341
15.8.	FORMAS DE MEDIR PÉRDIDAS QUE APLICAN LAS COMPAÑÍAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE OTROS PAÍSES.....	342
15.9.	CONOCIMIENTO DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGÍA DE LOS PAÍSES PRÓXIMOS	342
15.10.	PROGRAMA DE ORDENADOR QUE PERMITA SIMULAR SISTEMAS ELÉCTRICOS PARA EVALUAR PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN ELLOS DEBIDAS A LA CONEXIÓN SIMULTÁNEA DE MUCHOS RECEPTORES	343
15.11.	SIMULACIONES DE APLICACIÓN DE TARIFAS ELÉCTRICAS QUE TRASLADEN AL CONSUMIDOR EL COSTE DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA QUE ORIGINAN SUS RECEPTORES, UTILIZANDO LOS COCIENTES PROPUESTOS.....	344
15.12.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PRÁCTICO DE MEDIDOR DE COCIENTES DE PÉRDIDA DE ENERGÍA PARA BAJA TENSIÓN	345
15.13.	INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE SUMINISTRO EN LOS COCIENTES DE PÉRDIDAS DEFINIDOS EN ESTA MEMORIA	345
16.	GLOSARIO	347
17.	REFERENCIAS	351

2. Introducción

La investigación que ha dado lugar a esta memoria no es un trabajo aislado, sino que forma parte de una línea seguida desde hace tiempo por miembros del Área de Conocimiento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca, a los cuales me uní hace algunos años, en concreto cuando me incorporé a ella como Ayudante de Escuela Universitaria.

El título general que podría darse a esa línea de investigación es “Estudio de las pérdidas de energía en la resistencia del sistema eléctrico por causa de los receptores”. Probablemente, la primera aproximación a ese tema por miembros del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca pueda situarse en 1998, cuando el director de esta tesis publica un artículo de título “Energía reactiva y disminución de las pérdidas en distribución de energía eléctrica” [1], en el que da cuenta de que el factor de potencia de los receptores trifásicos no es un buen indicador de pérdidas achacables a los receptores, más concretamente, no es una buena medida de la pérdida de potencia que esos receptores pueden ocasionar en la resistencia del sistema eléctrico.

Algún tiempo después se vuelve a hacer otra aproximación al tema de las pérdidas, pero ahora relacionándolas con el desequilibrio de los receptores trifásicos [2], que desemboca en un trabajo de Grado de Salamanca y una tesis doctoral sobre esa parte de él, es decir, sobre el desequilibrio como causa de esas pérdidas, y sobre los compensadores estáticos, que equilibran las intensidades de las fases y simultáneamente corrigen el factor de potencia de los receptores [3][4].

Mientras tanto, como consecuencia de estos trabajos, van surgiendo otras necesidades de conocimiento, en especial sobre captación de datos para medidas, representación de resultados en el ordenador y automatización de procesos en función de esas medidas. A ese tema yo me había acercado en mi proyecto de fin de carrera [5], pero era necesario un mayor dominio de la adecuación de señales para la captación de medidas por ordenador, con el fin de poder hacer frente a todas las necesidades que iban surgiendo. Ese mayor conocimiento se consiguió, en grado suficiente, con mi posterior trabajo de Grado de Salamanca, de título “*Captación y tratamiento de datos de instalaciones y máquinas eléctricas, y representación de resultados en tiempo real*” [6]. En él desarrollé un sistema general de adecuación de señales, solo por medio de redes de resistencias,

que no deforma las ondas de tensión que se llevan a la tarjeta de adquisición de datos, y es válido tanto para tensiones constantes como para tensiones variables. Por medio de estas redes de adecuación de señales, y con el programa LabVIEW, se ha podido realizar en el laboratorio cualquier medida de las que se han ido presentando, y es posible automatizar todos los procesos que han ido surgiendo hasta ahora, incluidos todos los procesos y todas las medidas que se describen en esta memoria.

Todos los estudios a que nos hemos referido, iban poniendo cada vez más de manifiesto, por una parte, la inadecuación de la medida del consumo de energía reactiva para la evaluación de las pérdidas de energía en el sistema eléctrico, que es el único procedimiento que realmente se utiliza en la actualidad para intentar trasladar el coste de esas pérdidas al consumidor. Por otra, que existen otras causas achacables a las características de los receptores que provocan pérdidas comparables a las relacionadas con la potencia reactiva, que no son, ni siquiera, tenidas en cuenta, y que, de tratar de corregirse, podrían disminuir considerablemente la energía que se pierde en el sistema eléctrico y aumentar la capacidad de suministro de las instalaciones.

La consecuencia lógica de lo anterior fue la propuesta de acometer un trabajo de investigación que tratara de identificar las causas de pérdida de energía debidas a los receptores, y de crear variables adecuadas para la correcta medida de esas pérdidas. Este trabajo de investigación es, precisamente, del que se ocupa esta tesis.

Su contenido lo forman dos partes bien diferenciadas: una es el estudio de las causas de pérdidas y la creación de variables para su medida y posible incorporación a las tarifas eléctricas, y la otra, la que se dedica a diseñar los procedimientos de medida de esas variables por medio de un equipo informático. El equipo informático consta esencialmente de redes de adecuación de señales, que hay que diseñar para cada medida, y también de una tarjeta de captación de datos y de un ordenador, en el que se crean, por medio de LabVIEW, los programas específicos para cada medida.

Sin embargo, se ha optado por no separar las dos partes, sino que, al final de cada capítulo que se dedique al estudio de una causa de pérdidas de energía, se incluye la forma de medir la variable de calidad y, en particular, se incluyen la descripción de la red de adecuación de señales que se diseña y el programa que se elabora para esa medida concreta. La razón de haber elegido esta disposición es la íntima relación que, como se verá, existe, entre las fórmulas que se deducen para relacionar las

variables a medir con las variables a captar directamente, las redes de adecuación de señales específicas para ellas, y los programas que hay que elaborar. Se trata realmente de una cadena en la que cada componente es consecuencia del anterior.

3. Objetivos

Como se ha dicho en la introducción, el objetivo general de la investigación que ha dado lugar a esta memoria, ha sido estudiar las pérdidas en el sistema eléctrico que se deben a características de los receptores. Para realizar este estudio se han establecido los siguientes objetivos parciales:

1) Identificar las pérdidas de energía más importantes que se producen en el sistema eléctrico por causa de las características de los receptores.

2) Encontrar expresiones matemáticas que relacionen la energía que se pierde en el sistema eléctrico, con las variables que cuantifican las características de los receptores que son causa de esa pérdida de energía.

3) Encontrar relaciones matemáticas por medio de las cuales esa energía que se pierde pueda ser expresada en función de variables eléctricas fácilmente medibles.

4) Crear, para cada causa de pérdida de energía, una variable de calidad para cada receptor o para cada consumidor, indicativa de la influencia de las características de ese receptor o de la instalación de cada consumidor, en la energía que se pierde en el sistema eléctrico, y que puedan ser aplicadas a las tarifas eléctricas.

5) Crear variables de calidad que agrupen diferentes causas simultáneas de pérdidas de energía; crear también una variable global de calidad, indicativa de la influencia de todas las causas de pérdidas consideradas, de forma que puedan ser aplicadas a las tarifas eléctricas.

6) Comparar la energía que se pierde por las diferentes causas que se consideren, con objeto de tratar de determinar su importancia.

7) Encontrar expresiones matemáticas de las variables de calidad, en función de variables eléctricas que se puedan medir fácilmente con un equipo informático adecuado.

8) Las variables de calidad definidas se han de poder medir por medio de una tarjeta de captación de datos y de un ordenador. Para ello se han de diseñar redes de resistencias que adecúen las variables eléctricas necesarias hasta valores que puedan ser medidos con la tarjeta de captación de datos.

9) Han de crearse los programas de LabVIEW que permitan obtener, a partir de las señales de la tarjeta de adquisición de datos, cada una de las variables de calidad definidas para cada causa de pérdida de energía, y también la variable de calidad global.

10) Han de poder comprobarse los resultados por medio de simulaciones con LabVIEW.

11) A la vista de los resultados obtenidos, han de proponerse y justificarse soluciones para disminuir las pérdidas de energía por las causas consideradas.

Creo que todos estos objetivos han sido logrados suficientemente con el trabajo de que se da cuenta en esta memoria.

4. Forma actual de evaluar la energía que se pierde en el sistema eléctrico por causa de las características de los receptores

4.1. Introducción

Este capítulo trata de describir el estado actual del tema que se estudia en esta memoria. En particular se mostrarán los métodos que emplean las compañías distribuidoras de energía eléctrica para evaluar la energía que se pierde en el sistema eléctrico por causas achacables a los receptores, y las formas de trasladar el coste de esas pérdidas a los consumidores para incentivar su disminución. Nos centraremos en lo que se hace en España, que, aunque con variantes, es lo que se hace, en general, en otros países. También se mostrarán las soluciones que actualmente están al alcance de los consumidores para corregir las características de sus receptores que sean causas de esas pérdidas de energía.

4.2. Medida de la energía reactiva consumida durante el periodo de facturación

Aunque algunos requisitos que las compañías eléctricas exigen a los consumidores contribuyen de manera indirecta a incentivar el ahorro de energía en el sistema eléctrico español, realmente, la única forma por la que se pretende trasladar al consumidor el coste de la energía que se pierde en el sistema eléctrico por causa de sus receptores, es la medida de la energía reactiva que absorben esos receptores durante el periodo de facturación.

Hasta el 1 de enero de 2006 se mantuvo en vigor el llamado “complemento por energía reactiva”, que se fijaba en la forma en que se había establecido en 1995 [7]. Era un recargo o descuento porcentual que se aplicaba sobre la totalidad de la facturación básica a todos los consumidores abonados a cualquier tarifa excepto a la 1.0 y a la 2.0, que eran las tarifas de la mayor parte de las viviendas de España. Por tanto la

práctica totalidad del consumo doméstico de energía eléctrica quedaba excluida, de hecho, de este complemento, aunque se podía aplicar a los abonados de la tarifa 2.0 si se cumplían ciertas circunstancias.

Además del contador de energía activa, se exigía instalar un contador de energía reactiva a los consumidores a los que se les aplicara este complemento. Con las indicaciones de ambos contadores se definía el llamado “factor de potencia o $\cos\varphi$ medio de una instalación” de abonado por la fórmula

$$\cos\varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} \quad (4.1)$$

W_a es la energía activa absorbida por la instalación del consumidor durante el periodo de facturación, y W_r la energía reactiva absorbida durante el mismo periodo. Es decir, W_a es la indicación del contador de energía activa al final del periodo de facturación, y W_r la indicación del contador de energía reactiva en ese mismo periodo. El valor máximo de $\cos\varphi$ así hallado resulta ser la unidad. Ese factor de potencia se sustituía en la fórmula

$$K_r(\%) = \frac{17}{\cos^2\varphi} - 21 \quad (4.2)$$

que daba el porcentaje que se aplicaba a la cantidad que resultaba de la facturación básica. Como al sustituir en (4.2) valores del factor de potencia mayores que 0.90, $K_r(\%)$ sale negativo, ese resultado debía interpretarse como bonificación. En concreto, la mayor bonificación se alcanza para $\cos\varphi = 1$, que es del 4%. Así mismo se ponía un límite máximo para el recargo, que era el 47%, valor que se alcanzaba cuando el factor de potencia obtenido de (4.1) era 0.50. Si ese factor de potencia resultaba igual o menor que 0.55 en tres o más mediciones, se podía obligar al usuario a corregirlo.

Nótese la confusión que ese procedimiento introduce sobre el concepto de factor de potencia, confusión que permanece en la actualidad. En efecto, una definición tradicional y comúnmente aceptada de factor de potencia o $\cos\varphi$ es el número por el que hay que multiplicar la potencia aparente S de un receptor sinusoidal para obtener la potencia activa P que absorbe: $P = S\cos\varphi$. Para un receptor monofásico, $S = VI$, por lo que $P = VI\cos\varphi$. Precisamente, la razón del nombre ‘factor de potencia’ es que

$\cos\varphi$ aparece como *factor* del producto que da la potencia activa de un receptor sinusoidal. Pero, además, ese factor coincide con el coseno del argumento φ de la potencia compleja $\underline{S} = \underline{S}/\varphi = P + jQ$, que es otra definición equivalente de factor de potencia de un receptor sinusoidal: el coseno del argumento de la potencia compleja que absorbe ese receptor [8].

Sin embargo, el coseno proporcionado por la fórmula (4.1) no es el coseno del argumento de ninguna potencia compleja, sino el coseno del argumento de la energía compleja que ha absorbido la instalación del consumidor de que se trate, durante el periodo de facturación. En efecto, esta energía compleja es $\underline{W} = W_a + jW_r = \int_0^{t_r} P dt + j \int_0^{t_r} Q dt = \underline{W}/\varphi_W$, donde Q es la potencia reactiva que absorbe el receptor. El coseno de su argumento es $\cos\varphi_W = W_a/W = W_a/\sqrt{W_a^2 + W_r^2}$, o sea, el dado por (4.1).

Pero la confusión es aún mayor por haber llamado a ese factor de potencia, además, “ $\cos\varphi$ medio”, pues no pocas veces esa expresión se interpreta en el sentido de que es el valor medio de los factores de potencia de los receptores del consumidor que se han conectado al sistema eléctrico durante el periodo de facturación, cosa que no es cierta.

Además del procedimiento general para determinar el complemento por energía reactiva que empleaba las fórmulas (4.1) y (4.2), las compañías suministradoras de energía eléctrica y sus abonados en alta tensión podían establecer, de común acuerdo, otras formas para fijar el complemento por energía reactiva, aunque siempre con la conformidad de la Dirección General de Energía.

Con diversas variantes que podían ser introducidas cada año, esta fue la forma de fijar el complemento por energía reactiva que permaneció hasta 2006. Pero a partir de primero de enero de ese año, se modificó la forma de fijar el complemento por energía reactiva [9][10], aunque permaneció lo esencial del método, y también la terminología empleada. En concreto, la fórmula (4.2) se sustituyó por la función real definida a trozos siguiente:

$$\begin{aligned} K_r(\%) &= \frac{37.026}{\cos^2 \varphi} - 41.026 & \text{si } 0.95 < \cos \varphi \leq 1 \\ K_r(\%) &= 0 & \text{si } 0.90 \leq \cos \varphi \leq 0.95 \\ K_r(\%) &= \frac{29.16}{\cos^2 \varphi} - 36 & \text{si } \cos \varphi < 0.90 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Los resultados de esta nueva fórmula¹ dan también como descuento máximo el 4%, que se obtiene para $\cos\varphi = 1$. Pero el Real Decreto [9] eleva el recargo máximo al 50.7%, que es el que se alcanza cuando $\cos\varphi = 0.58$. En conjunto, el resultado de la modificación consiste en gravar más al consumidor de energía reactiva. En la Figura 1 se han dibujado las curvas de comparación de los porcentajes de recargo y bonificación con los dos métodos, el de 1995 y el de 2006 [10].

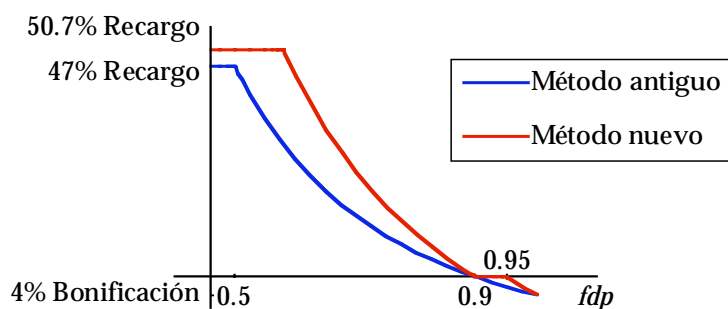


Figura 1.- Curvas de complemento para energía reactiva según el método de 1995 y el de 2006.

Además, se habla en el preámbulo del Real Decreto de fijar “los precios de ... energía activa y reactiva”. Esta práctica de facturar la energía reactiva a tanto el kVArh, como se hace con la energía activa, y el lenguaje que la acompaña, se ha ido imponiendo progresivamente a partir principalmente de los reales decretos de tarifas eléctricas posteriores a la Ley del Sector Eléctrico [11][12]. De forma que se da a entender que la energía reactiva es un producto más de consumo y que, por tanto, debe pagar más el que más consuma, en vez de un método para tratar de medir la energía que se pierde en el sistema eléctrico por determinadas características de los receptores, que debería conducir, por tanto, a que pague más el que más pérdidas origine, que no es, como se verá, el que más energía reactiva consume. Es decir, parece que la tendencia es

¹ Realmente, la fórmula que aparece en el Real Decreto está mal, pues los límites para cada trozo de la definición que allí aparecen son

$$1 \leq \cos\varphi < 0.95$$

$$0.95 \leq \cos\varphi \leq 0.90$$

$$\cos\varphi \leq 0.90$$

Pero el recuadro de resultados que sigue a la fórmula en el texto del Real Decreto está de acuerdo con las (4.3), que son, además, fórmulas posibles.

considerar, cada vez más, que mayor consumo de energía reactiva necesariamente produce mayores pérdidas.

4.3. Ejemplos de inadecuación del método del complemento por energía reactiva para evaluar la pérdida de energía debida a los receptores

Los fines del complemento por energía reactiva que se aplica en la factura de la energía eléctrica deberían ser, por una parte, trasladar al consumidor el coste de la pérdida de energía que sus receptores provocan en el sistema eléctrico y, por otra, animar al consumidor a mejorar las características de sus receptores para disminuir esa pérdida de energía. Una cualidad imprescindible de cualquier procedimiento que trate de cumplir el primer objetivo, es que debe pagar más el que más pérdida de energía provoque para la misma energía absorbida, y no al revés.

En [1][13][14] se muestran ejemplos de receptores trifásicos en los que eso no es así. Incluso se ponen ejemplos en los que se ve que la corrección del factor de potencia de receptores trifásicos no siempre disminuye la energía que se pierde en el sistema eléctrico, sino que, frecuentemente, la aumenta. Como el aumento del factor de potencia siempre disminuye la potencia reactiva y, por tanto, la energía reactiva que absorbe el receptor, resulta que el método del complemento por energía reactiva falla en su base para receptores trifásicos, pues, por él, hay casos en que se aplica mayor recargo al consumidor que produce menor pérdida de energía.

Suele creerse que, si bien el método del complemento por energía reactiva no es óptimo para receptores trifásicos, por causa principalmente del desequilibrio, sí lo es para receptores monofásicos [1][15]. Aunque en esta tesis se mostrará de forma inequívoca que el método de utilizar la energía reactiva que absorbe un receptor no puede ser nunca un método adecuado para medir las pérdidas de energía que origina ningún receptor, ni monofásico ni trifásico, se adelanta aquí esa afirmación, justificada con un sencillo ejemplo de receptores monofásicos.

Supónganse dos receptores monofásicos, uno de 1000 W y factor de potencia unidad, y otro de 250 W y factor de potencia 0.80. Cada uno es receptor único de dos abonado diferentes. Durante el periodo de facturación está conectado el primero un tiempo t , de forma que absorbe

la energía $W_1 = 1000t$. El segundo está conectado al sistema eléctrico durante un tiempo igual a $4t$, de forma que absorbe $250 \times 4t = 1000t$, la misma energía que el primero. Por tanto, si no hubiera recargos, ambos abonados pagarían lo mismo. Si se aplica un recargo por la pérdida de energía que hubieran provocado, debería gravar más al que más pérdida de energía haya originado. Eso es lo que pretende el complemento por energía reactiva. Apliquémoslo a los dos. Como el primero no absorbe energía reactiva, tendrá una bonificación del 4%. Como solo hay un receptor, el factor de potencia que se obtiene para el segundo con la fórmula (4.1) coincide con el factor de potencia del receptor, es decir $\cos \varphi = 0.80$. Para ese factor de potencia ha de utilizarse la tercera fórmula de (4.3), que da un recargo de 9.6%.

Veamos ahora cuál de los dos receptores ha originado mayor pérdida de energía. El valor eficaz de la intensidad del primero es $I_1 = 1000/V$, y la del segundo es $I_2 = 250/(V \times 0.8)$. V es el valor eficaz de la tensión, la misma para los dos. La potencia que hace perder cada uno es $P_{p1} = RI_1^2 = R1000^2/V^2$, y $P_{p2} = RI_2^2 = R250^2/(V^2 \times 0.8^2)$ respectivamente. R es la resistencia del sistema eléctrico. Como el primero está conectado el tiempo t , ha originado una pérdida de energía durante el periodo de facturación $W_{p1} = RI_1^2 t = R1000^2 t/V^2$, y el segundo, como ha estado conectado el tiempo $4t$, se ha perdido por su causa la energía $W_{p2} = 4RI_2^2 t = 4R250^2 t/(V^2 \times 0.8^2)$. La relación entre ambas es

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{R1000^2 t/V^2}{4R250^2 t/(V^2 \times 0.8^2)} = \frac{1000^2 \times 0.8^2}{4 \times 250^2} = 2.56$$

Es decir, el primer receptor, el de factor de potencia unidad, ha originado más de dos veces y media la pérdida de energía que ha originado el segundo, de factor de potencia 0.8.

El resultado es, pues, el siguiente: en un periodo de facturación, a dos abonados se les ha suministrado la misma energía. Para hacerlo, uno ha hecho perder más del doble de energía que el otro. Pero, a ese, al que ha hecho perder más energía, se le premia con un descuento de 4%, y al segundo, al que ha originado menos de la mitad de pérdida de energía se le castiga con un recargo del 9.6%.

4.4. Críticas al método de energía reactiva

Desde hace algunos años se han venido produciendo diversas críticas a los métodos de los complementos por energía reactiva que se vienen aplicando para la medida de las pérdidas que originan los receptores, pero no en el sentido del ejemplo que se ha expuesto arriba, sino que estas críticas han surgido principalmente asociadas a las deformaciones de las ondas de intensidad, respecto a la senoide, que provocan actualmente muchos receptores. Como consecuencia del análisis de los efectos que pueden originar los armónicos de esas intensidades [16][17], se ha dirigido la atención a las pérdidas relacionadas con ellos, y se ha visto que, también desde ese punto de vista, la medida de la energía reactiva para determinarlas es un método inadecuado [15]. Sin embargo, el camino que se ha emprendido, y el que parece haber atraído la atención de muchos autores, ha sido el de adaptar conceptos [18][19] para que sirvan también para esos casos, o de buscar nuevas definiciones y conceptos [20] para los mismos nombres que hasta ahora estaban bien instalados en la teoría de las redes sinusoidales. El procedimiento y los resultados a los que conduce, parecen considerablemente artificiales, principalmente porque parecen salirse del ámbito de la teoría general de redes eléctricas, para convertirse en una solución práctica para un caso concreto [20].

4.5. Desequilibrios de cargas trifásicas

La conclusión más clara a la que nuestro grupo ha venido llegando en relación al tema de las pérdidas de energía, es que conviene un análisis de todas sus causas, con identificación muy precisa de cada una de ellas. Una de estas causas es el desequilibrio de las intensidades de las cargas trifásicas [2], que también ha sido atendido por numerosos autores, pero, de nuevo, muchas veces, bajo la perspectiva de las intensidades deformadas respecto a la senoide [21], y del diseño de filtros para eliminar armónicos de esas intensidades [22]-[33]. No obstante, esta aproximación inicial ha dado lugar a que se preste atención al tema desde otros puntos de vista [34]-[38], que han desembocado en la reconsideración de los clásicos compensadores estáticos de potencia reactiva, de la que se ha puesto de manifiesto su utilidad, también, como equilibradores de cargas trifásicas [39]-[42]. A este tema nuestro grupo ha hecho algunas aportaciones [4][43][44], que, en este momento, permiten afirmar que también las pérdidas por desequilibrio de las cargas pueden ser evitadas, con soluciones de facilidad técnica comparable a la de la corrección del factor de potencia.

Pero todo esto es solo trabajo de investigación. Por el momento, únicamente la energía reactiva o el factor de potencia, son los indicadores que se emplean para evaluar las pérdidas de energía en el sistema eléctrico que originan los receptores, y para trasladar a ellos su coste.

5. Los sistemas eléctricos de energía

5.1. Introducción

Los actuales sistemas eléctricos de energía son la evolución de un inmenso conjunto de esfuerzos, inicialmente aislados, que, progresivamente, fueron coordinándose para constituir las enormes redes eléctricas actuales que sirven para que la Humanidad, cada grupo, cada individuo, disponga de energía en la cantidad que precise y en el lugar adecuado, para desarrollar cómodamente múltiples funciones. Si no existieran los sistemas eléctricos, algunos quehaceres y acciones de los hombres, aunque pudieran realizarse, serían más difíciles de hacer. En este grupo se encuentran, por ejemplo, muchas tareas domésticas y comunicaciones. También podría existir actividad nocturna, la que se debe a la iluminación, que podría conseguirse por otros medios, aunque no tan cómodos y eficaces como con la luz eléctrica. Pero otros muchos logros están tan relacionados con la previa existencia de suministro seguro, continuado y estable de energía eléctrica, que, con toda certeza no hubieran sido posibles sin la existencia de los sistemas eléctricos. Entre ellos, por ejemplo, la radio, la televisión, la utilización masiva de ordenadores, PDAs (agendas electrónicas programables), teléfonos móviles, posicionamiento global, Internet, y otros muchos, cuya dependencia de la energía eléctrica, y no de otra, es total.

Los sistemas eléctricos actuales no son los únicos posibles. Son el resultado de una evolución en la que aparecieron otras soluciones, algunas abandonadas. Se dedicarán, a continuación, unas páginas a esquematizar esa evolución desde el origen, para comprender el resultado final.

5.2. Primeras líneas de transporte y distribución de energía eléctrica

La primera aplicación industrial de la corriente eléctrica fue, como es sabido, el suministro de energía a lámparas. Se les entregaba energía, que ellas empleaban en parte para producir luz. Fue Edison [45], como también es conocido, el que acometió sistemáticamente la aplicación a gran escala de la corriente eléctrica para iluminar exteriores e interiores. El 4 de septiembre de 1882 inauguró la primera central eléctrica comercial

del mundo, que había construido en Pearl Street, en Manhattan, Nueva York, con la que iluminó la calle por medio de lámparas eléctricas [46]. Fue la primera vez que se iluminaba una calle de ese modo. Y, de forma parecida, siguieron muchas más de Nueva York, de otras ciudades de Estados Unidos y del resto del mundo, además de locales y viviendas.

5.3. Transporte de energía por medio de corriente continua “en paralelo”

También fue la primera vez que se pudo hablar de líneas eléctricas, pues la energía se transportaba hasta las lámparas por medio de líneas eléctricas de corriente continua: de una dínamo, que es un generador de corriente continua, situada en la casa de máquinas o central, se derivaban en paralelo líneas de corriente continua de 110 V de tensión entre los dos hilos [46]. Edison eligió ese valor de tensión, simplemente porque le pareció el más adecuado. A lo largo de cada línea se iban conectando entre los dos hilos, también en paralelo, las lámparas a alimentar.

Este tipo de suministro de energía a los receptores, que en este caso son las lámparas, se llamó distribución “a tensión constante” [8][47], muy impropriadamente, como veremos. Se escogió este nombre porque, al estar los receptores conectados en paralelo, y a pesar de la pequeña caída de tensión a lo largo de la línea cuando hay intensidad por ella, la tensión de todos ellos es casi la misma y coincide aproximadamente con la tensión V_d de la dínamo y de la línea (Figura 2).



Figura 2.- Alimentación de lámparas de corriente continua “a tensión constante”.

Aunque la forma de la onda de tensión ha cambiado, este es el procedimiento que se sigue empleando en los actuales sistemas eléctricos: a tensión constante.

El transporte y la distribución de energía eléctrica a tensión constante requieren que la tensión nominal de todos los receptores sea la misma y también igual que la del generador, que es la tensión que el generador mantiene entre sus terminales cuando funciona normalmente. La intensidad I de la línea es la suma de las intensidades de los receptores.

La expresión “sistemas a tensión constante”, con el significado que se le da en este párrafo, ha caído en desuso en la actualidad. Tampoco es una expresión apropiada, pues no se refiere a que la onda de tensión sea constante, es decir independiente del tiempo, sino a que todos los receptores están conectados a la misma tensión por estar conectados en paralelo. Como se ve, esta última expresión, *en paralelo*, expresa la verdadera característica de esta forma de transporte y distribución, por lo que estos sistemas deberían llamarse, sistemas de transporte o distribución *en paralelo*, o simplemente, *sistemas eléctricos en paralelo*.

En esta forma de transporte y distribución, los generadores han de funcionar, como se ha dicho, de manera que mantengan su tensión en el valor previamente fijado: 110 V en el caso de la primitiva línea de Edison, o algo más para compensar la caída de tensión a que da lugar la resistencia de la línea en los receptores más alejados del generador. Es decir, el generador ha de funcionar tratando de mantener la tensión de los receptores lo más próxima posible a su tensión nominal, con independencia de que la carga varíe, como de hecho ocurre normalmente².

Una cualidad de la distribución a tensión constante es que, como las averías habituales de los receptores interrumpen la intensidad por ellos, una avería de este tipo en uno no afecta al funcionamiento de los otros. Por la misma razón, tampoco la desconexión de uno o varios afecta al resto si el generador mantiene la tensión en su valor nominal. Sin embargo, la intensidad de la corriente que circula por el generador y la potencia que suministra disminuyen a medida que se desconectan receptores, y aumentan en caso contrario.

Por otro lado, si la avería de un receptor provoca su cortocircuito, los demás receptores sí se ven afectados. Un cortocircuito en uno de ellos o en la línea disminuye o anula la tensión que se aplica al resto y, por consiguiente, disminuye también la potencia que absorben. El resultado para las lámparas, por ejemplo, es que la luz que emiten se anula cuando un receptor que está en paralelo con ellas se pone en cortocircuito.

² Conviene aclarar que, en terminología eléctrica, el nombre “carga” se utiliza para designar la potencia que suministra en cada momento una parte de una red a otra a la que está conectada por dos o más terminales [8][48]. Por ejemplo, la carga de un generador es la potencia que el generador suministra al resto de la red que está conectado a él. La carga de una línea es la potencia que la línea suministra a los receptores que están conectados a ella. No obstante, no pocas veces se llama también “carga” de un generador [49], de una línea [50], etc. [51], al conjunto de los receptores conectados al generador, a la línea, etc.

Además, la intensidad por la línea y por el generador suele resultar excesiva y puede provocar calentamientos de alguna de sus partes, llegando incluso hasta su fusión, con la consiguiente avería.

El inconveniente de la fuerte intensidad de cortocircuito se resolvió con facilidad, inicialmente, con los fusibles, que son partes de conductor preparadas expresamente para fundirse por el calor que se genera en ellos por efecto Joule cuando el valor de su intensidad es demasiado alto; interrumpen así el circuito y, por tanto, la intensidad. De esta forma se impide que se dañen otras partes más caras o más difíciles de reemplazar.

En la actualidad las protecciones contra los efectos de los cortocircuitos y, en general, de los incrementos excesivos de intensidad, siguen consistiendo en fusibles, además de interruptores automáticos. Estos interrumpen también el circuito, y por tanto, la corriente, cuando la intensidad alcanza un valor considerado peligroso.

5.4. Transporte de energía por medio de corriente continua “en serie”

La forma de transportar energía eléctrica que puede considerarse dual del transporte a tensión constante, o en paralelo, es “a intensidad constante” [47]. Ahora el nombre tampoco se refiere a que la forma de la onda de la intensidad de la corriente sea una recta paralela al eje del tiempo, sino a que la intensidad es la misma en todos los receptores, y coincide con la que circula por el generador y la línea. La razón es que los receptores se conectan en serie entre ellos, y con el generador, por medio de los hilos de la línea (Figura 3). Por eso, un nombre más apropiado para este sistema sería sistema de transporte o de distribución *en serie* [8]

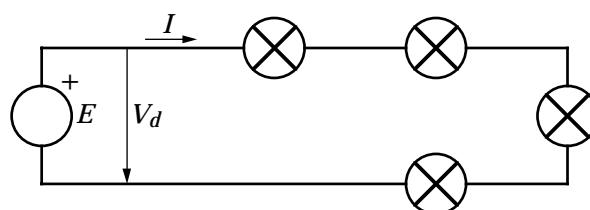


Figura 3.- Alimentación de lámparas de corriente continua “a intensidad constante”.

Resulta que, en esta forma de distribución, las intensidades nominales de los receptores deben coincidir entre ellas, con la del generador y con la intensidad de la línea, porque, en cualquier situación de funcionamiento, la intensidad de la corriente por cada uno de ellos es la

misma que la del resto, la intensidad es única en todo el circuito. Por eso, en este caso, el generador ha de controlarse de manera que su intensidad permanezca en ese valor nominal, es decir, de manera que funcione de la forma más próxima posible a una fuente de intensidad. Para ello necesita variar continuamente su tensión a medida que se intercalan más o menos receptores, pues la tensión del generador es la suma de las tensiones de los receptores y de las caídas de tensión en la línea. Por tanto, la tensión del generador y la potencia que entrega aumentan cuando aumenta el número de receptores conectados, y disminuyen cuando éstos disminuyen.

Un inconveniente práctico importante de la distribución a intensidad constante o en serie es que las averías de los receptores que provoquen interrupción del circuito en él, que son las averías más frecuentes, originan también la interrupción de la corriente en el resto de los receptores y, por consiguiente, la interrupción del funcionamiento de todos ellos. Lo mismo ocurre con la desconexión de uno de ellos si no se cortocircuita previamente.

Por el contrario, una avería en un receptor que origine un cortocircuito no afecta al funcionamiento del resto, siempre que el generador mantenga la intensidad en su valor nominal.

Otra característica de este procedimiento es que las secciones de los hilos de la línea son más pequeñas en comparación con la distribución a tensión constante, ya que la intensidad que circula por toda la línea es la misma que la de uno cualquiera de los receptores. La tensión del generador es la suma de las tensiones de los receptores.

5.4.1. Sistemas eléctricos en paralelo

La elección de Edison del sistema de transporte y distribución a tensión constante o en paralelo es la que ha perdurado de manera general. Con independencia de la forma de la onda de la fuerza electromotriz a que den lugar los generadores, prácticamente todos los sistemas eléctricos de potencia del mundo son *sistemas en paralelo*.

Las características que los hacen preferibles a los *sistemas en serie* son varias. Pero una muy importante es la posibilidad de conectar y desconectar receptores y generadores sin afectar al funcionamiento del resto, siempre que los generadores puedan mantener la tensión, lo que se ha conseguido con relativa facilidad en todos los casos.

Que la conexión de alternadores en serie no sea estable, y la conexión en paralelo sí lo sea dentro de límites suficientes, es otra importante razón

para que el sistema en paralelo sea el que perdure en los actuales sistemas sinusoidales.

Solo en algunas escasas aplicaciones muy concretas se utilizan los sistemas eléctricos en serie, por lo que el estudio del que se ocupa esta memoria no se referirá a ese tipo de transporte y distribución de energía eléctrica, sino, exclusivamente, al sistema de distribución en paralelo.

5.4.2. Transporte de energía eléctrica por medio de corriente continua

El gran inconveniente del transporte de energía eléctrica por medio de sistemas de corriente continua en paralelo es que la tensión del generador debe coincidir con la tensión de los receptores (Figura 2), ya que no hay forma fácil de aumentar o disminuir la tensión. Esta limitación es fuente de inconvenientes mucho mayores de lo que a primera vista pudiera parecer, pues la tensión de los receptores no puede ser demasiado alta, ya que los usuarios deben actuar sobre ellos en uso normal, y tensiones superiores a unos pocos cientos de voltios empiezan a ser peligrosas para las personas, incluso con medidas de protección. Mucho más peligrosas son las tensiones de algunos miles de voltios.

Pero la limitación por seguridad de la tensión de los receptores impone la misma limitación de la tensión del generador y de toda la línea. Eso lleva a que, para transportar potencias altas por medio de líneas de corriente continua, por tanto con baja tensión, se produzcan valores de potencias perdidas en la resistencia del sistema eléctrico muy altas, lo que no ocurriría si se pudiera elevar la tensión del sistema. Estas pérdidas fueron las que impidieron en el inicio del empleo de la corriente eléctrica, que fue corriente continua, transportar grandes potencia a grandes distancias. De hecho, la fuente de energía, las centrales, debían estar muy próximas a los receptores para que este transporte fuera económicamente posible. Esta fue la razón de que las principales fuentes de energía primaria para obtener energía eléctrica fueran inicialmente los combustibles, como el carbón [52]. En concreto, en los inicios, y hasta que en los años finales del siglo XIX y principios del siglo XX no se comenzó a utilizar la corriente alterna de forma habitual, el número de centrales térmicas superaba ampliamente al de centrales hidroeléctricas, porque las centrales térmicas se pueden situar cerca de los receptores, mientras que las hidroeléctricas deben situarse en el salto hidráulico. Por ejemplo, para suministrar energía eléctrica a la que entonces se llamaba Escuela Superior de Industrias de Béjar, la actual Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Industrial, se adquirió, todavía en 1903, un generador movido por una máquina de vapor [53]. Estas eran las soluciones habituales para tener energía eléctrica antes de finales del siglo XIX. Sólo cuando las ciudades o las fábricas, o sea, los receptores, estaban cerca de los saltos hidráulicos o se instalaban cerca de ellos, era posible su utilización para obtener energía eléctrica [52].

5.5. Corriente alterna

Tesla, que inicialmente trabajó con Edison, desarrolló el transformador, llamado al principio *bobina de Tesla*. Westinghouse utilizó el transformador en una instalación comercial en 1893 para iluminar la Chicago World's Columbian Exposition, celebrada para conmemorar el cuarto centenario del descubrimiento de América por Cristóbal Colón [54]. El sistema eléctrico que empleó para esa instalación constaba de dos partes: una alimentada por un generador de corriente alterna, y la otra de una dinamo [55]. Pero, con este doble sistema, al final se pusieron de manifiesto las ventajas de la corriente alterna, que se extendió de inmediato por todo el mundo y ha sido el sistema que ha perdurado.

5.6. Líneas de corriente alterna

La razón de preferir la corriente alterna fue, y es, que con la bobina de Tesla, con el transformador, se puede elevar la tensión para el transporte de energía, y rebajarla para su consumo, de manera fácil. Sin embargo eso no es posible con corriente continua. De ahí que, con enorme celeridad, se impusiera la corriente alterna en todo el sistema eléctrico: en generación, en las líneas de transporte y en la utilización de la energía eléctrica.

Aunque lo esencial para el funcionamiento del transformador es que la intensidad sea una función del tiempo no constante, la forma de la onda que mejor se adapta al funcionamiento del transformador es la función sinusoidal del tiempo [56][57]. De hecho, a partir del comienzo de la utilización de la corriente alterna para transportar energía hasta los receptores por medio de la inserción de transformadores, los generadores de corriente alterna, que comenzaron a llamarse *alternadores* [58] fueron perfeccionándose progresivamente para conseguir que su fuerza electromotriz se aproximara lo más posible a una función sinusoidal del tiempo. Esto hacía que, para la gran mayoría de los receptores de entonces, la intensidad de régimen permanente también fuera sinusoidal.

5.7. De los sistemas monofásicos a los trifásicos

En síntesis, un sistema monofásico consta de uno o varios generadores de corriente alterna conectados en paralelo, y una línea de dos hilos que parten de sus dos terminales, a los que se conectan también en paralelo los receptores.

Pero, casi de inmediato, surgieron combinaciones con el objetivo de ahorrar conductor, también en las líneas de corriente alterna, como ya había ocurrido en corriente continua con la distribución de tres hilos. Así surgió el sistema bifásico, que reproducía casi exactamente el sistema de tres hilos de corriente continua.

Aunque inicialmente se utilizaron en algunos casos estos sistemas bifásicos para el transporte de energía eléctrica, muy pronto comenzaron a emplearse los sistemas trifásicos, que consisten en el empleo simultáneo de tres sistemas monofásicos conectados en estrella o en triángulo. De esta forma se logra un notable ahorro de hilo y, por tanto, de cobre o aluminio, en las líneas de transporte y distribución de energía eléctrica, si se compara con el que se debe emplear para transportar la misma potencia por medio de tres líneas monofásicas independientes.

Los sistemas trifásicos son los que, casi exclusivamente, se utilizan hoy para la generación³ y el transporte de energía eléctrica, y constituyen

³ Puede parecer que los generadores fotovoltaicos que se conectan a los sistemas de energía eléctrica quedan fuera de esta afirmación, pues cada placa de células fotovoltaicas es, en funcionamiento normal, un generador de intensidad constante, es decir, un generador de corriente continua. Pero, en realidad, los generadores fotovoltaicos que se conectan a los sistemas eléctricos trifásicos se combinan entre sí y con los inversores que se intercalan, de forma que funcionen, en conjunto, de manera parecida a como funcionan los generadores trifásicos [59].

Nótese, en otro orden de cosas, que la expresión “generador de corriente continua”, utilizada en el párrafo anterior de esta nota, está aplicada a las placas de células fotovoltaicas con mayor propiedad que la usual para este término. En efecto, la expresión “generador de *corriente* continua” se emplea habitualmente, con impropiedad notable, para designar generadores de fuerza electromotriz constante, es decir, generadores de fuerza electromotriz independiente del tiempo, sin tener en cuenta que por estos generadores pueden circular corrientes cuya onda de intensidad puede tener cualquier forma, incluidas corrientes alternas. Sin embargo, la intensidad de la corriente que circula por las placas de células fotovoltaicas en funcionamiento normal sí es independiente del tiempo, es constante, es *corriente continua*, y sí pueden ser llamadas, por tanto, con propiedad, *generadores de corriente continua*.

por eso la mayor parte de cualquier sistema eléctrico en cualquier parte del mundo. Para la distribución se combinan sistemas trifásicos con sistemas monofásicos.

6. Tarjeta de adquisición de datos y redes de adecuación de señales

6.1. Introducción

A partir del capítulo siguiente se incluirán frecuentes referencias a las redes de adecuación de señales, necesarias para medir diversas variables eléctricas por medio de ordenador. Se dedica por eso este capítulo a hacer un breve resumen de su función, para facilitar el entendimiento de los procedimientos de medida que se citan en los capítulos siguientes.

6.2. Tarjeta PCI 6071E de captación de datos

Antes de crear cualquier red de adecuación de señales es necesario conocer algunos datos importantes sobre la tarjeta que se empleará para captar esas señales. En este trabajo se ha empleado una tarjeta de *National Instruments*, modelo PCI 6071E.



Figura 4.- Tarjeta PCI 6071E de *National Instruments* con la que se realizará la medida de las señales eléctricas.

6.2.1. Características relevantes

Este tipo de tarjetas solo captan los valores de tensión que se le apliquen a los bornes de sus canales. Eso significa que, para realizar la medida de una intensidad, por ejemplo, es necesario convertirla previamente en una medida de tensión proporcional a la intensidad, luego

realizar la medida de esa tensión y, por último, usando un programa de LabVIEW adecuado [65]⁴, obtener de ella el valor original de la intensidad [66][67].

Como las tarjetas de *National Instruments* solo admiten valores de tensión de entre 0 y 10 V por cada canal (ó 0 y -10 V; nunca entre -10 y 10 V por canal), si se necesita medir tensiones superiores a esos valores es necesario reducirlas previamente, realizar la medida y, después, volver a los valores originales mediante un programa de LabVIEW [66][67].

Este es el esquema general de toda medida, que hay que completar con el cumplimiento de otras restricciones que imponen las características de las tarjetas, como el valor limitado de tensión que admiten entre cualquier canal y la masa de la tarjeta, la precisión que son capaces de conseguir en las medidas, etc. [66][67].

Por estos motivos es necesario diseñar las que se llamarán *redes de adecuación de señales*, que se intercalan entre la red donde se quiere realizar la medida y la tarjeta de captación de datos. La red de adecuación de señales es específica para cada medida o conjunto de medidas [68][69].

Existen al menos tres formas básicas diferentes de crear redes de adecuación de señales: empleando transformadores de tensión e intensidad y resistencias, empleando transductores de señal, y mediante una red formada solo por resistencias [6]. En este trabajo se ha optado por redes enteramente resistivas, para poder tener la seguridad de que la señal que mide la tarjeta de captación de datos es proporcional a la señal original, sin ningún tipo de desfase o distorsión causado por transformadores o transductores. Dicho en otras palabras, se busca que las ondas de tensión que lleguen a la tarjeta no estén deformadas respecto a las originales. Además, solo las redes resistivas funcionan correctamente con ondas de tensión constante.

Con una red resistiva, el único método para reducir las tensiones que se desean medir a valores adecuados para la tarjeta es mediante el uso de divisores de tensión [6], como el de la Figura 5, donde la tensión que se quiere medir es v_e . La fórmula

⁴ LabVIEW es un entorno de programación, creado por National Instruments, orientado a objetos. Está diseñado especialmente para utilizar y controlar las tarjetas de captación y emisión de datos de esta compañía, aunque después se amplió para poder usar otras.

$$v_s = \frac{v_e}{R_1 + R_2} R_2$$

permite determinar los valores de las resistencias del divisor de tensión necesarias para que, cuando v_e alcance su valor máximo previsto, el valor máximo de la tensión que llega a la tarjeta, v_s , no supere su valor máximo admitido, de +10 V.

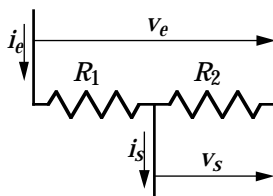


Figura 5.- Esquema de un divisor de tensión.

Realmente, el valor que capta la tarjeta es v_s , pero de él se puede volver a obtener v_e con el programa adecuado de LabVIEW, que es el valor que se quería medir.

Si lo que se desea es medir la intensidad que circula por un conductor, hay que intercalar en él una resistencia de valor conocido, R . Como en una resistencia $i = v/R$, bastará medir la tensión en bornes de la resistencia, empleando ahora ya el procedimiento descrito arriba, y dividir en el programa el valor captado entre la constante R . El resultado es la intensidad que circula por la resistencia y, por tanto, por el hilo.

Esta es, en esencia, la filosofía de las redes de adecuación de señales: además de limitar las tensiones que se apliquen a los terminales de la tarjeta a los valores que ella admite, la red ha de establecer las relaciones matemáticas que permitan poner la variable que se quiere medir en función solo de tensiones que se apliquen a la tarjeta. El programa informático que se elabore debe poder deshacer esos cambios de variables.

6.2.2. Parámetros de la tarjeta

Las tarjetas de *National Instruments*, empleadas conjuntamente con el programa informático LabVIEW y los drivers que se incluyen para ellas, permiten escoger varios parámetros que tendrán en cuenta a la hora de realizar la captación de datos.

La elección de esos valores se debe hacer siempre en función de la señal que se quiere medir y determinará el tipo de red de

acondicionamiento de señal que se debe construir. Por ese motivo hay que prestar especial atención a los valores que se escojan desde el principio, porque, si bien la mayoría de esos parámetros se seleccionan por software, y, por lo tanto, se pueden modificar en cualquier momento, la red de acondicionamiento de señal varía de unos parámetros a otros, de forma que una red que funciona perfectamente con una elección de parámetros, puede llegar a dañar la tarjeta con otros diferentes.

6.2.2.1. Tensión máxima

El primer parámetro es la tensión máxima, $V_{m\ ref}$, que se espera que llegue a los canales de la tarjeta, una vez adecuada la señal. Esta tensión debe escogerse entre los valores que admite la tarjeta de captación de datos. Para la tarjeta PCI 6071E estos valores vienen indicados en la Tabla 1, creada a partir de los datos proporcionados por *National Instruments*. Son los valores máximos de tensión de la columna *rango de entrada*.

Rango de entrada (seleccionable por software)	Ganancia	Precisión
0 a +10 V	1	2.44 mV
0 a +5 V	2	1.22 mV
0 a +2 V	5	488 mV
0 a +1 V	10	244 mV
0 a +500 mV	20	122 mV
0 a +200 mV	50	48.8 mV
0 a +100 mV	100	24.4 mV

Tabla 1.- Rangos de la entrada de señal por cada canal, para señales unipolares, según los datos proporcionados por National Instruments [66][67].

En función del rango de entrada que se escoja, la tarjeta multiplicará la señal que mida por el valor de la ganancia correspondiente. Como se puede ver, esto hará que el convertidor analógico-digital esté midiendo siempre el rango máximo de 0 a +10 V.

Pero, además, se aprecia que la precisión de la medida no se ve afectada: para la mitad de rango de tensiones la precisión se duplica, para un décimo del rango la precisión aumenta diez veces, etc. Eso significa que, en relación con la precisión de la medida, dará igual adecuar la señal para un máximo de 10 V ($V_{m\ ref} = 10\text{ V}$) o para 100 mV ($V_{m\ ref} = 100\text{ mV}$). Es decir, suponiendo que el máximo de tensión que vaya a tener la señal

que queremos medir, antes de adecuarla, sea de 220 V, y si tomamos $V_{m\ ref} = 10\ V$, la tarjeta podrá detectar variaciones de

$$\frac{220}{10} 2.44 \times 10^{-3} = 53.68 \times 10^{-3}\ V = 53.68\ mV$$

mientras que si escogemos $V_{m\ ref} = 100\ mV$, la precisión de la medida es

$$\frac{220}{100 \times 10^{-3}} 24.4 \times 10^{-6} = 53.68 \times 10^{-3}\ V = 53.68\ mV$$

que sigue siendo igual. Es decir, independientemente del valor $V_{m\ ref}$ que se escoja, la variación mínima que puede detectar la tarjeta es siempre la misma; solo depende del valor máximo de la tensión que se vaya a medir (para 220 V la variación mínima que detecta es de 53.68 mV).

Por lo general, como ocurre con cualquier aparato de medida, se debe escoger el valor de $V_{m\ ref}$ de forma que sea siempre superior al valor máximo de la señal que se desea medir, y cuando esa señal sea superior al máximo permitido por el aparato (en este caso +10 V), entonces se debe seleccionar su valor máximo, $V_{m\ ref} = 10\ V$, y reducir la señal de alguna forma para que nunca sobrepase ese valor (en seguida se verá cómo).

6.2.2.2. Polaridad

El segundo parámetro es lo que *National Instruments* ha llamado la *polaridad* de cada canal. Un canal puede ser *unipolar* y medir valores entre 0 y $+V_{m\ ref}$, o ser *bipolar* y medir entre $-V_{m\ ref}$ y $+V_{m\ ref}$ pero sin duplicar la precisión de la medida unipolar [67].

En el caso concreto de la tarjeta PCI 6071E, una medida unipolar entre 0 y +10 V tendría una precisión de 2.44 mV (Tabla 1); es decir, si la tensión aumenta o disminuye 2.44 mV la tarjeta detecta que ha habido un cambio en la tensión, pero si la variación es inferior a 2.44 mV la tarjeta no la detecta. Por otro lado, una medida bipolar entre -5 V y +5 V tiene la misma precisión, con la diferencia de que ahora, un mismo canal puede medir tensiones negativas y positivas.

En medida bipolar existe también la opción de medir entre -10 V y +10 V, aunque ahora la precisión es de 4.88 mV; o sea, aunque se duplica el rango de las tensiones que se pueden medir, la precisión de esas medidas se reduce a la mitad.

En este trabajo se ha optado por usar la medida unipolar.

6.2.2.3. Configuración de los terminales de la entrada analógica

La *configuración de los terminales de la entrada analógica* permite realizar tres tipos diferentes de medidas: medida simple no referenciada, medida simple referenciada y medida diferencial. Aunque este es uno de los parámetros que se pueden cambiar en cualquier momento desde el driver de la tarjeta (se maneja con un panel de control), es muy importante que la elección que se haya hecho en el driver esté de acuerdo con la conexión realizada en los terminales de la tarjeta, puesto que no hacerlo así puede llevar a medidas erróneas o, incluso, la avería de la tarjeta de captación de datos.

Básicamente, atendiendo solo a lo que interesa en este trabajo, el tipo de medida simple, tanto referenciada como no referenciada, emplea un canal para realizar cada medida.

Sin embargo, la medida diferencial emplea dos canales. Este tipo de medida se suele utilizar para reducir el ruido de la señal captada, principalmente, ya que el ruido de un canal suele cancelar al del otro [67]. Además, como en este tipo de medida el valor de la tensión captada por la tarjeta es el resultado de la diferencia de tensión entre los dos canales (de ahí el nombre de medida diferencial), el rango de tensión que se puede medir ahora es de -10 a +10 V, aunque la precisión pasa a ser de 4.88 mV [67]⁵. Sin embargo, el inconveniente de escoger la medida diferencial es que, de los 64 canales que posee la tarjeta PCI 6071E para realizar medidas de señales analógicas externas [66], solo se podrán realizar 32 medidas diferentes, pues es necesario usar dos canales por cada medida.

En este trabajo esto no es un problema, pues las medidas que se realizan simultáneamente no son más de seis, así que se ha optado por la medida diferencial para conseguir mayor exactitud.

⁵ La precisión depende de cuántos valores se quieren medir con la tarjeta, dentro de un rango: si la tarjeta está diseñada para que 1 bit corresponda a 1 μ V, y tiene una precisión de 8 bits, podrá medir hasta 8 μ V; si ahora se quiere que mida hasta 16 μ V, como la tarjeta solo tiene 8 bits, eso significa que ahora cada bit corresponderá a 2 μ V. De ahí que al pasar de un rango de -5/+5 V a otro de -10/+10 V la precisión se reduzca a la mitad [70]

Una vez escogido este tipo de medida, la forma de realizar las conexiones de los canales a la red de adecuación de señales también queda fijada: como ahora se necesitan dos canales para cada medida, esos dos canales no pueden ser cualesquiera, sino los que fija la tarjeta.

A la hora de llamar a un canal, y aunque en la medida diferencial se emplean dos para realizar una medida, el programa LabVIEW los verá como uno solo identificado por el número del canal apropiado (por ejemplo, en la PCI 6071E, en medida diferencial, al pedir el canal 0 la tarjeta usará a la vez los canales 0 y 8).

6.2.3. Valores escogidos

Resumiendo, la tarjeta de captación de datos se configurará de la siguiente forma:

- medida unipolar
- rango de 0 a +10 V por canal
- todos los canales con medida diferencial

Lo que dará como resultado un rango de medida de -10 a +10 V con una precisión de 4.88 mV por canal y con reducción de ruido.

Además, la red de adecuación de señal estará formada íntegramente por divisores de tensión y resistencias intercaladas en los hilos donde se quiere medir la intensidad.

7. Energía que se pierde en la resistencia de los sistemas eléctricos por consumo de potencia de los receptores

7.1. Introducción

El objetivo final de todo sistema eléctrico es entregar energía eléctrica a los receptores que se conectan a él. Esta función no se puede realizar sin perder una cantidad de energía en la resistencia del propio sistema. Resulta que la cuantía de esa energía que se pierde depende de características de los receptores y del modo de extraerla. En particular de la rapidez o lentitud de la extracción, es decir, de las potencias de los receptores que la extraigan. Este capítulo se dedica a estudiar la energía que se pierde por este motivo en los sistemas de corriente continua, en los monofásicos y en los trifásicos. Se llamará *energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por consumo de potencia*. Deduciremos las condiciones para que esta energía que se pierde sea mínima, y encontraremos una variable de comparación entre la pérdida de energía que origina un receptor o un consumidor por este motivo, y la mínima que podría originar. El valor de esta variable será un indicador de calidad de los receptores, o de la calidad del consumo de los abonados en cuanto a las pérdidas de energía a que dan lugar por esta causa. Se idearán procedimientos para la medida de esta variable de calidad.

Como se ha dicho, junto a los sistemas monofásicos y trifásicos, en este apartado se estudiarán también los de corriente continua de dos hilos, pues en ellos la pérdida de energía se produce casi exclusivamente por lo que se ha llamado consumo de potencia. Esto es así porque en esos sistemas no existen pérdidas de energía por consumo de potencia reactiva o por desequilibrio, ya que dichos conceptos carecen de sentido en corriente continua.

También pueden existir pérdidas de energía en los sistemas de corriente continua por deformación de la onda de intensidad a causa de que, en ocasiones, esta intensidad puede no ser constante. Pero, en general, estas pérdidas son escasas, por lo que será en este apartado, que

se ocupa de las pérdidas por consumo de potencia, en el único en el que se tratarán los sistemas de corriente continua.

7.2. Energía que se pierde en la resistencia de los sistemas de corriente continua por consumo de potencia

Las redes eléctricas en las que las fuerzas electromotrices de los generadores son constantes, es decir, independientes del tiempo, se llaman por tradición *redes de corriente continua*.

Como ya se ha dicho, “corriente continua” designa a toda corriente cuya intensidad es constante, por lo que “redes de corriente continua” es un término inapropiado, pues nada garantiza que la intensidad de la corriente de las ramas de estos sistemas se mantenga constante, a pesar de que sí lo sean las fuerzas electromotrices de los generadores de la red⁶. Por eso, una denominación más apropiada sería *redes de tensión constante*, porque las fuerzas electromotrices de los generadores, que son constantes, como se ha dicho, sí aseguran que, muy aproximadamente, las tensiones entre pares de nudos de la red se mantengan constantes en alto grado, pero no que lo hagan las intensidades⁷.

⁶ Un ejemplo de intensidad no constante aunque la tensión sí lo sea son los motores eléctricos de corriente continua alimentados a través de los controladores por regulación de ancho de pulso (PWM, Pulse Width Modulated). Aunque la tensión de la línea es constante, continua, la corriente por el motor y por la línea que lo alimenta está constituida por pulsos más o menos rectangulares de intensidad.

⁷ La misma impropiedad se produce, por ejemplo, cuando se llama a un generador cuya fuerza electromotriz es constante, tal como una batería, *generador de corriente continua*. La falta de corrección deriva de que la intensidad de la corriente que circula por un generador cuya fuerza electromotriz es constante no es necesariamente constante, ya que esa corriente depende también del resto de la red a la que el generador de fuerza electromotriz constante esté conectado. Por eso, no es la intensidad la que caracteriza al generador, sino su fuerza electromotriz, que sí es constante. Más apropiado sería llamarlo *generador de fuerza electromotriz constante*.

Pero la confusión del término “corriente continua” no termina aquí. Muchos objetos de dos terminales que mantienen una tensión entre ellos que es función del tiempo, se llaman dispositivos de corriente continua. Es el caso de los rectificadores. Un rectificador de media onda, por ejemplo, no siempre mantiene entre sus terminales una tensión constante ni, en general, la intensidad por él es constante; pero, en la terminología eléctrica común, es un dispositivo de corriente continua. De forma similar para el resto de rectificadores. Las placas fotovoltaicas son también dispositivos de corriente continua en

La utilización de redes eléctricas de corriente continua como sistemas de energía eléctrica dio lugar a la expresión *sistemas eléctricos de corriente continua*. En la actualidad, no se emplean sistemas de corriente continua para el suministro general de energía eléctrica. Se limitan a fines concretos. Pero fueron los primeros sistemas de potencia que se utilizaron. Por eso se inicia este estudio por ellos, aunque también debido a su empleo actual, que, a pesar de ser parcial, no es escaso⁸. Además, las conclusiones que se obtendrán serán una buena base sobre la que apoyar el estudio de los sistemas sinusoidales, que son los sistemas eléctricos utilizados actualmente en todo el mundo como sistemas de generación, transporte y distribución de energía eléctrica.

7.2.1. Potencias en un sistema eléctrico de corriente continua

Supondremos que el receptor de la Figura 6 es un receptor de corriente continua alimentado por un sistema eléctrico de corriente continua en paralelo. *Receptores de corriente continua son los receptores cuya intensidad de régimen permanente es constante si su tensión lo es* [61]. Por tanto, como E es constante, también I lo es. Estas condiciones las cumplían las primeras líneas de alumbrado de Edison, porque la mayor parte de los receptores eran lámparas de incandescencia, que son receptores de corriente continua en el sentido aquí indicado. Un circuito como ese será

el lenguaje eléctrico habitual. En su régimen conveniente de funcionamiento mantienen constante la intensidad de la corriente eléctrica por ellas, por lo que el nombre sí parece apropiado, pero su tensión puede variar, y de hecho varía por exigencia de muchas instalaciones de las que forman parte.

⁸ Algunas aplicaciones de sistemas de corriente continua para grandes potencias son de notable importancia. El empleo de líneas de corriente continua para ferrocarriles es una de ellas. Antes de que la aplicación del motor de inducción a la tracción ferroviaria fuera posible, pongamos antes de los años ochenta del siglo XX, prácticamente todos los ferrocarriles electrificados del mundo fueron construidos con líneas de corriente continua, y funcionan en la actualidad de esa forma. En España todos los construidos antes que la línea del AVE (Alta Velocidad Española) de Madrid a Sevilla, inaugurada en 1992, son ferrocarriles de corriente continua [60][57]. La tensión entre el hilo de contacto y el carril es de 3 kV en las líneas de eléctricas de corriente continua de ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias), que es la empresa que administra las líneas de la antigua RENFE. Las líneas similares de SNF (Société Nationale de Chemins de fer Français) en Francia son de 1500 V. También las líneas de metro son de corriente continua, aunque la tensión suele ser menor. Valores típicos son 600, 750 y también 1500 V.

llamado *sistema eléctrico de corriente continua en paralelo*. De forma más general, *una red de corriente continua es una red eléctrica en la que las tensiones de régimen permanente de los pares de sus nudos y las intensidades de régimen permanente de sus ramas son constantes*, independientes del tiempo [62].

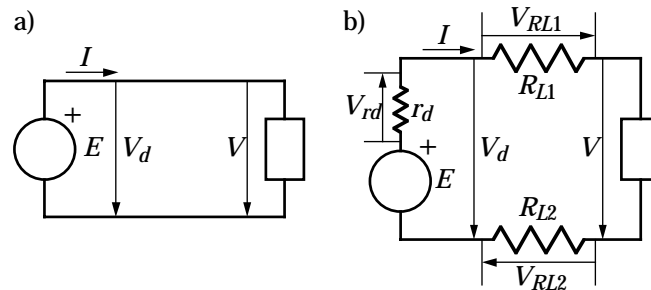


Figura 6.- a) Una línea tiene por fin llevar energía eléctrica del generador al receptor. b) Descripción de una línea eléctrica por medio de un circuito eléctrico.

Un sistema eléctrico de corriente continua queda suficientemente bien descrito para su estudio energético por el circuito que se muestra en la Figura 6 b): la *dinamo*⁹, el generador, se describe por medio de una fuente de tensión de valor su fuerza electromotriz, E , en serie con una resistencia, r_d , que es su resistencia interna; y los hilos de la línea por sus resistencias R_{L1} y R_{L2} .

La potencia eléctrica que la *dinamo* de fuerza electromotriz E produce es $P_d = EI$ (Figura 6). El receptor recibe una potencia que vale $P = VI$.

Según el teorema de Tellegen [56], en el circuito de la Figura 6 b) se tiene:

$$-EI + V_{rd}I + V_{RL1}I + VI + V_{RL2}I = 0 \quad (7.1)$$

$P_d = EI$ es la *potencia eléctrica que produce la dinamo*.

$P_{pd} = V_{rd}I = r_d I^2$ es la *potencia que absorbe la resistencia interna de la dinamo*.

⁹ Continuaremos hablando de *dinamos* para seguir con las primitivas líneas de Edison, pero, realmente, lo que sigue es válido para sistemas de corriente continua con cualquier tipo de generadores de fuerza electromotriz constante, como baterías, por ejemplo.

$P_{pL1} = V_{RL1}I = R_{L1}I^2$ es la *potencia que absorbe la resistencia del hilo 1 de la línea*.

$P = VI$ es la *potencia que absorbe el receptor*.

$P_{pL2} = V_{RL2}I = R_{L2}I^2$ es la *potencia que absorbe la resistencia del hilo 2 de la línea*.

Las potencias P_{pd} , P_{pL1} , y P_{pL2} no son útiles, por eso se dice de ellas que son *potencias que se pierden en las resistencias del sistema eléctrico*. P_{pd} se llama entonces *potencia que se pierde en la resistencia interna de la dinamo*, y P_{pL1} y P_{pL2} se llaman, respectivamente, *potencias que se pierden en las resistencias de cada hilo de la línea*. Se llama *resistencia de la línea* a $R_L = R_{L1} + R_{L2}$. De forma que $P_{pL} = P_{pL1} + P_{pL2} = (R_{L1} + R_{L2})I^2 = R_L I^2$ se llama *potencia que se pierde en la resistencia de la línea*.

$R_s = r_d + R_L$ se llama *resistencia del sistema eléctrico*, que es la suma de la resistencia interna del generador y de la resistencia de la línea, que es la resistencia de sus dos hilos. Y

$$P_p = P_{pd} + P_{pL} = (r_d + R_L)I^2 = R_s I^2 \quad (7.2)$$

se llama *potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico*.

Con esta notación, la (7.1) queda:

$$P_d = P_{pd} + P_{pL} + P = P_p + P \quad (7.3)$$

O sea, con la descripción de la Figura 6, la potencia eléctrica que produce el generador es igual a la que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico, más la que se entrega al receptor.

7.2.1.1. Potencia máxima de un generador y de una línea de corriente continua

La potencia que la dinamo suministra (según la Figura 6 b) es

$$P_d = EI$$

La potencia que absorbe la resistencia interna de la dinamo es

$$P_{pd} = r_d I^2$$

La energía que la resistencia de la dinamo absorbe debida a esa potencia aumenta la temperatura del generador, que, de no limitarse, puede dañar e incluso fundir sus componentes. Por eso, en una dinamo, como, en general, en cualquier generador, ha de fijarse un valor máximo de la intensidad que se permite circular por ella. Eso equivale a limitar el valor máximo de la potencia que puede suministrar a una tensión dada y, en concreto, a la tensión nominal. Así, en la práctica, entre las características de una dinamo no suele citarse el valor máximo de la intensidad que puede circular por ella, aunque es el verdadero límite, sino el mayor valor de la potencia eléctrica que puede suministrar a la tensión nominal, que se llama, simplemente, potencia máxima de la dinamo o, incluso, potencia de la dinamo¹⁰.

De la misma forma, la potencia $P_{pL} = R_L I^2$ que se pierde en la resistencia de la línea puede elevar su temperatura, por lo que también ha de limitarse su valor en la línea. Sin embargo, de nuevo este límite no se fija directamente, sino que se da la potencia máxima que la línea puede transportar a su tensión nominal, V , y que es la potencia máxima del receptor o del conjunto de receptores que se pueden conectar a ella. Como $P = VI$, si se conoce el valor máximo de P y la tensión nominal de la línea, V , se obtiene el valor máximo de I .

7.2.2. Rendimientos en un sistema de corriente continua

Como se ha dicho, el objetivo del sistema eléctrico de corriente continua es transportar la mayor parte de la energía eléctrica que genera la dinamo al receptor. Por tanto conviene disminuir al máximo la potencia que se pierde.

¹⁰ Aunque no es imprescindible para lo que sigue, no viene mal recordar aquí que conviene tener cuidado con el verdadero alcance que se debe dar al concepto de potencia máxima de un generador. La potencia máxima que puede suministrar una dinamo o cualquier otro generador no es una característica independiente de la tensión, sino complementaria del valor de su tensión nominal. Con tensión menor que la nominal, la potencia máxima es menor. Es decir, si a la tensión V la potencia máxima que puede entregar el generador es P , a la tensión V' la potencia máxima es P' ; como la intensidad en ambos casos ha de ser la misma, la intensidad máxima, de valor $I_m = P/V = P'/V'$, si $V' < V$, entonces ha de ser $P' < P$.

Se llama *rendimiento del generador* a la potencia eléctrica que entrega el generador a la línea, dividida por la potencia eléctrica que produce [56]. Como la potencia eléctrica que entrega el generador es la suma de la que absorbe la resistencia de la línea y la que absorbe el receptor, si se utiliza (7.3) se obtiene para el rendimiento del generador

$$\eta_d = \frac{P + P_{pL}}{P_d} = \frac{P_d - P_{pd}}{P_d} = 1 - \frac{P_{pd}}{P_d} \quad (7.4)$$

Se llama *rendimiento de la línea* al cociente entre la potencia que la línea entrega al receptor y la potencia que la dinamo entrega a la línea

$$\eta_L = \frac{P}{P + P_{pL}} = \frac{P + P_{pL} - P_{pL}}{P + P_{pL}} = 1 - \frac{P_{pL}}{P + P_{pL}} \quad (7.5)$$

Por último, se llama *rendimiento del sistema eléctrico* a la relación entre la potencia eléctrica que se entrega al receptor y la potencia eléctrica que genera la dinamo. Si se utiliza (7.3), se obtiene

$$\eta_s = \frac{P}{P_d} = \frac{P_d - P_p}{P_d} = 1 - \frac{P_p}{P_d} \quad (7.6)$$

Como se ve, el rendimiento del sistema aumenta si se disminuye la potencia P_p que se pierde en él.

Si se multiplican (7.4) por (7.5), se tiene

$$\eta_d \eta_L = \frac{P + P_{pL}}{P_d} \frac{P}{P + P_{pL}} = \frac{P}{P_d} = \eta_s \quad (7.7)$$

El rendimiento de un sistema eléctrico de corriente continua es el producto de los rendimientos de la dinamo y de la línea.

7.2.3. Influencia de la potencia del receptor en la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico de corriente continua

Si la dinamo y la línea de un sistema eléctrico de corriente continua se mantienen fijos, es decir, si la fuerza electromotriz permanece y también las resistencias de la dinamo y de la línea, pero pueden conectarse distintos receptores, son entonces los receptores que se conectan a la línea los que determinan la intensidad por ella. Como, según (7.2), la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico es proporcional al

cuadrado de esa intensidad, resulta que la potencia que se pierde en un mismo sistema eléctrico de corriente continua es distinta según el receptor conectado a él. A continuación se tratará de encontrar esta dependencia.

Un receptor de corriente continua se caracteriza por su tensión nominal, V , a la que ha de conectarse, y por la potencia P que absorbe cuando está conectado a esa tensión. Así, la intensidad del receptor y la intensidad de la línea que lo alimenta a su tensión nominal es

$$I = \frac{P}{V}$$

por lo que la potencia que se pierde en el sistema eléctrico cuando solo ese receptor está conectado entre dos terminales dados es

$$P_p = R_s I^2 = \frac{R_s P^2}{V^2} \quad (7.8)$$

$V = E - R_s I$ (Figura 6). Las líneas se construyeron y se construyen de forma que el producto $R_s I$ sea muy pequeño frente a E , por lo que V depende muy poco de I y, por tanto, del receptor. Por consiguiente, en (7.8), a lo sumo P_p varía cuando se cambia el receptor o varía la potencia que absorbe, lo que significa que *el valor de la potencia que se pierde en un sistema eléctrico de corriente continua de dos hilos solo depende del valor de la potencia que se entrega al receptor, y es proporcional al cuadrado de esa potencia.*

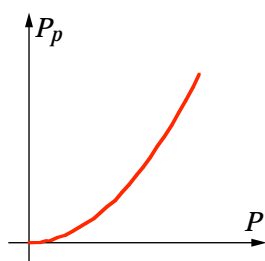


Figura 7.- Potencia que se pierde en un sistema eléctrico de corriente continua en función de la potencia que se suministra al receptor.

Se insiste en que aquí la expresión “el mismo sistema eléctrico” significa que, tanto la resistencia del sistema eléctrico, R_s , como la tensión del receptor, V , que se llamará también *tensión del sistema eléctrico*, permanecen constantes, con independencia de la potencia que se entregue al receptor.

Si se modificara el sistema eléctrico en el sentido de variar su tensión, según (7.8) la potencia que se pierde en el sistema eléctrico varía en

proporción inversa al cuadrado de esa tensión. En concreto, si se aumenta la tensión del sistema, disminuye la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico, para la misma potencia del receptor.

7.2.3.1. Influencia de la potencia del receptor en los rendimientos del sistema eléctrico de corriente continua

Aquí se introducen las relaciones anteriores en las fórmulas de los rendimientos de la dinamo, de la línea y del sistema eléctrico, para ver cómo varían con la potencia que se entrega al receptor.

El rendimiento de la dinamo es

$$\eta_d = 1 - \frac{P_{pd}}{P_d} = 1 - \frac{r_d I^2}{EI} = 1 - \frac{r_d I}{E} = 1 - \frac{r_d \frac{P}{V}}{E} = 1 - \frac{r_d P}{EV} \approx 1 - r_d \frac{P}{V^2}$$

Se ha utilizado el hecho, ya comentado, de que $E \approx V$.

El rendimiento de la línea es

$$\eta_L = 1 - \frac{P_{pL}}{P + P_{pL}} = 1 - \frac{R_L I^2}{VI + R_L I^2} = 1 - \frac{R_L I}{V + R_L I} = 1 - \frac{R_L \frac{P}{V}}{V + R_L \frac{P}{V}} \approx 1 - R_L \frac{P}{V^2}$$

Se ha considerado, como también ya se dijo, que la caída de tensión en la línea $R_L I = R_L \frac{P}{V}$ es despreciable frente V para los balances energéticos. Por eso el denominador del penúltimo miembro vale aproximadamente V .

El rendimiento del sistema eléctrico es

$$\eta_s = 1 - \frac{P_p}{P_d} = 1 - \frac{R_s I^2}{EI} = 1 - R_s \frac{I}{E} = 1 - R_s \frac{\frac{P}{V}}{E} \approx 1 - R_s \frac{P}{V^2} \quad (7.9)$$

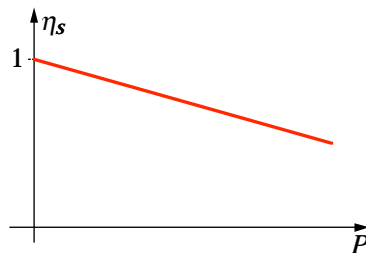


Figura 8.- Rendimiento de un sistema eléctrico de corriente continua en función de la potencia del receptor.

Se concluye que *todos los rendimientos disminuyen si aumenta la potencia P del receptor* (Figura 8). La disminución es lineal a partir de la unidad, que es el valor a que tiende el rendimiento cuando la potencia P de la carga tiende a cero. El valor absoluto de la pendiente de la recta de disminución del rendimiento del sistema es R_s/V^2 , proporcional a la resistencia del sistema eléctrico e inversamente proporcional al cuadrado de la tensión V . De la misma forma ocurre para el resto de los rendimientos, el de la dinamo y el de la línea, que la pendiente de la recta de disminución es directamente proporcional a la resistencia de la dinamo o de la línea.

Por tanto, para conseguir sistemas eléctricos de corriente continua con altos rendimientos, conviene disminuir la resistencia del sistema y elevar su tensión. Y, además, para un sistema dado, conviene obtener de él la energía con la menor potencia posible.

7.2.3.2. Incremento de la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico de corriente continua por unidad de incremento de su carga

Se llama *incremento de la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico de corriente continua por cada unidad que se incrementa la potencia del receptor* a la derivada en (7.8) de P_p respecto a P . Es la pendiente de la curva que se representa en la Figura 7. Resulta:

$$\frac{dP_p}{dP} = 2 \frac{R_s}{V^2} P \quad (7.10)$$

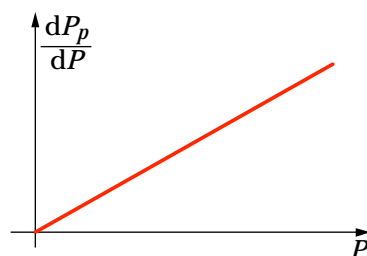


Figura 9.- Representación gráfica de (7.10): la potencia que se pierde por cada unidad que se incrementa la potencia que transporta el sistema es proporcional a esa potencia.

Se ve que la cantidad que se incrementa la potencia que se pierde en la resistencia del sistema por cada unidad que se incrementa la carga no es constante, sino proporcional a la propia carga. Es decir, a medida que se incrementa la carga, P , la potencia que se pierde para transportar cada unidad de potencia de ese incremento es mayor. Por ejemplo, si la carga

pasa de 100 kW a 101 kW, según (7.10), la potencia que se pierde se incrementa en $\Delta P_{p100} \approx 2K_s \times 100 = 200K_s$ quilovatios. La constante $K_s = R_s/V^2$ se llamará aquí *constante del sistema*. Si el incremento de un quilovatio se produce desde 1000 kW a 1001 kW, la potencia que se pierde se incrementa en $\Delta P_{p1000} \approx 2K_s \times 1000 = 2000K_s$ quilovatios. La relación entre estos incrementos es

$$\frac{\Delta P_{p1000}}{\Delta P_{p100}} \approx \frac{2K_s \times 1000}{2K_s \times 100} = 10$$

Ha resultado que el incremento de la potencia que se pierde, por cada unidad de potencia en que se incrementa la potencia que el sistema entrega, es diez veces mayor aproximadamente si se parte de 1000 kW que si se parte de 100 kW.

De nuevo se pone de manifiesto que, para ahorrar energía, es mejor entregarla con pequeños valores de la potencia durante tiempo largo, que entregarla con altos valores de potencia durante tiempo corto.

7.2.3.3. Disminución de los rendimientos por unidad de incremento de la carga de un sistema de corriente continua

Como se ha visto en (7.9), los rendimientos que se han definido en un sistema eléctrico de corriente continua dependen todos de la potencia P que el sistema entregue. Se hallará ahora la variación relativa de los rendimientos de un sistema de corriente continua por cada unidad de aumento de la carga del sistema. Se trata de calcular la derivada de cada rendimiento respecto a P , es decir, la pendiente de cada curva. En concreto la derivada de η_s respecto a P es la pendiente de la recta de la Figura 8.

$$\frac{d\eta_d}{dP} = -\frac{r_d}{V^2}$$

$$\frac{d\eta_L}{dP} = -\frac{R_L}{V^2}$$

$$\frac{d\eta_s}{dP} = -\frac{R_s}{V^2}$$

Se ve que las variaciones relativas de los rendimientos son negativas, como corresponde al hecho de que los rendimientos disminuyen al aumentar la potencia que el sistema entrega. Se ve también que el valor

absoluto de las variaciones relativas es constante, no depende de la potencia, pero sí del sistema eléctrico: para que los rendimientos disminuyan poco con el aumento de la potencia, conviene disminuir la resistencia correspondiente y aumentar la tensión del sistema. En particular, para que el rendimiento del sistema disminuya poco por cada unidad que se incrementa la potencia de la carga, ha de disminuirse la constante del sistema $K_s = R_s/V^2$ por disminución de la resistencia del sistema o por el aumento de su tensión. Principalmente, es la segunda medida la que tiene más influencia, pues, como se ve, V está elevada al cuadrado.

7.2.4. Potencia máxima que un sistema eléctrico de corriente continua puede entregar a un receptor

La fórmula (7.9) y, en general, todas en las que interviene la potencia P , tienen alcance limitado, pues el valor de la variable independiente, P , no puede crecer indefinidamente: hay un valor máximo para la potencia que un sistema eléctrico de corriente continua puede entregar a un receptor [56]. En efecto, fijado un sistema eléctrico que pueda describirse como en la Figura 6 b), la potencia que ese sistema eléctrico de corriente continua puede entregar a un receptor tiene un máximo absoluto cuyo valor es

$$P_m = \frac{E^2}{4R_s}$$

Eso significa que los rendimientos no decrecen indefinidamente, sino que hay un mínimo para cada uno de los rendimientos. En concreto, el valor mínimo del rendimiento η_s del sistema eléctrico es $\eta_{smi} = 0.5$, que se alcanza para el valor máximo de la potencia del receptor. Y el valor máximo de la potencia que se pierde en el sistema de corriente continua, que también se alcanza cuando el receptor absorbe la potencia máxima, es

$P_{pm} = P_m = \frac{E^2}{4R_s}$. Además, la aproximación de igualar la fuerza electromotriz E con la tensión del receptor V deja de ser posible cuando la potencia del receptor se acerca al valor máximo, pues cuando el sistema está entregando la máxima potencia al receptor, la fuerza electromotriz E es el doble que la tensión V del receptor [56]. Por eso la aproximación que

consiste en igualar E y V sólo es aceptable para valores de P alejados del valor máximo.

Estas aclaraciones solo tienen como fin establecer los límites de las fórmulas aproximadas de los rendimientos, en particular de (7.9), y también de la gráfica de la Figura 8 cuando la potencia que suministra el sistema eléctrico se acerca a la máxima. Porque, en realidad, los sistemas eléctricos de potencia funcionan en condiciones muy alejadas de la máxima potencia que pueden suministrar, precisamente para disminuir la potencia que se pierde en el sistema eléctrico y para mantener altos los rendimientos. Por eso, en las condiciones normales de funcionamiento, la diferencia entre E y V hace posible igualar en la práctica sus valores para los análisis energéticos como el que aquí se hace, y hablar, simplemente, de la tensión del sistema eléctrico, que se identifica, como se ha dicho, con V . La razón de hacerlo así es que esa es la tensión que tiende a mantenerse dentro de límites estrechos, la tensión de los receptores, para que funcionen a su tensión nominal. Para conseguir la constancia de V ha de variarse de continuo el valor de la fuerza electromotriz E . Si E se mantuviera fija, debido a la diferente caída de tensión en la línea al variar su carga, variaría también de continuo V .

7.2.5. Energía que se pierde en un sistema eléctrico de corriente continua por consumo de potencia

Supóngase que se necesita obtener de un sistema eléctrico de corriente continua una cantidad de energía W . Si esa cantidad se extrae del sistema eléctrico uniformemente durante el tiempo t , la potencia con la que se extrae es $P = W/t$. Si se utiliza (7.8), la potencia que se pierde entonces en el sistema es

$$P_p = \frac{R_s P^2}{V^2} = \frac{R_s W^2}{V^2 t^2} \quad (7.11)$$

Y la energía que se pierde en el sistema durante el tiempo en el que se está extrayendo de él esa energía es

$$W_p = P_p t = \frac{R_s W^2}{V^2 t} = \frac{R_s W}{V^2} P \quad (7.12)$$

Es decir, según el tercer miembro de (7.12), la energía que se pierde en un sistema eléctrico de corriente continua para extraer de él una energía W es inversamente proporcional al tiempo que se emplee en la

extracción. Eso significa que, de dos receptores que extraigan la misma energía del mismo sistema de corriente continua a potencia constante, independiente del tiempo, aunque no la misma potencia en los dos, hace perder menos energía en la resistencia del sistema el que la extrae en mayor tiempo. Lo anterior es equivalente a lo que muestra el cuarto miembro de (7.12): que la energía que se pierde en el sistema eléctrico al extraer de él la energía W con potencia constante P , es directamente proporcional a esa potencia. Por eso se llamará a esa energía *energía que se pierde por consumo de potencia*.

7.2.6. Condición de mínima energía perdida

La forma de facturar la energía extraída de un sistema eléctrico por los consumidores no ha variado sustancialmente desde los comienzos del suministro de energía eléctrica. Básicamente consiste en medir la energía que cada consumidor ha extraído del sistema durante un tiempo, que se llamará aquí *periodo de facturación*, y se designará como t_f . El número de quilovatios hora absorbidos se multiplica por el precio establecido para esa energía, y esa es la cantidad fundamental que ha de abonarse por la energía extraída.

En la actualidad el periodo de facturación para los consumidores domésticos es de dos meses. Para los grandes consumidores suele establecerse en el contrato que se suscribe entre la compañía suministradora de energía eléctrica y el consumidor.

Supóngase que en un tiempo cualquiera, t_f , se ha absorbido, a potencia constante, la energía W . Entonces, según (7.12), la energía que se ha perdido en el sistema de corriente continua es

$$W_{pt_f} = \frac{R_s W^2}{V^2 t_f} = K_s \frac{W^2}{t_f} \quad (7.13)$$

$K_s = R_s/V^2$ es la constante del sistema.

Si, por el contrario, se divide t_f en dos tiempos, y se obtiene esa misma cantidad de energía, W , de forma que la cantidad W_1 se obtiene durante un tiempo $t_1 < t_f$, y la cantidad $W - W_1$ durante el tiempo restante, $t_f - t_1$, con potencias constantes distintas, también según (7.12), la energía perdida en el sistema es ahora

$$W_p = K_s \left(\frac{W_1^2}{t_1} + \frac{(W - W_1)^2}{t_f - t_1} \right)$$

Se pretende ver que $W_{pt_f} \leq W_p$. Para ello, de W_p se restará W_{pt_f} y se comprobará que el resultado es un número positivo o nulo. En efecto,

$$\begin{aligned} W_p - W_{pt_f} &= K_s \left(\frac{W_1^2}{t_1} + \frac{(W - W_1)^2}{t_f - t_1} - \frac{W^2}{t_f} \right) = \\ &= K_s \frac{W_1^2 t_f^2 - W_1^2 t_1 t_f + W^2 t_1 t_f + W_1^2 t_1 t_f - 2 W W_1 t_1 t_f - W^2 t_1 t_f + W^2 t_1^2}{t_1 (t_f - t_1) t_f} = \\ &= K_s \frac{W_1^2 t_f^2 - 2 W W_1 t_1 t_f + W^2 t_1^2}{t_1 (t_f - t_1) t_f} = K_s \frac{(W_1 t_f - W t_1)^2}{t_1 (t_f - t_1) t_f} \geq 0 \end{aligned} \quad (7.14)$$

El numerador del último miembro de la igualdad anterior es positivo o nulo porque es un cuadrado. El denominador también es positivo, pues lo son los tiempos t_1 y t_f y también la diferencia $t_f - t_1$. Por tanto, queda demostrado que $W_{pt_f} \leq W_p$. Eso significa que W_{pt_f} es el valor mínimo de la energía que se pierde, ya que t_f puede hacerse tan pequeño como se quiera y dividirlo en dos partes como se quiera. Siempre se pierde la menor cantidad de energía si la energía que ha de absorberse en cada intervalo se obtiene durante todo él con potencia constante. En concreto, *si es W la energía que se ha absorbido durante el periodo de facturación t_f , la menor cantidad de energía posible que se pierde en la resistencia del sistema de corriente continua es la dada por (7.13)*. Dicho de otra manera: *para que se pierda la menor cantidad de energía posible en la resistencia de un sistema de corriente continua al extraer de él la energía W durante un tiempo t_f , ha de obtenerse con la potencia constante $P = W/t_f$* .

7.2.7. Cociente de pérdidas por consumo de potencia de sistemas de corriente continua

Por lo que se ha podido averiguar, no parece que cuando se empezaban a usar las líneas eléctricas de corriente continua se considerara para nada la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico

por causa de la extracción de fuertes potencias del sistema. De hecho tampoco se hace mucho en ese sentido en los sistemas de energía eléctrica actuales¹¹. Y sin embargo, como hemos visto, las energías que se pierden en la resistencia de un sistema eléctrico de corriente continua son bien distintas si se extrae la misma cantidad de energía con potencias altas o de bajo valor. Se creará aquí un índice que pueda medir la calidad de la extracción de energía en este aspecto.

Si es t_f el tiempo de facturación y W la energía consumida durante ese tiempo, según lo visto en el apartado anterior, se habría perdido la menor energía posible si se hubiera extraído esa energía a potencia constante durante el mayor tiempo posible, que es el tiempo de facturación, t_f . Esa energía que se pierde viene dada por (7.13), que se reproduce aquí con notación más adecuada

$$W_{pmi} = \frac{R_s W^2}{V^2 t_f} \quad (7.15)$$

W_{pmi} designa, por tanto, la energía mínima que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico, durante el periodo de facturación t_f , al extraer de ese sistema la energía W . Los valores de todas las variables del segundo miembro de la fórmula anterior son fácilmente medibles, excepto R_s . W es la energía que absorbe el receptor que, desde luego, debe ser medida.

Si realmente un receptor de potencia constante ha empleado en extraer la energía W el tiempo $t \leq t_f$, que es el tiempo que ha estado conectado al sistema eléctrico, la energía que se ha perdido por esa conexión es

¹¹ Las compañías suministradoras de energía de algunos países, como España, limitan la potencia que los consumidores pueden obtener del sistema eléctrico, o miden la máxima intensidad de su instalación, también con fines de disuadir de la extracción de potencias por encima de la contratada. Estas son medidas destinadas más a que no se sobrepase una determinada potencia, que a inducir a los consumidores a distribuir en el tiempo cualquier energía que sus receptores absorban. A pesar de ello, estas limitaciones sí contribuyen a un cierto reparto de energía en el tiempo, aunque solo sea a partir de un determinado valor de la potencia.

$$W_p = \frac{R_s W^2}{V^2 t}$$

Se llamará *cociente de pérdidas por consumo de potencia* a la relación entre la potencia realmente perdida en la resistencia del sistema eléctrico y la mínima que se perdería si se empleara todo el tiempo t_f para extraer la energía

$$c_P = \frac{W_p}{W_{pmi}}$$

$c_P \geq 1$, pues $W_p \geq W_{pmi}$, como ya se demostró. c_P indica las veces que W_p es mayor que W_{pmi} , las veces que W_p contiene como factor a W_{pmi} .

Si se calcula el valor del cociente en este caso concreto

$$c_P = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{t_f}{t} \quad (7.16)$$

Resulta que, si la potencia del receptor que se conecta durante distintos tiempos al sistema eléctrico de corriente continua es siempre la misma, para medir su cociente de pérdidas por consumo de potencia bastaría medir la suma, t , de los tiempos de conexión de ese receptor durante el periodo de facturación. La relación entre el tiempo de facturación y el tiempo t es el cociente de pérdidas por consumo de potencia.

7.2.8. Cálculo de la energía que se pierde en la resistencia de un sistema de energía eléctrica de corriente continua cuando la carga no es constante

La realidad es algo más compleja cuando se trata de aplicar lo anterior a la energía que absorbe un consumidor, pues la potencia que conecta un consumidor a un sistema eléctrico puede variar de continuo y, de hecho, así ocurre. En muchos casos cada receptor particular suele absorber potencia constante mientras está conectado a la tensión del sistema, pero, en cada momento, hay, en general, diversos receptores de un consumidor conectados al sistema eléctrico y, por tanto, en cada

momento la potencia P tiene valores distintos. Pero, incluso, hay receptores cuya potencia puede variar aunque su tensión no lo haga; por ejemplo, los motores. Un motor absorbe, en general, diferentes potencias si varía la carga mecánica que debe vencer, si varía el momento resistente o la velocidad, aunque no varíe su tensión. En estos casos la potencia P no es constante, sino una función del tiempo determinada por los receptores. Debido a que P no es constante, de la (7.11), que da la potencia que se pierde en la resistencia del sistema, solo son válidos ahora los dos primeros miembros, es decir,

$$P_p = R_s I^2 = \frac{R_s P^2}{V^2} \quad (7.17)$$

Como P es variable, también lo es la potencia P_p que se pierde en el sistema. Se consideran constantes, como se ha dicho, R_s y V . Por tanto, la energía que se pierde en la resistencia del sistema en el periodo de facturación t_f ya no viene dada por (7.12), sino que vale

$$W_p = \int_0^{t_f} P_p dt = R_s \int_0^{t_f} I^2 dt = R_s \int_0^{t_f} \frac{P^2}{V^2} dt = \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} P^2 dt = K_s \int_0^{t_f} P^2 dt$$

Aunque la tensión del receptor no fuera constante, hasta el cuarto miembro toda la fórmula es válida. El quinto y el sexto miembros solo son correctos si V es constante. También entonces la energía mínima que se perdería en la resistencia del sistema eléctrico sigue dada por (7.15), y el cociente de pérdidas por consumo de potencia vale ahora

$$c_P = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{V^2 t_f \int_0^{t_f} I^2 dt}{W^2} = \frac{t_f \int_0^{t_f} P^2 dt}{W^2} = \frac{t_f V^2 \int_0^{t_f} I^2 dt}{V^2 \left(\int_0^{t_f} I dt \right)^2} = \frac{t_f \int_0^{t_f} P^2 dt}{\left(\int_0^{t_f} I dt \right)^2} \quad (7.18)$$

Realmente la fórmula (7.18) es válida con independencia de si P es constante o no, es decir, incluye a la (7.16). En efecto, si P fuera constante durante un tiempo $t \leq t_f$ y cero el resto del tiempo, si se resuelve el último miembro de (7.18), resulta

$$c_P = \frac{t_f P^2 t}{W^2} = \frac{t_f P}{W} = \frac{t_f}{t}$$

que coincide con (7.16).

Conviene insistir, no obstante, en que (7.18) es válida solo si V es constante, pues, para obtenerla, se ha utilizado la fórmula (7.15).

7.2.9. Medida del cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas de corriente continua

La medida del cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de corriente continua consiste en obtener el resultado de (7.18). Para ello puede utilizarse cualquier miembro. Aquí se hará, inicialmente, con el tercero, para medir, además del cociente de pérdidas, la energía W absorbida por el receptor al final del periodo de facturación. Es decir, hay que medir el periodo de facturación t_f , medir la energía W absorbida por

la carga durante ese periodo, y averiguar el valor de la integral $\int_0^{t_f} P^2 dt$.

La medida consistirá en obtener en LabVIEW las funciones de la intensidad instantánea, I , y la tensión instantánea, V , de la carga en cada intervalo de tiempo, Δt . Se multiplicarán y se elevará al cuadrado el resultado. Así se obtiene P^2 . Se multiplicará ese valor por Δt , y se sumará ese producto al producto anterior. La nueva suma se almacenará sustituyendo a la anterior y así sucesivamente. Con este método se obtiene

el valor del sumatorio $\sum_0^t P^2 \Delta t$ para cada valor de $t \leq t_f$, contado desde el inicio del periodo de facturación. El resultado de la suma es el valor de la integral $\int_0^t P^2 dt$ desde el inicio del periodo de facturación hasta que ha transcurrido ese tiempo t .

La medida de la energía que absorbe la carga en el periodo de facturación W se realiza multiplicando los pares de valores instantáneos de V e I captados, se multiplica ese producto por Δt , y se suma la suma anterior de los productos. Esa suma sustituye a la anterior en la variable habilitada para el caso, y así sucesivamente. Es decir, se halla la suma

$\sum_0^t VI \Delta t = \sum_0^t P \Delta t$ para $t \leq t_f$. El programa también debe medir el tiempo t

que ha transcurrido desde que se inició la medida. Cuando $t = t_f$ el programa devolverá el valor

$$c_P = \frac{t_f \int_0^{t_f} P^2 dt}{W^2} \approx \frac{t_f \sum_0^{t_f} (VI)^2 \Delta t}{\left(\sum_0^{t_f} VI \Delta t \right)^2}$$

que es el valor del cociente de pérdidas por consumo de potencia buscado. La exactitud es tanto mayor cuanto menor sea el intervalo Δt entre las medidas. No obstante, hay que tener en cuenta que el sistema de medida está dirigido a sistemas de potencia, en los que la potencia de los receptores varía muy lentamente si se compara con los tiempos que pueden ser considerados en el sistema de medida. En concreto, intervalos de medida de algunos segundos son tiempos muy pequeños para los sistemas de potencia, pero muy grandes para el sistema de medida, lo que es una indudable ventaja. Además, los programas de LabVIEW pueden elaborarse de forma que los intervalos de tiempo puedan ser elegidos a voluntad en función de la precisión que se desee. Así se hará aquí siempre que sea posible.

Si se utiliza el último miembro de (7.18) para hallar c_P , solo se opera en cada intervalo Δt con el valor de la intensidad así: se capta y se obtiene el valor de I y, con él se obtiene $I^2 \Delta t$, que se suma a la suma de los resultados similares anteriores desde que comenzó el periodo de facturación. También se obtiene $I \Delta t$, que se suma a la suma de todos los resultados similares anteriores. Así para cada intervalo Δt . Al final del periodo de facturación el programa de LabVIEW realizará la operación

$$c_P \approx \frac{t_f \sum_0^{t_f} I^2 \Delta t}{\left(\sum_0^{t_f} I \Delta t \right)^2}$$

que da el cociente de pérdida de energía por consumo de potencia del receptor de corriente continua.

7.2.10. Red de adecuación de señales para la medida del cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas de corriente continua

En la Figura 10 se muestra la red de resistencias que permite llevar a la tarjeta de captación de datos las tensiones con las que un programa de LabVIEW, creado expresamente para ello, hallará el cociente de pérdidas por consumo de potencia de una carga conectada a un sistema de corriente continua [71]. Los valores de las resistencias deben hallarse para los casos concretos. En particular, ha de conocerse una cota superior para la tensión del sistema, V . Con ese valor han de calcularse los dos divisores de tensión iguales, formados por las resistencias R_1 y R_2 , para que el valor absoluto de la tensión entre los terminales ACH1(+) y ACHk(-) no supere nunca 10 V, como ya se dijo, y para que el valor absoluto de la tensión entre los terminales ACH2(+) y ACHk(-) no pase tampoco de ese valor. El límite superior de 10 V para cada canal es un requisito de la tarjeta de adquisición de datos elegida.

Como la intensidad que entra hacia la tarjeta por cada terminal es despreciable (pocos microamperios), las intensidades por las resistencias R_1 y R_2 de la izquierda son iguales. Esa intensidad vale $i_1 = V/(R_1 + R_2)$. Como se ha dicho arriba, la tensión de R_2 no debe superar 10 V, es decir, $R_2 i_1 = R_2 V / (R_1 + R_2) < 10$, de donde

$$R_2 < 10 \frac{R_1 + R_2}{V} \quad (7.19)$$

Realmente (7.19) no proporciona todavía un valor para R_2 , pues no está fijado el de R_1 . Como esa fórmula es la única restricción para R_1 y R_2 , puede elegirse para la suma $R_1 + R_2$ cualquier valor que permita que se cumpla (7.19). Lo mejor es elegir resistencias muy grandes. Así i_1 es muy pequeña y la red de medida no afecta al sistema de potencia. Además la energía que absorbe la red de medida, que es la que absorben las resistencias, también es pequeña con la elección de resistencia grandes [71].

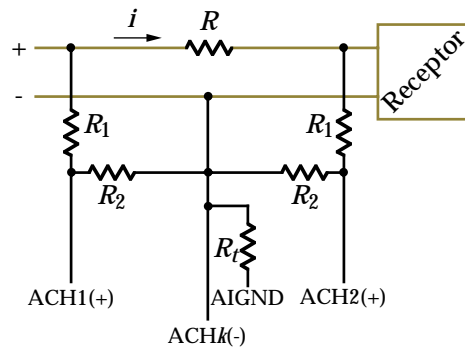


Figura 10.- Red de adecuación de señales para la medida del cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas de corriente continua. Se dibuja en negro la red de adecuación de señales, y en marrón la línea de corriente continua y el receptor.

El valor de R debe elegirse para que la tensión entre sus terminales sea detectada por la tarjeta. El valor mínimo de la tensión con la que la tarjeta mide correctamente entre cada canal y el de referencia, como ya se vio, es $2.44 \times 10^{-3} \text{ V} = 2.44 \text{ mV}$. Por tanto entre los terminales ACH1(+) y ACH2(+) debe haber, como mínimo 4.88 mV . Por otra parte

$$V_{ACH1(+)} = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

y

$$V_{ACH2(+)} = V_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Como

$$V_{ACH1(+)} - V_{ACH2(+)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_1 - V_2) > 4.88 \times 10^{-3},$$

resulta que

$$V_1 - V_2 > 4.88 \times 10^{-3} \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Si es I_{mi} la intensidad mínima que se quiere detectar, debe ser

$$RI_{mi} = 4.88 \times 10^{-3} \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

De donde

$$R = 4.88 \times 10^{-3} \frac{R_1 + R_2}{R_2 I_{mi}}$$

La red de la Figura 10 está preparada para poder captar valores instantáneos de V_c y de I . La frecuencia máxima de esta captación es de 2.5×10^6 muestras/s, por lo que las prestaciones que se pueden obtener de esa red y el resto del equipo son muchas más que la sola medida del cociente de pérdidas.

7.2.11. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas de corriente continua

El siguiente programa calcula y representa en la pantalla del ordenador el cociente de pérdidas por demanda de potencia de una carga cualquiera en un sistema de corriente continua.

Además, no solo se comunicará con la tarjeta de captación de datos instalada en el ordenador para realizar medidas de un aparato físico real, sino que también podrá simular esa captación de medidas. Esto último permite poder usar el programa aún en el caso de no disponer de una tarjeta de captación de datos instalada en el ordenador. La simulación se limita a suministrar al programa datos que le permitan realizar las operaciones programadas y obtener así el cociente; para ello genera dos señales de tensión que se corresponden con las tensiones V_1 y V_2 que mediría la tarjeta (Figura 11).

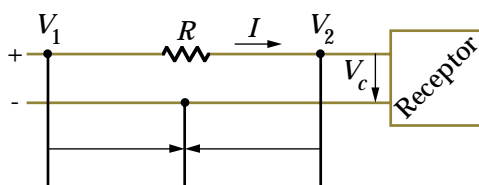


Figura 11.- Representación esquemática de las conexiones empleadas para realizar la medida del cociente de pérdida de energía por consumo de potencia para una carga de corriente continua.

Finalmente, el programa muestra el valor actual del cociente, usando como periodo de facturación el tiempo transcurrido desde que se inició la medida hasta el instante actual, y muestra también la *historia* de ese cociente, es decir, representa en la pantalla hasta 2048 valores que el

cociente ha tenido. Cuando se inicia un nuevo periodo de facturación, presionando el botón con la etiqueta *Reiniciar*, esos valores se borrarán.

Como ya se ha dicho, la programación se va a realizar empleando LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, Puesto de trabajo de Ingeniería con Instrumentos Virtuales de Laboratorio). Como ya se dijo, esta es la aplicación de *National Instruments* que, mediante un lenguaje de programación gráfico orientado a objetos, permite crear *instrumentos virtuales* (que es el nombre de esos objetos). Todos sus objetos son analogías de instrumentos de laboratorio habituales: pantallas para mostrar resultados, pulsadores o palancas para introducir datos, etc. Para realizar un programa en este lenguaje hay que unir los terminales adecuados de unos *instrumentos virtuales* con los de otros, empleando para ello *cables virtuales* [72][73].

Para facilitar la comprensión del instrumento virtual que se ha creado aquí se incluye un estudio detallado de cada nueva parte o instrucción que lo compone, comenzando por la zona que verá el usuario nada más cargarlo, el *Panel frontal*, y terminando por el estudio del *Diagrama de conexiones*, que es la programación interna del instrumento virtual, o su código fuente [72][73].

7.2.11.1. Panel frontal

Esta es la parte del instrumento virtual que ve el usuario (Figura 12). Desde aquí se controlan todas las operaciones que se quieren realizar y aquí se muestran los resultados obtenidos.

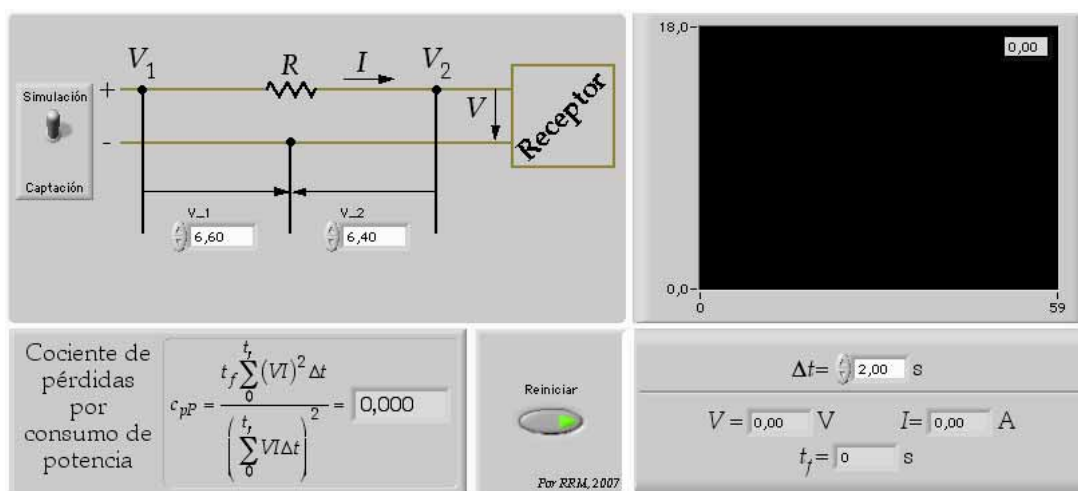


Figura 12.- Panel frontal del instrumento virtual que determina el cociente de pérdidas por consumo de potencia en un receptor de corriente continua.

Lo que sigue es una explicación de las zonas en que está dividido el instrumento virtual y de los resultados que muestran. Para poder identificarlos más fácilmente se han dividido en zonas, como se muestra en la Figura 13.

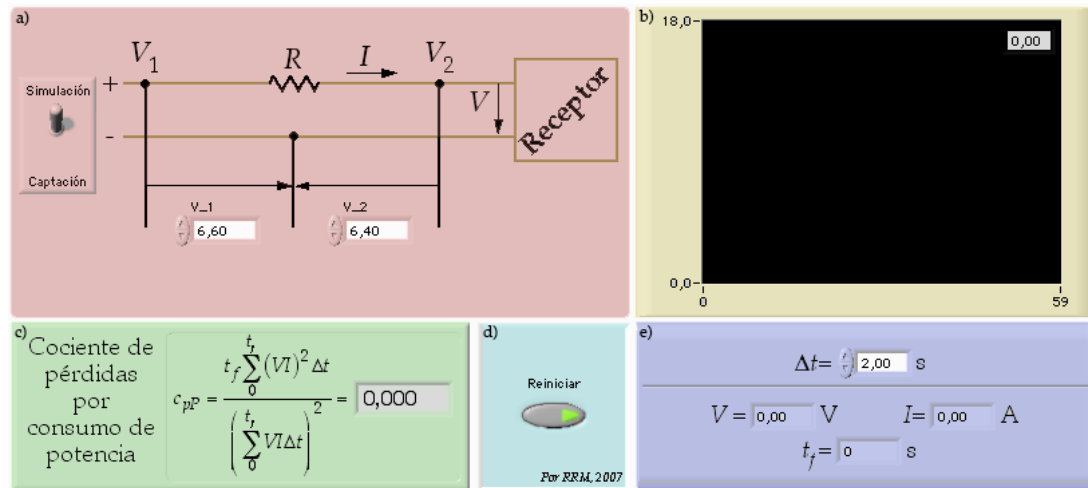


Figura 13.- Zonas en que está dividido el panel frontal del instrumento virtual.

- La zona a) muestra el esquema del circuito que se ha montado para acondicionar las señales que le van a llegar a la tarjeta. Como se puede ver se dispondrá de las tensiones V_1 y V_2 , antes y después de la resistencia R , respectivamente. En este esquema el usuario no debe hacer nada, sólo se muestra como indicación. A la izquierda de ese esquema está el interruptor llamado *Simulación/Captación*. Mediante este interruptor el usuario le indicará al programa si desea captar los datos provenientes de la tarjeta de captación de datos instalada en el ordenador o prefiere que el propio programa simule esos datos. Esta última opción se ha puesto, principalmente, para facilitar el proceso de depuración del programa, ya que cuando se cree el equipo será preferible ver el comportamiento con una carga real que con unas medidas simuladas. Debajo del esquema se pueden ver dos campos llamados V_1 y V_2 , que sirven para indicarle al programa los valores máximos de tensión de la onda que se debe simular. Como solo son útiles cuando se quiere simular la captación de datos, si el interruptor está en la posición de *Captación* desaparecerán de la pantalla, mientras que en la posición de *Simulación* volverán a aparecer.

- La zona b) contiene una pantalla en la que se muestra la evolución del cociente de pérdidas por consumo de potencia a lo largo del tiempo. Esta gráfica no sirve para aplicar el cociente, ya que lo importante es siempre su valor final. Sin embargo, se incluye aquí como curiosidad. En la parte superior derecha de la gráfica hay un campo en el que se muestra, en todo momento, el último valor que la gráfica ha representado, y que coincide con el valor del cociente actual.
- La zona c) indica claramente qué cociente se está obteniendo en este momento: el *Cociente de pérdidas por consumo de potencia*. Además, también se muestra la ecuación que el programa resuelve para obtenerlo y los valores que emplea. Por último, en el campo que está a la derecha de la ecuación es donde se muestra el valor actual del cociente. Este valor es el que se debe emplear cuando se desee usar el cociente en las tarifas eléctricas. Esta es la zona más interesante del panel frontal, puesto que es la que contiene el valor del cociente que se está buscando.
- En la zona d) está el botón de reinicio del instrumento. Cuando el usuario desee volver a iniciar el periodo de facturación deberá pinchar en este botón. Al hacerlo se borrarán todos los datos almacenados hasta ahora, incluyendo la gráfica (que volverá a mostrarse vacía) y el valor actual del cociente.
- Finalmente, la zona e) contiene algunos datos que pueden resultar interesantes al usuario y un dato que es necesario para el funcionamiento del programa. El primer campo, Δt , es el intervalo de tiempo que el usuario desea usar entre medidas. Su objetivo es reducir la carga que supone, a la tarjeta de captación de datos y al ordenador, el estar realizando permanentemente la medida durante todo el periodo de facturación; en lugar de eso se le pide que realice la medida cada cierto tiempo. En función del valor, en segundos, que el usuario indique aquí el programa esperará ese tiempo para realizar la siguiente medida y cálculo del cociente; además, el valor que indica este campo es el que se usará como Δt para calcular el cociente. Debajo de este campo aparecen otros tres campos en los que el usuario no puede actuar: V muestra el valor medio de la tensión actual de la

carga en voltios, I muestra el valor medio de la intensidad que circula por la carga en amperios, y t_f es el tiempo de facturación, en segundos; es decir, el tiempo que ha pasado desde que se inició la medida del cociente actual.

Nótese que los campos en los que el usuario puede introducir valores se representan con un fondo blanco, mientras que los campos que solo sirven para indicar datos tienen un fondo gris.

Debajo de estas cinco zonas del panel frontal, y ocultos a la vista del usuario, se muestran algunos resultados poco importantes pero necesarios para realizar el cálculo del cociente. Básicamente corresponden a variables intermedias que ha sido necesario crear y que solo resulta útil ver mientras se está depurando el programa.

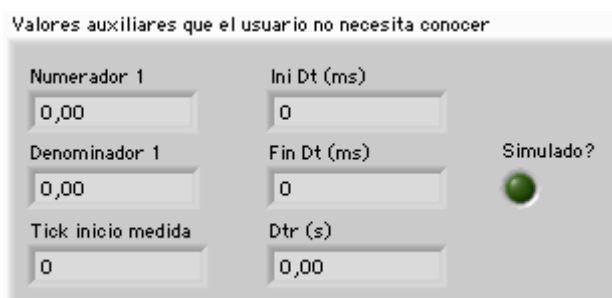


Figura 14.- Otros resultados de escaso interés para el usuario, pero necesarios para el programa, permanecen ocultos a su vista.

Estos números se explicarán con más profundidad cuando se explique el código fuente en la siguiente sección.

7.2.11.2. Diagrama de conexiones

Aquí se explica la programación interna del instrumento virtual. Si bien LabVIEW permite emplear el lenguaje de programación C para realizar cualquier tarea, lo más habitual es emplear los propios objetos integrados en el programa, dando como resultado una programación más rápida y fácil de revisar, aunque también más limitada (puesto que solo se puede disponer de las instrucciones incluidas en el programa; si se necesitara realizar una acción que no tuviera su objeto gráfico equivalente en LabVIEW sería necesario emplear C para crearlo) [72].

En este caso, toda la programación se ha podido realizar con las instrucciones preprogramadas de LabVIEW.

7.2.11.2.1. Estructura principal

Por un lado, cuando LabVIEW ejecuta un programa es él mismo quien decide el orden en que se ejecutarán las instrucciones. Como norma general LabVIEW ejecuta en último lugar las instrucciones que requieren un dato que les proporcionará otra instrucción previa, de forma que parece que los datos fluyen del primer instrumento al último [73][74]. Sin embargo, las instrucciones que no tengan una relación de este tipo con las restantes se ejecutarán en un orden impreciso, llegando a darse el caso de que una instrucción se ejecute antes que otras en una zona del programa y en el resto suceda lo contrario.

Por otro lado, para determinar el Δt de cada medida y cuánto ha durado el periodo de facturación, datos necesarios para calcular el cociente, es necesario saber en qué momento se inicia cada iteración del programa y en qué momento acaba. Esto requiere que LabVIEW tome el dato del tiempo (ya se verá cómo más adelante) al principio y al final de la iteración; es decir, es necesario que ejecute una instrucción antes que el resto y la misma instrucción después que las demás.

Para solucionar este problema LabVIEW incluye una estructura especial llamada *Estructura secuencial* (Figura 15). El programa ejecutará primero todos los instrumentos virtuales y operaciones que estén fuera de dicha estructura y, a continuación, comenzará a ejecutar los que estén dentro de ella empezando por el primer *fotograma* (el fotograma cero); una vez ejecutados todos sus elementos pasará al segundo *fotograma* (el uno), y así sucesivamente hasta que acabe con todos los *fotogramas* de la estructura [75][76].

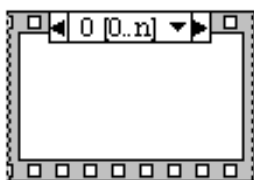


Figura 15.- Estructura secuencial (*sequence structure*).

Para realizar este primer programa se ha creado una única estructura secuencial y se le han añadido cuatro fotogramas. No es necesario realizar ninguna operación previa, por lo que no se ha puesto ninguna instrucción fuera de ella.

7.2.11.2.2. Fotograma 0

El primer fotograma de la estructura secuencial (Figura 16) es el encargado de inicializar todos los valores cuando sea necesario, de almacenar en una variable el instante de inicio del periodo de facturación, y de guardar en otra variable el instante de inicio del primer incremento de tiempo, Δt . Si bien en la primera iteración del programa el tiempo de inicio de Δt y del periodo de facturación coinciden, en las iteraciones siguientes no es así, por eso es necesario crear dos variables separadas, a pesar de que en este primer momento guarden el mismo dato.

A continuación se estudian detalladamente las partes que componen el primer fotograma.

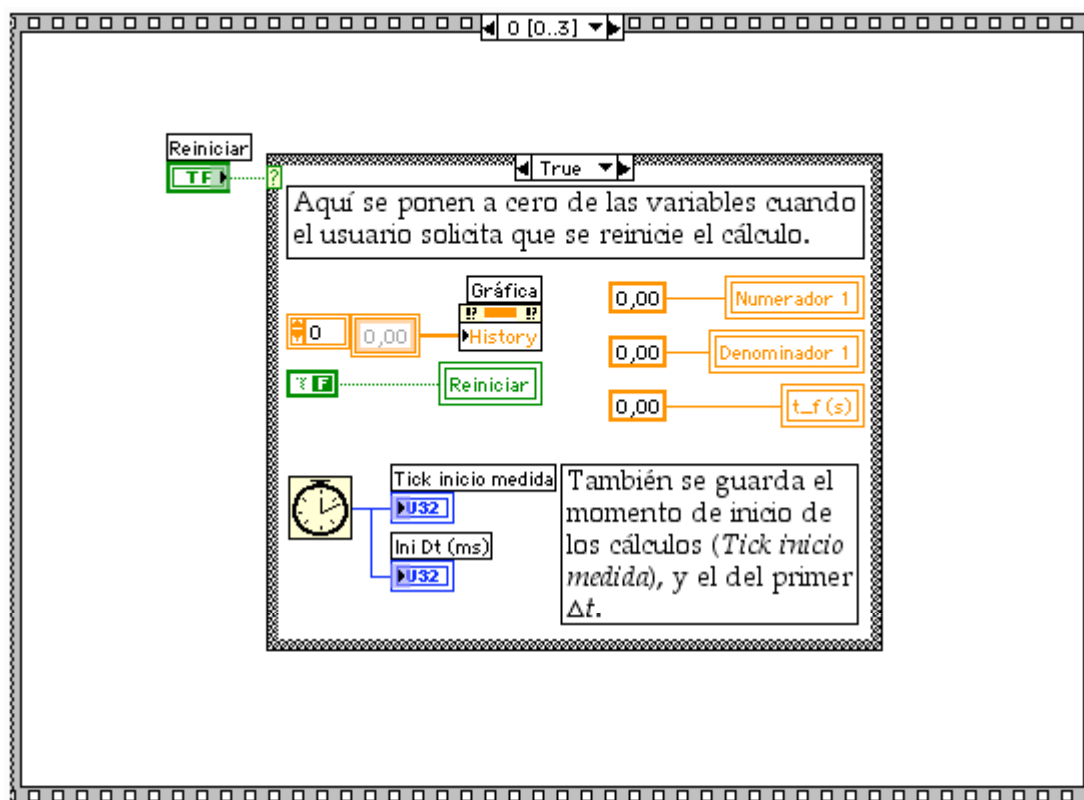


Figura 16.- *Fotograma 0* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

El fotograma 0 está formado principalmente por otro elemento nuevo llamado *estructura de casos* (Figura 17). Estas estructuras contienen uno o más subprogramas independientes entre sí, llamados *casos*, que se pueden seleccionar en el menú que aparece en su parte superior. Solo un subprograma de la estructura se ejecuta en cada iteración del instrumento virtual. Cuál es depende del valor que llegue a su selector de casos, que es

el terminal verde, con una interrogación en su interior, colocado a la izquierda del recuadro que delimita la estructura [75][76].

Por defecto, estas estructuras vienen programadas con los casos verdadero (*True*) y falso (*False*), de manera que si la variable conectada al selector de la estructura tiene en el momento de ejecución el valor verdadero (*True*), serán las instrucciones contenidas en el subprograma *True* las que se ejecuten. En este caso se ha optado por mantener los valores predefinidos: *True* y *False*.

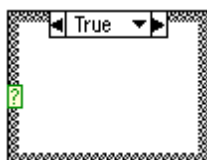


Figura 17.- Estructura de casos (*case structure*).

El selector de la estructura de casos se ha conectado a una variable booleana llamada *Reiniciar* (Figura 18). Esta variable representa en el diagrama de conexiones el valor del botón homónimo que se encuentra en el panel frontal.

Con la conexión efectuada de esta forma, cuando el usuario quiera volver a iniciar el periodo de facturación pulsará el botón *Reiniciar* del panel frontal y, automáticamente, la variable booleana relacionada pasará al nuevo estado: valor verdadero (*True*). Cuando el programa pase por esta parte del código, en el fotograma 0, comprobará que *Reiniciar* vale *True* y buscará y ejecutará el subprograma *True* de la estructura de casos.



Figura 18.- Botón del *panel frontal* con la etiqueta *Reiniciar* y su variable booleana relacionada del *diagrama de conexiones*.

Se hace un breve paréntesis aquí para recordar que la manera de conectar un instrumento, variable o estructura a otro en LabVIEW es mediante *cables*. En función del tipo de datos que vayan a *transmitirse* por cada cable LabVIEW le asignará automáticamente diferentes colores y formas. Así, cuando se transmite un booleano, como en este caso, el cable aparece como una línea de puntos verdes (Figura 19).



Figura 19.- Cable de unión de variables booleanas.

Siguiendo con el programa, las acciones que debe ejecutar para reiniciar el cálculo del cociente, y que, por lo tanto, se deben incluir en el caso *True* de la estructura de casos son (Figura 20): a) borrar todos los datos de la gráfica del cociente de pérdidas, b) devolver el botón *Reiniciar* y su variable asociada al valor falso, c) asignar el valor 0.00 a la variable *Numerador 1*, d) asignar el valor 0.00 a la variable *Denominador 1*, e) asignar el valor 0.00 a la variable t_f (s) y f) almacenar en sendas variables el valor del momento de inicio de la medida y del Δt .

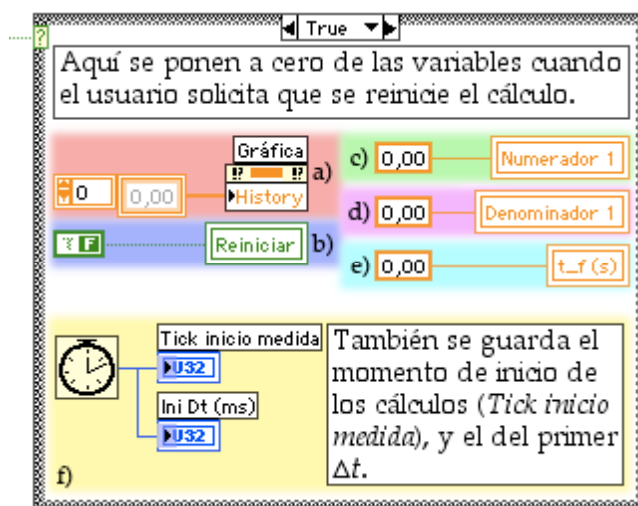


Figura 20.- Estructura de casos del fotograma 0. Acciones que se ejecutarán cuando se reinicie el cálculo.

La acción a) es meramente estética: pretende que la gráfica aparezca totalmente limpia cada vez que se reinicia el periodo de facturación (Figura 21); para ello sustituye toda la historia de la gráfica por un único valor, el 0.00, que se coloca como primer dato de la historia. Esto se consigue asignando a la propiedad *History* de *Gráfica* el valor único 0.00 para el tiempo 0 [75][76]¹².

¹² Un método rápido para obtener la propiedad *History* de *Gráfica* es pinchar en ella con la herramienta *Object Shortcut Menu* (Menú de Atajos del Objeto) y seleccionar *Create >Property Node*. En el objeto que se crea bastará con buscar la opción *History Data*.



Figura 21.- Gráfica totalmente limpia, resultado de aplicar la instrucción a) de la Figura 20.

b) fuerza a la variable *Reiniciar* (y, por tanto, también a su botón) a volver al estado *False*; de esta forma se garantiza que las acciones de reinicio se ejecutan al menos una vez antes de que el botón vuelva a su posición original. Si bien existen otros métodos para manejar el comportamiento del botón de reinicio este es el que parece más fácil de entender por el usuario final del programa, ya que verá que el botón permanece encendido (Figura 18) hasta que el programa realiza el reinicio, momento en que vuelve a apagarse. Además, es el comportamiento que funciona más correctamente, pues hará que la variable permanezca en el estado *True* hasta que el programa llegue al fotograma 0, que es donde se interpreta qué se debe hacer en ese caso, y después de ejecutar las acciones del caso *True* lo devolverá a su valor inicial, *False*, para que no vuelvan a hacerlo.

Las siguientes tres instrucciones, c), d) y e), ponen a cero tres variables que se explicarán más adelante. Baste con saber que son parte del proceso de cálculo del cociente de pérdidas.

Por último, f) es la encargada de almacenar en sendas variables el tiempo en que se inicia el cálculo (*Tick inicio medida*) y en que se inicia Δt (*Ini Dt (ms)*) en la primer iteración. Como en el momento de reiniciar el periodo de facturación ambos tiempos coinciden, a ambas variables se les lleva el mismo número.

Este número es el valor del contador de milisegundos del ordenador, proporcionado por el instrumento virtual "*Cuenta de ticks (ms)*" (Figura 22). Un *tick* es como se llama a un milisegundo contado por el reloj interno del ordenador. En LabVIEW han optado por definirlo como una variable sin signo (o sea, siempre positiva) de 32 bits de precisión simple; es decir,

puede ser un número comprendido entre 0 y $2^{32} - 1$ (se le resta 1 porque también se tiene en cuenta el valor 0). De ahí que las variables *Tick inicio medida* e *Ini Dt (ms)* también se hayan definido como variables sin signo de 32 bits (U32 significa *Unsigned, 32 bits*) [75][76].



Figura 22.- Instrumento virtual Cuenta de ticks (ms) (*Tick Count (ms)*).

En el caso en que la variable *Reiniciar* tenga el valor falso (*False*), o sea, que el usuario no solicite que se reinicie el cálculo, esta estructura no debe hacer nada, por eso se ha dejado vacía.

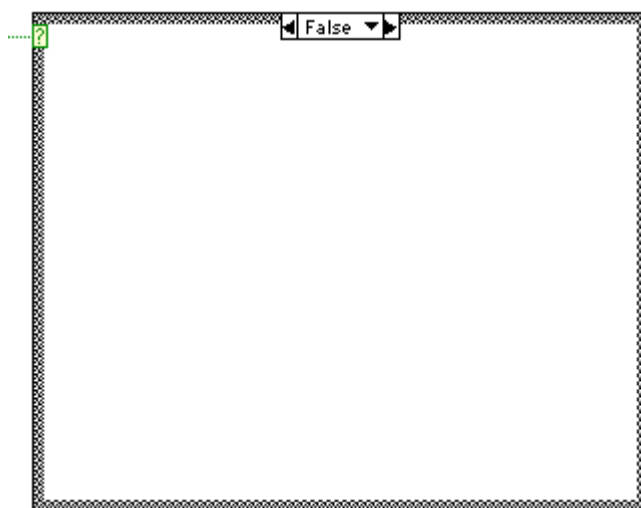


Figura 23.- Estructura de casos superior del *fotograma 0*. Cuando no se reinicie el cálculo no debe hacer nada.

Hasta aquí llega la programación del primero de los cuatro fotogramas que componen la estructura secuencial. En resumen, se puede decir que las instrucciones de este primer fotograma sólo se ejecutarán cuando el usuario pulse el botón *Reiniciar*, con la intención de que el programa interrumpa el cálculo del cociente de pérdidas y vuelva a iniciarlo.

7.2.11.2.3. *Fotograma 1*

Como bien indica la leyenda del fotograma 1 (Figura 24), el objetivo de esta parte del programa es, esencialmente, captar o simular las ondas que se necesitan para poder obtener los valores de la tensión del receptor V y su intensidad I , además de realizar la parada entre cada iteración del programa, para darle tiempo a realizar los cálculos y evitar que la tarjeta

de captación de datos esté en continuo funcionamiento, y de mostrar u ocultar los campos de V_1 y V_2 cuando sea necesario.

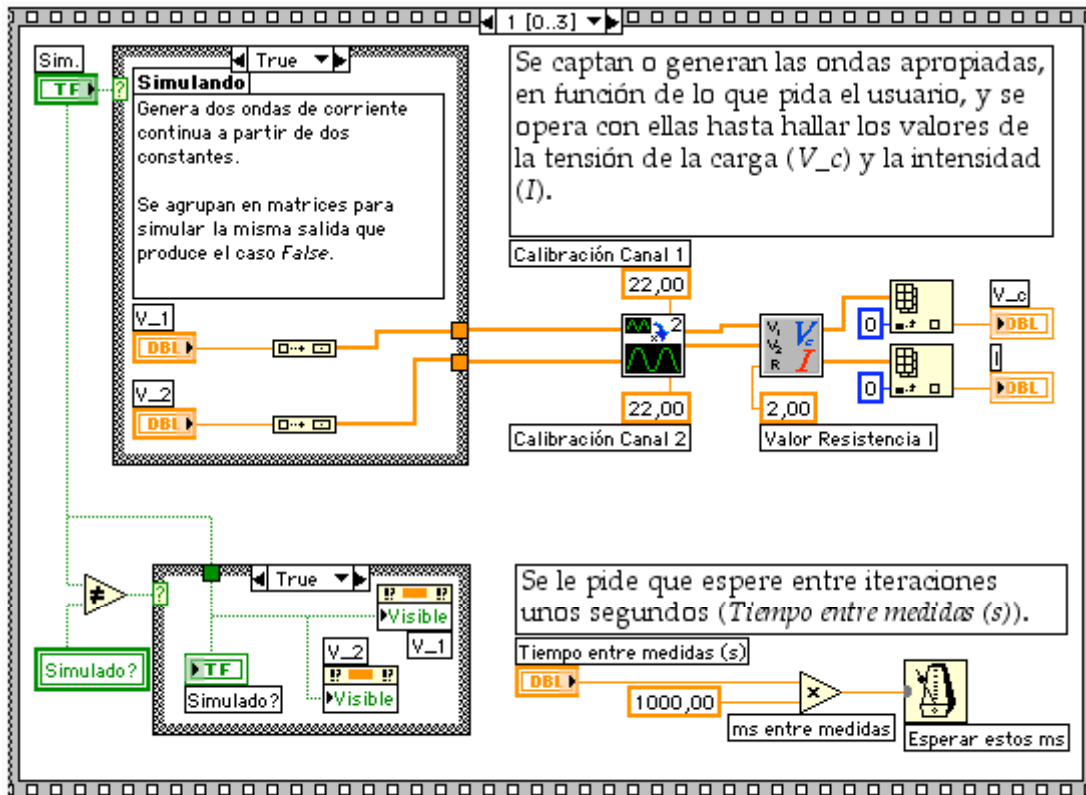


Figura 24.- Fotografía 1 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

La primera elección que debe hacer el usuario del instrumento virtual tiene que ver con el origen de los datos con los que trabajará sucesivamente el instrumento virtual: pueden ser datos obtenidos por la tarjeta de captación instalada en el ordenador o datos simulados por el propio programa. En ambos casos el resultado final, los datos simulados o captados, debe ser el mismo, puesto que se pretende que el resto del programa pueda servir indistintamente para cualquiera de ellos.

La forma que tiene el usuario de elegir una de estas dos opciones es mediante el interruptor de *Simulación/Captación* (Figura 25). Cuando está en la posición de *Captación* (interruptor hacia abajo) el programa de LabVIEW empleará la tarjeta PCI 6071-E, que está instalada en el ordenador, para captar las tensiones V_1 y V_2 de la red de la Figura 11 (pág. 71). Si el interruptor se coloca en la posición de *Simulación*, tal y como se ve en la Figura 25, el programa generará dos formas de onda que

simularán los valores de V_1 y V_2 ; no usará la tarjeta. La simulación se ha usado, sobre todo, durante el proceso de depuración del programa.



Figura 25.- Interruptor de *Simulación/Captación*.

Estas dos opciones se han programado en la estructura de casos superior de este fotograma, y cuyo caso falso (*False*), se muestra en la Figura 26. En este caso se pretende captar las dos señales de tensión V_1 y V_2 mediante la tarjeta de captación de datos PCI 6071-E, de National Instruments, que las devuelve al resto del programa como una matriz de dos filas y tantas columnas como sea necesario. A continuación se separan las dos señales en dos matrices de una fila cada una.

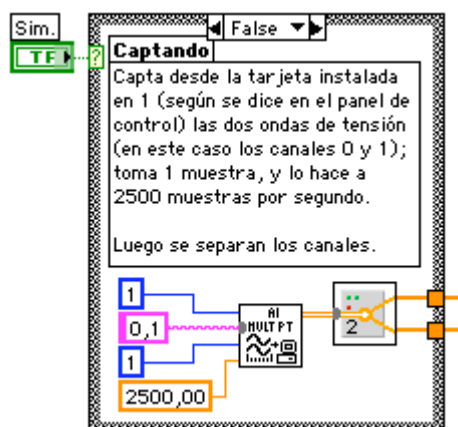


Figura 26.- Caso *False* de la estructura de casos superior del fotograma 1, y la variable *Sim.* que dicta el caso que se debe ejecutar.

Como se explicó en el fotograma anterior, este caso *False* se ejecuta cuando la variable que está unida al selector de la estructura causal, la variable *Sim.* asociada al interruptor *Simulación /Captación* del panel frontal del instrumento virtual, posee un valor falso (*False*); es decir, cuando el interruptor se encuentre en la posición de *Captación* se ejecutará el subprograma *False* de esta estructura de casos.



Figura 27.- Instrumento para la Captación de Formas de Onda Analógicas (*AI Acquire Waveforms*).

Aquí, primero se pide a la tarjeta que realice la captación de las señales. Para ello se emplea el instrumento virtual dedicado a la *Captación de Formas de Onda Analógicas* que incluye National Instruments en el paquete de la tarjeta de captación (Figura 27) [77]. Este instrumento se encarga de solicitar a la tarjeta indicada por la primera constante (dentro del rectángulo azul superior) que capte las señales que le llegan a los canales especificados en la segunda constante (rectángulo rosa); lo hará tomando tantas muestras como se le indique en la tercera constante a la velocidad indicada en la cuarta constante (rectángulo naranja). El resultado es una matriz con tantas filas como canales se hayan solicitado y una columna por cada muestra (es decir, aquí se obtiene una matriz 2×1 ; con dos filas y una columna).

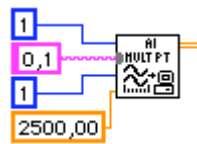


Figura 28.- Instrumento para la Captación de Formas de Onda Analógicas empleado en el programa y sus valores finales.

Seguidamente se justifican cada uno de los valores suministrados al instrumento de captación de datos (Figura 28). Comenzando por el superior:

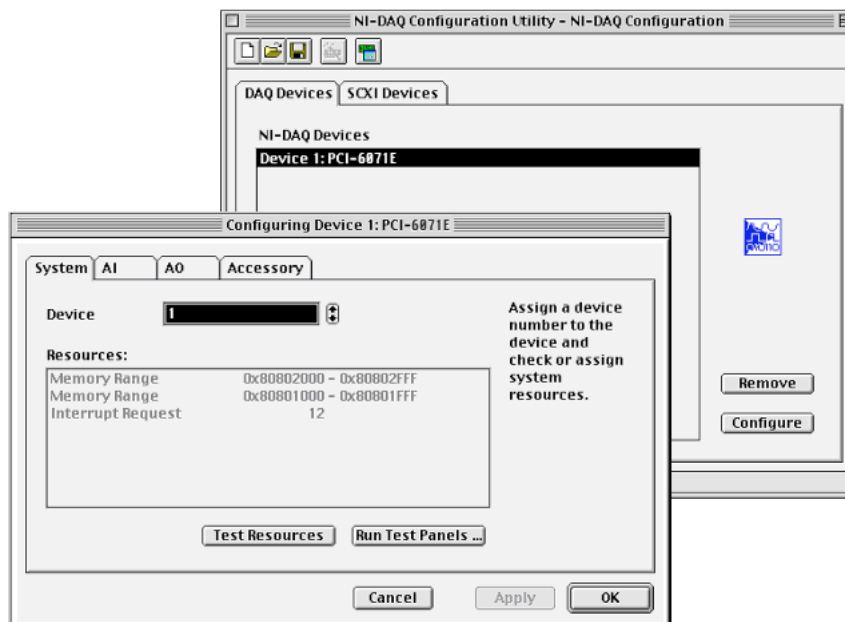


Figura 29.- Panel de control donde se indica a LabVIEW el número que corresponde a cada tarjeta instalada en el ordenador.

- El número que se asigna a cada tarjeta en el panel de control (Figura 29) es arbitrario, pero, una vez fijado, ese será el número que identifique a la tarjeta en ese ordenador [77]. En este caso se ha asignado el número 1 a la tarjeta PCI 6071-E, que es la destinada a la captación de datos. Así, al instrumento virtual de *Captación de Formas de Onda Analógicas* se le indica también que emplee la tarjeta 1.
- Como ya se ha dicho, el programa necesita medir las tensiones V_1 y V_2 de la red de la Figura 11 (página 71). Por cómo se han hecho las conexiones en la red de adecuación de señales, estas dos tensiones se miden con los canales 0 y 1 de la tarjeta.
- La forma de onda que se pretende medir es una constante, pues en este primer caso trabajamos con corriente continua. Esto significa que los datos que se van a capturar no varían en cada uno de los periodos en que se realizan las operaciones, Δt , por lo que no es necesario realizar muchas captaciones de datos en ese intervalo de tiempo ya que todos serían iguales (Figura 30); por ese motivo, para hacer más sencillo el trabajo de la tarjeta de captación y del programa, se ha optado por realizar una única medición al principio de cada intervalo. Esa es la razón de que se le haya asignado a la tercera variable un 1.

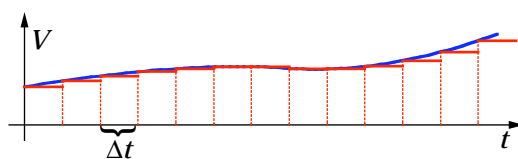


Figura 30.- En azul se ve la forma de onda que se desea captar, las líneas verticales delimitan los intervalos de captación y en rojo los valores con los que el programa trabaja en cada intervalo.

- Finalmente, como solo se va a capturar un único dato al principio de cada intervalo, el valor que se le asigne a la variable que determina las muestras por segundo que se van a realizar es ahora irrelevante. Sin embargo, por no tener influencia en este caso, y ya que en futuros montajes se optará por una velocidad de 2500 muestras por segundo, se ha preferido introducirlo ahora; pero hay que insistir en que ese valor no es importante para este programa.

Con estas conexiones, el resultado de la captación de datos será, como ya se ha dicho antes, una matriz 2×1 , formada por la tensión V_1 en la primera fila, y el valor de V_2 en la segunda.

Hay que recordar que estos valores son números comprendidos entre 0 y 10 V en ambos casos, por las restricciones que impone la tarjeta de adquisición de datos y, en consecuencia, la red que adecúa las señales para que no la dañen, lo que forzarán a que, más adelante, haya que calibrar esos valores. Además, la variable que LabVIEW asigna a esta salida, *variable de punto flotante de precisión sencilla* (SGL), tiene una precisión de hasta seis cifras decimales; es decir, podría almacenar variaciones del orden de 10^{-6} V, que son mucho menores de las que se van a emplear. Sin embargo, el resto del programa está preparado para trabajar con variables de doble precisión (DBL), por lo que LabVIEW se encarga automáticamente de la conversión de la variable de un formato al otro; de ahí que en la entrada del siguiente instrumento virtual aparezca un punto grisáceo (Figura 31).



Figura 31.- LabVIEW convierte automáticamente una variable con precisión sencilla (SGL) a doble precisión (DBL) si es necesario. Al hacer el cambio lo indica con un semicírculo gris.

El último paso de este caso *False* es separar las dos señales V_1 y V_2 en dos señales independientes, en dos matrices de una fila cada una, para facilitar las operaciones posteriores. Como esta es una acción que se va a realizar con frecuencia, se ha optado por crear un instrumento virtual independiente que se encargue de ella. Esto permitirá volver a utilizarlo tantas veces como se quiera sin la necesidad de volver a programarlo. El instrumento se llama *Dividir 2 Canales.vi* (Figura 32) y está especialmente preparado para separar dos canales de la matriz de valores devuelta por cualquier instrumento virtual de LabVIEW dedicado a la captación de datos.



Figura 32.- Instrumento virtual de creación propia llamado *Dividir 2 Canales*.

El diagrama de conexiones de este instrumento virtual es muy sencillo: la entrada, que es la matriz de dos filas que le pasa el instrumento

para la Captación de Formas de Onda Analógicas, se lleva a sendas instrucciones encargadas de aislar la primera y segunda filas. Las devolverán como dos matrices, de una fila cada una, a través de las variables *Salida 1* y *Salida 2*, respectivamente.

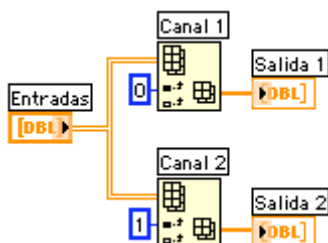


Figura 33.- Diagrama de conexiones del instrumento virtual de creación propia llamado Dividir 2 Canales.

La instrucción que se usa es la llamada *Catalogar Grupo* (Figura 34). Se emplea para seleccionar un elemento o conjunto de elementos de un grupo. LabVIEW detecta que, en este caso, la matriz tiene dos dimensiones, por lo que crea automáticamente dos índices (los terminales azules). El primer índice hace referencia a la primera dimensión (las filas de la matriz) y el segundo a la segunda dimensión (las columnas) [75][76].

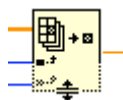


Figura 34.- Instrucción Catalogar Grupo (*Index Array*).

Para crear las dos matrices independientes con los datos de cada fila se fija el valor del primer índice mientras que el segundo se deja al aire. Con esta configuración la instrucción que tiene un 0 en su primer índice devolverá todas las columnas de la primera fila de la matriz original, y la instrucción que tiene un 1 devolverá todas las columnas de la segunda fila. Esas dos salidas son las que se llevan a sendos indicadores, *Salida 1* y *Salida 2*, y, a la vez, las que se devuelven al resto de los instrumentos cuando éste se usa dentro de otro programa, como se ha hecho, por ejemplo, en el fotograma 1 [75][76].

Aquí acaba el caso *False* de esta estructura de casos. El resultado final son dos valores de tensiones, V_1 y V_2 , de entre 0 y 10 voltios cada uno, que están almacenados en sendas matrices 1×1 .

El siguiente caso (Figura 35) se ejecuta cuando la variable *Sim* posee un valor verdadero (*True*); es decir, cuando *Simulación/Captación* se encuentra en la posición de *Simulación*. Como bien dice la leyenda, aquí se busca generar dos ondas de corriente continua cuyos valores simularán

los de V_1 y V_2 , y presentarlas con una estructura similar a la devuelta por el caso *False* (o sea, dos matrices 1×1 con los valores de la tensión V_1 en la primera y V_2 en la segunda), para que el resto del programa siga sirviendo sin necesidad de cambios.

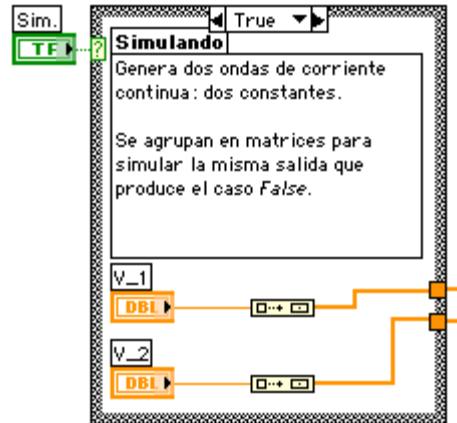


Figura 35.- Caso *True* de la estructura de casos superior del fotograma 1, y su variable *Sim.* que dicta el caso que se debe ejecutar.

Como las ondas que se pretenden simular, dos ondas de corriente continua, no son más que dos constantes que se mantienen invariables a lo largo del tiempo (o, al menos, eso es lo que se va a suponer para cada Δt), el método para simularlas podría consistir en pedirle al usuario que asigne un valor a cada variable, V_1 y V_2 , y usarlas directamente cada vez que sean necesarias. Sin embargo, como ya se ha dicho antes, otro objetivo de esta parte del programa es que los resultados en ambos casos (*True* y *False*) tengan la misma forma, por lo que es necesario prepararlos.



Figura 36.- Controles del *Panel frontal*, manejables por el usuario, asociados a las variables V_1 y V_2 del *Diagrama de conexiones*.

Se parte de dos variables separadas, V_1 y V_2 , que están unidas a sendos controles (Figura 36). LabVIEW asigna por defecto un número entero de doble precisión (DBL) a todos los controles que se crean, y, como ya se dijo, esa es la precisión que se mantendrá en todo el programa, ya que no hay ninguna necesidad de cambiarla.



Figura 37.- Instrucción Crear Matriz (*Buil Array*).

Sin embargo, es necesario obtener dos matrices 1×1 formadas con esas dos variables, para que la salida del caso *True* sea igual a la del caso *False*. Para ello se emplea la instrucción de LabVIEW *Crear Matriz* (Figura 37). Esta misma instrucción sirve, a la vez, para añadir una matriz detrás de otra o para añadir elementos a matrices n -dimensionales [75][76].

Como los datos de partida son las dos variables V_1 y V_2 formadas únicamente por un número cada una, LabVIEW crea una matriz vacía y le añade los elementos; es decir, él solo determina que, ya que no se le pasan dos matrices, no hay posibilidad de poner una matriz detrás de otra, y como tampoco se le pasa la matriz a la que añadir los elementos, la única opción es crear una matriz nueva con ellos. Así, el resultado de este paso son dos matrices 1×1 que contienen, por un lado, a V_1 y, por el otro, a V_2 . Como se ve, la entrada a la instrucción es una línea naranja fina, que indica que le llega un único número con coma flotante, y la salida es una línea naranja gruesa, que representa una matriz formada por elementos con coma flotante.

Las dos salidas de la instrucción Crear Matriz se llevan a las dos salidas de la estructura de casos, vigilando que la primera salida, que corresponde a la matriz de V_1 , vaya a la primera salida de la estructura y que la salida V_2 vaya a la segunda salida de la estructura.

A partir de aquí, el resto de las operaciones son totalmente independientes del método con que se hallan obtenido los valores de V_1 y V_2 . Por ese motivo se encuentran fuera de la estructura de casos superior.

El siguiente paso para obtener la tensión y la intensidad de la carga, que es el objetivo final del fotograma 1, consiste en convertir los valores que han llegado a la tarjeta en valores reales de la red. Como ya se dijo, para que la tarjeta de captación de datos pudiera realizar las mediciones correctamente fue necesario adecuar las señales de forma que las tensiones sean proporcionales a las reales de la red y, a la vez, no superen los 10 V admitidos por la tarjeta.

La red de adecuación de señales que se construyó para ello (Figura 38) está formada únicamente por divisores de tensión creados con

resistencias, por lo que las tensiones medidas por la tarjeta, $V_{ACH1(+)}$ y $V_{ACH2(+)}$, son siempre proporcionales a las tensiones reales, V_1 y V_2 .

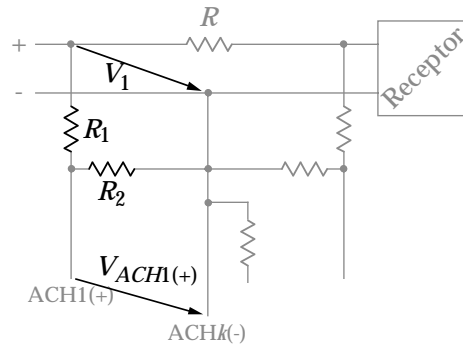


Figura 38.- Red de adecuación de señales para la medida del cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas de corriente continua. Se resaltan las variables que intervienen en el divisor de tensión 1.

Además, si bien es cierto que el valor de las resistencias varía con la temperatura, las intensidades que van a circular por la red de adecuación de señales son muy pequeñas, como se vio al diseñarla. Por eso se puede suponer también que el incremento de temperatura, y, por lo tanto, la variación del valor de la resistencia debido a ella, va a ser muy pequeño.

Por estas dos razones, la proporcionalidad y la poca variación del valor de las resistencias con la temperatura, se puede decir que las tensiones que llegan a la tarjeta y las reales de la red son siempre proporcionales.

Pues bien, la tarea de transformar los datos que han llegado a la tarjeta de nuevo, en las tensiones reales de la red, la cumple el instrumento virtual llamado *Calibrar 2 Canales* (Figura 39), instrumento que se ha creado para este programa.

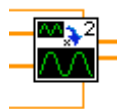


Figura 39.- Instrumento virtual de creación propia llamado *Calibrar 2 Canales*.

La función de este instrumento es multiplicar dos matrices de datos, en este caso V_1 y V_2 , por un valor concreto cada una. Esto se hace tomando las dos matrices de entrada, *Entrada Canal 1* y *Entrada Canal 2*, y multiplicándolas por sendas constantes, *Calibración Canal 1* y *Calibración Canal 2*, respectivamente (Figura 40). Para ello se ha empleado la

instrucción de LabVIEW llamada *Multiplicar* (*Multiply*) que devuelve el producto de las dos entradas, sean estas del tipo que sean [75][76].

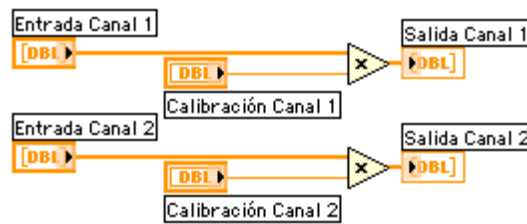


Figura 40.- Diagrama de conexiones del instrumento virtual de creación propia *Calibrar 2 Canales*.

En este caso, a cada instrucción *Multiplicar* se le proporciona una matriz y una constante; así, LabVIEW multiplicará cada celda de la matriz por la constante y devolverá otra matriz de la misma dimensión que la original. Como este instrumento debe servir para calibrar dos canales es necesario realizar este producto dos veces, una por cada canal.



Figura 41.- Instrucción *Multiplicar* (*Multiply*).

Para obtener el valor de la constante por la que hay que multiplicar cada canal se pueden usar dos métodos. Por un lado, bastaría con ver en la Figura 38 que

$$V_{ACH1(+)} = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

de donde

$$K_{R1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

es la constante por la que habría que multiplicar la tensión medida con la tarjeta para obtener la tensión de la red original, V_1 . Un proceso similar se haría con V_2 para obtener K_{R2} . Estos dos valores, K_{R1} y K_{R2} , se introducirían en el campo superior (*Calibración Canal 1*) y el inferior (*Calibración Canal 2*) del instrumento virtual, respectivamente.

Sin embargo, con este método se está suponiendo, entre otras cosas, que los valores de las resistencias que se han usado en la red de adecuación de señales son exactos y que la resistencia de los hilos empleados es despreciable. Si no existiera otra opción, el error introducido

con estas suposiciones podría ser asumible por lo pequeño que resulta; pero, como veremos, no va a ser necesario.

El otro método para encontrar el valor de las constantes consiste en medir, con un aparato externo, bien calibrado, cada una de las tensiones reales de la red, V_x , y comprobar en la pantalla del ordenador el valor que le llega a la tarjeta de captación de datos, $V_{ACHx(+)}$. Así,

$$K_{Rx} = \frac{V_x}{V_{ACHx(+)}}$$

es la fórmula general de la constante buscada para cada canal x . Este último es el método que se recomienda en este caso.

Los valores que se han empleado para ambas constantes son $K_{R1} = 22$ y $K_{R2} = 22$, como se ve en la Figura 24 (pág. 82).



Figura 42.- Instrumento virtual de creación propia llamado *Obtener_V_I_2Canales*.

El siguiente paso del programa general sirve para determinar los valores de la tensión de la carga, V , y la intensidad, I , que circula por ella a partir de los valores de las tensiones V_1 y V_2 . Para ello se emplea el instrumento virtual *Obtener_V_I_2Canales*, que también se ha creado expresamente para esta tesis (Figura 42).

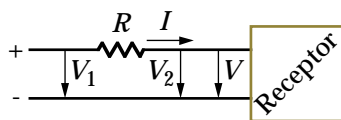


Figura 43.- Tensiones reales de la red medidas con la tarjeta.

Para entender rápidamente el programa basta con observar la Figura 43. Para empezar, en ella se puede ver que $V = V_2$; es decir, la tensión de la carga es igual a la tensión medida por la *Entrada de Tensión 2* de la tarjeta; de ahí que se lleve directamente a la *Salida de Tensión Vc* (Figura 44).

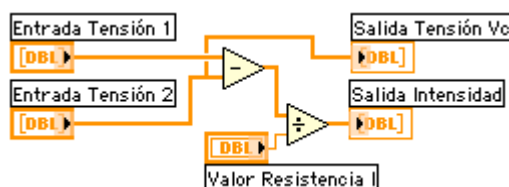


Figura 44.- Diagrama de conexiones del instrumento virtual de creación propia *Obtener_V_I_2Canales*.

Para obtener la intensidad de la carga, I , basta ver que

$$I = \frac{V_R}{R} = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

Esa es precisamente la operación que realiza la segunda parte del programa (Figura 44): toma la matriz de la *Entrada de Tensión 1*, que es la que corresponde a V_1 , y le resta la matriz de la *Entrada de Tensión 2*, V_2 , para obtener el valor de la tensión en los bornes de la resistencia R . La resta se realiza con la instrucción de LabVIEW *Restar* (Figura 45) que devuelve el resultado de sustraer al primer elemento el segundo. En este caso, al tratarse de dos matrices, LabVIEW devuelve la primera menos la segunda [75][76].



Figura 45.- Instrucción Restar (*Subtract*).

A continuación se divide la tensión de la resistencia por el valor de esa resistencia. Este valor, R , proporcionado por el usuario, es el valor de la resistencia, en ohmios, que se ha intercalado en el hilo entre los puntos donde se miden las tensiones V_1 y V_2 ; se puede averiguar midiéndolo con un ohmímetro. En la Figura 24 (en la página 82) el valor de la resistencia es 2Ω . Para efectuar la división se emplea la instrucción de LabVIEW *Dividir* (93) que devuelve otra matriz con todas las celdas de la matriz original divididas por la constante [75][76].



Figura 46.- Instrucción Dividir (*Divide*).

La matriz resultante es ya la matriz de la intensidad de la carga, y es la que se devuelve al resto del programa, completando así la función del instrumento virtual.

El último paso que se realiza en este fotograma consiste en extraer los valores de tensión e intensidad de sus matrices y devolverlos como dos

constantes que se guardarán en los indicadores llamados V_c e I (Figura 47).

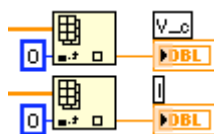


Figura 47.- Extracción del único elemento que contiene cada matriz y su representación en la pantalla.

Para ello se vuelve a emplear el instrumento virtual *Catalogar grupo*; LabVIEW detecta que la matriz original solo posee una única dimensión y por eso solo activa un único índice. Así, cuando a ese índice se le conecta la constante 0, se le está pidiendo al instrumento que extraiga el elemento de la matriz localizado en la posición 0, es decir, el primer elemento de la matriz; que además, por cómo se construyó ésta, se sabe que es el único elemento que tiene. Este número se lleva a un indicador que muestra en la pantalla el resultado obtenido (Figura 48). La misma operación se repite para la otra matriz. El resultado final son los dos valores de la tensión de la carga y la intensidad que circula por ella, que quedan almacenados en dos variables asociadas a dos indicadores.

$$V = 0,00 \text{ V} \quad I = 0,00 \text{ A}$$

Figura 48.- Indicadores, en el panel frontal, que muestran los valores actuales de la tensión y la intensidad de la carga.

Otra de las acciones que se realizan cuando el usuario modifica el valor del interruptor *Simulación/Captación* es mostrar u ocultar los dos campos que permiten al usuario introducir los valores de V_1 y V_2 en la simulación. Se pretende que cuando el programa esté simulando (la variable *Sim.* es *True*, Figura 49) los dos campos sean visibles, y que desaparezcan si el programa está captando datos (la variable *Sim.* es *False*, Figura 51). Además resulta interesante, para evitar operaciones innecesarias, que LabVIEW oculte los campos solo si son visibles, y que los muestre si no lo son; es decir, no se quiere que esté ocultando o mostrando permanentemente los campos en cada iteración, sino que lo haga solo en la iteración en que es necesario; esto es, cuando cambie el valor de la variable *Simulación/Captación*.

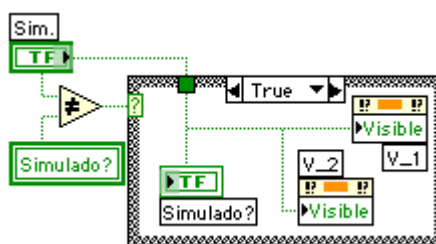


Figura 49.- Caso *True* de la estructura de casos inferior del fotograma 1, y su variable *Sim.* que dicta el caso que se debe ejecutar.

Para ello se comparará el valor actual de la variable *Simulación/Captación* con el valor que adquirió en su último cambio. Para saber cuál era este valor basta con almacenarlo en una variable auxiliar, que se ha llamado *Simulado?*, cuyo valor refleja el estado que tuvo *Simulación/Captación* en la iteración anterior, antes de que el usuario cambiara su valor.

La comparación se realiza mediante la instrucción de LabVIEW llamada *¿Desigual?* (Figura 50). Si las dos variables que se conectan en las entradas de la instrucción (en este caso las variables *Simulación/Captación* y *Simulado?*) tienen valores iguales ésta devuelve *False* en su salida, y si no son iguales devuelve *True*. La instrucción acepta variables de cualquier tipo [75][76].



Figura 50.- Instrucción *¿Desigual?* (*Not equal?*).

En concreto, con estas conexiones, la instrucción *¿Desigual?* devolverá *True* cuando cambie el valor de la variable *Simulación/Captación*, y *False* cuando no cambie. Esa salida se une al selector de la estructura de casos inferior, tal y como se ve en la Figura 49.

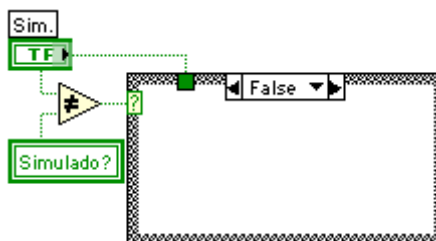


Figura 51.- Caso *False* de la estructura de casos inferior del fotograma 1, y su variable *Sim.* que dicta el caso que se debe ejecutar.

Hay que recordar que se quieren ocultar o mostrar los campos solo cuando haya un cambio en el estado de la variable *Simulación/Captación*, es

decir, cuando *¿Desigual?* devuelva *True*. Por ese motivo, las instrucciones para ocultar o mostrar los campos se deben incluir en el caso *True* de la estructura, y se puede dejar el caso *False* vacío (Figura 51).

En el caso *True* (Figura 49) se incluyen las dos instrucciones que hacen que los controles para *V_1* y *V_2* aparezcan o desaparezcan. Esto se consigue asignando a la propiedad *Visible* de cada control el valor *True* para que sea visible y *False* para que no lo sea. La propiedad visible de un control se modifica con la instrucción de LabVIEW llamada *Nudo de propiedad* (Figura 52), que sirve para leer o modificar un gran conjunto de propiedades de instrumentos virtuales, objetos e incluso de la propia aplicación. Basta con indicarle en el campo *class* el elemento al que se le quiere cambiar la propiedad, en *name 1*, *name 2*, etc., la propiedad de que se trata, y unirla a la variable adecuada [75][76].

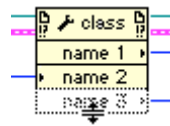


Figura 52.- Instrucción Nudo de Propiedad (*Property Node*).

Lo que aquí se busca es que cuando se está simulando, o sea, cuando la variable *Simulación/Captación* es verdadera, que la visibilidad de los controles también lo sea; y, de la misma forma, cuando no se está simulando no queremos que se vean. Este comportamiento se puede conseguir uniendo la variable *Simulación/Captación* a la propiedad *Visible* de cada control.

Además, es aquí donde se pide a LabVIEW que almacene el estado actual de la variable *Simulación/Captación* en el indicador *Simulado?*. Como ya se ha visto este indicador es el que sirve para poder comparar el estado que tuvo la variable *Simulación/Captación* antes de que el usuario cambiara su valor. Programado de esta forma, el almacenamiento del valor antiguo de la variable *Captación/Simulación* solo tiene lugar una vez, que es justo después de que haya ocurrido el cambio de estado y el programa se haya dado cuenta de ello.

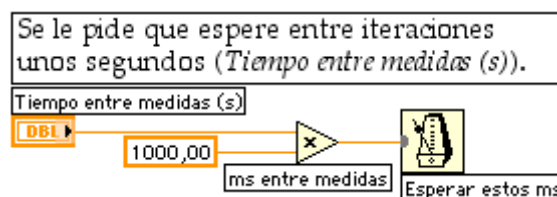


Figura 53.- Sección del código del fotograma 1 encargada de obligar al programa a respetar el tiempo entre medidas solicitado por el usuario.

La última sección de código de este fotograma (Figura 53) tiene por misión obligar a LabVIEW a detenerse lo suficiente para que Δt , que es el tiempo entre medidas, dure tanto como haya solicitado el usuario mediante el control *Tiempo entre medidas (s)*. Esta espera se realiza mediante la instrucción de LabVIEW llamada *Espera Hasta el Siguiente Múltiplo de ms* (Figura 54).



Figura 54.- Instrucción llamada Espera Hasta el Siguiente Múltiplo de ms (*Wait Until Next ms Multiple*).

Esta instrucción obliga a LabVIEW a detener las futuras operaciones hasta que el reloj del procesador alcance un múltiplo del tiempo que se indica a la instrucción en su entrada. Este tiempo debe estar en milisegundos [75][76]. El siguiente ejemplo ayuda a entender mejor su funcionamiento: si en la entrada del instrumento se conecta una constante de valor 2000 (2 segundos) el instrumento no permitirá que se inicie ninguna operación hasta que el contador interno del ordenador alcance un valor múltiplo de 2000; es decir, hasta que valga $2000 \times x$, siendo x un número natural comprendido entre 0 y $2^{32} - 1$, que es el rango admitido por LabVIEW para la variable de tiempo. De esta manera, independientemente del momento en que se inicie el programa, por ejemplo a los 2780 ms, LabVIEW esperará hasta que el reloj alcance el valor 4000 ms para seguir operando. Se ve, entonces, que es muy posible que la primera iteración del programa no dure exactamente los 2000 s, pero sí lo harán el resto.

Que la primera iteración no tenga la misma duración que el resto no afecta al cálculo del coeficiente, siempre que se use su verdadera duración, Δt_0 , en el cálculo. Es decir, el cálculo del coeficiente sería:

$$c_{pP} = \frac{t_f \left((VI)^2 \Delta t_0 + \sum_1^{t_f} (VI)^2 \Delta t \right)}{\left(VI \Delta t_0 + \sum_1^{t_f} VI \Delta t \right)^2}$$

donde Δt es una constante en todas las iteraciones. Sin embargo, el valor concreto de Δt en cada iteración es irrelevante, siempre y cuando se use el mismo en cada iteración del cálculo del cociente. Por eso, la fórmula general sigue siendo válida. Es decir, forzar a que Δt sea constante desde

la segunda iteración en adelante es, una vez más, una cuestión estética y no una necesidad del cálculo.

Como ya se ha visto, a la instrucción *Espera Hasta el Siguiete Múltiplo de ms* hay que pasarle la duración del intervalo en milisegundos. Sin embargo, se ha preferido poner el valor de la variable Δt , en el panel frontal, en segundos, por ser una unidad más habitual. Así, antes de conectar el control *Tiempo entre medidas (s)* a la instrucción, se ha multiplicado su valor por 1000, como se ve en la Figura 53.

En resumen, este fotograma es el encargado de realizar la captación o simulación de los datos con los que se trabajará, de obtener a partir de ellos los valores de tensión e intensidad de la carga, de mostrar u ocultar los campos V_1 y V_2 cuando es necesario, y de detener el programa hasta que se cumpla el tiempo entre medidas.

7.2.11.2.4. Fotograma 2

El penúltimo fotograma (Figura 55) tiene como misión determinar los valores de Δt y del tiempo de facturación que ha transcurrido hasta ese momento.

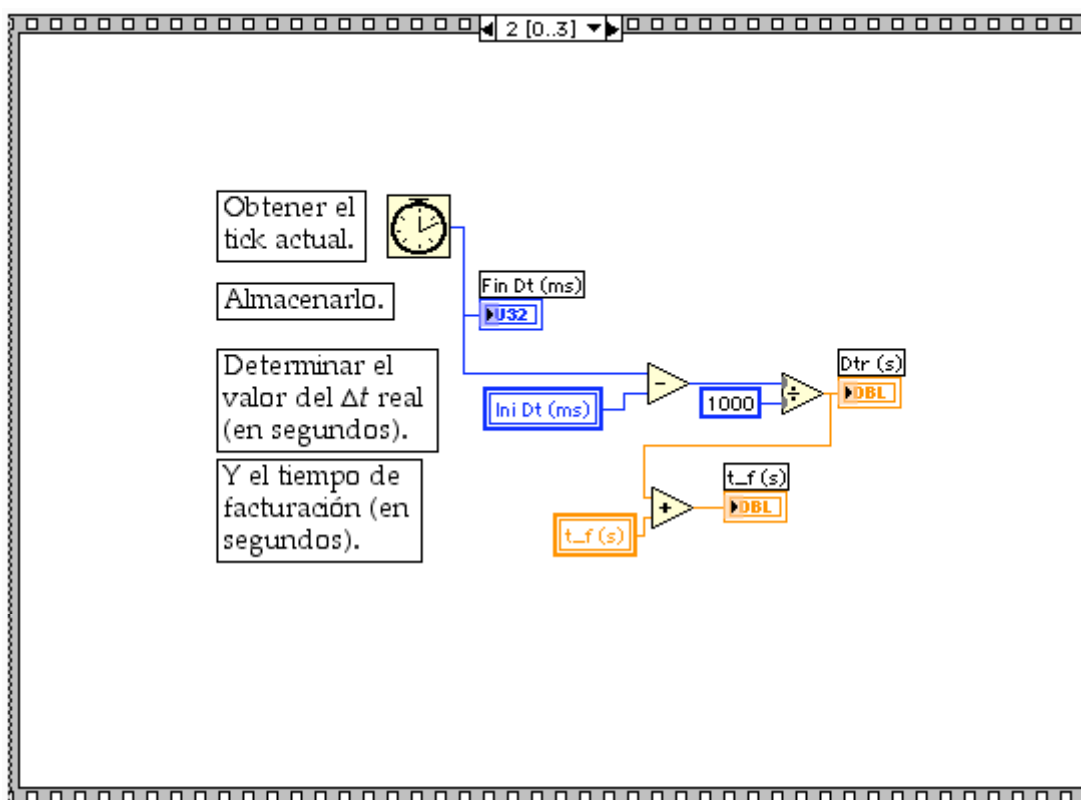


Figura 55.- *Fotograma 2* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

Para ello se ha dividido la programación en cuatro secciones distintas, que son las que se muestran en la Figura 56. La misión de cada una de las secciones es la siguiente:

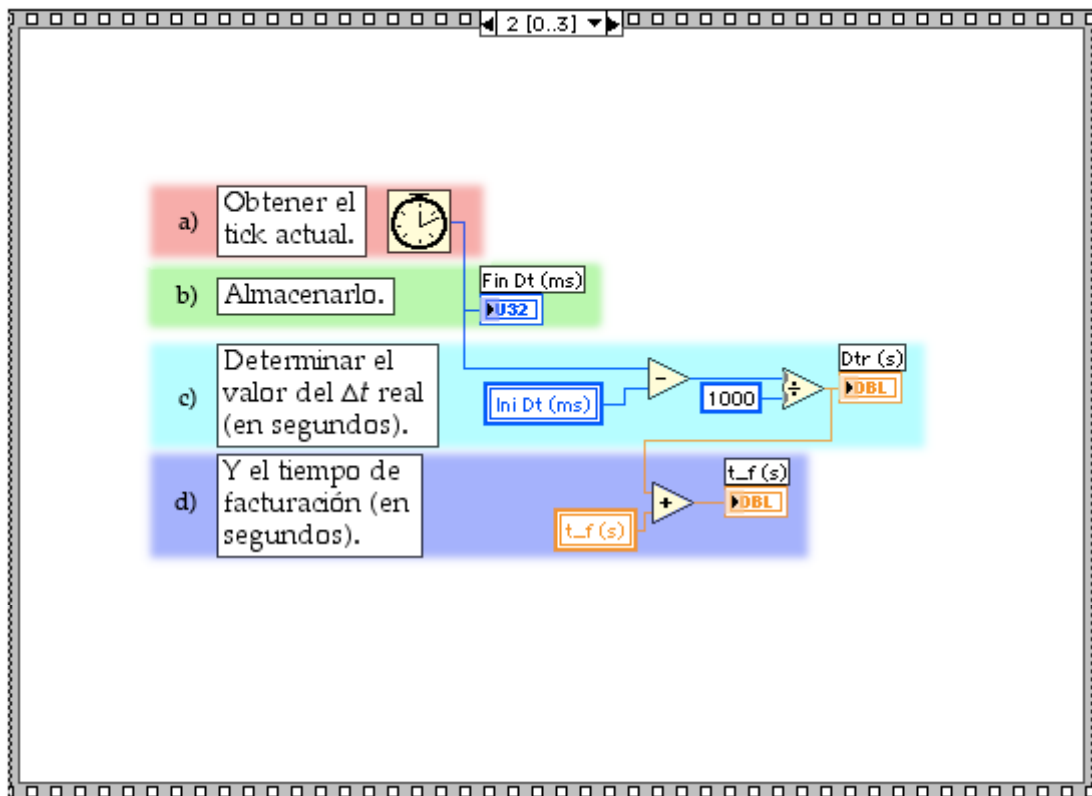


Figura 56.- Las cuatro tareas que desempeña el *fotograma 2*.

- En la sección a) se le pide a LabVIEW que vuelva a determinar el valor actual de los ticks del procesador. Esta operación se realiza con el instrumento *Cuenta de Ticks* que ya se ha explicado.
- En b) se almacena el valor actual devuelto por *Cuenta de Ticks* en una variable auxiliar. Este valor, que es el tiempo en el que acaba el Δt actual, se usará también en la próxima iteración del programa como tiempo de inicio del Δt siguiente, por eso hay que guardarlo en otra variable.
- c) determina la duración real del Δt de esta iteración. Para ello resta del tick actual, obtenido en este fotograma, el valor que se almacenó en la variable *Ini Dt (ms)*, que hay que recordar que es el tiempo en que se inició este intervalo. Por último, como en el cálculo del cociente se trabaja en el Sistema Internacional de Unidades donde el tiempo se mide en

segundos, es necesario transformar los milisegundos en segundos; por eso se ha dividido el resultado de la resta por 1000. Este valor final de Δt se usará más adelante, en el fotograma 3, así que se ha almacenado en la variable auxiliar $Dtr (s)$.

- La sección d) de este fotograma se encarga del cálculo del tiempo de facturación. Para ello se suma el incremento de tiempo del periodo actual, calculado en el paso c) de este fotograma, al tiempo de facturación total, $t_f (s)$, calculado en el periodo anterior. El resultado de la suma, el tiempo de facturación total hasta ese momento medido en segundos, se guarda de nuevo en la variable $t_f (s)$.

Se ha tenido en cuenta, a la hora de almacenar $Dtr (s)$, que los periodos de tiempo entre medidas son siempre muy inferiores al valor que puede almacenar la variable. Esto es así porque se ha escogido una variable de 64 bits de doble precisión, que puede almacenar hasta 1.79×10^{308} ticks $\approx 5.68 \times 10^{297}$ años [78]. Lo mismo ocurre con el tiempo de facturación $t_f (s)$.

Tampoco hay que preocuparse por el salto a cero que realiza una variable de 32 bits de precisión simple cuando tiene que almacenar un valor superior a $2^{32} - 1$, que es el mayor número que puede almacenar. En este fotograma no se está buscando el valor exacto del tiempo, sino la duración del incremento (tiempo del final del intervalo menos tiempo del inicio). Por poner un ejemplo, supóngase que el inicio del intervalo tiene lugar en el valor $2^{32} - 1 = 4294967295$ (que, como ya se vio, es el máximo admitido por esta variable) y que el intervalo acaba en $(2^{32} - 1) + 5 = 4294967300$; es decir, el intervalo dura 5 ticks. Como ya se dijo, LabVIEW no podrá almacenar ese número, por ser superior al límite máximo de la variable, y lo representará como si fuera el número 4 (el 0 también se cuenta); es decir, ha *truncado* el número. Para determinar ahora la duración del intervalo se le pide a LabVIEW que reste el valor final del intervalo menos el valor inicial del intervalo, y lo hará con las variables que él ha guardado; es decir, hará $4 - 4294967295 = -4294967291$. Pero, una vez más, LabVIEW no puede almacenar ese número en una variable de 32 bits sin signo (por eso se ha escogido U32 y no I32), así que lo convierte a un número que sí puede almacenar, y ese número es el $4294967296 - 4294967291 = 5$ (el máximo de números que se pueden representar con la variable de 32 bits, incluyendo el 0, menos el número

negativo que se obtuvo), que es la duración del intervalo que se estaba buscando.

Por lo tanto, en este fotograma se han obtenido el valor del final del periodo Δt , almacenado en *Fin Dt (ms)*, la duración del periodo actual de la medida *Dtr (s)*, y la duración del periodo de facturación entero, guardado en la variable *t_f (s)*.

7.2.11.2.5. Fotograma 3

El último fotograma del programa para calcular el cociente de pérdidas por consumo de potencia en sistemas de corriente continua es el encargado de realizar los cálculos finales y representar los resultados en la pantalla del ordenador. Además también realiza una operación necesaria para la medida en el siguiente intervalo.

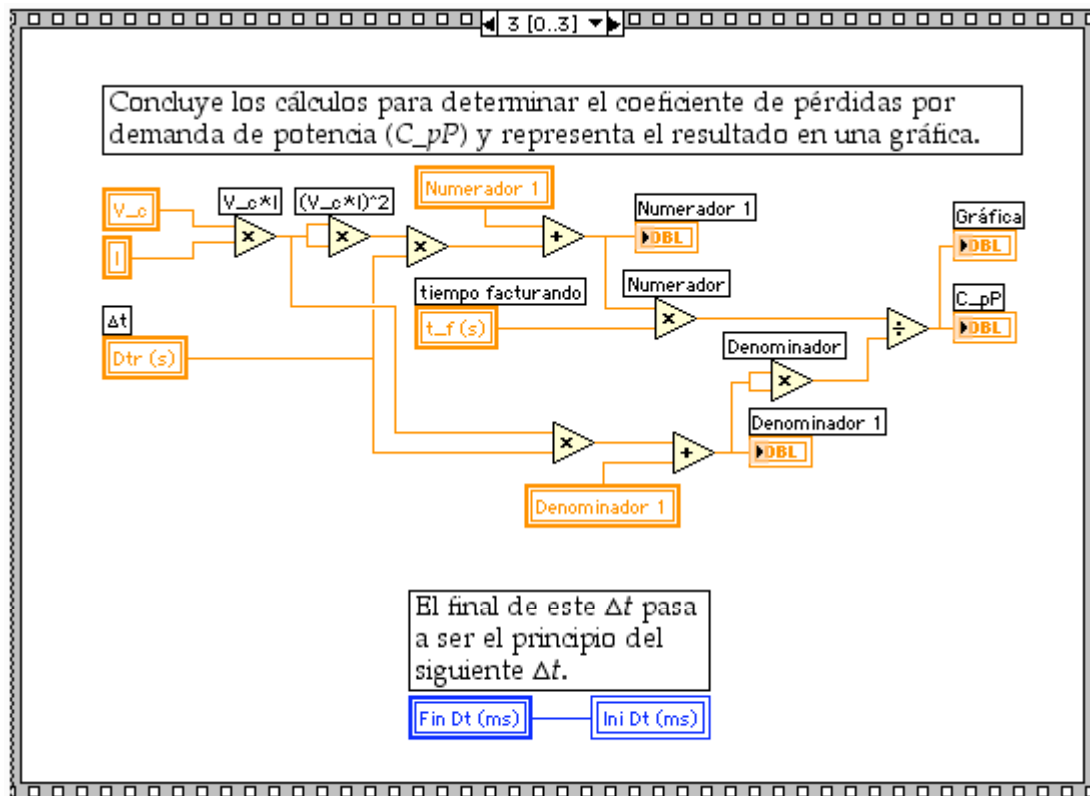


Figura 57.- *Fotograma 3* de los cuatro que componen la *estructura secuencial principal* del programa.

La parte superior del programa se dedica a terminar el cálculo del cociente según la fórmula ya vista

$$c_{pP} = \frac{t_f \sum_0^{t_f} (VI)^2 \Delta t}{\left(\sum_0^{t_f} VI \Delta t \right)^2}$$

Para ello primero se calcula el numerador (Figura 58). Esta tarea se ha dividido en cinco pasos:

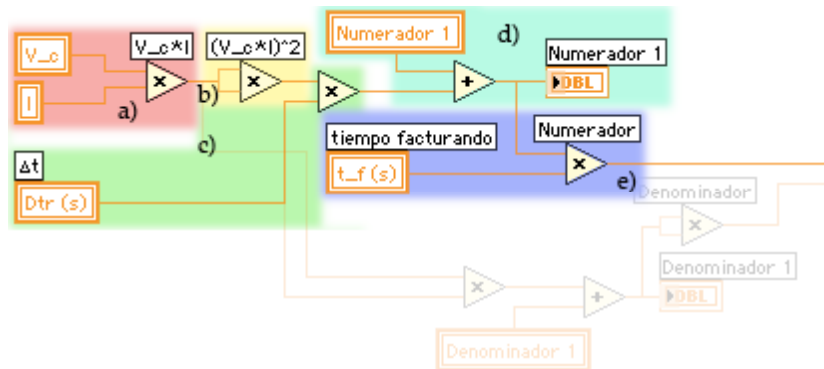


Figura 58.- Cálculo del numerador del cociente de pérdidas por consumo de potencia.

- En a) se calcula el producto VI de la iteración actual. Para ello se crean sendas instancias de las variables V_c e I , de forma que se puedan leer sus valores actuales (que se determinaron en el fotograma 1), y a continuación se multiplican empleando la instrucción apropiada de LabVIEW.
- b) eleva al cuadrado dicho producto. LabVIEW no dispone de una instrucción específica para elevar un número a otro, pero como elevar al cuadrado no es más que multiplicar un número por sí mismo, para conseguir este resultado en LabVIEW basta con emplear la instrucción *Multiplicar*, y llevarle a sus dos entradas el mismo valor, en este caso el resultado de a). Así, en este paso se consigue obtener $(VI)^2$.
- El siguiente paso en la obtención del numerador del cociente es multiplicar $(VI)^2$ por el incremento de tiempo, es decir, multiplicarlo por la variable Dtr (s) que almacena la duración del intervalo de medida actual, en segundos, y que se obtuvo en el fotograma anterior, para obtener $(VI)^2 \Delta t$. Esta

operación es la que se realiza en la sección c), donde se toma el resultado de b) y se multiplica por el valor de la variable Dtr (s).

- d) es el encargado de realizar el sumatorio de todos los valores de $(VI)^2 \Delta t$ obtenidos durante todo el proceso de

facturación, $\sum_0^{t_r} (VI)^2 \Delta t$. El método que se emplea para

realizar el sumatorio es sumar al contenido de la variable *Numerador 1* el valor obtenido en el paso c), y el resultado de esta suma se lleva de nuevo a la variable *Numerador 1*. Es decir, *Numerador 1* guarda siempre el valor de todo el sumatorio, desde la iteración 0 en que se inició el periodo de facturación hasta la iteración anterior a la actual, y es en este paso donde se le suma el valor actual de $(VI)^2 \Delta t$. El resultado de esta suma se vuelve a introducir en la misma variable *Numerador 1* para poder usarla en la siguiente iteración.

- En el último paso, e), para obtener el numerador del cociente se multiplica el valor del sumatorio por la duración del periodo de facturación. Como ya se vio, este periodo se toma desde el tiempo en que inicia la medida hasta el tiempo actual; por lo tanto va aumentando en cada iteración. Su valor se determinó en el fotograma anterior y está almacenado en la variable t_f (s). Al realizar el producto del valor de *Numerador*

1 por t_f (s), se obtiene ya $t_f \sum_0^{t_r} (VI)^2 \Delta t$, que es el numerador

buscado.

Seguidamente, se calcula el denominador del cociente en tres pasos (Figura 59):

- calcula $VI\Delta t$ multiplicando los valores de VI y de Δt ya usados en el cálculo del numerador.

- realiza el sumatorio $\sum_0^{t_r} VI\Delta t$ de la misma forma ya explicada

en el paso d) del cálculo del numerador, solo que en este caso el resultado se almacena en una nueva variable llamada *Denominador 1*.

- Por último, c) es el encargado de elevar al cuadrado el resultado del paso anterior, de la misma forma ya explicada en el apartado b) del cálculo del numerador, para obtener

finalmente el valor $\left(\sum_0^{t_f} VI\Delta t \right)^2$ del denominador.

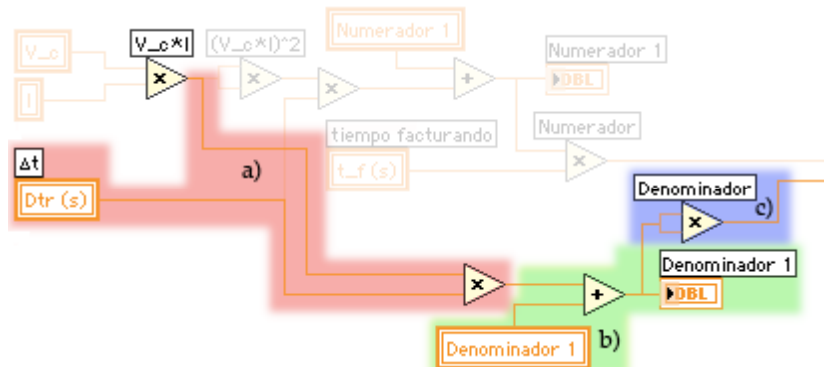


Figura 59.- Cálculo del denominador del cociente de pérdidas por consumo de potencia.

El paso final del cálculo del cociente es dividir el numerador por el denominador y llevar el resultado a una gráfica y un indicador (Figura 60). Como ya se vio más arriba, el único número que interesa de los mostrados en el panel frontal del instrumento virtual es el del indicador C_{pP} (Figura 61 a), que es el valor que tiene el cociente en cada momento y que será el que haya que usar cuando $t = t_f$. Además, se ha querido llevar también el resultado a un instrumento virtual, creado por National Instruments, llamado Gráfico de formas de onda (*Waveform Charts*), que es el encargado de representar a lo largo del tiempo los diferentes valores que adquiere el cociente (Figura 61 b). Sin embargo, debe quedar claro que la representación mostrada en este gráfico, la evolución del cociente a lo largo del periodo de facturación, no tiene valor a la hora de aplicar el cociente.

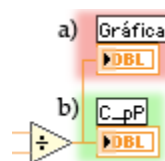


Figura 60.- Pasos finales del cálculo del cociente de pérdidas por consumo de potencia.

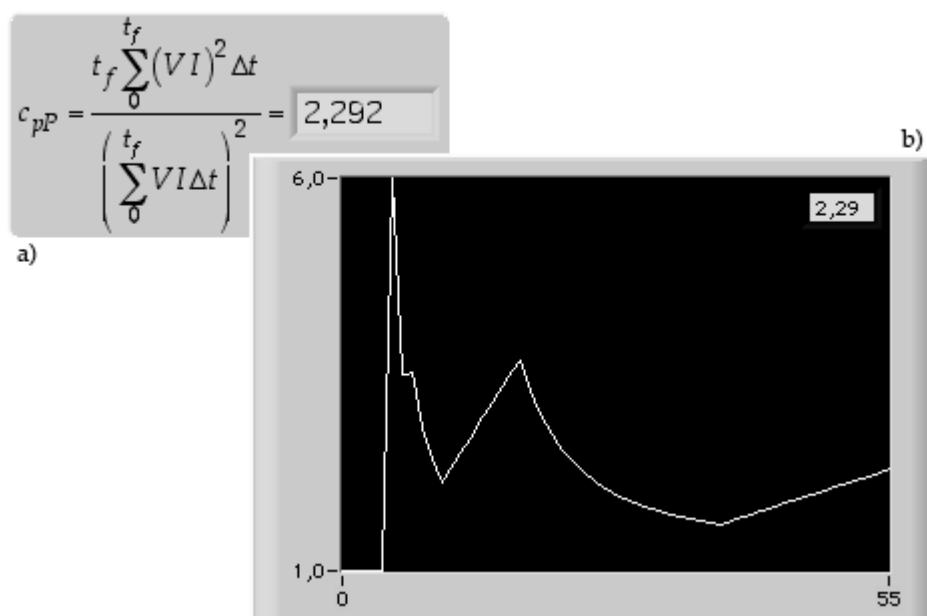


Figura 61.- Las dos representaciones del cociente de pérdidas por consumo de potencia en el panel frontal del instrumento virtual.

La última instrucción de este fotograma, y por lo tanto del instrumento virtual, se encarga de hacer que el tiempo final del intervalo de medida actual se convierta en el tiempo inicial del intervalo de medida siguiente (Figura 62).

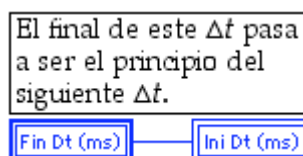


Figura 62.- Última instrucción del instrumento virtual: hacer que el tiempo inicial del siguiente intervalo de medida sea igual al tiempo final del intervalo actual.

Así pues, este último fotograma termina de calcular el cociente, representa en la pantalla del ordenador su valor y, por último, fija el tiempo de inicio del intervalo siguiente de medida.

Como nota a parte, se quiere indicar que todos los elementos creados para este y los siguientes programas, incluso los instrumentos virtuales de creación propia, contienen una ayuda contextual que se puede ver seleccionando, en la barra de menú, la opción *Help->Show Context Help*. Ahí se describe qué acción realiza el elemento o instrumento virtual y, cuando es necesario, qué valores hay que suministrarle y con qué unidades.

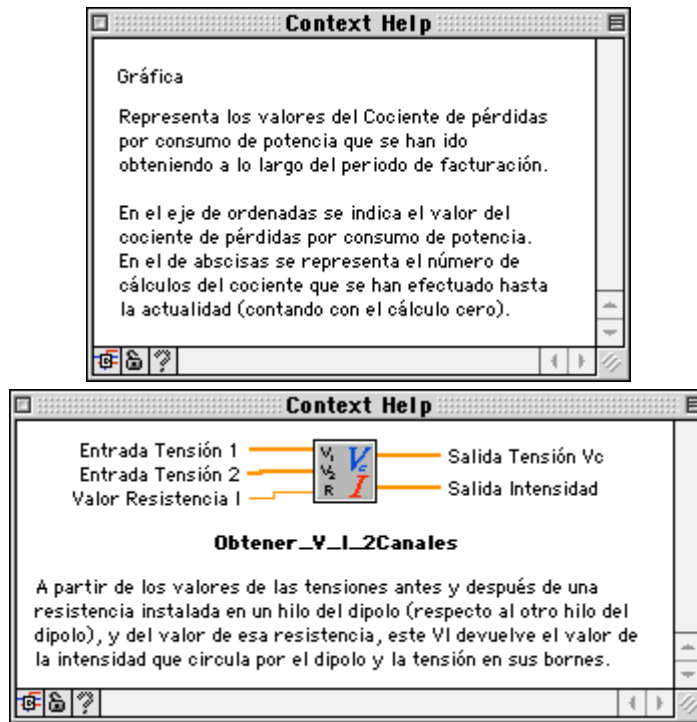


Figura 63.- Ayudas contextuales del elemento *Gráfica* y el instrumento virtual *Obtener_V_I_2Canales*.

Y con esto concluye la descripción de este instrumento virtual.

7.2.12. Sistemas complejos de corriente continua

El estudio anterior se ha referido al sistema más simple de corriente continua: un generador, una línea de dos hilos y un receptor. Es cierto que los sistemas pueden ser más complejos, con dínamos y líneas en paralelo o con otras conexiones que incluyan, por ejemplo, sistemas de protección. Sin embargo, el estudio realizado hasta aquí es completo, pues cualquiera que sea la complejidad del sistema eléctrico de corriente continua, puede descomponerse en dos dipolos: uno es el receptor, y el otro el resto del sistema, que se conecta al receptor por dos terminales. El resto del sistema puede aproximarse por un dipolo de Thévenin, es decir, por una fuente de tensión constante en serie con una resistencia [56], que es la resistencia R_s del sistema, con lo que el estudio del sistema complejo queda reducido al estudio realizado hasta aquí del sistema simple, y las conclusiones de ese estudio son válidas para cualquier sistema de corriente continua.

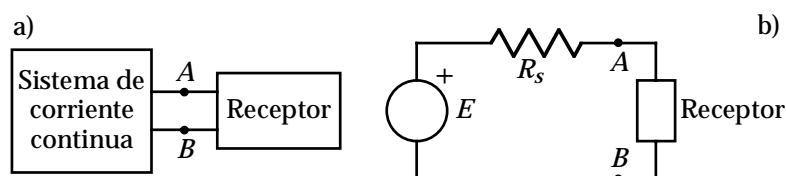


Figura 64.- a) Por muy complejo que sea un sistema de corriente continua, un receptor está conectado a él por dos terminales, el A y el B. b) El sistema a la izquierda de AB puede aproximarse por un dipolo de Thévenin, es decir, por una fuente de tensión constante en serie con una resistencia R_s , que es la resistencia del sistema.

7.3. Energía que se pierde en la resistencia de los sistemas monofásicos por consumo de potencia

7.3.1. Sistemas monofásicos

Los sistemas monofásicos se utilizaron inicialmente en diferentes partes del mundo [79] tanto para transportar energía eléctrica en alta tensión, como para distribuirla en baja tensión. El sistema monofásico más simple consta de un generador de corriente alterna, que es un generador que produce fuerza electromotriz sinusoidal, de cuyos dos terminales parten dos hilos hasta los dos terminales del receptor, que es un dipolo sinusoidal.

Se llamará *dipolo sinusoidal* a cualquier *objeto de dos terminales tal que, si su tensión es sinusoidal, su intensidad de régimen permanente es también sinusoidal de la misma frecuencia que su tensión* [56]. En particular, todo receptor que se pueda describir por una combinación de resistencias, inductancias y condensadores es un dipolo sinusoidal.

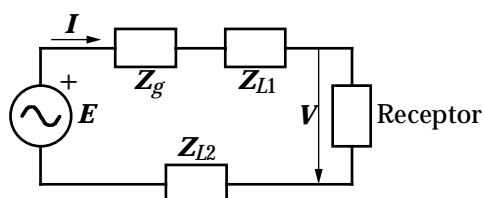


Figura 65.- Sistema monofásico.

Muchos generadores de corriente alterna se pueden describir con suficiente aproximación por medio de una fuente de tensión sinusoidal de valor instantáneo $e = E_m \text{sen}(\omega t)$, en serie con una resistencia y una autoinducción. Para los efectos de cálculo de potencias y energías, cada

hilo de la línea puede ser representado por una resistencia en serie con una autoinducción, pues pueden ignorarse los parámetros transversales, que tienen poca influencia en el balance energético. Si también el receptor es sinusoidal, la intensidad instantánea de régimen permanente del circuito es sinusoidal de la misma frecuencia que la fuerza electromotriz del generador, de la forma $i = I_m \text{sen}(\omega t - \varphi)$, y también las tensiones entre dos puntos cualesquiera son sinusoidales de la misma frecuencia. Se trata, pues, de una red sinusoidal [56]. En estas condiciones el sistema monofásico puede ser analizado como una red fasorial [56][57], y descrito, por tanto, como en la Figura 65. En ella $\mathbf{Z}_g = R_g + jX_g$ es la impedancia del alternador, $\mathbf{Z}_{L1} = R_{L1} + jX_{L1}$ es la impedancia del hilo 1 de la línea, $\mathbf{Z}_{L2} = R_{L2} + jX_{L2}$ es la impedancia del hilo 2, $\mathbf{Z}_L = \mathbf{Z}_{L1} + \mathbf{Z}_{L2} = (R_{L1} + R_{L2}) + j(X_{L1} + X_{L2}) = R_L + jX_L$ es la impedancia de la línea, y $\mathbf{Z}_s = \mathbf{Z}_g + \mathbf{Z}_L = (R_g + R_L) + j(X_g + X_L) = R_s + jX_s$ la impedancia del sistema monofásico (números complejos en negrita).

7.3.2. Potencia de dipolos sinusoidales

La potencia instantánea que absorbe un dipolo sinusoidal es

$$p = vi = V_m \text{sen}(\omega t) I_m \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

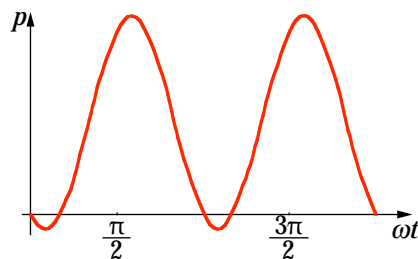


Figura 66.- Representación gráfica de la potencia instantánea que absorbe un dipolo sinusoidal con $\varphi = 30^\circ$.

Es una función periódica del tiempo de frecuencia doble que la tensión o la intensidad, o de periodo la mitad del periodo de la tensión o de la intensidad. Se representa en la Figura 66. En concreto, el periodo de la tensión o la intensidad en sistemas de 50 Hz es de $1/50 = 0.02\text{s} = 2\text{cs}$, y en los de 60 Hz es de $1/60\text{s}$, por lo que el periodo de la potencia es en los sistemas de 50 Hz de $1/100\text{s} = 1\text{cs}$, y en los de 60 Hz de $1/120\text{s} \approx 8.3\text{ms}$.

El valor medio en un periodo de esa potencia se llama potencia activa, y vale [56][57]

$$P = VI \cos \varphi$$

$\cos \varphi$ es el factor de potencia del receptor.

Como a las frecuencias usuales de los sistemas eléctricos de energía, que son frecuencias de 50 ó 60 Hz, el periodo de la potencia es una centésima de segundo o menor, cualquier tiempo puede considerarse, en la práctica, para los cálculos de energía como los que aquí interesan, múltiplo del periodo de la potencia, sin error apreciable. De esta forma, la energía que absorbe un receptor durante un tiempo t se puede hallar multiplicando la potencia activa por ese tiempo: $W = Pt$ [56][57]. Esta fórmula es la misma que la que proporciona el valor de la energía que se entrega a un receptor de corriente continua, salvo que, en el de corriente continua, P es la potencia instantánea, que, por ser constante, coincide con su valor medio. Esta coincidencia de fórmulas va a facilitar notablemente el estudio que se inicia ahora sobre los sistemas monofásicos, pues va a resultar, en muchos aspectos, solo adaptación del realizado para los sistemas de corriente continua.

7.3.2.1. Potencias activas en sistemas monofásicos

Si para el balance energético se emplea en los sistemas monofásicos la potencia activa, las relaciones energéticas son semejantes a las de los sistemas de corriente continua, excepto por la aparición del $\cos \varphi$ como factor en la fórmula de la potencia activa. En concreto, el teorema de Tellegen aplicado a un sistema monofásico como el representado en la Figura 65, conduce a la fórmula (7.3), que se reproduce de nuevo a continuación con notación adaptada [56][57].

$$P_a = P_{pa} + P_{pL} + P = P_p + P$$

P_a es la *potencia activa que genera el alternador*.

$P_{pa} = rI^2$ es la *potencia activa que se pierde en la impedancia interna del alternador*, que coincide con la *potencia que se pierde en su resistencia interna*. I es el valor eficaz de la intensidad del sistema monofásico.

$P_{pL} = R_L I^2$ es la *potencia activa que se pierde en la resistencia de la línea*.

Se llama resistencia de la línea a R_L , que es la suma de la resistencia de los dos hilos de la línea.

P es la potencia activa que absorbe el receptor.

$P_p = P_{pa} + P_{pL} = rI^2 + R_L I^2 = (r + R_L) I^2 = R_s I^2$ es la potencia activa que se pierde en la resistencia del sistema monofásico. $R_s = r + R_L$ se llamará resistencia del sistema monofásico.

También las fórmulas de los rendimientos, (7.4) a (7.7) (en la página 55), son válidas con las potencias activas de los sistemas monofásicos.

7.3.3. Influencia de la potencia activa del receptor en la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema monofásico

La potencia activa que se pierde en la resistencia del sistema monofásico es

$$P_p = R_s I^2 = R_s \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \varphi} \quad (7.20)$$

Como ocurre en los sistemas de corriente continua, resulta aquí también que la potencia que se pierde en la resistencia del sistema monofásico es proporcional al cuadrado de la potencia del receptor. Sin embargo, ahora aparece una nueva causa de incremento de esa potencia que se pierde: el factor de potencia del receptor, que no existe en los sistemas de corriente continua. De él se hablará más adelante. Ahora, para simplificar el análisis, se tratará de establecer analogías con los sistemas de corriente continua. Resulta que si el factor de potencia del receptor con el que se absorbe potencia de un sistema monofásico es siempre el mismo, la potencia que se pierde en la resistencia del sistema monofásico es proporcional al cuadrado de la potencia activa que se absorbe del sistema.

Por tanto, con la hipótesis del mismo factor de potencia, la conclusión relativa a la potencia que se pierde en la resistencia del sistema monofásico es la misma que para los sistemas de corriente continua. Y las conclusiones que derivan de ella también. En particular, es fácil ver que los rendimientos del alternador, de la línea y del sistema resultan ahora, respectivamente,

$$\eta_a \approx 1 - r_a \frac{P}{V^2 \cos^2 \varphi}$$

$$\eta_L \approx 1 - R_L \frac{P}{V^2 \cos^2 \varphi}$$

$$\eta_s \approx 1 - R_s \frac{P}{V^2 \cos^2 \varphi}$$

Se ve que *los rendimientos de los sistemas monofásicos disminuyen linealmente cuando aumenta la potencia del receptor*, de la misma forma que en los sistemas de corriente continua. Sin embargo, aquí, el valor absoluto de la pendiente de la recta de disminución es inversamente proporcional, no solo al cuadrado del valor eficaz de la tensión del sistema, sino también al cuadrado del factor de potencia de la carga.

También los sistemas monofásicos tienen un límite para la potencia activa que se puede extraer de ellos. De un sistema monofásico que se pueda describir como en la Figura 65, se consigue extraer la máxima potencia activa cuando se conecta como receptor una impedancia que sea la conjugada de la del sistema, $Z_s = Z_g + Z_{L1} + Z_{L2}$ [56][57]. Entonces la potencia que absorbe el receptor, que es la máxima, vale

$$P_m = R_s \frac{E^2}{4R_s}$$

El valor del rendimiento del sistema monofásico es entonces también 0.5, y la potencia que se pierde en la resistencia del sistema monofásico es también la máxima que se puede perder, de valor

$$P_{pm} = P_m = R_s \frac{E^2}{4R_s}$$

Por tanto en la (7.20) y en las fórmulas de los rendimientos, la variable P no puede crecer indefinidamente, sino solo hasta el valor máximo indicado.

De nuevo, este comentario sobre el valor máximo de la potencia es una aclaración pertinente, pero que no tiene demasiada importancia práctica, pues también los sistemas monofásicos de energía funcionan en condiciones muy alejadas de la máxima potencia que pueden suministrar. En estas condiciones, la aproximación de considerar como tensión del sistema la tensión en la carga también es adecuada.

Si se deriva (7.20) se obtiene el incremento de la potencia que se pierde en la resistencia del sistema monofásico por unidad de incremento de la potencia de la carga, que resulta proporcional a la potencia de la carga, como ocurre en los sistemas de corriente continua. Pero también es inversamente proporcional al cuadrado del factor de potencia

$$\frac{dP_p}{dP} = 2 \frac{R_s}{V^2 \cos^2 \varphi} P \quad (7.21),$$

Si, como se hace en este apartado, se considera fijado el factor de potencia, la forma de (7.21) es la misma que la de (7.10). Por tanto, su representación gráfica coincide con la de la Figura 9 (página 58), excepto en el valor de la pendiente.

Resulta pues que, también en los sistemas monofásicos, *a medida que se incrementa la potencia de la carga, se incrementa la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por unidad de potencia transportada*, que es el valor que proporciona la fórmula (7.21).

7.3.4. Energía que se pierde en la resistencia de un sistema monofásico por consumo de potencia

Se realiza ahora un análisis para el sistema monofásico análogo al realizado para el sistema de corriente continua.

Supóngase que se necesita extraer de un sistema monofásico la energía W . Si esa cantidad se extrae uniformemente durante el tiempo t , con factor de potencia constante, la potencia activa del receptor con que se extrae es $P = W/t$. Si se utiliza (7.20), la potencia que se pierde en el sistema es

$$P_p = R_s I^2 = R_s \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \varphi} = \frac{R_s W^2}{t^2 V^2 \cos^2 \varphi} \quad (7.22)$$

La energía que se pierde en el sistema durante el tiempo en el que se está extrayendo de él esa energía vale

$$W_p = P_p t = R_s I^2 t = R_s \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \varphi} t = \frac{R_s W^2}{t V^2 \cos^2 \varphi} = \frac{R_s W}{V^2 \cos^2 \varphi} P \quad (7.23)$$

Resulta que, según el quinto miembro de (7.23), la energía que se pierde en un sistema monofásico cuando se extrae de él la energía W es inversamente proporcional al tiempo que se emplea en la extracción, de la misma forma que en los sistemas de corriente continua, aunque en la fórmula (7.23) aparece el cuadrado del factor de potencia, que no existe en los sistemas de corriente continua.

Otra forma de interpretar la anterior afirmación la proporciona el sexto miembro de (7.23), que indica que la energía que se pierde en un sistema monofásico al extraer de él la energía W con factor de potencia y

potencia activa P constantes es directamente proporcional a esa potencia. Por eso también aquí se llama a esa energía *energía que se pierde por consumo de potencia*.

La (7.23) indica, por tanto, que también en los sistemas monofásicos, la energía que se pierde en el sistema eléctrico para suministrar la energía W al receptor, es menor si esa energía se obtiene con potencia pequeña que si se extrae con potencia más grande.

7.3.5. Cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas monofásicos

El esquema del razonamiento es aquí semejante al realizado para los sistemas de corriente continua, y las conclusiones generales también. Se comienza, como en ellos, suponiendo la potencia activa de la carga constante.

Si durante el tiempo de facturación, t_f , se ha extraído de un sistema monofásico la energía W con factor de potencia y potencia constantes, la energía perdida en la resistencia del sistema viene dada por (7.23). Pero en esa fórmula el tiempo t es el tiempo que verdaderamente ha durado esa extracción. Por tanto, la energía perdida en la resistencia del sistema eléctrico es la menor posible si el tiempo durante el que se extraído la energía W hubiera sido el máximo posible, es decir, t_f . Esa mínima energía que se pierde se obtiene aquí como en (7.14) y vale

$$W_{pmi} = \frac{R_s W^2}{t_f V^2 \cos^2 \varphi} \quad (7.24)$$

Suponiendo, se insiste, que se extrae con el mismo factor de potencia constante que el del receptor verdadero. Si se ha empleado el tiempo $t \leq t_f$ en extraer la energía W a potencia constante, la energía que realmente se ha perdido es

$$W_p = \frac{R_s W^2}{t V^2 \cos^2 \varphi}$$

Y el *cociente de pérdidas por consumo de potencia* resulta

$$c_P = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{\frac{R_s W^2}{t V^2 \cos^2 \varphi}}{\frac{R_s W^2}{t_f V^2 \cos^2 \varphi}} = \frac{t_f}{t}$$

Es decir, si la potencia con la que se extrae la energía W durante el tiempo $t \leq t_f$ es constante, el cociente de pérdidas es, simplemente, la relación entre el tiempo de facturación y el realmente empleado para obtener la energía W con la potencia constante del receptor.

Considerar el caso de carga constante es útil, en una primera aproximación, para entender la influencia de la potencia con que la carga obtiene esa energía en la energía que se pierde. Pero, en general, como se dijo para los sistemas de corriente continua, la potencia activa P de la carga es variable, por lo que, según (7.22), también lo es la potencia P_p que se pierde en el sistema. Por tanto, la energía que se pierde en su resistencia en el periodo de facturación t_f vale

$$W_p = \int_0^{t_f} P_p dt = R_s \int_0^{t_f} I^2 dt = R_s \int_0^{t_f} \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \varphi} dt = \frac{R_s}{V^2 \cos^2 \varphi} \int_0^{t_f} P^2 dt \quad (7.25)$$

Aunque la tensión del receptor y el factor de potencia no fueran constantes, hasta el cuarto miembro toda la fórmula es válida. El quinto miembro solo es correcto si V y $\cos \varphi$ son constantes, que es lo que se ha estado suponiendo. En este caso la energía mínima que se perdería en la resistencia del sistema eléctrico sigue dada por (7.24), y el cociente de pérdidas por consumo de potencia vale ahora

$$c_P = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{t_f V^2 \cos^2 \varphi \int_0^{t_f} I^2 dt}{W^2} = \frac{t_f \int_0^{t_f} P^2 dt}{W^2} = \frac{t_f \int_0^{t_f} I^2 dt}{\left(\int_0^{t_f} I dt \right)^2} \quad (7.26)$$

Nótese que, salvo el tercer miembro, la fórmula es idéntica en la forma a la que se obtuvo para el sistema de corriente continua. No obstante, conviene insistir en que aquí V es el valor eficaz de la tensión de la carga, que se seguirá llamando tensión del sistema, I es el valor eficaz de la intensidad y P la potencia activa.

La (7.26) es útil como información de que una misma energía extraída de un sistema monofásico puede provocar mayores o menores pérdidas de energía en la resistencia del sistema eléctrico dependiendo de

la potencia con la cual se obtenga esa energía. También tiene utilidad práctica cuando se aplica a un receptor, pues entonces el factor de potencia es único, y es totalmente adecuada a ese caso la hipótesis de $\cos\varphi$ constante, con la que se ha obtenido (7.26). En este sentido se puede hablar del cociente de pérdida de energía por consumo de potencia de un receptor monofásico. Pero no es tan útil cuando se aplica a un consumidor, que puede conectar durante el periodo de facturación, y de hecho conecta, receptores con factores de potencia diversos. Entonces, ya no es válida la hipótesis de factor de potencia, $\cos\varphi$, constante. Se verá pronto, sin embargo, que esa dificultad desaparece cuando se combine la pérdida de energía por consumo de potencia con otras causas de pérdidas.

7.3.6. Medida del cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas monofásicas

Si se cumplen las hipótesis que han dado lugar a (7.26), y, en particular, la constancia del factor de potencia, la medida del cociente de pérdidas c_p consiste en obtener el resultado de esa fórmula. Se puede utilizar para ello cualquiera de sus miembros a partir del tercero. Si se utiliza el cuarto, se obtiene también la medida de la energía absorbida por el receptor. Hay que medir el periodo de facturación, t_f , la energía, W , absorbida por la carga durante ese periodo, y calcular el valor de la integral $\int_0^{t_f} P^2 dt$. Se utilizará, como se ha dicho, la tarjeta de adquisición de datos PCI 6071E de National Instruments y el programa LabVIEW.

Hay que obtener el valor eficaz, I , de la intensidad en intervalos cortos de tiempo. La forma de hacerlo será la siguiente: se captarán valores instantáneos de la tensión con velocidad de captación suficiente para que la onda de tensión instantánea pueda ser obtenida con exactitud. Como la frecuencia de la onda de tensión es 50 Hz, el periodo es $1/50 = 0.02\text{s} = 2\text{cs}$. Por tanto, si se toman 20 valores de tensión cada dos centisegundos, la onda de tensión queda bien representada. Esa frecuencia de muestreo equivale a 1000 muestra/s. Lo mismo se hará para obtener la onda de la intensidad por la carga durante el mismo intervalo tiempo, usando en método que ya se explicó. Se obtienen las dos ondas durante un segundo, es decir, cincuenta ondas completas de la tensión y cincuenta de la intensidad. Ese número proporciona gran exactitud para obtener los valores eficaces de la tensión y de la intensidad y la diferencia de fase φ entre ellas. Con esos datos, durante el siguiente segundo se hace la

operación $VI\cos\varphi\Delta t = \Delta W$. Esa es la energía que el receptor ha absorbido durante el tiempo Δt . Ha de sumarse a la energía acumulada anterior, desde $t = 0$, en que comenzó a contarse el periodo de facturación, t_f . Y así hasta el valor final de t_f , en que se habrá completado del cálculo de la energía absorbida por la carga:

$$W \approx \sum_0^{t_f} VI\cos(\varphi)\Delta t$$

Los límites del sumatorio significan que los incrementos del tiempo comienzan en $t = 0$, cuando empieza el periodo de facturación, y terminan en t_f , cuando acaba ese periodo.

Simultáneamente, utilizando los mismos intervalos Δt anteriores, debe hallarse la integral del numerador de (7.26), que es

$$\int_0^{t_f} P^2 dt \approx \sum_0^{t_f} V^2 I^2 \cos^2(\varphi)\Delta t$$

Transcurrido el tiempo t_f , el programa de LabVIEW devolverá el resultado de la operación correspondiente al último miembro de (7.26), es decir,

$$c_P = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{t_f \int_0^{t_f} P^2 dt}{W^2} \approx \frac{t_f \sum_0^{t_f} V^2 I^2 \cos^2 \varphi \Delta t}{\left(\sum_0^{t_f} VI\cos\varphi\Delta t \right)^2}$$

cuyo resultado es el cociente de pérdidas por consumo de potencia de la carga monofásica.

Si solo se quiere obtener el cociente de pérdida de energía, se puede utilizar el último miembro de (7.26). Solo hay que obtener en cada intervalo, Δt , el valor eficaz I de la intensidad. El programa que se elabore ha de realizar en cada intervalo la operación $I^2\Delta t$, que ha de sumar a la suma de los productos similares anteriores; y la operación $I\Delta t$, que también ha de sumar a la suma correspondiente de esos productos anteriores. Al final del periodo de facturación el programa habrá obtenido

$$c_P \approx \frac{t_f \sum_0^{t_f} I^2 \Delta t}{\left(\sum_0^{t_f} I \Delta t \right)^2}$$

que es el cociente de pérdidas de energía por consumo de potencia del receptor monofásico.

Como

$$c_P \approx \frac{t_f \sum_0^{t_f} I^2 \Delta t}{\left(\sum_0^{t_f} I \Delta t \right)^2} = \frac{t_f \sum_0^{t_f} I_m^2 \Delta t}{\left(\sum_0^{t_f} I_m \Delta t \right)^2}$$

Puede obtenerse c_P a partir del valor máximo de la intensidad en lugar de utilizar el valor eficaz.

7.3.7. Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas monofásicas

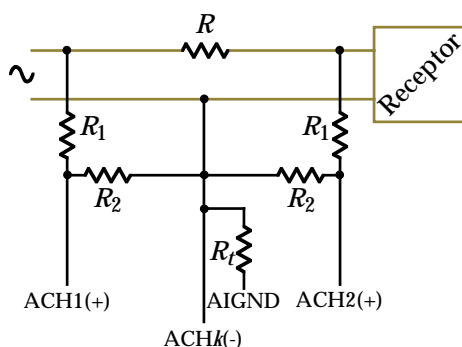


Figura 67.- Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas monofásicas.

La red de adecuación de señales se dibuja en la Figura 67. Es idéntica a la red de adecuación de señales de la Figura 10 (página 70) para cargas de corriente continua. El cálculo de las resistencias de los divisores de tensión se hace como allí, salvo que ahora hay que considerar el valor máximo V_m de la tensión sinusoidal v del sistema monofásico para que los

valores máximos de las tensiones entre los canales ACH1(+) y ACH2(+) no superen 10 V. Es decir, deben cumplirse las siguientes relaciones:

$$R_2 < 10 \frac{R_1 + R_2}{V_m}$$

$$R = 4.88 \times 10^{-3} \frac{R_1 + R_2}{R_2 I_{mi}}$$

I_{mi} es aquí el menor valor eficaz de la intensidad que se quiere detectar.

7.3.8. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas monofásicas

Este programa calcula y presenta en la pantalla del ordenador el cociente de pérdidas por demanda de potencia de una carga monofásica en un sistema sinusoidal.

Además, al igual que el programa anterior, también se comunicará con la tarjeta de captación de datos instalada en el ordenador para realizar medidas de un aparato físico real, simulará esa captación de medidas para poder depurar el programa, mostrará el valor actual del cociente usando como periodo de facturación el tiempo transcurrido desde que se inició la medida hasta el instante actual, y la *historia* de ese cociente.

A continuación se explican, someramente, las partes del panel frontal y los cambios que se ha necesitado introducir en el diagrama de conexiones para que el programa pueda calcular el cociente en sistemas monofásicos. Este programa no incluye al anterior, sino que lo modifica para que funcione con cargas monofásicas. Si se quiere determinar el cociente con cargas de corriente continua se debe emplear aquel.

7.3.8.1. Panel frontal

Este panel frontal también está dividido en cinco zonas diferentes, como se muestra en la Figura 68.

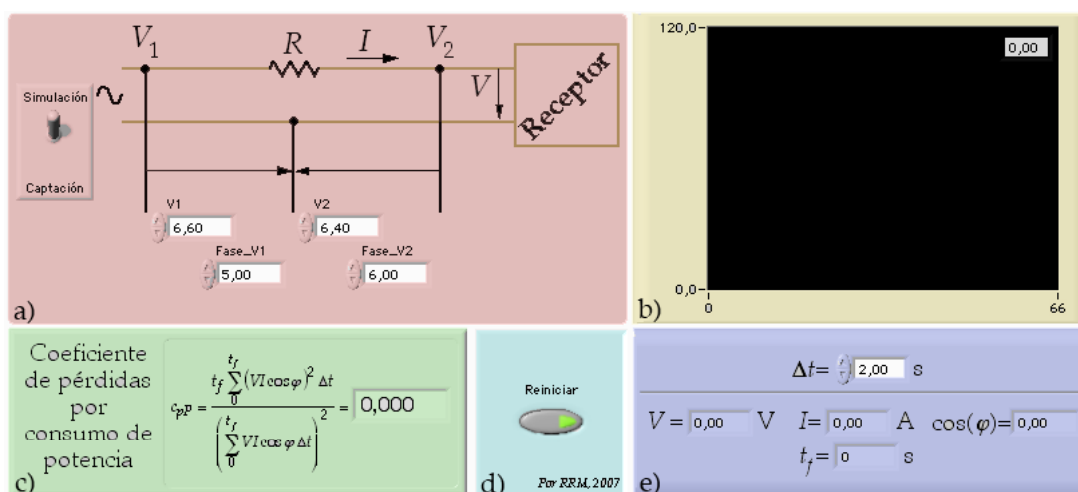


Figura 68.- Zonas en que está dividido el panel frontal del instrumento virtual.

A continuación se pasa a describirlas. Las partes que son similares al programa que calcula del cociente de pérdidas por consumo de potencia en sistemas de corriente continua solo se nombrarán, haciendo una descripción más detallada de los componentes nuevos.

- La zona a) muestra el esquema del circuito que se ha montado para acondicionar las señales. Aquí también se medirá la tensión V_1 antes de la resistencia R y la tensión V_2 después de R . A la izquierda del esquema está el interruptor *Simulación/Captación* que permite al usuario indicar si desea trabajar con datos provenientes de la tarjeta de captación o prefiere los simulados por el programa. En el caso de que prefiera la posición de *Simulación* aparecerán los campos V_1 , V_2 , $Fase_V1$ y $Fase_V2$, que se usarán para que el usuario defina los valores máximos de tensión que desea que tengan las ondas senoidales generadas en ese momento, y sus respectivas fases.
- La zona b) muestra la evolución del cociente de pérdidas por consumo de potencia a lo largo del tiempo, como una curiosidad. En su parte superior derecha está el último valor que la gráfica ha representado, que coincide con el valor del cociente actual.
- En la zona c) se indica que se está calculando el *Cociente de pérdidas por consumo de potencia*. Además, también incluye la nueva ecuación que el programa debe resolver para obtenerlo, preparada para un sistema monofásico, y los valores que

emplea para ello. Por último, en el campo que está a la derecha de la ecuación es donde se muestra el valor actual del cociente, que es el que se debe emplear cuando se desee usarlo en las tarifas eléctricas.

- d) contiene el botón de reinicio del instrumento, que el usuario debe pulsar cuando desee volver a iniciar el periodo de facturación, como ya se vio en el programa anterior.
- Por último, e) sigue mostrando Δt , que es el intervalo de tiempo en segundos que el usuario desea usar entre medidas, V es el valor eficaz de la tensión actual de la carga en voltios, I es el valor eficaz de la intensidad que circula por la carga en amperios, $\cos(\varphi)$ es el factor de potencia de la carga, y t_f es el tiempo de facturación, en segundos.

Una vez más, debajo de la zona ya explicada y ocultos a la vista del usuario, está la zona con resultados poco importantes pero necesarios para realizar el cálculo del cociente.

Valores auxiliares que el usuario no necesita conocer

Numerador 1	Ini Dt (ms)	Simulado? <input checked="" type="checkbox"/>
0,00	0	
Denominador 1	Fin Dt (ms)	
0,00	0	
Tick inicio medida	Dtr (s)	
0	0,00	

Figura 69.- Otros resultados de escaso interés para el usuario, pero necesarios para el programa, permanecen ocultos a su vista.

7.3.8.2. Diagrama de conexiones

Al igual que se ha hecho con el panel frontal, en esta explicación del diagrama de conexiones se pasarán por alto aquellos elementos que no varíen con respecto al programa anterior: *Cálculo del cociente de pérdidas por consumo de potencia en cargas de corriente continua*. La explicación será más detallada en los elementos nuevos.

Toda la programación se ha podido realizar con las instrucciones incluidas en LabVIEW.

7.3.8.2.1. Estructura principal

Para realizar este programa se han añadido cuatro fotogramas a una estructura secuencial, y, como no ha sido necesario realizar ninguna operación previa, no se ha puesto ninguna instrucción fuera de ella.

7.3.8.2.2. Fotograma 0

El primer fotograma de la estructura secuencial (Figura 70), sigue sirviendo exclusivamente para inicializar todos los valores cuando lo solicite el usuario, y almacenar el instante de inicio del periodo de facturación y el del primer incremento de tiempo, Δt . Una vez más, aunque en la primera iteración del programa el tiempo de inicio de Δt y del periodo de facturación coinciden, en las iteraciones siguientes no es así, y sigue siendo necesario crear dos variables separadas.

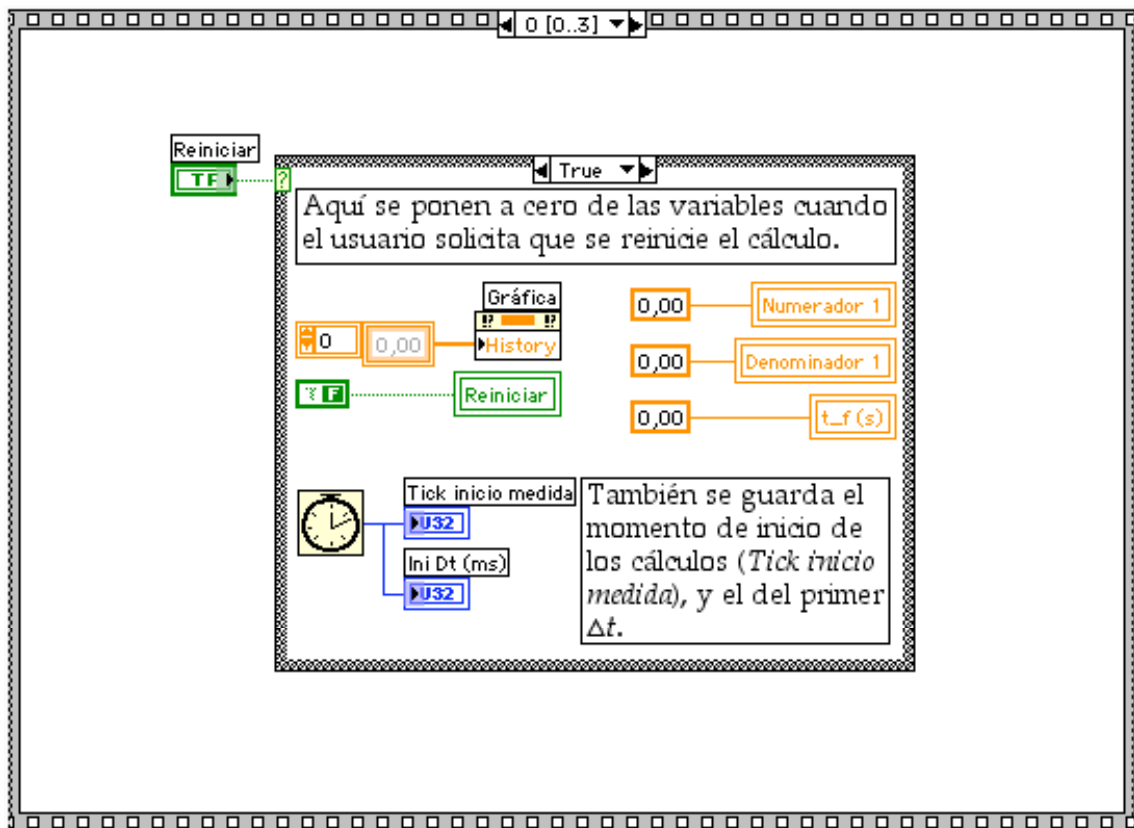


Figura 70.- *Fotograma 0* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

La programación de este primer fotograma sigue siendo igual a la del primer fotograma del programa anterior, así que todo lo explicado entonces se puede aplicar también ahora.

7.3.8.2.3. Fotograma 1

Los objetivos de esta parte del programa (Figura 71) siguen siendo captar o simular las ondas necesarias para obtener los valores de la tensión del receptor V y su intensidad I , realizar la parada necesaria para que Δt dure lo que ha pedido el usuario, y mostrar u ocultar los campos que aparecen en la simulación según sea necesario.

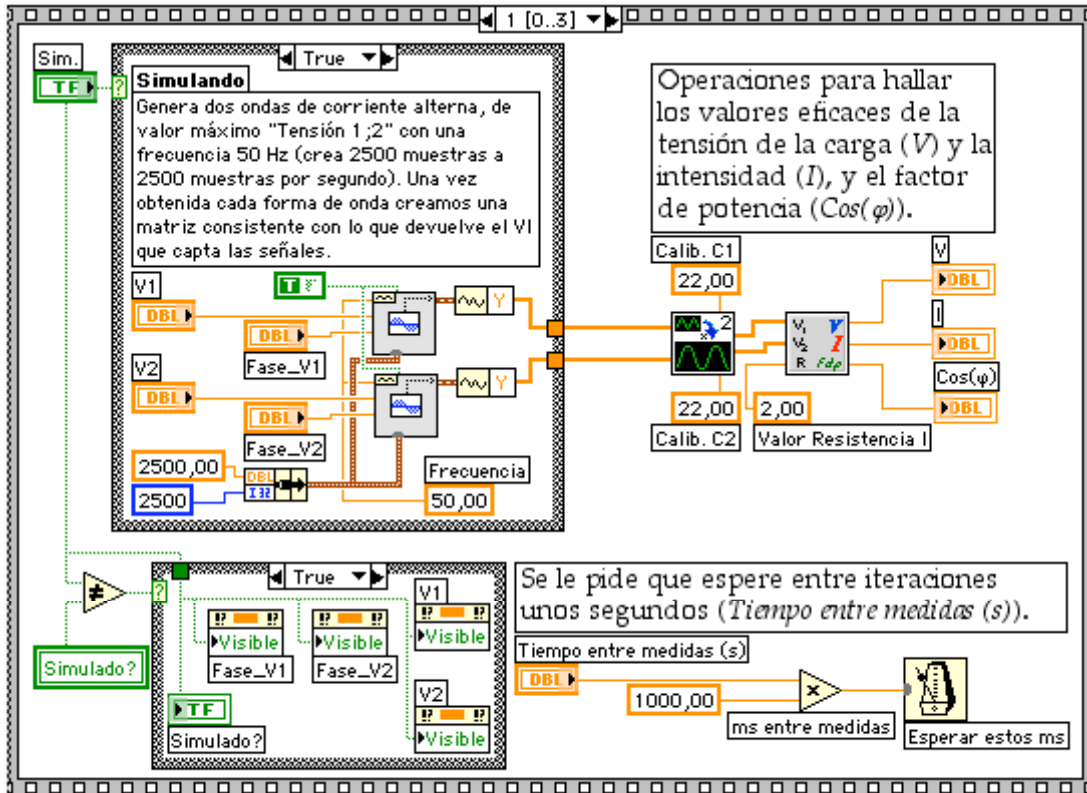


Figura 71.- *Fotograma 1* de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

A continuación se describen los cambios con respecto al programa anterior.

El programa ejecuta el caso *False* de la primera estructura de casos (Figura 72) cuando se le pide que utilice la tarjeta de captación instalada en el ordenador, en lugar de simular las medidas. Se emplea otra vez el instrumento virtual para la adquisición de formas de onda analógicas explicado anteriormente. Sin embargo, en este caso, al tratarse de una onda senoidal, es necesario captar los datos de una zona representativa de la onda, no basta con tomar un único dato, como se hacía en el programa de corriente continua. Además, como ya se dijo, para poder obtener una forma de onda adecuada, teniendo en cuenta que las tensiones que se pretende medir tienen una frecuencia de 50 Hz, es necesario que la

velocidad de captación sea también elevada. Por ello se le pide a la tarjeta de captación de datos que capte 2500 datos y que lo haga a una velocidad de muestreo de 2500 muestras/segundo. Es decir, con los valores indicados la tarjeta estará 1 segundo captando los valores de la tensión que le llegan a ambos canales. El resultado de esta captación será una matriz de dimensión 2×2500 .

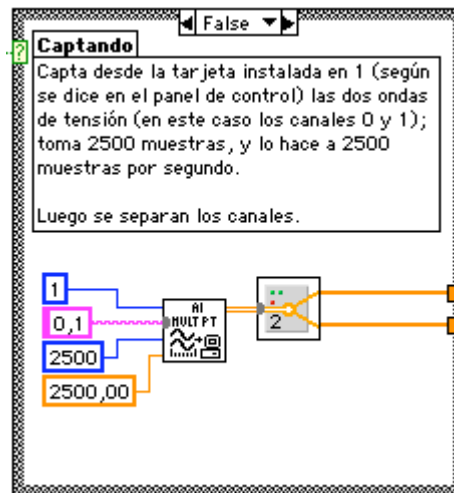


Figura 72.- Caso *False* de la estructura de casos superior del fotograma 1.

El siguiente paso, al igual que en el programa anterior, consiste en dividir esa matriz en dos matrices de dimensión 1×2500 cada una y con los datos de la matriz original. Este proceso se puede seguir haciendo con el instrumento virtual que se creó en el programa anterior llamado *Dividir2Canales.vi*.

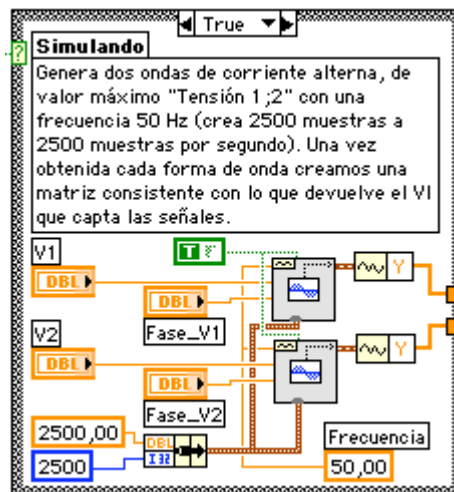


Figura 73.- Caso *True* de la estructura de casos superior del fotograma 1.

Por otro lado, si el usuario escoge la opción de que sea el propio instrumento virtual el que debe simular los valores que captaría la tarjeta, en ese caso se está pidiendo que se ejecute el caso *True* de la *estructura de casos* superior (Figura 73).

Este caso se va a encargar, entonces, de generar los 2500 valores correspondientes a dos ondas de tensión sinusoidales, con una frecuencia de 50 Hz cada una, y una velocidad de muestreo de 2500 muestras por segundo. Todo ello para que el resultado sea el que idealmente se obtendría de la tarjeta de captación.

Para ello se emplea el instrumento virtual creado por National Instruments llamado *Forma de Onda Sinusoidal* (Figura 74). Este instrumento genera una matriz de datos que, una vez representados, corresponden a una forma de onda sinusoidal de la frecuencia, amplitud y desfase con respecto al origen de tiempos, especificados.



Figura 74.- Instrumento virtual llamado Forma de Onda Sinusoidal (*Sine Waveform.vi*).

Se pretende que el usuario pueda modificar la amplitud de las ondas de tensión en cualquier momento, por lo que se han unido los terminales *amplitude* de estos instrumentos a sendos controles, que aparecen en el panel frontal del instrumento virtual, llamados *V1* y *V2*. Similarmente, también se quiere permitir modificar la fase de ambas tensiones en cualquier momento, por lo que los terminales *phase* se han unido a otros dos controles llamados *Fase_V1* y *Fase_V2*.

La frecuencia de la onda generada debe ser siempre de 50 Hz, por lo que el terminal *frequency* del instrumento virtual se ha unido a una constante con el valor 50.

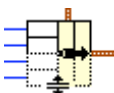


Figura 75.- Instrucción de LabVIEW llamada Atar (*Bundle*).

Por último, para indicarle a este instrumento que se necesita que genere 2500 valores de la onda sinusoidal con una velocidad de 2500 valores por segundo, es necesario construir un *grupo* en el que el primer elemento sea la velocidad de muestreo y el segundo el número de valores necesarios, y unirlos al terminal *sampling info* del instrumento. El *grupo* se

ha fabricado con la instrucción *Atar* (Figura 75), que genera grupos (*bundles*) a partir de los elementos que le llegan a su entrada.



Figura 76.- Es necesario forzar el reinicio de los instrumentos encargados de generar la onda sinusoidal si se quiere que también se pueda variar la fase de las ondas en cada momento.

El comportamiento por defecto del instrumento encargado de generar la onda de tensión sinusoidal es el de crear los datos según los valores de amplitud, frecuencia y velocidad de muestreo que se le indican en sus terminales, y cuando estos valores cambien reflejará el cambio en la onda de salida inmediatamente. Sin embargo, esto no se aplica a la fase de la onda; la fase será siempre la que se le indicó en el inicio de la ejecución del programa y para cambiarla será necesario forzar que el instrumento se reinicie. Por ese motivo se ha unido el terminal reset de ambos instrumentos a una constante de valor permanente *True* (Figura 76). Esta constante hará que el instrumento genere una onda en cada iteración del programa con la fase que indique el usuario.

Así pues, para generar una onda sinusoidal que simule la que captaría la tarjeta de captación de datos, el instrumento debe estar conectado como se ve en la Figura 77.

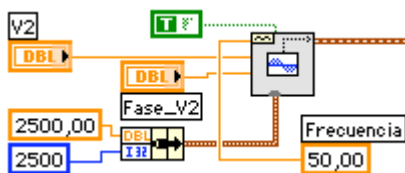


Figura 77.- Conexión adecuada del instrumento virtual encargado de generar la forma de onda sinusoidal.

Finalmente, una vez generada la forma de onda mediante el instrumento *Forma de Onda Sinusoidal.vi*, es necesario extraer únicamente los valores de esa forma de onda y desechar aquellos datos que no se usen del resultado de dicho instrumento. Para ello se emplea la instrucción *Coger componentes de la Forma de Onda* (Figura 78). Como ahora solo interesan los datos que se han generado y no el instante de inicio ni la distancia temporal entre ellos, nos quedamos con los valores devueltos por el terminal *Y*.

Con esto ya se habrán obtenido dos matrices de dimensión 1×2500 , que era lo que se pretendía.

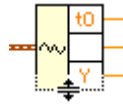


Figura 78.- Instrucción llamada Coger Componentes de la Forma de Onda (*Get Waveform Components*) que se emplea para aislar los componentes de una forma de onda.

El siguiente paso, que ya es independiente del método que se haya escogido para captar o generar los datos con los que se va a trabajar, consiste en calibrar las medidas obtenidas. Aquí también, el método consiste en tomar número a número los datos y multiplicarlos por la constante adecuada para que reflejen la medida real, no la obtenida tras la red de acondicionamiento de señales. Este paso se realiza con el mismo instrumento virtual que se creó para el programa anterior, llamado *Calibrar2Canales.vi*, y que no precisa de modificación alguna.

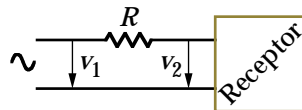


Figura 79.- Tensiones medidas por la tarjeta de captación de datos.

A continuación se pretende encontrar los valores eficaces de la tensión de la carga y de la intensidad, y el valor del factor de potencia de la carga, a partir de los valores de tensión medidos, v_1 y v_2 (Figura 79). Esos resultados se llevan a los tres indicadores que ya se han visto en el panel frontal del instrumento virtual.

Para obtenerlos se ha creado el instrumento virtual llamado *Obtener_V_I_Ef_2Canales.vi*, cuyo diagrama de conexiones se muestra en la Figura 80.

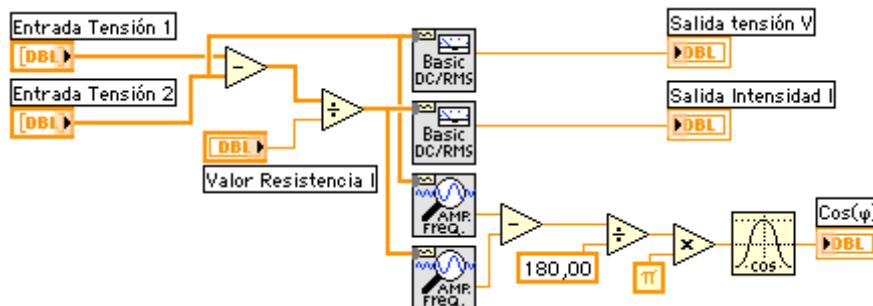


Figura 80.- Instrumento virtual creado para este programa llamado *Obtener_V_I_Ef_2Canales.vi*. Su misión es obtener los valores eficaces de la tensión e intensidad de la carga y su factor de potencia.

Similarmente a como se hizo en el programa anterior, la que se considerará tensión de la carga es la tensión v_2 , y la manera para obtener la intensidad que circula por ella es

$$i = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

que es lo que se hace en la parte a) del programa de la Figura 81.

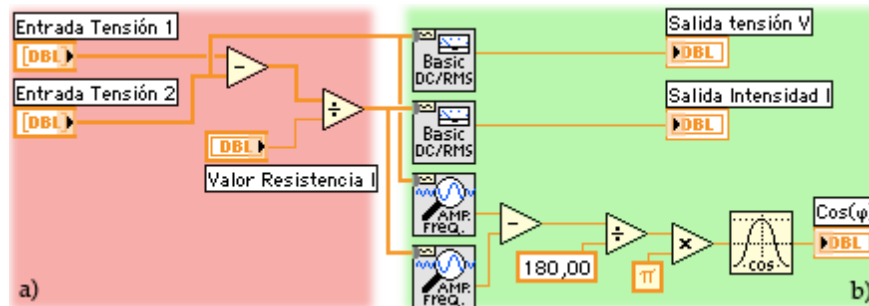


Figura 81.- a) Elementos del programa para cargas monofásicas similares al programa anterior y b) elementos nuevos.

Sin embargo, para poder calcular el cociente de pérdidas por consumo de potencia se necesita averiguar los valores eficaces de esa tensión e intensidad, así como el factor de potencia. De estos cálculos se encarga la parte b) del programa de la Figura 81. Los instrumentos situados en su parte superior izquierda se emplean para determinar los valores eficaces de la tensión y de la intensidad. Este instrumento virtual está incluido en la instalación base de LabVIEW y se llama *CC-RMS Básico Medio.vi* (Figura 82). Es capaz de determinar la componente de continua (salida *DC value*) y el valor eficaz (salida *RMS value*) de cualquier forma de onda o matriz de datos que se le aporte. El único valor que interesa en este programa es el valor eficaz, por eso es el único que se llevará a una salida.



Figura 82.- Instrumento virtual llamado CC-RMS Básico Medio (*Basic Averaged DC-RMS.vi*).

El cálculo del factor de potencia requiere de unas operaciones previas. Por definición, en un receptor monofásico, que no deja de ser un dipolo en un sistema de corriente alterna, el factor de potencia es el coseno del ángulo de desfase entre la tensión aplicada al dipolo y la intensidad que circula por él [56]. Es decir, para poder determinar el factor de

potencia primero es necesario determinar el ángulo φ de desfase entre la tensión y la intensidad.



Figura 83.- Instrumento virtual llamado Extraer Información del Tono Principal (*Extract Single Tone Information.vi*).

Para ello se pedirá a LabVIEW que averigüe la fase de la tensión y la fase de la intensidad y por último se procederá a restarlas. El instrumento que se usa para determinar la fase de estas ondas sinusoidales es el llamado *Extraer Información del Tono Principal* (Figura 83). Este instrumento aísla la onda con mayor amplitud de todas las que se le suministren y devuelve su frecuencia, amplitud y fase, esta última medida en grados. En este programa solo se suministra una onda a cada instrumento, por lo que siempre dará los valores relativos a ella, sin necesidad de aislarla. Además, ahora solo interesa el valor de su fase, por lo que los demás se pueden ignorar (no se conectan a ningún indicador).

Una vez disponemos de la fase de la tensión, φ_V , y de la intensidad, φ_I , podemos averiguar el desfase

$$\varphi = \varphi_V - \varphi_I$$

y con él determinar su coseno, para obtener el factor de potencia.



Figura 84.- Instrucción de LabVIEW llamada Coseno (*Cosine*).

La instrucción de LabVIEW llamada *Coseno* (Figura 84) devuelve en su salida el coseno del valor de la entrada, siempre que éste se indique en radianes. Sin embargo, como se ha visto, el instrumento usado para obtener la fase de la tensión y de la intensidad la proporciona en grados, por lo que es necesario convertir esos valores a radianes antes de proseguir. De ahí que el desfase φ se divida por 180 y se multiplique por la constante π antes de llevarlo a la entrada de la instrucción coseno.

Finalmente, el resultado de esa instrucción coseno se lleva al indicador apropiado del instrumento virtual.

El último cambio que se ha hecho en este fotograma ha sido incluir los nuevos campos llamados *Fase_V1* y *Fase_V2* en la zona que se encarga

de mostrar u ocultar todos los campos del panel frontal (Figura 85). El método es el mismo que se explicó en el programa anterior.

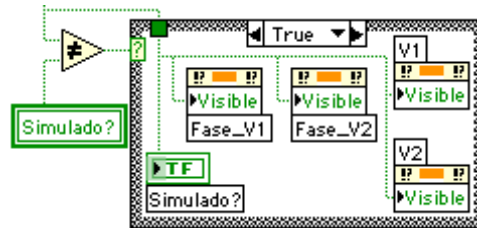


Figura 85.- Método para mostrar u ocultar los campos en función del valor actual del interruptor *Simulación/Captación*.

La zona dedicada a la parada del instrumento virtual no ha sufrido ningún cambio con respecto al anterior programa.

7.3.8.2.4. Fotograma 2

El penúltimo fotograma (Figura 86), sigue sirviendo para determinar los valores de Δt y del tiempo de facturación que ha transcurrido hasta ese momento.

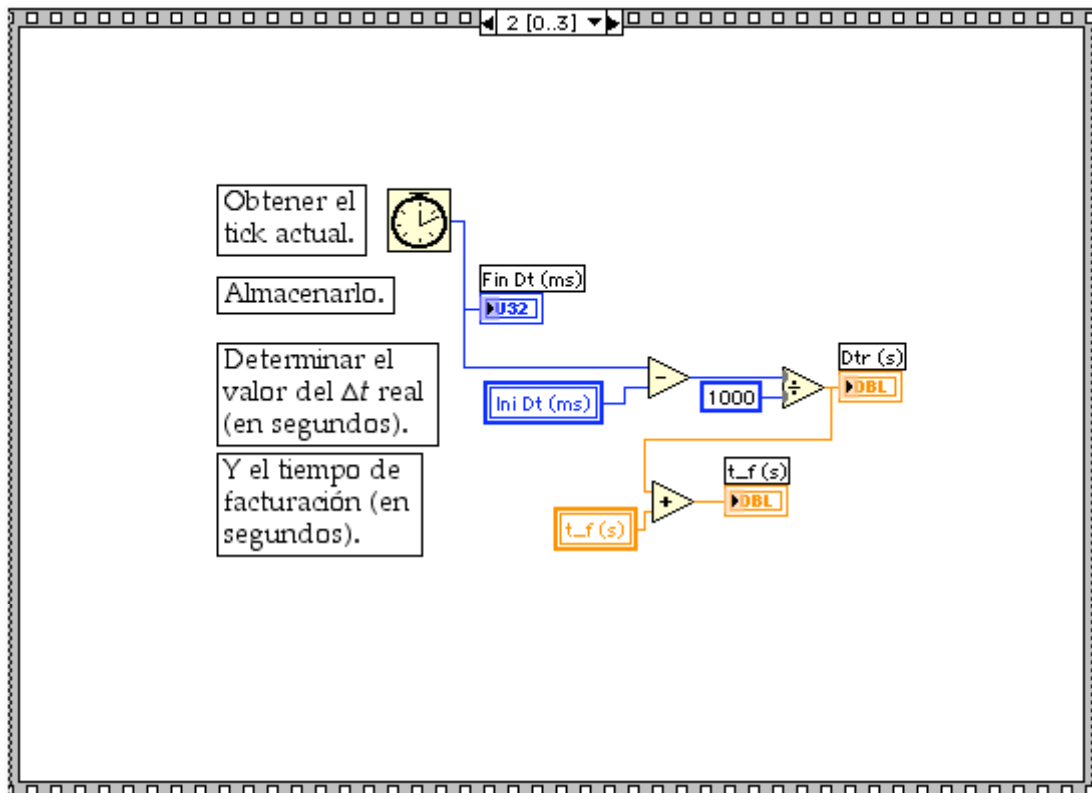


Figura 86.- *Fotograma 2* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

Este fotograma tampoco ha sufrido ningún cambio con respecto al anterior.

7.3.8.2.5. Fotograma 3

El fotograma 3 del programa calcula el cociente de pérdidas por consumo de potencia en sistemas monofásicos y presenta los resultados en la pantalla del ordenador.

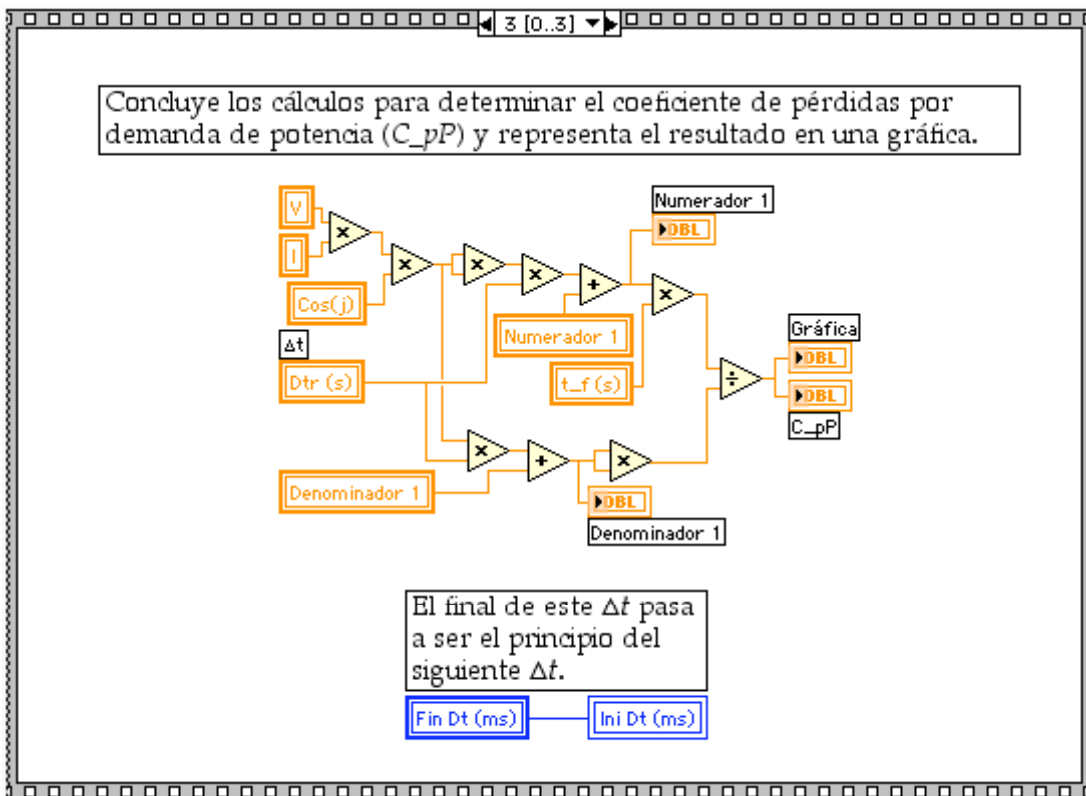


Figura 87.- Fotograma 3 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

La parte superior del programa se dedica a terminar el cálculo del cociente según la fórmula concreta para un receptor monofásico:

$$c_{pP} = \frac{t_f \sum_0^{t_r} (VI \cos \varphi)^2 \Delta t}{\left(\sum_0^{t_r} VI \cos \varphi \Delta t \right)^2}$$

Para ello, primero se calcula el numerador (Figura 88). Yendo operación a operación, y empezando por la de arriba a la izquierda (Figura 88), primero se multiplican los valores eficaces de la tensión (V) y

de la intensidad (I), obtenidos en el fotograma 1, y el resultado se multiplica por el valor del $\cos\phi$, obtenido también en ese fotograma. Ese valor se eleva al cuadrado (multiplicándolo por sí mismo, como ya se explicó en el programa anterior) y el resultado se multiplica por Δt obtenido en el fotograma 2. Hasta este punto tenemos el interior del sumatorio, $(VI\cos\phi)^2 \Delta t$.

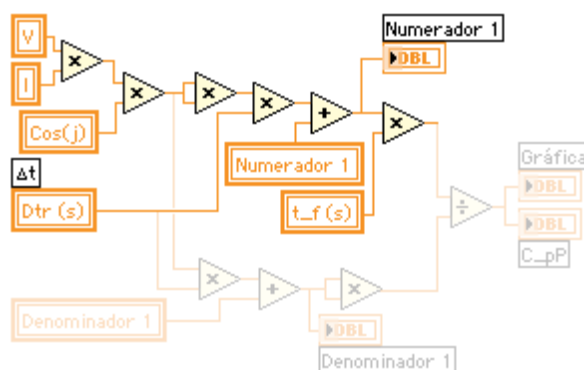


Figura 88.- Cálculo del numerador del cociente de pérdidas por consumo de potencia.

A continuación se procede a realizar el sumatorio por el procedimiento que ya se vio: se suma el valor de la operación realizada hasta ahora, en esta iteración del programa, al resultado de la suma de todos los valores de iteraciones anteriores, que está almacenado en la variable *Numerador 1*. El resultado de esa suma se vuelve a llevar a la variable *Numerador 1* para que se pueda usar en la próxima iteración.

Por último ya solo queda multiplicar el resultado del sumatorio por el valor del periodo de facturación ($t_f(s)$) y el valor final es el numerador

del cociente de pérdidas buscado, $t_f \sum_0^{t_f} (VI\cos\phi)^2 \Delta t$.

Seguidamente, se calcula el denominador del cociente (Figura 89).

Una vez más, repasando las operaciones de izquierda a derecha y de arriba abajo, se ve que el producto $VI\cos\phi$ que se obtuvo en el proceso anterior, cogido antes de elevarse al cuadrado, se multiplica ahora por Δt para obtener el interior del sumatorio $VI\cos\phi\Delta t$.

Se realiza el sumatorio sumando el resultado de la operación a los valores anteriores almacenados en la variable *Denominador 1* y esa suma se lleva a la variable *Denominador 1* para que pueda ser usada en el cálculo del sumatorio de la siguiente iteración del programa.

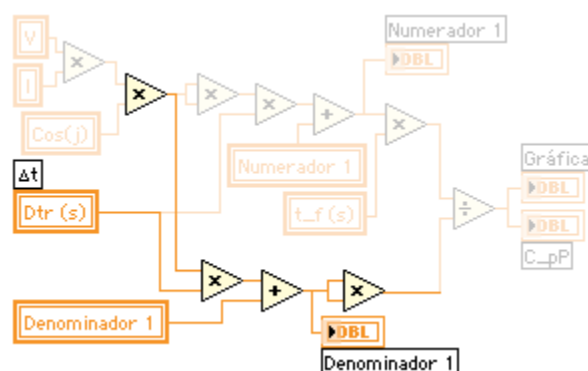


Figura 89.- Cálculo del denominador del cociente de pérdidas por consumo de potencia.

Por último, el resultado del sumatorio se eleva al cuadrado, para

obtener el denominador del cociente, $\left(\sum_0^{t_f} VI \cos \varphi \Delta t \right)^2$.

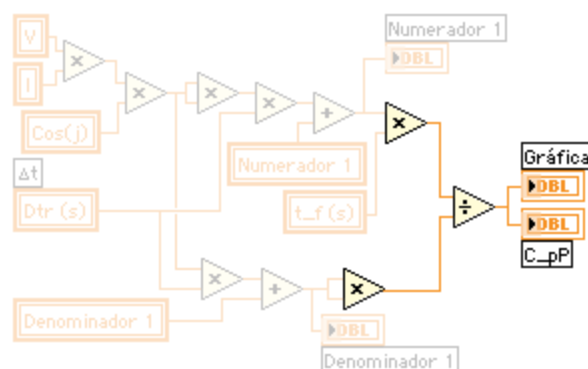


Figura 90.- Pasos finales del cálculo del cociente de pérdidas por consumo de potencia.

Finalmente se divide el numerador por el denominador y se lleva el resultado a la gráfica y al campo de texto encargado de mostrar el cociente (Figura 90), tal y como se vio en el programa anterior y en el panel frontal de este instrumento virtual.

La última instrucción del fotograma, encargada de que el tiempo final del intervalo de medida actual se convierta en el tiempo inicial del intervalo de medida siguiente, tampoco se ha modificado.

7.3.9. Sistemas monofásicos complejos

El estudio se ha hecho sobre un sistema monofásico como el representado por la Figura 65 (página 107). Pero es completo en el sentido de que abarca a todo sistema monofásico por complejo que sea. En efecto,

si se tiene una red sinusoidal de dos terminales a los que se conecta un receptor sinusoidal (Figura 91), por muy compleja que sea la red de dos terminales puede ser aproximada por un dipolo de Thévenin, es decir, una fuente de tensión en serie con una impedancia Z_S . Al conectar a ese dipolo el receptor monofásico se obtiene un sistema monofásico como el analizado hasta aquí.

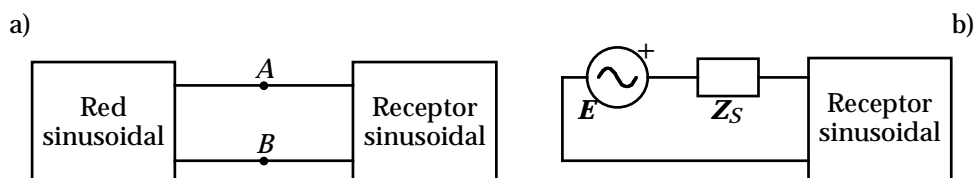


Figura 91.- a) Red sinusoidal de dos terminales conectada a un receptor sinusoidal. b) El mismo receptor conectado al dipolo de Thévenin equivalente de la red.

7.4. Energía que se pierde en la resistencia de los sistemas trifásicos por consumo de potencia

Un alternador trifásico es, en realidad, un conjunto de tres alternadores monofásicos cuyas fuerzas electromotrices tienen la misma frecuencia. Los alternadores monofásicos pueden conectarse, en principio, en estrella o en triángulo. Los alternadores trifásicos se construyen para que funcionen como generadores equilibrados. Así serán considerados en esta memoria siempre que haya que referirse a ellos. De los extremos de la estrella o de los vértices del triángulo parten tres hilos hasta el receptor. El conjunto de esos tres hilos se llama *línea trifásica de tres hilos*. Cada uno de esos tres hilos de una línea trifásica se llama *fase*. Las fases se designan respectivamente por las letras R , S y T . Esa notación significa que v_S está retrasada $\pi/3$ radianes o 120° de v_R , y que v_T está retrasada también 120° de v_S . v_R , v_S y v_T son las tensiones instantáneas entre cada fase y el centro de la estrella del generador trifásico.

A veces, principalmente para líneas trifásicas de distribución de energía eléctrica, del centro de la estrella del generador parte un cuarto hilo, que se llama *hilo neutro*, designado por N . Entonces la línea se llama *línea trifásica de cuatro hilos* [56][57].

Los receptores trifásicos son tripolos o cuadripolos [56][80] porque se conectan a las líneas trifásicas por medio de tres o de cuatro terminales respectivamente (Figura 92). En este capítulo se supondrá que todos los

receptores trifásicos son sinusoidales. Un receptor trifásico sinusoidal es aquel que, al conectarlo a un sistema trifásico de una determinada frecuencia, las intensidades de régimen permanente de todas sus ramas son sinusoidales de esa frecuencia, aunque en esta memoria bastará con que solo las intensidades de régimen permanente de los terminales del receptor sean sinusoidales de la misma frecuencia que las tensiones del sistema trifásico.

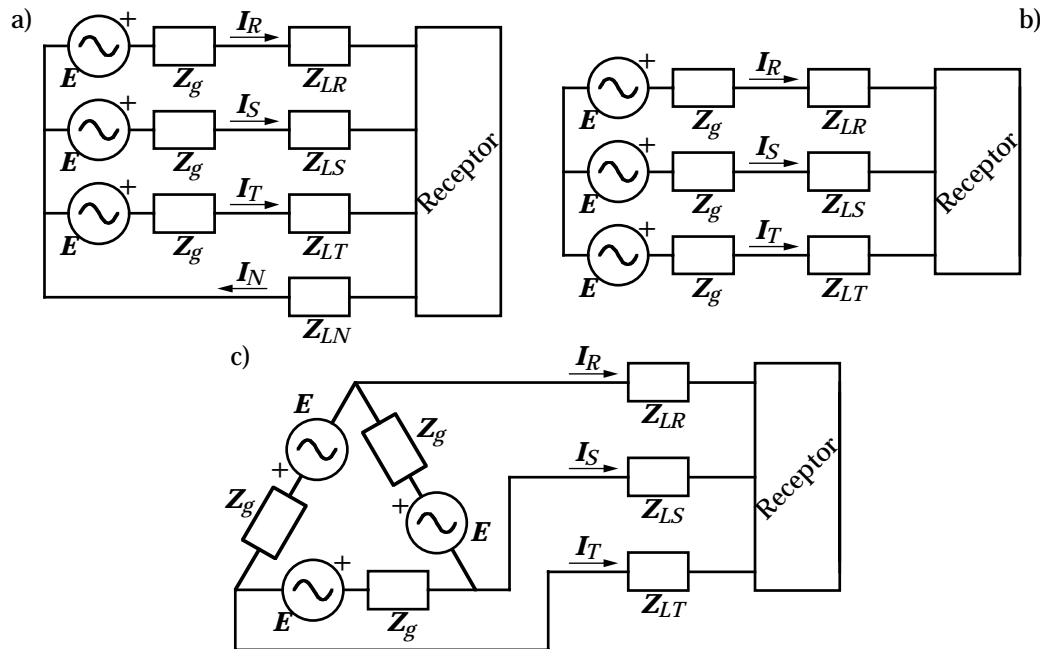


Figura 92.- a) Sistema trifásico de cuatro hilos. b) Sistema trifásico de tres hilos con el generador en estrella. c) Sistema trifásico de tres hilos con el generador en triángulo.

Con independencia de cómo esté conectado un generador trifásico equilibrado, en estrella o en triángulo, puede siempre describirse con suficiente aproximación por medio de tres fuentes de tensión en estrella, en serie cada una de ellas con una impedancia $Z_g = r + jx$ [56][57] (Figura 92). Cada hilo de la línea trifásica puede describirse por medio de una impedancia, que designaremos por $Z_{LR} = R_{LR} + jX_{LR}$, $Z_{LS} = R_{LS} + jX_{LS}$, $Z_{LT} = R_{LT} + jX_{LT}$ y $Z_{LN} = R_{LN} + jX_{LN}$, según describa las fases R , S , T o el hilo neutro N . Las partes reales de las impedancias complejas son las respectivas resistencias de los hilos, y las partes imaginarias las respectivas reactancias.

7.4.1.1. Potencias activas en sistemas trifásicos

Se llamará fuente trifásica al conjunto de las tres fuentes monofásicas que sirven para describir un generador trifásico. La potencia activa que genera un alternador trifásico es la que genera la fuente trifásica que lo describe, que es la suma de las que generan las tres fuentes monofásicas de que consta

$$P_{at} = EI_R \cos \varphi_{Ra} + EI_S \cos \varphi_{Sa} + EI_T \cos \varphi_{Ta}$$

I_R , I_S e I_T son los valores eficaces de las intensidades por las fases respectivas. φ_{Ra} es la diferencia de fase entre la fuerza electromotriz de la fuente monofásica conectada en serie con la fase R y la intensidad por esa fase. De forma similar para φ_{Sa} y φ_{Ta} .

La potencia activa que absorben las resistencias internas del alternador es

$$P_{pa} = rI_R^2 + rI_S^2 + rI_T^2 = r(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)$$

La potencia activa que absorben las resistencias de la línea si es de cuatro hilos es

$$P_{pL} = R_{LR}I_R^2 + R_{LS}I_S^2 + R_{LT}I_T^2 + R_{LN}I_N^2$$

La fórmula sirve si la línea es de tres hilos, pues, entonces, $I_N = 0$, y

$$P_{pL} = R_{LR}I_R^2 + R_{LS}I_S^2 + R_{LT}I_T^2$$

En la casi totalidad de las líneas trifásicas los hilos que constituyen las tres fases son iguales; entonces, para sistemas de tres hilos

$$P_{pL} = R_L(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)$$

$R_L = R_{LR} = R_{LS} = R_{LT}$ es la resistencia común de las fases.

La potencia activa que absorbe un receptor trifásico es [56][57]

$$P = V_R I_R \cos \varphi_R + V_S I_S \cos \varphi_S + V_T I_T \cos \varphi_T = P_R + P_S + P_T \quad (7.27)$$

V_R , V_S y V_T son los valores eficaces de las tensiones entre los terminales del receptor y el centro de la estrella del generador. En los sistemas trifásicos de potencia habituales las tensiones del receptor están muy aproximadamente equilibradas, y será como se supondrán siempre aquí.

Entonces $V_R = V_S = V_T = V$. φ_R , φ_S y φ_T son las diferencias de fase entre esas tensiones y las intensidades de las fases correspondientes.

Cada uno de los sumandos

$$\begin{aligned} P_R &= VI_R \cos \varphi_R \\ P_S &= VI_S \cos \varphi_S \\ P_T &= VI_T \cos \varphi_T \end{aligned} \quad (7.28)$$

de (7.27) se llama potencia que absorbe el receptor por la fase R , por la fase S y por la fase T , respectivamente.

También en un sistema trifásico resulta que

$$P_{at} = P_{pa} + P_{pL} + P = P_p + P$$

Así mismo las fórmulas de los rendimientos (7.4) a (7.7) (página 55) son válidas con las potencias activas de los sistemas trifásicos.

7.4.2. Influencia de la potencia activa del receptor en la potencia activa que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico

La potencia que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico de tres hilos es

$$P_p = P_{pa} + P_{pL} = r(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) + R_L(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) = (r + R_L)(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)$$

Si $R_s = r + R_L$, entonces esa potencia es

$$P_p = R_s(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)$$

Si se utilizan las fórmulas (7.28), esa potencia resulta:

$$P_p = R_s \left(\frac{P_R^2}{V^2 \cos^2 \varphi_R} + \frac{P_S^2}{V^2 \cos^2 \varphi_S} + \frac{P_T^2}{V^2 \cos^2 \varphi_T} \right) \quad (7.29)$$

Esta fórmula pone de manifiesto que un receptor trifásico sinusoidal influye en la potencia que se pierde en la resistencia del sistema trifásico por medio de las potencias que absorbe por cada fase, y por los factores de potencia de cada fase. Es decir, no solo la potencia total que absorbe el receptor influye en la potencia que se pierde en la resistencia del sistema trifásico, como ocurría en los sistemas de corriente continua y monofásico, sino que influye también la forma de absorberla, o sea el reparto de la

suma $P = P_R + P_S + P_T$ entre sus sumandos. Más adelante se verá que el reparto más conveniente para que la potencia que se pierde en la resistencia del sistema sea la menor posible por este exclusivo concepto es el reparto equilibrado, o sea, aquel en que $P_R = P_S = P_T$ con el mismo factor de potencia, es decir, de forma que también $\cos\varphi_R = \cos\varphi_S = \cos\varphi_T = \cos\varphi$. Esa situación de equilibrio implica que también los valores eficaces de las intensidades de las fases son iguales, es decir, $I_R = I_S = I_T = I$. Por tanto, para poner de manifiesto aquí solo la influencia de la potencia del receptor en la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico, supondremos que esa potencia se le entrega al receptor de forma equilibrada con un factor de potencia $\cos\varphi$. En estas condiciones

$$P = 3P_R = 3P_S = 3P_T \quad (7.30)$$

y (7.29) queda así:

$$P_p = R_s \frac{3P_R^2}{V^2 \cos^2 \varphi} \quad (7.31)$$

De (7.30) se deduce que $P_R = P/3$; o sea $P_R^2 = P^2/9$. Si se sustituye en (7.31) se tiene:

$$P_p = R_s \frac{3P^2}{9V^2 \cos^2 \varphi} = R_s \frac{P^2}{3V^2 \cos^2 \varphi} = R_s \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} \quad (7.32)$$

$U = \sqrt{3}V$ es el valor eficaz de la tensión entre fases del receptor. (7.32) es la relación buscada. Pone de manifiesto que, también en los sistemas trifásicos equilibrados, la potencia que se pierde en la resistencia del sistema es directamente proporcional al cuadrado de la potencia del receptor.

Otra forma de llegar al mismo resultado es considerar que la potencia que absorbe un receptor trifásico equilibrado es $P = \sqrt{3}UI\cos\varphi = 3VI\cos\varphi$, I es el valor eficaz de la intensidad de una fase, y φ la diferencia de fases entre la tensión entre una fase y el punto neutro de la estrella del generador, y la intensidad de esa fase [56][57]. Por tanto,

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi} = \frac{P}{3V\cos\varphi}$$

Y la potencia que se pierde en la resistencia del sistema es

$$P_p = 3R_s I^2 = 3R_s \frac{P^2}{3U^2 \cos^2 \varphi} = R_s \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = R_s \frac{P^2}{3V^2 \cos^2 \varphi} \quad (7.33)$$

Resultados que coinciden con los obtenidos en (7.32).

7.4.2.1. Influencia de la potencia activa del receptor en los rendimientos de un sistema trifásico

Las hipótesis consideradas para los sistemas eléctricos anteriores, el sistema de corriente continua y el sistema monofásico, serán también adoptadas aquí para los sistemas trifásicos, con las adaptaciones pertinentes. En particular la que se refiere a considerar la tensión del receptor como tensión del sistema, sin tener en cuenta la diferencia con la tensión de la fuente debida a la caída de tensión en la línea. Eso equivale a despreciar, para este fin, la caída de tensión en la impedancia del generador y de la línea, o sea, a considerar nulas, solo a estos efectos, esas impedancias, lo que origina también que el factor de potencia de la carga de la fuente trifásica a que equivaldría el generador, sea el mismo que el del receptor. Para los fines de balance energético que aquí se persiguen, esta aproximación es razonable, y permite un tratamiento adecuado del tema, que, de otra manera, resultaría de extraordinaria complicación y, sobre todo, poco útil.

En estas condiciones, y con la hipótesis de sistema en equilibrio que hemos establecido, la potencia eléctrica que produce el generador trifásico es $P_a = 3EI \cos \varphi$. La que absorbe la resistencia interna del alternador es $P_{pr} = 3rI^2$. La que absorbe la resistencia de la línea es $P_{pL} = 3R_L I^2$. La suma $P_{pr} + P_{pL} = P_p$ es la potencia que se pierde en la resistencia del sistema.

Por tanto, el rendimiento del generador es

$$\eta_a = \frac{P_a - P_{pr}}{P_a} = 1 - \frac{3rI^2}{3EI \cos \varphi_a} = 1 - \frac{r \left(\frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} \right)^2}{E \cos \varphi_a \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}} = 1 - \frac{rP}{E \cos \varphi_a \sqrt{3}U \cos \varphi}$$

Si se tiene en cuenta que $U = \sqrt{3}V$, y con las aproximaciones $E = V$ y $\cos \varphi_a = \cos \varphi$, resulta:

$$\eta_a \approx 1 - \frac{rP}{3V^2 \cos^2 \varphi} = 1 - \frac{rP}{3\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2 \cos^2 \varphi} = 1 - \frac{rP}{U^2 \cos^2 \varphi} \quad (7.34)$$

Para el rendimiento de la línea se tiene:

$$\begin{aligned} \eta_L &= \frac{(P_{pL} + P) - P_{pL}}{P_{pL} + P} \approx 1 - \frac{3R_L I^2}{3VI \cos \varphi} = 1 - \frac{R_L \left(\frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}\right)^2}{V \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} \cos \varphi} = 1 - \frac{R_L P}{V\sqrt{3}U \cos^2 \varphi} = \\ &= 1 - \frac{R_L P}{3V^2 \cos^2 \varphi} = 1 - \frac{R_L P}{U^2 \cos^2 \varphi} \end{aligned} \quad (7.35)$$

Y, de forma similar, para el rendimiento del sistema trifásico se obtiene

$$\eta_s = \frac{P_a - P_p}{P_a} \approx 1 - \frac{R_s P}{3V^2 \cos^2 \varphi} = 1 - \frac{R_s P}{U^2 \cos^2 \varphi} \quad (7.36)$$

Se ve que, también aquí, los rendimientos disminuyen con la potencia suministrada de la misma forma que en los sistemas de corriente continua y monofásicos, y la representación gráfica de la Figura 8 (página 57) sigue valiendo también si se considera fijo el factor de potencia.

7.4.3. Incremento de la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico equilibrado por unidad de incremento de su carga

Si en la fórmula (7.32) se deriva la potencia que se pierde en la resistencia del sistema trifásico, P_p , respecto a la potencia de la carga, P , se obtiene

$$\frac{dP_p}{dP} = 2R_s \frac{P}{3V^2 \cos^2 \varphi} = 2R_s \frac{P}{U^2 \cos^2 \varphi}$$

La derivada es la cantidad que se incrementa la potencia que se pierde en el sistema trifásico equilibrado por cada unidad que se incrementa la potencia de la carga. Esta derivada es, como en los sistemas de corriente continua y monofásicos, también proporcional a la propia

potencia de la carga. De nuevo ocurre que la derivada siempre es positiva, es decir, un aumento de la potencia de carga provoca siempre un aumento de la potencia que se pierde, nunca disminución. Además, ese aumento de la potencia que se pierde por cada unidad que se aumenta la potencia de la carga, es proporcional a P , y, por tanto, mayor cuanto mayor sea la propia potencia de carga.

7.4.4. Disminución de los rendimientos por unidad de incremento de la carga de un sistema trifásico equilibrado

Si en (7.34), (7.35) y (7.36) se deriva respecto a P , se obtiene:

$$\frac{d\eta_a}{dP} = -\frac{r}{U^2 \cos^2 \varphi}$$

$$\frac{d\eta_L}{dP} = -\frac{R_L}{U^2 \cos^2 \varphi}$$

$$\frac{d\eta_s}{dP} = -\frac{R_s}{U^2 \cos^2 \varphi}$$

Cada derivada expresa lo que se incrementa cada rendimiento por cada unidad que se incrementa la potencia de carga. Se ve que, como en los sistemas de corriente continua y monofásicos, ese incremento es negativo, es decir, los rendimientos disminuyen siempre que aumenta la potencia de carga, y esa disminución es constante, no depende de la potencia de carga. Estos resultados están de acuerdo con el obtenido anteriormente de que el aumento de la potencia que se pierde por unidad de aumento de potencia de la carga es proporcional a la potencia de la carga.

7.4.5. Potencia máxima que un sistema trifásico equilibrado puede entregar a un receptor

Tampoco un sistema trifásico puede entregar cualquier potencia activa a una carga. Como en los anteriores casos, existe un máximo para esa potencia, y es la suma de las potencias activas máximas que los sistemas monofásicos que lo forman pueden entregar a sus cargas. En sistemas de tensiones equilibradas se alcanza, por tanto, si se conecta como carga un conjunto de tres impedancias complejas iguales en estrella, cada una de valor el conjugado de la impedancia compleja de cada

generador monofásico [56], es decir, $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_g^*$. El símbolo \mathbf{Z}_g^* designa al conjugado de \mathbf{Z}_g . Cuando el sistema entrega esa potencia activa máxima, la que se pierde en la resistencia del sistema resulta también ser igual a la que se entrega a la carga. Ese valor es

$$P_{pm} = P_m = 3R_s \frac{E^2}{4R_s}$$

de forma que el rendimiento del sistema es 0.5. Tampoco entonces es posible la aproximación de suponer las tensiones en la carga iguales a las del generador. Sin embargo, también los sistemas trifásicos que se utilizan para el transporte de energía funcionan en condiciones muy alejadas de la potencia máxima que pueden suministrar, precisamente para evitar tamañas tasas de pérdida de potencia, por lo que estas hipótesis siguen siendo válidas.

7.4.6. Energía que se pierde en un sistema trifásico equilibrado por consumo de potencia

Si se integra en el periodo de facturación la potencia que se pierde en la resistencia del sistema, dada por (7.32), se obtiene la energía que se pierde durante el periodo de facturación:

$$\begin{aligned} W_p &= \int_0^{t_f} P_p dt = 3R_s \int_0^{t_f} I^2 dt = \frac{R_s}{3} \int_0^{t_f} \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \varphi} dt = \\ &= \frac{R_s}{3V^2 \cos^2 \varphi} \int_0^{t_f} P^2 dt \end{aligned} \quad (7.37)$$

Se llamará W a la energía absorbida por el receptor durante el tiempo de facturación, t_f . Si esa energía se ha obtenido del sistema con potencia constante P_{t_f} durante todo el tiempo t_f , (7.37) da que la energía que se ha perdido en la resistencia del sistema es

$$W_{pt_f} = \frac{R_s P_{t_f}^2 t_f}{3V^2 \cos^2 \varphi} = \frac{R_s W^2 t_f}{3V^2 t_f^2 \cos^2 \varphi} = \frac{R_s W^2}{3V^2 t_f \cos^2 \varphi}$$

Si la misma energía se ha obtenido a potencia constante P_t durante un tiempo $t \leq t_f$, la energía que se ha perdido durante el tiempo de facturación es ahora

$$W_{pt} = \frac{R_s P_t^2 t}{3V^2 \cos^2 \varphi} = \frac{R_s W^2 t}{3V^2 t^2 \cos^2 \varphi} = \frac{R_s W^2}{3V^2 t \cos^2 \varphi}$$

La relación entre ambas energías es

$$\frac{W_{pt}}{W_{pt_f}} = \frac{t_f}{t} \quad (7.38)$$

Es decir, la energía que se pierde en la resistencia del sistema para obtener de él la energía W con potencia constante es inversamente proporcional al tiempo que se invierta en obtenerla.

Realmente las relaciones anteriores son, para los propósitos actuales, idénticas a las correspondientes de los sistemas de corriente continua. Difieren en la constante del sistema, que ahora es $K_s = R_s / (3V^2 \cos^2 \varphi)$. Por tanto, con una demostración del todo igual que la (7.14) (página 63), se obtiene que la energía mínima que se pierde en el sistema cuando se extrae de él la energía W con receptor de factor de potencia constante, $\cos \varphi$, durante el tiempo de facturación, t_f , es

$$W_{pmi} = \frac{R_s W^2}{3V^2 t_f \cos^2 \varphi} = \frac{R_s W^2}{U^2 t_f \cos^2 \varphi} \quad (7.39)$$

O sea, también en el sistema trifásico equilibrado, la energía que se pierde en su resistencia al extraer de él la energía W durante el tiempo de facturación, t_f , es mínima si esa energía se extrae con potencia constante W/t_f .

Se llamará también ahora *cociente de pérdidas por consumo de potencia* a la relación entre la potencia realmente perdida en la resistencia del sistema trifásico cuando se extrae la energía W durante el tiempo de facturación t_f , y la mínima que se perdería durante ese tiempo

$$c_P = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{\frac{R_s}{3V^2 \cos^2 \varphi} \int_0^{t_f} P^2 dt}{\frac{R_s W^2}{3V^2 t_f \cos^2 \varphi}} = \frac{t_f \int_0^{t_f} P^2 dt}{W^2}$$

El último miembro de esta fórmula es idéntico al de la (7.26) (página 114), que es la correspondiente de los sistemas monofásicos, y también igual que la (7.18) (página 66), que es la de los sistemas de corriente continua. Por tanto, para los tres sistemas, el cociente de pérdidas por consumo de potencia vale

$$c_P = \frac{t_f \int_0^{t_f} P^2 dt}{W^2} \quad (7.40)$$

t_f es el periodo de facturación; P es la potencia activa de la carga en cada instante en los sistemas monofásico y trifásico equilibrado, y el valor instantáneo de la potencia de la carga en los sistemas de corriente continua; y W es la energía absorbida por la carga durante el periodo de facturación.

Otra expresión también útil del factor c_P es

$$\begin{aligned} c_P &= \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{3R_s \int_0^{t_f} I^2 dt}{\frac{R_s W^2}{3V^2 t_f \cos^2 \varphi}} = \frac{3 \int_0^{t_f} I^2 dt}{\left(\int_0^{t_f} 3VI \cos \varphi dt \right)^2} = \frac{t_f \int_0^{t_f} I^2 dt}{\left(\int_0^{t_f} Idt \right)^2} = \\ &= \frac{t_f \int_0^{t_f} I_m^2 dt}{\left(\int_0^{t_f} I_m dt \right)^2} \end{aligned} \quad (7.41)$$

7.4.7. Medida del cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas de sistemas trifásicos

Se comenzará este apartado describiendo el procedimiento para obtener el resultado de (7.40) por medio del equipo de medida constituido por la tarjeta PCI 6071E de National Instruments, insertada en un ordenador, y el programa LabVIEW para hacer los cálculos.

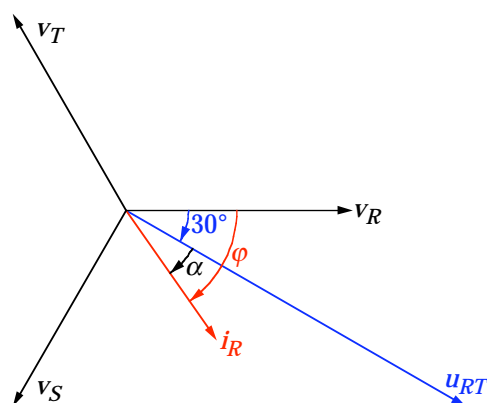


Figura 93.- El ángulo φ de la carga es la diferencia de fase entre v_R e i_R . Por tanto $\varphi = 30^\circ + \alpha$.

Se medirá la potencia activa P de la carga trifásica, que, como se ha dicho, es una carga equilibrada. Para ello se captará la onda de tensión instantánea u_{RT} entre las fases R y T , y se obtendrá la onda de intensidad instantánea i_R por la fase R con frecuencia de captación suficiente para que ambas puedan ser representadas con exactitud, durante un pequeño intervalo de tiempo. Como la frecuencia de las ondas es 50 Hz, el periodo es $1/50 = 0.02\text{s} = 2\text{cs}$. Por tanto, si se toman, por ejemplo, 20 valores o más de cada una cada dos centisegundos, será más que suficiente. Esa frecuencia de muestreo equivale a 1000 muestra/s. Se pretende conseguir las dos ondas durante un segundo, es decir, cincuenta periodos de la tensión y cincuenta de la intensidad. Ese número proporciona gran exactitud para obtener los valores eficaces de la tensión y de la intensidad y la diferencia de fase φ entre ellas.

Con estos datos y el programa de LabVIEW se pueden obtener los valores eficaces U_{RT} e I_R de las ondas instantáneas u_{RT} e i_R , y la diferencia de fase α entre los dos ondas sinusoidales u_{RT} e i_R , en este orden. De esta diferencia de fase se obtiene el ángulo $\varphi = 30^\circ + \alpha$ (Figura 93). Con estos datos puede obtenerse la potencia P , pues

$$P = \sqrt{3}U_{RT}I_R \cos \varphi \quad (7.42)$$

Por tanto, si con los valores eficaces y el ángulo φ medidos se programa la operación de (7.42), se obtiene la potencia activa de la carga equilibrada.

Con la operación $\sqrt{3}U_{RT}I_R \cos \varphi \Delta t = \Delta W$, se obtiene la energía que el receptor ha absorbido durante el tiempo Δt , que ha de comenzar a

contarse desde el inicio de la captación de las ondas. Ha de sumarse a la energía acumulada anterior, desde $t = 0$, en que comenzó a contarse el periodo de facturación, t_f . Y así hasta el valor final de t_f , en que se habrá completado del cálculo de la energía absorbida por la carga

$$W \approx \sqrt{3} \sum_0^{t_f} U_{RT} I_R \cos \varphi \Delta t$$

Los límites del sumatorio significan que los incrementos del tiempo comienzan en $t = 0$, cuando empieza el periodo de facturación, y terminan en t_f , cuando acaba ese periodo. Es decir, la suma de todos los intervalos Δt debe ser t_f .

Simultáneamente, utilizando los mismos intervalos Δt anteriores, debe hallarse la integral del numerador de (7.40), que es

$$\int_0^{t_f} P^2 dt \approx 3 \sum_0^{t_f} U_{RT}^2 I_R^2 \cos^2 \varphi \Delta t$$

Transcurrido el tiempo t_f , el programa de LabVIEW habrá realizado la operación correspondiente al último miembro de (7.40), es decir,

$$\begin{aligned} c_P &= \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{t_f \int_0^{t_f} P^2 dt}{W^2} \approx \frac{3 t_f \sum_0^{t_f} U_{RT}^2 I_R^2 \cos^2 \varphi \Delta t}{\left(\sqrt{3} \sum_0^{t_f} U_{RT} I_R \cos \varphi \Delta t \right)^2} = \\ &= \frac{t_f \sum_0^{t_f} U_{RT}^2 I_R^2 \cos^2 \varphi \Delta t}{\left(\sum_0^{t_f} U_{RT} I_R \cos \varphi \Delta t \right)^2} \end{aligned} \quad (7.43)$$

cuyo resultado es el cociente de pérdidas por consumo de potencia de la carga trifásica equilibrada.

Con los datos captados, además del cociente de pérdida de energía se pueden obtener los valores de otras magnitudes, en especial la energía absorbida por el receptor. Pero, si solo se quiere medir c_P , obtener el

último término de (7.41) es mucho más fácil. Basta captar la onda de la intensidad de una fase en cada intervalo Δt , hallar por medio de la programación adecuada en LabVIEW su valor máximo I_m , hallar el producto $I_m^2 \Delta t$, sumarlo a la suma de los productos similares anteriores hallados desde el comienzo del periodo de facturación, hallar así mismo el producto $I_m \Delta t$ y sumarlo de la misma manera a la suma anterior correspondiente, y dividirlos, de forma que, una vez transcurrido el tiempo $t_f = \sum \Delta t$, el programa habrá realizado la operación

$$\frac{t_f \sum_0^{t_f} I_m^2 \Delta t}{\left(\sum_0^{t_f} I_m \Delta t \right)^2} \approx c_P \quad (7.44)$$

7.4.8. Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas trifásicas equilibradas

En la Figura 94 se representa la red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas trifásicas equilibradas. Se trata de poder medir las variables que permiten hacer las operaciones que constituyen el último miembro de (7.43). El funcionamiento es totalmente semejante al de la red de la Figura 67 (página 117) para receptores monofásicos.

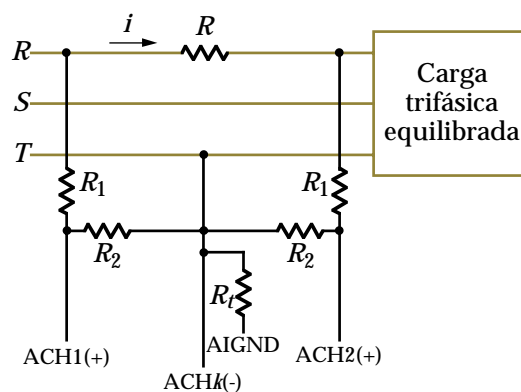


Figura 94.- Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas trifásicas equilibradas.

El cálculo de las resistencias de los divisores de tensión se hace como allí, salvo que ahora hay que considerar el valor máximo U_{RTm} de la tensión sinusoidal v_{RT} para que los valores máximos de las tensiones entre los canales ACH1(+) y ACH2(+) no superen 10 V. Es decir, deben cumplirse las siguientes relaciones:

$$R_2 < 10 \frac{R_1 + R_2}{U_{RTm}}$$

y

$$R = 4.88 \times 10^{-3} \frac{R_1 + R_2}{R_2 I_{Rmi}}$$

I_{Rmi} es el menor valor de la intensidad por la fase R que se quiere detectar.

7.4.9. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas trifásicas equilibradas

El programa calculará y mostrará en la pantalla del ordenador el cociente de pérdidas por demanda de potencia de una carga trifásica equilibrada.

Además, al igual que los programas anteriores para cargas de corriente continua y cargas monofásicas, se captarán medidas de un aparato físico real a través de la tarjeta de captación de datos o se simularán los datos captados, se mostrará el valor actual del cociente, y su *historia*.

Hay que indicar que este programa no incluye a los anteriores, sino que los modifica para poder trabajar con cargas trifásicas. Si se quiere determinar el cociente con cargas de corriente continua o monofásicas se debe emplear el programa anterior apropiado. Lo mismo ocurrirá con todos los programas que se basen en estos tres que se han visto hasta ahora, aunque ya no se volverá a mencionar.

Seguidamente se explican los cambios introducidos al programa en que éste se basa.

7.4.9.1. Panel frontal

La disposición del panel frontal de este instrumento virtual sigue siendo similar a la de los programas precedentes (Figura 95).

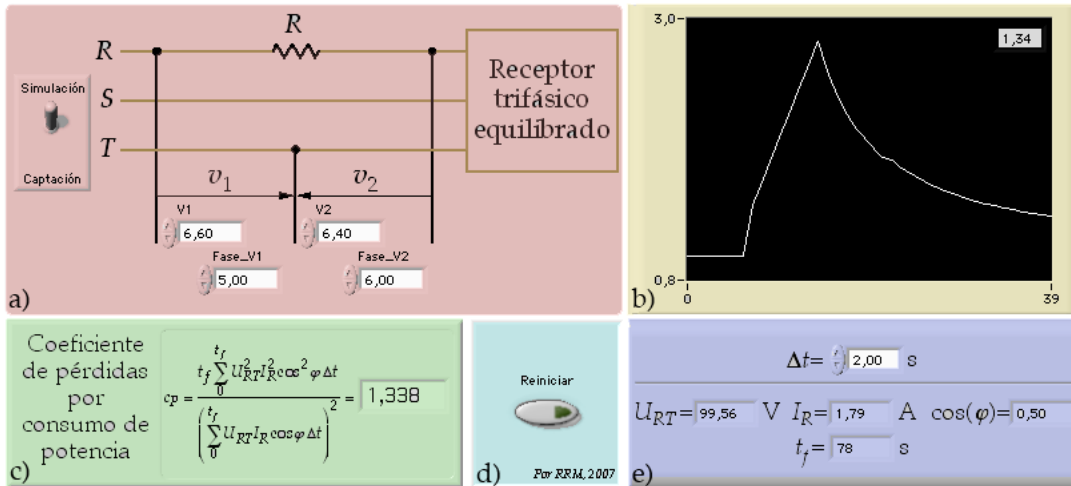


Figura 95.- Zonas en que está dividido el panel frontal del instrumento virtual.

- muestra el esquema de la red de acondicionamiento de señales que se debe usar con este programa. Se medirá la tensión V_1 antes de la resistencia R y la tensión V_2 después de la resistencia R . A la izquierda del esquema está el interruptor *Simulación/Captación* que permite seleccionar si el programa debe trabajar con datos provenientes de la tarjeta de captación o debe simularlos. En el caso de que prefiera la posición de *Simulación* aparecerán los campos V_1 , V_2 , *Fase_V1* y *Fase_V2*, necesarios para que el usuario defina los valores máximos de tensión de las ondas sinusoidales y sus fases.
- La zona b) muestra la evolución del cociente de pérdidas por consumo de potencia a lo largo del tiempo y el último valor que la gráfica ha representado, que aparece en el campo de la parte superior derecha de la pantalla.
- En c) se indica que se está calculando el *Cociente de pérdidas por consumo de potencia*. Se muestra también la ecuación, específica de un sistema trifásico, que el programa está empleando para obtener el cociente y su valor en ese momento, solución de esa ecuación.
- d) contiene el botón que el usuario debe pulsar para volver a iniciar el periodo de facturación.

- Finalmente, e) permite al usuario escoger el valor de Δt , y muestra los valores U_{RT} , que es el valor eficaz de la tensión entre las fases R y T , medida en voltios; I_R , que es el valor eficaz de la intensidad que circula por la fase R , $\cos(\varphi)$ es el factor de potencia de la carga trifásica equilibrada, y t_f es el tiempo de facturación, en segundos.

También estará oculta la zona con resultados poco importantes para el usuario pero necesarios para realizar el cálculo del cociente.

Valores auxiliares que el usuario no necesita conocer

Numerador 1	Ini Dt (ms)	Simulado? <input checked="" type="radio"/>
469314,27	2806001	
Denominador 1	Fin Dt (ms)	
5244,14	2806001	
Tick inicio medida	Dtr (s)	
2727580	2,00	

Figura 96.- Otros resultados de escaso interés para el usuario, pero necesarios para el programa, permanecen ocultos a su vista.

7.4.9.2. Diagrama de conexiones

Toda la programación se ha podido realizar con las instrucciones preprogramadas de LabVIEW, no ha sido necesario realizar ningún programa en C.

Además, como fruto del esfuerzo que se ha puesto en el diseño de los programas para que los elementos comunes puedan ser reutilizados en los siguiente programas, los cambios que se han necesitado en la construcción de este han sido mínimos.

7.4.9.2.1. Estructura principal

El programa consta, como los anteriores, de cuatro *fotogramas* incluidos dentro de una *estructura secuencial*. No se ha puesto ninguna instrucción fuera de esta *estructura*.

7.4.9.2.2. Fotograma 0

El primer fotograma de la estructura secuencial (Figura 97), inicializa los valores cuando el usuario pulse el botón *Reiniciar*, y almacena el

instante de inicio del periodo de facturación y el del primer incremento de tiempo, Δt , en sendas variables.

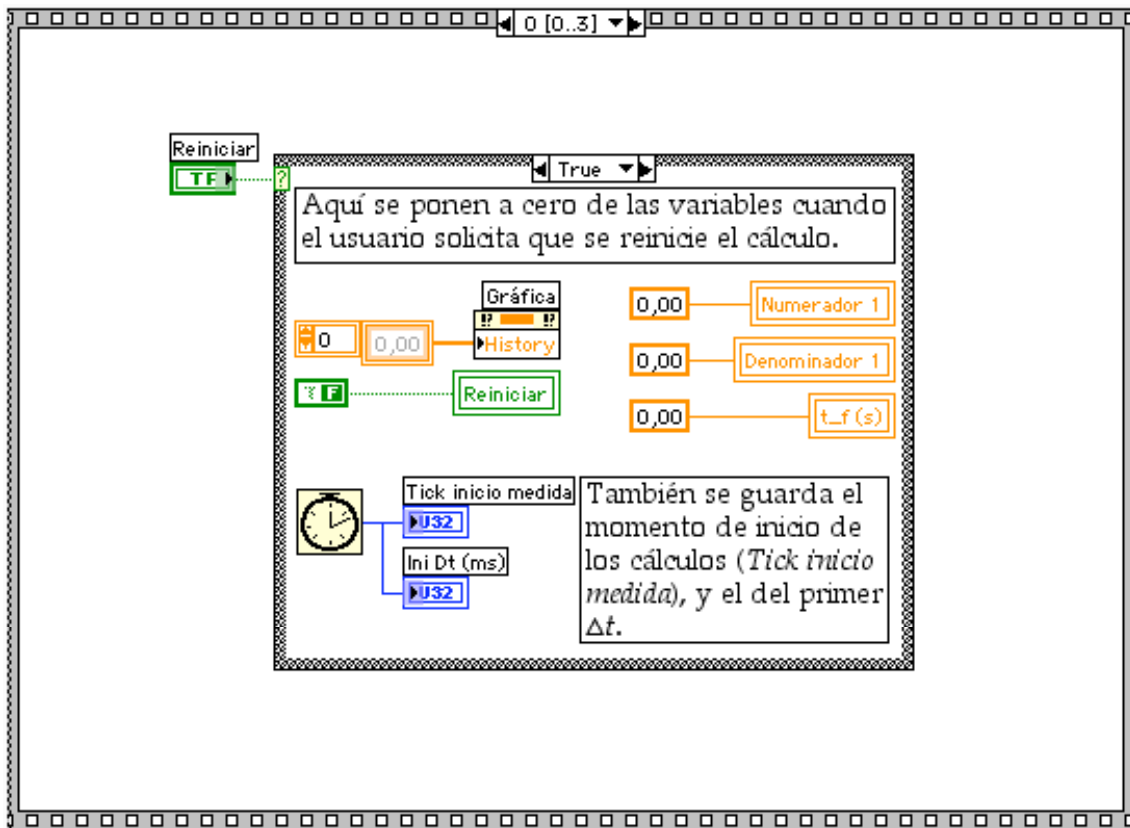


Figura 97.- *Fotograma 0* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

No ha sido necesario modificar la programación de este primer fotograma.

7.4.9.2.3. *Fotograma 1*

Aquí se captan o simulan los valores de las ondas con las que se trabajará para la obtención del cociente (Figura 98). Además se obtienen los valores eficaces de la tensión entre las fases R y T , y de la intensidad de la fase R , I_R , se realiza la parada necesaria para que Δt dure lo que ha pedido el usuario, y se muestran u ocultan los campos que se usan en la simulación.

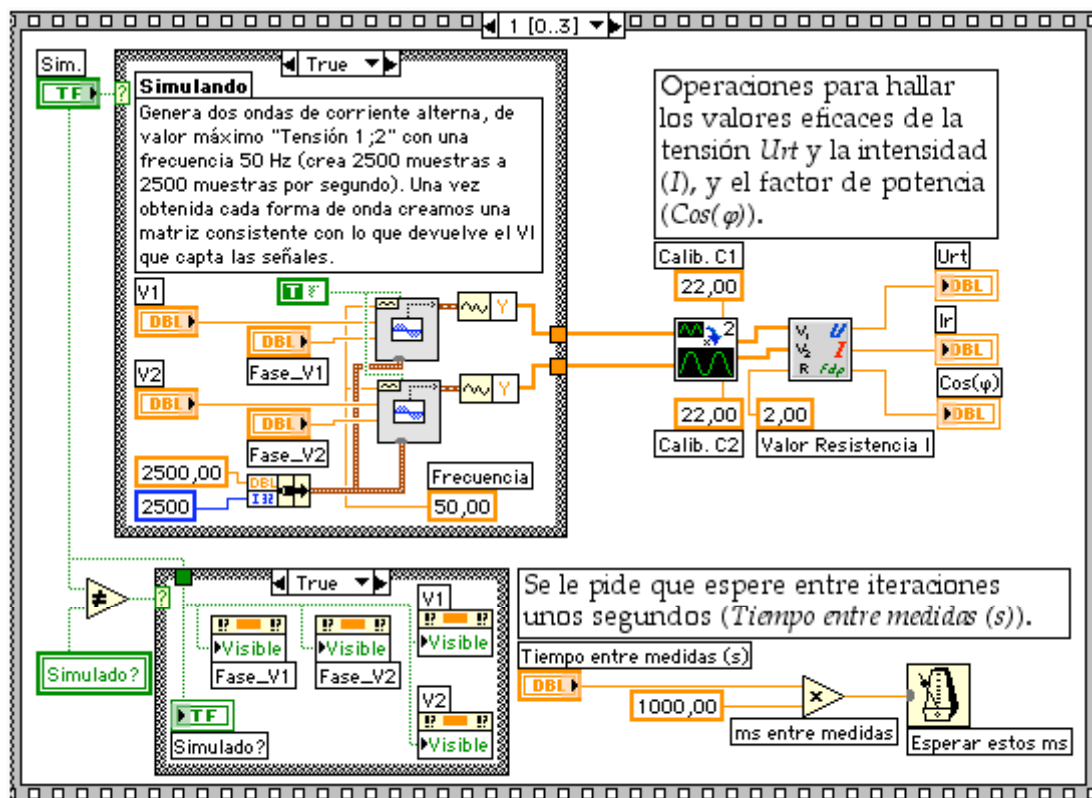


Figura 98.- Fotografía 1 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

Este es el único fotograma que ha sido necesario modificar para que el programa funcione correctamente. Si bien toda la zona de captación de datos o de simulación de esos datos captados, así como el instrumento de calibración, siguen valiendo para este programa sin la necesidad de modificarlos con respecto al programa anterior para cargas monofásicas, no ocurre lo mismo con el instrumento encargado de obtener los valores eficaces de la intensidad y la tensión compuesta, y el factor de potencia (Figura 99).



Figura 99.- Instrumento de creación propia llamado *Obtener_Urt_I_Ef_2Canales.vi*.

Como en este caso se está trabajando con los valores de tensión instantánea v_1 y v_2 medidos entre las fases R y T , en lugar de entre una fase y el neutro, por ejemplo, las operaciones que hay que emplear varían con respecto a las del programa anterior, preparado para cargas monofásicas. Ahora se va a trabajar para calcular el cociente con la tensión compuesta U_{RT} , en vez de con una tensión simple, y la intensidad de fase

I_R . Además, el método para obtener el desfase entre la tensión y la intensidad tiene que variar necesariamente, como ya se vio, pues ahora no se están captando datos de la tensión v_R y la intensidad i_R , sino de la tensión u_{RT} ; es decir, el nuevo instrumento virtual que se ha creado debe obtener el valor de $U_{RT} = V_2$, $I_R = (V_1 - V_2)/R$ y $\cos\varphi = \cos(30^\circ + \alpha)$.

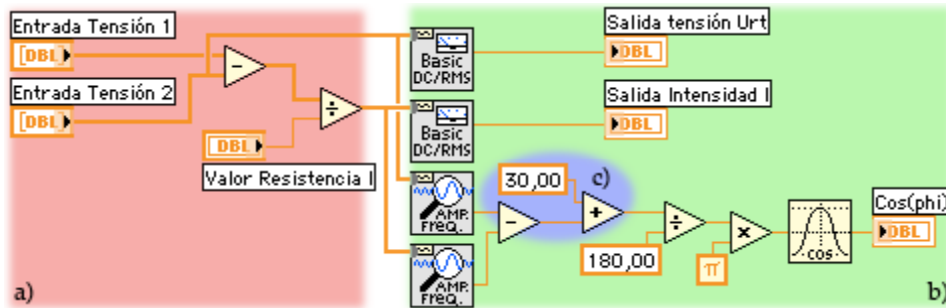


Figura 100.- Diagrama de conexiones del instrumento virtual de creación propia *Obtener_Urt_I_Ef_2Canales.vi*.

Así, por cómo se ha construido la red de adecuación de señal (Figura 101), es fácil ver que $u_{RT} = v_2$, y como $i_R = (v_1 - v_2)/R$, la parte a) del programa que se construyó para la carga monofásica sigue sirviendo ahora.

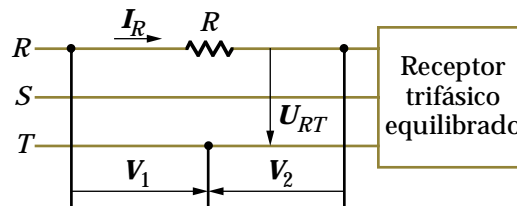


Figura 101.- Las variables eléctricas medidas por la tarjeta de captación de datos y las que se necesitan para calcular el cociente.

El resto del programa, la parte b) de la Figura 100, también se puede usar tal y como estaba en el programa anterior, siempre y cuando se tenga la precaución de añadir la operación indicada en la parte c) de la Figura 100. Aquí, a la diferencia de fase entre la tensión v_{RT} y la intensidad i_R se le añaden 30 grados para obtener el desfase entre la tensión v_R y la intensidad i_R . Hecho el paso c), el resto del programa, convertir el desfase en radianes y hallar su coseno, sigue siendo igual que el anterior.

La otra modificación que se ha realizado en este fotograma ha sido sobre las etiquetas de los indicadores a los que se lleva el resultado (Figura

102), para que reflejen los valores que muestran: U_{RT} , I_R y $\cos\varphi$. Esto mismo se hará en todos los programas a lo largo de esta memoria, aunque no se indique en cada uno de ellos.



Figura 102.- Indicadores que muestran los resultados del *fotograma 1*.

La zona dedicada a mostrar u ocultar los campos que el usuario utiliza para definir los valores de tensión cuando se está simulando la captación de datos, y la zona donde se programa la parada del instrumento virtual, no han sufrido ningún cambio con respecto al programa anterior.

7.4.9.2.4. *Fotograma 2*

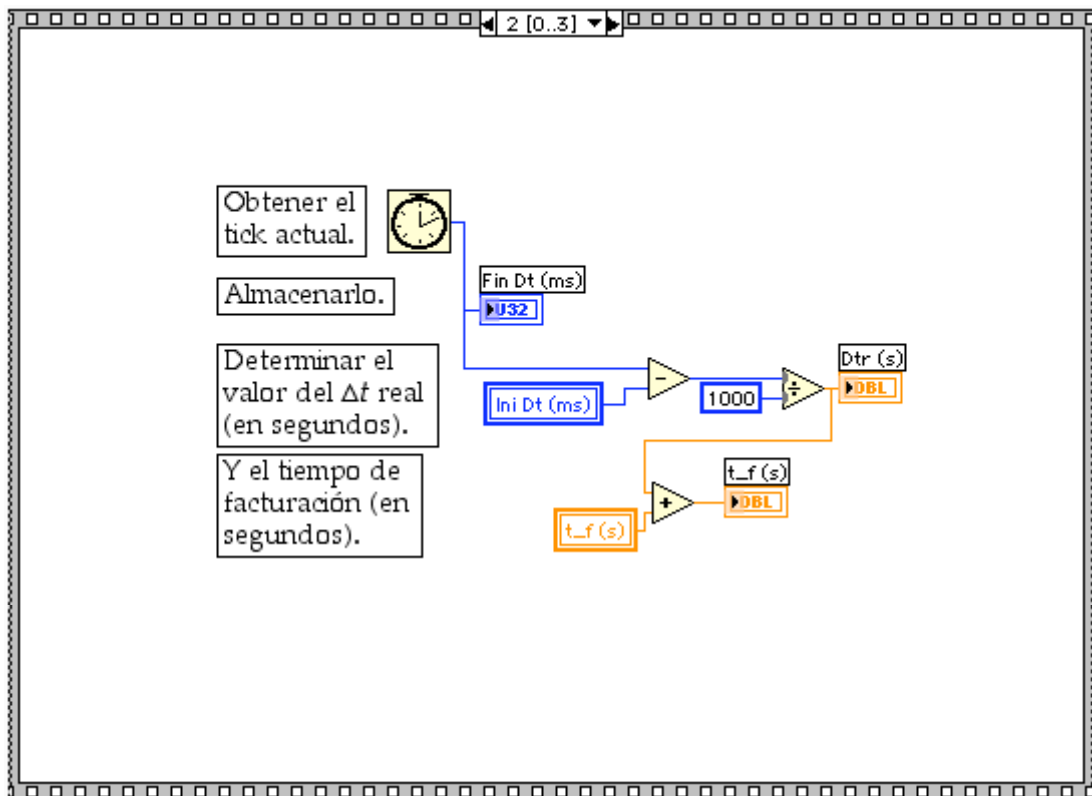


Figura 103.- *Fotograma 2* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

El fotograma 2 (Figura 103), obtiene y almacena los valores de Δt y del tiempo de facturación.

No se ha modificado en absoluto.

7.4.9.2.5. *Fotograma 3*

El último fotograma calcula ya el cociente de pérdidas por consumo de potencia en sistemas trifásicos, presenta los resultados en la pantalla del ordenador y hace que el instante final del Δt actual pase a ser el instante de inicio del siguiente.

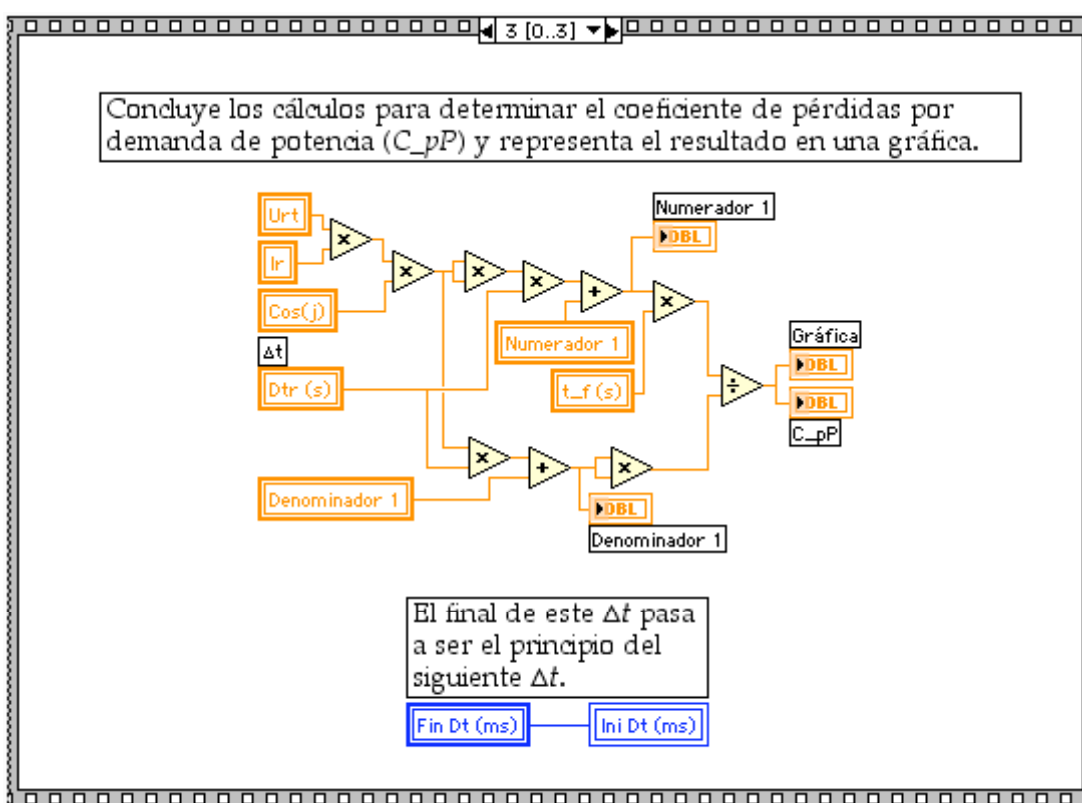


Figura 104.- *Fotograma 3* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

Aquí, salvo por la modificación de los nombres de las variables con las que se comienza el cálculo, que ahora se llaman U_{rt} , I_r y $\text{Cos}(j)$, el resto del programa es idéntico al del *fotograma 3* del programa anterior, para cargas monofásicas.

Hasta aquí llega el programa de LabVIEW que permite calcular el cociente de pérdidas por consumo de potencia en cargas trifásicas.

7.4.10. Sistemas trifásicos complejos

Como en los dos sistemas anteriores, el estudio se ha hecho sobre un sistema trifásico como el representado por la Figura 92 (página 134). Pero es completo, en el sentido de que abarca a todo sistema trifásico de tres hilos, por complejo que sea, ya que si se tiene una red trifásica equilibrada con tres terminales a los que se conecta un receptor trifásico equilibrado, por muy compleja que sea la red trifásica, puede ser aproximada por un tripolo trifásico de Thévenin equilibrado, es decir, una fuente trifásica equilibrada de tensión en serie con tres impedancia iguales Z_s [56][57]. Al conectar a ese tripolo el receptor trifásico equilibrados, se obtiene un sistema trifásico equilibrado como el analizado hasta aquí (Figura 105).

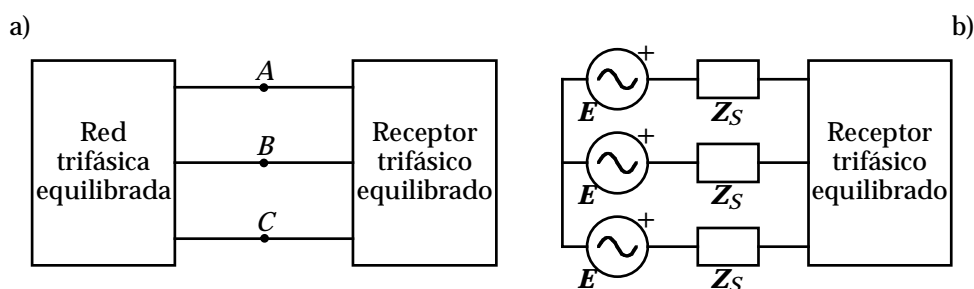


Figura 105.- Cualquier red trifásica equilibrada de tres terminales se puede aproximar por un tripolo de Thévenin equilibrado.

7.5. Energía total que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico por consumo de potencia

Hasta aquí se han determinado las pérdidas de potencia y de energía que un receptor de una potencia determinada, conectado a un sistema eléctrico de corriente continua, monofásico o trifásico, provoca en la resistencia de ese sistema si solo ese receptor estuviera conectado al sistema en ese punto. De forma similar se hace para un solo consumidor. Se dirá que esas pérdidas son exclusivamente achacables a ese consumidor o a esa carga. Es decir, ambas determinaciones, de potencia y de energía que se pierden, son específicas de una carga concreta, de un receptor o de un consumidor, conectada en un lugar concreto del sistema eléctrico.

Pero a un sistema eléctrico se conectan muchas cargas en lugares distintos. Eso significa que, para cada una de esas cargas, el sistema se aproxima por equivalentes de Thévenin diferentes, formados por impedancias diferentes. Dicho de otra manera: dos cargas idénticas conectadas a un sistema eléctrico en terminales distintos, provocan por sí

solas pérdidas de potencia diferentes y, por tanto, pérdidas de energía diferentes aunque estén conectadas el mismo tiempo. Esto es así porque el equivalente de Thévenin del sistema eléctrico es, en general, diferente desde terminales diferentes, de manera que, aunque la tensión de todos los receptores sea la misma, o sea, aunque la tensión del sistema sea la misma, no lo es, en general, la impedancia del sistema desde los diferentes puntos de conexión de los receptores, ni tampoco su resistencia, sino que existe una resistencia del sistema distinta para cada carga si las cargas están conectadas en terminales distintos.

Por el contrario, a dos cargas conectadas simultáneamente a los mismos terminales del sistema, corresponde la misma resistencia del sistema. Pero, a pesar de ello, la pérdida de potencia que originan en la resistencia del sistema, incluso en este último caso, no es la suma de la que originarían cada una por separado. Por ejemplo: si un receptor de potencia P_1 se conecta a un sistema eléctrico, la potencia que se pierde en la resistencia del sistema si solo ese receptor está conectado en ese punto es, según se vio, proporcional al cuadrado de la potencia del receptor: $P_{p1} = KP_1^2$. Si en lugar de ese receptor se conecta en el mismo punto otro de potencia P_2 y con el resto de características similares (el mismo factor de potencia si son sinusoidales y equilibrados si son trifásicos), la potencia que se pierde ahora en la resistencia del sistema es $P_{p2} = KP_2^2$. Si se conectaran los dos a la vez en el mismo lugar, la pérdida de potencia sería

$$P_{p(1+2)} = K(P_1 + P_2)^2 > KP_1^2 + KP_2^2 = P_{p1} + P_{p2}$$

Es decir, la potencia que se pierde en el sistema eléctrico, sea de corriente continua, monofásico o trifásico, por causa del consumo de potencia de dos cargas conectadas simultáneamente en el mismo lugar, es siempre superior a la suma de las potencias que se pierden cuando cada una está conectada sola. Esta afirmación es también cierta para dos cargas conectadas en distinto lugar si sus intensidades circulan por algunas ramas comunes del sistema eléctrico.

Por tanto, tampoco la energía que se pierde en la resistencia del sistema durante el periodo de facturación por consumo de potencia es la suma de las energías que los receptores hacen perder por separado por este motivo, sino mayor.

Pero, si durante el periodo de facturación cada receptor de los conectados al sistema eléctrico hace perder el mínimo de energía, la

energía total que se pierde en el sistema eléctrico por consumo de potencia es siempre menor que si no fuera así. Por eso, siempre es conveniente que, en cada toma de energía, se extraiga la energía de forma que la que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por demanda de potencia en ese punto sea la mínima. Si eso ocurre, para esa entrega de energía en esos puntos, la energía perdida en la resistencia del sistema eléctrico exclusivamente por consumo de potencia es la mínima posible. Por eso conviene fomentar la extracción de energía de esa forma.

7.6. Resumen de resultados del análisis de pérdidas por consumo de potencia

Sistemas de corriente continua

Energía mínima perdida

$$W_{pmi} = \frac{R_s W^2}{V^2 t_f}$$

donde R_s es la resistencia del sistema, W es la energía que se ha extraído del sistema durante el periodo de facturación t_f , y V es la tensión del receptor.

Energía que realmente se pierde

$$W_p = \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} P^2 dt$$

donde P es la potencia del receptor.

Cociente de pérdidas

$$c_P = \frac{t_f \int_0^{t_f} I^2 dt}{\left(\int_0^{t_f} I dt \right)^2}$$

donde I es la intensidad del receptor.

Sistemas monofásicos

Energía mínima perdida

$$W_{pmi} = \frac{R_s W^2}{t_f V^2 \cos^2 \varphi}$$

donde R_s es la resistencia del sistema, W la energía que se ha extraído del sistema durante el periodo de facturación t_f , V el valor eficaz de la tensión del receptor y $\cos \varphi$ el factor de potencia del receptor.

Energía que realmente se pierde

$$W_p = \frac{R_s}{V^2 \cos^2 \varphi} \int_0^{t_f} P^2 dt$$

donde P es la potencia activa que absorbe el receptor.

Cociente de pérdidas

$$c_p = \frac{t_f \int_0^{t_f} I^2 dt}{\left(\int_0^{t_f} I dt \right)^2}$$

donde I es el valor eficaz de la intensidad del receptor.

Sistemas trifásicos

Energía mínima perdida

$$W_{pmi} = \frac{R_s W^2}{U^2 t_f \cos^2 \varphi}$$

donde R_s es la resistencia total de cada fase, W la energía que se ha extraído del sistema, U el valor eficaz de la tensión entre fases, t_f el tiempo de facturación y $\cos \varphi$ el factor de potencia del receptor.

Energía que realmente se pierde

$$W_p = \frac{R_s}{U^2 \cos^2 \varphi} \int_0^{t_f} P^2 dt$$

donde P es la potencia activa que absorbe el receptor.

Cociente de pérdidas

$$c_P = \frac{t_f \int_0^{t_f} I^2 dt}{\left(\int_0^{t_f} I dt \right)^2}$$

donde I es el valor eficaz de las intensidades de las fases.

8. Energía que se pierde en los sistemas eléctricos sinusoidales por consumo de potencia reactiva

La potencia reactiva es un concepto propio de las redes eléctricas sinusoidales [56]. En este capítulo estudiaremos las pérdidas relacionadas con el consumo de esta potencia por los receptores monofásicos y trifásicos que se conectan a los sistemas eléctricos sinusoidales de suministro de energía.

De toda la energía que se pierde en la resistencia de los sistemas eléctricos por causas achacables a los receptores, la que se pierde por la potencia reactiva de los receptores de los sistemas sinusoidales es la única que, desde hace tiempo y en la actualidad, tratan de disminuir las empresas distribuidoras por medio de métodos directos. Estos métodos parten de asumir que mayor consumo de energía reactiva por un receptor provoca siempre mayor pérdida de energía en la resistencia del sistema eléctrico. Con esta hipótesis, pocas veces cierta como se verá, se aplican en la actualidad en España, de forma análoga a como se hace en otros países, dos procedimientos para disuadir del consumo de energía reactiva a los consumidores y, por tanto, en principio, para reducir la energía que se pierde en la resistencia de los sistemas eléctricos sinusoidales por esta causa.

Uno de esos dos procedimientos consiste en la medida del coseno del argumento de la energía compleja [56] que absorbe el conjunto de receptores de cada consumidor durante el periodo de facturación. El coseno de ese argumento se suele llamar, impropriamente como veremos, factor de potencia. Cuanto menor es ese factor de potencia mayor es el consumo de energía reactiva, por lo que el coseno del argumento de la energía compleja se toma como medida indirecta del consumo de energía reactiva. Por medio de una fórmula en la que interviene ese factor de potencia, se obtiene un recargo que incrementa del precio de cada unidad de energía activa consumida, más cuanto menor es ese factor de potencia, o sea, más recargo cuanto mayor sea la energía reactiva consumida. En España, si el factor de potencia es la unidad o próximo a la unidad, el recargo se hace negativo, es decir, se transforma en bonificación [7][9][10].

Este método se aplica actualmente a ciertos consumidores, principalmente a empresas, fábricas, talleres, etc., pero no a los consumidores domésticos, de cuyos receptores no se mide de ninguna forma la energía reactiva que absorben del sistema eléctrico ni, por tanto, tampoco se aplica a ellos ningún recargo o bonificación por este motivo.

Otro procedimiento para disuadir del consumo de energía reactiva a los consumidores con la pretensión de disminuir la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico, consiste en cobrar directamente la energía reactiva absorbida por sus receptores en las condiciones establecidas en el contrato entre la compañía suministradora de energía eléctrica y el cliente. Por ahora, esa modalidad no es posible en España para todos los consumidores a los que se mide la energía reactiva, sino solo para los que pueden elegir suministrador de energía eléctrica y negociar con él las condiciones de ese suministro, a los que se suele llamar grandes consumidores [7][81].

8.1. Energía que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal por consumo de potencia reactiva de un receptor monofásico

Comenzaremos analizando la relación que existe entre la energía que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico sinusoidal, el factor de potencia de los receptores monofásicos conectados a él, y la potencia reactiva de estos receptores.

8.1.1. Potencia que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal por causa del factor de potencia de un receptor monofásico

Como se vio en el capítulo anterior, la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal a causa de una carga monofásica de potencia P conectada a él, y cuya tensión sinusoidal tiene de valor eficaz V es (7.20)

$$P_p = R_s I^2 = R_s \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \varphi} \quad (8.1)$$

R_s es la parte real de la impedancia de Thévenin del sistema [56], hallada desde los dos terminales a los que se conecta el receptor, a la que hemos llamado resistencia del sistema. Si el sistema sinusoidal consistiera solo en

una línea monofásica con un generador (Figura 106), R_s coincidiría con la suma de las resistencias de los dos hilos de la línea y del generador. $\cos\varphi$ es el factor de potencia del receptor monofásico.

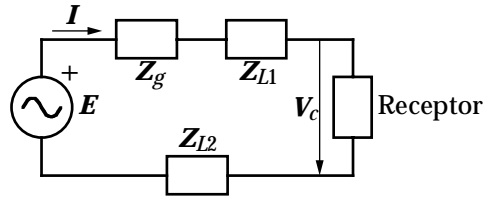


Figura 106.- Sistema monofásico.

Nos fijaremos ahora exclusivamente en el factor de potencia del receptor monofásico como variable de la que depende la potencia que se pierde en la resistencia del sistema.

Si solo varía $\cos\varphi$, de (8.1) se deduce que el valor mínimo de la potencia P_p se obtiene para el máximo valor de $\cos\varphi$, que es la unidad. Ese valor mínimo es, por tanto,

$$P_{pmi} = R_s \frac{P^2}{V^2} \quad (8.2)$$

La relación entre la potencia que se pierde y la mínima es

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \quad (8.3)$$

Esta relación se representa en la Figura 107. La curva solo se dibuja en la parte positiva de $\cos\varphi$, pues solo consideraremos receptores propiamente dichos; es decir, los que absorben potencia activa o, dicho de otro modo, aquellos cuya potencia activa absorbida es siempre positiva. Con independencia de si estos receptores son inductivos o capacitivos, su factor de potencia es siempre positivo, como se mostrará más adelante.

Se ve que la potencia P_p que se pierde tiende a infinito a medida que el factor de potencia tiende a cero. Otros puntos de interés de la curva de la Figura 107 son que su valor mínimo y, por tanto, el de P_p , se alcanza para el valor más alto de $\cos^2 \varphi$, que es la unidad, ya que se corresponde con el valor más alto de $\cos\varphi$, que es uno. Para ese valor de $\cos\varphi$ se

cumple la igualdad $P_p = P_{pmi}$. Para $\cos\varphi = 1/\sqrt{2} \approx 0.707$, la potencia que se pierde es doble de la mínima, y para $\cos\varphi = 0.500$, cuatro veces más. Para valores menores de $\cos\varphi$ la potencia que se pierde crece con gran rapidez [10]. La curva no existe para valores superiores a uno, pues este es el valor más alto de $\cos\varphi$.

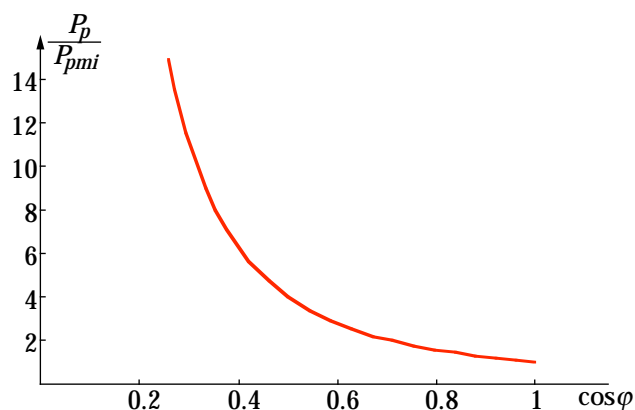


Figura 107.- Representación gráfica de (8.3). Es la relación entre la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema monofásico al que está conectado un receptor de factor de potencia $\cos\varphi$ y la potencia mínima que se pierde, que es la que corresponde a $\cos\varphi = 1$.

Se ve, por tanto, que para disminuir la potencia que se pierde debida al factor de potencia de los receptores monofásicos conviene elevar ese factor de potencia. Además, como para receptores propiamente dichos existe relación biunívoca entre la potencia que se pierde y el factor de potencia del receptor, el propio factor de potencia puede servir para la medida indirecta de la potencia que por este motivo se pierde en la resistencia del sistema eléctrico.

8.1.2. Disminución de la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico por cada unidad que se incrementa el factor de potencia del receptor monofásico

La pendiente de la curva de la Figura 107 da el aumento relativo, respecto a la potencia mínima, de la potencia que se pierde en la resistencia del sistema monofásico por cada unidad que se incrementa el factor de potencia del receptor. Esa pendiente es la derivada de (8.3) respecto a $\cos\varphi$:

$$\frac{d\left(\frac{P_p}{P_{pmi}}\right)}{d(\cos\varphi)} = -\frac{2}{\cos^3\varphi} \quad (8.4)$$

Se representa en la Figura 108. Se ve que la derivada es negativa para $\cos\varphi > 0$, únicos casos de nuestro interés. Eso significa que la potencia P_p que se pierde en el sistema disminuye cuando aumenta el factor de potencia $\cos\varphi$. Además, se ve que el valor absoluto de la disminución de la potencia que se pierde por cada unidad que se aumente el factor de potencia es mayor cuanto menor es el factor de potencia. Es decir, un determinado aumento del factor de potencia produce mayor disminución de la potencia que se pierde si se parte, por ejemplo, de 0.4 que si se parte de 0.8. O, dicho de otra forma, un aumento del factor de potencia disminuye más la potencia que se pierde cuanto más bajo sea el factor de potencia del que se parte. Por tanto, *para disminuir la potencia que se pierde en la resistencia de sistemas eléctricos sinusoidales por causa del factor de potencia de los receptores monofásicos es más eficaz elevar los factores de potencia más bajos que dedicar el esfuerzo a elevar los más altos y llegar, incluso, a la unidad en ellos.*

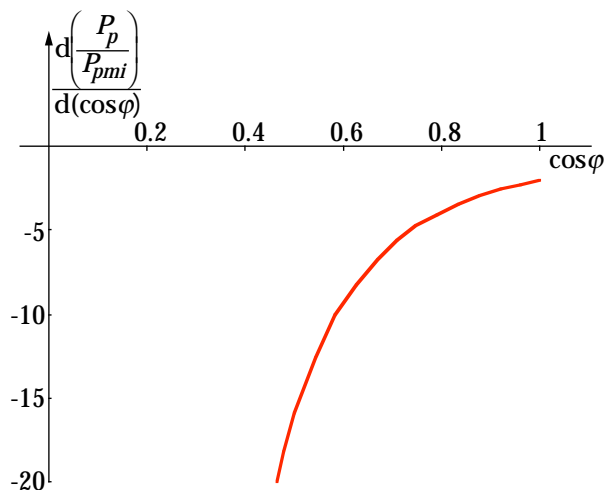


Figura 108.- Representación gráfica en función de $\cos\varphi$ para $\cos\varphi > 0$ de la derivada (8.4). Representa lo que se incrementa la potencia perdida P_p por cada unidad que se incrementa el factor de potencia del receptor, es decir, por cada unidad que se incrementa $\cos\varphi$.

8.1.3. Energía que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal por causa del factor de potencia de cargas monofásicas

Hasta ahora hemos analizado la relación entre la potencia que se pierde en el sistema eléctrico y el factor de potencia de una carga monofásica. Pero es de mayor interés tratar de evaluar la energía que durante un tiempo se pierde en la resistencia del sistema.

La energía compleja que un sistema eléctrico sinusoidal entrega a un receptor monofásico de potencia compleja $\mathbf{S} = \underline{S}/\varphi = P + jQ$ conectado a él durante el tiempo t_f es

$$\mathbf{W} = \int_0^{t_f} \mathbf{S} dt = \underline{W}/\varphi_W = W_a + jW_r$$

Los números complejos como \mathbf{W} se escribirán en **negrita**. $W_a = \int_0^{t_f} P dt$ es la energía activa que absorbe el receptor, la única energía en sentido termodinámico que absorbe. Es medida por los contadores monofásicos de energía activa. $W_r = \int_0^{t_f} Q dt$ es la energía reactiva, que se considera absorbida si es positiva y entregada si es negativa; $W = \sqrt{W_a^2 + W_r^2}$ es el módulo de la energía compleja, y φ_W es el argumento de esa energía compleja [56].

Según (8.1)

$$P_p = \frac{R_s}{V^2} \frac{P^2}{\cos^2 \varphi}$$

Por tanto, la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico para entregar la energía activa W_a durante el tiempo t_f es

$$W_p = \int_0^{t_f} P_p dt = \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} \frac{P^2}{\cos^2 \varphi} dt \quad (8.5)$$

P es la potencia activa con que se entrega esa energía W_a . La potencia P puede ser función del tiempo. También el factor de potencia $\cos \varphi$ puede ser función del tiempo. Como siempre, se supone que el sistema permanece invariable, es decir, que no cambian en el tiempo R_s ni V .

Se ve en (8.5) que si $\cos\varphi$ vale permanente uno, la energía que se pierde debida al factor de potencia es la mínima.

8.1.4. Cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas monofásicas

Si se puede elegir el factor de potencia, la energía mínima que se pierde en el sistema eléctrico cuando se entrega energía a un receptor monofásico de potencia activa P es, como se ha dicho, la que se entrega con factor de potencia unidad, que corresponde, a su vez, a la mínima potencia perdida, que se da en (8.2):

$$W_{pmi} = \int_0^{t_f} P_{pmi} dt = \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} P^2 dt \quad (8.6)$$

Como en casos anteriores, definiremos cociente de pérdida de energía por causa del factor de potencia de cargas monofásicas, c_Q , a la relación entre la energía W_p que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por esta causa durante el periodo de facturación t_f , y el valor mínimo W_{pmi} que podría perderse:

$$\begin{aligned} c_Q = \frac{W_p}{W_{pmi}} &= \frac{\frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} \frac{P^2}{\cos^2 \varphi} dt}{\frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} P^2 dt} = \frac{\int_0^{t_f} S^2 dt}{\int_0^{t_f} P^2 dt} = \frac{\int_0^{t_f} V^2 I^2 dt}{\int_0^{t_f} V^2 I^2 \cos^2 \varphi dt} = \\ &= \frac{\int_0^{t_f} I^2 dt}{\int_0^{t_f} I^2 \cos^2 \varphi dt} \end{aligned} \quad (8.7)$$

También c_Q es un número real mayor o igual que la unidad. Es lo que se suele llamar un índice de demérito o de falta de calidad, pues, cuanto mayor es c_Q se pierde más energía por cada unidad de energía que se entrega al receptor. El valor óptimo de c_Q es uno. Toma ese valor cuando la energía que se pierde durante el periodo de facturación es mínima, cuando $W_p = W_{pmi}$.

Como $W_p = c_Q W_{pmi}$, el cociente c_Q es el número de veces que la energía que se pierde, W_p , contiene a la energía mínima que se pierde W_{pmi} .

Las igualdades (8.7) ofrecen el valor de c_Q en función de variables diferentes. Se puede utilizar uno u otro miembro de esas igualdades como expresión de c_Q para poner de manifiesto diferentes aspectos de interés, o para realizar la medida de c_Q con más facilidad.

8.1.5. Medida del cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas monofásicas

Se trata de idear un procedimiento para obtener experimentalmente el resultado de (8.7) para un receptor monofásico. Los datos para las operaciones se obtendrán, como en casos anteriores, por medio de la tarjeta de adquisición de datos PCI 6071E de National Instruments, acoplada a un ordenador, y las operaciones se realizarán por medio de programación específica que se elaborará en LabVIEW.

Puede utilizarse cualquiera de los miembros de (8.7) pero, si solo se quiere medir c_Q , puede emplearse el último. Lo mejor es dividir el periodo de facturación t_f en intervalos Δt y obtener valores de las ondas de tensión y de intensidad del receptor durante cada intervalo Δt , con frecuencia de captación suficiente para que puedan ser reproducidas con aproximación adecuada, como se describió en el capítulo anterior. Así es posible obtener, por medio de un programa que se hará en LabVIEW, el valor eficaz de la intensidad, y la diferencia de fase φ entre la tensión y la intensidad. Con esos valores el programa debe realizar cada operación $I^2 \Delta t$ y sumarla al resultado de las sumas de esas mismas operaciones para los intervalos anteriores. Al final de t_f esa suma da aproximadamente el numerador del último miembro de (8.7):

$$\int_0^{t_f} I^2 dt \approx \sum_0^{t_f} I^2 \Delta t$$

Los límites del sumatorio indican que la suma debe realizarse hasta que la suma de todos los intervalos de tiempo sea igual al periodo de facturación t_f .

Como en cada intervalo se ha ido obteniendo la diferencia de fase φ entre la tensión y la intensidad, también, simultáneamente en cada intervalo, el programa debe realizar la operación $(I^2 \cos^2 \varphi) \Delta t$ y sumar el resultado a la suma de los mismos productos de intervalos anteriores. Por tanto, en cada valor de t , que es la suma de todos los intervalos transcurridos desde el comienzo del periodo de facturación, se obtiene el denominador del último miembro de (8.7):

$$\int_0^t I^2 \cos^2 \varphi dt = \sum_0^t I^2 \cos^2 \varphi \Delta t$$

En ese instante el programa halla el cociente de los resultados de las dos sumas, y ese es el valor aproximado del cociente c_Q hasta ese instante. Cuando $t = t_f$, el último valor obtenido de c_Q es el cociente correspondiente al periodo de facturación:

$$c_Q \approx \frac{\sum_0^{t_f} I^2 \Delta t}{\sum_0^{t_f} (I^2 \cos^2 \varphi) \Delta t}$$

La aproximación es mayor cuanto mayor sea la velocidad de obtención de valores, la velocidad de muestreo. La velocidad máxima de muestreo de la tarjeta PCI 6071E de National Instruments es 1.25 millones de muestras por segundo en total. Como se verá, para obtener las ondas de tensión e intensidad solo es necesario tomar valores de dos tensiones, lo que hace que se asignen 625000 muestras por segundo a cada una de ellas. Esa cantidad corresponde a $625000 / 50 = 12500$ muestras para cada periodo de cada onda de tensión, lo que es mucho más que suficiente para representarla con la aproximación que se pretende aquí, ya que nuestro objetivo es mostrar la posibilidad práctica de los procedimientos de medida que se proponen. Por razones prácticas solo se usará 2500 muestras por segundo como velocidad de muestreo por cada canal, lo que corresponde a 500 muestras por cada periodo de cada onda de tensión, valor que es también, más que suficiente para reproducirlas con todas exactitud.

8.1.6. Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas monofásicas

Además de limitar los valores de la tensión a los que la tarjeta de adquisición de datos permite, la red de adecuación de señales debe diseñarse para introducir en el ordenador las tensiones de las cuales sea posible obtener, como hemos visto, las ondas de tensión y de intensidad del receptor, y la diferencia de fase entre ellas. Para ello se puede utilizar la red ya empleada en casos anteriores, que se reproduce en la Figura 109. Ahora la cota mínima superior de la tensión instantánea del receptor es $\sqrt{2}V$, donde V es el mayor valor eficaz que se espera de la tensión del sistema, que es la tensión del receptor monofásico. Con ese valor y las características de la tarjeta, se calculan los valores de las resistencias de la red como en el capítulo anterior.

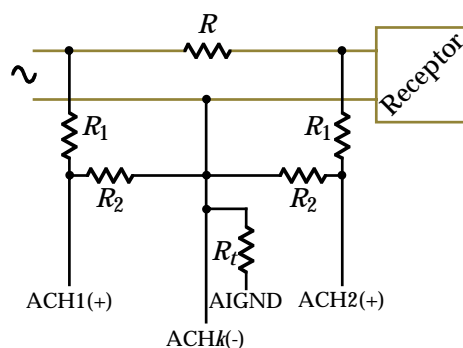


Figura 109.- Red de adecuación de señales para la medida del cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas monofásicas. Se dibuja en negro la red de adecuación de señales, y en marrón la línea monofásica y el receptor.

8.1.7. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas monofásicas

El programa calcula y presenta en la pantalla del ordenador el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de una carga monofásica cualquiera.

Está basado en el programa que se creó en el capítulo anterior, en concreto en el programa que calcula el cociente de pérdidas por consumo de potencia en cargas monofásicas. Así pues, también usará la tarjeta de captación de datos para realizar medidas de las variables eléctricas de un aparato físico real, o simulará esa captación de medidas, lo que permitirá

depurar el programa más fácilmente. Además mostrará el valor actual del cociente, y una gráfica con su *historia*.

Sigue una rápida explicación de las partes que componen el panel frontal del instrumento virtual creado, y una exposición algo más detallada de los cambios introducidos en el diagrama de conexiones con respecto al programa original.

8.1.7.1. Panel frontal

El panel frontal de este instrumento virtual se puede ver en la Figura 110. Está dividido en cinco secciones.

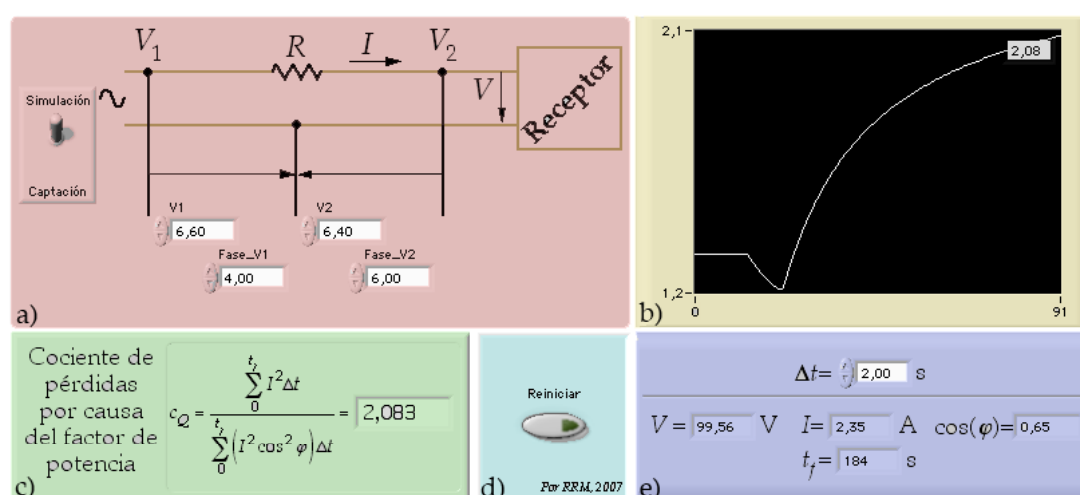


Figura 110.- Zonas en que está dividido el panel frontal del instrumento virtual.

- En la zona a) aparece el esquema del circuito necesario para acondicionar las señales, el botón de *Simulación/Captación* y los campos que permiten al usuario modificar los valores eficaces y las fases de las tensiones simuladas. En el esquema se ve que se medirán las tensiones V_1 y V_2 antes y después de la resistencia R , respectivamente.
- La zona b) muestra en una gráfica la evolución del cociente de pérdidas por consumo de potencia reactiva a lo largo del tiempo, y, en su parte superior derecha, el último valor que ha representado.
- En la zona c) se indica al usuario que este instrumento virtual sirve para calcular el *Cociente de pérdidas por causa del factor potencia*, se muestra la nueva ecuación que el programa usará,

y el valor actual del cociente, que es el que se debe usar para aplicarlo a las tarifas eléctricas.

- En d) se incluye el botón de reinicio del instrumento, que el usuario pulsará si desea volver a iniciar el periodo de facturación.
- e) muestra el intervalo de tiempo en segundos que el usuario desea usar entre medidas, Δt , el valor eficaz de la tensión actual de la carga en voltios, V , el valor eficaz de la intensidad que circula por la carga en amperios, I , el factor de potencia de la carga, $\cos(\varphi)$, y t_f que es el tiempo de facturación, medido en segundos.

La zona con resultados poco interesantes para el usuario, pero necesarios para realizar el cálculo del cociente, se incluye por debajo de la zona visible.

Valores auxiliares que el usuario no necesita conocer

Numerador 1	Ini Dt (ms)	
898,26	5324000	
Denominador 1	Fin Dt (ms)	Simulado?
431,24	5324000	<input checked="" type="radio"/>
Tick inicio medida	Dtr (s)	
5140010	2,00	

Figura 111.- Otros resultados de escaso interés para el usuario pero necesarios para el programa.

8.1.7.2. Diagrama de conexiones

Como ya se ha dicho, el programa está basado en el que se creó para determinar el cociente de pérdidas por demanda de potencia de cargas monofásicas, y se han introducido los cambios necesarios para que determine este nuevo cociente de pérdidas.

8.1.7.2.1. Estructura principal

Está formada exclusivamente por los cuatro *fotogramas* habituales de la *estructura secuencial*.

8.1.7.2.2. Fotograma 0

Inicializa los valores cuando lo solicita el usuario y almacena el instante de inicio del periodo de facturación y el del primer incremento de tiempo, Δt .

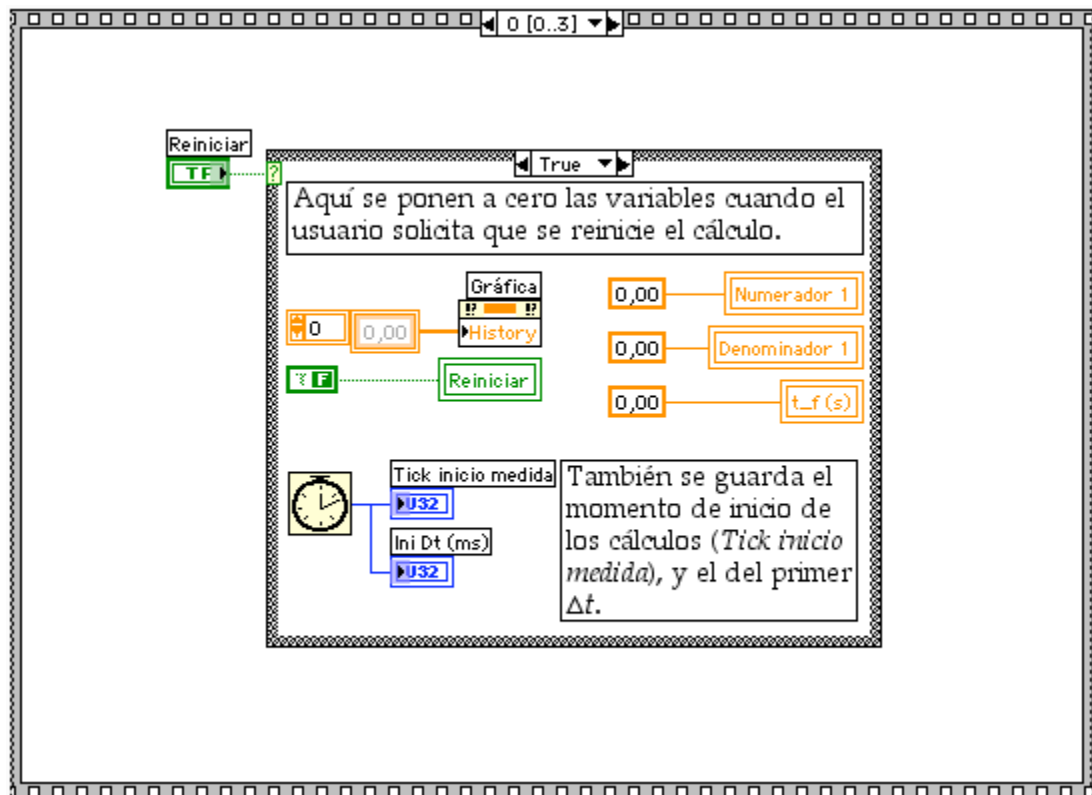


Figura 112.- *Fotograma 0* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

Este fotograma no ha sufrido ningún cambio con respecto al programa en el que se basa.

8.1.7.2.3. Fotograma 1

Contiene las instrucciones para captar o simular los valores de las ondas de tensión v_1 y v_2 , necesarias para obtener los valores eficaces de la tensión del receptor V y su intensidad I . Realiza la parada necesaria para que Δt dure lo que ha pedido el usuario, y muestra u oculta los campos que aparecen en la simulación cuando es necesario.

Este fotograma tampoco ha sufrido ningún cambio con respecto al programa en el que se basa.

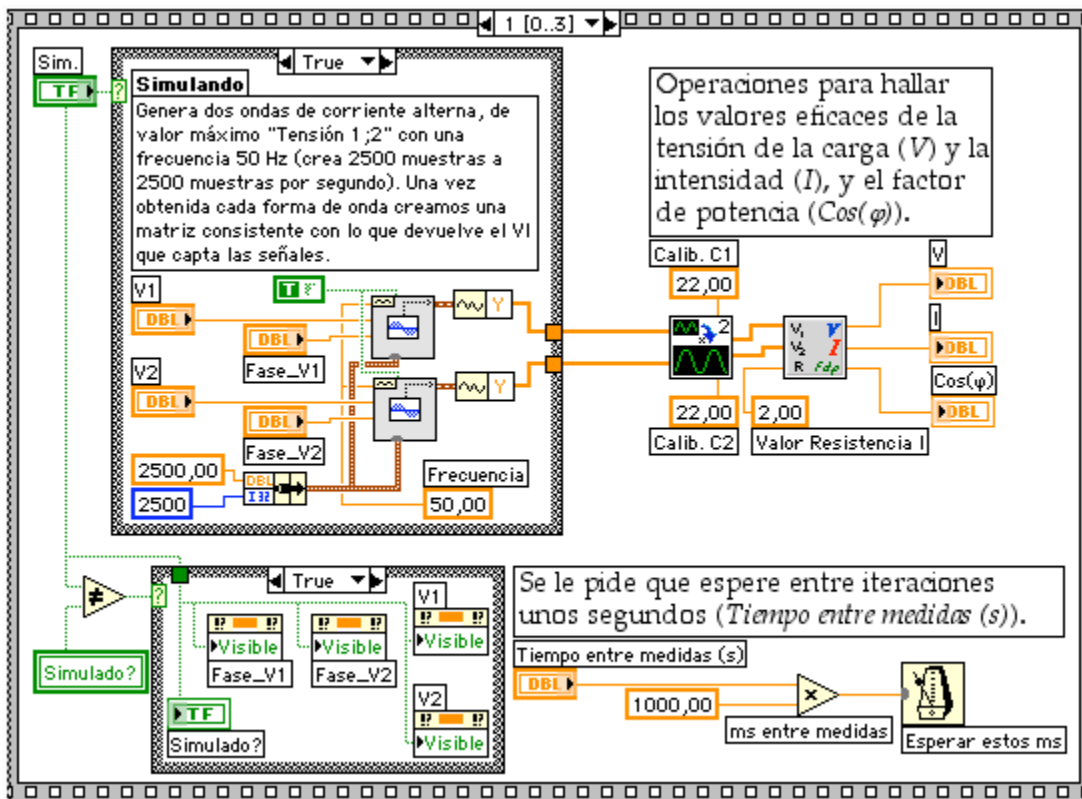


Figura 113.- Fotografía 1 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

Conviene notar que, a pesar de que en la determinación del cociente no es necesario emplear el valor de la tensión V de la carga, en este fotograma sí se calcula. El motivo es que se necesita medir esa tensión para poder obtener la intensidad, que sí es necesaria, así que no es un esfuerzo muy grande para el programa ir un paso más allá y representar el dato en la pantalla. En todo caso, puede resultar interesante conocer qué tensión hay en los bornes de la carga.

8.1.7.2.4. Fotografía 2

El penúltimo fotograma sigue sirviendo para determinar los valores de Δt y del tiempo de facturación que ha transcurrido hasta ese momento.

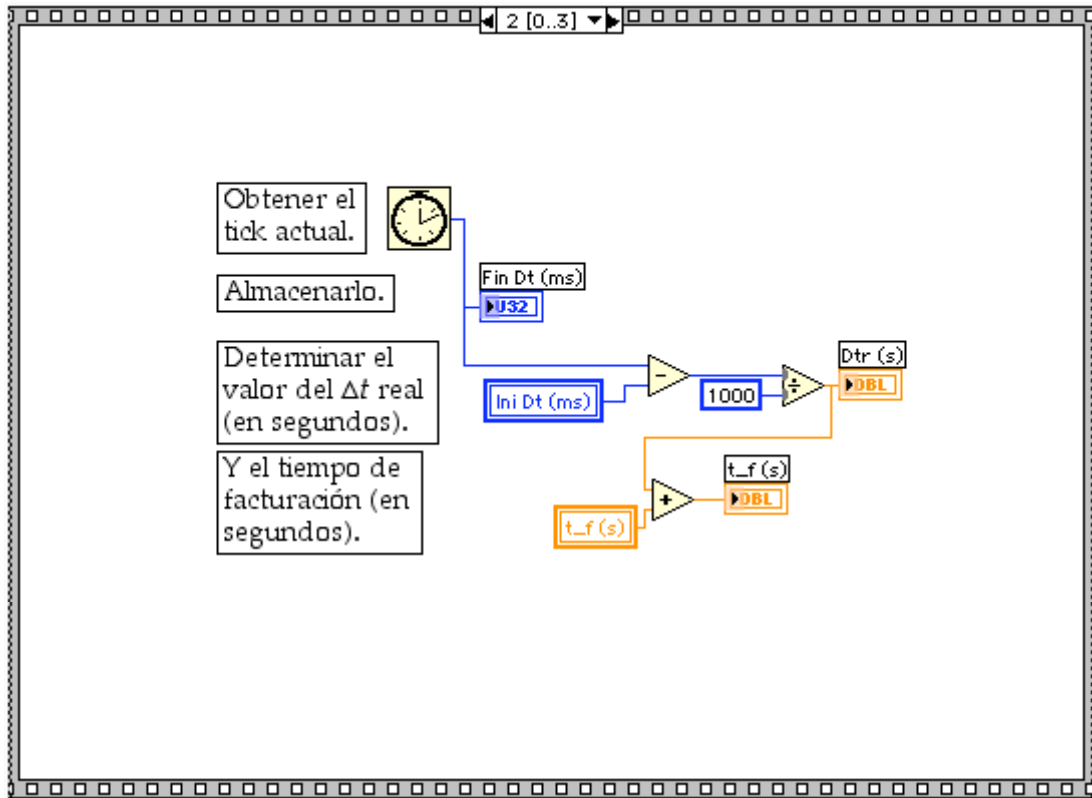


Figura 114.- Fotografía 2 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

Al igual que los anteriores, este fotograma tampoco ha sufrido ningún cambio, por lo que sigue sirviendo la explicación que se dio de él en la sección del cociente de pérdidas por demanda de potencia de un receptor monofásico.

8.1.7.2.5. Fotografía 3

El fotograma 3 es el único que ha sufrido cambios. Se encarga de calcular el cociente de pérdidas por consumo de potencia reactiva en sistemas monofásicos y representar los resultados en la pantalla del ordenador.

La parte superior del fotograma realiza el cálculo del cociente mediante la fórmula:

$$c_Q \approx \frac{\sum_0^{t_r} I^2 \Delta t}{\sum_0^{t_r} (I^2 \cos^2 \varphi) \Delta t}$$

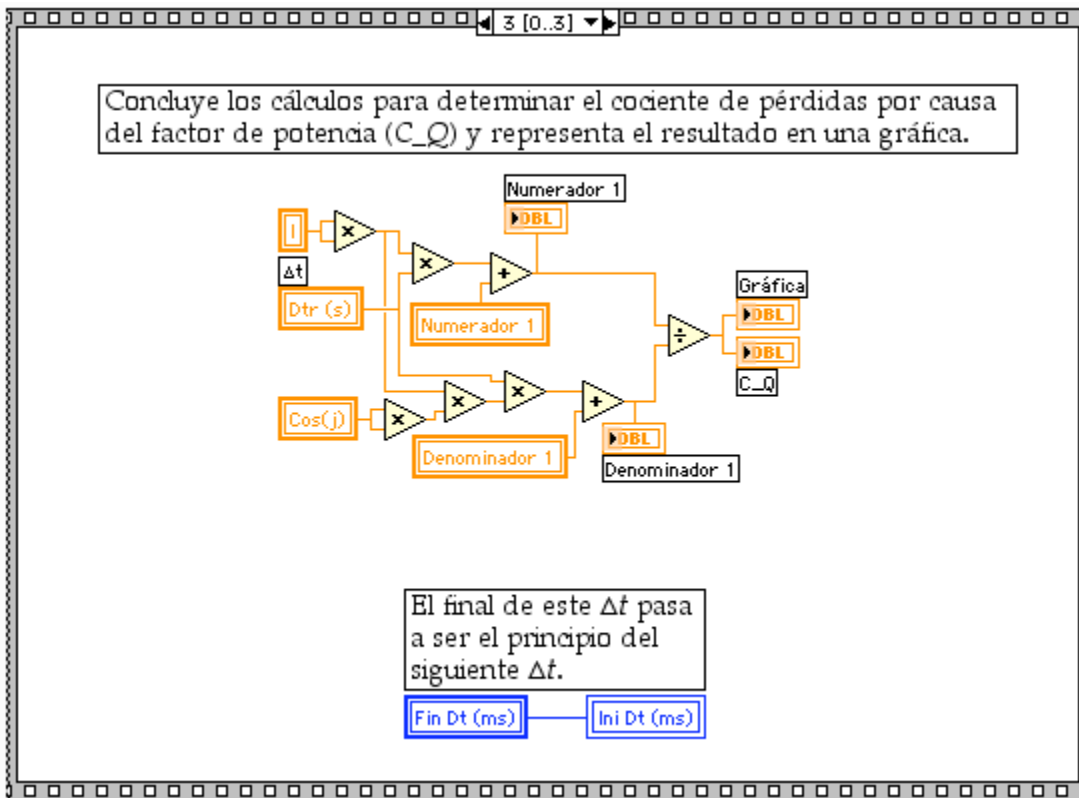


Figura 115.- Fotografía 3 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

Empieza calculando el numerador (Figura 116): eleva al cuadrado el valor eficaz de la intensidad de la carga, I , obtenido en el fotograma 1, y lo multiplica por el valor de Δt obtenido en el fotograma anterior. Hasta este punto se tiene el interior del sumatorio, $I^2 \Delta t$. El último paso para obtener el numerador del cociente completo es realizar el sumatorio usando el método que ya se ha explicado en programas anteriores.

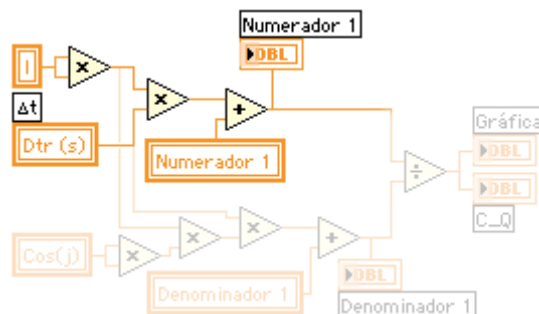


Figura 116.- Cálculo del numerador del cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de una carga monofásica.

A continuación pasa a obtener el denominador del cociente (Figura 117): multiplica el resultado obtenido antes de elevar I al cuadrado por el

cuadrado del $\cos\varphi$ (que aquí aparece como $\text{Cos}(j)$ porque no es posible modificar el tipo de letra de los nombres de las variables). El siguiente paso es multiplicar $I^2 \cos^2 \varphi$ por Δt y, por último, realizar el sumatorio.

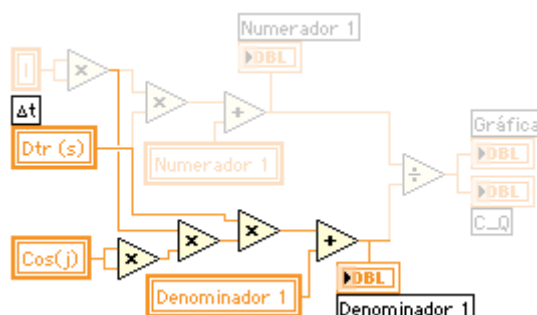


Figura 117.- Cálculo del denominador del cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de una carga monofásica.

Por último se realiza la división del numerador por el denominador y se lleva el resultado a los indicadores ya vistos (Figura 118): la gráfica y el campo de texto.

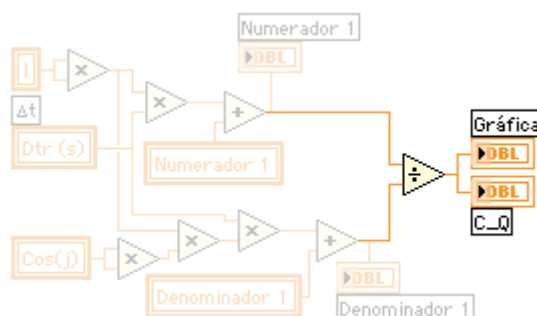


Figura 118.- Pasos finales del cálculo del cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de una carga monofásica.

La instrucción final del fotograma, toma el tiempo final del intervalo de medida actual y lo convierte en el tiempo inicial del intervalo de medida siguiente. Esta instrucción tampoco se ha modificado con respecto a programas anteriores.

8.1.8. Potencia que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal por causa de la potencia reactiva de un receptor monofásico

El análisis anterior, en el que la variable independiente era el factor de potencia de la carga, puede hacerse utilizando la potencia reactiva del receptor como variable independiente, en lugar de su $\cos\varphi$. Es lo que se

hace en este apartado. Se verá que con este cambio de variable se ponen de manifiesto conclusiones de notable interés.

La potencia compleja que un receptor monofásico absorbe de un sistema sinusoidal es

$$\underline{S} = \underline{S}/\varphi = \underline{VI}^* = \underline{VI}/\varphi = VI\cos\varphi + jVI\sin\varphi = P + jQ \quad (8.8)$$

V e I son los fasores de la tensión y de la intensidad del receptor. I^* es el conjugado de I . El número real positivo $S = VI$ es el módulo de la potencia compleja \underline{S} que absorbe el receptor, que se llama potencia aparente. φ es el argumento de la potencia compleja, que coincide con la diferencia de fase entre la tensión sinusoidal del receptor, que es la tensión del sistema, de valor eficaz V , y la intensidad sinusoidal del receptor, de valor eficaz I . P es la potencia activa y Q la potencia reactiva que el receptor absorbe. $\cos\varphi$ es el factor de potencia del receptor [56][82].

Un receptor propiamente dicho, al que exclusivamente nos referimos aquí, es aquel en que P es siempre positivo. Como V e I son valores eficaces, que son siempre positivos [56], de (8.8) se deduce que, en un receptor propiamente dicho, $\cos\varphi$ es siempre positivo, o sea, φ está siempre entre $-\pi/2$ y $+\pi/2$ radianes. $\cos\varphi$ también puede ser cero. Eso ocurre solo cuando la potencia activa que absorbe el receptor es cero y no lo es la reactiva, pues de (8.8), $\cos\varphi = P/\sqrt{P^2 + Q^2}$; si $P = 0$ sin serlo Q , resulta $\cos\varphi = 0$.

De (8.8) se obtiene también que $Q/P = \operatorname{tg}\varphi$. O bien

$$Q = P\operatorname{tg}\varphi = \pm P\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi} - 1} \quad (8.9)$$

Los dos signos de la raíz cuadrada, el positivo y negativo son útiles, pues la potencia reactiva de un receptor propiamente dicho puede ser positiva o negativa, es decir, el receptor puede ser inductivo o capacitivo (Figura 119).

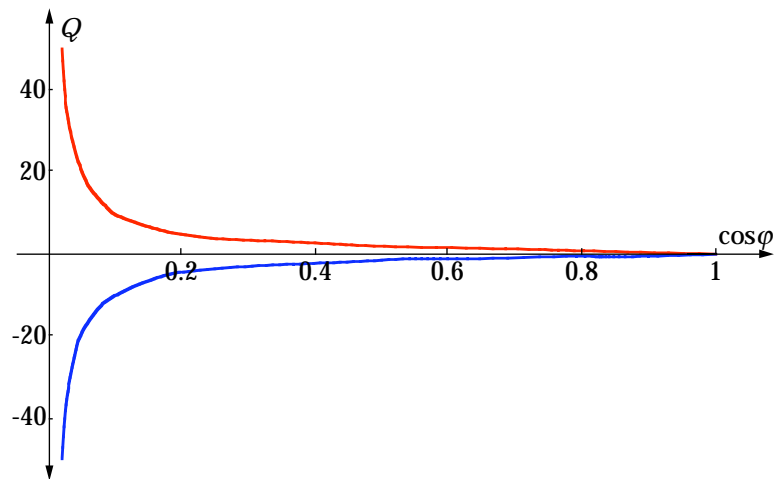


Figura 119.- Representación gráfica de la potencia reactiva que absorbe un receptor monofásico en función de su factor de potencia.

Y, como $\cos^2 \varphi = 1 / (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)$, resulta que la (8.1) queda¹³:

$$P_p = R_s \frac{P^2}{V^2 \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = R_s \frac{P^2}{V^2 \frac{1}{1 + \frac{Q^2}{P^2}}} = R_s \frac{P^2}{V^2 \frac{P^2}{P^2 + Q^2}} = R_s \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \quad (8.10)$$

La (8.10) muestra que la potencia P_p que se pierde por causa del factor de potencia del receptor, también puede ponerse solo en función de la potencia reactiva que absorbe ese receptor¹⁴. Realmente la diferencia que existe entre (8.1) y (8.10) es solo un cambio de variable, por lo que, en la práctica, se puede hablar indistintamente de potencia que se pierde por bajo factor de potencia o por consumo de potencia reactiva.

Como en (8.10) la potencia reactiva está elevada el cuadrado no influye su signo en la potencia P_p que se pierde en el sistema eléctrico. Es

¹³ Si la igualdad $1 = \operatorname{sen}^2 \varphi + \cos^2 \varphi$ se divide por $\cos^2 \varphi$ se obtiene $\frac{1}{\cos^2 \varphi} = \operatorname{tg}^2 \varphi + 1$, de donde $\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1}$ y $\cos^2 \varphi = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}$.

¹⁴ La (8.10) también puede deducirse viendo que $P_c / \cos \varphi = S = \sqrt{P_c^2 + Q^2}$, de forma que $P_p = R_s \frac{P^2 + Q^2}{V^2}$.

decir, solo el valor absoluto de la potencia reactiva determina la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico, sin importar si el receptor es inductivo o capacitivo, tal como ya se vio cuando se utilizó como única variable el factor de potencia del receptor.

Se ve también en (8.10) que el valor mínimo de P_p se obtiene cuando $Q = 0$, es decir, cuando el receptor no absorbe potencia reactiva, y que ese valor mínimo vale

$$P_{pmi} = R_s \frac{P^2}{V^2} \quad (8.11)$$

el mismo que en (8.2), como debía esperarse.

Conviene hacer un paréntesis aquí para mostrar que es útil utilizar la relación $\alpha = |Q|/P$, porque así (8.10) queda:

$$P_p = R_s \frac{P^2 + Q^2}{V^2} = R_s \frac{P^2 + \alpha^2 P^2}{V^2} = R_s \frac{P^2}{V^2} (1 + \alpha^2) = P_{pmi} (1 + \alpha^2) \quad (8.12)$$

Y la relación entre la potencia P_p que en cada caso se pierde, y la mínima, es

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = 1 + \alpha^2 \quad (8.13)$$

que se representa en la Figura 120. De esa figura y de (8.13) se observa cómo crece rápidamente la potencia que se pierde a medida que crece α , o sea, a medida que crece la relación entre los valores absolutos de las potencias reactiva y activa que absorbe el receptor. Por ejemplo, si ese valor absoluto $|Q|$ es igual a la potencia activa P del receptor, la potencia que se pierde es doble de la mínima; si $|Q| = 2P$, entonces $P_p = (1 + 2^2) P_{pmi} = 5P_{pmi}$, es decir, la potencia que se pierde resulta cinco veces la mínima si el valor absoluto de la potencia reactiva del receptor es el doble que su potencia activa.

Estas conclusiones ponen de manifiesto lo adecuado que puede resultar a veces utilizar α como variable para medir la relación P_p/P_{pmi} en lugar de directamente la potencia reactiva Q , pues la variación que origina una misma potencia reactiva Q en el cociente P_p/P_{pmi} no depende solo de Q , sino también de P .

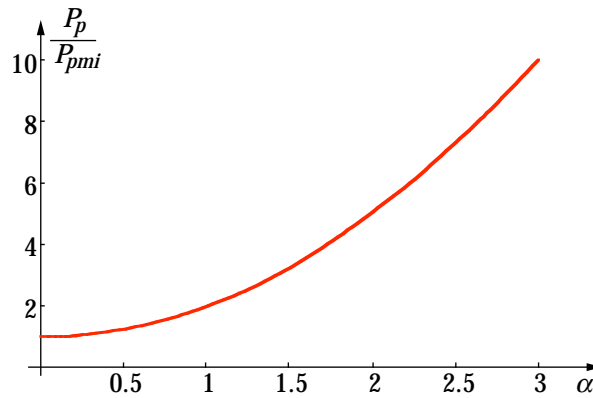


Figura 120.- Representación gráfica de P_p/P_{pmi} en función de $\alpha = |Q|/P$.

8.1.9. Potencia que se pierde en la resistencia de un sistema monofásico por consumo de potencia activa y por consumo de potencia reactiva

Se puede dar un enfoque interesante al análisis si la fórmula (8.10) se pone así:

$$P_p = R_s \frac{P^2 + Q^2}{V^2} = \frac{R_s}{V^2} P^2 + \frac{R_s}{V^2} Q^2 \quad (8.14)$$

Llamaremos al sumando

$$P_{pP} = \frac{R_s}{V^2} P^2$$

potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por consumo de potencia activa. Y a

$$P_{pQ} = \frac{R_s}{V^2} Q^2 \quad (8.15)$$

potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por consumo de potencia reactiva. De esta forma resulta que la potencia que se pierde en la resistencia del sistema es la suma de la debida a la entrega de potencia activa y la debida a la entrega de potencia reactiva:

$$P_p = P_{pP} + P_{pQ} \quad (8.16)$$

Se ve en (8.16) que la potencia reactiva incrementa la potencia que se pierde en los sistemas monofásicos en la cantidad dada por (8.15). Como ya se ha dicho, la potencia reactiva Q que absorbe un receptor sinusoidal

puede ser positiva o negativa, pero (8.15) muestra de nuevo que, en la pérdida de potencia que origina, solo interviene el cuadrado de esa potencia, por lo que es indiferente el signo de Q en cada instante: lo único que importa para la pérdida de potencia a que da lugar la potencia reactiva de un receptor es el valor absoluto de esa potencia reactiva. Disminuyendo ese valor absoluto puede disminuirse P_{pQ} . Realmente en eso consiste la corrección del factor de potencia, en disminuir el valor absoluto de Q , pues, como $\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$, para P fijo, disminuir el valor absoluto de la potencia reactiva Q de un receptor equivale a aumentar su factor de potencia. Incluso es posible hacer nula la potencia reactiva de un receptor [56], en cuyo caso el factor de potencia vale uno y la potencia P_{pQ} se anula.

8.1.10. Aumento de la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema monofásico por cada unidad que aumenta el valor absoluto de la potencia reactiva del receptor

Las derivadas en (8.15) de P_{pQ} , y en (8.10) de P_p respecto a Q , dan lo que aumenta P_{pQ} y P_p por cada unidad que aumenta Q si se mantiene P constante. Resulta:

$$\frac{dP_{pQ}}{dQ} = \frac{dP_p}{dQ} = 2R_s \frac{Q}{V^2} \quad (8.17)$$

La derivada es independiente de P , pero es proporcional a Q . Significa que, cuanto mayor sea el valor absoluto de la potencia reactiva del receptor mayor es el valor absoluto de la variación de la potencia que se pierde por cada unidad que se incremente la potencia reactiva del receptor.

Nótese que la derivada tiene el signo de Q . Si Q es positiva, también lo es la derivada. Significa que un aumento de Q hace aumentar la potencia que se pierde P_p . Si Q es negativa, la derivada es negativa, y significa que un aumento de Q , que en realidad es una disminución de su valor absoluto, provoca una disminución de P_p . Es decir, sea el receptor inductivo o capacitivo, un aumento del valor absoluto de Q siempre

provoca aumento de la potencia que se pierde, P_p , y una disminución del valor absoluto de Q siempre origina una disminución de P_p . El valor absoluto de ese aumento o disminución relativos de la potencia que se pierde es mayor cuanto mayor sea la potencia reactiva de partida.

El valor de la derivada (8.17) puede utilizarse como medida de eficacia de la disminución del valor absoluto de la potencia reactiva del receptor para disminuir la potencia que se pierde en el sistema: cuanto mayor sea el valor absoluto de la potencia reactiva de partida, más disminuye la potencia que se pierde por cada unidad que disminuye el valor absoluto de esa potencia reactiva. Por ejemplo, si la potencia reactiva de un receptor es 100 kVAr, y se disminuye esa potencia 1 kVAr, la potencia que se pierde en el sistema eléctrico disminuye la cantidad $\Delta P_p \approx K_m Q = 100 K_m$, donde $K_m = 2R_s / V^2$. Si la potencia reactiva de receptor es 10 kVAr y se disminuye igualmente 1 kVAr, entonces la potencia que se pierde en el sistema eléctrico solo disminuye $\Delta' P_p \approx 10 K_m$, la décima parte que en el caso anterior.

O sea, para ser más eficaces en disminuir la potencia que se pierde en un sistema eléctrico sinusoidal, es preferible disminuir el valor absoluto de la potencia reactiva de aquellos receptores monofásicos con mayor valor absoluto de potencia reactiva, que disminuir el valor absoluto de la de aquellos que lo tienen menor.

8.1.11. Energía que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal por consumo de potencia reactiva de cargas monofásicas

Hasta aquí hemos considerado potencias, pero son las energías las medidas últimas y definitivas que informan del mayor o menor rendimiento del sistema eléctrico para transportar la energía eléctrica a los consumidores.

Si se utiliza (8.14), la fórmula (8.5), que da la energía que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal durante el periodo de facturación debida a un receptor monofásico, queda:

$$W_p = \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} P^2 dt + \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} Q^2 dt \quad (8.18)$$

Llamaremos al sumando

$$W_{pP} = \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} P^2 dt$$

energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por consumo de potencia activa durante el periodo de facturación. Y a

$$W_{pQ} = \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} Q^2 dt \quad (8.19)$$

energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por consumo de potencia reactiva durante el periodo de facturación.

Debe resaltarse la fórmula (8.19), pues pone nítidamente de manifiesto que la energía que se pierde en el sistema eléctrico debida a la potencia reactiva del receptor no es proporcional a la energía reactiva que consume el receptor, es decir, no es proporcional a $W_r = \int_0^{t_f} Q dt$, que es la integral de la potencia reactiva, sino a la integral del cuadrado de esa potencia reactiva. Significa eso que no es posible, en contra de lo que se hace, utilizar la energía reactiva que absorbe un receptor como medida de la pérdida de energía que origina en el sistema eléctrico por causa de su potencia reactiva. Esta es la razón de que, en esta memoria, no se llame a esa pérdida de energía “por consumo de energía reactiva”, término que es habitual en el lenguaje eléctrico, sino por consumo de potencia reactiva; pues, como se mostrará más adelante con más detalle, mayor consumo de energía reactiva no significa, en general, mayores pérdidas de energía en el sistema eléctrico.

La fórmula (8.19) sí ofrece la forma de obtener, para cada receptor, un parámetro proporcional a la energía que se pierde en el sistema eléctrico por causa de su potencia reactiva. Basta para ello medir, en vez de la energía reactiva que absorbe el receptor, el valor de la integral $\int_0^{t_f} Q^2 dt$ en el periodo de facturación t_f . Puede hacerse con la misma red de adecuación de señales de la Figura 109 (página 170). De nuevo hay que obtener en cada intervalo Δt las ondas de tensión e intensidad y, de ellas, sus valores eficaces y la diferencia de fase φ entre las dos, es decir, la diferencia de fase entre la tensión y la intensidad. Con esos valores ha de programarse LabVIEW para que realice la operación $(V \text{sen} \varphi)^2 \Delta t$ y sumar el número resultante al resultado de las sumas correspondientes a los intervalos anteriores. Al finalizar el periodo de facturación se obtiene

$$\sum_0^{t_r} (V I \sin \varphi)^2 \Delta t \approx \int_0^{t_r} Q^2 dt$$

De donde resulta que

$$W_{pQ} \approx K_m \sum_0^{t_r} (V I \sin \varphi)^2 \Delta t$$

$$\text{con } K_m = \frac{R_s}{V^2}.$$

Pero, si se sigue la línea de esta investigación, y se emplean los cocientes de pérdidas, según (8.18) se pierde la menor energía posible en la resistencia del sistema eléctrico si la potencia reactiva Q es nula. Es decir, la energía mínima que se pierde es

$$W_{pmi} = \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_r} P^2 dt$$

que, como cabía esperar, coincide con (8.6), pues potencia reactiva cero coincide con factor de potencia unidad. Por tanto, el cociente de energía perdida hallado por este camino es

$$c_Q = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{\frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_r} P^2 dt + \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_r} Q^2 dt}{\frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_r} P^2 dt} = \frac{\int_0^{t_r} (P^2 + Q^2) dt}{\int_0^{t_r} P^2 dt} = \frac{\int_0^{t_r} I^2 dt}{\int_0^{t_r} I^2 \cos^2 \varphi dt}$$

que, como debía ser, resulta el mismo que el obtenido en (8.7).

8.2. Energía que se pierde en un sistema trifásico por consumo de potencia reactiva

La energía eléctrica se entrega a una gran parte de consumidores por medio de líneas trifásicas, que alimentan receptores trifásicos. Las causas que originan la potencia que se pierde en los sistemas sinusoidales por los receptores monofásicos son, como ya hemos visto, el consumo de potencia activa y el consumo de potencia reactiva. Sin embargo, para los receptores trifásicos sinusoidales, a esas dos causas se une otra, que se analizará más adelante, que es la debida al desequilibrio de las intensidades de las fases. Veremos en un capítulo posterior que, en un suministro trifásico en el que las tensiones permanezcan equilibradas, el desequilibrio de las intensidades de las fases que llegan a un receptor, aumenta siempre la

potencia que se pierde en el sistema eléctrico, si se compara con la potencia que se pierde si, tanto las tensiones como las intensidades, permanecen equilibradas. Si existe equilibrio de intensidades, las únicas causas que originan pérdida de potencia en un sistema trifásico achacables al receptor trifásico son, como se verá, las mismas que las achacables a los receptores monofásicos, es decir, el consumo de potencia activa y el consumo de potencia reactiva. Se tratará de deducir aquí solo la energía que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal que alimente un receptor trifásico, cuando lo hace por medio de una línea trifásica de tensiones e intensidades equilibradas, y se dejará el estudio del desequilibrio como causa de pérdida de energía para un capítulo aparte.

8.2.1. Energía que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico equilibrado por causa del factor de potencia del receptor

Se vio en el capítulo anterior que la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico equilibrado es (7.33)

$$P_p = R_s \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = R_s \frac{P^2}{3V^2 \cos^2 \varphi} \quad (8.20)$$

R_s es la resistencia de cada una de las tres fases del tripolo trifásico de Thévenin equivalente por el que se puede aproximar el sistema trifásico equilibrado. U es el valor eficaz de la tensión entre fases del sistema, y V el valor eficaz de la tensión entre fase y neutro. P es la potencia activa que absorbe el receptor trifásico y $\cos \varphi$ su factor de potencia. En este caso de sistema equilibrado, φ coincide con la diferencia de fase entre cada tensión simple y la intensidad de la fase correspondiente, es decir, φ es, por ejemplo, la diferencia de fase entre v_R e i_R [56].

Nótese que no hay diferencia formal entre los segundos miembros de (8.20) y (8.1), por lo que los resultados de las deducciones matemáticas obtenidas de (8.1) son formalmente idénticas a los que se obtengan de las mismas operaciones hechas sobre (8.20), sin más que poner ahora U donde allí aparece V . En particular, si solo el factor de potencia del receptor puede variar, también en el sistema trifásico equilibrado se pierde la menor potencia posible cuando el factor de potencia alcance su valor máximo, es decir, cuando $\cos \varphi = 1$. Ese valor mínimo es

$$P_{pmi} = R_s \frac{P^2}{U^2}$$

De forma que la relación entre la potencia que se pierde con un factor de potencia $\cos\varphi$ y la potencia mínima es, como en los receptores monofásicos

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{1}{\cos^2 \varphi}$$

inversamente proporcional al cuadrado del factor de potencia del receptor.

La derivada de esa relación respecto al factor de potencia es, por tanto, también ahora

$$\frac{d\left(\frac{P_p}{P_{pmi}}\right)}{d(\cos\varphi)} = -\frac{2}{\cos^3 \varphi}$$

Así pues, todas las conclusiones que se obtuvieron para receptores monofásicos son válidas también para los receptores trifásicos de sistemas equilibrados. En concreto, la Figura 107 (página 164) representa también la relación entre la potencia que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico al que está conectado un receptor de factor de potencia cualquiera, $\cos\varphi$, y la potencia mínima que se pierde, que es la que corresponde a $\cos\varphi = 1$. También es válida la Figura 108 (página 165) y la conclusión que se desprende de ella de que *para disminuir la potencia que se pierde en la resistencia de sistemas eléctricos sinusoidales por causa del factor de potencia de receptores tanto monofásicos como trifásicos es más eficaz elevar los factores de potencia más bajos que dedicar el esfuerzo a elevar los más altos*. Solo hay que añadir ahora que esto es cierto si el receptor trifásico permanece equilibrado.

La energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico debida a un receptor trifásico equilibrado es

$$W_p = \int_0^{t_f} P_p dt = \frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} \frac{P^2}{\cos^2 \varphi} dt$$

La mínima energía se pierde cuando $\cos\varphi = 1$ en todo el periodo de facturación t_f , y vale

$$W_{pmi} = \int_0^{t_f} P_{pmi} dt = \frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} P^2 dt$$

Por lo que el cociente de pérdidas para receptores trifásicos de sistemas equilibrados es

$$\begin{aligned} c_Q &= \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{\frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} \frac{P^2}{\cos^2 \varphi} dt}{\frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} P^2 dt} = \frac{\int_0^{t_f} S^2 dt}{\int_0^{t_f} P^2 dt} = \\ &= \frac{\int_0^{t_f} (\sqrt{3}UI)^2 dt}{\int_0^{t_f} (\sqrt{3}UI \cos \varphi)^2 dt} = \frac{\int_0^{t_f} I^2 dt}{\int_0^{t_f} I^2 \cos^2 \varphi dt} \end{aligned} \quad (8.21)$$

8.2.2. Medida del cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas trifásicas equilibradas

Se trata de crear un método para obtener experimentalmente el resultado de (8.21) para un receptor trifásico equilibrado, con la tarjeta de adquisición de datos PCI 6071E de National Instruments, y de elaborar el programa de LabVIEW que haga las operaciones que conduzcan a c_Q .

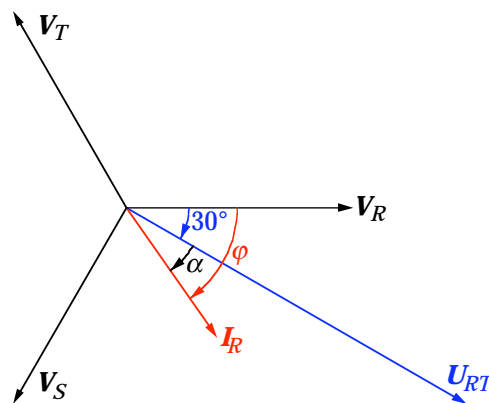


Figura 121.- Diagrama fasorial de tensiones y de la intensidad I_R de un receptor trifásico de un sistema trifásico equilibrado.

Si se utiliza el último miembro de (8.21), las operaciones que hay que realizar son casi las mismas que las descritas para el receptor monofásico, pero ahora se partirá de la obtención de las ondas de tensión e intensidad u_{RT} e i_R en cada intervalo Δt . Con ellas se obtienen la diferencia de fase

$\varphi(u_{RT}, i_R)$ entre u_{RT} e i_R , el valor eficaz $U = U_{RT}$ de la tensión entre fases, y el valor eficaz $I = I_R$ de la intensidad de cada fase. Además, de la Figura 121 se ve que $\varphi = \varphi(u_{RT}, i_R) + 30^\circ$ [56]. Con estos valores se va haciendo para cada intervalo la operación $I^2 \Delta t$, que se suma al resultado de las sumas de los intervalos anteriores, y la operación $(I \cos \varphi)^2 \Delta t$, que también se suma al resultado de la suma de los productos correspondientes de los intervalos anteriores. Así, al final del periodo de facturación se obtiene

$$\int_0^{t_r} I^2 dt \approx \sum_0^{t_r} I^2 \Delta t$$

e

$$\int_0^{t_r} I^2 \cos^2 \varphi dt \approx \sum_0^{t_r} I^2 \cos^2 \varphi \Delta t$$

El cociente entre esos términos es c_Q :

$$c_Q \approx \frac{\sum_0^{t_r} I^2 \Delta t}{\sum_0^{t_r} I^2 \cos^2 \varphi \Delta t}$$

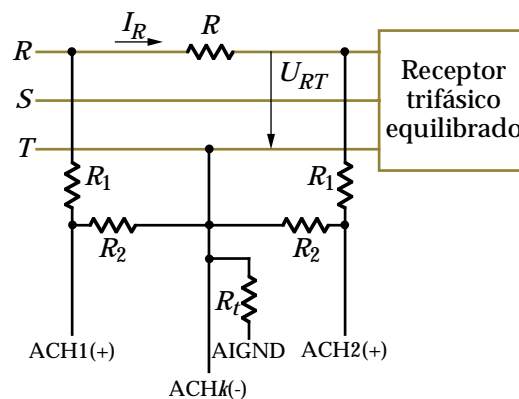


Figura 122.- Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas de un receptor trifásico equilibrado.

En la Figura 122 se representa la red de adecuación de señales para medir c_Q de un receptor trifásico equilibrado.

8.2.3. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas trifásicas equilibradas

El programa calculará y mostrará en la pantalla del ordenador el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de una carga trifásica equilibrada de tres hilos. Simulará las medidas o las captará de un aparato real a través de la tarjeta de captación de datos, mostrará el valor del cociente, y su *historia*.

Este programa está basado en el programa para obtener el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas trifásicas, explicado antes. A continuación se explican solo los cambios introducidos a ese programa para crear este.

8.2.3.1. Panel frontal

En la Figura 123 se muestra el panel frontal de este instrumento virtual, que sigue siendo similar al de los anteriores instrumentos.

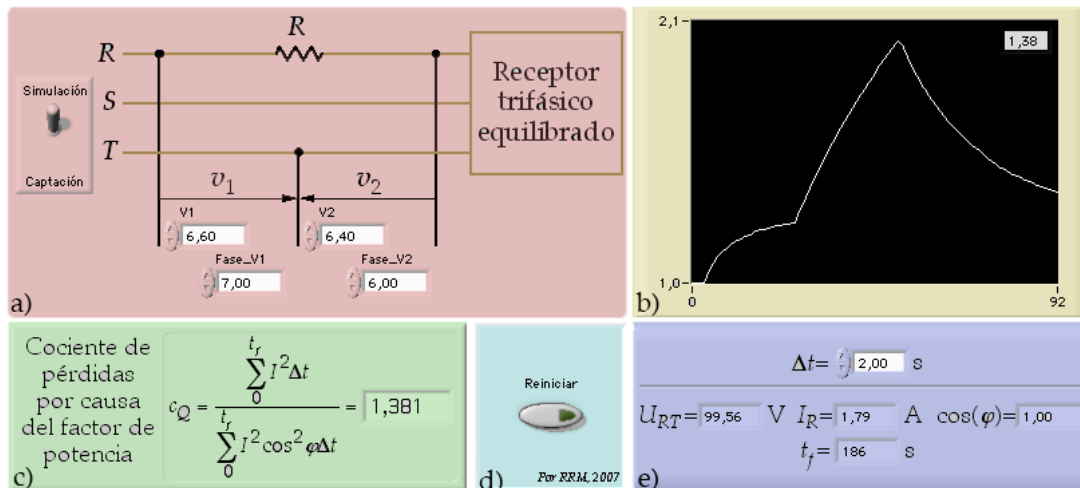


Figura 123.- Zonas en que está dividido el panel frontal del instrumento virtual.

- muestra el esquema de la red de acondicionamiento de señales que se asume que se ha usado en este programa; debe servir para medir las tensiones V_1 y V_2 , de antes y después de la resistencia R , respectivamente. A su izquierda se encuentra el interruptor *Simulación/Captación*. En el caso de que se prefiera la *Simulación* aparecerán los campos V_1 , V_2 ,

Fase_V1 y *Fase_V2*, que se emplearán para crear las ondas sinusoidales para v_1 y v_2 .

- contiene la gráfica con la evolución del cociente de pérdidas por consumo de potencia a lo largo del tiempo, y el último valor que la gráfica ha representado.
- informa al usuario de que se está calculando el *Cociente de pérdidas por causa del factor de potencia*, y le muestra la ecuación que el programa usa para obtenerlo y su valor en ese momento.
- contiene el botón que reinicia el periodo de facturación.
- permite al usuario escoger el valor de Δt , y muestra el valor eficaz de la tensión entre las fases *R* y *T*, U_{RT} , medida en voltios, el valor eficaz de la intensidad que circula por la fase *R*, I_R , el factor de potencia de la carga trifásica equilibrada, $\cos(\varphi)$, y el tiempo de facturación, en segundos, t_f .

Debajo está la zona (Figura 124) con resultados poco importantes para el usuario.

Valores auxiliares que el usuario no necesita conocer

Numerador 1	Ini Dt (ms)	Simulado? <input checked="" type="radio"/>
580,86	2690000	
Denominador 1	Fin Dt (ms)	
420,69	2690000	
Tick inicio medida	Dtr (s)	
2504010	2,00	

Figura 124.- Otros resultados necesarios para el programa.

8.2.3.2. Diagrama de conexiones

El programa, al igual que el panel frontal, está basado en el que se emplea para calcular el cociente de pérdidas por consumo de potencia de cargas trifásicas, con algunos pequeños cambios que se verán a continuación.

8.2.3.2.1. Estructura principal

El programa está formado por cuatro *fotogramas* incluidos dentro de la *estructura secuencial*, exclusivamente.

8.2.3.2.2. Fotograma 0

Encargado de inicializar todos los valores cuando el usuario pulsa sobre el botón *Reiniciar*, y almacena el instante de inicio del periodo de facturación y el del primer incremento de tiempo, Δt , en sendas variables (Figura 125).

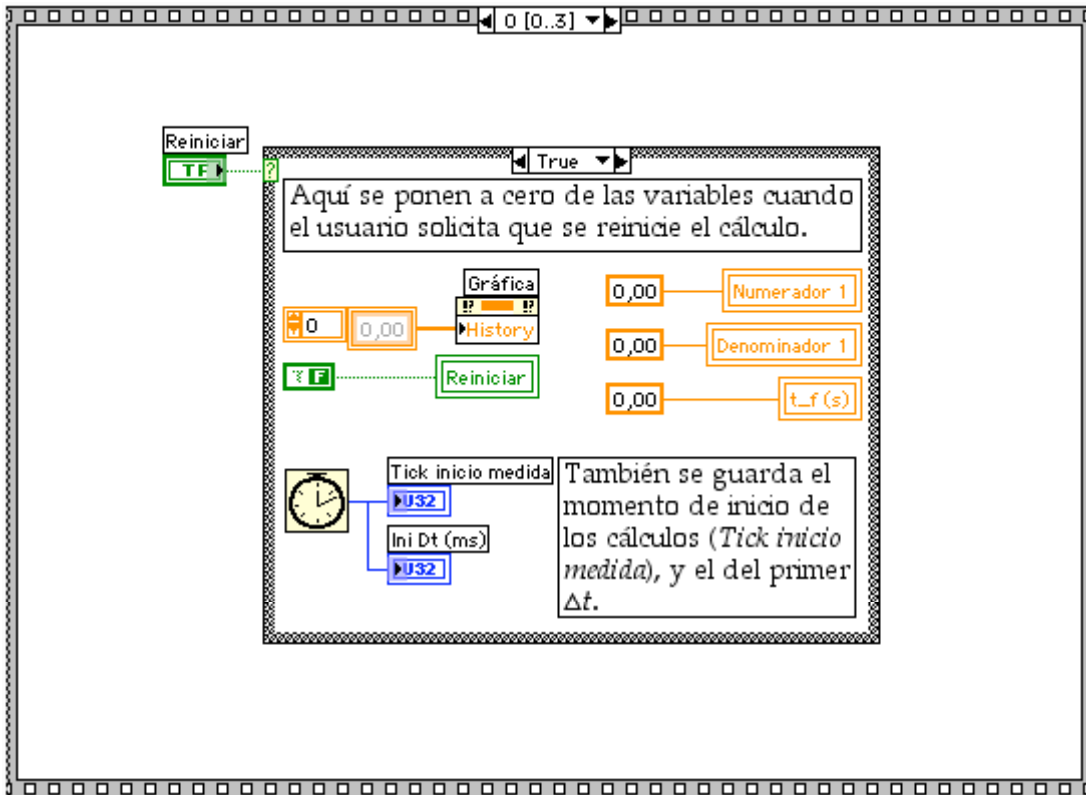


Figura 125.- Fotograma 0 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

No ha sido necesario modificar la programación de este primer fotograma.

8.2.3.2.3. Fotograma 1

Aquí se captan o simulan los valores de las ondas con las que se trabajará para la obtención del cociente (Figura 126). Además se obtienen los valores de la tensión compuesta entre las fases *R* y *T*, la intensidad de la fase *R*, I_R , se realiza la parada necesaria para que Δt dure lo que ha pedido el usuario, y se muestran u ocultan los campos de la simulación.

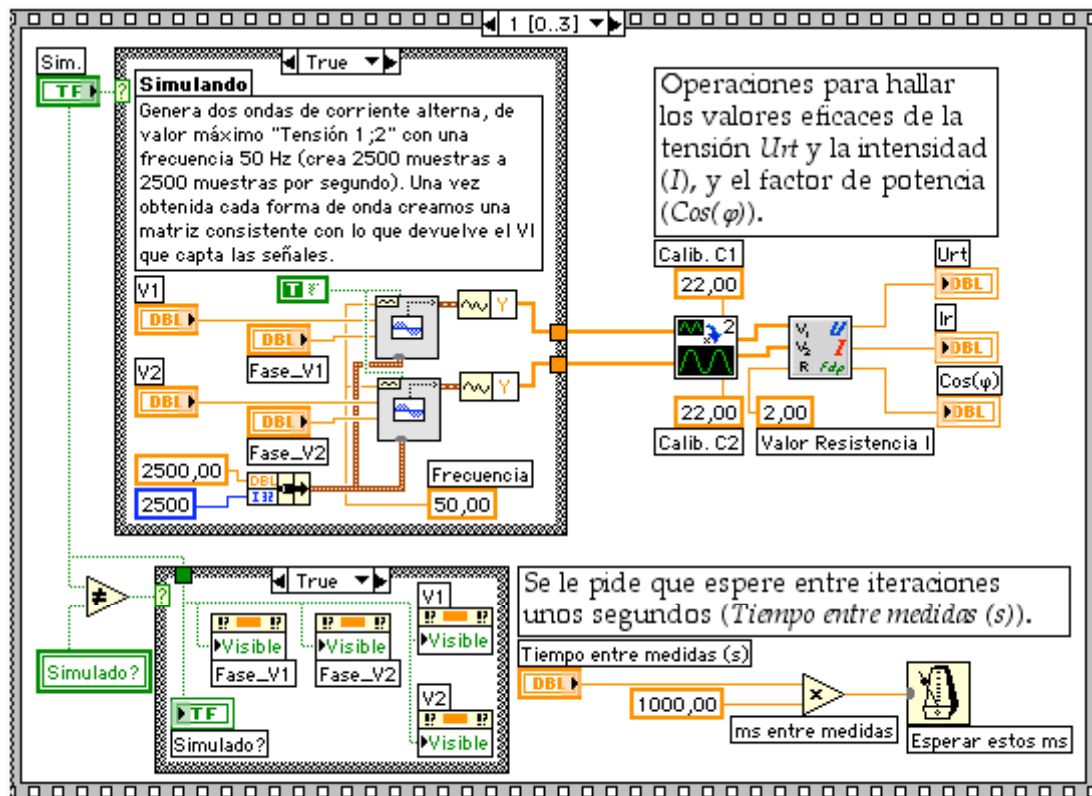


Figura 126.- Fotografía 1 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

Este fotograma no ha sufrido ningún cambio con respecto al programa en que se basa.

8.2.3.2.4. Fotografía 2

Aquí se obtienen y almacenan los valores de Δt y del tiempo de facturación.

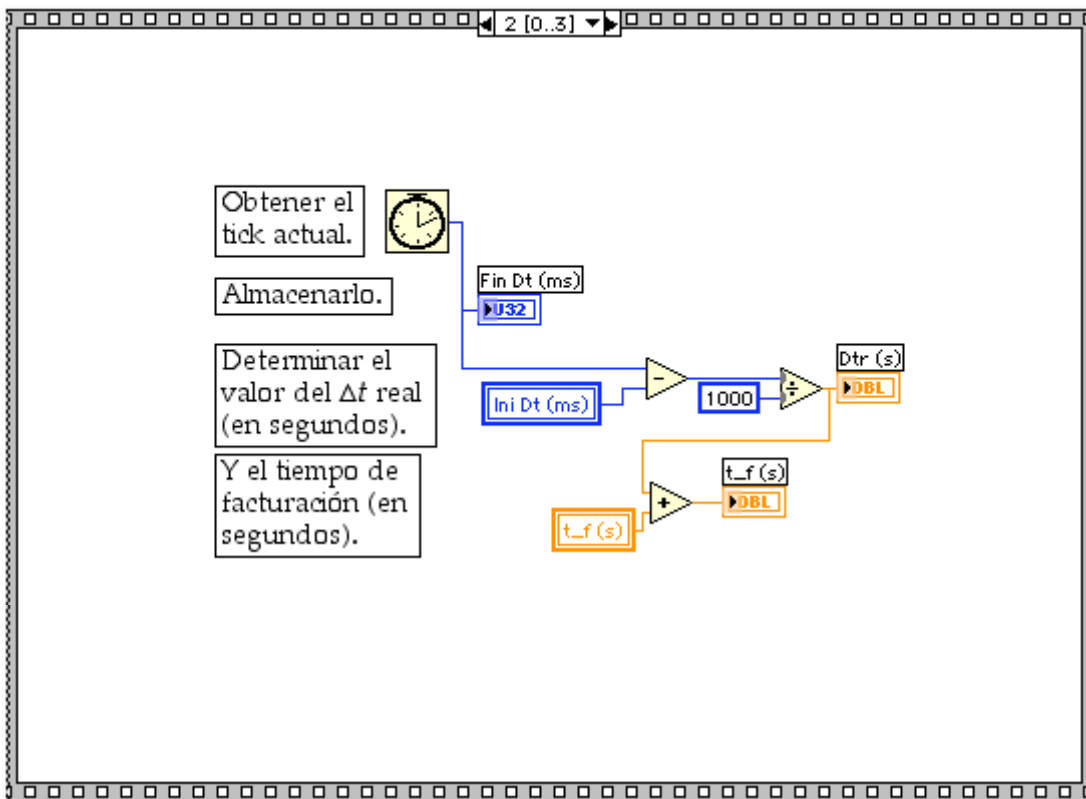


Figura 127.- Fotografía 2 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

Esta parte del programa tampoco se ha modificado.

8.2.3.2.5. Fotografía 3

El último fotograma sirve para determinar el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de una carga trifásica y representar los resultados en la pantalla del ordenador, y para hacer que el instante final del Δt actual pase a ser el instante de inicio del siguiente.

El método empleado para realizar el cálculo del cociente sigue siendo el que se usó para el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas monofásicas, ya que en ambos

$$c_Q \approx \frac{\sum_0^{t_f} I^2 \Delta t}{\sum_0^{t_f} I^2 \cos^2 \varphi \Delta t}$$

Por ese motivo, el programa que se usa aquí es el mismo.

La última instrucción del programa es también idéntica a la del fotograma 3 del programa base.

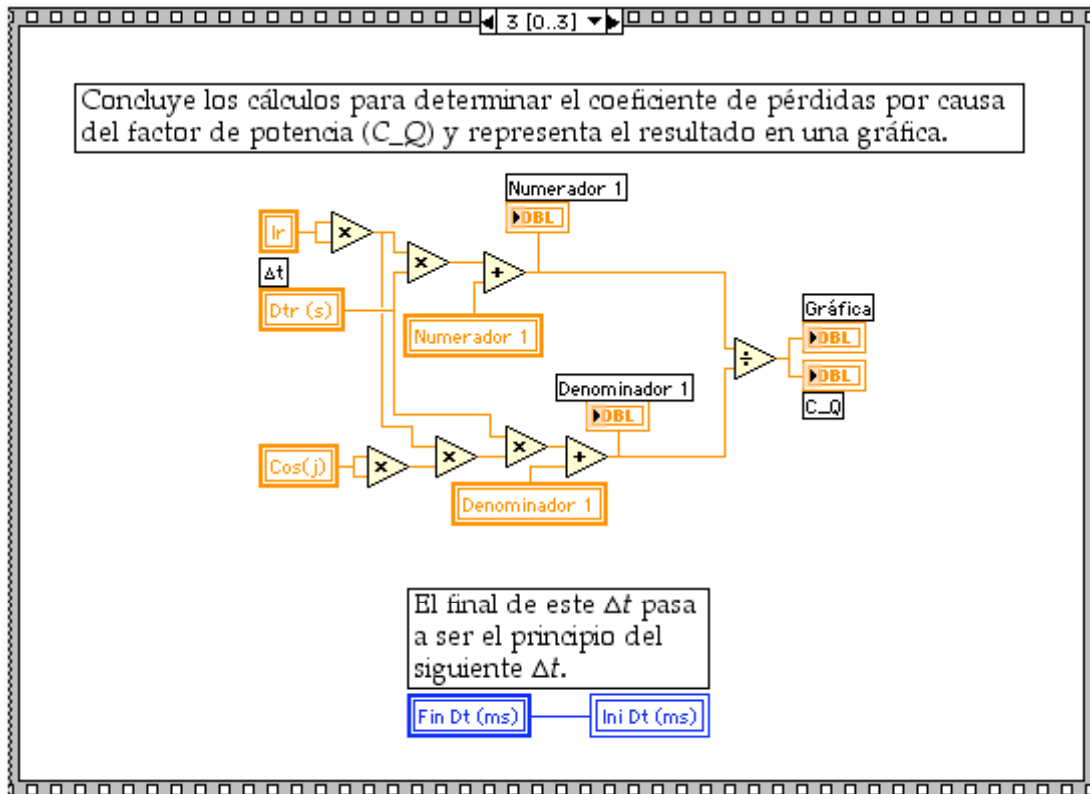


Figura 128.- *Fotograma 3 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.*

8.2.4. Energía que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico equilibrado por consumo de potencia reactiva de un receptor

De la misma forma que para los receptores monofásicos, la (8.20) puede ponerse así:

$$P_p = R_s \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = R_s \frac{S^2}{U^2} = R_s \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (8.22)$$

lo que permite hacer el análisis anterior utilizando la potencia reactiva del receptor como variable independiente, en lugar de su $\cos \varphi$.

$S = \sqrt{3}UI$ es el módulo de la potencia compleja, S , que absorbe el receptor, que se llama potencia aparente. φ es el argumento de la potencia compleja, que, en los sistemas trifásicos equilibrados, coincide con la diferencia de fase entre la tensión entre cada fase y el neutro, y la

intensidad de esa fase. P es la potencia activa y Q la potencia reactiva que el receptor absorbe. $\cos\varphi$ es el factor de potencia del receptor [56][82].

También en un receptor trifásico propiamente dicho, al que exclusivamente nos referimos aquí, $\cos\varphi$ es siempre positivo.

Se ve en (8.22) que el valor mínimo de P_p se obtiene también en los receptores trifásicos equilibrados cuando $Q = 0$, es decir, cuando el receptor no absorbe potencia reactiva, y que ese valor mínimo vale

$$P_{pmi} = R_s \frac{P^2}{U^2} \quad (8.23)$$

Si, como se hizo para el receptor monofásico, se utiliza también aquí la relación $\alpha = |Q|/P$, la (8.22) queda:

$$P_p = R_s \frac{P^2 + Q^2}{U^2} = R_s \frac{P^2 + \alpha^2 P^2}{U^2} = R_s \frac{P^2}{U^2} (1 + \alpha^2) = P_{pmi} (1 + \alpha^2) \quad (8.24)$$

Y la relación entre la potencia P_p que en cada caso se pierde, y la mínima, es también ahora

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = 1 + \alpha^2 \quad (8.25)$$

idéntica a la del receptor monofásico, por lo que la gráfica de la Figura 120 (página 181) y sus consecuencias también valen para los receptores trifásicos equilibrados.

Por otra parte, de la misma forma que para los receptores monofásicos, la (8.22) puede ponerse también así:

$$P_p = R_s \frac{P^2 + Q^2}{U^2} = R_s \frac{P^2}{U^2} + R_s \frac{Q^2}{U^2} \quad (8.26)$$

La nueva expresión muestra que, también para los sistemas trifásicos equilibrados, la potencia que se pierde en su resistencia consta de dos sumandos:

$$P_{pP} = R_s \frac{P^2}{U^2}$$

que también llamaremos ahora *potencia que se pierde en la resistencia del sistema por consumo de potencia activa*, y

$$P_{pQ} = R_s \frac{Q^2}{U^2} \quad (8.27)$$

que llamaremos *potencia que se pierde en la resistencia del sistema por consumo de potencia reactiva*.

Estas fórmulas son formalmente idénticas a las correspondientes de un receptor monofásico; y también resulta que la fórmula

$$P_p = P_{pP} + P_{pQ}$$

es válida tanto para receptores monofásicos como para receptores trifásicos equilibrados: *la potencia que se pierde en la resistencia del sistema es la suma de la debida a la entrega de potencia activa y la debida a la entrega de potencia reactiva*.

La derivada en (8.27) de P_{pQ} respecto a Q , da lo que aumenta P_{pQ} por cada unidad que aumenta Q si se mantiene P constante, y vale

$$\frac{dP_{pQ}}{dQ} = \frac{dP_p}{dQ} = 2R_s \frac{Q}{U^2}$$

La derivada es independiente de P , pero es proporcional a Q . Significa que, como ya se dijo para receptores monofásicos, cuanto mayor sea la potencia reactiva del receptor, mayor es el aumento de la potencia que se pierde por cada unidad que se incremente la potencia reactiva del receptor. Pero también al revés: *para ser más eficaces en disminuir la potencia que se pierde en un sistema eléctrico sinusoidal, tanto con receptores monofásicos como trifásicos equilibrados, conviene más disminuir el valor absoluto de la potencia reactiva de aquellos receptores con mayor valor absoluto de potencia reactiva, que disminuir el valor absoluto de la de aquellos que lo tienen menor*.

Si se integra (8.26) en el periodo de facturación se obtiene la energía que se pierde en la resistencia de un sistema sinusoidal durante ese periodo debida a un receptor trifásico, queda:

$$W_p = \frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} P^2 dt + \frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} Q^2 dt$$

También aquí llamaremos al sumando

$$W_{pP} = \frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} P^2 dt \quad (8.28)$$

energía que se pierde por consumo de potencia activa durante el periodo de facturación. Y a

$$W_{pQ} = \frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} Q^2 dt \quad (8.29)$$

energía que se pierde por consumo de potencia reactiva durante el periodo de facturación, que es proporcional a la integral durante el periodo de facturación del cuadrado de la potencia activa, y no a la energía reactiva absorbida por el receptor durante ese periodo, que es la integral de su potencia reactiva.

La fórmula (8.29) ofrece también ahora la forma de obtener, para cada receptor trifásico equilibrado, un parámetro proporcional a la energía que se pierde en el sistema eléctrico por causa de su potencia reactiva. Ese parámetro es el valor de la integral $\int_0^{t_f} Q^2 dt$ en el periodo de facturación t_f . Puede hacerse con la misma red de adecuación de señales de la Figura 122: se obtienen en cada intervalo Δt la onda de tensión u_{RT} y de intensidad i_R y, de ellas, sus valores eficaces y el ángulo φ como se explicó más arriba. Con esos valores ha de programarse LabVIEW para que realice la operación $(\sqrt{3}U I \text{sen} \varphi)^2 \Delta t$, y sumar el número resultante al resultado de las sumas correspondientes a los intervalos anteriores. Al finalizar el periodo de facturación se obtiene

$$\sum_0^{t_f} (\sqrt{3}U I \text{sen} \varphi)^2 \Delta t \approx \int_0^{t_f} Q^2 dt$$

De donde resulta que

$$W_{pQ} \approx K_t \sum_0^{t_f} (\sqrt{3}U I \text{sen} \varphi)^2 \Delta t$$

$$\text{con } K_t = \frac{R_s}{U^2}.$$

Se recuerda que R_s es aquí la resistencia de cada fase, Q es la potencia reactiva del receptor, U el valor eficaz de la tensión entre fases del receptor, e I el valor eficaz de la intensidad de cada fase.

8.3. Potencia y energía totales que se pierden en un sistema sinusoidal por causa de las potencias activa y reactiva de sus receptores

Si un solo receptor sinusoidal monofásico o trifásico se conecta a un sistema eléctrico sinusoidal, la potencia que se pierde en la resistencia del sistema está dada, como se ha visto, por (8.14) y por (8.26). En ambos casos esa potencia vale

$$P_{p1} = KP_1^2 + KQ_1^2 \quad (8.30)$$

Donde el valor de K es distinto para los receptores monofásicos y trifásicos. P_1 es la potencia activa y Q_1 la potencia reactiva del receptor. Si, retirado ese receptor, se conecta ahora otro de potencias activa y reactiva P_2 y Q_2 , la potencia que se pierde en la resistencia del sistema por su causa es

$$P_{p2} = KP_2^2 + KQ_2^2 \quad (8.31)$$

Si ahora se conectan los dos simultáneamente en paralelo al sistema, forman un receptor de potencia activa $P = P_1 + P_2$ y de potencia reactiva $Q = Q_1 + Q_2$, de forma que la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico al estar los dos conectados simultáneamente es

$$P_p = K(P_1 + P_2)^2 + K(Q_1 + Q_2)^2 \quad (8.32)$$

La suma de las potencias que se pierden cuando cada receptor está conectado por separado al sistema es

$$P_{p1} + P_{p2} = KP_1^2 + KQ_1^2 + KP_2^2 + KQ_2^2 = K(P_1^2 + P_2^2) + K(Q_1^2 + Q_2^2) \quad (8.33)$$

Si se comparan (8.32) y (8.33), se ve lo siguiente: como las potencias activas son siempre números reales positivos, siempre ocurre que el primer sumando del segundo miembro de (8.32) es mayor que el primer paréntesis de (8.33), es decir, $K(P_1 + P_2)^2 > K(P_1^2 + P_2^2)$. O sea, la potencia que se pierde por la potencia activa de los dos receptores juntos es mayor que la suma de las que se pierden cuando están conectados solos. Además, actuando solo en los receptores, esa potencia perdida no se puede disminuir si se mantienen sus potencias activas. Pero las potencias reactivas de los receptores pueden ser positivas o negativas. Si ambas

tienen el mismo signo, siempre ocurre que la potencia que se pierde por la potencia reactiva de los receptores es mayor cuando están conectados juntos que la suma de la que se pierde por separado, porque entonces el segundo sumando de (8.32) es mayor que el segundo paréntesis de (8.33):

$$K(Q_1 + Q_2)^2 > K(Q_1^2 + Q_2^2) \quad (8.34)$$

Pero, si los dos receptores tienen potencia reactiva de signo distinto, la (8.34) resulta:

$$K(Q_1^2 + Q_2^2 - 2|Q_1||Q_2|) < K(Q_1^2 + Q_2^2)$$

Es decir, la potencia que se pierde por consumo de potencia reactiva cuando se conectan simultáneamente los dos receptores en paralelo, uno con potencia reactiva positiva y otro negativa, es ahora menor que la suma de la que se pierde cuando se conectan por separado. Este comportamiento se aprovecha para disminuir las pérdidas debidas a la potencia reactiva de los receptores: un mismo consumidor conecta en paralelo receptores con potencias reactivas de distinto signo. De esta manera puede llegar a anular la potencia reactiva del conjunto. En concreto, la potencia reactiva que absorben los condensadores es negativa: como su potencia activa es prácticamente cero, se conectan en paralelo con receptores de potencia reactiva positiva para disminuir o anular la potencia reactiva del conjunto y, de esta manera, disminuir o anular la potencia que se pierde por consumo de potencia reactiva y, por tanto, disminuir o anular la energía que, por este motivo, se pierde en la resistencia del sistema eléctrico.

8.4. Forma actual de medir la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico debida a la potencia reactiva de los receptores

Describiremos ahora la forma en que las empresas de distribución de energía eléctrica de España tratan las pérdidas en la resistencia del sistema eléctrico “por consumo de energía reactiva”. La expresión entrecomillada es de empleo frecuente y da idea ya del procedimiento, similar al que se sigue en otros países. En efecto, para tratar de evaluar esas pérdidas se mide la energía reactiva que absorben los receptores de cada consumidor durante el periodo de facturación. Además, se prohíbe que el conjunto de los receptores que en cada instante están conectados a la red eléctrica

sinusoidal por un consumidor, tengan potencia reactiva negativa [83]. Y también se impide a los contadores de energía reactiva medir energía reactiva negativa, de forma que no se reste a la positiva por la posible conexión en distinto tiempo de receptores de potencia reactiva negativa. Sí puede un consumidor conectar simultáneamente a la red receptores de potencias reactivas de distinto signo, siempre que la potencia reactiva total sea positiva.

La energía compleja que absorbe cualquier receptor sinusoidal, monofásico, trifásico, o con otro número de terminales, o el conjunto de receptores de un consumidor durante un tiempo t_f es [56]

$$\mathbf{W} = \underline{W/\varphi_W} = W_a + jW_r \quad (8.35)$$

$W_a = \int_0^{t_f} P dt$ es la energía activa y $W_r = \int_0^{t_f} Q dt$ la energía reactiva que absorbe ese receptor. $W = \sqrt{W_a^2 + W_r^2}$ es el módulo de esa energía compleja y φ_W su argumento. De (8.35) resulta que

$$\cos \varphi_W = \frac{W_a}{W} = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} \quad (8.36)$$

Pues bien, las compañías distribuidoras de energía eléctrica obligan a colocar al comienzo de la instalación receptora de ciertos medianos y grandes consumidores un contador de energía activa, que mide W_a durante el periodo de facturación, y otro contador de energía reactiva, que mide W_r durante el mismo periodo. Como se prohíbe que los receptores de un consumidor conectados simultáneamente a la red tengan potencia reactiva negativa [83], la energía reactiva absorbida por un receptor o conjunto de receptores de un consumidor es siempre un número real positivo, o nulo si Q es nula, o negativa a pesar de la prohibición. Con las indicaciones de los dos contadores se determina, mediante la fórmula (8.36), el coseno del argumento de la energía compleja, es decir, se determina $\cos \varphi_W$ [81], que no es, en general, ningún factor de potencia, aunque se le de ese nombre, pues el factor de potencia de un receptor es el coseno del argumento de su potencia compleja, y este es el coseno del argumento de una energía compleja absorbida, en general, por diversos receptores conectados tiempos distintos. Solo si se conecta a la red un único receptor de potencia compleja fija $\mathbf{S} = P + jQ = \underline{S/\varphi}$, la energía

compleja que absorbe tiene el mismo argumento que la potencia compleja, pues entonces

$$W = \int_0^{t_f} \underline{S}/\varphi dt = \underline{S}/\varphi t_f = W/\varphi$$

pero, en general, es el coseno del argumento de la energía compleja, $\cos\varphi_W$, el que se utiliza para obtener los recargos o bonificaciones por consumo de energía reactiva por el primero de los procedimientos a que nos hemos referido al principio de este capítulo [7][9][10]. Es un procedimiento inadecuado al fin de medir la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico, pues consumidores que provocan pérdidas de energía cuantiosas, pueden sufrir recargos mucho menores que los que las producen mucho más pequeñas que ellos. Se verá con un ejemplo.

Supónganse dos consumidores, cada uno con un solo receptor para que el cálculo resulte sencillo. Pueden ser ambos receptores monofásicos o ambos trifásicos. El receptor del primero de potencia compleja $\underline{S}_1 = S_1/\varphi = P_1 + jQ_1$, y el del segundo de potencia compleja doble del primero: $\underline{S}_2 = 2\underline{S}_1 = 2S_1/\varphi = 2P_1 + j2Q_1$. Si durante el periodo de facturación el primero ha estado conectado a la red un tiempo total $t_1 \leq t_f$, y el segundo un tiempo total $t_2 = t_1/2$, la energía compleja que ha absorbido el primero es

$$W_1 = \underline{S}_1 t_1 = S_1 t_1 / \varphi = W / \varphi$$

y el segundo

$$W_2 = \underline{S}_2 t_2 = 2\underline{S}_1 \frac{t_1}{2} = \underline{S}_1 t_1 = W_1$$

O sea, los dos han absorbido la misma energía compleja durante el periodo de facturación. Eso significa que también el argumento de esa energía compleja es el mismo para los dos, en este caso, coincide con el argumento común de las dos potencias complejas, pues cada consumidor solo ha conectado un receptor. Como el coseno de ese argumento es el que se utiliza en la fórmula del recargo, a los dos se aplicará el mismo recargo por consumo de energía reactiva [10]. Si se emplea el método de pagar directamente el consumo de energía reactiva, los dos también pagarán lo mismo por este concepto, ya que la energía reactiva que han absorbido es la misma, pues es la parte imaginaria de la energía compleja que han absorbido, que es para los dos la misma.

Visto este resultado, calcularemos ahora con (8.19) ó (8.29), según fuera el receptor monofásico o trifásico, la pérdida de energía que por causa de cada uno se ha originado en el sistema eléctrico debida a la potencia reactiva respectiva. Para el primero esta energía es

$$W_{pQ1} = K \int_0^{t_r} Q_1^2 dt = KQ_1^2 t_1$$

Para el segundo

$$W_{pQ2} = K \int_0^{t_r} Q_2^2 dt = KQ_2^2 \frac{t_1}{2} = K(2Q_1)^2 \frac{t_1}{2} = 2KQ_1^2 t_1 = 2W_{pQ1}$$

K toma el valor correspondiente que indican las fórmulas (8.19) ó (8.29) dependiendo de si los receptores son ambos monofásicos, o ambos trifásicos equilibrados. Se han unificado los cálculos porque las conclusiones son comunes a los dos tipos de receptores.

Se ve que el segundo receptor, que tiene doble potencia reactiva que el primero, aunque durante el tiempo de facturación absorbe la misma energía activa y la misma energía reactiva que el primero, origina el doble de pérdidas de energía en el sistema eléctrico debidas solo a la potencia reactiva. Sin embargo, como se dijo, el recargo será idéntico para los dos, pues los dos han absorbido la misma energía reactiva.

Como se ve, es fácil pensar en ejemplos en los que la inadecuación entre los recargos y las energías que se pierden son mucho más espectaculares aún que en el caso elegido.

Este ejemplo, no obstante, basta para mostrar la inadecuación de los actuales procedimientos de recargo, que deberían buscar penalizar más a los consumidores que originen mayores pérdidas de energía. Y es que, la medida de la energía reactiva absorbida por un receptor, o la determinación del coseno del argumento de la energía compleja absorbida por él, que es lo que se usa ahora, no son procedimientos que puedan servir para indicar las pérdidas de energía en el sistema eléctrico.

Se llama la atención de que la potencia reactiva, y no la energía reactiva, es la causa de pérdida de energía en la resistencia del sistema eléctrico, como se ve en (8.19) y en (8.29), donde se pone de manifiesto que valores absolutos de potencias reactivas mayores provocan siempre pérdidas de energía mayores durante el mismo tiempo. Por eso, en este trabajo, a esa causa de pérdida de energía se la denomina "por consumo de potencia reactiva", y no por "consumo de energía reactiva", pues en la energía reactiva, al intervenir el tiempo, mayor consumo de energía reactiva no implica necesariamente mayores pérdidas de energía, sino

que, en muchos casos, como se vio en el ejemplo, las pérdidas son menores. Y eso es así porque, en las fórmulas de la energía que se pierde, en las fórmulas (8.19) y (8.29), la potencia reactiva Q está elevada al cuadrado. Si no fuera así, si el integrando que aparece en esas fórmulas fuera la potencia reactiva Q elevada a la unidad, resultaría que la potencia que se perdería sería proporcional a la energía reactiva absorbida por el receptor y, entonces, sí que estaría totalmente justificado medir la energía reactiva que absorbe el receptor, pues sería un indicativo perfecto para medir las pérdidas. Pero las fórmulas (8.19) y (8.29) muestran que las cosas están muy lejos de ser así.

¿Por qué, entonces, la energía reactiva se ha utilizado y se continúa utilizando como indicador de pérdidas? Esta pregunta plantea un tema interesante de investigación futura, inseparable del origen del propio concepto de energía reactiva, que tenemos intención de emprender. De momento, no podemos responder de forma segura. No obstante sí se podría aventurar una hipótesis verosímil, aunque, naturalmente, pendiente de confirmación clara. Como se ha visto, las formas de medida que hemos ideado en este trabajo, basadas en los cocientes de pérdidas por consumo de potencia reactiva, y de los otros cocientes de pérdidas que se proponen, requieren el empleo de técnicas de medida y de captación de datos absolutamente nuevas, necesitan tarjetas de adquisición de datos con gran frecuencia de muestreo y de programas de ordenador que realicen operaciones casi instantáneas. No parece que se puedan idear otros procedimientos que empleen instrumentos de medida clásicos y que ofrezcan los mismos o similares resultados. De ser eso cierto, la razón de haber venido empleando el procedimiento de la energía reactiva para evaluar este tipo de pérdidas en el sistema eléctrico, sería que, a pesar de su clara inadecuación, era el único que se podía aplicar hasta el surgimiento de la tecnología actual; y eso porque la integral $\int_0^{t_r} Q dt = W_r$, que se llamó energía reactiva, sí puede ser medida por un aparato clásico, el contador de energía reactiva, que fue, en el inicio, un mecanismo modificado del contador de energía activa.

Es verdad que la energía reactiva consumida por los receptores de un abonado, y la energía que se pierde en el sistema eléctrico no son proporcionales, ni siquiera existe entre ellas una relación biunívoca, como ya se ha visto, por lo que es imposible emplear la energía reactiva como indicador de las pérdidas en el sistema eléctrico; tampoco, por tanto, el recargo que se aplica al consumidor, que está basado en la energía reactiva que absorbe, es proporcional a las pérdidas que origina, ni puede existir

entre ese recargo y la energía perdida en el sistema eléctrico una relación biunívoca, pero penalizar de cualquier forma el consumo de energía reactiva, aunque sea de manera injusta, sí anima a los consumidores a disminuir la potencia reactiva de los receptores. Y esa medida, la de disminuir el valor absoluto de la potencia Q , sí disminuye siempre la energía que se pierde en el sistema eléctrico si los receptores son monofásicos o trifásicos equilibrados.

8.5. Energía reactiva y desequilibrio de receptores trifásicos

Los receptores trifásicos que se han considerado hasta ahora en este capítulo han sido todos receptores equilibrados. La razón es que, como se verá en el capítulo siguiente, el desequilibrio merece un análisis particular, pues él mismo es otra causa de incremento de la energía que se pierde en el sistema eléctrico. No obstante, existe una especial relación entre el desequilibrio, la corrección del factor de potencia de receptores trifásicos, y el actual método de medir las pérdidas por medio de la energía reactiva, que conviene que se trate en este capítulo, que está dedicado a las pérdidas debidas al consumo de potencia reactiva.

Aunque ya se han utilizado algunos conceptos de los comentados a continuación, precisaremos brevemente, pero procurando la máxima claridad, algunos de los más importantes de los que se van a necesitar en este apartado.

8.5.1. Potencia y energía de receptores trifásicos

La potencia compleja que absorbe un multipolo sinusoidal (Figura 129) cuando está conectado a una red sinusoidal es [84]

$$S = \sum_{k=0}^t V_k I_k^* = \sum_{k=0}^t V_k I_k / \underline{\varphi}_k = \sum_{k=0}^t S_k / \underline{\varphi}_k = S / \underline{\varphi} = P + jQ$$

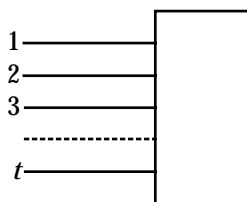


Figura 129.- Multipolo sinusoidal de t terminales.

V_k es el fasor del potencial de un terminal cualquiera, k , respecto a un origen arbitrario de potenciales; I_k es el fasor de la intensidad que entra al multipolo por el terminal k e I_k^* su conjugado. V_k es el valor eficaz del potencial del terminal k e I_k el valor eficaz de la intensidad que entra por el terminal k . φ_k es la diferencia de fase entre el potencial del terminal k y la intensidad que entra al multipolo por ese terminal. $S_k = V_k I_k$ se llama potencia aparente del terminal k . El módulo S de la potencia compleja se llama potencia aparente del multipolo. φ es el argumento de la potencia compleja que absorbe el multipolo. La parte real, P , de la potencia compleja es la potencia reactiva que absorbe el multipolo, y la parte imaginaria, Q , la potencia reactiva que absorbe el multipolo. $\cos\varphi = P/S$ se llama factor de potencia del multipolo.

La energía compleja que absorbe el multipolo durante el periodo de facturación t_f es

$$W = \int_0^{t_f} S dt = \int_0^{t_f} P dt + j \int_0^{t_f} Q dt = W_a + j W_r = W / \varphi_W$$

$W_a = \int_0^{t_f} P dt$ es la energía activa, y $W_r = \int_0^{t_f} Q dt$ es la energía reactiva absorbida por el multipolo. φ_W es el argumento de la energía compleja.

Los conceptos expuestos en este apartado 8.5.1 se refieren a multipolos sinusoidales cualesquiera, con independencia de su número de terminales; por tanto también son válidos para los receptores trifásicos, equilibrados o no.

8.5.2. Forma actual de evaluar la energía que se pierde por causa de receptores trifásicos desequilibrados

La forma actual de evaluar la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por causa de receptores trifásicos desequilibrados es la misma que la que ya se ha expuesto para los receptores equilibrados: se miden W_a y W_r , que son las indicaciones de los contadores de energía activa y de energía reactiva; de ellas se obtiene $\cos\varphi_W = W_a / \sqrt{W_a^2 + W_r^2}$ y, con ese valor, se aplica el recargo a que ya nos hemos referido [10], o

bien se cobra directamente la energía reactiva que han absorbido los receptores de cada consumidor.

Este procedimiento tampoco grava a los consumidores proporcionalmente a la energía que cada consumidor hace perder en el sistema eléctrico. Pero, como ocurría en los receptores equilibrados, sí anima a los consumidores a corregir el factor de potencia de sus receptores o, lo que es lo mismo, a disminuir su potencia reactiva, que, como se ha dicho, no es negativa. De esta manera, su integral $W_r = \int_0^{t_r} Q dt$ que es la energía reactiva que absorbe el consumidor, disminuye y disminuye el recargo o, incluso, puede llegar a anularse.

Vimos más arriba que disminuir la potencia reactiva positiva de un receptor trifásico equilibrado de manera que permanezca equilibrado después de esa disminución, siempre disminuye la pérdida de energía que ese receptor provoca en el sistema eléctrico. Sin embargo, ni siquiera esto es cierto, en general, si el receptor trifásico está desequilibrado.

En efecto, veremos que, si el receptor está desequilibrado, la disminución de su potencia reactiva no disminuye siempre la pérdida de energía que origina en el sistema eléctrico, sino que, no pocas veces la aumenta. Pero, aunque eso ocurra, como el recargo solo depende de la energía reactiva que absorbe el receptor, que sí disminuye si disminuye la potencia reactiva, ese recargo es menor aunque se provoque mayor pérdida de energía. El resultado es que un receptor que provoca mayores pérdidas que otro será bonificado, y el que produce menores pérdidas será penalizado [1].

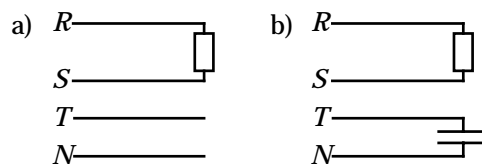


Figura 130.- a) El receptor trifásico está desequilibrado, pues solo las intensidades de las fases R y S no son nulas. Al abonado se le aplica el recargo correspondiente a la energía reactiva $W_r = \int_0^{t_r} Q dt$ que absorbe el receptor. b) Con el condensador de potencia $-Q$ se anula la potencia reactiva y la energía reactiva que absorbe el conjunto. Ahora no hay recargo, sino bonificación. Pero en b) el receptor origina mayores pérdidas de energía que en a).

En efecto, en la Figura 130 se muestra un ejemplo de lo que se dice. En la parte a) solo el receptor de potencia $P + jQ$ está conectado entre las

fases R y S de la línea trifásica de un consumidor. El contador de energía reactiva indicará al final del periodo de facturación la energía

$$W_r = \int_0^{t_f} Q dt = Qt, \text{ donde } t \leq t_f \text{ es el tiempo total que el receptor ha estado}$$

conectado a la red. Esa energía reactiva no es nula porque se supone que Q no es nula y, además, es positiva. La pérdida de energía que el receptor

$$\text{origina es } W_{p1} = \int_0^{t_f} 2RI^2 dt = 2RI^2 t, \text{ donde } R \text{ es la resistencia de cada fase}$$

e I el valor eficaz de la intensidad del receptor. En la parte b) se ha colocado un condensador de potencia reactiva $-Q$, que se conecta y se desconecta a la red simultáneamente con el receptor inicial, con lo que la potencia reactiva del conjunto resulta cero. Por tanto, la energía reactiva que el receptor de la parte b) absorbe, medida por el contador trifásico de energía reactiva, es ahora cero, y se le aplicará la bonificación consecuente. Sin embargo, la pérdida de energía que el nuevo receptor ocasiona es la

que se origina en las fases R y S , que es la misma que en el caso a), más la que origina la intensidad del condensador en la fase T y el neutro, que es

$$W_{pC} = \int_0^{t_f} RI_C^2 dt = RI_C^2 t. \quad I_C \text{ es el valor eficaz de la intensidad del}$$

condensador. O sea, la nueva pérdida es $P_{p2} = 2RI^2 t + 2RI_C^2 t$, mayor que la primera; pero, como se ha dicho, ahora el consumidor será bonificado.

Se puede pensar que el ejemplo anterior puede ser poco representativo, que se presenta pocas veces en la realidad. Sin embargo no es así. En [1] se analizan otros muchos casos en los que los resultados son idénticos a este.

Por tanto, resumiendo, la penalización por consumo de energía reactiva no es un procedimiento adecuado para que el consumidor pague las pérdidas de energía que sus receptores originan en el sistema eléctrico, aunque sí sirve para incentivar la disminución de la potencia reactiva que absorbe.

8.6. Comparación del procedimiento actual de recargo por consumo de energía reactiva con el método del cociente de pérdidas que aquí se propone

El procedimiento de utilizar los cocientes de pérdidas que aquí se propone, compara siempre la energía que realmente se pierde en la

resistencia del sistema eléctrico por causa exclusiva del receptor, con la que se perdería si el receptor tuviera características óptimas, o sea, aquellas que hacen que origine la menor pérdida de energía posible. Y esto, con un cociente para cada una de las causas de pérdidas por separado; pero también, como se verá en capítulos siguientes, para un conjunto cualquiera de esas causas consideradas simultáneamente. Por eso ocurre que las pérdidas son siempre proporcionales a esos cocientes, y pueden ser utilizados con total seguridad para establecer los recargos o bonificaciones que se consideren adecuados para disminuir esas pérdidas. Esos recargos pueden establecerse proporcionales a la energía que se pierde, con un peso estadístico igual o distinto para cada causa de pérdidas, o progresivos, pero siempre adecuados al fin que se pretende, que es penalizar la pérdida de energía que se produzca en el sistema eléctrico por causa de las características de los receptores o de la forma de utilizarlos. Un requisito indispensable de cualquier sistema de penalización es que pague más el que más energía haga perder al sistema, y que nunca ocurra lo contrario. Esto sucede siempre con el procedimiento de los cocientes de pérdidas que se propone, y, probablemente, casi nunca con el método de la medida de la energía reactiva que actualmente se aplica, como se ha visto. Ni siquiera, en contra de lo que suele creerse, el método de la energía reactiva es adecuado si los sistemas de distribución fueran monofásicos, como también se vio.

Otra ventaja importante del método que aquí se propone es que, como con él se mide la integral del cuadrado de la potencia reactiva, la integral de Q^2 , a la que es directamente proporcional la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico, no importa si el receptor absorbe potencia reactiva positiva o negativa. El método siempre va acumulando las medidas de la energía que se pierde.

Por el contrario, el método actual de medir la energía reactiva que absorbe el receptor, requiere, como es sabido, y ya se ha dicho antes, que esa energía sea siempre positiva, pues, si fuera negativa, los contadores clásicos de energía reactiva girarían en sentido contrario, y restarían esa energía para obtener el resultado final, a pesar de que la energía que se pierde en el sistema eléctrico siempre seguiría aumentando. Para que esto no ocurra, para que la resta no se produzca, en el método actual se exige, como es sabido, que el conjunto de los receptores del abonado conectados a la red nunca tenga potencia reactiva negativa. Y, como medida complementaria, se dota a los contadores de energía reactiva de un mecanismo que les impide girar hacia atrás. El resultado real es que, si un consumidor absorbe energía reactiva negativa no hay medio de saberlo, y

tampoco se grava de ninguna manera, por ello, la pérdida de energía en el sistema eléctrico que también originan los receptores que absorben potencia reactiva negativa.

Todos estos inconvenientes desaparecen con el método del cociente de pérdidas por consumo de potencia reactiva que aquí se propone.

8.7. Resumen de resultados del análisis de pérdidas por consumo de potencia reactiva

Sistemas monofásicos

Energía mínima perdida

$$W_{pmi} = \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} P^2 dt$$

donde R_s es la resistencia del sistema, V el valor eficaz de la tensión del receptor, t_f el periodo de facturación y P la potencia activa del receptor.

Potencia que se pierde por consumo de potencia activa y reactiva

$$P_p = \frac{R_s}{V^2} P^2 + \frac{R_s}{V^2} Q^2$$

donde Q es la potencia reactiva del receptor.

Energía que realmente se pierde

$$W_p = \frac{R_s}{V^2} \int_0^{t_f} \frac{P^2}{\cos^2 \varphi} dt$$

donde $\cos \varphi$ es el factor de potencia del receptor.

Cociente de pérdidas

$$c_Q = \frac{\int_0^{t_f} I^2 dt}{\int_0^{t_f} I^2 \cos^2 \varphi dt}$$

donde I es el valor eficaz de la intensidad del receptor.

Sistemas trifásicos

Energía mínima perdida

$$W_{pmi} = \frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} P^2 dt$$

donde R_s es la resistencia total de cada fase, U el valor eficaz de la tensión entre fases, t_f el tiempo de facturación y P la potencia activa que absorbe el receptor.

Energía que realmente se pierde

$$W_p = \frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} \frac{P^2}{\cos^2 \varphi} dt$$

donde $\cos \varphi$ es el factor de potencia del receptor.

Cociente de pérdidas

$$c_Q = \frac{\int_0^{t_f} I^2 dt}{\int_0^{t_f} I^2 \cos^2 \varphi dt}$$

donde I es el valor eficaz de las intensidades de las fases.

9. Energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por desequilibrio de las intensidades de los receptores trifásicos

9.1. Introducción

Los sistemas de generación, transporte y distribución de energía eléctrica habituales son trifásicos en la mayoría de sus partes. También mucha de la energía que se obtiene de ellos se extrae por medio de receptores trifásicos. Algunos receptores trifásicos se unen al sistema eléctrico del que obtienen su energía por medio de tres conductores, que se llaman fases, y otros también por un cuarto conductor, que se llama conductor neutro. Los generadores trifásicos que forman parte de los sistemas trifásicos funcionan de forma que producen fuerzas electromotrices equilibradas. Se persigue con ello que las tensiones que se apliquen a los receptores trifásicos también estén equilibradas. Estas y otras medidas que buscan el equilibrio hacen que, en la práctica, las tensiones entre cada una de las tres fases y el neutro de los receptores trifásicos están muy aproximadamente equilibradas. Por eso, en todo este capítulo, como en los anteriores, se supondrá que las tensiones de los sistemas trifásicos están equilibradas.

Pero las intensidades de los terminales de los receptores trifásicos dependen del propio receptor. También depende de él que estén equilibradas o no. De un receptor trifásico diremos que está equilibrado si, al ser conectado a un sistema trifásico de tensiones equilibradas, las intensidades de sus terminales también resultan equilibradas [80]. Si, estando las tensiones equilibradas, las intensidades no lo están, se dice que el receptor está desequilibrado.

Pues bien, en este capítulo se verá que el desequilibrio de las intensidades a que pueden dar lugar los receptores que se conectan a los sistemas trifásicos, es causa directa de incremento de la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico [2].

9.2. Ejemplo

Antes de mostrar de forma general que el desequilibrio de las intensidades de las fases de los receptores trifásicos es causa de pérdidas de energía en el sistema eléctrico, conviene presentar el tema por medio de un ejemplo en el que se comprueba muy claramente esa afirmación [2].

Si a una línea trifásica de tensiones equilibradas se conecta un receptor equilibrado de potencia activa P y factor de potencia $\cos\varphi$, la intensidad por cada fase vale [56]

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi}$$

U es el valor eficaz de la tensión entre cada par de fases de la línea. Como el receptor es equilibrado, la intensidad del neutro es nula. Por tanto la potencia que se pierde en la línea, de resistencia R en cada hilo, vale

$$P_{p1} = 3RI_1^2 = 3R\frac{P^2}{3U^2\cos^2\varphi} = R\frac{P^2}{U^2\cos^2\varphi}$$

Un caso de notable desequilibrio ocurre si esa misma potencia activa es absorbida por un receptor monofásico con el mismo factor de potencia $\cos\varphi$, que se conecte entre dos fases. Entonces el valor eficaz de la intensidad por cada una de esas dos fases vale

$$I_2 = \frac{P}{U\cos\varphi}$$

Y es cero en la otra fase y en el neutro. Por tanto, la potencia que ahora se pierde en la resistencia del sistema es

$$P_{p2} = 2RI_2^2 = 2R\frac{P^2}{U^2\cos^2\varphi} = 2P_{p1}$$

Es decir, sólo por causa de este especial desequilibrio, se ha duplicado la potencia que se pierde en la resistencia del sistema.

Se podía haber elegido un ejemplo en el que la diferencia entre las potencias que se pierden con el receptor equilibrado y desequilibrado fueran aún mayores. Por ejemplo, si un receptor de la misma potencia activa y con el mismo factor de potencia se conecta entre una fase y el neutro, el valor eficaz de la intensidad por esa fase y el neutro es

$$I_3 = \frac{P}{V\cos\varphi} = \frac{\sqrt{3}P}{U\cos\varphi}$$

$V = U/\sqrt{3}$ es el valor eficaz de la tensión entre cada fase y el neutro. La potencia que se pierde ahora en la resistencia del sistema eléctrico es la que absorben las resistencias de la fase y el neutro entre los que está conectado el receptor, únicos conductores por los que circula intensidad. Esa potencia vale

$$P_{p3} = 2RI_3^2 = 2R \frac{3P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = 6R \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = 6P_{p1}$$

En este caso la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico es seis veces la que se pierde cuando la misma potencia se entrega a una carga trifásica equilibrada.

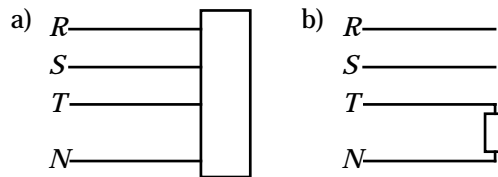


Figura 131.- El receptor desequilibrado de la figura b) absorbe la misma potencia que el receptor equilibrado de la figura a) y tiene el mismo factor de potencia que él. Pero la potencia que el receptor de la figura b) hace perder en el sistema eléctrico es nueve veces la que hace perder el receptor equilibrado de la figura a). Esta diferencia se debe solo al desequilibrio y, en la actualidad, no es evaluada de ninguna manera.

Se ha supuesto que el conductor neutro tiene la misma resistencia que cada una de las fases, lo que no siempre ocurre. Con frecuencia la resistencia del conductor neutro es el doble de la resistencia de cada fase [85][86]. En caso de ser así, la potencia que se pierde en la resistencia de la fase y el neutro sería

$$P_{p3} = RI_3^2 + 2RI_3^2 = 3RI_3^2 = 3R \frac{3P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = 9R \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = 9P_{p1}$$

Nueve veces la potencia que se perdería si la potencia eléctrica que se demanda del sistema se extrajera por medio de un receptor trifásico equilibrado con el mismo factor de potencia.

Una conclusión que se deduce directamente de este ejemplo, sin necesidad de ninguna otra consideración, es que, por razones de ahorro de energía, es preferible obtener cualquier potencia de un sistema trifásico por medio un receptor trifásico equilibrado que por medio de un receptor monofásico. Por ejemplo, si se trata de calentar un horno con resistencias, se obtiene el mismo resultado en cuanto a cantidad de calor que se

produce cada unidad de tiempo y, por tanto, en cuanto a temperatura que se alcanza en el horno, si se utiliza una sola resistencia de la potencia necesaria P conectada entre dos fases o entre fase y neutro, que tres resistencias iguales que formen un receptor equilibrado cuya suma de potencias sea P . Sin embargo, con la última forma de hacerlo es menor la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico, se ahorra energía, aunque este ahorro no se evalúe en la actualidad de ninguna manera y no repercuta, por tanto, en beneficio del consumidor, sino principalmente, en beneficio de la empresa suministradora de energía eléctrica [2].

9.3. Desequilibrio de cargas trifásicas como causa de pérdidas de energía

El procedimiento que se ha venido aplicando hasta ahora de evaluación de la energía que se pierde, por causas achacables al receptor, ha consistido en comparar la energía que se pierde por una causa determinada con la energía que se perdería si ese motivo de pérdidas disminuye o desaparece completamente, pero dejando invariables las otras causas de pérdidas. Este procedimiento puede ser aplicado también al desequilibrio de cargas trifásicas, tratando de separar el propio desequilibrio como causa de pérdidas, de las otras causas de pérdidas achacables al receptor. Pero, si se hace así, el método necesita ahora un comentario adicional. La razón es que, en general, no se puede separar el desequilibrio de las intensidades de las fases, de las diferencias de fase entre esas intensidades y las tensiones entre las fases correspondientes y el neutro. Esas diferencias de fase están relacionadas con el factor de potencia de la carga, por lo que conviene aclarar lo que significa separar ambas causas de pérdidas: el desequilibrio y el factor de potencia de cargas trifásicas.

En lo que sigue se trata este tema.

9.3.1. Desequilibrio y factor de potencia de cargas trifásicas

Se llama factor de potencia de un receptor sinusoidal a la relación entre la potencia activa P que absorbe el receptor y su potencia aparente S . Como la potencia compleja que absorbe el receptor es $\underline{S} = S/\varphi = P + jQ$, el factor de potencia resulta ser el coseno del argumento φ de la potencia

compleja que absorbe ese receptor [8][56]. Esta definición es válida para cualquier receptor sinusoidal, sea monofásico, trifásico equilibrado, trifásico no equilibrado, o cualquier otro multipolo sinusoidal [56]. Si se trata de un receptor trifásico equilibrado, el ángulo φ coincide con los ángulos $\varphi_R = \varphi_S = \varphi_T$. φ_R es la diferencia de fase entre la tensión v_R , entre la fase R y el neutro, y la intensidad i_R de esa fase. De forma similar ocurre con, φ_S y φ_T . En este caso, el factor de potencia del receptor trifásico coincide con el coseno de esos desfases. Pero si el receptor no está equilibrado, el argumento φ de la potencia compleja no coincide, en general, con esos desfases, que a su vez, pueden ser diferentes entre sí [56].

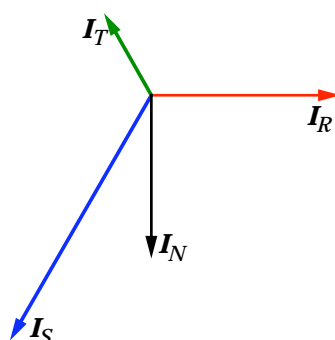


Figura 132.- Desequilibrio de intensidades producido solo por su distinto valor eficaz.

Una forma inicial de explorar el efecto exclusivo del desequilibrio sobre las pérdidas fue abordada en la referencia [2]. Consistió en considerar solo los desequilibrios que se deben a diferencias de los valores eficaces de las intensidades de las fases, y suponer que todos los desfases de esas intensidades respecto a las tensiones simples correspondientes son iguales, o sea, suponer que $\varphi_R = \varphi_S = \varphi_T$. En este caso solo se permite que varíen los valores eficaces de las intensidades, por lo que el factor de potencia no cambia, pues es el coseno del ángulo $\varphi = \varphi_R = \varphi_S = \varphi_T$, que se mantiene inalterado.

El resultado del análisis fue que la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico es mínima si los valores eficaces de las intensidades de las fases son iguales y es cero el valor eficaz de la intensidad por el neutro [2]. Este resultado, junto a las hipótesis de partida son, precisamente, las propiedades de los receptores equilibrados.

Otra segunda forma de considerar el problema, más general que la anterior, fue abordada en la referencia [4]. En ella se consideraron como

variables independientes no solo los valores eficaces de las intensidades de las fases y el neutro, sino también los ángulos φ_R , φ_S y φ_T , con la única restricción de que la potencia activa P que absorbe el receptor debía mantenerse constante. Este planteamiento, como se ve, no exigía que el factor de potencia permaneciera fijo. El resultado, en este caso, fue que la potencia que se pierde es mínima si las intensidades de las fases están equilibradas y el factor de potencia es la unidad. Es decir, si, además de tener el mismo valor eficaz, la intensidad de cada fase está en fase con la tensión simple de esa fase, lo que equivale a decir que $\varphi = \varphi_R = \varphi_S = \varphi_T = 0$.

Ninguno de estos dos casos es el que pretendemos estudiar aquí. El primero sí separa las pérdidas por desequilibrio de las debidas al factor de potencia, pues este mantiene su valor. Pero no se estudia el caso general, sino solo el particular que consiste en que el desequilibrio de partida solo se debe a la diferencia de los valores eficaces de las intensidades de las fases, y no a desigualdades de los ángulos φ_R , φ_S y φ_T , que es la otra causa de desequilibrio.

El segundo caso, el que está contenido en la referencia [4], considera unidas en un solo problema dos causas de pérdidas: el desequilibrio y el factor de potencia. Por eso el resultado afecta a las dos causas: la potencia que se pierde es mínima si, simultáneamente, las intensidades están equilibradas y el factor de potencia es la unidad [4].

9.4. Condición de mínima potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por desequilibrio de una carga trifásica de cuatro hilos

Se puede, desde luego, eliminar el desequilibrio de un receptor y mantener su factor de potencia inalterado, y así evaluar la potencia que se pierde solo por el desequilibrio. Pero mantener el factor de potencia inalterado no significa mantener los ángulos φ_R , φ_S y φ_T ; sino mantener inalterado el argumento de la potencia compleja que absorbe el receptor, pues su coseno es el factor de potencia de la carga. Eso equivale a mantener inalterada la potencia reactiva, que es la parte imaginaria de la potencia compleja, ya que la permanencia de su parte real, que es la potencia activa que absorbe el receptor, es la hipótesis fundamental de trabajo.

Por tanto, nuestro objetivo es que ha de hacerse mínima la potencia P_p que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico, permitiendo para ello que puedan variar los valores eficaces de las intensidades de las fases y del neutro, y los ángulos de desfase de las intensidades de las fases respecto a las tensiones, es decir, han de poder variar I_R , I_S , I_T , I_N , φ_R , φ_S y φ_T , pero han de mantenerse inalteradas las potencias activa y reactiva que absorbe el receptor, lo que implica mantener inalterado su factor de potencia. Se intentará dar forma matemática a estas condiciones.

Se trata de un problema de mínimos de la función P_p con las dos restricciones de las potencias activa y reactiva a que nos hemos referido, un problema que se puede resolver por el método de los multiplicadores de Lagrange [87].

Si el receptor es de cuatro hilos, y se suponen iguales las resistencias de los conductores de la línea y que su valor es R , la potencia que se pierde en esas resistencias es

$$P_p = R \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2 \right) \quad (9.1)$$

Se deben encontrar los mínimos de la función P_p , pero deben introducirse las dos condiciones sobre las potencias activa y reactiva. La potencia activa que absorbe el receptor trifásico, esté equilibrado o no, [56] es

$$P = VI_R \cos \varphi_R + VI_S \cos \varphi_S + VI_T \cos \varphi_T \quad (9.2)$$

Y la potencia reactiva es

$$Q = VI_R \sin \varphi_R + VI_S \sin \varphi_S + VI_T \sin \varphi_T \quad (9.3)$$

La función auxiliar $F(I_R, I_S, I_T, I_N, \varphi_R, \varphi_S, \varphi_T)$ que se escribe a continuación contiene esas restricciones:

$$F = R \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2 \right) + m_1 \left(VI_R \cos \varphi_R + VI_S \cos \varphi_S + VI_T \cos \varphi_T - P \right) + m_2 \left(VI_R \sin \varphi_R + VI_S \sin \varphi_S + VI_T \sin \varphi_T - Q \right)$$

Sus derivadas parciales respecto a las variables son:

$$\frac{\partial F}{\partial I_R} = 2RI_R + m_1 V \cos \varphi_R + m_2 V \sin \varphi_R$$

$$\frac{\partial F}{\partial I_S} = 2RI_S + m_1V\cos\varphi_S + m_2V\sin\varphi_S$$

$$\frac{\partial F}{\partial I_T} = 2RI_T + m_1V\cos\varphi_T + m_2V\sin\varphi_T$$

$$\frac{\partial F}{\partial I_N} = 2RI_N$$

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi_R} = -m_1VI_R\sin\varphi_R + m_2VI_R\cos\varphi_R$$

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi_S} = -m_1VI_S\sin\varphi_S + m_2VI_S\cos\varphi_S$$

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi_T} = -m_1VI_T\sin\varphi_T + m_2VI_T\cos\varphi_T$$

Si se igualan a cero, sus soluciones son extremos de P_p .

Además, entre los fasores de las intensidades, debe cumplirse la primera ley de Kirchhoff:

$$I_N = -I_R - I_S - I_T$$

Una solución para las siete ecuaciones que surgen de igualar a cero las derivadas parciales, compatible con la primera ley de Kirchhoff es $I_R = I_S = I_T = I$, $I_N = 0$ y $\varphi_R = \varphi_S = \varphi_T = \varphi$; es decir, que los valores eficaces de las fases sean iguales y que también los ángulos de desfase entre las intensidades y sus correspondientes tensiones sean iguales. Estas dos condiciones conducen también a que $I_N = 0$. Pero estas son, precisamente, propiedades de las cargas trifásicas equilibradas de cuatro hilos. Entonces, como V , P y Q están fijados, de las restricciones (9.2) y (9.3), se deduce que

$$P = 3VI\cos\varphi$$

y

$$Q = 3VI\sin\varphi$$

De ellas se obtienen φ e I . Para hallar I se elevan al cuadrado los dos miembros de ambas ecuaciones y se suma el resultado. Resulta

$$P^2 + Q^2 = 9V^2I^2(\sin^2\varphi + \cos^2\varphi)$$

O sea,

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{3V} = \frac{S}{3V} = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (9.4)$$

Hallada I , pueden hallarse las razones trigonométricas de φ :

$$\cos\varphi = \frac{P}{3VI} = \frac{P}{\sqrt{3}UI} = \frac{P}{S}$$

$$\operatorname{sen}\varphi = \frac{Q}{3VI} = \frac{Q}{\sqrt{3}UI} = \frac{Q}{S}$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P}$$

Todas estas fórmulas son también, como se ve, relaciones propias de las cargas equilibradas.

La demostración que aparece en el artículo de la referencia [2] sirve también aquí para demostrar que este extremo es un mínimo.

Por tanto, resulta que el desequilibrio de las cargas trifásicas de cuatro hilos es otra causa de pérdida de energía en la resistencia del sistema eléctrico. Y la potencia que se pierde es mínima si ese desequilibrio no existe. Entonces esa potencia mínima se obtiene de (9.1) y (9.4):

$$\begin{aligned} P_{pmi} &= 3RI^2 = 3R \frac{S^2}{3U^2} = R \frac{P^2 + Q^2}{U^2} = \\ &= R \frac{V^2 \left[(I_R \cos\varphi_R + I_S \cos\varphi_S + I_T \cos\varphi_T)^2 + (I_R \operatorname{sen}\varphi_R + I_S \operatorname{sen}\varphi_S + I_T \operatorname{sen}\varphi_T)^2 \right]}{U^2} = \\ &= R \frac{(I_R \cos\varphi_R + I_S \cos\varphi_S + I_T \cos\varphi_T)^2 + (I_R \operatorname{sen}\varphi_R + I_S \operatorname{sen}\varphi_S + I_T \operatorname{sen}\varphi_T)^2}{3} \end{aligned} \quad (9.5)$$

La relación entre la potencia que se pierde y la que se perdería si el receptor estuviera equilibrado se obtiene del cociente de (9.1) y (9.5):

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2)}{(I_R \cos\varphi_R + I_S \cos\varphi_S + I_T \cos\varphi_T)^2 + (I_R \operatorname{sen}\varphi_R + I_S \operatorname{sen}\varphi_S + I_T \operatorname{sen}\varphi_T)^2} \quad (9.6)$$

```

Clear[R];
Sistema4H[MIR_, φR_, MIS_, φS_, MIT_, φT_] :=
Module[{V = 230, VR, VS, VT, MIN, IR, IS, IT, IN, Pp, S, Pc, φ, Ie, Ppe},
  VR = V; VS = V/E^(I*120*Degree); VT = V/E^(I*240*Degree);
  IR = MIR/E^(I*φR); IS = MIS/E^(I*(φS + 120*Degree));
  IT = MIT/E^(I*(φT + 240*Degree)); IN = IR + IS + IT; MIN = Abs[IN];
  Pp = R*(MIN^2 + MIR^2 + MIS^2 + MIT^2);
  S = VR*Conjugate[IR] + VS*Conjugate[IS] + VT*Conjugate[IT]; Pc = Re[S];
  φ = Arg[S]; Ie = Pc/(3*V*Cos[φ]); Ppe = 3*R*Ie^2;
  Print["La potencia perdida en el sistema desequilibrado (Pp): ", N[Pp]];
  Print["La potencia perdida en el sistema equilibrado (Ppe): ", N[Ppe]];
  Print["Relación Pp/Ppe: ", N[Pp/Ppe]];
]

```

Programa 1.- Proporciona la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por desequilibrio de cargas trifásicas de cuatro hilos.

I_R	I_S	I_T	P_p	P_{pmi}	P_p/P_{pmi}
$2/\underline{0^\circ}$	$3/\underline{-135^\circ}$	$1/\underline{130^\circ}$	$16.42R$	$11.66R$	1.41
$2/\underline{-60^\circ}$	$2/\underline{180^\circ}$	$2/\underline{-59.99^\circ}$	$12R$	$4.06 \times 10^{-12} R$	$2.95 \times 10^{12} R$

Tabla 2.- Potencias que se pierden en la resistencia del sistema eléctrico por desequilibrio de cargas trifásicas de cuatro hilos.

El Programa 1, creado para realizara comprobaciones, se ha elaborado con Mathematica. Para usarlo hay que suministrarle los valores eficaces de las intensidades de las fases, I_R , I_S e I_T y sus ángulos de desfase φ_R , φ_S y φ_T respecto a las tensiones simples correspondientes. La salida es la potencia que se pierde en el sistema en cada caso, la potencia que se perdería si la misma potencia compleja que absorbe la carga así definida fuera absorbida por un receptor equilibrado, y la relación entre ambas potencias. En la Tabla 2 se muestran los resultados que este programa proporciona para diferentes casos de cargas trifásicas equilibradas y desequilibradas de cuatro hilos, todos concordantes con el desarrollo teórico elaborado hasta aquí.

9.5. Condición de mínima potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por desequilibrio de una carga trifásica de tres hilos

Veremos que, si el receptor trifásico es de tres hilos, los resultados son similares.

La potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico debida a una carga trifásica de tres hilos es

$$P_p = R(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)$$

Las restricciones (9.2) y (9.3) siguen siendo válidas ahora en la misma forma que allí. Por tanto, la nueva función auxiliar es ahora

$$F = R(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) + m_1(VI_R \cos \varphi_R + VI_S \cos \varphi_S + VI_T \cos \varphi_T - P) + m_2(VI_R \sin \varphi_R + VI_S \sin \varphi_S + VI_T \sin \varphi_T - Q)$$

Las derivadas parciales de esta función son las mismas que las del apartado 9.4. Ahora la primera ley de Kirchhoff ha de cumplirse en la forma fasorial

$$I_T = -I_R - I_S$$

De nuevo es solución el conjunto de condiciones correspondientes a las cargas equilibradas, y la potencia mínima que se pierde viene dada también ahora por (9.5), de manera que la relación entre la potencia que se pierde con el receptor desequilibrado y la que se perdería si estuviera equilibrado es

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)}{(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 + (I_R \sin \varphi_R + I_S \sin \varphi_S + I_T \sin \varphi_T)^2}$$

que solo difiere de (9.6) en el numerador.

```
Clear[R];
Sistema3H[MIR_, φR_, MIS_, φS_] :=
Module[{V = 230, VR, VS, VT, MIT, φT, IR, IS, IT, Pp, S, Pc, φ, Ie,
Ppe},
VR = V; VS = V/E^(I*120*Degree); VT = V/E^(I*240*Degree);
IR = MIR/E^(I*φR); IS = MIS/E^(I*(φS + 120*Degree)); IT = -IR - IS;
MIT = Abs[IT]; Pp = R*(MIR^2 + MIS^2 + MIT^2);
S = VR*Conjugate[IR] + VS*Conjugate[IS] + VT*Conjugate[IT]; Pc =
Re[S];
φ = Arg[S]; Ie = Pc/(3*V*Cos[φ]); Ppe = 3*R*Ie^2;
Print["La potencia perdida en el sistema desequilibrado (Pp): ",
N[Pp]];
Print["La potencia perdida en el sistema equilibrado (Ppe): ",
N[Ppe]];
Print["Relación Pp/Ppe: ", N[Pp/Ppe]];
]
```

Programa 2.- Proporciona la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por desequilibrio de cargas trifásicas de tres hilos.

El Programa 2 es una variante para cargas de tres hilos del de la Programa 1. Ahora las entradas son únicamente los valores eficaces y los ángulos de desfase de las intensidades de dos fases, la R y la S .

I_R	I_S	P_p	P_{pmi}	P_p/P_{pmi}
$1/0^\circ$	$1/-120^\circ$	$3R$	$3R$	1
$2/60^\circ$	$3/-120^\circ$	$32R$	$25R$	1.28
$2/60^\circ$	$2/-60.01^\circ$	$24R$	$2R$	2
$5/-60^\circ$	$5/-178^\circ$	$73.50R$	$0.03R$	2413.24
$2/-60^\circ$	$2/-179.99^\circ$	$12R$	$1.22 \times 10^{-11} R$	9.85×10^{11}

Tabla 3.- Potencias que se pierden en la resistencia del sistema eléctrico por desequilibrio de cargas trifásicas de tres hilos.

En la Tabla 3 se muestran resultados obtenidos con el programa de la Programa 2 para diferentes cargas trifásicas de tres hilos. De nuevo la concordancia con las deducciones teóricas es total.

9.6. Cociente de pérdida de energía por desequilibrio de una carga trifásica

La energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico que alimenta una carga trifásica durante el periodo de facturación es la integral en ese tiempo de la potencia que se pierde:

$$W_p = \int_0^{t_f} P_p dt$$

Si la carga es de cuatro hilos esa integral vale

$$W_p = \int_0^{t_f} P_p dt = \int_0^{t_f} R \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2 \right) dt$$

Y si es de tres hilos

$$W_p = \int_0^{t_f} P_p dt = R \int_0^{t_f} \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 \right) dt$$

La pérdida de energía que produce durante el periodo de facturación un receptor trifásico equilibrado de tres o cuatro hilos que absorba la misma potencia activa con el mismo factor de potencia, es la integral de (9.5):

$$W_{pmi} = \int_0^{t_r} P_{pmi} dt = 3R \int_0^{t_r} I^2 dt = \frac{R}{U^2} \int_0^{t_r} S^2 dt = \frac{R}{U^2} \int_0^{t_r} (P^2 + Q^2) dt =$$

$$= \frac{R}{3} \int_0^{t_r} \left[(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 + (I_R \operatorname{sen} \varphi_R + I_S \operatorname{sen} \varphi_S + I_T \operatorname{sen} \varphi_T)^2 \right] dt$$

Por tanto el *cociente de pérdidas por desequilibrio* para una carga trifásica de cuatro hilos es

$$c_d = \frac{W_p}{W_{pmi}} =$$

$$= \frac{3 \int_0^{t_r} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt}{\int_0^{t_r} \left[(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 + (I_R \operatorname{sen} \varphi_R + I_S \operatorname{sen} \varphi_S + I_T \operatorname{sen} \varphi_T)^2 \right] dt}$$
(9.7)

Y para una carga de tres hilos

$$c_d = \frac{W_p}{W_{pmi}} =$$

$$= \frac{3 \int_0^{t_r} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) dt}{\int_0^{t_r} \left[(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 + (I_R \operatorname{sen} \varphi_R + I_S \operatorname{sen} \varphi_S + I_T \operatorname{sen} \varphi_T)^2 \right] dt}$$
(9.8)

Si el receptor está equilibrado, $I_R = I_S = I_T = I$, $I_N = 0$, $\cos \varphi_R = \cos \varphi_S = \cos \varphi_T = \cos \varphi$, y $\operatorname{sen} \varphi_R = \operatorname{sen} \varphi_S = \operatorname{sen} \varphi_T = \operatorname{sen} \varphi$. Entonces, la (9.8) queda

$$c_d = \frac{3 \int_0^{t_r} 3I^2 dt}{\int_0^{t_r} \left[(3I \cos \varphi)^2 + (3I \operatorname{sen} \varphi)^2 \right] dt} = \frac{9 \int_0^{t_r} I^2 dt}{9 \int_0^{t_r} \left[I^2 (\cos^2 \varphi + \operatorname{sen}^2 \varphi) \right] dt} = \frac{\int_0^{t_r} I^2 dt}{\int_0^{t_r} I^2 dt} = 1$$

que es el valor esperado para las cargas equilibradas.

Las propiedades de este cociente para los dos casos, carga de cuatro hilos y carga de tres hilos, son similares a las de los cocientes anteriores: el cociente de pérdidas por desequilibrio de cargas trifásicas es igual o

mayor que la unidad, el valor uno corresponde a las mínimas pérdidas, que son las que se producen si el receptor es equilibrado, y siempre la energía que se pierde es proporcional al cociente de pérdidas:

$$W_p = c_d W_{pmi}$$

9.6.1. Medida del cociente de pérdidas por causa del desequilibrio de una carga trifásica

El procedimiento de medida es similar al empleado en los casos anteriores, y se seguirá utilizando la misma tarjeta de adquisición de datos. Se trata de evaluar los últimos miembros de (9.7) y (9.8). Aunque el número de variables cuyos valores hay que obtener experimentalmente es menor para receptores de tres hilos que para receptores trifásicos de cuatro hilos, para aprovechar y simplificar los equipos del laboratorio que se han utilizado, se emplea el mismo procedimiento de medida del cociente de pérdidas para receptores tanto de tres como de cuatro hilos. En ambos casos, en cada intervalo Δt se obtienen por muestreo digital las intensidades sinusoidales i_R , i_S e i_T y las tensiones v_R , v_S y v_T . Con el programa adecuado en LabVIEW, se obtienen los ángulos de desfase φ_R , φ_S y φ_T , el valor instantáneo $i_N = i_R + i_S + i_T$, y los valores eficaces en el intervalo Δt de las intensidades de las fases y del neutro, es decir, los valores eficaces I_R , I_S , I_T e I_N . El programa ha de hacer ahora la operación $3(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2)\Delta t$ y sumarla a la suma de los resultados anteriores, que han de haber sido realizados desde el comienzo del periodo de facturación. Y también ha de hacer la operación

$$\left[(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 + (I_R \sin \varphi_R + I_S \sin \varphi_S + I_T \sin \varphi_T)^2 \right] \Delta t$$

cuyo resultado debe sumar también a la suma de los resultados de esta misma operación hecha en los intervalos de tiempo que comenzaron con el inicio del periodo de facturación, y hacer la operación

$$c_d = \frac{3 \sum_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) \Delta t}{\sum_0^{t_f} \left[(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 + (I_R \sin \varphi_R + I_S \sin \varphi_S + I_T \sin \varphi_T)^2 \right] \Delta t}$$

cuyo resultado es c_d con mayor aproximación cuanto menor sea Δt . Los extremos de los sumatorios indican que la suma de los intervalos Δt es t_f .

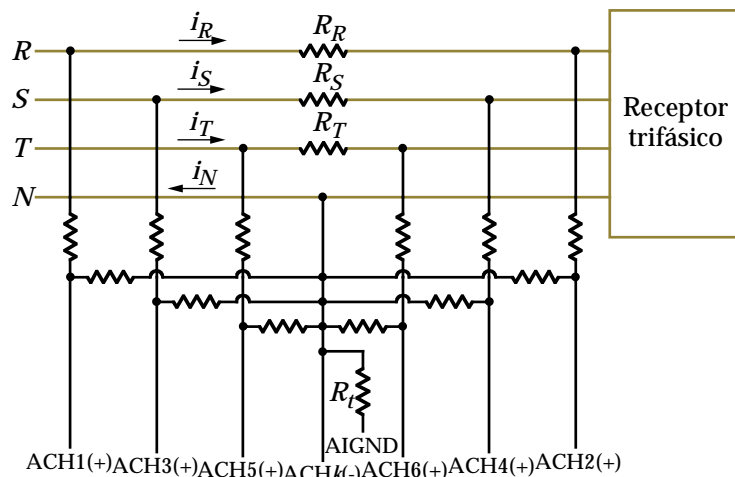


Figura 133.- Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas por desequilibrio de un receptor trifásico.

9.6.2. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas por causa del desequilibrio de una carga trifásica

Como en los casos anteriores, el siguiente programa calcula y presenta en la pantalla del ordenador el cociente de pérdidas por desequilibrio de una carga trifásica cualquiera en un sistema sinusoidal. Simulará las medidas o las captará de un aparato real a través de la tarjeta de captación de datos instalada en el ordenador, mostrará el valor del cociente, y su *historia*.

Este programa está basado en el programa para obtener el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia de cargas trifásicas, explicado anteriormente, sin embargo los cambios introducidos son ahora mucho más extensos que en programas anteriores, como se verá.

9.6.2.1. Panel frontal

Hay que recordar que esta es la única parte del instrumento virtual que ve el usuario, y sirve para controlar los elementos necesarios para el correcto funcionamiento del programa y para mostrar los resultados obtenidos.

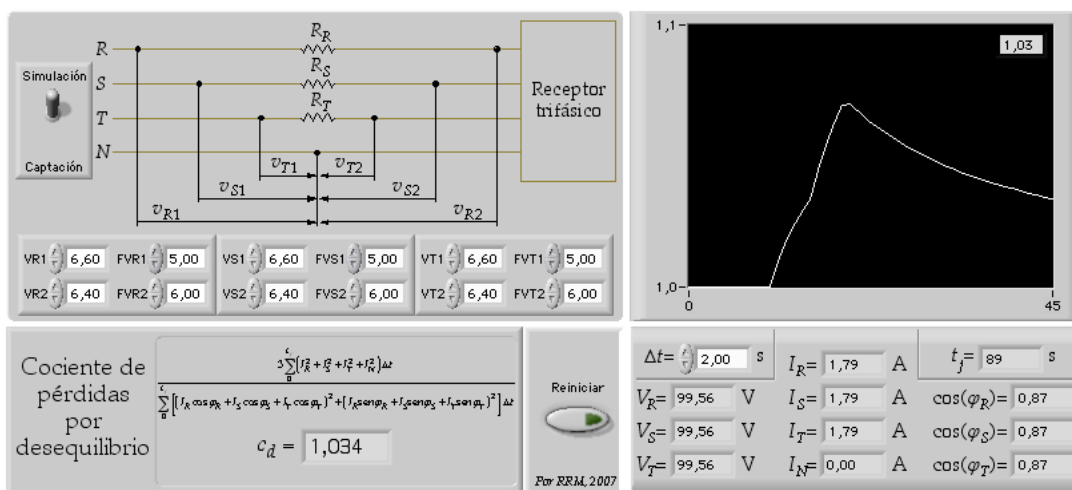


Figura 134.- Panel frontal del instrumento virtual que determina el cociente de pérdidas por desequilibrio.

Como se ha venido haciendo hasta ahora, lo que sigue es una explicación de las zonas en que está dividido el instrumento virtual, y que se muestran coloreadas en la Figura 135 para facilitar su identificación.

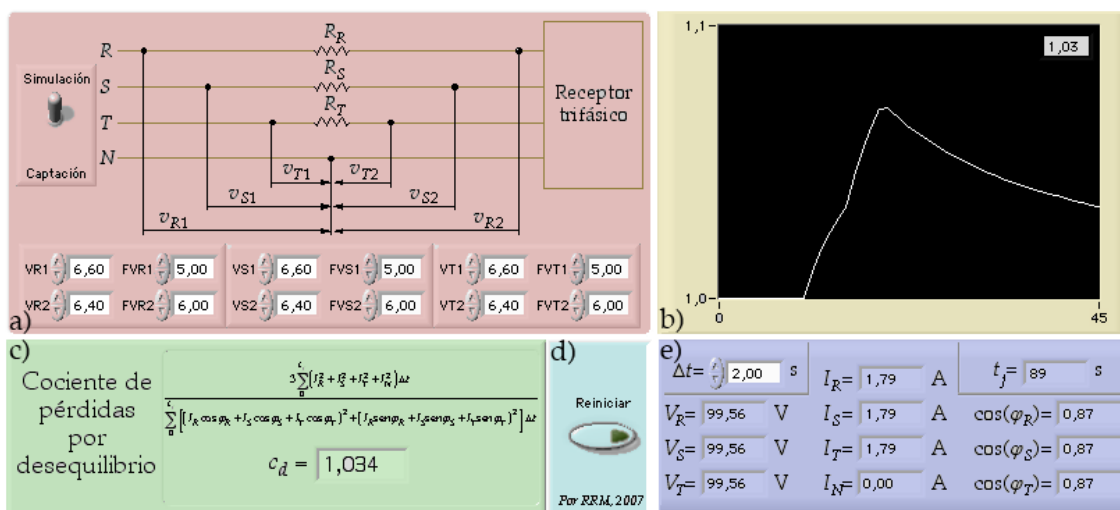


Figura 135.- Zonas en que está dividido el panel frontal del instrumento virtual.

- La zona a) muestra el esquema del circuito que se debe montar para acondicionar las señales que le llegan a la tarjeta,

y que se muestra más detalladamente en la Figura 133. Como se puede ver allí, se usarán seis canales de la tarjeta de captación de datos para medir los valores instantáneos de las tensiones de cada fase con respecto al hilo neutro, antes y después de la resistencia que se ha intercalado en cada fase, tal y como se indica en la Tabla 4. Es muy importante que se respete el orden de conexión que se indica allí cuando se vaya a fabricar la red de adecuación de señales, puesto que se asumirá que la tarjeta está midiendo esas señales cuando se hagan los cálculos. También en la zona a) se encuentra el botón de *Simulación/Captación* y los campos que permiten al usuario modificar los valores eficaces y las fases de las tensiones simuladas. En este programa los campos son más numerosos que en los precedentes ya que hay que simular seis tensiones, y cada una requiere que el usuario defina su valor máximo y su fase.

Canal que realiza la medida	Variable eléctrica medida
ACH1(+)	V_{R1}
ACH2(+)	V_{R2}
ACH3(+)	V_{S1}
ACH4(+)	V_{S2}
ACH5(+)	V_{T1}
ACH6(+)	V_{T2}

Tabla 4.- Variable eléctrica que debe medir cada canal de la tarjeta de captación de datos para que el programa funcione correctamente.

- La zona b) contiene la evolución del cociente de pérdidas por desequilibrio a lo largo del tiempo y el último valor representado que muestra en el campo superior derecho. Esta zona no ha sufrido cambios.
- La zona c) indica al usuario que se está obteniendo el *Cociente de pérdidas por desequilibrio*. Además, también se muestra la ecuación que el programa resolverá para obtenerlo y, en el campo que está debajo de la ecuación, el valor actual del cociente. A pesar de que ha sido necesario ampliar el tamaño de esta zona con respecto a anteriores programas para permitir que cupiera la ecuación del cociente, el contenido de esta sección sigue invariable.

- En la zona d) está el botón de reinicio del instrumento, necesario para volver a iniciar el periodo de facturación.
- En la zona e), en su esquina superior izquierda, se incluye el campo Δt , que es el intervalo de tiempo que el usuario desea usar entre medidas. Su valor mínimo se ha limitado a 1.5 segundos, ya que la tarjeta de captación de datos tomará medidas durante 1 segundo y después el programa deberá operar con ellas. Se ha considerado que medio segundo es tiempo más que suficiente para que realice las operaciones necesarias para obtener el valor del cociente hasta ese intervalo. En la esquina superior derecha está t_f , que es el tiempo de facturación, en segundos. El resto de los campos muestran los valores eficaces de las tensiones de cada terminal de la carga con respecto al terminal del hilo neutro, los valores eficaces de las intensidades que circulan por cada fase y el hilo neutro, y el coseno del desfase entre la tensión y la intensidad de cada fase.

También, ocultos a la vista del usuario, se encuentran algunos resultados necesarios para el cálculo del cociente, aunque en esta ocasión se han añadido los valores del seno del desfase entre la tensión e intensidad de cada fase.

Valores auxiliares que el usuario no necesita conocer

Numerador 1	Ini Dt (ms)	Sen(φ_r)	
953,83	1400017	0,50	
Denominador 1	Fin Dt (ms)	Sen(φ_s)	Simulado?
2768,40	1400017	0,50	<input checked="" type="checkbox"/>
Tick inicio medida	Dtr (s)	Sen(φ_t)	
1310857	2,00	0,50	

Figura 136.- Otros resultados de escaso interés para el usuario permanecen ocultos.

9.6.2.2. Diagrama de conexiones

Si bien este programa se basaba en el instrumento creado para determinar el cociente de consumo de potencia de cargas trifásicas, lo cierto es que ha sufrido muchos cambios, principalmente en los fotogramas 1 y 3.

9.6.2.2.1. Estructura principal

Permanece invariada. Sigue estando formada por una única estructura secuencial compuesta de cuatro fotogramas (desde el 0 hasta el 3).

9.6.2.2.2. Fotograma 0

El primer fotograma de la estructura secuencial inicializa todos los valores, y almacena en una variable el instante de inicio del periodo de facturación y en otra el instante de inicio del primer incremento de tiempo, Δt .

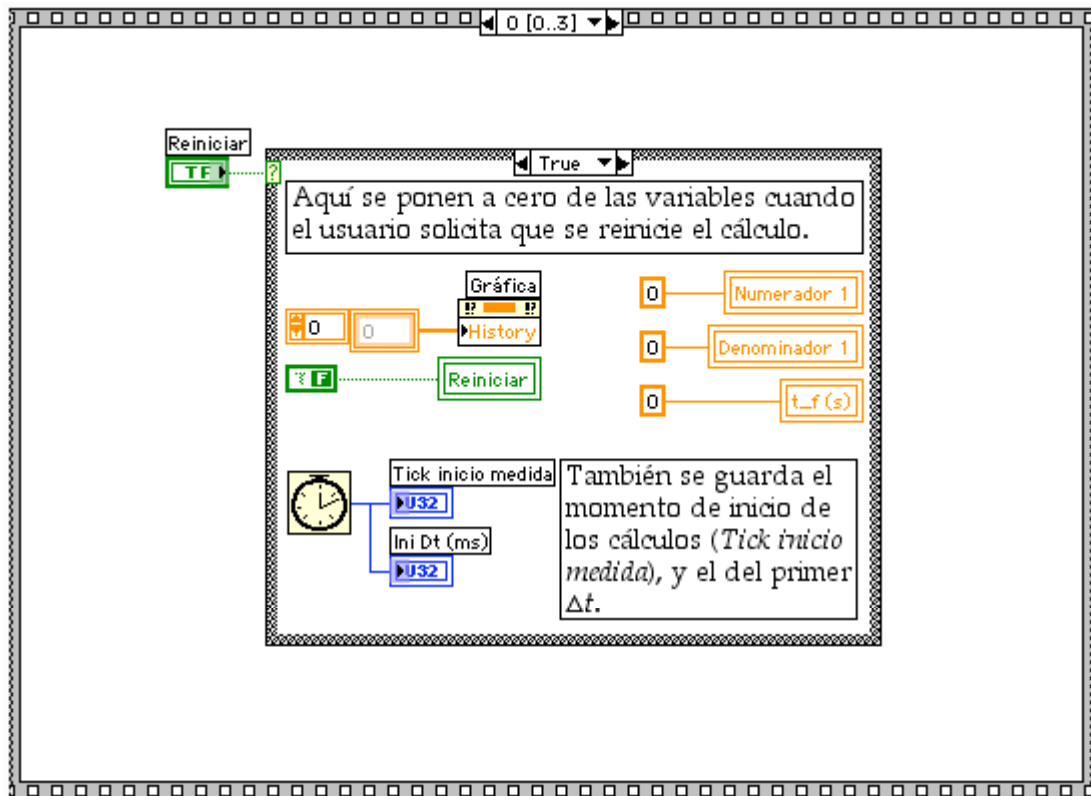


Figura 137.- *Fotograma 0* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

La única modificación que se ha hecho en este fotograma ha sido para reducir el número de decimales de los números que se pasan a las variables para anularlas (Figura 138). El único propósito de esta acción es mejorar la estética del programa.

El resto de los elementos permanecen igual.



Figura 138.- Los únicos cambios que se han introducido en este fotograma.

9.6.2.2.3. Fotograma 1

Como en los programas anteriores, el fotograma 1 capta o simula las ondas necesarias para obtener los valores de las tensiones del receptor, sus intensidades, y los senos y cosenos de los desfases entre la tensión y la respectiva intensidad de cada fase.

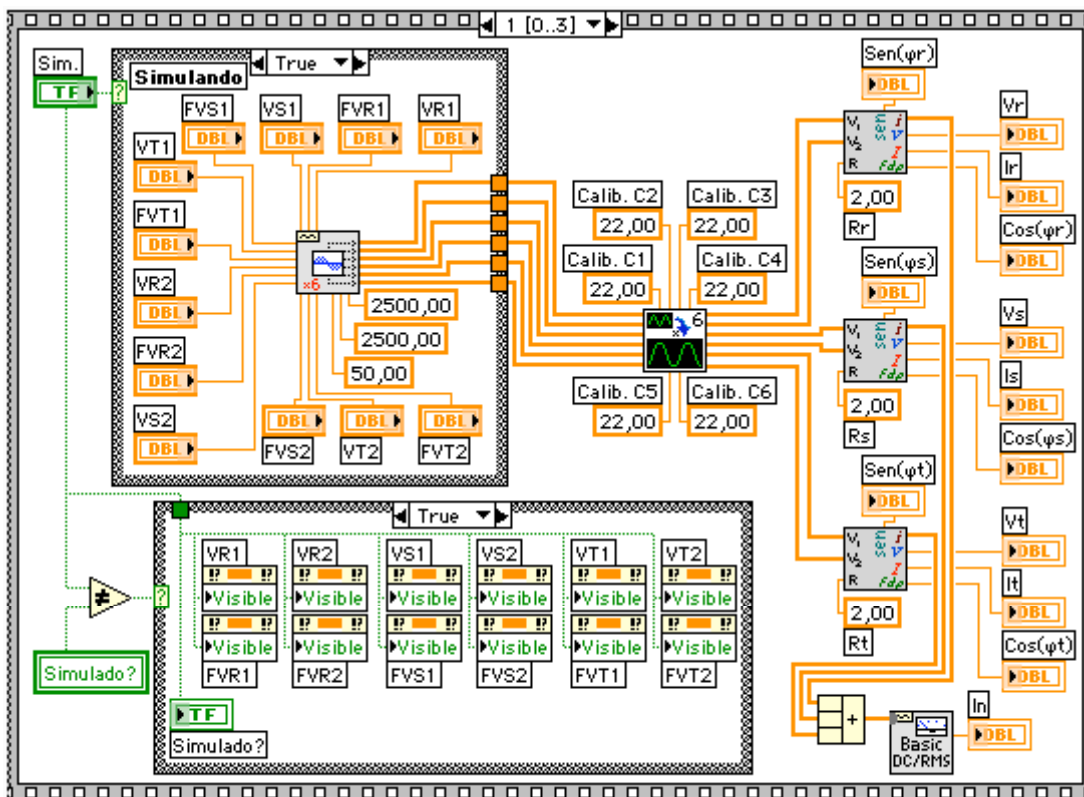


Figura 139.- *Fotograma 1* de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

Para que pudiera caber toda la programación de este fotograma ha sido necesario eliminar la mayoría de las etiquetas de explicación, pero el funcionamiento del mismo sigue siendo igual a los programas anteriores.

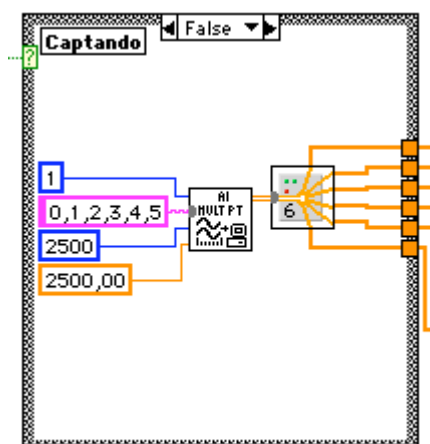


Figura 140.- Zona de captación de datos del instrumento virtual.

La primera modificación tiene lugar en la zona de captación de datos (Figura 140). Mientras que antes se pedía al instrumento virtual que realizara la medida de dos variables eléctricas, desde los canales 0 y 1 exclusivamente, ahora se le pide que mida las 6 tensiones correspondientes a los canales 0, 1, 2, 3, 4 y 5, en ese orden concreto. Es decir, y como se dijo antes, si la red de adecuación de señales se ha conectado como indica la Figura 133, para que cada canal realice las mediciones que indica la Tabla 4, entonces ese es el orden de los canales que hay que emplear.

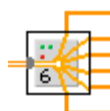


Figura 141.- Instrumento *Dividir6canales.vi*, de creación propia.

Además, ahora se introduce un nuevo instrumento de creación propia llamado *Dividir6canales.vi* (Figura 141). Es el encargado de dividir en pequeñas matrices la matriz 6×2500 devuelta por el instrumento para la *Captación de Formas de Onda Analógicas.vi*, que es el que se utiliza para realizar la captación de datos desde la tarjeta instalada en el ordenador, como ya se vio.

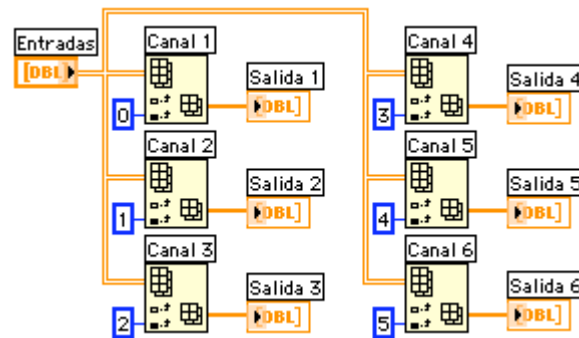


Figura 142.- Diagrama de conexiones del instrumento *Dividir6canales.vi*.

Su funcionamiento es similar al del instrumento *Dividir2canales.vi* que ya se estudió antes. Resumidamente, toma la matriz original y se la lleva a un instrumento *Catalogar Grupo*, al que se le pide que extraiga una fila concreta, de las seis que tiene la matriz original, y el resultado se lleva a uno de los indicadores que servirán como salidas (Figura 142). Esto se repite para las seis señales medidas.

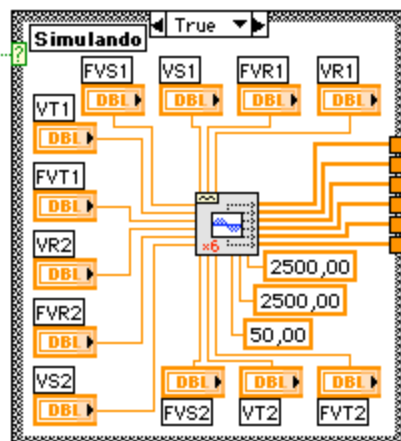


Figura 143.- Zona de simulación de las ondas de tensión del instrumento virtual.

En la zona de simulación de las ondas ha sido necesario crear un instrumento virtual independiente, para poder simplificar el programa (Figura 143). El nuevo instrumento se ha llamado *Generar_6_Ondas_Sinusoidales.vi* (Figura 144). Como su nombre indica ha sido diseñado de forma que genere seis ondas sinusoidales independientes, y que las devuelva por sus seis salidas en el mismo formato en que las devuelve la zona de captación de datos. Esto volverá a permitir que el resto del programa sea independiente del método que se emplee para conseguir esas ondas.

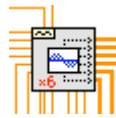


Figura 144.- Instrumento virtual de creación propia llamado *Generar_6_Ondas_Sinusoidales.vi*.

La conexión interna de este instrumento se puede ver en el diagrama de la Figura 145. Básicamente, este diagrama es igual a la parte que generaba las dos ondas de tensión en los programas para obtener el cociente de pérdidas por causa del factor de potencia, solo que ahora es necesario generar seis ondas.

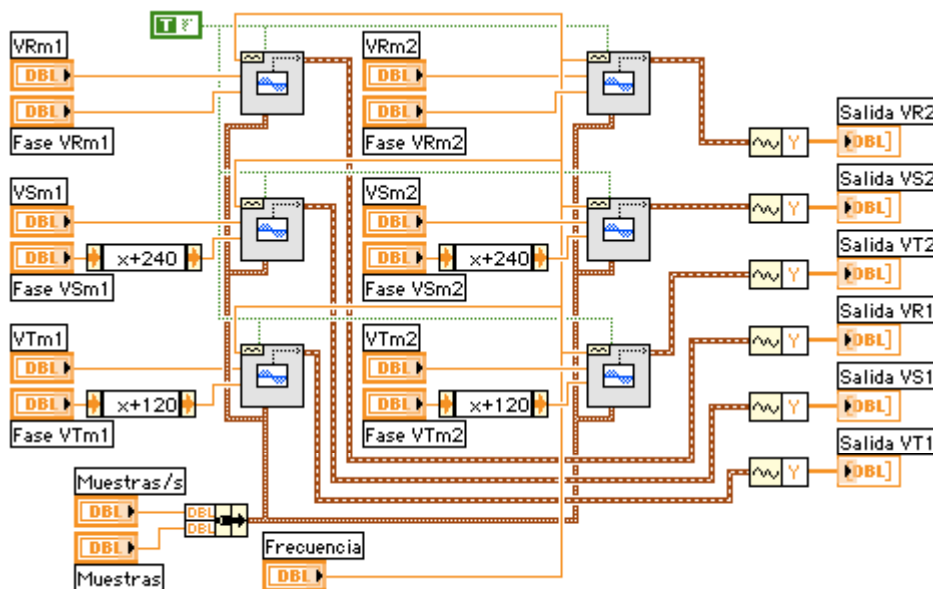


Figura 145.- Diagrama de conexiones del instrumento virtual *Generar_6_Ondas_Sinusoidales.vi*.

Tal y como se ha construido el instrumento virtual, el usuario deberá introducir los valores máximos de las ondas de tensión, antes y después de las resistencias R_R , R_S y R_T , así como sus respectivas fases iniciales. El origen de fases para cada una de las tensiones es diferente: mientras que para las tensiones de la fase R el origen de fases es el fasor $1/0^\circ$, para las de la fase S es el $1/-120^\circ$ y para las de T es $1/-240^\circ$. Esto se ha hecho así para facilitar la introducción de los datos al usuario, ya que, para simular tensiones equilibradas, bastará que introduzca en todos los campos los mismos valores (Figura 146), sin necesidad de preocuparse de a qué fase están conectados. Sin embargo, a la hora de programar, esto obliga a que a los valores de la fase S se les sumen 240° y a los de la fase T 120° .

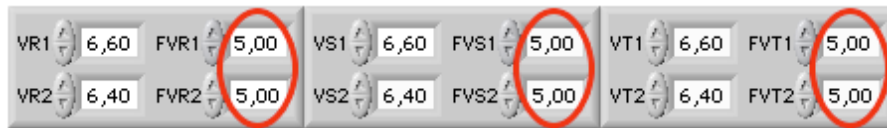


Figura 146.- Con estos valores se consigue simular una carga resistiva equilibrada (desfase nulo).

Para realizar estas operaciones se podría introducir una instrucción *suma*, junto a la constante adecuada, como se ha estado haciendo hasta ahora, pero se ha preferido optar por emplear la instrucción llamada *Nodo de Expresión* (Figura 147), que permite introducir expresiones matemáticas sencillas y que, en este caso, ocupa menos espacio que su equivalente con otros objetos.

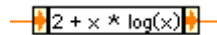


Figura 147.- Nodo de Expresión (*Expression Node*).

Como aquí lo que se busca es sumarle a la entrada, que es el valor en grados de la fase inicial que el usuario ha elegido, la constante 240, para las tensiones de la fase *S*, y 120 para las tensiones de la fase *T*, las expresiones que hay que escribir en el interior del *Nodo de Expresión* son $x + 240$, para la fase *S*, y $x + 120$, para la *T*, donde x es el nombre de la variable que este nodo usa para referirse a la entrada.

El resto de los componentes de este instrumento virtual se siguen comportando como lo hacían en los programas anteriores: al instrumento *Forma de Onda Senoidal.vi* se le pide que genere 2500 valores, con una frecuencia de muestreo de 2500 valores por segundo, de una forma de onda sinusoidal de 50 Hz y amplitud y fase inicial definidas por el usuario. También se conecta permanentemente su terminal de reinicio a una constante de valor *True*, para se pueda modificar en todo momento el valor inicial de la fase de esa onda generada. Del resultado, que es una *forma de onda* (nombre que da LabVIEW a una matriz formada por el instante de inicio de la captación de datos, el tiempo que transcurre entre muestras y, después, todos los valores medidos, uno detrás del otro), se extrae solo la matriz *Y* con los datos medidos y se lleva a una de las salidas del instrumento virtual. Estas conexiones se realizan para cada una de las seis ondas que se pretenden generar.

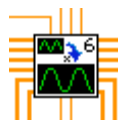


Figura 148.- Instrumento de creación propia llamado *Calibrar6canales.vi*.

El siguiente paso en el programa principal, paso que ya es independiente del método que se haya empleado para conseguir las formas de onda, consiste en calibrar cada una de las seis salidas del instrumento virtual anterior. Para ello se emplea el nuevo instrumento *Calibrar6canales.vi* (Figura 148).

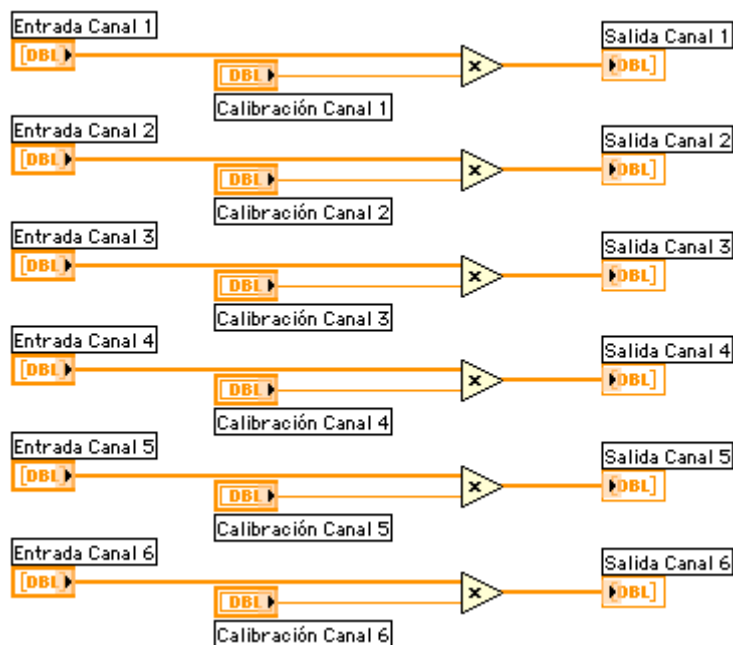


Figura 149.- Diagrama de conexiones del instrumento virtual *Calibrar6canales.vi*.

Este instrumento es una extensión del anterior *Calibrar2canales.vi*, solo que ahora se han triplicado sus entradas y salidas (Figura 149). El instrumento coge los valores que se le suministran en las seis entradas y los multiplica por el valor indicado en las variables *Calibración Canal x*, donde x es un número entre 1 y 6, antes de devolverlos por la salida.

En este punto del programa principal ya se dispone de los valores reales de las tensiones instantáneas medidas, o simuladas, antes y después de las resistencias de cada fase. El siguiente paso es obtener los valores que se necesitan para realizar la medida del cociente: el valor eficaz de la intensidad de cada fase y del hilo neutro, y el factor de potencia y el seno de los desfases entre las tensiones y las intensidades de cada fase. Para ello se ha creado el instrumento virtual llamado *Obtener_V_I_Ef_i_2Canales.vi* (Figura 150).

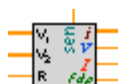


Figura 150.- Instrumento virtual de creación propia llamado *Obtener_V_I_Ef_i_2Canales.vi*.

Este instrumento es igual que *Obtener_V_I_Ef_2Canales.vi*, solo que ahora se le ha pedido también que devuelva el valor de la intensidad instantánea, a través de la *Salida Intensidad i*, y que determine el seno del desfase entre la tensión y la intensidad calculada (Figura 151).

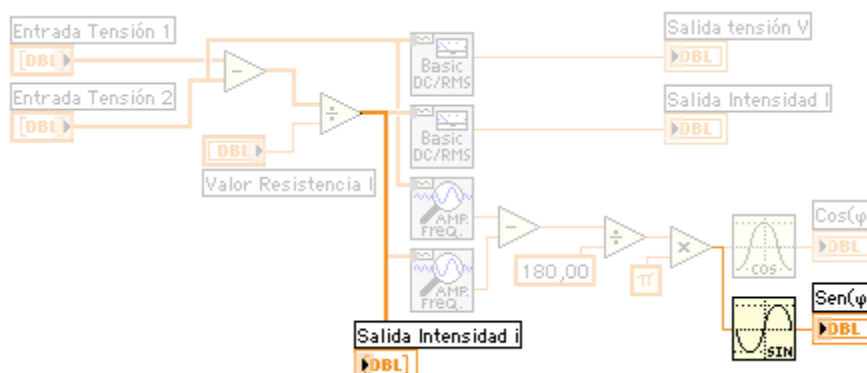


Figura 151.- Diagrama de conexiones del instrumento virtual *Obtener_V_I_Ef_i_2Canales.vi*.

El único valor que falta por determinar es el valor eficaz de la intensidad que circula por el hilo neutro. Sumando las matrices con los valores instantáneos de las intensidades de las tres fases se obtienen los valores instantáneos de la intensidad del neutro: $i_N = i_R + i_S + i_T$ (Figura 152). Para realizar la suma se ha usado la instrucción *Componer operación aritmética*, que sirve para realizar sumas, productos u otras operaciones booleanas, con dos o más elementos. Su ventaja con respecto a la instrucción suma o producto es que *Componer operación aritmética* puede realizar la operación con múltiples elementos, mientras que las otras instrucciones solo aceptan dos.

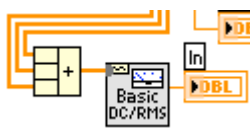


Figura 152.- Cálculo del valor eficaz de la intensidad que circula por el hilo neutro.

El último paso consiste en determinar el valor eficaz de la intensidad del neutro, para lo que se ha empleado el instrumento *CC-RMS Medio Básico.vi* ya visto.

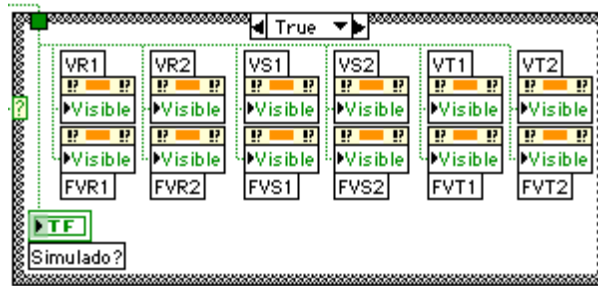


Figura 153.- Método para mostrar u ocultar los campos usados para definir las ondas simuladas.

En este fotograma también se ha programado el mostrado u ocultación de los campos que emplea el usuario para definir los valores máximos de las tensiones y sus fases iniciales (Figura 153). Así, cuando pida que se simulen las ondas el instrumento mostrará estos campos, y los ocultará cuando el usuario pida la captación de datos a través de la tarjeta, igual que hacía en programas anteriores.

Por necesidades de espacio, la parada que se realiza entre medidas para que el tiempo entre ellas sea Δt se ha pasado al último fotograma.

9.6.2.2.4. Fotograma 2

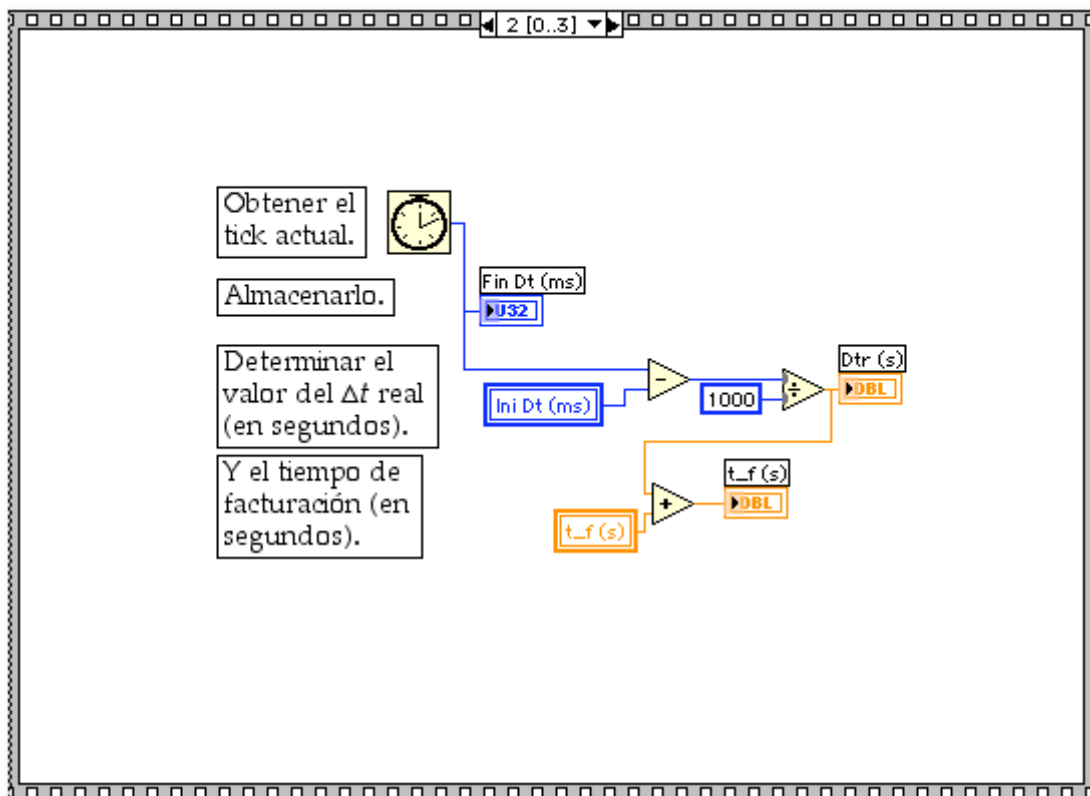


Figura 154.- *Fotograma 2* de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

Su misión es determinar los valores de Δt y del tiempo de facturación que ha transcurrido hasta ese momento.

Este fotograma no se ha modificado con respecto al programa base.

9.6.2.2.5. *Fotograma 3*

El último fotograma del programa realiza los cálculos finales y representa los resultados en la pantalla del ordenador. Además, también realiza una operación necesaria para la medida en el siguiente intervalo, e incorpora la programación de la parada necesaria para esperar entre medidas el tiempo indicado por el usuario en Δt .

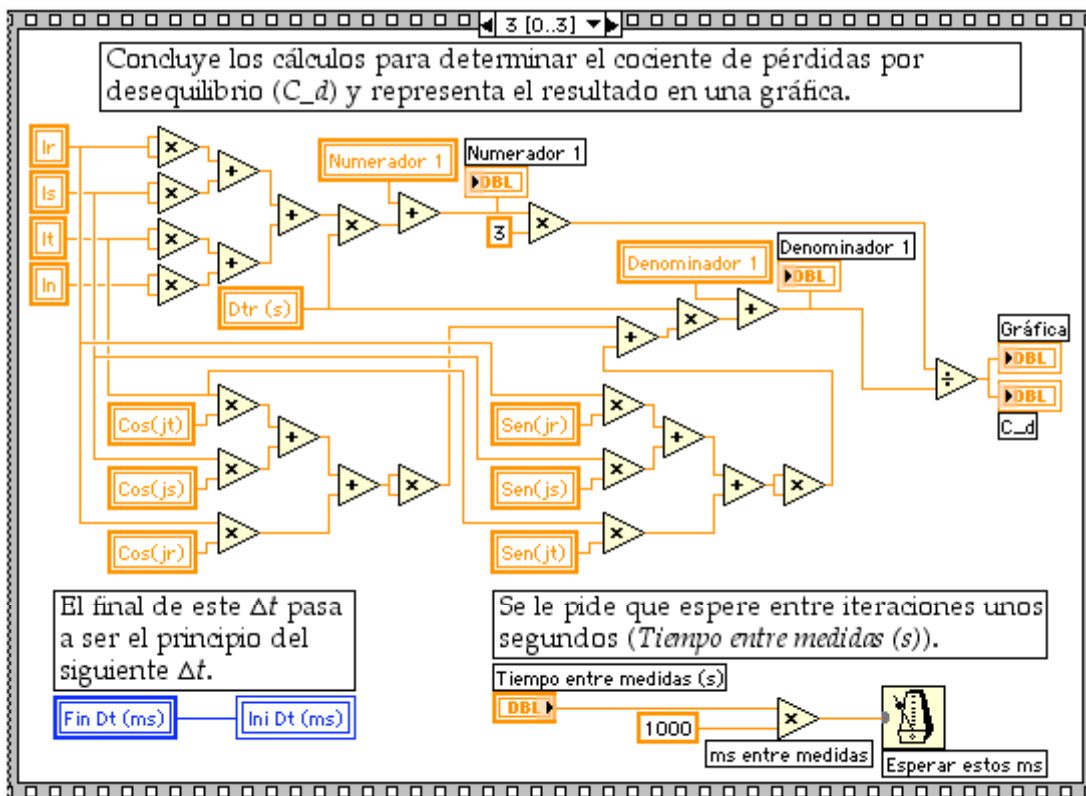


Figura 155.- *Fotograma 3* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

La parte superior del programa se dedica a terminar el cálculo del cociente

$$c_d \approx \frac{3 \sum_0^{t_i} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) \Delta t}{\sum_0^{t_i} \left[(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 + (I_R \sin \varphi_R + I_S \sin \varphi_S + I_T \sin \varphi_T)^2 \right] \Delta t}$$

Primero se calcula el numerador (Figura 156): elevando al cuadrado cada uno de los valores eficaces de las intensidades de las fases y del hilo neutro, sumándolos todos, multiplicándolos por el valor de Δt calculado en el fotograma anterior, realizando el sumatorio como ya se ha visto antes y, por último, multiplicando el resultado por 3.

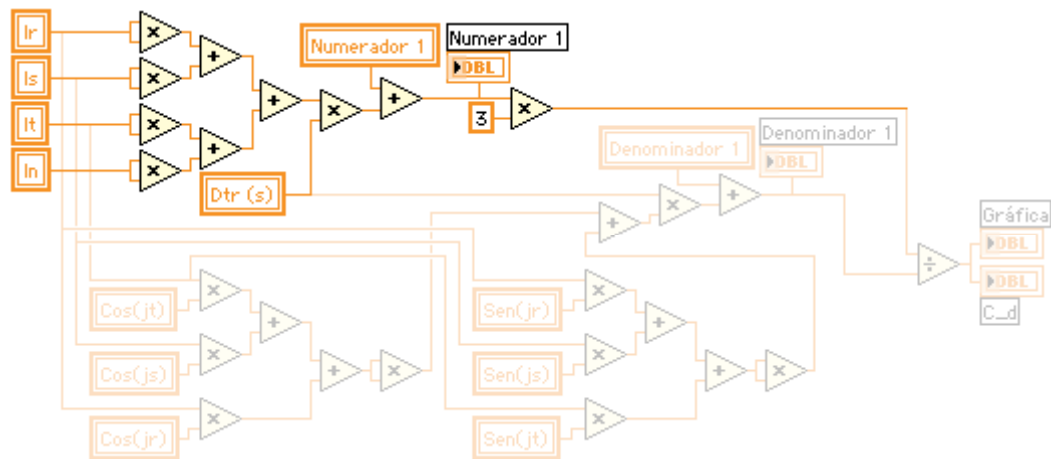


Figura 156.- Cálculo del numerador del cociente de pérdidas por desequilibrio de cargas trifásicas.

A continuación se procede a calcular el valor del denominador (Figura 157): primero se realizan los productos de cada intensidad de fase por el coseno y el seno del desfase que existe entre la tensión, entre esa fase y el hilo neutro, y esa intensidad. Después se suman todos los productos de los cosenos entre sí y lo mismo se hace con los productos de los senos. Seguidamente se elevan los dos resultados al cuadrado y se suman entre sí, obteniendo así el valor de $(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 + (I_R \sin \varphi_R + I_S \sin \varphi_S + I_T \sin \varphi_T)^2$. Ese dato se multiplica ahora por el Δt de este intervalo y se realiza el sumatorio.

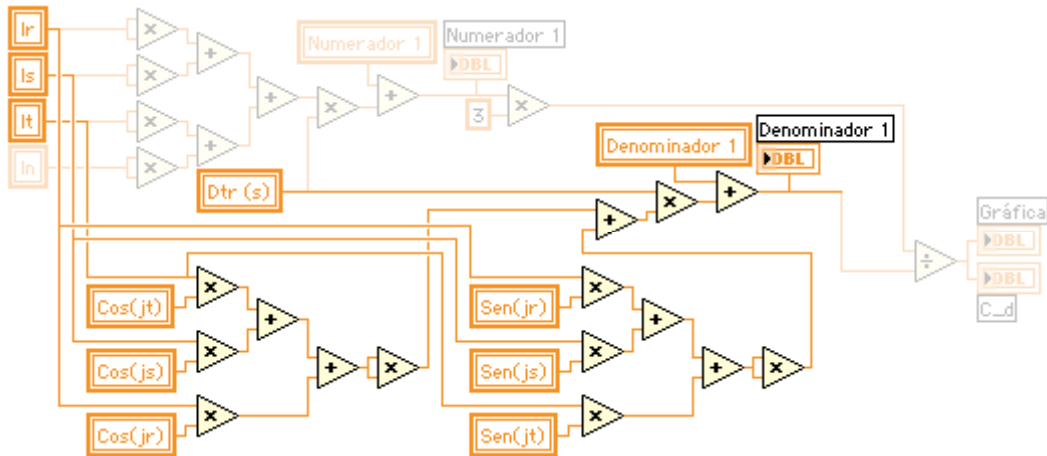


Figura 157.- Cálculo del denominador del cociente de pérdidas por desequilibrio de cargas trifásicas.

El último paso (Figura 158) consiste en dividir el numerador entre el denominador y llevar el resultado a la gráfica y al indicador que mostrará el valor de c_d .

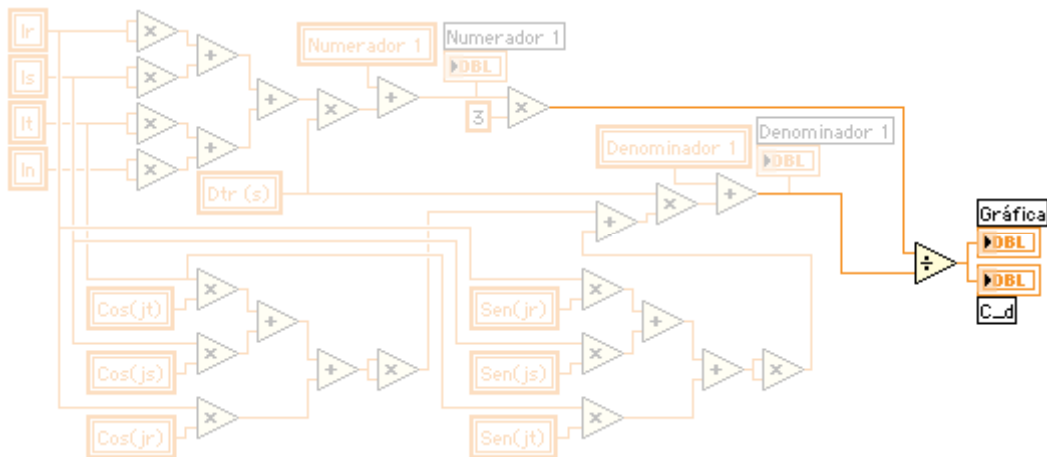


Figura 158.- Último paso para la obtención del cociente.

La última parte del programa (Figura 159) se encarga de fijar el tiempo de inicio del intervalo siguiente de medida y de realizar la parada entre medidas para asegurarse de que se espera el Δt que ha pedido el usuario. Es cierto que, al mover a este fotograma la espera entre medidas se ha hecho que el primer Δt no tenga la duración que ha pedido el usuario, pero, como ya se vio, esta diferencia entre Δt_0 e Δt no tiene ningún efecto en la medida, que es lo que realmente importa.

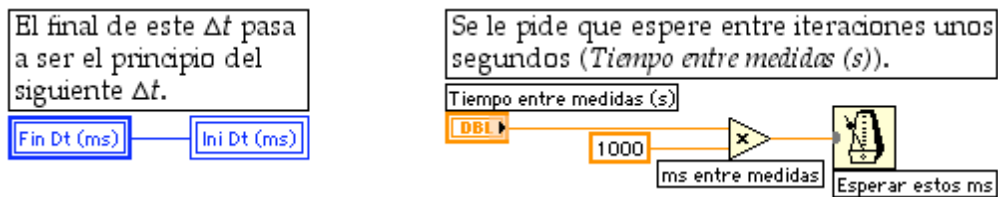


Figura 159.- Últimas acciones del fotograma 3.

Y con esto concluye la programación de este instrumento virtual, que sirve para determinar el cociente de pérdidas por desequilibrio de cargas trifásicas.

9.7. Resumen de resultados del análisis de pérdidas por desequilibrio de las intensidades de los receptores trifásicos

Carga de tres hilos

Energía mínima perdida

$$W_{pmi} = \frac{R}{3} \left(\int_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 dt + \int_0^{t_f} (I_R \text{sen} \varphi_R + I_S \text{sen} \varphi_S + I_T \text{sen} \varphi_T)^2 dt \right)$$

donde R es la resistencia total de cada fase, t_f el periodo de facturación, I_R , I_S e I_T son los valores eficaces de las intensidades de cada fase, $\cos \varphi_R$, $\cos \varphi_S$ y $\cos \varphi_T$, y $\text{sen} \varphi_R$, $\text{sen} \varphi_S$ y $\text{sen} \varphi_T$ son los cosenos y los senos de los desfases entre las tensiones simples de cada fase y sus respectivas intensidades.

Energía que realmente se pierde

$$W_p = R \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) dt$$

Cociente de pérdidas

$$c_d = \frac{W_p}{W_{pmi}}$$

Carga de cuatro hilos

Energía mínima perdida

$$W_{pmi} = \frac{R}{3} \left(\int_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 dt + \int_0^{t_f} (I_R \sin \varphi_R + I_S \sin \varphi_S + I_T \sin \varphi_T)^2 dt \right)$$

donde R es la resistencia total de cada fase, t_f el periodo de facturación, I_R , I_S e I_T son los valores eficaces de las intensidades de cada fase, $\cos \varphi_R$, $\cos \varphi_S$ y $\cos \varphi_T$, y $\sin \varphi_R$, $\sin \varphi_S$ y $\sin \varphi_T$ son los cosenos y los senos de los desfases entre las tensiones simples de cada fase y sus respectivas intensidades.

Energía que realmente se pierde

$$W_p = R \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt$$

donde I_N es el valor eficaz de la intensidad del hilo neutro.

Cociente de pérdidas

$$c_d = \frac{W_p}{W_{pmi}}$$

10. Energía que se pierde en el sistema eléctrico por deformación de la onda de intensidad de los receptores

La potencia eléctrica instantánea que absorbe un receptor de dos terminales es el producto de su tensión instantánea por su intensidad instantánea: $p = vi$. Como ya se ha dicho, siempre que un receptor absorbe potencia eléctrica de un sistema eléctrico provoca pérdida de potencia en la resistencia de ese sistema eléctrico. Veremos que una de las causas de esa pérdida de potencia es que la forma de la onda de la intensidad que circula por el receptor no coincida con la forma de la onda de la tensión entre sus terminales. Esta situación se llama *deformación de la onda de intensidad*. Investigar la manera de evaluar la potencia y la energía que se pierden en la resistencia del sistema eléctrico por esta causa, y crear una forma de medirlas es el objetivo de este capítulo. Además, como para las causas de pérdida de energía ya consideradas en esta memoria, crearemos un cociente de pérdidas de energía que compare la energía que se pierde durante el periodo de facturación, con la que se perdería si la deformación de la onda de intensidad no existiera, es decir, con la energía que se pierde cuando esta causa de pérdidas desaparece.

Aunque se podrían considerar sistemas eléctricos con diferentes formas de las ondas de tensión e intensidad, limitaremos el estudio a los sistemas sinusoidales, que son los que, de forma general, se utilizan para la entrega de energía eléctrica. Al final del capítulo se estudiarán los sistemas de corriente continua, que, aunque solo sea parcialmente, también se emplean para la entrega de energía en ciertas instalaciones, algunas de gran potencia y extensión.

10.1. Incremento de la energía que se pierde en un sistema eléctrico sinusoidal por deformación de la onda de intensidad de los receptores

10.1.1. Introducción

Una red eléctrica en la que las tensiones de régimen permanente entre dos puntos cualesquiera y las intensidades de régimen permanente de todas sus ramas son funciones sinusoidales del tiempo de la misma frecuencia, se llama *red sinusoidal*. La frecuencia común de todas las tensiones e intensidades se llama *frecuencia de la red sinusoidal* o, simplemente, *frecuencia de la red*. Una red cuyas ramas solo consten de resistencias, inductancias y capacidades, con fuentes de tensión e intensidad de la misma frecuencia, es una red sinusoidal [8].

Un receptor sinusoidal es el receptor eléctrico en el que, siempre que los potenciales de sus terminales sean funciones sinusoidales del tiempo de la misma frecuencia, las intensidades de régimen permanente de esos terminales son también funciones sinusoidales de esa misma frecuencia [8].

Los generadores de los sistemas eléctricos de potencia son, en su mayoría, alternadores¹⁵. Un alternador es un generador eléctrico rotativo destinado a producir fuerzas electromotrices que sean funciones sinusoidales del tiempo [58][88]. Como todos los alternadores de cada sistema eléctrico producen fuerzas electromotrices sinusoidales de la misma frecuencia, la tensión de cada receptor resulta también, muy aproximadamente, sinusoidal de esa frecuencia [56]. Esta afirmación es consecuencia de que la suma de funciones sinusoidales de la misma frecuencia da siempre funciones de esa frecuencia. En la Figura 160 se muestran ejemplos gráficos. También la derivación y la integración de funciones sinusoidales, y la multiplicación por un escalar, dan funciones sinusoidales de la misma frecuencia [56].

Muchos receptores pasivos de los sistemas eléctricos de potencia quedan bien descritos por medio de resistencias, inductancias y

¹⁵ No todos los generadores de los sistemas eléctricos de potencia son alternadores. Como mínimo se pueden citar, por ejemplo, los inversores de las plantas fotovoltaicas.

capacidades. Y muchos receptores activos y generadores se describen por medio de esos mismos dipolos y fuentes de tensión sinusoidales de la misma frecuencia. Esta es la razón de que los sistemas eléctricos de potencia funcionen aproximadamente como redes sinusoidales.

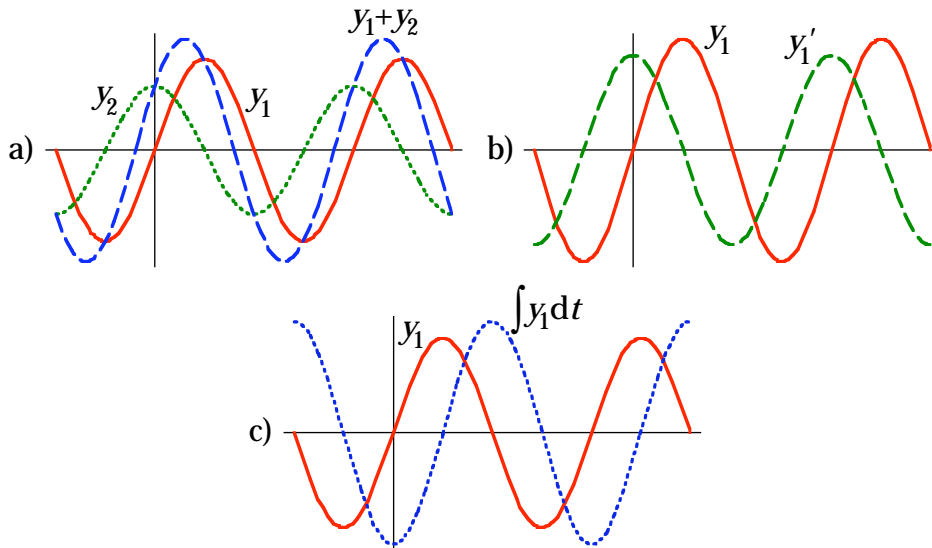


Figura 160.- Aquí $y_1 = A_m \text{sen}(\omega t)$ e $y_2 = B_m \text{sen}(\omega t + \varphi)$. Se aprecia que a) la suma, b) la derivada y c) la integral de funciones sinusoidales de la misma frecuencia es otra función sinusoidal de esa frecuencia.

Pero hay receptores conectados al sistema eléctrico cuya intensidad permanente no es sinusoidal cuando su tensión sí lo es. Se dice de ellos que deforman la onda de intensidad. Entonces el desarrollo de Fourier de esta onda de intensidad, además del término fundamental, contiene armónicos. También, si el valor medio de la intensidad no es cero, el desarrollo contiene un término independiente del tiempo, que coincide con ese valor medio.

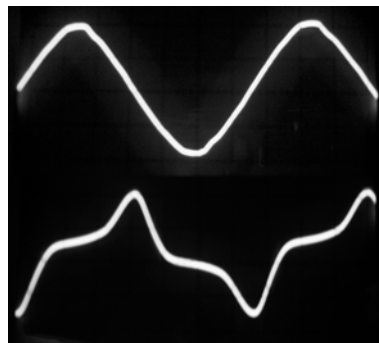


Figura 161.- Fotografía obtenida por el autor de la onda de intensidad del primario de un transformador en vacío cuando se le aplica una tensión sinusoidal.

Debido a la impedancia de los elementos del sistema eléctrico anteriores al receptor, por los que circula la intensidad del receptor, la onda de tensión del receptor también se deforma. Sin embargo, esa impedancia del sistema eléctrico es, en los sistemas de energía eléctrica, mucho menor que la de los receptores, por lo que la deformación de la onda de tensión por causa de la intensidad no sinusoidal del receptor suele ser tan pequeña, que la tensión en los terminales de los receptores puede considerarse sinusoidal para los balances energéticos como los que se harán aquí.

La Figura 161 es una fotografía de la pantalla de un osciloscopio, obtenida con el fin de aclarar la última afirmación. La parte superior es la onda de la tensión de alimentación de un transformador en vacío, y la parte inferior es la onda de la intensidad del primario, visualizadas ambas en nuestro laboratorio con un osciloscopio analógico de doble traza. Se ve que, a pesar de que la onda de intensidad dista mucho de ser sinusoidal, la onda de tensión aparece prácticamente sinusoidal.

En lo que sigue trataremos de ver la influencia sobre la potencia que se pierde en un sistema eléctrico sinusoidal cuando se produce una situación similar a la que se ha descrito, es decir, tensiones sinusoidales en los terminales de los receptores, pero intensidades deformadas, intensidades no sinusoidales que entran al receptor o salen de él por esos mismos terminales. Como se ha dicho, esta situación se aproxima mucho al comportamiento real de los receptores de potencia conectados al sistema eléctrico general. Como aproximación inicial al tema, comenzaremos con un ejemplo sencillo, aunque suficientemente representativo.

10.1.2. Intensidad rectificada de media onda

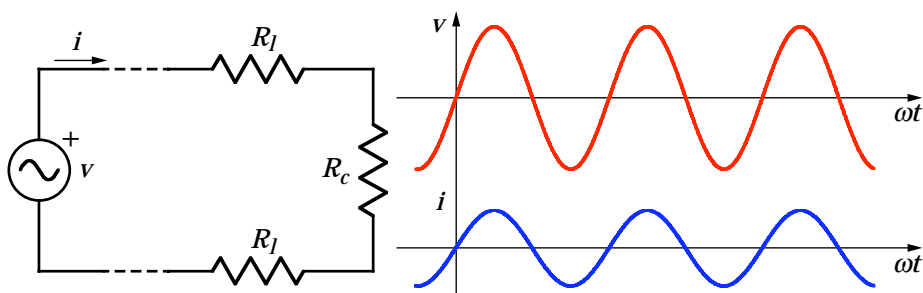


Figura 162.- Carga conectada a un generador por medio de dos hilos de resistencia R_l .

Supóngase una fuente de tensión sinusoidal de valor $v = V_m \text{sen}(\omega t)$. Como se trata de una fuente de tensión, la onda de tensión sinusoidal de la fuente permanece indeformada cualquiera que sea la intensidad por ella. En la Figura 162 se muestra esa fuente conectada a una resistencia de carga, R_c , por medio de una línea de resistencia R_l en cada hilo. Supondremos que R_l es mucho menor que R_c ($R_l \ll R_c$), por lo que la tensión en R_c será aproximadamente igual a v . Con estas hipótesis, en régimen permanente la intensidad es sinusoidal

$$i = I_m \text{sen}(\omega t) \approx \frac{V_m}{R_c} \text{sen}(\omega t)$$

de valor eficaz

$$I = \frac{V_m}{\sqrt{2}R_c}$$

La potencia activa que entrega la fuente a R_c es

$$P = R_c I^2 = R_c \frac{V_m^2}{2R_c^2} = \frac{V_m^2}{2R_c}$$

Y el valor medio de la potencia que se pierde en la línea que une la fuente con la resistencia es

$$P_p = 2R_l I^2 = R_l \frac{V_m^2}{R_c^2} \quad (10.1)$$

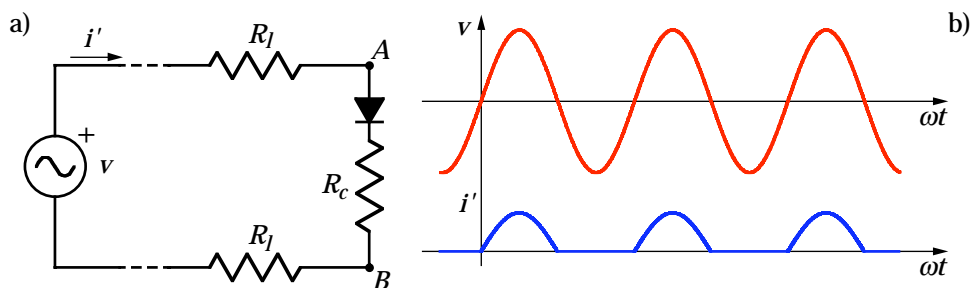


Figura 163.- a) Rectificador monofásico de media onda. b) Sus ondas de tensión e intensidad.

En la Figura 163 se ha intercalado un diodo, que supondremos ideal, entre la fuente y la resistencia de carga del circuito de la Figura 162, con el único fin de crear un receptor distinto, el formado por el diodo en serie con la resistencia R_c , es decir, el receptor de terminales A y B . Este

receptor deforma la onda de intensidad respecto a la senoide inicial. La intensidad es ahora una función rectificadora de media onda. Esta intensidad, I , está representada en la parte inferior de la Figura 163 b). El valor eficaz de esa intensidad es [56]

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} I_m^2 \sin^2(\omega t) dt + \int_{T/2}^T 0^2 dt \right)} = \frac{I_m}{2} = \frac{V_m}{2R_c} \quad (10.2)$$

Donde $I_m = V_m/R_c$.

La potencia que entrega ahora la fuente a R_c es

$$P = R_c I^2 = R_c \left(\frac{I_m}{2} \right)^2 = R_c \left(\frac{V_m}{2R_c} \right)^2 = \frac{V_m^2}{4R_c} = \frac{P}{2} \quad (10.3)$$

la mitad de la potencia que absorbe R_c en la Figura 162. La potencia que se pierde en la resistencia de la línea es ahora

$$P_p = 2R_l I^2 = 2R_l \left(\frac{I_m}{2} \right)^2 = 2R_l \left(\frac{V_m}{2R_c} \right)^2 = R_l \frac{V_m^2}{2R_c^2} = \frac{P_p}{2} \quad (10.4)$$

De lo anterior se deduce que, aunque la tensión sinusoidal permanezca indeformada, la deformación de la onda de intensidad a que ha dado lugar el receptor produce, en este caso, dos efectos: por una parte disminuye la potencia que se entrega a la carga, que en el circuito de la Figura 163 es la mitad que la potencia que se entrega en el circuito de la Figura 162 y, además, modifica la potencia que se pierde en la línea, que también resulta ser la mitad de la que se pierde en el circuito de la Figura 162. Estos dos efectos indican dos caminos de estudio de la influencia de los receptores que se conectan a un mismo punto del sistema eléctrico. Uno es ver cómo afectan sus características a la potencia que absorben, y otro, cómo estas características influyen en la potencia que se pierde en el sistema eléctrico. El objetivo en todo este trabajo es el segundo, porque, como se ha venido haciendo, se trata de comparar la potencia que hacen perder en el sistema eléctrico receptores que absorban del sistema la misma potencia, y relacionarla con sus características.

En este caso concreto, la forma de comparar la potencia que se pierde en la línea en los dos casos, en el de onda de intensidad no deformada y onda deformada, va a consistir por eso en exigir que las potencias entregadas en ambos casos al receptor sean iguales, y se compararán entonces las potencias que se pierden en la línea. Es decir, se verá cuál es la potencia que se pierde en la línea si se entrega una potencia con el

mismo valor medio, primero con una onda de intensidad sinusoidal, y después con una onda rectificada.

Para conseguir que la potencia que absorbe el receptor en el segundo caso sea igual que en el primer caso ha de ocurrir que su resistencia, que llamaremos ahora R'_c , sea la mitad de la resistencia del circuito de la Figura 162. Es decir,

$$R'_c = \frac{R_c}{2}$$

Para ese receptor la (10.3) se transforma en

$$P'' = \frac{V_m^2}{4R'_c} = \frac{V_m^2}{4\frac{R_c}{2}} = \frac{V_m^2}{2R_c} = P$$

O sea, con ese valor de su resistencia, el receptor de la Figura 163, absorbe la misma potencia que el de la Figura 162 al ser conectado al mismo sistema eléctrico, pero deforma la onda de intensidad, mientras que no lo hace el de la Figura 162. El valor eficaz (10.2) de la intensidad deformada del receptor de la Figura 163 resulta ahora

$$I'' = \frac{V_m}{2R'_c} = \frac{V_m}{2\frac{R_c}{2}} = \frac{V_m}{R_c}$$

y la potencia que se pierde en la línea, (10.4), se transforma en

$$P'_p = R_l \frac{V_m^2}{2R'_c{}^2} = R_l \frac{V_m^2}{2\left(\frac{R_c}{2}\right)^2} = 2R_l \frac{V_m^2}{R_c^2} = 2P_p$$

Es decir, *si con tensión sinusoidal y una intensidad rectificada de media onda se entrega a un receptor la misma potencia que con intensidad sinusoidal, se duplica la potencia que se pierde en la línea.*

Este es un caso particular, un ejemplo, en el que aparece claro que la deformación de la onda de intensidad incrementa las pérdidas en el sistema eléctrico respecto a las que se producen con onda de intensidad sinusoidal. La pregunta que habría que hacer ahora es: ¿siempre que hay deformación de la onda de intensidad se incrementan estas pérdidas? ¿Pueden evaluarse estas pérdidas de una manera general? Como se verá en seguida, la respuesta a las dos preguntas es afirmativa y la suministra, de una manera muy general, el análisis de Fourier. Se sintetizan a

continuación aquellas partes de este análisis que se utilizarán más adelante.

10.1.3. Síntesis del análisis de Fourier

Si $f(t)$ es una función periódica de período T que cumple las *condiciones de Dirichlet*¹⁶, entonces, para todo t en que $f(t)$ es continua, se cumple que [56]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \operatorname{sen}(n\omega t + \theta_n)$$

El segundo miembro se llama *desarrollo de Fourier* de la función $f(t)$. El término a_0 es el valor medio de $f(t)$ en un período, y se llama *término independiente*. Los coeficientes a_0 y c_n se llaman *coeficientes de Fourier*. Cada término $c_n \operatorname{sen}(n\omega t + \theta_n)$ se llama *armónico n* de la función, y el primer armónico, en el que $n = 1$, se llama también *término fundamental* del desarrollo de Fourier de la función.

Si se conoce la función $f(t)$ se pueden determinar sus coeficientes de Fourier. Incluso si de la función $f(t)$ solo se conoce su gráfica, hay procedimientos para obtener esos coeficientes y, por tanto, el desarrollo de Fourier de la función [56].

Conocidos los coeficientes del desarrollo, el valor eficaz F de la función $f(t)$ vale

$$F = \sqrt{a_0^2 + c_{1f}^2 + c_{2f}^2 + c_{3f}^2 + \dots} = \sqrt{a_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} c_{nf}^2}$$

donde c_{nf} es el valor eficaz del armónico n , es decir

$$c_{nf} = \frac{c_n}{\sqrt{2}}$$

¹⁶ Estas condiciones son que $f(t)$ sea continua a trozos en el periodo, que su valor medio en el periodo sea finito, y que tenga un número finito de máximos y mínimos en el periodo.

Si v es la tensión periódica de un dipolo e i su intensidad, sus desarrollos de Fourier respectivos son

$$v = \bar{V} + \sum_{n=1}^{\infty} V_{nm} \operatorname{sen}(n\omega t + \theta_n)$$

$$i = \bar{I} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \operatorname{sen}(n\omega t + \theta_n - \varphi_n)$$

donde \bar{V} e \bar{I} son los valores medios de la tensión e intensidad, respectivamente, V_{nm} e I_{nm} son los valores máximos de los armónicos n respectivos, φ_n la diferencia de fase entre el armónico n de la tensión y el armónico n de la intensidad, y θ_n es la fase inicial de cada armónico.

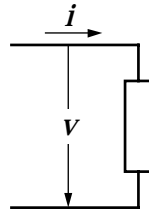


Figura 164.- Si $v = \bar{V} + \sum_{n=1}^{\infty} V_{nm} \operatorname{sen}(n\omega t + \theta_n)$ e

$$i = \bar{I} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \operatorname{sen}(n\omega t + \theta_n - \varphi_n), \text{ el valor medio de la potencia}$$

$$\text{que absorbe el dipolo vale } P = \bar{V}\bar{I} + \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\varphi_n).$$

En función de los términos del desarrollo, el valor medio de la potencia que absorbe ese dipolo vale [56]

$$P = \bar{V}\bar{I} + \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\varphi_n) \quad (10.5)$$

donde $V_n = V_{nm}/\sqrt{2}$ es el valor eficaz del armónico n de la tensión, e $I_n = I_{nm}/\sqrt{2}$ el valor eficaz del armónico n de la intensidad. La fórmula (10.5) pone de manifiesto que *si existe el armónico h de la intensidad, y no*

existe el correspondiente armónico h de la tensión, estos dos armónicos h no entregan potencia al receptor, pues su producto es cero¹⁷.

10.1.4. Potencia que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico debida a la deformación de la onda de intensidad de un receptor monofásico

Si la tensión de un receptor monofásico se mantiene sinusoidal, pero su onda de intensidad no es sinusoidal, el desarrollo de Fourier de la tensión solo contiene el término fundamental

$$v = V_m \text{sen}(\omega t)$$

y, en general, el desarrollo de Fourier de la onda de intensidad es

$$i = \bar{I} + I_{1m} \text{sen}(\omega t + \theta - \varphi) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nm} \text{sen}(n\omega t + \theta_n) \quad (10.6)$$

donde $I_{1m} \text{sen}(\omega t + \theta - \varphi)$ es el término fundamental de la intensidad, y φ la diferencia de fase entre el término fundamental de la tensión y el término fundamental de la intensidad.

Como la tensión carece de valor medio y de armónicos, excepto el término fundamental, según (10.5), la potencia activa que absorbe el receptor es

$$P = VI_1 \cos(\varphi)$$

donde V e I_1 son los valores eficaces de los términos fundamentales de la tensión y de la intensidad. Este hecho se expresará diciendo que solo el término fundamental entrega potencia al dipolo.

Si es R la resistencia del dipolo de Thévenin equivalente por el que puede aproximarse el sistema eléctrico, la potencia activa que se pierde en la línea es

$$P_p = RI^2 = R\left(\bar{I}^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots\right) = R\left(\bar{I}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2\right) \quad (10.7)$$

¹⁷ Que no exista el armónico h de la intensidad significa que su valor máximo, y, por tanto, su valor eficaz, son nulos: $I_{hm} = I_h = 0$.

Resulta por tanto, de forma general, que los armónicos de la intensidad distintos del término fundamental no contribuyen a entregar potencia al receptor, pero sí a la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico.

10.1.4.1. Incremento de potencia que se pierde por deformación de la onda de intensidad de un receptor monofásico

La intensidad sinusoidal que entrega al receptor la misma potencia activa que la onda deformada anterior (10.6) es la intensidad que es igual al término fundamental

$$i_1 = I_{1m} \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

Para esta intensidad, la potencia que se pierde en la línea monofásica es

$$P_{pmi} = RI_1^2$$

Por tanto, (10.7) se puede poner como

$$\begin{aligned} P_p &= R(\bar{I}^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots) = RI_1^2 + R(\bar{I}^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots) = \\ &= RI_1^2 + RI_a^2 = P_{pmi} + RI_a^2 = P_{pmi} + \Delta P_p \end{aligned} \quad (10.8)$$

donde

$$I_a^2 = \bar{I}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2$$

es la suma del cuadrado del valor medio de la función más los cuadrados de los valores eficaces de todos los armónicos excluido el término fundamental, que coincide con el cuadrado del valor eficaz de $i_a = i - i_1$.

Es decir, (10.8) muestra que la potencia que se pierde a causa de una onda de intensidad deformada es siempre igual a la que se pierde cuando la onda es sinusoidal más el término

$$\Delta P_p = RI_a^2 \quad (10.9)$$

que solo es nulo cuando la intensidad no tiene armónicos y su valor medio vale cero. El término ΔP_p se llamará *incremento de la potencia que se pierde por deformación de la onda de intensidad*. Como ΔP_p siempre es un número

real positivo, de (10.8) se obtiene que $P_{pmi} \leq P_p$. Es decir, *en todos los casos, una onda de intensidad deformada produce más pérdidas en el sistema eléctrico que la onda de intensidad no deformada* si ambas entregan el mismo valor medio de la potencia al receptor. Esta es también una razón importante para tratar de eliminar los armónicos de la intensidad.

10.1.4.2. Cociente de pérdida de potencia por deformación de la onda de intensidad de un receptor monofásico

ΔP_p mide el incremento absoluto de las pérdidas de potencia debido a la deformación de la onda de intensidad. Se crea ahora también un indicador relativo, que se llamará *cociente de pérdida de potencia por deformación de la onda de intensidad*, definido como el cociente entre la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por causa de un receptor monofásico, y la que se perdería si la intensidad de ese receptor fuera igual al término fundamental de la intensidad, es decir

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{P_{pmi} + \Delta P_p}{P_{pmi}} = 1 + \frac{\Delta P_p}{P_{pmi}} = 1 + \frac{RI_a^2}{RI_1^2} = 1 + \frac{I_a^2}{I_1^2} \quad (10.10)$$

Se ve que $\frac{P_p}{P_{pmi}} \geq 1$. Si solo existe término fundamental, o sea, si el

valor medio es nulo y no hay armónicos, $I_a^2 = 0$, y entonces (10.9) muestra que el incremento de la potencia perdida por deformación de la onda de intensidad vale $\Delta P_p = 0$ y de (10.10) se obtiene que $c_{Pa} = 1$. A medida que crece I_a^2 por deformación de la onda de intensidad, crece ΔP_p y también crece el cociente de pérdidas c_{Pa} debido a que lo hace el sumando I_a^2/I_1^2 . Por tanto, cada una de las siguientes condiciones es condición suficiente de mínima pérdida de potencia por deformación de la onda de intensidad, y todas estas condiciones son equivalentes entre sí: a) $\Delta P_p = 0$, b) $I_a^2 = 0$, c)

$I_a^2/I_1^2 = 0$, d) $\frac{P_p}{P_{pmi}} = 1$. Se recuadran estas condiciones en la Tabla 5.

$$\Delta P_p = 0 \quad | \quad I_a^2/I_1^2 = 0$$

$$I_a^2 = 0 \quad \left| \quad \frac{P_p}{P_{pmi}} = 1 \right.$$

Tabla 5.- Condiciones equivalentes de mínima potencia que se pierde en la resistencia de un sistema monofásico por deformación de la onda de intensidad respecto a la sinusoidal. Cada una es condición suficiente de mínima potencia perdida.

10.1.4.3. Aplicación a una intensidad rectificada de media onda

Si se aplica este método general de análisis al ejemplo particular con el que comenzó el capítulo, representado en la Figura 163 (página 249), se verá que los resultados son idénticos a los allí obtenidos. En efecto, la resistencia del dipolo de Thévenin equivalente del dipolo a la izquierda de AB en el circuito de la Figura 163 es $R = 2R_l$, y el desarrollo de Fourier de la intensidad rectificada de media onda es [56]

$$i' = \frac{I'_m}{\pi} + \frac{I'_m}{2} \operatorname{sen}(\omega t) - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2I'_m}{\left((2k)^2 - 1\right)\pi} \cos(2k\omega t)$$

con la intensidad máxima I'_m igual a V_m/R'_c . Se tiene, por tanto:

$$\begin{aligned} P'_p &= 2R_l \left(\left(\frac{I'_m}{\pi} \right)^2 + \left(\frac{I'_m}{2\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{2I'_m}{3\pi\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{2I'_m}{15\pi\sqrt{2}} \right)^2 + \dots \right) = \\ &= 2R_l \frac{I_m'^2}{4 \times 2} + 2R_l \left(\frac{I_m'^2}{\pi^2} + \frac{4I_m'^2}{3^2 \times 2\pi^2} + \frac{4I_m'^2}{15^2 \times 2\pi^2} + \dots \right) = P_p + \Delta P_p \end{aligned}$$

donde se puede ver que

$$P_p = \frac{R_l I_m'^2}{4} = R_l \frac{V_m^2}{4R_c'^2} = R_l \frac{V_m^2}{R_c^2}$$

o sea, que es igual a la potencia P_p dada por (10.1), que es la perdida por la onda sinusoidal. Además

$$c_{Pa} = 1 + \frac{\Delta P_p}{P_p} = 1 + \frac{2R_l \left(\frac{I_m'^2}{\pi^2} + \frac{4I_m'^2}{3^2 \times 2\pi^2} + \frac{4I_m'^2}{15^2 \times 2\pi^2} + \dots \right)}{2R_l \frac{I_m'^2}{4 \times 2}} =$$

$$\begin{aligned}
&= 1 + \frac{\frac{1}{\pi^2} + \frac{4}{3^2 \times 2\pi^2} + \frac{4}{15^2 \times 2\pi^2} + \dots}{\frac{1}{4 \times 2}} = \\
&= 1 + \frac{8}{\pi^2} + \frac{32}{2\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{((2k)^2 - 1)^2} = 2 \quad (10.11)
\end{aligned}$$

Que son los mismos resultados obtenidos más arriba con el análisis particular¹⁸.

10.1.4.4. Cociente de pérdida de energía por deformación de la onda de intensidad de un receptor monofásico

La energía que se pierde en la resistencia del sistema durante el periodo de facturación es

$$W_p = \int_0^{t_f} P_p dt = R \int_0^{t_f} I^2 dt$$

I es el valor eficaz de la intensidad.

La energía que se pierde si la onda de intensidad no estuviera deformada es

$$W_{pmi} = \int_0^{t_f} P_{pmi} dt = R \int_0^{t_f} I_1^2 dt$$

I_1 es el valor eficaz del término fundamental de la intensidad.

Se llama cociente de pérdida de energía por deformación de la onda de intensidad durante el periodo de facturación a la relación

$$c_a = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{\int_0^{t_f} I^2 dt}{\int_0^{t_f} I_1^2 dt} \quad (10.12)$$

$c_a \geq 1$. En el caso óptimo de que el desarrollo de Fourier de la intensidad solo conste del término fundamental, $I = I_1$, y $c_a = 1$.

¹⁸ El resultado (10.11) se obtiene ejecutando en el programa informático Mathematica la instrucción $N[1 + \frac{8}{\pi^2} + \frac{32}{2\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{((2k)^2 - 1)^2}]$.

10.1.4.5. Medida del cociente de pérdidas de energía por deformación de la onda de intensidad de cargas monofásicas

Se trata de obtener el valor de c_a durante el periodo de facturación t_f . Para ello, durante cada intervalo de tiempo Δt , se captan muestras a través de una tarjeta de adquisición de datos para poder obtener la onda de intensidad i de la carga. Con la programación adecuada de LabVIEW se obtiene el valor eficaz I de esa intensidad y el valor eficaz I_1 del término fundamental de su desarrollo de Fourier. El programa debe calcular a continuación el producto $I^2 \Delta t$ y sumarlo a la suma de los productos anteriores similares a él que se han debido hallar desde el comienzo del periodo de facturación. De forma parecida, el programa debe hacer el producto $I_1^2 \Delta t$ y sumarlo a la suma de los productos anteriores similares a él que se han venido calculando también desde el comienzo del periodo de facturación. Solo falta hacer la división

$$c_a \approx \frac{\sum_0^{t_r} I^2 \Delta t}{\sum_0^{t_r} I_1^2 \Delta t} \quad (10.13)$$

cuyo resultado es el cociente de pérdida de energía por deformación de la onda de intensidad para esa carga monofásica. El valor de c_a obtenido de esta manera es más aproximado cuanto menor sea cada intervalo de tiempo Δt . Pero, por otra parte, Δt debe ser de suficiente duración como para poder obtener varios ciclos de la intensidad y poder hallar así con precisión su valor eficaz y su desarrollo de Fourier. No obstante, si se tiene en cuenta que el periodo que corresponde a la frecuencia de 50 Hz del sistema eléctrico es 2 cs, con valores de Δt de 40 cs o más se cumplen ampliamente todas las exigencias. Para mayor seguridad, en los programas que se han confeccionado Δt nunca puede ser menor que 1.5 segundos.

10.1.4.6. Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas de energía por deformación de la onda de intensidad de cargas monofásicas

En la Figura 165 se muestra la red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas de energía por deformación de la onda de intensidad de cargas monofásicas. Como se ve, se trata de captar permanentemente solo la onda de la intensidad de la carga [6]. A partir de ella, una programación adecuada en LabVIEW realiza la operación (10.13) y obtiene el cociente c_a .

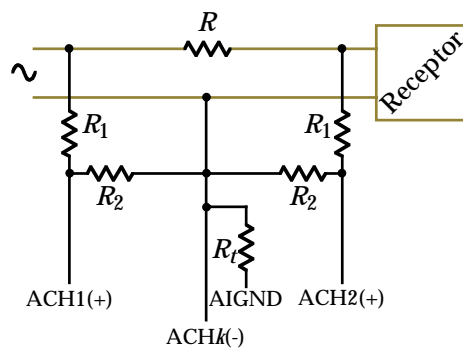


Figura 165.- Red de adecuación de señales para medir el cociente de pérdidas de energía por deformación de la onda de intensidad de cargas monofásicas.

10.1.4.7. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas de energía por deformación de la onda de intensidad de cargas monofásicas

Este programa calcula y representa en la pantalla del ordenador el cociente de pérdidas por deformación de la onda de intensidad de una carga monofásica en un sistema sinusoidal. Para poder hacerlo, se comunicará con la tarjeta de captación de datos instalada en el ordenador o simulará una captación de medidas.

El instrumento virtual está basado en el que se creó para calcular el cociente de pérdidas por consumo de potencia de una carga monofásica en un sistema sinusoidal.

10.1.4.7.1. Panel frontal

El panel frontal del instrumento (Figura 166) está formado por cinco zonas bien diferenciadas:

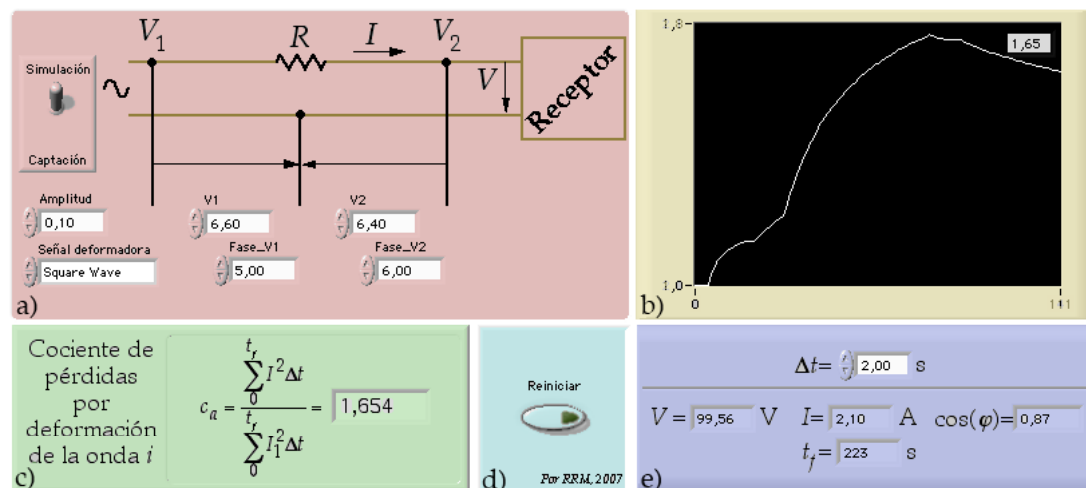


Figura 166.- Zonas en que está dividido el panel frontal del instrumento virtual.

- La zona a) muestra el esquema del circuito con las dos tensiones que se van a captar o a simular. A la izquierda del esquema está el interruptor *Simulación/Captación*, y debajo de él están los cuatro campos que permiten definir las ondas si se opta por simularlas. Debajo del interruptor hay dos nuevos campos que sirven para definir la amplitud y la forma de la onda deformadora que se sumará a la intensidad.
- La zona b) muestra la evolución del cociente de pérdidas por consumo de potencia a lo largo del tiempo y el último valor representado.
- En la zona c) se indica que se está calculando el *Cociente de pérdidas por deformación de la onda de intensidad*, se muestra la ecuación empleada para hallarlo y el valor actual del cociente.
- En d) se encuentra el botón de reinicio del instrumento, para volver a iniciar el periodo de facturación.
- Por último, e) muestra Δt , el valor eficaz de la tensión actual del receptor en voltios, V , el valor eficaz de la intensidad que circula por la carga en amperios, I , el factor de potencia de la carga, $\cos(\varphi)$, y t_f , que es el tiempo de facturación, en segundos.

También, fuera de la zona que ve el usuario están los resultados poco importantes pero necesarios para realizar el cálculo del cociente.

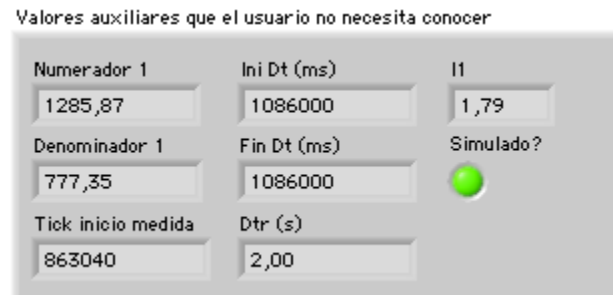


Figura 167.- Otros resultados de escaso interés para el usuario, pero necesarios para el programa, permanecen ocultos a su vista.

10.1.4.7.2. Diagrama de conexiones

A continuación se explica el código fuente de este instrumento virtual.

10.1.4.7.2.1. Estructura principal

El programa está formado, como todos los anteriores, por cuatro *fotogramas* incluidos en una *estructura secuencial*.

10.1.4.7.2.2. Fotograma 0

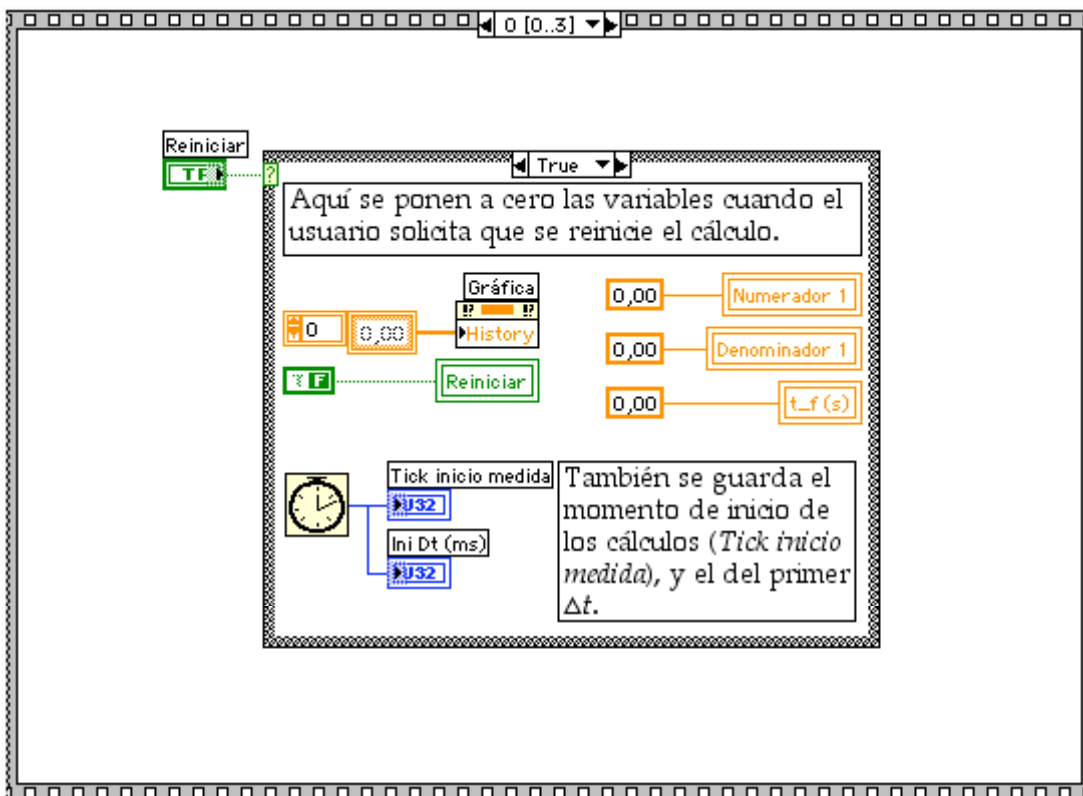


Figura 168.- *Fotograma 0* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

El primer fotograma inicializa todos los valores cuando el usuario pulsa el botón de reinicio del instrumento y almacena el instante de inicio del periodo de facturación y el del primer incremento de tiempo, Δt .

Este fotograma no ha sufrido cambios.

10.1.4.7.2.3. Fotograma 1

Encargado de captar o simular las dos ondas necesarias para calcular el cociente, realizar la parada entre medidas solicitada por el usuario en Δt , y mostrar u ocultar los campos que aparecen en la simulación según sea necesario.

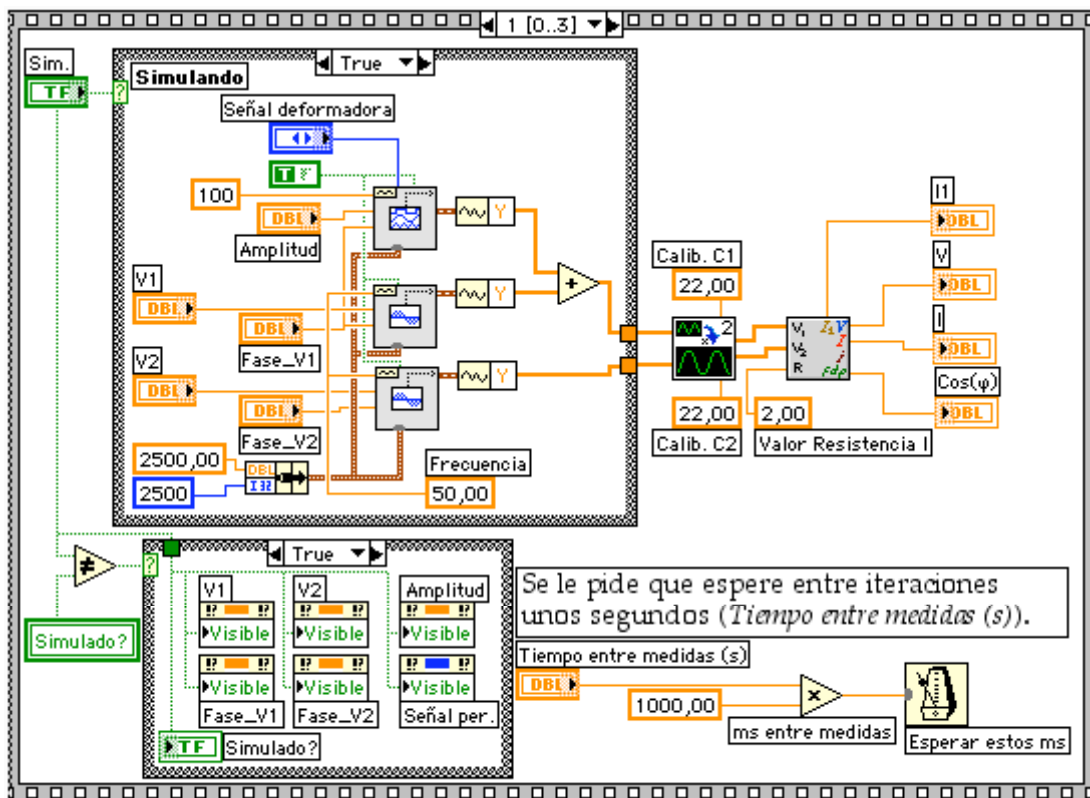


Figura 169.- *Fotograma 1* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

Si bien la captación de datos no ha sufrido ninguna variación con respecto al programa anterior, sí se ha modificado la zona encargada de su simulación.

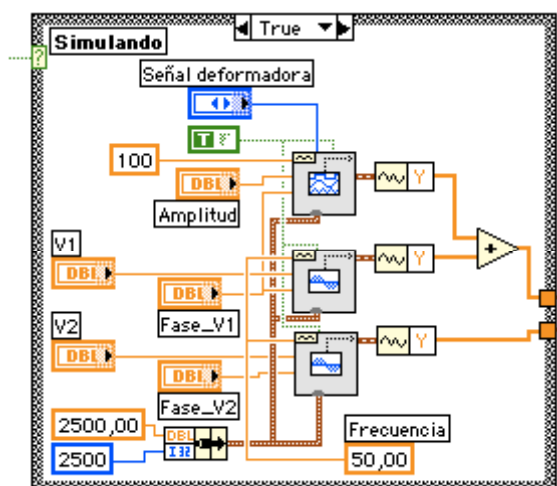


Figura 170.- Caso *True* de la estructura de casos superior del fotograma 1, encargado de simular las ondas de tensión.

Para generar las ondas de tensión principales se siguen empleando los instrumentos *Forma de Onda Sinusoidal* explicados anteriormente, sin embargo, para generar la onda que se encargará de deformar las señales, se ha optado por usar el instrumento de National Instruments llamado *Generador de Funciones Básico.vi* (Figura 171) que permite escoger uno de los cuatro tipos de onda periódica que tiene definidos y variarlo mientras se ejecuta el programa. Los tipos de onda que admite son: *Sine wave* (senoidal), *Triangle wave* (triangular), *Square wave* (cuadrada), y *Sawtooth wave* (de diente de sierra).

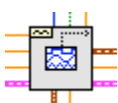


Figura 171.- Generador de Funciones Básico (*Basic Function Generator.vi*) de National Instruments.

El terminal que sirve para programar qué tipo de forma de onda se quiere generar se ha conectado a un control del panel frontal para que el usuario pueda modificarlo mientras el programa se ejecuta. Lo mismo se ha hecho con la amplitud de la onda, para que el usuario pueda darle el valor que desee, e incluso anularla (es decir, simular que no hay deformación). La fase inicial de la onda se ha conectado al control que determina la fase inicial de la onda v_1 . El terminal reset del instrumento se ha unido a una constante *True*, como se ha hecho con los instrumentos *Forma de Onda Sinusoidal*, para permitir modificar la fase inicial de la onda mientras el programa se ejecuta. El terminal de la frecuencia se ha unido a una constante de valor 100; es decir, la frecuencia de la onda deformadora es de 100 Hz, el doble que la fundamental. Por último, el terminal de la

información sobre el muestreo se ha unido al mismo grupo que los otros dos instrumentos, para que la frecuencia de muestreo sea de 2500 muestras por segundo y que realice 2500 muestras. A la salida de este instrumento se ha colocado un instrumento extractor de componentes de las formas de onda para que devuelva únicamente sus datos, Y .

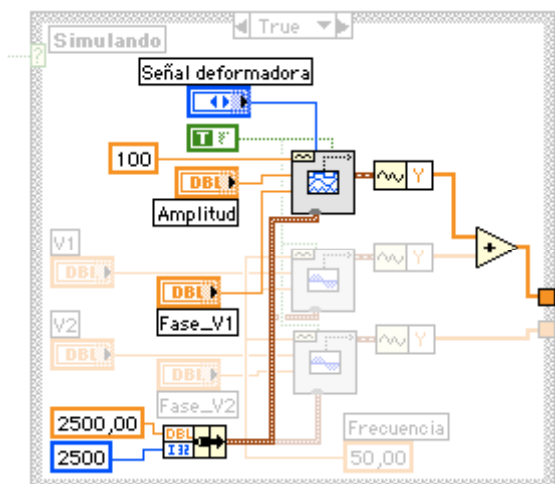


Figura 172.- Método empleado para deformar la onda.

La calibración de los dos canales permanece igual que en el programa anterior, sin embargo, el método para obtener los valores con los que se operará para obtener el cociente sí se ha modificado. El instrumento que se ha creado para este caso es *Obtener_V_I_Ef_I1_2Canales.vi*, que devuelve los valores eficaces de la tensión y la intensidad del receptor, así como el valor eficaz del primer armónico de la intensidad, el término fundamental, y el coseno del desfase entre la tensión y la intensidad.



Figura 173.- Instrumento virtual de creación propia llamado *Obtener_V_I_Ef_I1_2Canales*.

Está basado en el instrumento *Obtener_V_I_Ef_i_2Canales.vi*, solo que, en lugar de devolver el valor del seno del ángulo del desfase entre la tensión y la intensidad, en este caso devuelve el valor eficaz del término fundamental del desarrollo de Fourier de la intensidad.

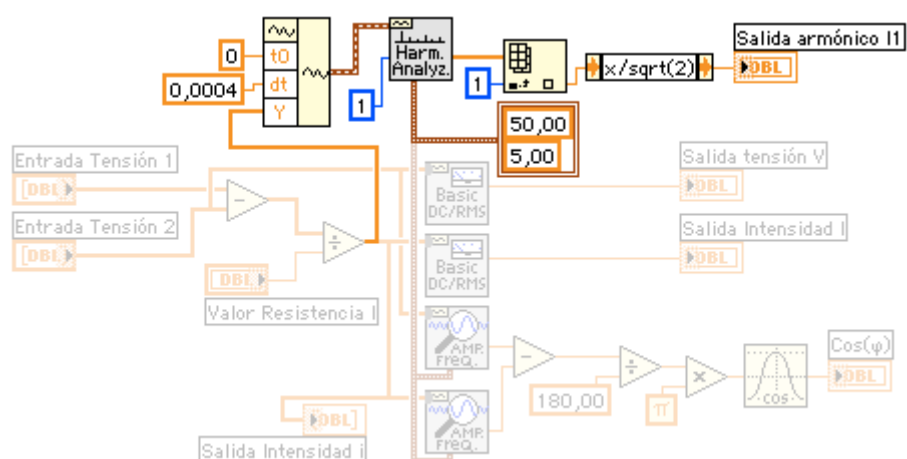


Figura 174.- Programación para obtener el valor eficaz del elemento fundamental del desarrollo de Fourier de la onda de intensidad.

Para determinar el valor eficaz del primer armónico del desarrollo de Fourier de la intensidad se utiliza el instrumento *Analizador de la Distorsión Armónica.vi* (Figura 175), que devuelve, entre otros, la amplitud o valor máximo de todos los armónicos que detecta en la onda original. A este instrumento es necesario suministrarle una *forma de onda*, que, además de los valores de la onda, incluye otra información, como su instante de inicio y el tiempo de separación entre medidas.



Figura 175.- Instrumento virtual Analizador de la Distorsión Armónica (*Harmonic Distortion Analyzer.vi*).

Así pues, antes de pasarle al instrumento la matriz con los valores instantáneos de la intensidad, es necesario construir una *forma de onda* con ellos. Para eso se emplea el instrumento *Construir una Forma de Onda* (Figura 176). Al terminal *Y* de este instrumento se le ha llevado la matriz con los valores de *i*. El valor que se lleve al terminal *t0* es en este caso irrelevante, pues no importa en qué momento se inició la medida de la onda; por ese motivo se ha conectado a una constante de valor 0. Sin embargo, el valor que se conecta al terminal *dt* sí es importante, puesto que se tiene la intención de pedirle al instrumento Analizador de la Distorsión Armónica que busque el término fundamental alrededor de una frecuencia de 50 Hz, así que éste necesita que la onda lleve asociada el dato del tiempo que transcurre entre cada uno de sus valores. Así pues, como se le ha pedido que realice medidas a 2500 medidas por segundo, el tiempo que transcurre entre cada medida es

$$dt = \frac{1}{2500} = 0.0004\text{s}$$

que es el dato que se ha unido a ese terminal. La salida de *Construir una Forma de Onda* es lo que se ha llevado a la entrada de señal del instrumento *Analizador de la Distorsión Armónica*.

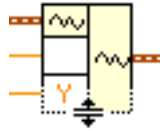


Figura 176.- Construir una Forma de Onda (*Build Waveform.vi*).

Se ha conectado al terminal *highest harmonic* del instrumento una constante de valor 1. De esta forma se le está pidiendo que busque únicamente el valor medio (0) y el término fundamental (1) de la onda que se le pase por el terminal *signal in*, en este caso la onda de intensidad.

En el terminal *advanced search* se ha conectado un grupo formado por la constante 50 seguida de la constante 5. Se le está indicando con este grupo que debe buscar en término fundamental del desarrollo de Fourier en torno a la frecuencia de 50 Hz, y que esa frecuencia puede oscilar un $\pm 5\%$. Esto se ha hecho así para acelerar el proceso de encontrar y aislar el término fundamental del desarrollo de Fourier de la onda de intensidad.

De las dos amplitudes que devuelve el instrumento *Analizador de la Distorsión Armónica* por el terminal de salida, llamado *components level*, solo es útil para este programa el valor del término fundamental, por lo que se utiliza la instrucción *Catalogar grupo* pidiéndole que extraiga de la matriz original el elemento en la posición 1 (hay que recordar que la posición 0, la primera, es el valor medio del desarrollo de Fourier de la onda de intensidad).

Hasta este punto, el programa ha obtenido el valor máximo del término fundamental de la onda de intensidad, como lo que se necesita es su valor eficaz basta con hacer $I = I_m / \sqrt{2}$ para obtenerlo, que es precisamente lo que hace el *Nodo de Expresión* $\times / \sqrt{2}$. La salida de este *Nodo de Expresión* es el valor eficaz del primer armónico del desarrollo de Fourier que se buscaba.

También es necesario introducir una modificación en el método que se ha usado para determinar el coseno del desfase entre la tensión y la intensidad halladas (Figura 177). El instrumento que se emplea para obtener la fase de las ondas, llamado *Extraer Información del Tono Principal*,

usa para sus cálculos la onda que tiene el mayor valor máximo, exclusivamente. Como las ondas con las que se ha trabajado hasta ahora eran sinusoidales, con una frecuencia fija y sin armónicos, la única onda que se le pasaba a este instrumento era, claramente, la de mayor amplitud y su funcionamiento era el esperado.

Sin embargo, a partir de este punto, se introducen deformaciones en las ondas que se quieren analizar, así que ya no se puede estar seguro de que el armónico con mayor amplitud sea el fundamental del desarrollo de Fourier de la onda. Por eso se necesitará indicar al instrumento el rango de frecuencias en el que se encuentra el primer armónico, al igual que se hizo con *Analizador de la Distorsión Armónica*. Esto se consigue uniendo al terminal *advanced search* un grupo formado por las constantes 50 y 5, para indicarle que debe buscar el término fundamental del desarrollo de Fourier en $50 \text{ Hz} \pm 5\%$, de forma similar a como se hace con *Extraer Información del Tono Principal*.

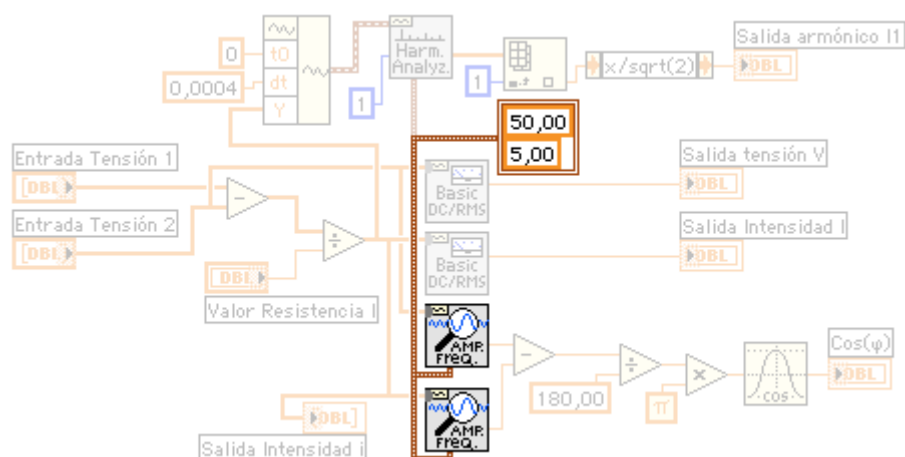


Figura 177.- Segunda modificación de *Obtener_V_I_Ef_I1_2Canales* con respecto a *Obtener_V_I_Ef_i_2Canales*.

El último paso del fotograma 1 del programa principal es presentar esos valores obtenidos, I_1 , V , I , y $\cos\phi$, en el panel frontal mediante sendos indicadores.

Otro de los elementos que se ha modificado en este fotograma es el encargado de mostrar u ocultar los campos según se esté *simulando* o *captando* datos, respectivamente. Se han incluido los dos nuevos campos que definen la señal deformadora.

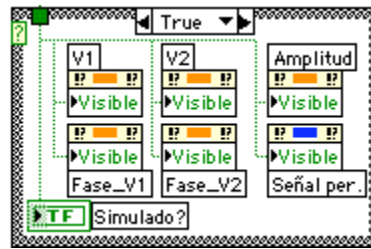


Figura 178.- Zona encargada de mostrar u ocultar los campos dedicados a definir las ondas que se simularán.

10.1.4.7.2.4. Fotograma 2

Determina el valor de Δt y el tiempo de facturación que ha transcurrido hasta este momento.

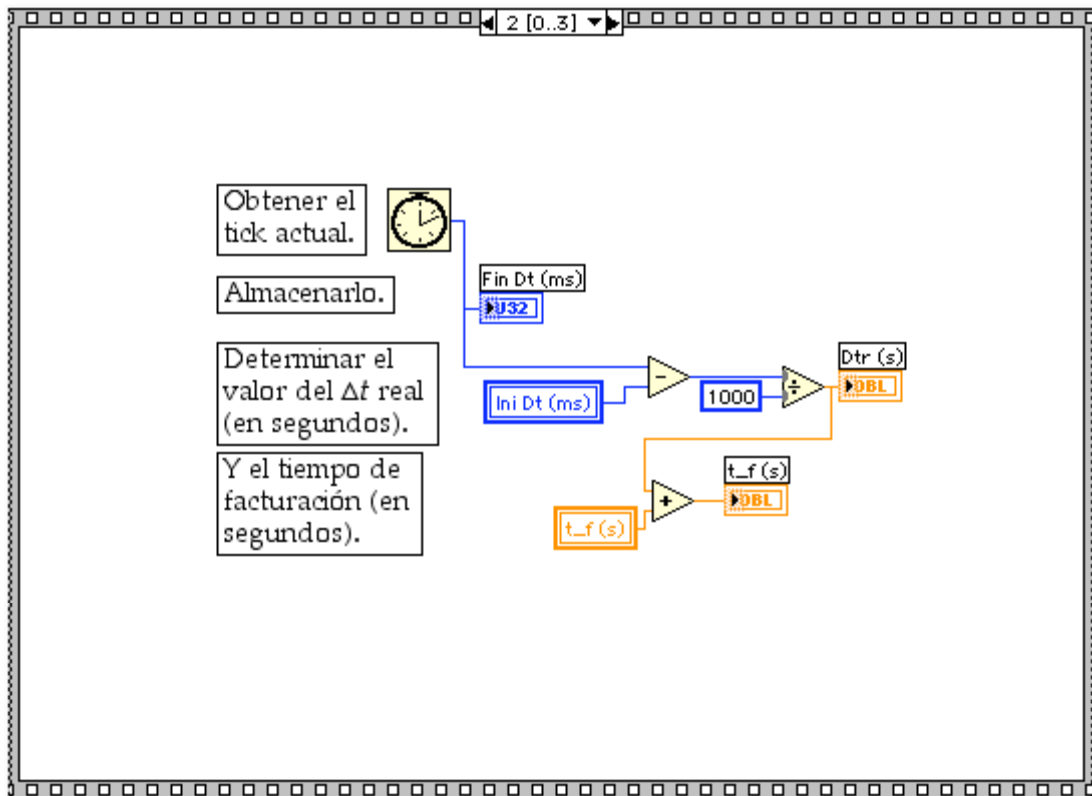


Figura 179.- *Fotograma 2* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

Este fotograma tampoco se ha modificado.

10.1.4.7.2.5. Fotograma 3

Calcula el cociente de pérdidas por deformación de la onda de intensidad de cargas monofásicas en sistemas sinusoidales, y representa el resultado en la pantalla.

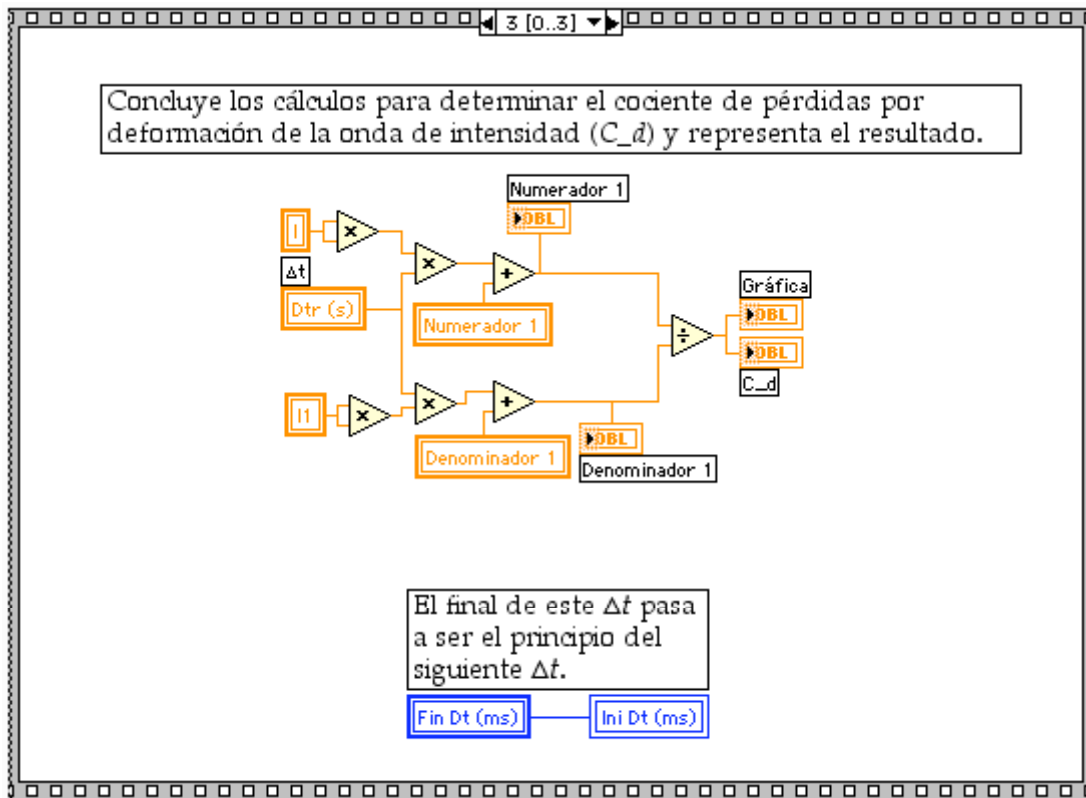


Figura 180.- Fotografía 3 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

La parte superior del programa se calcula el cociente según la fórmula:

$$c_a \approx \frac{\sum_0^{t_r} I^2 \Delta t}{\sum_0^{t_r} I_1^2 \Delta t}$$

Comenzando por el cálculo del numerador (Figura 181), el programa eleva al cuadrado el valor eficaz de la intensidad I , obtenido en el fotograma 1, para, seguidamente, multiplicarlo por Δt , que también se obtuvo en el fotograma anterior. Se suma ese resultado a la suma de los resultados similares de iteraciones anteriores, guardados en la variable

Numerador 1, para obtener $\sum_0^t I^2 \Delta t$, que es el numerador buscado. Ese

valor se guarda también en la variable *Numerador 1* para poder usarlo en la próxima iteración del programa.

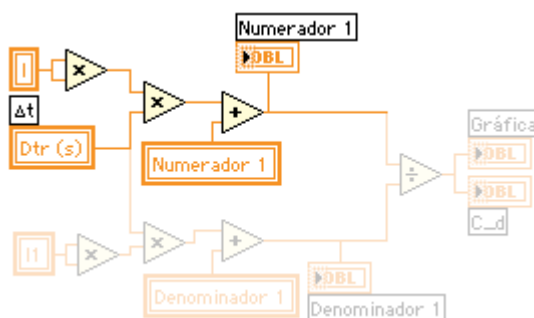


Figura 181.- Cálculo del numerador del cociente de pérdidas por deformación de la onda de intensidad de un receptor monofásico.

El cálculo del denominador es igual de rápido (Figura 182): tras elevar al cuadrado el valor eficaz del término fundamental del desarrollo de Fourier de la onda de intensidad, se multiplica por el valor de Δt , ya usado en el numerador, y se procede a realizar el sumatorio empleando la variable *Denominador 1* como variable auxiliar. El resultado es el

denominador buscado $\sum_0^t I_1^2 \Delta t$.

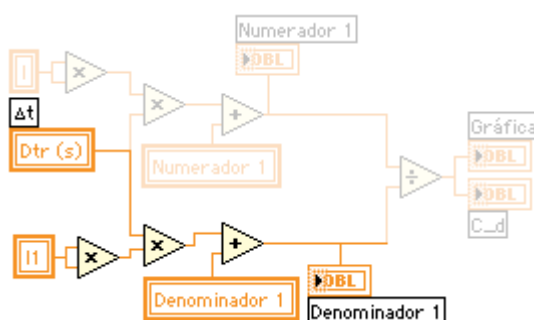


Figura 182.- Cálculo del denominador del cociente de pérdidas por deformación de la onda de intensidad de un receptor monofásico.

El paso final consiste en dividir el numerador por el denominador y llevar el resultado a la gráfica y al indicador que muestra el valor del cociente (Figura 183).

La última instrucción del fotograma, y del programa, tampoco se ha modificado.

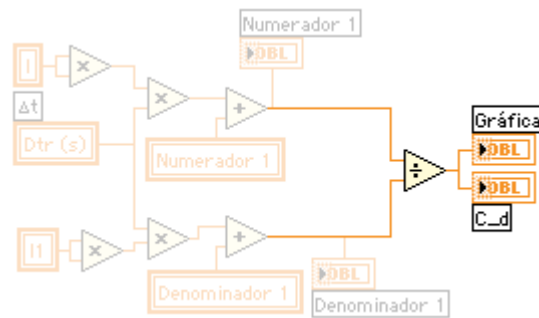


Figura 183.- Pasos finales del cálculo del cociente de pérdidas por consumo de potencia.

10.1.5. Potencia que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico debido a la deformación de la onda de intensidad de un receptor trifásico

Se considerarán ahora sistemas trifásicos, y se determinará también para los receptores trifásicos la potencia que se pierde, ΔP_p , y la relación entre la potencia que se pierde y la que se perdería si las ondas de intensidad de los terminales del receptor trifásico no se deformaran.

Las hipótesis serán las mismas que para el sistema monofásico ya estudiado, con las adaptaciones imprescindibles. En concreto, se supondrá que las tensiones permanecen equilibradas y sinusoidales. Se tomará como origen de fases la tensión entre la fase R y el conductor neutro. Es decir,

$$\begin{aligned}v_R &= V_m \text{sen}(\omega t) \\v_S &= V_m \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \\v_T &= V_m \text{sen}(\omega t - 240^\circ)\end{aligned}$$

Las series de Fourier de las intensidades de las fases son

$$\begin{aligned}i_R &= \bar{I}_R + I_{R1m} \text{sen}(\omega t - \varphi_R) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Rnm} \text{sen}(n\omega t - \varphi_{Rn}) \\i_S &= \bar{I}_S + I_{S1m} \text{sen}(\omega t - 120^\circ - \varphi_S) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Snm} \text{sen}(n\omega t - \theta_{Sn}) \\i_T &= \bar{I}_T + I_{T1m} \text{sen}(\omega t - 240^\circ - \varphi_T) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Tnm} \text{sen}(n\omega t - \theta_{Tn})\end{aligned}$$

La potencia activa que se entrega al receptor es la suma de las que entregan los términos fundamentales del desarrollo de Fourier de las tres intensidades de las fases, o sea,

$$\begin{aligned} P &= VI_{R1} \cos(\varphi_R) + VI_{S1} \cos(\varphi_S) + VI_{T1} \cos(\varphi_T) = \\ &= V(I_{R1} \cos(\varphi_R) + I_{S1} \cos(\varphi_S) + I_{T1} \cos(\varphi_T)) \end{aligned}$$

donde V es el valor eficaz de la tensión entre cada fase y el neutro, e I_{R1} , I_{S1} , e I_{T1} el valor eficaz de los términos fundamentales de las intensidades de cada fase.

El sistema eléctrico trifásico se puede aproximar por su equivalente de Thévenin en estrella [82], tal como se indica en la Figura 184, donde $Z = R + jX$

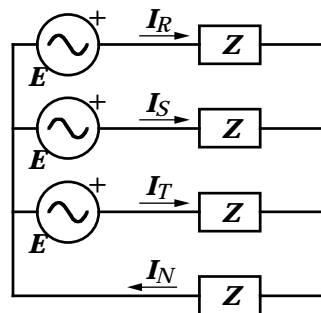


Figura 184.- Cuadripolo equivalente de Thévenin aproximado para un sistema trifásico.

Entonces, la potencia que se pierde en la resistencia de cada fase es

$$P_{pR} = RI_R^2 = R(\bar{I}_R^2 + I_{R1}^2 + I_{R2}^2 + I_{R3}^2 + \dots) = R\left(\bar{I}_R^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{Rn}^2\right) = RI_{R1}^2 + RI_{Ra}^2$$

$$P_{pS} = RI_S^2 = R(\bar{I}_S^2 + I_{S1}^2 + I_{S2}^2 + I_{S3}^2 + \dots) = R\left(\bar{I}_S^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{Sn}^2\right) = RI_{S1}^2 + RI_{Sa}^2$$

$$P_{pT} = RI_T^2 = R(\bar{I}_T^2 + I_{T1}^2 + I_{T2}^2 + I_{T3}^2 + \dots) = R\left(\bar{I}_T^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{Tn}^2\right) = RI_{T1}^2 + RI_{Ta}^2$$

y, similarmente, la potencia que se pierde en el neutro es

$$P_{pN} = RI_N^2 = R\left(\bar{I}_N^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{Nn}^2\right) = RI_{N1}^2 + RI_{Na}^2$$

R es la resistencia de cada fase y la del neutro, que supondremos iguales. I_R , I_S , I_T e I_N son los valores eficaces de las intensidades de las fases y del neutro. \bar{I}_R , \bar{I}_S , \bar{I}_T e \bar{I}_N son los valores medios de esas intensidades. I_{R1} , I_{R2} , I_{R3} , etc. son los valores eficaces del término fundamental y de los armónicos de la intensidad de la fase R . De forma parecida, en las siguientes fórmulas aparecen los valores eficaces de los términos fundamentales y de los armónicos de las intensidades de las fases S y T .

$I_{Ra}^2 = \bar{I}_R^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Rn}^2$ es la suma del cuadrado del valor medio de la

intensidad de la fase R más el cuadrado de los valores eficaces de todos los armónicos de esa intensidad, excluido el término fundamental. De forma

parecida para las otras fases, $I_{Sa}^2 = \bar{I}_S^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Sn}^2$ e $I_{Ta}^2 = \bar{I}_T^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Tn}^2$; y para

el neutro, $I_{Na}^2 = \bar{I}_N^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Nn}^2$. Por tanto, el término RI_{Ra}^2 es la potencia que

se pierde en la resistencia de la fase R debida a todos los términos del desarrollo de Fourier de la intensidad de esa fase, i_R , excluido el fundamental. Por eso llamaremos a ese término potencia que se pierde debida a los armónicos, de ahí el subíndice a . Pero debe recordarse que también están incluidas las pérdidas del término independiente, es decir, el valor medio, si existe. De la misma manera los términos RI_{Sa}^2 , RI_{Ta}^2 y RI_{Na}^2 se llamarán potencias que se pierden en las fases S y T y en el neutro debidas a los armónicos de las intensidades de esas fases y del neutro.

La potencia que se pierde en la línea por causa de la onda de intensidad deformada es la suma de las cuatro potencias anteriores, las que se pierden en las tres fases más la que se pierde en el neutro:

$$P_p = R \left(I_{R1}^2 + I_{Ra}^2 + I_{S1}^2 + I_{Sa}^2 + I_{T1}^2 + I_{Ta}^2 + I_{N1}^2 + I_{Na}^2 \right) \quad (10.14)$$

10.1.5.1. Incremento de potencia que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico por deformación de las ondas de intensidad de un receptor trifásico

Las intensidades sinusoidales de cada fase que entregan al receptor la misma potencia activa que las intensidades deformadas anteriores, son

las intensidades que son iguales a los términos fundamentales de las intensidades deformadas.

$$\begin{aligned}i_R &= I_{R1m} \text{sen}(\omega t - \varphi_R) \\i_S &= I_{S1m} \text{sen}(\omega t - 120^\circ - \varphi_S) \\i_T &= I_{T1m} \text{sen}(\omega t - 240^\circ - \varphi_T)\end{aligned}$$

La potencia que se pierde en la resistencia del sistema trifásico debido a esas intensidades sinusoidales es

$$P_{pmi} = RI_{R1}^2 + RI_{S1}^2 + RI_{T1}^2 = R(I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2)$$

Por tanto, la potencia que se pierde por las ondas de intensidad deformadas, dada por (10.14) queda:

$$\begin{aligned}P_p &= R(I_{R1}^2 + I_{Ra}^2 + I_{S1}^2 + I_{Sa}^2 + I_{T1}^2 + I_{Ta}^2 + I_{N1}^2 + I_{Na}^2) = \\&= R(I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2 + I_{N1}^2) + R(I_{Ra}^2 + I_{Sa}^2 + I_{Ta}^2 + I_{Na}^2) = \\&= P_{pmi} + R(I_{Ra}^2 + I_{Sa}^2 + I_{Ta}^2 + I_{Na}^2) = P_{pmi} + \Delta P_p\end{aligned}\quad (10.15)$$

Es decir, la potencia que se pierde en el sistema trifásico por la deformación de las ondas de intensidad de un receptor es siempre igual a la que se pierde cuando las ondas son sinusoidales más el término

$$\Delta P_p = R(I_{Ra}^2 + I_{Sa}^2 + I_{Ta}^2 + I_{Na}^2)$$

formado por sumandos en los que solo aparecen términos relacionados con los armónicos y los valores medios de las intensidades, sin relación con el término fundamental de ninguna de ellas. El término ΔP_p es el incremento de la potencia perdida por deformación *de las ondas de intensidad*. Como ΔP_p siempre es un número real positivo, de (10.15) se obtiene que $P_{pmi} \leq P_p$. Es decir, se ve de nuevo que, también en los sistemas trifásicos, *intensidades deformadas producen más pérdidas en el sistema eléctrico que las intensidades sinusoidales que entregan la misma potencia que ellas*.

10.1.5.2. Cociente de pérdida de potencia de un receptor trifásico por deformación de las ondas de intensidad

El cociente de pérdida de potencia por deformación de la onda de intensidad, definido como el cociente entre la potencia que se pierde en la línea debida a las intensidades de un receptor trifásico, y la que se perdería si esas intensidades fueran iguales a los término fundamentales de su desarrollo de Fourier, vale ahora

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{P_{pmi} + \Delta P_p}{P_{pmi}} = 1 + \frac{\Delta P_p}{P_{pmi}} = 1 + \frac{I_{Ra}^2 + I_{Sa}^2 + I_{Ta}^2 + I_{Na}^2}{I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2 + I_{N1}^2}$$

Se ve que $\frac{P_p}{P_{pmi}} \geq 1$. Si solo existe término fundamental, es decir, si el

valor medio es nulo y no hay armónicos, $\frac{P_p}{P_{pmi}} = 1$. A medida que crece el incremento de la potencia perdida por deformación de la onda de intensidad, ΔP_p , también crece el cociente $\frac{P_p}{P_{pmi}}$.

Si no hay conductor neutro,

$$\Delta P_p = R \left(I_{Ra}^2 + I_{Sa}^2 + I_{Ta}^2 \right)$$

y

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = 1 + \frac{I_{Ra}^2 + I_{Sa}^2 + I_{Ta}^2}{I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2}$$

10.1.5.3. Cociente de pérdida de energía por deformación de las ondas de intensidad de un receptor trifásico

Si el receptor trifásico es de cuatro hilos, cada uno con la misma resistencia R que los otros, la energía que se pierde en esas resistencias durante el periodo de facturación, t_f , es

$$W_p = R \int_0^{t_f} \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2 \right) dt$$

Y la que se perdería con las ondas de intensidad sinusoidales, con las ondas no deformadas sería

$$W_{pmi} = R \int_0^{t_f} \left(I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2 + I_{N1}^2 \right) dt$$

De manera que el cociente de pérdida de energía por deformación de las ondas de intensidad en el periodo de facturación es

$$c_a = \frac{\int_0^{t_f} \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2 \right) dt}{\int_0^{t_f} \left(I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2 + I_{N1}^2 \right) dt} \quad (10.16)$$

Si el receptor es de tres hilos, el cociente vale

$$c_a = \frac{\int_0^{t_f} \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 \right) dt}{\int_0^{t_f} \left(I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2 \right) dt}$$

10.1.5.4. Medida del cociente de pérdidas de energía por deformación de las ondas de intensidad de cargas trifásicas

Se trata de obtener las medidas necesarias para hallar el cociente (10.16) durante el periodo de facturación, t_f . Para ello, durante la primera parte del intervalo Δt se obtienen muestras para conseguir las ondas de las intensidades i_R , i_S e i_T de las fases. Ha de programarse LabVIEW para que, por suma, obtenga la intensidad instantánea del neutro: $i_N = i_R + i_S + i_T$. A continuación, el programa ha de obtener los valores eficaces de todas esas intensidades y los valores eficaces de los términos fundamentales de sus desarrollos de Fourier. Ahora el programa debe obtener el producto $\left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2 \right) \Delta t$ y sumarlo a la suma de los anteriores productos similares que han ido obteniéndose desde el comienzo del periodo de facturación, t_f . También ha de obtener el producto $\left(I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2 + I_{N1}^2 \right) \Delta t$ y sumarlo a la suma de los productos similares anteriores, y realizar la operación

$$c_a \approx \frac{\sum_0^t (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) \Delta t}{\sum_0^t (I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2 + I_{N1}^2) \Delta t}$$

que da el valor de c_a para cada valor de t , que es el tiempo transcurrido desde que se inició la medida, con mayor aproximación cuanto menores sean los intervalos de tiempo Δt . Cuando $t = t_f$, c_a es el cociente de pérdidas buscado, correspondiente al tiempo de facturación.

10.1.5.5. Programa de LabVIEW para obtener el cociente de pérdidas de energía por deformación de las ondas de intensidad de cargas trifásicas

A continuación se explica brevemente el programa de LabVIEW creado para calcular el cociente de pérdidas por deformación de las ondas de intensidad, a partir de las medidas realizadas con la tarjeta de captación de datos. Realizará las mismas funciones que los programas precedentes.

Este instrumento virtual está basado en el que obtiene el cociente de pérdidas por desequilibrio de las intensidades de los receptores trifásicos, aunque también incluye importantes cambios.

10.1.5.5.1. Panel frontal

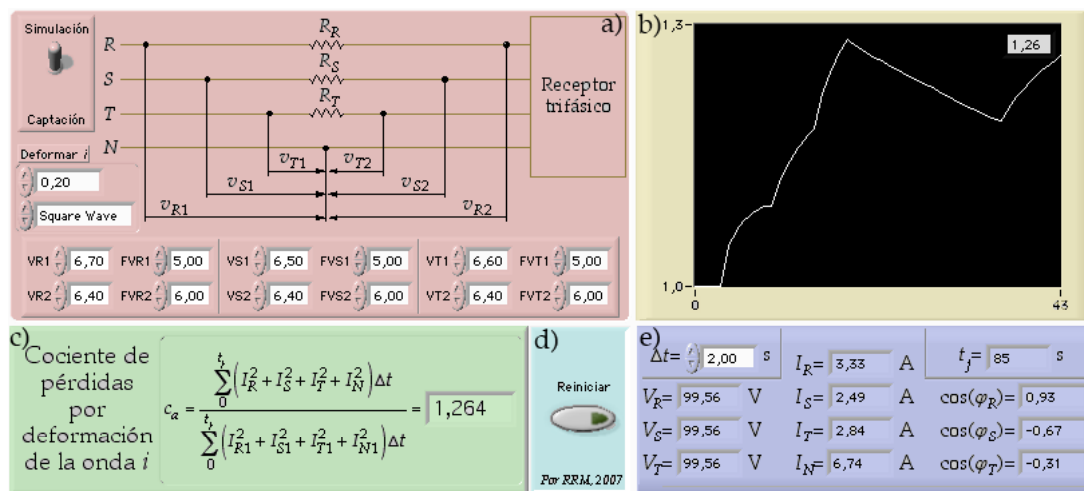


Figura 185.- Zonas en que está dividido el panel frontal del instrumento virtual.

El panel frontal de este instrumento virtual tiene la misma distribución que los anteriores, variando únicamente su contenido.

- La zona a) muestra el esquema del circuito que se debe montar para acondicionar las señales y qué variables espera el programa que se midan con él, también contiene el interruptor *Simulación/Captación* y los campos que permiten al usuario modificar los valores eficaces y las fases iniciales de las seis tensiones simuladas. Además, inmediatamente debajo del interruptor, se encuentra una nueva zona llamada *Deformar i*. Aquí se define la amplitud y la forma de la onda deformadora, por ese orden.
- La zona b) contiene la evolución del cociente de pérdidas y el último valor representado por la gráfica.
- La zona c) indica al usuario que se está obteniendo el *Cociente de pérdidas por deformación de la onda de intensidad*, muestra la ecuación que el programa emplea para ello e indica el valor actual del cociente.
- En la zona d) está el botón para reiniciar la medida.
- En la zona e), se siguen mostrando los valores de Δt , que es el intervalo de tiempo que el usuario desea usar entre medidas, t_f , que es el tiempo de facturación medido en segundos, los valores eficaces de las tensiones de cada terminal de la carga con respecto al terminal del hilo neutro, los valores eficaces de las intensidades que circulan por cada fase y el hilo neutro, y el coseno del desfase entre la tensión y la intensidad de cada fase.

Bajo estos valores se oculta a la vista la zona donde típicamente se han venido ocultando aquellos valores que no son de interés para el usuario pero que el funcionamiento del programa exige que aparezcan en el panel frontal del instrumento virtual. En esta ocasión, a los valores habituales de programas anteriores se le han añadido los valores eficaces de los términos fundamentales de los desarrollos de Fourier de las intensidades de las fases y del hilo neutro.

Valores auxiliares que el usuario no necesita conocer

Numerador 1 2415,44	Ini Dt (ms) 16144021	I1r 2,50	Simulado? <input checked="" type="radio"/>
Denominador 1 1910,72	Fin Dt (ms) 16144021	I1s 2,01	
Tick inicio medida 16058969	Dtr (s) 1,99	I1t 2,01	
			I1n 6,04

Figura 186.- Otros resultados de escaso interés para el usuario permanecen ocultos.

10.1.5.5.2. Diagrama de conexiones

Los cambios que este instrumento virtual ha sufrido, con respecto al que determina el cociente de pérdidas por desequilibrio de las intensidades de los receptores trifásicos, están concentrados principalmente en los fotogramas 1 y 3.

10.1.5.5.2.1. Estructura principal

No se ha modificado: es una estructura secuencial formada por cuatro fotogramas.

10.1.5.5.2.2. Fotograma 0

Inicializa los valores necesarios para poder comenzar un nuevo periodo de facturación, t_f , almacena en una variable el instante de inicio de t_f y en otra el instante de inicio del primer Δt .

No se ha modificado nada de este fotograma.

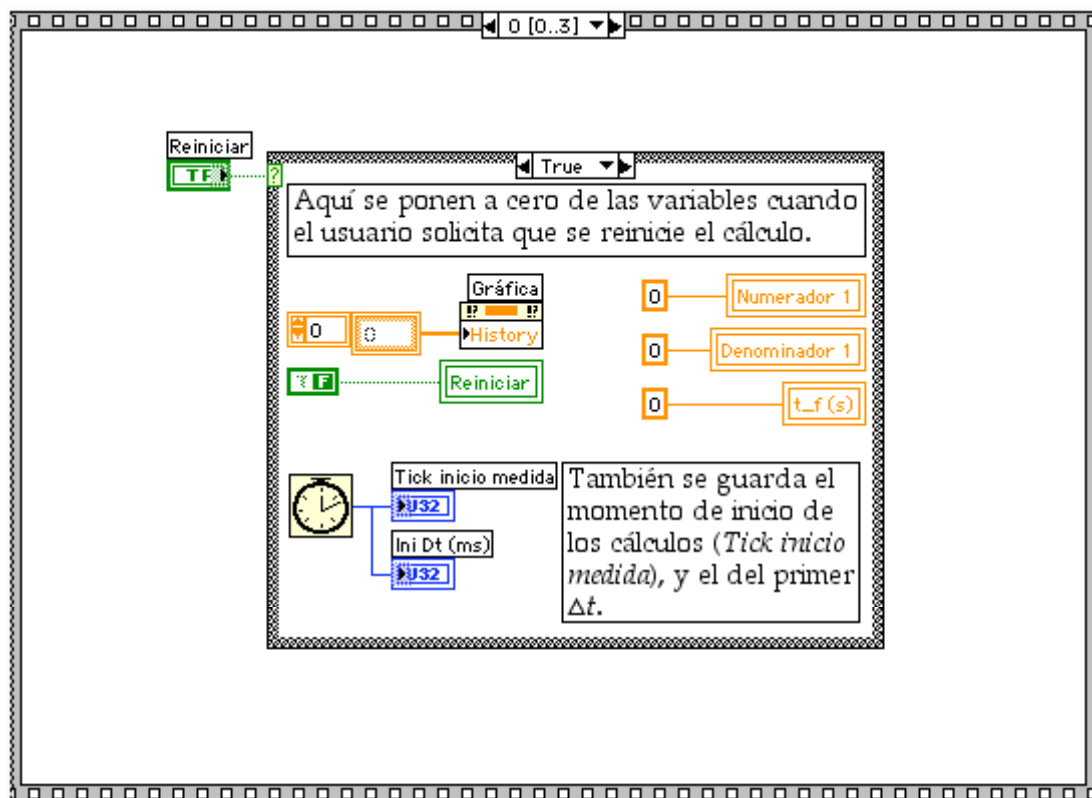


Figura 187.- Fotograma 0 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

10.1.5.5.2.3. Fotograma 1

Este fotograma capta o simula las ondas necesarias para obtener los valores de las tensiones del receptor, sus intensidades, los cosenos de los desfases entre la tensión y la respectiva intensidad de cada fase, y el valor eficaz del primer armónico del desarrollo de Fourier de la intensidad de cada fase y del hilo neutro.

Además, también se encarga de mostrar u ocultar los campos que se usan para simular las ondas de tensión captadas.

Si bien la zona de captación de datos del instrumento no ha sufrido ninguna modificación con respecto al instrumento que se ha usado como base, la zona de simulación de las ondas sí ha necesitado cambios. El principal ha sido la sustitución del instrumento *Generar_6_Ondas_Sinusoidales.vi* por *Generar_6_Ondas_Deformadas.vi* (en la Figura 189 se aprecia mejor la diferencia entre ambos instrumentos).

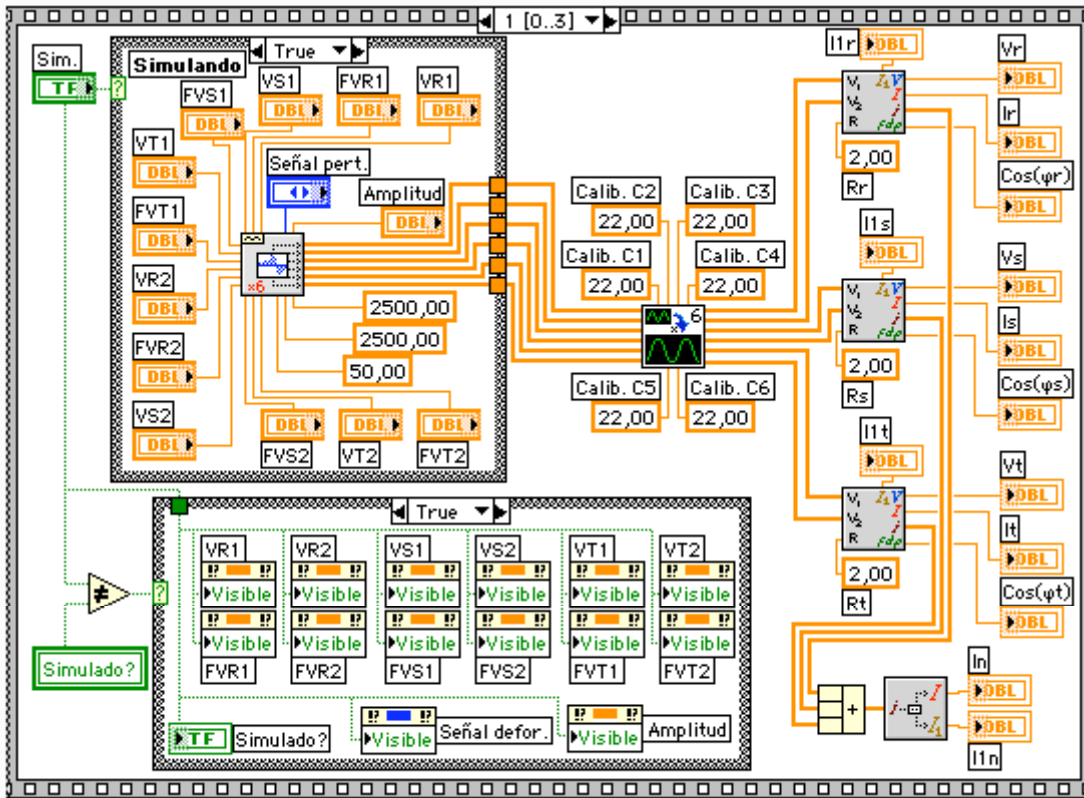


Figura 188.- Fotografía 1 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

El instrumento se creó para que generara seis ondas deformadas independientes. Para ello, como se hizo en el programa anterior para cargas monofásicas, a una onda sinusoidal de frecuencia 50 Hz le sumará otra onda con el doble de frecuencia y de la forma y amplitud escogidas por el usuario.

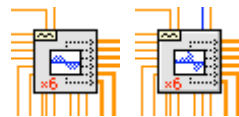


Figura 189.- A la izquierda *Generar_6_Ondas_Sinusoidales.vi*, a la derecha *Generar_6_Ondas_Deformadas.vi*, ambos instrumentos de creación propia.

En la Figura 190 se puede ver el diagrama de conexiones de este instrumento. Se aprecia que la única modificación con respecto al instrumento que ha sustituido, *Generar_6_Ondas_Sinusoidales.vi*, es que ahora a las salidas de v_{R1} , v_{S1} , y v_{T1} se les suma una onda deformada obtenida de la misma forma que se empleó en el programa anterior para cargas monofásicas.

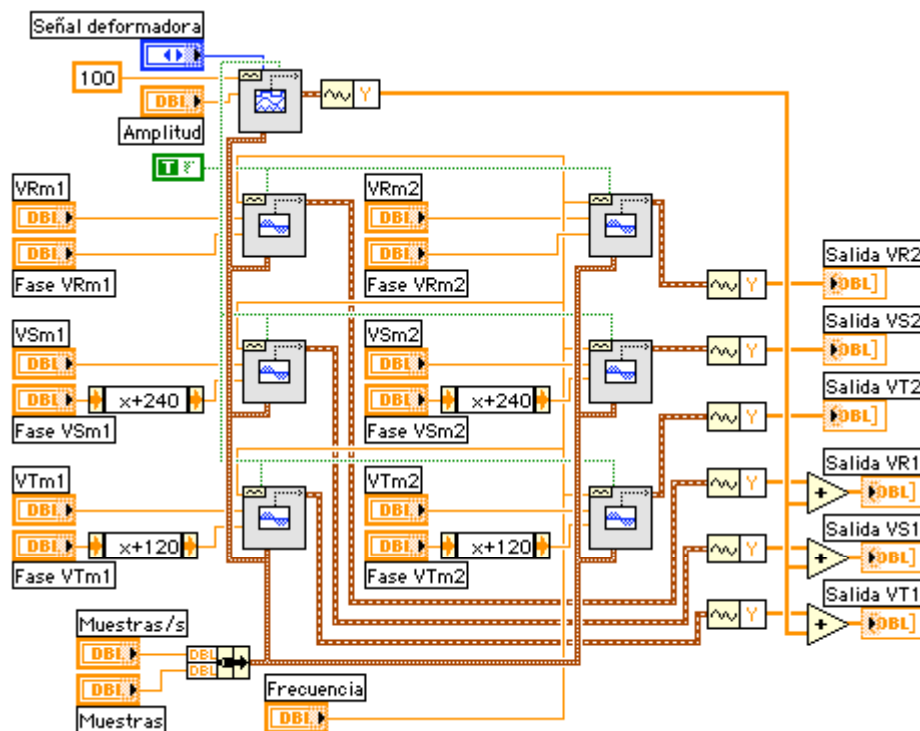


Figura 190.- Diagrama de conexiones del instrumento virtual *Generar_6_Ondas_Deformadas.vi*.

De vuelta al programa principal (Figura 188), se puede ver que a los nuevos terminales del instrumento *Generar_6_Ondas_Deformadas.vi* se les ha conectado sendos controles que servirán al usuario para poder modificar la amplitud y la forma de las ondas deformadoras durante la ejecución del programa.

Después de realizar la calibración de las seis ondas de tensión simuladas o captadas por la tarjeta se procede a obtener, con ellas, los valores eficaces de las tensiones entre cada fase y el neutro, de las intensidades de cada fase, y del término fundamental del desarrollo de Fourier de esas intensidades, así como el coseno del desfase entre la tensión y la intensidad de cada fase. Todos estos valores, necesarios para calcular el cociente, se consiguen por medio del instrumento *Obtener_V_I_Ef_I1_2Canales.vi*, como ya se vio en el programa anterior.

Para obtener la intensidad que circula por el hilo neutro basta con recordar que $i_N = i_R + i_S + i_T$; es decir, hay que sumar todas las matrices que salen por los terminales llamados *Salida Intensidad i*, del instrumento *Obtener_V_I_Ef_I1_2Canales.vi*, que son los valores instantáneos de las intensidades de cada fase. Esta suma se realiza mediante la instrucción *Realizar Operación Aritmética*, como ya se vio. A continuación se emplea el instrumento *Obtener_I_I1.vi* que se ha creado de forma que devuelva los

valores eficaces de la intensidad que se le suministra y del término fundamental de su desarrollo de Fourier (Figura 191).



Figura 191.- Instrumento virtual de creación propia llamado *Obtener_I_II.vi*.

El funcionamiento de este instrumento es una simplificación de *Obtener_V_I_Ef_II_2Canales.vi* (Figura 192). A partir de una única entrada, que se supone que es una intensidad sinusoidal, calcula y devuelve su valor eficaz usando el instrumento *CC-RMS Medio Básico.vi*, además de buscar la amplitud de su primer armónico, en torno a los $50 \text{ Hz} \pm 5\%$, y devolver su valor eficaz.

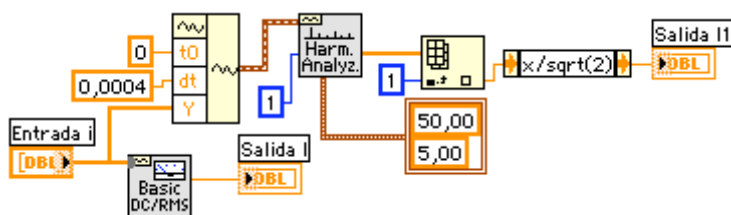


Figura 192.- Diagrama de conexiones del instrumento virtual *Obtener_I_II.vi*.

En el método que muestra u oculta los campos que definen las ondas que se van a simular se han añadido las instrucciones apropiadas de los controladores de la *Señal deformadora* y su *Amplitud* (Figura 193). Así, cuando se simulen las ondas el instrumento mostrará estos campos, y los ocultará cuando el usuario pida la captación de datos, igual que hacía en programas anteriores.

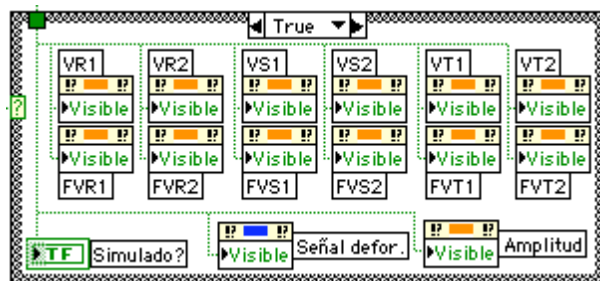


Figura 193.- Método para mostrar u ocultar los campos usados para definir las ondas simuladas.

Aquí también se ha pasado al fotograma 3 la parada que hace que el tiempo entre medidas sea Δt , por necesidades de espacio.

10.1.5.5.2.4. Fotograma 2

Se emplea para obtener los valores de Δt y del tiempo que ha transcurrido hasta ese momento.

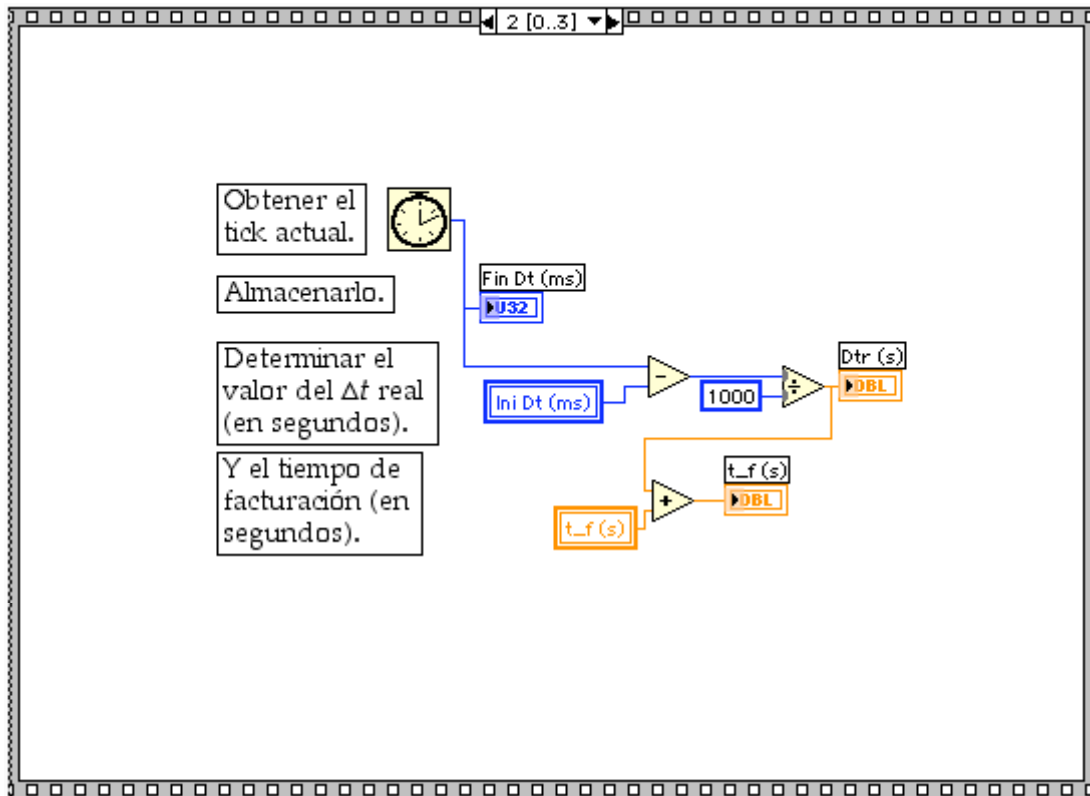


Figura 194.- *Fotograma 2* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

Este fotograma no se ha modificado.

10.1.5.5.2.5. Fotograma 3

Calcula el cociente y representa los resultados en el panel frontal. También realiza una operación necesaria para la medida en el siguiente intervalo, e incorpora la espera entre medidas para respetar Δt .

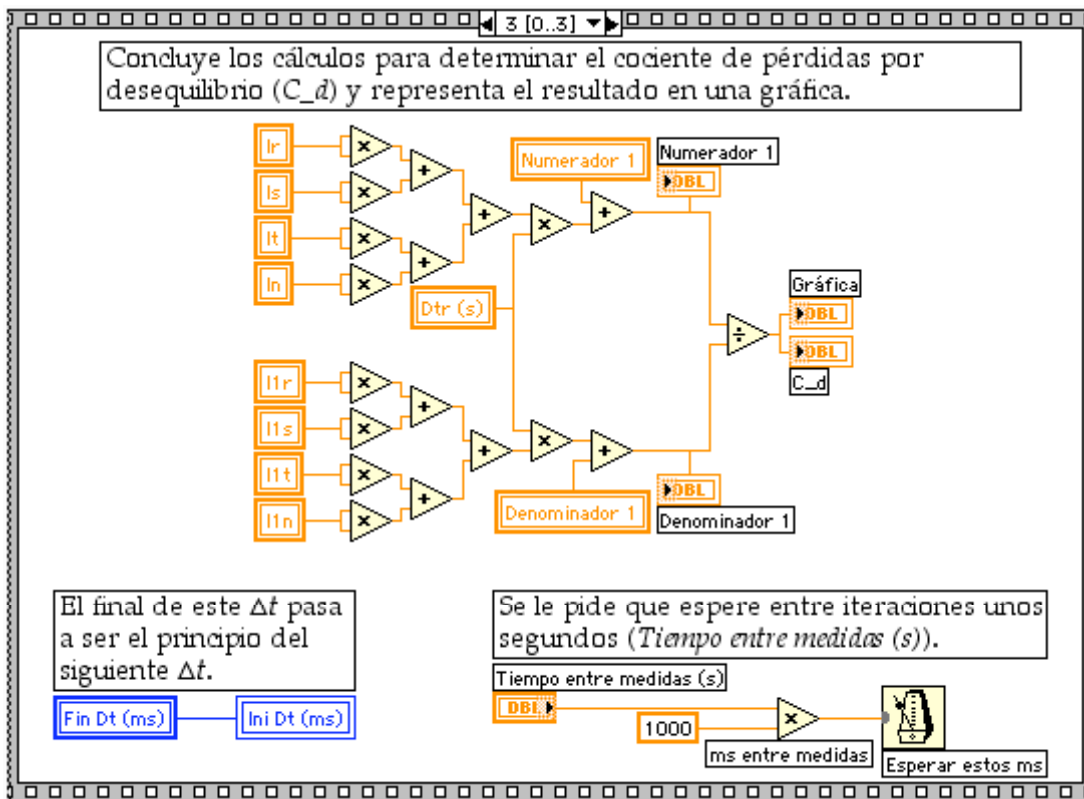


Figura 195.- Fotografía 3 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

En la parte superior se calcula el cociente usando

$$c_a \approx \frac{\sum_0^{t_r} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) \Delta t}{\sum_0^{t_r} (I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2 + I_{N1}^2) \Delta t}$$

Para calcular el numerador (Figura 196) se eleva al cuadrado el valor eficaz de las intensidades de cada fase y del hilo neutro, obtenidos en el fotograma 1, y se suman todos. El resultado se multiplica por Δt, calculado en el fotograma anterior, y, por último, se realiza el sumatorio.

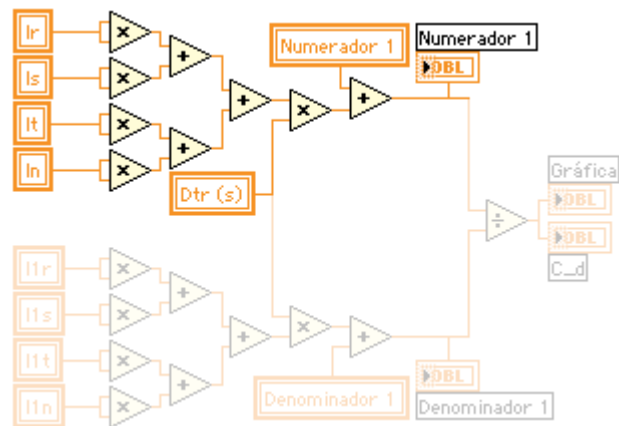


Figura 196.- Cálculo del numerador del cociente de pérdidas por deformación de las ondas de intensidad de cargas trifásicas.

Similarmente, para obtener el denominador (Figura 197) se eleva al cuadrado el valor eficaz del término fundamental del desarrollo de Fourier de las intensidades de cada fase y del hilo neutro, obtenidos también en el fotograma 1, y se suman. El resultado se multiplica por Δt y se realiza el sumatorio.

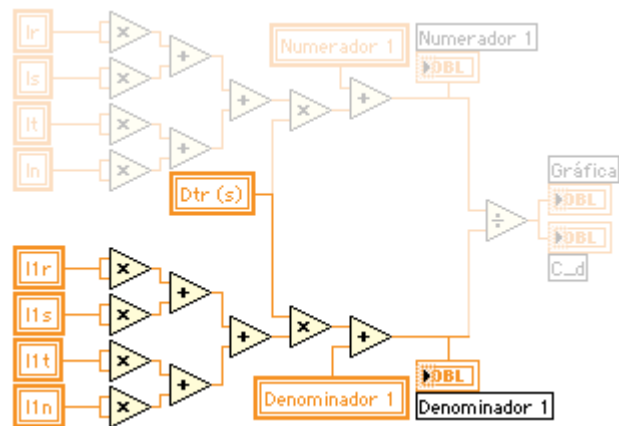


Figura 197.- Cálculo del denominador del cociente de pérdidas por deformación de las ondas de intensidad de cargas trifásicas.

Finalmente, se divide el numerador entre el denominador y se lleva el resultado a la gráfica y al indicador que muestra cuánto vale el cociente, c_a , actual (Figura 198).

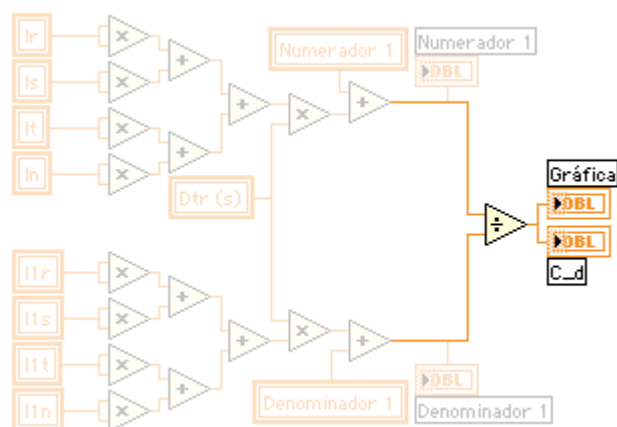


Figura 198.- Último paso para la obtención del cociente.

La última parte del programa (Figura 199) no se ha variado con respecto al instrumento en el que se ha basado este.

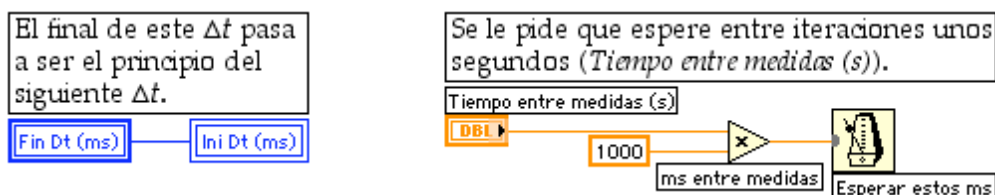


Figura 199.- Últimas acciones del fotograma 3.

10.2. Pérdidas en el hierro

Hasta ahora, en este capítulo, se ha determinado el incremento de la potencia que se pierde en la resistencia de los conductores del sistema eléctrico debido exclusivamente a la deformación de la onda de intensidad. Existen otro tipo de pérdidas de potencia por la misma causa que, aunque su magnitud no es globalmente comparable a la anterior, sí pueden tener importancia, y de hecho la tienen, en partes concretas del sistema eléctrico. Estas son las pérdidas de potencia que suelen conocerse con el nombre de *pérdidas en el hierro*, y se producen en los circuitos magnéticos de máquinas rotativas y transformadores, debidas a las corrientes de Foucault y a la orientación periódica de los recintos de Weiss.

Sin embargo, no parece que la medida de esas pérdidas achacables a cada consumidor sea fácilmente posible, ni útil su medida para ser incorporadas de manera general a las tarifas eléctricas. Por eso, no se incluyen aquí. A pesar de todo, la inclusión de filtros en los receptores que deforman las ondas de intensidad, sea por la razón que sea, no solo

disminuirá las pérdidas en la resistencia de los hilos, sino también las pérdidas en el hierro.

10.3. Resumen de resultados del análisis de pérdidas por deformación de las ondas de las intensidades

Sistemas monofásicos

Potencia mínima perdida

$$P_{pmi} = 2R_l I_1^2$$

donde R_l es la resistencia de cada uno de los dos hilos de la línea, e I_1 el valor eficaz del término fundamental del desarrollo de Fourier de la intensidad.

Potencia que realmente se pierde

$$P_p = P_{pmi} + 2R_l I_a^2$$

donde $I_a^2 = \bar{I}^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots$ es la suma de los cuadrados del valor medio y de los valores eficaces de todos los armónicos (excluido el término fundamental) del desarrollo de Fourier de la intensidad.

Cociente de pérdidas

$$c_a = \frac{\int_0^{t_f} I^2 dt}{\int_0^{t_f} I_1^2 dt}$$

donde t_f es el tiempo de facturación, e I el valor eficaz de la intensidad.

Sistemas trifásicos

Potencia mínima perdida

$$P_{pmi} = R \left(I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2 + I_{N1}^2 \right)$$

donde R es la resistencia de cada hilo, I_{R1} , I_{S1} , I_{T1} e I_{N1} son los valores eficaces de los términos fundamentales del desarrollo de Fourier de las intensidades de las fases y del neutro.

Potencia que realmente se pierde

$$P_p = P_{pmi} + R \left(I_{Ra}^2 + I_{Sa}^2 + I_{Ta}^2 + I_{Na}^2 \right)$$

donde $I_{Ra}^2 = \bar{I}_R^2 + I_{R2}^2 + I_{R3}^2 + \dots$, $I_{Sa}^2 = \bar{I}_S^2 + I_{S2}^2 + \dots$, $I_{Ta}^2 = \bar{I}_T^2 + I_{T2}^2 + \dots$, e $I_{Na}^2 = \bar{I}_N^2 + I_{N2}^2 + \dots$ son las sumas de los cuadrados del valor medio y de los valores eficaces de todos los armónicos (excluido el término fundamental) del desarrollo de Fourier de las intensidades de las fases y el neutro, respectivamente.

Cociente de pérdidas

$$C_a = \frac{\int_0^{t_f} \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2 \right) dt}{\int_0^{t_f} \left(I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2 + I_{N1}^2 \right) dt}$$

donde t_f es el tiempo de facturación, e I_R , I_S , I_T e I_N son los valores eficaces de las intensidades de las fases y del neutro.

11. Cociente global de pérdida de energía debida a las características de los receptores trifásicos

11.1. Introducción

Hasta aquí se han analizado cuatro causas de pérdida de energía en el sistema eléctrico achacables a los receptores, que hemos llamado pérdida de energía *por demanda de potencia*, pérdida de energía *por potencia reactiva* o por factor de potencia, pérdida de energía *por desequilibrio de cargas trifásicas* y pérdida de energía *por deformación de las ondas de intensidad*. Se ha conseguido en todos los casos crear un cociente de pérdida de energía que compara la energía que se pierde durante el periodo de facturación, con la que se perdería en cada caso, si la causa concreta que se consideraba se anulara, y se han diseñado procedimientos para la medida de cada uno de estos cocientes.

En este capítulo trataremos de crear índices de medida de pérdidas de energía para receptores trifásicos, que agrupen a más de una causa, y desarrollaremos procedimientos para la medida de cada uno, para terminar, al final del capítulo, creando un índice global, también para receptores trifásicos, que agrupe las cuatro causas estudiadas, y el correspondiente método para medir este cociente.

11.2. Cociente de pérdida de energía debida al factor de potencia y al desequilibrio de las intensidades de receptores trifásicos

Como ya se ha dicho, el único método de medir pérdidas de energía que se aplica en la actualidad, consiste en medir la energía reactiva que absorben determinados receptores. Ya se ha comentado lo inadecuado que es el procedimiento, y también cómo la corrección del factor de potencia no es, en general, una solución eficaz para disminuir las pérdidas, a no ser que el receptor resulte equilibrado después de la corrección [1][13].

Como se mostrará más adelante, hay procedimientos para equilibrar receptores trifásicos y simultáneamente corregir su factor de potencia

[4][43]. Los procedimientos a los que nos referimos aquí consisten en determinadas conexiones de reactancias. Es decir, solo por medio de reactancias es posible disminuir o eliminar simultáneamente la energía que se pierde por causa del desequilibrio de cargas trifásicas y de su factor de potencia. Este método de equilibrado y corrección simultánea del factor de potencia no tiene, por tanto, dificultades de aplicación mucho mayores que la conexión de condensadores que ahora se utiliza solo para disminuir la potencia reactiva, pero tiene la ventaja de que sí es del todo eficaz. Por eso, la eliminación conjunta de esas dos causas de pérdida de energía no solo es técnicamente posible, sino incluso fácil de realizar. Se tratará por eso, en primer lugar, de crear un cociente único que englobe las pérdidas por desequilibrio y por bajo factor de potencia.

Comenzaremos por los receptores trifásicos alimentados por una línea de tres conductores de la misma resistencia R cada uno. Se supondrán, como siempre, las tensiones equilibradas. Entonces la potencia que se pierde en la resistencia de los tres conductores es

$$P_p = R(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \quad (11.1)$$

I_R , I_S e I_T son los valores eficaces de las intensidades de las fases. La potencia activa que absorbe el receptor que origina esas intensidades, que se suponen sinusoidales, es

$$P = VI_R \cos \varphi_R + VI_S \cos \varphi_S + VI_T \cos \varphi_T \quad (11.2)$$

V es el valor eficaz de la tensión entre cada fase y el neutro. φ_R la diferencia de fase entre la tensión instantánea v_R , medida entre la fase R y el neutro, y la intensidad instantánea i_R , que circula hacia el receptor por esa fase; φ_S es la diferencia de fase entre v_S e i_S , y φ_T la diferencia de fase entre v_T e i_T .

Si la misma potencia P dada por (11.2) fuera absorbida en cada momento por un receptor cuyas intensidades estuvieran equilibradas y su factor de potencia fuera la unidad, la intensidad de cada fase de ese receptor sería

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U} = \frac{P}{3V} = \frac{I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T}{3}$$

Y entonces la potencia que se perdería en la resistencia del sistema trifásico por eliminación de esas dos causas de pérdidas, desequilibrio y factor de potencia, sería la mínima, de valor

$$\begin{aligned}
 P_{pmi} &= 3RI^2 = 3R \left(\frac{I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T}{3} \right)^2 = \\
 &= \frac{R}{3} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 \quad (11.3)
 \end{aligned}$$

El cociente de estas potencias, es decir, el cociente entre la potencia que realmente se pierde y la mínima, es

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)}{(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2} \quad (11.4)$$

siempre mayor o igual que uno. Vale la unidad cuando los valores eficaces de las tres intensidades son iguales y los cosenos de los tres ángulos valen uno, es decir si el receptor está equilibrado y su factor de potencia es la unidad.

La energía que se pierde en el sistema eléctrico durante el periodo de facturación se obtiene integrando (11.1) en ese periodo de facturación:

$$W_p = \int_0^{t_r} P_p dt = R \int_0^{t_r} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) dt \quad (11.5)$$

La que se perdería si el receptor estuviera equilibrado y su factor de potencia fuera la unidad, se obtiene integrando (11.3) también en el periodo de facturación, y es

$$W_{pmi} = \int_0^{t_r} P_{pmi} dt = \frac{R}{3} \int_0^{t_r} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 dt \quad (11.6)$$

por lo que el cociente de pérdida de energía debido al factor de potencia y al desequilibrio durante el periodo de facturación es

$$c_{d\varphi} = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{3 \int_0^{t_r} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) dt}{\int_0^{t_r} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 dt} \quad (11.7)$$

Si el receptor es de cuatro hilos, y se supone que la resistencia del neutro es la misma que la de las fases, la (11.4) se transforma en

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2)}{(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2}$$

Y la (11.5) se transforma en

$$W_p = R \int_0^{t_r} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt \quad (11.8)$$

La energía mínima sigue siendo la dada por (11.6), pues es la que se pierde si el receptor está equilibrado y el factor de potencia vale uno, por lo que no hay tampoco ahora intensidad por el neutro. Por tanto, la (11.7) para receptor de cuatro hilos se transforma en

$$c_{d\phi} = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{3 \int_0^{t_r} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt}{\int_0^{t_r} (I_R \cos \phi_R + I_S \cos \phi_S + I_T \cos \phi_T)^2 dt} \quad (11.9)$$

Si el receptor está equilibrado y su factor de potencia es uno, $I_R = I_S = I_T = I$, $I_N = 0$ y $\cos \phi_R = \cos \phi_S = \cos \phi_T = 1$, con lo que (11.7) y (11.9) resultan:

$$c_{d\phi} = \frac{3 \int_0^{t_r} 3I^2 dt}{\int_0^{t_r} (3I)^2 dt} = 1$$

Que es el valor mínimo de este cociente de pérdida de energía.

Como las intensidades se suponen sinusoidales, se podrían utilizar sus valores máximos. Como $I_R^2 = I_{Rm}^2/2$ y de forma similar para el resto de las intensidades, la (11.9) se puede escribir así:

$$c_{d\phi} = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{3 \int_0^{t_r} (I_{Rm}^2 + I_{Sm}^2 + I_{Tm}^2 + I_{Nm}^2) dt}{\int_0^{t_r} (I_{Rm} \cos \phi_R + I_{Sm} \cos \phi_S + I_{Tm} \cos \phi_T)^2 dt} \quad (11.10)$$

11.2.1. Medida del cociente de pérdida de energía debido al factor de potencia y al desequilibrio de las intensidades de cargas trifásicas

Se trata de obtener (11.7) y (11.9) con el equipo ya descrito. La red de adecuación y captación de señales es la misma empleada anteriormente para receptores trifásicos Figura 133 (página 227). Han de captarse en cada intervalo Δt las ondas instantáneas i_R , i_S , i_T , v_R , v_S y v_T . Con la programación adecuada de LabVIEW, de ellas se obtienen el valor instantáneo $i_N = i_R + i_S + i_T$ y los ángulos de desfase ϕ_R entre v_R e i_R , ϕ_S entre v_S e i_S , y ϕ_T entre v_T e i_T . De los valores instantáneos, el programa

ha de hallar los valores eficaces I_R , I_S , I_T e I_N , y, con ellos, ya puede calcularse los productos $\left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2\right)\Delta t$ y $\left(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T\right)^2 \Delta t$, que se suman a los anteriores respectivos para, al final del periodo de facturación, realizar la operación que proporciona el cociente $c_{d\varphi}$:

$$c_{d\varphi} \approx \frac{3 \sum_0^{t_f} \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2\right) \Delta t}{\sum_0^{t_f} \left(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T\right)^2 \Delta t} \quad (11.11)$$

Si el receptor es de tres hilos, no hay intensidad del neutro, y pueden captarse solo dos intensidades de fase, por ejemplo, i_R e i_S . De ellas el programa debe obtener $i_T = -i_R - i_S$. A partir de aquí el programa debe efectuar las mismas operaciones que con cuatro hilos, para terminar calculando (11.11), teniendo en cuenta que $I_N = 0$.

En vez de obtener los valores eficaces de las intensidades en cada Δt , se pueden obtener sus valores máximos. Entonces se programaría LabVIEW para que realizara la operación correspondiente a (11.10):

$$c_{d\varphi} \approx \frac{3 \sum_0^{t_f} \left(I_{Rm}^2 + I_{Sm}^2 + I_{Tm}^2 + I_{Nm}^2\right) \Delta t}{\sum_0^{t_f} \left(I_{Rm} \cos \varphi_R + I_{Sm} \cos \varphi_S + I_{Tm} \cos \varphi_T\right)^2 \Delta t}$$

11.3. Cociente de pérdida de energía debida a la demanda de potencia, al factor de potencia, y al desequilibrio de las intensidades de receptores trifásicos

Al definir el cociente de pérdida de energía anterior se ha supuesto que el receptor que producía las menores pérdidas de energía absorbía para cada valor del tiempo la misma potencia activa que el verdadero. Como ahora se quiere introducir el reparto uniforme del consumo de

energía, el receptor ideal debe absorber una potencia P_{t_r} constante durante todo el tiempo de facturación, que debe valer

$$P_{t_r} = \frac{W}{t_f} \quad (11.12)$$

donde W es la energía que ha absorbido el receptor real durante el periodo de facturación, t_f .

Por tanto, ahora la energía que se pierde en la resistencia del sistema trifásico se considera que es mínima si ocurre a la vez que el receptor esté equilibrado, que su factor de potencia valga uno, y que su potencia sea constante durante todo el periodo de facturación con el valor dado por (11.12). Para este receptor, el valor eficaz de la intensidad de cada fase sería constante durante el periodo de facturación, y valdría

$$I = \frac{P_t}{\sqrt{3}U} = \frac{P_t}{3V} = \frac{W}{3Vt_f}$$

La intensidad del neutro sería cero. U es el valor eficaz de la tensión entre fases, V es el valor eficaz de la tensión entre fase y neutro, W es, como se ha dicho, la energía que ha absorbido el receptor real durante el periodo de facturación, y t_f es el tiempo que dura ese periodo de facturación.

Resulta por tanto que la potencia mínima y constante que se perdería durante el periodo de facturación sería

$$P_{pmi} = 3RI^2 = 3R \left(\frac{W}{3Vt_f} \right)^2 = \frac{R}{3} \left(\frac{W}{Vt_f} \right)^2$$

Por tanto, ahora el cociente de pérdida de potencia para un receptor de tres conductores vale

$$\begin{aligned} \frac{P_p}{P_{pmi}} &= \frac{R(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)}{\frac{R}{3} \left(\frac{W}{Vt_f} \right)^2} = \frac{3t_f^2 V^2 (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)}{\left(\int_0^{t_f} (VI_R \cos \varphi_R + VI_S \cos \varphi_S + VI_T \cos \varphi_T) dt \right)^2} = \\ &= \frac{3t_f^2 (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)}{\left(\int_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T) dt \right)^2} \end{aligned}$$

Y para un receptor de cuatro conductores

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3t_f^2 (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2)}{\left(\int_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T) dt \right)^2}$$

La energía mínima que se perdería en la resistencia del sistema trifásico es

$$\begin{aligned} W_{pmi} &= \int_0^{t_f} P_{pmi} dt = \frac{R}{3} \left(\frac{W}{V t_f} \right)^2 t_f = \frac{R}{3 t_f} \left(\frac{W}{V} \right)^2 = \\ &= \frac{R}{3 t_f} \left(\frac{\left(\int_0^{t_f} (V I_R \cos \varphi_R + V I_S \cos \varphi_S + V I_T \cos \varphi_T) dt \right)^2}{V^2} \right) = \\ &= \frac{R}{3 t_f} \left(\int_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T) dt \right)^2 \end{aligned}$$

La energía que realmente se pierde sigue dada por (11.5) o (11.8), según se trate de suministro con tres o cuatro hilos. Por tanto, el cociente de pérdida de energía por desequilibrio, factor de potencia y consumo de potencia es

$$\begin{aligned} c_{d\varphi P} &= \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{R \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt}{\frac{R}{3 t_f} \left(\int_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T) dt \right)^2} = \\ &= \frac{3 t_f \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt}{\left(\int_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T) dt \right)^2} \quad (11.13) \end{aligned}$$

O, si se quieren utilizar los valores máximos de las intensidades,

$$c_{d\varphi P} = \frac{3 t_f \int_0^{t_f} (I_{Rm}^2 + I_{Sm}^2 + I_{Tm}^2 + I_{Nm}^2) dt}{\left(\int_0^{t_f} (I_{Rm} \cos \varphi_R + I_{Sm} \cos \varphi_S + I_{Tm} \cos \varphi_T) dt \right)^2} \quad (11.14)$$

En (11.13) y (11.14) $I_N = I_{Nm} = 0$ en receptores trifásicos de tres conductores.

11.3.1. Medida del cociente de pérdida de energía debido al factor de potencia, al desequilibrio, y al consumo de potencia de receptores trifásicos

Hay que obtener (11.13). Para ello, con el equipo habitual, se obtienen las ondas de las intensidades i_R , i_S e i_T de las fases, así como v_R , v_S y v_T , al comienzo de cada intervalo Δt a partir del inicio del periodo de facturación. De esas ondas, el programa de LabVIEW ha de obtener $i_N = i_R + i_S + i_T$, los ángulos φ_R , φ_S y φ_T de desfase entre v_R , v_S y v_T , e i_R , i_S e i_T respectivamente, y los valores eficaces I_R , I_S , I_T e I_N . Con ellos, el programa ha de hallar el producto $(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2)\Delta t$ y sumarlo a los productos similares hallados en los intervalos anteriores desde que comenzó el periodo de facturación. También ha de hallar el producto $(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)\Delta t$ y sumarlo de la misma manera a la suma de los similares hallados en los intervalos Δt anteriores desde el comienzo del periodo de facturación y elevarlo al cuadrado. El programa ha de hacer todas estas operaciones dentro del tiempo Δt . Como en casos anteriores, la suma de todos los Δt debe ser el periodo de facturación t_f . Al final de ese tiempo t_f el programa ha de efectuar la operación

$$c_{d\phi P} = \frac{3t_f \sum_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) \Delta t}{\left(\sum_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T) \Delta t \right)^2}$$

que es la medida del cociente buscado. Se pueden obtener los valores máximos de las intensidades en vez de los valores eficaces. Entonces el programa debe hacer la operación correspondiente a (11.14), es decir,

$$c_{d\phi P} = \frac{3t_f \sum_0^{t_f} (I_{Rm}^2 + I_{Sm}^2 + I_{Tm}^2 + I_{Nm}^2) \Delta t}{\left(\sum_0^{t_f} (I_{Rm} \cos \varphi_R + I_{Sm} \cos \varphi_S + I_{Tm} \cos \varphi_T) \Delta t \right)^2}$$

11.4. Cociente de pérdida de energía debida al factor de potencia, al desequilibrio y a la deformación de las ondas de las intensidades de receptores trifásicos

De los cocientes de pérdidas por diferentes causas simultáneas citados antes, hemos supuesto siempre que las ondas de intensidad son sinusoidales, que no están deformadas. Pero esto en realidad pocas veces, o quizá casi nunca, es cierto. Por eso esta causa puede añadirse en todos los casos y así los resultados son mucho más próximos a la realidad. Pues no considerar la deformación de las ondas de intensidad supone cometer siempre un error en la medida de la potencia que absorbe el receptor en cada momento, ya que las fórmulas en las que se basan las medidas de esos cocientes de pérdidas suponen que las ondas de las intensidades son sinusoidales.

Introducir en todos los casos la deformación de la onda de intensidad para obtener los cocientes, no resulta tampoco nada difícil, ya que la única acción que se requiere es una adecuada programación de LabVIEW. En concreto, si se tiene en cuenta la deformación de las ondas de intensidad, la potencia que absorbe un receptor trifásico viene dada siempre por

$$P = VI_{R1} \cos \varphi_{R1} + VI_{S1} \cos \varphi_{S1} + VI_{T1} \cos \varphi_{T1} \quad (11.15)$$

Donde I_{R1} , I_{S1} e I_{T1} son los valores eficaces de los términos fundamentales del desarrollo de Fourier de las intensidades de las fases, y φ_{R1} , φ_{S1} y φ_{T1} las diferencias de fase entre cada tensión simple correspondiente y cada uno de esos términos.

Así la energía que el receptor absorbe durante el periodo de facturación es

$$W = \int_0^{t_r} P dt = V \int_0^{t_r} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt$$

Esta es la única variable que hay que modificar en las fórmulas de todos los cocientes parciales que se consideren si en ello se quiere tener en cuenta la deformación de las ondas de intensidad.

Por ejemplo, un cociente de pérdida de energía que tuviera en cuenta el desequilibrio, el factor de potencia y la deformación de la onda de intensidad, utilizaría (11.15) como potencia que absorbe el receptor en vez de (11.2). Entonces, la potencia mínima que se pierde, que se obtiene si

simultáneamente ocurre que se equilibra el receptor, se corrige su factor de potencia hasta la unidad y las intensidades son sinusoidales, no es la dada por (11.3), sino

$$P_{pmi} = \frac{R}{3} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1})^2$$

El cociente de pérdida de potencia resulta de modificar en el mismo sentido (11.4) así:

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)}{(I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1})^2}$$

Y el cociente de pérdida de energía para receptores de tres hilos de modificar (11.7) así:

$$c_{d\varphi a} = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{3 \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) dt}{\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1})^2 dt}$$

Para cuatro hilos

$$c_{d\varphi a} = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{3 \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt}{\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1})^2 dt}$$

11.4.1. Medida del cociente de pérdida de energía debida al desequilibrio, al factor de potencia y a la deformación de las ondas de las intensidades de receptores trifásicos

La medida de este cociente ha de hacerse de forma casi idéntica a la medida del cociente de pérdida de energía debida al desequilibrio y al factor de potencia, salvo que, ahora, ha de programarse LabVIEW para que, en cada intervalo Δt , determine los valores eficaces I_{R1} , I_{S1} e I_{T1} de los términos fundamentales de los desarrollos de Fourier de las intensidades instantáneas de cada fase, y los ángulos φ_{R1} , φ_{S1} y φ_{T1} de diferencias de fase entre las tensiones, medidas entre las fases correspondientes y el neutro, y el término fundamental del desarrollo de Fourier de la intensidad de esa fase. Para hallar el cociente de pérdida de potencia debida al desequilibrio, al factor de potencia y a la deformación

de las ondas de intensidad de un receptor de tres hilos, el programa ha de hacer la operación

$$c_{d\phi a} \approx \frac{3 \sum_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \Delta t}{\sum_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1})^2 \Delta t}$$

Y para un receptor de cuatro hilos

$$c_{d\phi a} \approx \frac{3 \sum_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) \Delta t}{\sum_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1})^2 \Delta t}$$

11.5. Cociente global de pérdida de energía de receptores trifásicos

Llamaremos cociente global de pérdida de energía de receptores trifásicos al cociente que tiene en cuenta las cuatro causas de pérdida de energía consideradas en esta memoria: el desequilibrio, el factor de potencia, el consumo de potencia activa y la deformación de la onda de intensidad.

Cualquiera que sea el conjunto de causas de pérdida de energía que se considere, la energía que se pierde en la resistencia de un sistema trifásico está dada siempre por (11.5) o (11.8). Es decir, esas dos fórmulas proporcionan el valor de la energía total que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico, sin tener en cuenta la causa, con independencia, incluso, de la forma de las ondas de las intensidades de las fases y del neutro. Pero la potencia mínima de referencia será distinta según las causas que se consideren, que son las causas de pérdida de energía que se anulan para obtener la energía mínima que se pierde; esa energía es mínima, precisamente por la anulación de esas causas.

En este caso del cociente global, se pierde la mínima energía si se eliminan las cuatro causas que se consideran. Por tanto, la potencia del receptor que hiciera perder la mínima energía debería ser constante durante todo el periodo de facturación, lo que implica que esa potencia debe valer $P_{t_f} = W/t_f$. W es la energía que el receptor real ha absorbido

durante el periodo de facturación, t_f , que solo es entregada por los términos fundamentales de los desarrollos de Fourier de las intensidades de las fases, de valores eficaces I_{R1} , I_{S1} e I_{T1} ; es decir,

$$W = V \int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt \quad (11.16)$$

La fórmula (11.16) es en realidad la única diferencia con los casos en que se consideraban intensidades sinusoidales, y, por eso, no se establecía diferencia entre ellas y los términos fundamentales de sus desarrollos de Fourier. Ahora sí, porque, si las intensidades no son sinusoidales y sí son las tensiones, sólo los términos fundamentales del desarrollo de Fourier de las intensidades entregan potencia al receptor.

Por tanto, la potencia constante de ese receptor que absorbería la misma energía W que el receptor real durante todo el periodo de facturación se obtiene dividiendo (11.16) entre t_f :

$$P_{t_f} = \frac{V \int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt}{t_f}$$

Además, las intensidades de las fases deben estar equilibradas, y sus desfases respecto a sus tensiones correspondientes deben ser cero; o sea, que el factor de potencia del receptor, que es cada uno de los cosenos de esos ángulos iguales, es la unidad. Estas dos condiciones dan lugar a que la intensidad de cada fase del receptor de potencia P_{t_f} , que produce la menor pérdida de energía durante el periodo de facturación, valga

$$\begin{aligned} I &= \frac{P_{t_f}}{\sqrt{3}U} = \frac{W}{3Vt_f} = \frac{V \int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt}{3Vt_f} = \\ &= \frac{\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt}{3t_f} \end{aligned}$$

Estas tres intensidades iguales de las fases dan lugar a una pérdida de potencia mínima constante en la resistencia del sistema eléctrico de valor

$$P_{pmi} = 3RI^2 = \frac{R}{3t_f^2} \left(\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt \right)^2$$

De forma que la energía mínima que se pierde durante el periodo de facturación es

$$W_{pmi} = P_{pmi} t_f = \frac{R}{3t_f} \left(\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt \right)^2$$

Y el cociente global de pérdida de energía para tres hilos es

$$\begin{aligned} c_{aPd\varphi} &= \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{R \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) dt}{\frac{R}{3t_f} \left(\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt \right)^2} = \\ &= \frac{3t_f \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) dt}{\left(\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt \right)^2} \end{aligned}$$

Y para cuatro hilos

$$c_{aPd\varphi} = \frac{W_p}{W_{pmi}} = \frac{3t_f \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt}{\left(\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt \right)^2} \quad (11.17)$$

que es semejante en la forma a la (11.13), con la diferencia de que en el denominador de (11.17) aparecen los valores eficaces y los desfases de los términos fundamentales de las intensidades de las fases.

11.5.1. Medida del cociente global de pérdida de energía de receptores trifásicos

Hay que hacer la operación del último miembro de (11.17). Con el equipo de medida ya descrito, se captan las intensidades instantáneas i_R , i_S e i_T de las fases, y las tensiones instantáneas v_R , v_S y v_T durante la primera parte del intervalo Δt . Debe elaborarse un programa de LabVIEW que halle la intensidad instantánea $i_N = i_R + i_S + i_T$, que halle los términos fundamentales de los desarrollos de Fourier de las intensidades de las fases i_{R1} , i_{R2} e i_{R3} , que halle las diferencias de fase φ_{R1} , φ_{R2} y φ_{R3} entre las tensiones v_R , v_S y v_T y los términos fundamentales de las intensidades respectivas. De esos datos el programa ha de obtener los valores eficaces de las intensidades de las fases y del neutro, I_R , I_S , I_T e

I_N , y realizar el producto $(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2)\Delta t$, que ha de sumar a la suma de los productos similares correspondientes a los anteriores Δt desde el comienzo del periodo de facturación; ha de obtener los valores eficaces de los términos fundamentales de las intensidades de las fases, I_{R1} , I_{S1} e I_{T1} , y realizar el producto $(I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1})\Delta t$, que ha de sumar a la suma de los productos similares anteriores, y realizar la operación

$$c_{aPd\varphi} \approx \frac{3t \sum_0^t (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) \Delta t}{\left(\sum_0^t (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) \Delta t \right)^2}$$

t es el tiempo transcurrido desde el comienzo de la medida. El programa ha de efectuar todas estas operaciones dentro del intervalo Δt , y reanudar la misma secuencia de operaciones en el siguiente intervalo Δt , y así sucesivamente. Llegado el final del periodo de facturación, el resultado es el cociente de energía perdida en ese periodo de facturación.

11.5.2. Programa de LabVIEW para obtener el cociente global de pérdida de energía de receptores trifásicos

Este instrumento virtual permite determinar el cociente global de pérdida de energía debida a las características de los receptores trifásicos. Simulará o captará las medidas de un aparato real a través de la tarjeta de captación de datos, mostrará el valor del cociente calculado a partir de ellas, y representará en una gráfica su evolución desde el inicio del periodo de facturación.

11.5.2.1. Panel frontal

Su panel frontal está distribuido en cinco secciones.

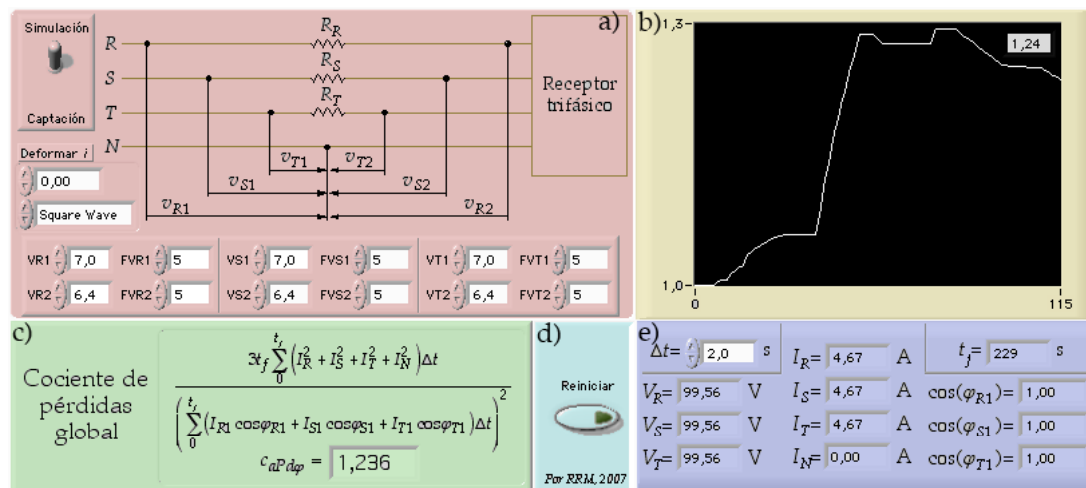


Figura 200.- Zonas en que está dividido el panel frontal del instrumento virtual.

- La zona a) contiene un esquema de las medidas que hará la tarjeta de captación de datos y del tipo de receptor sobre el que se está trabajando. A la izquierda de este esquema está el botón de *Simulación/Captación* de medidas, que permite al usuario escoger entre realizar la captación de datos desde la tarjeta instalada en el ordenador o simular esos datos. Debajo de este interruptor se encuentra la zona *Deformar i*, donde se define la amplitud y la forma de la onda deformadora, por ese orden; se puede escoger cualquier tipo de onda deformadora de estas cuatro: *Sine waveform* (Onda sinusoidal), *Triangle wave* (Onda triangular), *Square wave* (Onda cuadrada) y *Sawtooth wave* (Onda de diente de sierra). En la parte inferior de la zona a) están los campos que permiten al usuario establecer los valores eficaces y las fases iniciales de las seis tensiones simuladas que se representan en el esquema.
- La zona b) contiene la evolución del cociente de pérdidas desde el inicio del tiempo de facturación hasta el instante actual. Además, en el campo superior derecho muestra el último valor representado en la gráfica.
- La zona c) indica al usuario, mediante un letrero, qué cociente se puede obtener con este instrumento virtual; en este caso es el *Cociente de pérdidas global*, $c_{aPd\phi}$. A la derecha del letrero se indica la ecuación que el programa usa para determinarlo. Por último, en el campo que está bajo la ecuación, el instrumento indica en todo momento el valor actual de $c_{aPd\phi}$.

- En la zona d) está el botón para reiniciar la medida y comenzar un nuevo periodo de facturación.
- En la zona e), se puede seleccionar el valor de Δt , que es el intervalo de tiempo que el usuario desea usar entre medidas. También aparecen los valores de t_f , que es el tiempo de facturación medido en segundos, los valores eficaces de las tensiones de cada terminal de la carga con respecto al terminal del hilo neutro, los valores eficaces de las intensidades que circulan por cada fase y el hilo neutro, y el coseno del desfase entre la tensión y el término fundamental de la intensidad de cada fase.

Debajo de la parte del instrumento virtual que ve el usuario están algunos valores que no son interesantes, pero que deben aparecer en el panel frontal por exigencias de la programación.

Valores auxiliares que el usuario no necesita conocer

Numerador 1	Ini Dt (ms)	I1r	Simulado? <input checked="" type="checkbox"/>
18906,58	17306044	4,67	
Denominador 1	Fin Dt (ms)	I1s	
3238,70	17306044	4,67	I1n
Tick inicio medida	Dtr (s)	I1t	0,00
17077425	2,00	4,67	

Figura 201.- Otros resultados de escaso interés para el usuario permanecen ocultos.

11.5.2.2. Diagrama de conexiones

A continuación se explica someramente la programación que se ha realizado para crear este instrumento virtual. Se ha basado en el programa que determina el cociente de pérdidas por deformación de las ondas de intensidad en receptores trifásicos.

11.5.2.2.1. Estructura principal

Como ha ocurrido en todos los programas anteriores, no ha sido necesario modificar la estructura principal de este instrumento: sigue estando formada exclusivamente por una *estructura secuencial* con cuatro *fotogramas*.

11.5.2.2.2. Fotograma 0

Aquí se ha programado la inicialización del instrumento virtual, lo que permite iniciar un nuevo periodo de facturación, t_f . Esto se logra poniendo a cero todas las variables que almacenan un dato permanentemente, como son *Numerador 1*, *Denominador 1*, t_f (s), y la historia de la gráfica.

Además se almacena en sendas variables el instante de inicio de t_f y el del primer Δt .

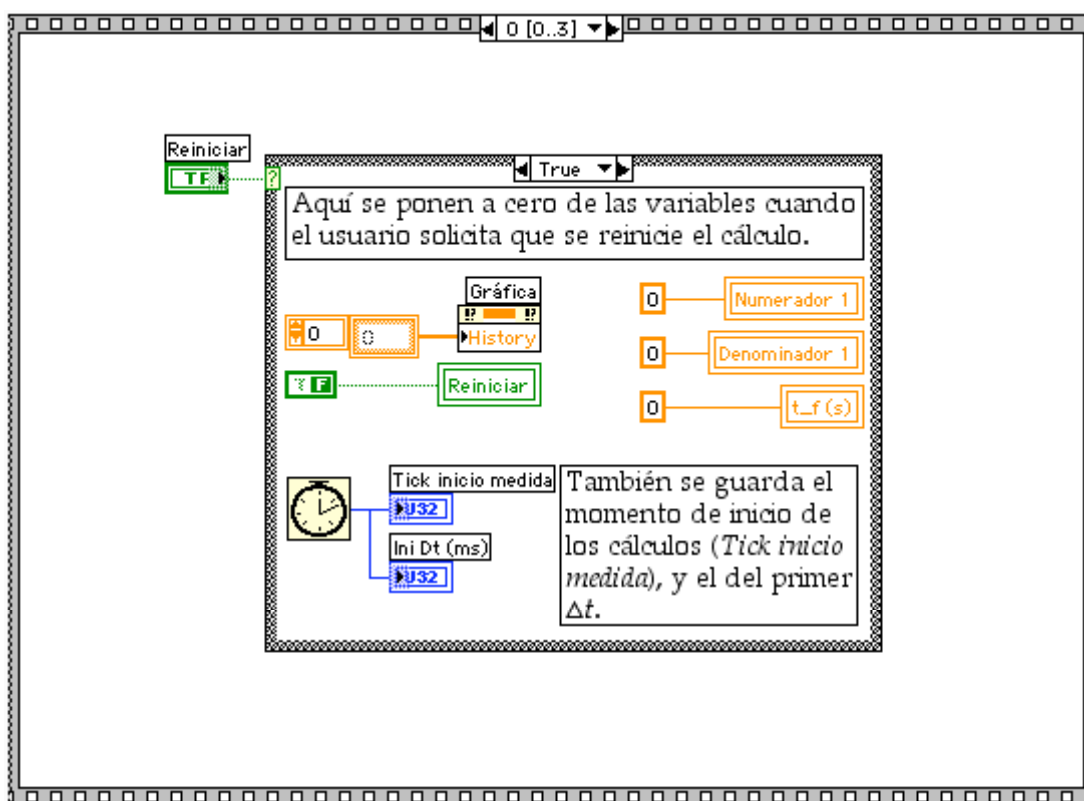


Figura 202.- *Fotograma 0* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

11.5.2.2.3. Fotograma 1

En este fotograma se programa la captación o simulación de las ondas de tensión que sirven para obtener los valores de las tensiones del receptor, sus intensidades, los cosenos de los desfases entre la tensión y el respectivo término fundamental de la intensidad de cada fase, así como el valor eficaz del primer armónico del desarrollo de Fourier de la intensidad de cada fase y del hilo neutro.

Además, también se encarga de mostrar u ocultar los campos que se usan para simular las ondas de tensión captadas.

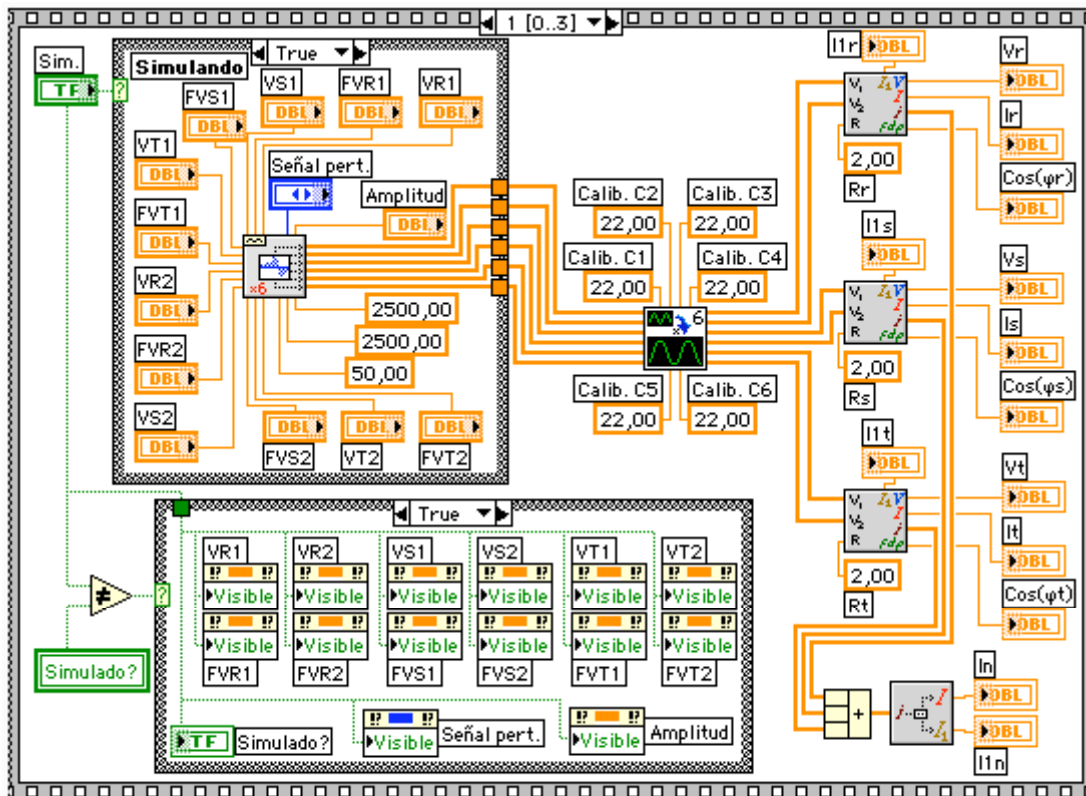


Figura 203.- Fotografía 1 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

Todo se ha hecho como se explicó en el instrumento para determinar el cociente de pérdidas por deformación de las ondas de intensidad en receptores trifásicos.

11.5.2.2.4 Fotografía 2

Programado para determinar los valores de Δt y del tiempo que ha transcurrido desde que se inició la medida del cociente actual hasta este momento.

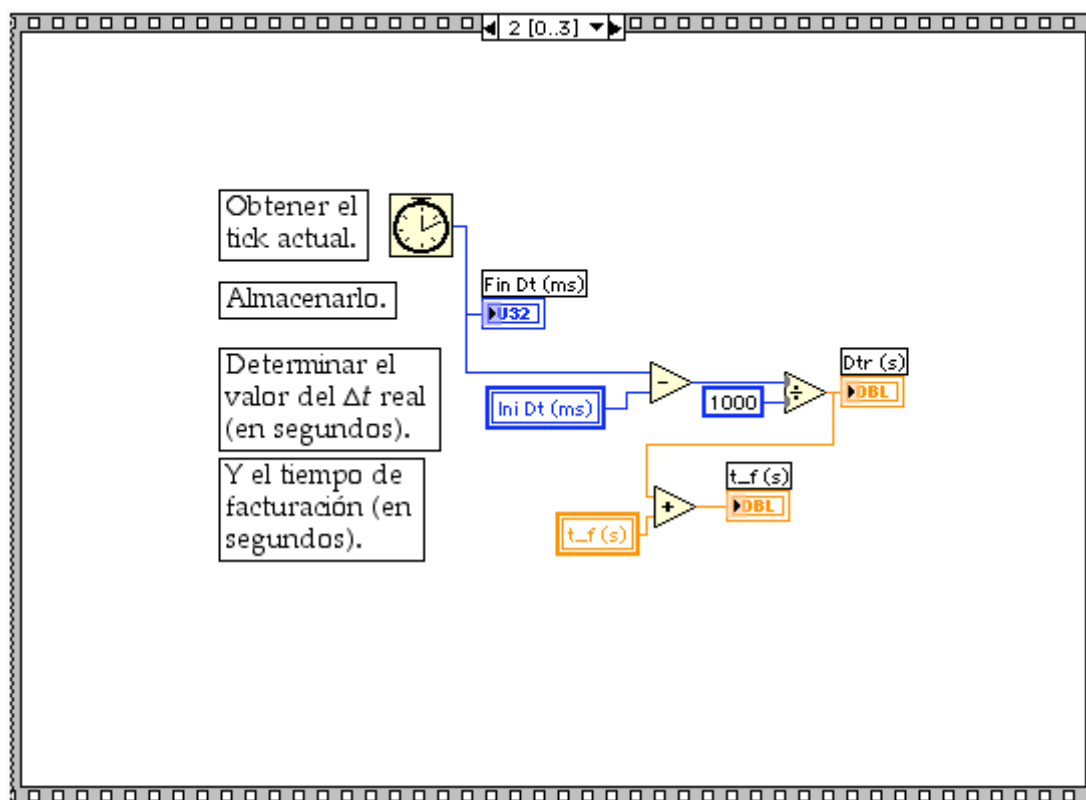


Figura 204.- Fotografía 2 de los cuatro que componen la estructura secuencial principal del programa.

11.5.2.2.5. Fotografía 3

En este último fotograma se ha programado el cálculo del cociente global y la representación los resultados en el panel frontal, además de la preparación para el siguiente intervalo, y la espera entre medidas para respetar Δt .

En la parte superior del fotograma se calcula el cociente empleando la fórmula

$$c_{aPd\phi} \approx \frac{3t \sum_0^t \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2 \right) \Delta t}{\left(\sum_0^t \left(I_{R1} \cos \phi_{R1} + I_{S1} \cos \phi_{S1} + I_{T1} \cos \phi_{T1} \right) \Delta t \right)^2}$$

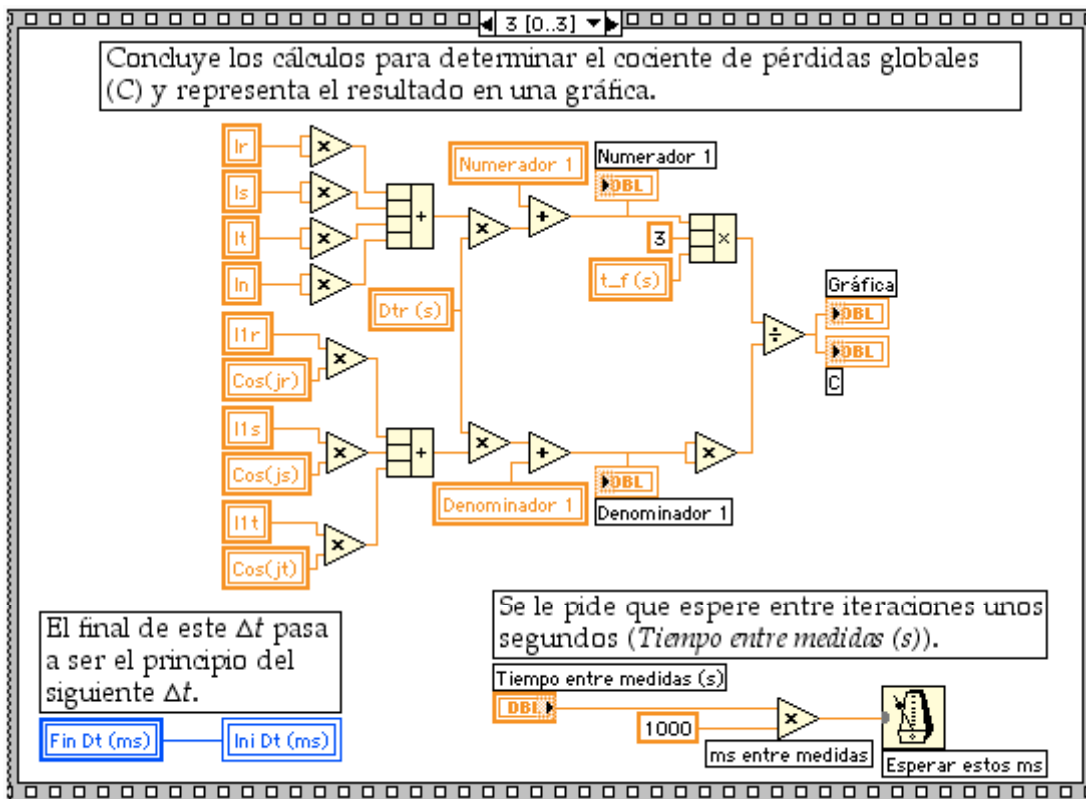


Figura 205.- *Fotograma 3* de los cuatro que componen la *estructura secuencial* principal del programa.

El cálculo del numerador (Figura 206) se realiza elevando al cuadrado el valor eficaz de las intensidades de cada fase y del hilo neutro, obtenidos en el fotograma 1, y, tras sumarlos todos, el resultado se multiplica por Δt , calculado en el fotograma anterior. Seguidamente se procede a realizar el sumatorio en la forma que ya se ha explicado, y el resultado se multiplica por 3 y por el tiempo que lleva el instrumento calculando el cociente, que se había almacenado en la variable $t_f(s)$ en el fotograma anterior.

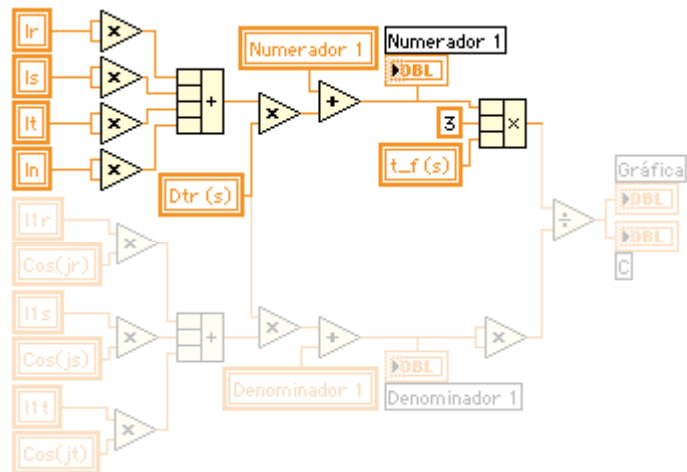


Figura 206.- Cálculo del numerador del cociente global de pérdida de energía debida a cargas trifásicas.

Para calcular el denominador (Figura 207) se multiplica el valor eficaz del término fundamental del desarrollo de Fourier de la intensidad de cada fase por el coseno del desfase entre la tensión de esa fase y el primer armónico de su intensidad, valores que se obtuvieron en el fotograma 1. Tras sumar estos tres productos se multiplica el resultado por Δt y se realiza el sumatorio. Finalmente se eleva al cuadrado el resultado.

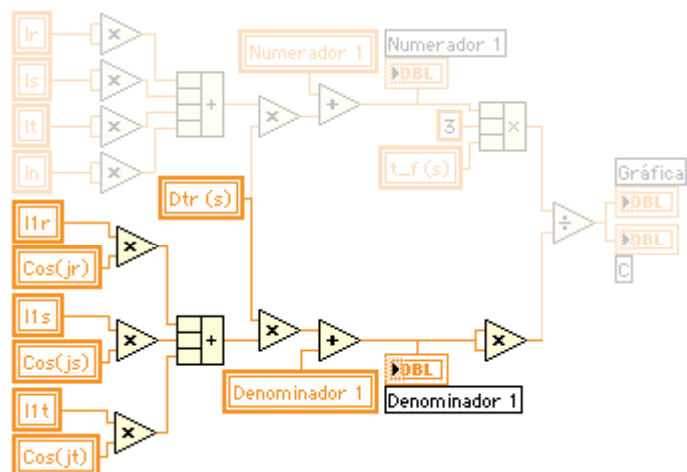


Figura 207.- Cálculo del denominador del cociente global de pérdida de energía debida a cargas trifásicas.

El último paso para obtener el cociente consiste en dividir el numerador entre el denominador y llevar el resultado a la gráfica y al indicador que muestra el valor actual del cociente, $c_{aPd\phi}$ (Figura 208).

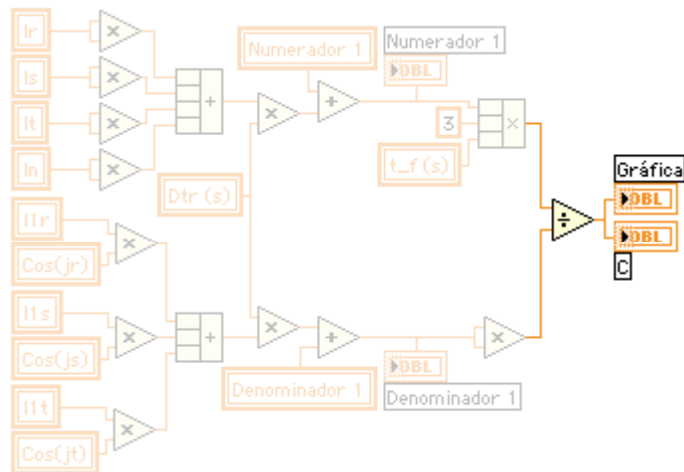


Figura 208.- Obtención del cociente global de pérdida de energía debida a cargas trifásicas.

La última parte del programa es la programación encargada de hacer que el tiempo final del Δt actual sea el tiempo de inicio del Δt siguiente. También se programa aquí la parada solicitada por el usuario.

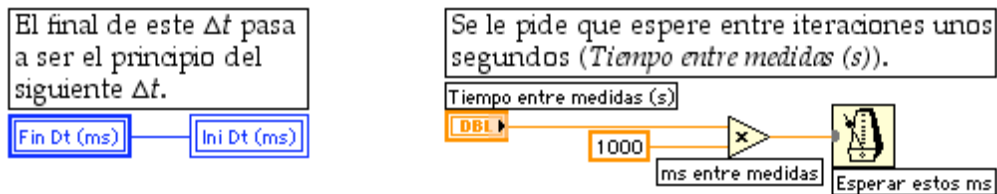


Figura 209.- Últimas acciones del fotograma 3.

11.6. Resumen de resultados del análisis de pérdidas de receptores trifásicos

Debida al factor de potencia y al desequilibrio de las intensidades

Cociente de potencias de cargas de tres hilos

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)}{(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2}$$

donde I_R , I_S e I_T son los valores eficaces de las intensidades de las fases, y $\cos \varphi_R$, $\cos \varphi_S$ y $\cos \varphi_T$ son los cosenos de los desfases entre las tensiones simples de las fases y sus respectivas intensidades.

Cociente de pérdidas de cargas de tres hilos

$$c_{d\varphi} = \frac{3 \int_0^{t_r} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) dt}{\int_0^{t_r} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 dt}$$

Cociente de potencias de cargas de cuatro hilos

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3 (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2)}{(I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2}$$

donde I_N es el valor eficaz de la intensidad del hilo neutro.

Cociente de pérdidas de cargas de cuatro hilos

$$c_{d\varphi} = \frac{3 \int_0^{t_r} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt}{\int_0^{t_r} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T)^2 dt}$$

Debida a la demanda de potencia, al factor de potencia, y al desequilibrio de las intensidades**Cociente de potencias de cargas de tres hilos**

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3 t_f^2 (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)}{\left(\int_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T) dt \right)^2}$$

donde t_f es el tiempo de facturación, I_R , I_S e I_T son los valores eficaces de las intensidades de las fases, y $\cos \varphi_R$, $\cos \varphi_S$ y $\cos \varphi_T$ son los cosenos de los desfases entre las tensiones simples de las fases y sus respectivas intensidades.

Cociente de pérdidas de cargas de tres hilos

$$c_{d\varphi P} = \frac{3 t_f \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) dt}{\left(\int_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T) dt \right)^2}$$

Cociente de potencias de cargas de cuatro hilos

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3t_f^2 (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2)}{\left(\int_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T) dt \right)^2}$$

donde I_N es el valor eficaz de la intensidad del hilo neutro.

Cociente de pérdidas de cargas de cuatro hilos

$$c_{d\varphi P} = \frac{3t_f \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt}{\left(\int_0^{t_f} (I_R \cos \varphi_R + I_S \cos \varphi_S + I_T \cos \varphi_T) dt \right)^2}$$

Debida al factor de potencia, al desequilibrio y a la deformación de las ondas de las intensidades**Cociente de potencias de cargas de tres hilos**

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3(I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2)}{(I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1})^2}$$

donde I_R , I_S e I_T son los valores eficaces de las intensidades de las fases, I_{R1} , I_{S1} e I_{T1} los valores eficaces de los términos fundamentales del desarrollo de Fourier de las intensidades de las fases, y $\cos \varphi_{R1}$, $\cos \varphi_{S1}$ y $\cos \varphi_{T1}$ los cosenos de los desfases entre las tensiones simples de las fases y los términos fundamentales de sus intensidades.

Cociente de pérdidas de cargas de tres hilos

$$c_{d\varphi a} = \frac{3 \int_0^{t_f} (I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2) dt}{\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1})^2 dt}$$

Cociente de potencias de cargas de cuatro hilos

$$\frac{P_p}{P_{pmi}} = \frac{3(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2)}{(I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1})^2}$$

donde I_N es el valor eficaz de la intensidad del hilo neutro.

Cociente de pérdidas de cargas de cuatro hilos

$$c_{d\varphi a} = \frac{3 \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt}{\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1})^2 dt}$$

Cociente global**Cociente de pérdidas de cargas de tres hilos**

$$c_{aPd\varphi} = \frac{3 t_f \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) dt}{\left(\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt \right)^2}$$

donde t_f es el tiempo de facturación, I_R , I_S e I_T los valores eficaces de las intensidades de las fases, I_{R1} , I_{S1} e I_{T1} los valores eficaces de los términos fundamentales del desarrollo de Fourier de las intensidades de las fases, y $\cos \varphi_{R1}$, $\cos \varphi_{S1}$ y $\cos \varphi_{T1}$ los cosenos de los desfases entre las tensiones simples de las fases y los términos fundamentales de sus intensidades.

Cociente de pérdidas de cargas de cuatro hilos

$$c_{aPd\varphi} = \frac{3 t_f \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt}{\left(\int_0^{t_f} (I_{R1} \cos \varphi_{R1} + I_{S1} \cos \varphi_{S1} + I_{T1} \cos \varphi_{T1}) dt \right)^2}$$

donde I_N es el valor eficaz de la intensidad del hilo neutro.

12. Comparación de pérdidas de energía según las causas que las originan

12.1. Introducción

En este capítulo se tratará de comparar la importancia, en la pérdida de energía, de las causas estudiadas. Como es bien sabido, y se ha dicho ya en esta memoria, la potencia reactiva de los receptores, su factor de potencia distinto de la unidad, es considerada en la actualidad por los responsables de los sistemas eléctricos de energía, como la única causa merecedora de atención para disminuir la pérdida de energía achacable a los receptores. Aunque, como también se ha mostrado, esas pérdidas se miden inadecuadamente a través del consumo de energía reactiva. La exclusiva atención a ese único factor podría transmitir la sensación de que el consumo de potencia reactiva es la causa más importante de pérdidas. Por eso, en este capítulo se tratará de comparar la energía que se pierde por cada una de las otras causas, con la que se pierde por el consumo de potencia reactiva. Se limitará el estudio a los sistemas trifásicos, de los que se obtendrá la información más útil, pues son los más ampliamente utilizados como sistemas eléctricos de energía.

12.2. Comparación entre la energía que se pierde por desequilibrio de las intensidades de un receptor trifásico, con la que se pierde por su consumo de potencia reactiva

En la resistencia de un sistema trifásico de tensiones equilibradas que suministra a un receptor la potencia P se pierde la menor potencia si el receptor está equilibrado y su factor de potencia vale uno. Ya se halló que esa potencia mínima vale

$$P_{pmi} = R_s \frac{P^2}{U^2}$$

R_s es la resistencia de cada fase y U el valor eficaz de la tensión entre dos fases.

Un desequilibrio frecuente en las instalaciones consiste en suministrar potencia por medio de líneas monofásicas que parten de una fase y el neutro. Ya se vio que ese suministro origina una pérdida de potencia igual a seis veces la mínima si el neutro tiene la misma resistencia que las fases, y de nueve veces la mínima si la resistencia del neutro es la mitad que la de las fases.

Compararemos estas pérdidas con las que se producen por el factor de potencia.

La pérdida de potencia que origina un receptor equilibrado debida a su factor de potencia es

$$P_p = R_s \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{P_{pmi}}{\cos^2 \varphi} \quad (12.1)$$

Por tanto, para que ese receptor produjera una pérdida de potencia nueve veces la mínima, debe ocurrir que $\frac{1}{\cos^2 \varphi} = 9$. O sea, que $\cos \varphi = \frac{1}{3} \approx 0.33$.

Este es un factor de potencia inadmisibles, pues es inferior a 0.58, que es el menor que se permite en la facturación, y al que se le aplicaría un recargo a cada kWh consumido del 50.7%, que es el máximo permitido [9][81]. Por tanto, se considera inadmisibles que esa potencia sea perdida por causa de un factor de potencia bajo. En caso de producirse, además de aplicar al consumo de energía el recargo máximo, se obligaría a la corrección del factor de potencia. Sin embargo, como es por desequilibrio, ni siquiera es tenida en cuenta.

Si el neutro tiene la misma resistencia que las fases, la potencia que se pierde es seis veces la mínima. Para que un receptor equilibrado perdiera esa potencia debería ocurrir que $\frac{1}{\cos^2 \varphi} = 6$, o sea, que

$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{6}} \approx 0.41$. Tampoco este factor de potencia es admisible, porque es menor que 0.58, y, también ahora, el recargo sería el máximo, el 50.7% [10].

Si la línea monofásica parte de dos fases, ya se vio que la potencia que se pierde es el doble que la mínima. Para que un receptor trifásico equilibrado que suministra la misma potencia pierda esa potencia, ha de tener un factor de potencia tal que $\frac{1}{\cos^2 \varphi} = 2$, o sea, $\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.71$, que sí es admisible, pero a cuyo consumo de energía se aplicaría un recargo del 21.85% [10].

Como se ve, el desequilibrio de las intensidades como causa de pérdida potencia en la resistencia del sistema eléctrico no es, ni mucho menos desdeñable.

Es verdad que, en las partes del sistema eléctrico muy alejadas de los receptores y más próximas, por tanto, a los generadores, el resultado de la demanda conjunta de muchos receptores desequilibrados, aleatoriamente repartidos entre las fases, tiende a equilibrar las intensidades de las fases cerca de los receptores, por lo que las mayores pérdidas de energía por desequilibrio suelen producirse en la parte del sistema eléctrico próxima a los consumidores, pero aún así, no parece que, por su magnitud, estas pérdidas puedan ser ignoradas.

La potencia que se pierde por el desequilibrio debido a la derivación de líneas monofásicas que parten de líneas trifásica para alimentar receptores monofásicos, está limitada a nueve o seis veces la potencia mínima, como se ha dicho más arriba. Pero esta no es la mayor pérdida de potencia que puede originarse por desequilibrio. En realidad, los receptores trifásicos desequilibrados pueden originar relaciones de pérdida de potencia sin límite alguno. Dicho de manera más precisa: el cociente entre la potencia que se pierde por su desequilibrio y la mínima que podría perderse, no tiene cota superior. Por tanto, los ejemplos expuestos arriba, aunque pueden ser los más frecuentes en las instalaciones ordinarias, no son los casos extremos de receptores que originen las mayores pérdidas de potencia. A pesar de ello, hasta ahora, no se ha aplicado ningún medio para medir esas pérdidas y, ni siquiera, para detectarlas.

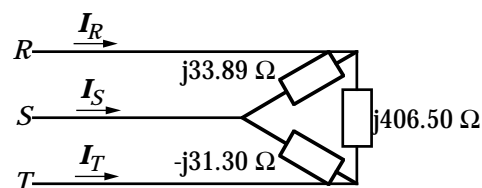


Figura 210.- El receptor trifásico de la figura no absorbe potencia activa ni potencia reactiva, pero el valor eficaz de cada

intensidad de fase es 11.74 A. Por tanto produce pérdida de energía.

En la Figura 210 se muestra un caso extremo: el receptor trifásico no absorbe potencia activa, por lo que, para este caso, $P_{pmi} = R_s \frac{P^2}{U^2} = 0$. Sin embargo, sí origina pérdida de potencia por desequilibrio. El valor de esa pérdida de potencia es $P_p = 3R_s I^2$, que no es cero. I es el valor eficaz de la intensidad de una fase cualquiera, pues los tres valores eficaces son iguales (en la referencia [44] se explica por qué). Pero esa pérdida de potencia no puede hallarse mediante la fórmula (12.1), pues también $\cos \varphi = 0$, por lo que (12.1) resulta un cociente en el que el numerador y el denominador son cero. Tampoco, por tanto, la potencia reactiva que absorbe ese receptor es una medida de la pérdida de potencia que origina en el sistema eléctrico, pues la potencia reactiva que absorbe también es cero. Resulta, por consiguiente, que un contador de energía activa colocado delante de un receptor como el de la Figura 210 indica siempre cero, y un contador de energía reactiva también. De hecho, para la compañía suministradora de energía, el único efecto de ese receptor es hacerla perder energía en el sistema eléctrico: no puede facturarle energía activa ni tampoco energía reactiva, pues no absorbe ninguna de las dos. Por tanto, en la actualidad, las pérdidas de energía que receptores como esos originan en el sistema eléctrico, pasan desapercibidas para las empresas de distribución de energía eléctrica. No ocurre así si se aplica el método que se propone en esta memoria, que consiste en medir cocientes de pérdida de energía. En efecto, su valor en este caso sería

$$c_d = \frac{W_p}{W_{pmi}} \rightarrow \frac{3 \int_0^{t_f} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) dt}{0}$$

Que el denominador resulte nulo es consecuencia de que, como el receptor no absorbe energía activa, la mínima energía que debe perderse para absorber esa energía activa (energía cero), es cero. Pero el receptor pierde energía no nula, que es el numerador; por tanto, el cociente c_d tiende a infinito.

12.3. Comparación entre la energía que se pierde por consumo de potencia de un receptor trifásico, con la que se pierde por su consumo de potencia reactiva

La energía que se pierde por extraer energía del sistema eléctrico con potencias altas es también grande. En efecto, si un receptor de potencia activa P extrae una energía W , la pérdida de potencia que origina en la resistencia del sistema eléctrico, ya se vio que vale

$$P_p = R_s \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi}$$

Es decir, la potencia que se pierde es proporcional al cuadrado de la potencia del receptor. Eso significa que, si un consumidor absorbe con potencia constante P_1 la energía W durante la tercera parte del tiempo de facturación, si se supone el mismo factor de potencia, su potencia es tres veces la mínima: $P_2 = 3P_1$, y la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico por su causa es

$$P_p = R_s \frac{P_2^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = R_s \frac{(3P_1)^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = 9 \left(R_s \frac{P_1^2}{U^2 \cos^2 \varphi} \right) = 9P_{pmi}$$

La energía que se pierde por su causa exclusiva en la resistencia del sistema eléctrico es

$$W_p = P_p \frac{t_f}{3} = 9P_{pmi} \frac{t_f}{3} = 3W_{pmi}$$

Ya que la energía mínima que se pierde es

$$W_{pmi} = P_{pmi} t_f$$

Para que un receptor trifásico equilibrado perdiera tres veces la energía mínima por causa de su factor de potencia debería cumplir que $\frac{1}{\cos^2 \varphi} = 3$, o sea, $\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0.58$, y se le aplicaría el máximo recargo del 50.7%.

Esta situación no es nada exagerada. Realmente, muchas veces se consume energía eléctrica de forma más concentrada que la expuesta.

El resultado pone de manifiesto que también a esta causa de pérdidas convendría aplicarle más atención, para reducir la energía que se pierde en el sistema eléctrico.

12.4. Comparación entre la energía que se pierde por deformación de las ondas de las intensidades de un receptor trifásico, y la que se pierde por su consumo de potencia reactiva

La comparación aquí es menos concluyente, pues realmente depende de cómo sea la deformación de las ondas de intensidad en cada caso. A pesar de la abundancia de receptores que deforman las ondas de intensidad, su influencia en las pérdidas globales de energía no es tan importante como la de las otras causas, aunque sí lo puede ser en casos concretos y en aparatos concretos. Por ejemplo, ya se vio que, en una línea monofásica, la potencia que se pierde se duplica si la onda de intensidad es una onda rectificadora de media onda, y que la potencia que se pierde en el hierro de transformadores y de máquinas puede ser importante.

No obstante, la atención que se dedica a la deformación de las ondas de intensidad para disminuirla o eliminarla por medio de filtros es notablemente mayor que a otras causas de pérdidas, no por las pérdidas globales que provoca, sino por las locales, las que se producen en las máquinas con núcleo ferromagnético, que pueden dañarlas o disminuir considerablemente su rendimiento. También por las influencias electromagnéticas que los armónicos pueden generar sobre aparatos sensibles.

13. Optimización energética de receptores

13.1. Introducción

Una vez identificadas con claridad las cuatro causas de pérdida de energía que se han estudiado en los capítulos anteriores, y de haber ideado la forma de medir los cocientes de pérdida de energía, surge la pregunta de si existen procedimientos para disminuir esas pérdidas y, en caso afirmativo, cuáles son y las formas de aplicarlos.

La respuesta inicial es que sí existen esos procedimientos para disminuir esas pérdidas, y algunos de ellos son bien conocidos. No obstante, este capítulo se ocupará, resumidamente, de la forma de utilizarlos para conseguir el mayor ahorro de energía posible.

Una manera muy eficaz de disminuir la energía que se pierde en el sistema eléctrico es actuar directamente sobre los receptores en el momento de su diseño y de su posterior fabricación. Es verdad que un receptor eléctrico se proyecta para desempeñar una función concreta, y los elementos que lo forman y que le hacen realizar esa función pueden dar lugar, como resultado, a un bajo factor de potencia, a deformación de las ondas de las intensidades, a desequilibrios y a potencias altas. Sin embargo, es posible disminuir y hasta eliminar algunas de estas causas de pérdida sin afectar para nada a las funciones para las que el receptor ha sido construido. En lo que sigue se verá cómo hacerlo.

13.2. Mínima potencia posible de los receptores

Como se vio en el capítulo correspondiente, la potencia que se pierde en el sistema eléctrico cuando se conecta sólo un receptor a él, es proporcional al cuadrado de la potencia del receptor. Es decir, que la potencia que se pierde se multiplica por cuatro cada vez que la potencia del receptor que se conecta se multiplica por dos. Pero esa relación cuadrática hace también que la potencia que se pierde por causa de un receptor al ser conectado al sistema eléctrico, sea, en general, muy superior si ya hay otros receptores conectados a ese sistema. Dicho de otra

forma, la potencia que se pierde por la conexión simultánea de dos o más receptores es mayor que la suma de las potencias que se pierden si cada uno estuviera conectado, él solo, al sistema eléctrico.

Si nos fijamos en la energía que absorbe el receptor, lo anterior da lugar a que, como también se vio, la energía que se pierde en el sistema eléctrico cuando el receptor absorbe una determinada energía es inversamente proporcional al tiempo que tarda en absorberla.

Por tanto, una acción para el ahorro consiste en fabricar los receptores con la menor potencia posible, siempre que con esa potencia puedan realizar la función para la que se fabrican. En algunos casos eso puede hacerse fácilmente si el tiempo no es un requisito esencial. Por ejemplo, si un mismo receptor ha de realizar dos o más funciones que absorban potencia, puede realizar primero una función y después, sucesivamente las otras, en vez de realizar dos o más funciones simultáneamente, ya que la potencia eléctrica que absorbe mientras está realizando operaciones simultáneas es mayor que si realiza una después de otra. La energía que ha absorbido al final de su funcionamiento es la misma que si hubiera realizado todas las funciones a la vez, pero la energía que se ha perdido en el sistema eléctrico por causa de su potencia es mucho menor si las funciones las ha realizado sucesivamente.

13.3. Utilización de receptores trifásicos en lugar de receptores monofásicos

Como se vio, la potencia que se pierde en el sistema trifásico por causa de un receptor que absorbe una potencia activa P , es dos veces mayor si el receptor es monofásico y se conecta entre dos fases, que si esa misma potencia es absorbida por un receptor trifásico equilibrado. Incluso si el receptor monofásico que absorbe la potencia P se conecta entre una fase y el neutro, la potencia que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico es seis veces la que se pierde si el receptor que absorbe esa misma potencia es trifásico equilibrado. Incluso llega a ser nueve veces mayor si la sección del neutro es la mitad que la de cada fase, como a veces ocurre.

Estos resultados muestran la conveniencia de utilizar receptores trifásicos equilibrados en lugar de receptores monofásicos allí donde sea posible.

Las lámparas son probablemente los receptores monofásicos que más abundan. Incluso en edificios en los que la instalación es trifásica, como ocurre en fábricas, talleres, almacenes, centros comerciales, polideportivos,

teatros, salas de espectáculos, hoteles, centros de enseñanza, hospitales, etc., la iluminación se hace con lámparas monofásicas. Grandes salas son iluminadas con frecuencia con lámparas conectadas únicamente entre una fase y el neutro, en vez de repartirlas entre las tres fases. Esta práctica es muy frecuente para que sea posible encender y apagar las lámparas desde un único interruptor monofásico.

Puede estudiarse la posibilidad de iluminar con luminarias de tres lámparas, tal como ahora se hace con mucha frecuencia con luminarias fluorescentes de dos. Estas luminarias de tres lámparas se dispondrían para ser conectadas a líneas trifásicas con neutro para el alumbrado. Para ello bastaría conectar las lámparas en estrella, de forma que una gran sala o nave pueda ser iluminada con conjuntos de esas luminarias de tres lámparas. Se conectaría cada luminaria a las tres fases de una línea trifásica, cada lámpara a una fase distinta de las que se conectan las otras dos, y el centro de la estrella al neutro. La conexión al neutro asegura que se mantenga la tensión de cada lámpara muy próxima a la nominal, aunque por avería u otras causas se elimine alguna de ellas [89]. La línea y, por tanto, el alumbrado, podrían ser gobernados por un interruptor trifásico. Así para cada sección de alumbrado.

Esta solución mantendría equilibrada permanentemente cada línea de alumbrado, lo que aproximadamente dividiría por nueve la potencia que se pierde en ella y en la línea que lo alimenta. Si en el resto del alumbrado se hiciera de la misma forma, el avance hacia el ahorro y hacia el equilibrio de las intensidades en todo el sistema eléctrico sería considerable.

Las luminarias de tres lámparas fluorescentes, conectada cada lámpara a una fase distinta, tienen además la ventaja de que eliminan el efecto estroboscópico de las lámparas fluorescentes por la diferencia de fase entre las tensiones de las lámparas, que es $2\pi/3$ radianes, otra cualidad muy útil para toda clase de salas de trabajo.

Lo que se ha dicho sobre las lámparas puede ser extendido a otros casos similares de receptores monofásicos que puedan ser combinados para formar receptores trifásicos, o directamente sustituidos por receptores trifásicos equilibrados, como motores, estufas, etc.

13.4. Equilibrado de receptores trifásicos

Como se vio, un receptor trifásico desequilibrado origina mayores pérdidas de energía que el receptor equilibrado que absorba la misma

potencia que el primero y con el mismo factor de potencia que él. En la tesis doctoral que constituye la referencia [90], realizada en nuestra Área de Ingeniería Eléctrica, se desarrolla un procedimiento que equilibra cualquier receptor trifásico de tres o cuatro terminales por medio de un tripolo de reactancias que se conecta en paralelo con ese receptor trifásico (Figura 211). El tripolo de reactancias no absorbe potencia activa, por lo que el receptor que resulta absorbe la misma potencia activa que el inicial, pero con las intensidades equilibradas, lo que disminuye la potencia que se pierde en la resistencia del sistema trifásico.

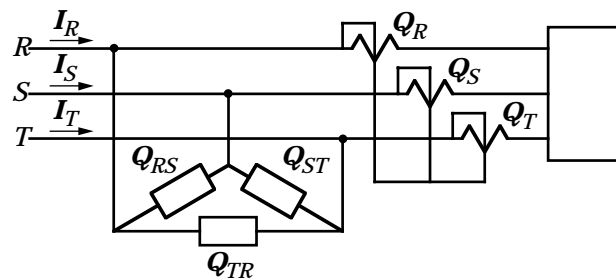


Figura 211.- Existen tres reactancia que, conectadas en triángulo y en paralelo con un receptor trifásico desequilibrado de tres hilos, forman con él un receptor resultante equilibrado.

Si solo se quiere equilibrar la carga, de forma que el nuevo factor de potencia siga siendo el mismo que el de la propia carga inicial, los valores de las potencias de las reactancias en triángulo que equilibran el receptor son [44][90]

$$\begin{aligned} Q_{RS} &= \frac{Q}{3} + Q_T - Q_R - Q_S \\ Q_{ST} &= \frac{Q}{3} + Q_R - Q_S - Q_T \\ Q_{TR} &= \frac{Q}{3} + Q_S - Q_T - Q_R \end{aligned} \quad (13.1)$$

Donde $Q = Q_R + Q_S + Q_T$ es la potencia reactiva que absorbe el receptor trifásico inicial, que es la misma que absorbe el conjunto formado por el receptor inicial y las reactancias que lo equilibran.

Si el receptor es de cuatro hilos, y está desequilibrado, de forma que la intensidad por el terminal del neutro no es nula, con dos reactancias conectadas en paralelo con él, como se muestra en la Figura 212, se puede anular la intensidad por el neutro, sin que tampoco estas reactancias absorban potencia activa. Para lograrlo, los valores de esas reactancias han de ser [44][56][90]

$$X_1 = \frac{\sqrt{3}V}{\sqrt{3} \operatorname{Im}(\mathbf{I}_N) + \operatorname{Re}(\mathbf{I}_N)}$$

$$X_2 = \frac{\sqrt{3}V}{2 \operatorname{Re}(\mathbf{I}_N)}$$

V es el valor eficaz de la tensión entre cada fase y el neutro, \mathbf{I}_N es el fasor de la intensidad por el neutro, y $\operatorname{Re}(\mathbf{I}_N)$ e $\operatorname{Im}(\mathbf{I}_N)$ son las partes real e imaginaria respectivamente del fasor de la intensidad del neutro.

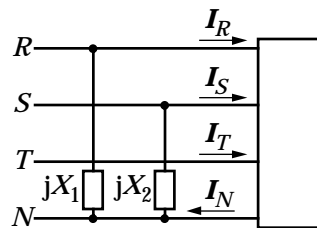


Figura 212.- Con dos reactancias de valor adecuado se puede anular la intensidad por el neutro sin modificar el funcionamiento del receptor original.

Una vez anulada la intensidad por el neutro, se aplica después la misma solución que para el caso del receptor trifásico de tres conductores.

Por tanto, es posible fabricar cualquier receptor sinusoidal como receptor trifásico equilibrado sin afectar en nada a su funcionamiento.

13.5. Corrección del factor de potencia de receptores monofásicos y de receptores trifásicos equilibrados

Una solución totalmente eficaz para disminuir las pérdidas debidas al factor de potencia de los receptores monofásicos y trifásicos equilibrados es elevar su factor de potencia. Si ese factor de potencia es la unidad, la potencia que se pierde por esta causa se elimina totalmente.

Para elevar el factor de potencia de un receptor monofásico inductivo de $\cos\varphi_1$ a $\cos\varphi_2$, puede colocarse en paralelo con el receptor monofásico un condensador de potencia reactiva [56]

$$Q_C = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) \quad (13.2)$$

P es la potencia activa del receptor.

Si el receptor es trifásico equilibrado, han de conectarse en paralelo con él tres condensadores iguales en estrella o en triángulo cuya potencia reactiva valga en total Q_C , pues la fórmula (13.2) es válida también para receptores trifásicos equilibrados. P es ahora la potencia del receptor trifásico equilibrado. Cada condensador ha de tener, por tanto, una potencia igual a $Q_C/3$. Conectados los tres condensadores en paralelo, como el receptor inicial estaba equilibrado, también el conjunto que resulta al poner los condensadores iguales en paralelo con él es equilibrado.

Lo óptimo es elevar el factor de potencia hasta la unidad, o sea, que $\cos\varphi_2 = 1$, con $\varphi_2 = 0$. Entonces $\operatorname{tg}\varphi_2 = 0$ y la (13.2) queda

$$Q_C = P \operatorname{tg}\varphi_1$$

Diseñar y fabricar los receptores con condensadores incorporados para conseguir que el factor de potencia sea la unidad no es excesivamente caro y, sin embargo, es una solución totalmente efectiva para disminuir o eliminar la energía que se pierde por esta causa.

Aunque la solución aquí expuesta es aplicable en general, ya que es externa al receptor propiamente dicho, hay otras soluciones particulares que pueden adoptarse al diseñar el receptor, incluida la que consiste en colocar condensadores en serie. Soluciones de este tipo también consiguen receptores con factor de potencia la unidad y, de hecho, en algunos casos se aplican. La diferencia con la forma de corrección general por medio de condensadores en paralelo, es que ahora los elementos de corrección forman parte del receptor.

Desde luego, si los receptores son inicialmente capacitivos, lo que es menos frecuente, la corrección ha de hacerse con inductancias.

13.6. Corrección del factor de potencia y equilibrado simultáneos de receptores trifásicos desequilibrados

Ya se vio que corregir el factor de potencia de receptores trifásicos desequilibrados, disminuye siempre la potencia reactiva que absorben, pero esta disminución no siempre implica menor pérdida de energía, sino que, a menudo, la corrección aumenta la energía que se pierde en el sistema eléctrico. Pero es posible corregir el factor de potencia y, simultáneamente, conseguir un receptor resultante que esté equilibrado.

Las mismas reactancias pueden conseguir ambos objetivos [44][90]. Como, además, esas reactancias no absorben energía activa, no hay incremento de potencia activa del receptor.

La solución para corregir el factor de potencia y equilibrar el receptor trifásico es realmente la misma que la del apartado 13.4. La diferencia es el valor que se da a la variable Q , que es la potencia reactiva que absorberá el conjunto, una vez conectado el triángulo de reactancias. Si $Q = 0$, el triángulo de reactancias equilibra el receptor y lleva su factor de potencia hasta la unidad. Para conseguir un factor de potencia, $\cos\varphi$, distinto de la unidad, el valor de Q que hay que sustituir en (13.1) es $Q = P \operatorname{tg}(\arccos\varphi)$, donde P es la potencia activa del receptor [44][90].

13.7. Filtrado de la intensidad del receptor

Las intensidades de muchos receptores actuales conectados al sistema eléctrico no son sinusoidales. Las consecuencias relacionadas con la pérdida de energía son que aumenta la energía que se pierde en el sistema eléctrico, no solo en su resistencia, que es la que aquí se ha evaluado, sino también en los núcleos de los transformadores, de los alternadores y, en general, de las máquinas rotativas. Como la potencia que se pierde por histéresis es proporcional a la frecuencia de la intensidad, y la que se pierde por corrientes de Foucault es proporcional al cuadrado de esa frecuencia, la potencia que se pierde en el hierro de las máquinas puede ser considerable y elevar peligrosamente su temperatura si las intensidades contienen armónicos de frecuencias superiores a la fundamental, que es lo que ocurre si se deforma la onda de intensidad.

Además, los armónicos de frecuencias muy altas pueden afectar al funcionamiento de sistemas próximos electromagnéticamente sensibles.

Por tanto, es conveniente evitar que la onda de intensidad de los receptores se deforme respecto a la senoide, en este caso no solo por causa de la energía que se pierde en el sistema eléctrico, sino por otras razones, como las comentadas. Como en los casos anteriores, la solución es conectar, en paralelo con el receptor, filtros que contrarresten los armónicos que el receptor produzca en su intensidad, de forma que la intensidad del conjunto, formado por el receptor y el filtro, sea lo más próxima posible a una senoide.

Desde hace algunos años son muy numerosos los filtros que se han propuesto para contrarrestar la deformación de las ondas de intensidad

[28], y no son pocos los distribuidores de material eléctrico que los ofrecen desde hace tiempo para alta y baja tensión [91][92]. De hecho, aunque el objetivo exclusivo no es el ahorro de la energía que se pierde en el sistema eléctrico, ya es práctica extendida la incorporación de filtros en los receptores que más deforman las ondas de intensidad. Por tanto, es posible también incorporar en el diseño y fabricación de los receptores aquellos que resulten más eficaces en cada caso.

13.8. Correcciones al inicio de las instalaciones de los consumidores

La solución más eficaz para disminuir los cocientes de pérdida de energía que se han considerado más arriba, es diseñar cada receptor de forma que sus cocientes de pérdida sean la unidad o muy próximos a ella. Pero esa solución no es completa para el cociente de energía perdida por demanda de potencia, sobre el que la actuación del consumidor es determinante.

En efecto, la potencia que demanda un consumidor depende del número de receptores que simultáneamente conecte al sistema eléctrico, por lo que el cociente de pérdida de energía por consumo de potencia, no depende ya solo del diseño de los receptores, sino de una adecuada planificación del consumo de energía, que conviene repartir lo más uniformemente posible durante el periodo de facturación. Y esto solo puede hacerlo el consumidor.

Ocurre, además, que muchos receptores no incorporan los dispositivos que disminuyen o eliminan la pérdida de potencia que originan. Una solución, en este último caso, es situar los elementos correctores al principio de la instalación del consumidor, considerándola toda como un receptor. Pero, en este caso, esos sistemas deben ser automáticos, de forma que logren mantener las variables que intervienen en las pérdidas en los valores adecuados.

En este momento, como es bien conocido, existen baterías automáticas de condensadores que mantienen el factor de potencia de la instalación del consumidor dentro de ciertos límites prefijados. Son del todo eficaces para disminuir la energía que se pierde en el sistema eléctrico si las intensidades de la instalación están siempre equilibradas. Pero no lo son durante el tiempo que permanezcan desequilibradas. No obstante, el equilibrio o desequilibrio no influye en la bonificación, que se

consigue con independencia de él, pues basta que disminuyan o anulen la energía reactiva que absorbe la instalación del consumidor.

En [43][90], se describen baterías automáticas que equilibran las intensidades y corrigen el factor de potencia de la carga variable de los consumidores. Estas dos acciones, realizadas simultáneamente, son del todo eficaces para la disminución de la pérdida de energía en la resistencia del sistema eléctrico. Un prototipo ha sido montado en los laboratorios de nuestra Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca, y probado con resultados satisfactorios. Pero, que nosotros sepamos, no existen actualmente modelos comerciales.

14. Resultados y conclusiones

A continuación se resumen las conclusiones que se consideran más importantes, que son consecuencia de la investigación que se expone en esta memoria.

1.- El único procedimiento que se aplica actualmente para la medida de las pérdidas de energía por causa de los receptores, es la medida de la energía reactiva que absorben las instalaciones de algunos consumidores. Estas pérdidas, que pretenden medirse así, se denominan por eso *pérdidas por consumo de energía reactiva*. Se ha demostrado aquí que, en contra de lo que se practica, no es cierto, en general, que mayor energía reactiva absorbida durante el periodo de facturación por un receptor, indique que ha provocado mayor pérdida de energía en la resistencia del sistema eléctrico que otro que ha absorbido menos energía reactiva y la misma energía activa. No es cierto ni para los sistemas trifásicos ni para los monofásicos. La razón es que, en ambos sistemas, la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico no es proporcional a la integral de la potencia reactiva de los receptores, que es la energía reactiva, sino a la integral del cuadrado de esa potencia reactiva.

2.- Se han identificado y analizado cuatro causas de pérdidas achacables a características de los receptores, que se han revelado como las causas más importantes. Se han denominado, *por consumo de potencia*, *por causa del factor de potencia*, *por desequilibrio* de las intensidades de los sistemas trifásicos, y *por deformación de las ondas de las intensidades*. La que se ha llamado *por causa del factor de potencia* se ha denominado también *por consumo de potencia reactiva*. Está íntimamente relacionada con la que habitualmente se denomina *por consumo de energía reactiva*, aunque el tratamiento que aquí se da es totalmente diferente al habitual.

3.- La fórmula

$$W_p = \frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} P^2 dt + \frac{R_s}{U^2} \int_0^{t_f} Q^2 dt$$

expresa con claridad la forma en que la energía que se pierde en la resistencia de un sistema eléctrico sinusoidal durante el periodo de facturación por consumo de potencia activa y por consumo de potencia reactiva, está relacionada con los valores de esas dos potencias de los receptores o de los consumidores. El primer término del segundo miembro es la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico

por consumo de potencia activa. Muestra que es proporcional a la integral del cuadrado de esa potencia. Por tanto, disminuir la potencia activa de los receptores disminuye mucho la pérdida de energía. El segundo término es la energía que se pierde por consumo de potencia reactiva, también proporcional a la integral del cuadrado de esa potencia. Disminuyendo o anulando esta potencia reactiva se disminuye o anula también la energía que se pierde por esta causa. El hecho de que en los dos sumandos intervenga el cuadrado de las potencias activa y reactiva, tiene como consecuencia que es mucho más eficaz disminuir potencias activas y reactivas grandes, que invertir el mismo esfuerzo en hacerlo con potencias pequeñas.

4.- Las pérdidas de energía por consumo de potencia y por desequilibrio son comparables en magnitud a las pérdidas debidas al factor de potencia de los receptores, por lo que parece que deberían merecer mayor atención por las empresas distribuidoras de energía eléctrica para el ahorro de energía, de la que se les presta. Las pérdidas debidas a deformación de las ondas de las intensidades pueden ser considerables en partes puntuales del sistema eléctrico, en concreto en transformadores y en el resto de las máquinas con materiales ferromagnéticos. No tanto, en general, en la resistencia del sistema eléctrico.

5.- Se han creado cocientes de pérdida de energía para cada una de las cuatro causas consideradas. Cada uno es el cociente entre la energía que se pierde durante el periodo de facturación por causa del receptor o por causa del consumidor que se considera, y la energía mínima que se perdería si la causa de las pérdidas desapareciera. También se han creado cocientes que agrupan diferentes causas, y un cociente global para las cuatro citadas. En todos los casos, mayor valor del cociente, indica mayores pérdidas para la misma energía consumida, lo que convierte a los cocientes definidos en variables óptimas para determinar la influencia de receptores y consumidores en las pérdidas del sistema eléctrico.

6.- Todos los cocientes son fácilmente medibles por medio de un sistema informático de medida como el que se ha descrito en la memoria. Se han creado las redes de adecuación de señales que hacen posibles todas las medidas. Todas estas redes se han diseñado solo con resistencias, por el momento las únicas redes que no deforman las ondas de tensión que llegan a la tarjeta respecto a las originales que se quieren captar, y que sirven para medir cualesquiera formas de onda, incluidas las tensiones de valor constante. Se han creado, también en LabVIEW, los programas que permiten medir, presentar y utilizar esos cocientes de pérdidas.

7.- Existen procedimientos de disminución o anulación de las pérdidas originadas por las cuatro causas estudiadas. En particular se hace mención especial de los compensadores estáticos, que son tripolos trifásicos, formados por tres reactancias, que corrigen el factor de potencia y, simultáneamente, equilibran las intensidades de las fases de cargas trifásicas de tres y cuatro hilos.

8.- Las conclusiones anteriores muestran que es posible crear procedimientos, más completos más justos que el actual, de medida de pérdidas por causa de los receptores, y que incentivan en los consumidores la disminución de las pérdidas, no solo por consumo de potencia reactiva, sino también por algunas o todas las otras causas consideradas en esta memoria, ya que pueden crearse y medirse fácilmente cocientes que agrupen las causas de pérdidas que se desee. Esta podría ser una buena forma para disminuir aún más las pérdidas de energía en el sistema eléctrico e, incluso, aumentar su capacidad de suministro de energía.

15. Futuras investigaciones posibles

15.1. Introducción

Siempre que se avanza en la investigación de una materia surgen numerosas ramas que parten de ella, y que completan el tema fundamental. A veces los objetos de estudio que derivan del principal están tan relacionados con el núcleo de la investigación, que es difícil establecer el límite que la concluya. Por eso, citar los temas principales que pueden ser objeto de futuras investigaciones, deja un camino abierto y bien trazado para continuar con la tarea.

En este capítulo se enumeran y comentan los temas relacionados con el asunto central de esta memoria, que pueden ser objetos de investigaciones futuras.

15.2. Investigación de sistemas de adecuación de señales que no deformen la onda de intensidad

Los cocientes de pérdida de energía definidos en esta memoria requieren ser medidos para cada instalación consumidora final de energía eléctrica, tal como se ha expuesto, por medio de sistemas que capturen las formas de las ondas de tensión y de intensidad de los receptores o de los consumidores.

Para captar tensiones de algunos cientos de voltios e intensidades de algunos amperios, nosotros, en trabajos de investigación anteriores, hemos diseñado redes de adecuación de las señales que hay que introducir en la tarjeta de adquisición de datos, que están formadas solo por resistencias [6]. La ventaja de estas redes resistivas de adecuación de señales es que no deforman las ondas de intensidad ni las ondas de tensión y sirven para cualquier tipo de onda, de manera que las ondas que se captan son reproducciones semejantes de las verdaderas ondas de tensión y de intensidad que se pretenden analizar y medir. Por tanto no se comete ningún error de distorsión.

Sin embargo, la creación de redes resistivas de adecuación de señales para grandes intensidades es difícil, porque esas corrientes han de circular

por resistencias, con el consiguiente calentamiento. Desde luego que este calentamiento se puede reducir, en principio, disminuyendo las resistencias por las que van a circular intensidades altas, pero esa reducción conduciría a valores de resistencias muy pequeños, difíciles por eso de calibrar.

La forma actual de medir grandes intensidades sinusoidales, y también altas tensiones, consiste, como es sabido, en hacerlo por medio de transformadores de medida, que reproducen en el secundario las ondas de tensión y de intensidad del primario si esas ondas son sinusoidales, pero que no lo hacen, en general, si esas ondas sinusoidales están deformadas, ni tampoco cuando las ondas de las tensiones o de las intensidades no son sinusoidales.

Una búsqueda de medios o procedimientos que pudieran ser aplicados a grandes corrientes, y permitieran adecuar los valores de grandes intensidades de manera que no se deformaran las ondas, cualquiera que estas sean, como hacen las redes resistivas, posibilitaría que todas las conclusiones de esta memoria pudieran ser aplicadas a medir con gran precisión los cocientes de pérdidas de receptores de grandes intensidades.

Este es un tema principal de investigación que se propone, sobre el que ya se han hecho y se vienen haciendo en nuestra Área de Ingeniería Eléctrica algunas aproximaciones exploratorias.

15.3. Determinación de los cocientes de pérdidas de receptores comunes y recomendaciones consiguientes que los mejoren

La forma más eficaz de disminuir los cocientes de pérdidas de los consumidores es actuar sobre los receptores concretos que sucesivamente cada consumidor va a ir conectando a la red. Un trabajo experimental sencillo que puede iniciarse en el laboratorio de Ingeniería Eléctrica es el estudio de los receptores habituales que se emplean en viviendas, talleres y fábricas, para medir sus cocientes de pérdidas de potencia y poder recomendar las posibles soluciones de mejora. Para eso bastará el banco de medidas diseñado para este trabajo y los programas de LabVIEW elaborados para calcular y presentar estas medidas. Con los resultados de cada uno se obtendrán datos sobre las condiciones en que se encuentran esos receptores en cuanto a las pérdidas que originan en la resistencia del sistema eléctrico, y se podrán deducir actuaciones de mejora.

15.4. Determinación de los cocientes de pérdidas de algunos consumidores domésticos e industriales

Se trataría de medir los cocientes de pérdidas durante el periodo de facturación, de los consumidores que sea posible. Puede comenzarse por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial o por algunas de sus partes: laboratorios, zonas de aulas, etc. Podría ser un buen inicio para averiguar el estado en que se encuentran las instalaciones en cuanto a las pérdidas que producen en el sistema eléctrico. Según los resultados que se obtuvieran, se podrían también recomendar mejoras para la propia instalación. Con el mismo objetivo podría realizarse una investigación más amplia en los edificios que fuera posible de la Universidad de Salamanca.

Hacerlo en la Universidad tiene la ventaja de que los permisos para la instalación necesaria para las medidas serían más fáciles de conseguir.

En una segunda etapa se medirían cocientes de pérdida de energía de consumidores domésticos e industriales.

15.5. Medida del grado de desequilibrio de las diferentes partes del sistema eléctrico

Como se ha mostrado en esta memoria, el desequilibrio de las intensidades provoca pérdidas de energía en el sistema eléctrico nada despreciables. Por otra parte, aunque las intensidades de las líneas eléctricas próximas a los receptores desequilibrados resultan, en general, fuertemente desequilibradas, las de las más alejadas de ellos pueden no estarlo tanto o, incluso, pueden resultar escasamente desequilibradas, debido al equilibrio al que naturalmente tiende el reparto aleatorio de las cargas en las diferentes fases.

Un estudio de interés puede ser la determinación del grado de desequilibrio real del sistema eléctrico en todas o muchas de sus partes para poder tener idea de la energía que se pierde en él por esta causa. En algunos puntos del sistema la empresa que los gestionan ya miden la intensidad de cada fase. Esto suele ocurrir en las centrales de generación, y también en algunas estaciones y subestaciones de transformación. Si, además, la empresa correspondiente ha almacenado los datos durante algún tiempo, el trabajo inicial consistiría en disponer de ellos. Si no se guardan los datos, ha de crearse un sistema para disponer de las medidas durante un tiempo razonablemente largo para poder sacar conclusiones.

Allí donde no se mida la intensidad de cada fase, habría que instalar un sistema de medida que lo haga y que almacene los datos durante un tiempo suficiente para poder estudiarlos. Esta acción es mucho más difícil de llevar a cabo, por lo que, al menos inicialmente, se puede conseguir cierta información con los datos que sean fácilmente conseguibles porque ya se estén obteniendo.

15.6. Investigación sobre la conveniencia o no de suministro trifásico a ciertas viviendas de nueva construcción, y de la fabricación de electrodomésticos trifásicos

El consumo de energía eléctrica de las viviendas actuales es muy superior a las de hace algunas décadas. Sin embargo, los receptores siguen siendo monofásicos, y el suministro desde el transformador final a los receptores también, por lo que la energía que se pierde en ese tramo de cada vivienda, desde el transformador a los receptores, es mayor que si fuera una línea trifásica con receptores trifásicos equilibrados al final de ella. El suministro monofásico desde el transformador a cada vivienda produce, además, desequilibrio en las líneas de media y de alta tensión, que también incrementan las pérdidas por causa de ese desequilibrio.

Una investigación útil puede consistir en tratar de determinar la disminución de pérdida de energía que se produciría si los electrodomésticos de mayor potencia, como cocinas, lavadoras, lavavajillas, y calefacción eléctrica de los hogares se fabricaran como receptores equilibrados, y el suministro también fuera equilibrado. Habría que valorar, desde luego, no solo el ahorro de energía, sino, en sentido contrario, el mayor coste de la instalación eléctrica de las viviendas, y el posible mayor coste de algunos electrodomésticos trifásicos sobre los actuales monofásicos, no tanto por el incremento del precio de fabricación debido a los componentes, cuanto al inicio de las cadenas de fabricación y de comercialización, que, hasta que el consumo de estos electrodomésticos trifásicos no creciera, serían más caros. El balance resultante indicaría si conviene o no incentivar las instalaciones trifásicas en todas o en ciertas viviendas de nueva construcción con el objetivo de ahorrar energía.

15.7. Origen y evolución histórica de los conceptos de potencia reactiva y energía reactiva, y de la medida de la energía reactiva para evaluar las pérdidas de energía en el sistema eléctrico achacable a los receptores

La medida de la energía reactiva que absorben los receptores se ha utilizado y se utiliza para medir la energía que se pierde en el sistema eléctrico debida al factor de potencia de las cargas. Este es el único procedimiento de medida de pérdidas que se ha empleado hasta ahora. Ello se debe, quizá, a la facilidad con que se ha podido medir la energía reactiva desde los comienzos de la comercialización de la energía eléctrica. Como se sabe, el aparato para la medida de la energía reactiva ha sido el contador clásico de energía reactiva, que es, en realidad, un contador clásico de energía activa modificado.

Simultáneamente al concepto de energía reactiva debió surgir el de potencia reactiva, magnitud que también se puede medir fácilmente por medio de un vatímetro electrodinámico modificado, que se llamó varímetro.

El interés histórico del origen de estos conceptos es mayor si se tiene en cuenta que, tal como se ha expuesto ya en otro lugar de esta memoria, el procedimiento de medida de las pérdidas basado en la medida de la energía reactiva que absorben las cargas de los consumidores no es el adecuado. No obstante, pudiera ser que, tal como se ha dicho también allí, fuera el único posible de aplicar en el momento de su inicio. Es de notable interés, por tanto, poder aclarar estos extremos.

Además conviene fijar la atención en los nombres elegidos, potencia y energía, para dos magnitudes que no lo son con el sentido que en termodinámica se da a estos dos términos. La única razón de los nombres es la dimensional: la potencia reactiva tiene dimensión de potencia y la energía reactiva de energía. Sin embargo, razones similares a esta no han bastado para otras magnitudes de la física y de la ingeniería. Por ejemplo, el momento de una fuerza respecto a un punto no se llama trabajo o energía, a pesar de que es fuerza.longitud [93]. Por lo que nosotros conocemos, algunos autores se opusieron con firmeza a denominar con estos nombres los dos conceptos citados, sin ningún éxito, desde luego [94].

Una investigación que aclare los puntos expuestos y otros que puedan surgir parece del máximo interés.

15.8. Formas de medir pérdidas que aplican las compañías de suministro de energía eléctrica de otros países

Como ya se ha dicho, la medida de la energía reactiva que absorben los receptores es la única forma de medir las pérdidas que aplican las compañías de suministro de energía eléctrica. Sin embargo, incluso en los países que así se hace, el conjunto de los consumidores a los que se aplica es diverso. En España, por ejemplo, no se mide la energía reactiva a los consumidores domésticos, y los grandes o medianos consumidores no tienen tampoco un tratamiento homogéneo.

En los países próximos las actuaciones son similares a las de España, pero no idénticas. Incluso, en cada país puede haber diferencia de unas compañías a otras.

Por eso, tratar de estudiar las formas que se aplican en cada país y el grado en el que se aplican, proporcionaría un conocimiento comparativo útil.

15.9. Conocimiento de los sistemas eléctricos de energía de los países próximos

La investigación que se propone en el apartado anterior puede ser complementada con un estudio más amplio de los sistemas eléctricos de los países próximos, principalmente. Una razón útil que justificaría este trabajo es que la política de la Unión Europea tiende a que la integración de los sistemas eléctricos europeos sea cada vez mayor, lo mismo que se pretende que sea cada vez mayor la unidad del mercado de la energía eléctrica de los países de la Unión Europea. De hecho, algunas iniciales investigaciones en ese sentido ya se han realizado en el Área de Ingeniería Eléctrica. En particular el estudio de algunos aspectos del sistema eléctrico portugués, cuya producción, junto a la producción de energía eléctrica del sistema español, puede ser ya gestionada comercialmente y ofrecida al mercado en el llamado Mercado Ibérico de la Energía Eléctrica (MIBEL), que es un paso importante para la consecución del mercado único europeo de energía eléctrica [52].

15.10. Programa de ordenador que permita simular sistemas eléctricos para evaluar pérdidas de energía en ellos debidas a la conexión simultánea de muchos receptores

El trabajo de investigación que ha dado lugar a esta memoria se ha centrado en evaluar la energía que se pierde en el sistema eléctrico por causa de cada receptor o cada consumidor, pues se trataba de crear variables que midieran, precisamente, la influencia de las características de los receptores en el aumento de esa pérdida de energía. Por eso, la pérdida de energía evaluada era la achacable estrictamente a cada receptor o a cada consumidor, si fuera él el único conectado al sistema eléctrico. Sin embargo, como se ha visto a lo largo de esta memoria, cuando hay receptores de varios consumidores simultáneamente conectados a la red, la energía que se pierde en la resistencia del sistema eléctrico no es la suma de las energías que se pierden si cada uno estuviera, él solo, conectado al sistema eléctrico, sino que es mucho mayor que esa suma, pues la potencia que se pierde en cada hilo conductor es proporcional al cuadrado del valor eficaz su intensidad. Por tanto, los cocientes de energía perdida definidos aquí, no sirven para averiguar la energía que se pierde en el sistema eléctrico, sino solo para determinar el grado en que cada receptor influye en esa pérdida de energía.

El conocimiento adquirido en esta investigación podría ser aprovechado, no obstante, para tratar de evaluar cantidades absolutas de esa pérdida de energía en sistemas eléctricos. Un camino que puede resultar útil es el de la simulación del comportamiento del sistema por medio de un programa de ordenador elaborado para este fin. El programa debería reproducir diferentes situaciones concretas, semejantes a situaciones reales, y evaluar la energía total que se pierde en cada caso por las cuatro causas achacables a los receptores aquí consideradas, pero ahora no por causa de cada receptor, sino por causa del conjunto de los receptores simultáneamente conectados.

15.11. Simulaciones de aplicación de tarifas eléctricas que trasladen al consumidor el coste de las pérdidas de energía que originan sus receptores, utilizando los cocientes propuestos

Una vez definidos los cocientes de pérdida de energía proporcionales a dichas pérdidas, y de haber diseñado la forma de medirlos, se trataría de utilizarlos para trasladar al consumidor, principalmente a los grandes consumidores, el coste de la energía que se pierde a causa de las características no idóneas de su consumo. Para ello es imprescindible estudiar una gran cantidad de situaciones y ver los resultados en todos los casos.

Un camino inicial a seguir para esta investigación podría ser partir de unas condiciones mínimas de calidad exigibles a los receptores de los consumidores y determinar sus cocientes de pérdida de energía para ese mínimo de calidad, que deberían estar exentos de todo recargo. A partir de esos mínimos podrían estudiarse recargos que indujeran al consumidor a mejorar sus receptores para disminuir la pérdida de energía que originan.

Como se ha visto, estas mejoras son del todo posibles para disminuir la energía que se pierde por desequilibrio, por factor de potencia y por deformación de la onda de intensidad. Como se puede medir cada cociente por separado, se puede dar un mayor peso de recargo al cociente que se desee.

Puede ser difícil crear algún recargo por el cociente de pérdida de energía debido al consumo de potencia, sobre todo para los pequeños consumos durante corto tiempo. Pero, por otra parte, incentivar la distribución en el tiempo de la extracción de energía es de gran eficacia, pues la energía que se pierde disminuye fuertemente.

Un camino quizá puede ser comenzar a aplicar recargos basados en ese cociente solo a partir de un valor determinado de la potencia que se consume.

En cualquier caso, diseñar un sistema de tarifas basado en los cocientes aquí creados, requiere un amplio trabajo de recopilación de consumos reales y de su distribución en el tiempo, y ver los resultados a que conducirían las diferentes tarifas que pudieran idearse.

15.12. Diseño y construcción de un prototipo práctico de medidor de cocientes de pérdida de energía para baja tensión

Aunque es fácil montar en el laboratorio equipos para las medidas de los cocientes de pérdidas, formados por la red de adecuación de señales, una tarjeta de adquisición de datos y el ordenador en que corra el correspondiente programa de LabVIEW, para que el sistema de medida resulte práctico ha de crearse un equipo económico y fácil de instalar por los consumidores que realice esta función. Este podría ser también un trabajo futuro.

15.13. Influencia de la variación de la tensión de suministro en los cocientes de pérdidas definidos en esta memoria

A lo largo de toda esta investigación se ha supuesto que la tensión de suministro (tensión instantánea del receptor si es de corriente continua, o valor eficaz de la tensión del receptor si es de corriente alterna) permanece constante durante todo el periodo de facturación. Esta hipótesis no está nada alejada de la realidad, pues, en efecto, el suministro de energía eléctrica, para que sea eficaz, requiere que el valor de la tensión de los receptores se mantenga en su valor nominal o muy próximo a él. Y, de hecho, eso es lo que ocurre siempre. Por eso existe un límite admisible de oscilación de la tensión que las compañías de suministro de energía eléctrica no pueden superar.

Además, los cocientes definidos y su medida son independientes del valor concreto de esa tensión.

No obstante, sí puede ser conveniente tratar de cuantificar con la mayor exactitud posible la influencia de las oscilaciones de la tensión sobre los cocientes de pérdidas definidos.

16. Glosario

Este capítulo se dedica a definir algunos términos usados en esta memoria, que son de empleo poco frecuente en ingeniería eléctrica, o cuyo significado puede ser confuso [8].

cociente de pérdida de energía. Cociente entre la energía que se pierde en el sistema eléctrico durante el periodo de facturación por causa de un consumidor, y la que se perdería en el caso que se considera óptimo.

cociente de pérdida de energía por consumo de potencia. Cociente entre la energía que se pierde en el sistema eléctrico durante el periodo de facturación debida a un consumidor, y la que se hubiera perdido si esa misma energía se hubiera suministrado al consumidor con potencia constante.

cociente de pérdida de energía por consumo de potencia reactiva. Cociente entre la energía que se pierde en un sistema sinusoidal durante el periodo de facturación debida a un consumidor y la que se hubiera perdido si la potencia reactiva de sus receptores hubiera sido nula. Si los receptores son trifásicos se suponen equilibrados.

cociente de pérdida de energía por deformación de las ondas de intensidad. Cociente entre la energía que se pierde en un sistema de tensiones sinusoidales durante el periodo de facturación debida a un consumidor, y la que se hubiera perdido si las ondas de intensidad hubieran sido sinusoidales.

cociente de pérdida de energía por desequilibrio de cargas trifásicas. Cociente entre la energía que se pierde en un sistema sinusoidal durante el periodo de facturación debida a un consumidor, y la que se hubiera perdido si los receptores hubieran estado equilibrados.

cociente global de pérdida de energía. 1 Cociente entre la energía que se pierde en un sistema sinusoidal durante el periodo de facturación debida a un consumidor, y la que se perdería si los receptores fueran trifásicos equilibrados con potencia reactiva nula, y hubieran absorbido la misma energía con potencia constante. **2** Cociente que incluye varias causas de pérdidas

distribución a intensidad constante. Forma inicial de designar la distribución en serie.

distribución a tensión constante. Forma inicial de designar la distribución en paralelo.

distribución en paralelo. 1 Forma de distribuir energía eléctrica que consiste en conectar los generadores y los receptores en paralelo. **2** La instalación preparada para esa forma de distribución.

distribución en serie. 1 Forma de distribuir energía eléctrica que consiste en conectar los receptores y los generadores en serie. **2** La instalación preparada para esa forma de distribución.

factor de potencia. Relación entre la potencia activa que absorbe un receptor sinusoidal y su potencia aparente. Coincide con el coseno del argumento φ de la potencia compleja que absorbe el receptor, por lo que se llama con frecuencia *coseno de φ* . Se designa también por *fdp* (*factor de potencia*). En facturación de energía eléctrica se llama también factor de potencia de un consumidor en el periodo de facturación al coseno del argumento de la energía compleja que ha absorbido el consumidor durante el periodo de facturación.

fase. Ángulo de una función sinusoidal. La fase de la función $y = Y_m \text{sen}(\omega t + \alpha)$ es $\omega t + \alpha$.

fase inicial. El valor de la fase cuando $t = 0$.

fasor de una función sinusoidal. Número complejo cuyo módulo es el valor eficaz de esa función y cuyo argumento es la fase inicial de esa función.

frecuencia de muestreo. Número de veces que se obtienen datos cada unidad de tiempo, habitualmente cada segundo. La *frecuencia de muestreo* se llama también *velocidad de muestreo*.

función semidefinida negativa. Función real cuyos valores son solo negativos o nulos.

función semidefinida positiva. Función real cuyos valores son solo positivos o nulos

multipolo. Parte de una red que se conecta al resto por t terminales. Según el número de sus terminales los multipolos se llaman dipolos, tripolos, cuadripolos, etc.

onda. **1** Representación gráfica de una función real de variable real no constante que es continua a trozos. **2** A veces se utiliza para designar a la propia función, como cuando se habla de *onda de tensión* u *onda de intensidad*.

receptor de corriente continua. **1** Receptor de energía eléctrica en el que las intensidades permanentes de sus terminales son constantes si los potenciales permanentes de sus terminales lo son. **2** Receptor de energía eléctrica en el que las intensidades permanentes de sus terminales son semidefinidas positivas si los potenciales permanentes de sus terminales lo son, o semidefinidas negativas si los potenciales permanentes de sus terminales lo son.

receptor de corriente alterna. **1** Receptor sinusoidal. **2** Receptor de energía eléctrica en el que las intensidades permanentes de sus terminales son funciones alternas del tiempo si sus tensiones lo son.

receptor monofásico. Receptor sinusoidal de dos terminales.

receptor sinusoidal. Receptor de energía eléctrica en el que siempre que los potenciales de sus terminales son funciones sinusoidales del tiempo de la misma frecuencia, las intensidades permanentes de esos terminales son funciones sinusoidales del tiempo de esa frecuencia.

receptor trifásico. Receptor sinusoidal de tres o cuatro terminales, cada uno de los cuales se conecta a cada uno de los tres o cuatro terminales de un generador o línea trifásicos.

receptor trifásico equilibrado. Receptor trifásico en el que las intensidades de sus terminales están equilibradas si lo están sus tensiones.

red de corriente alterna. **1** Red sinusoidal. **2** Red eléctrica en la que las intensidades de sus ramas son funciones alternas del tiempo.

red de corriente continua. **1** Red eléctrica en la que las intensidades permanentes de sus ramas son constantes. **2** Red eléctrica en la que la intensidad permanente de cada rama es función del tiempo semidefinida positiva o semidefinida negativa.

red sinusoidal. Red eléctrica en la que las tensiones permanentes entre sus pares de nudos y las intensidades permanentes de sus ramas son funciones sinusoidales del tiempo de la misma frecuencia.

sistema eléctrico. Sistema de energía eléctrica.

sistema de energía eléctrica. Red eléctrica destinada a suministrar energía eléctrica a receptores.

sistema de corriente alterna. **1** Sistema eléctrico constituido por una red de corriente alterna. **2** Sistema sinusoidal.

sistema de corriente continua. Sistema eléctrico constituido por una red de corriente continua.

sistema sinusoidal. Sistema eléctrico constituido por una red sinusoidal.

velocidad de muestreo. Número de veces que se obtienen datos cada unidad de tiempo, habitualmente cada segundo. La *velocidad de muestreo* se llama también *frecuencia de muestreo*.

17. Referencias

- [1] Félix Redondo Quintela. *La Energía reactiva y la disminución de las pérdidas en distribución de energía eléctrica*. Energía. Julio-Agosto de 1998.
- [2] Félix Redondo Quintela, Juan Manuel García Arévalo y Norberto Redondo Melchor. *Desequilibrio y pérdidas en las instalaciones eléctricas*. Montajes e Instalaciones. Abril de 2000.
- [3] J. M. García Arévalo. *Minimización de pérdidas en el sistema eléctrico por desequilibrio de las cargas trifásicas*. Trabajo de Grado de Salamanca. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Salamanca. Julio de 2003.
- [4] J. M. García Arévalo. *Desarrollo de un sistema para el equilibrado de cargas trifásicas y la corrección simultánea de su factor de potencia*. Tesis doctoral. Departamento de Física, Ingeniería y Radiología Médica. Universidad de Salamanca. Septiembre de 2005.
- [5] Miguel Pons Martín y Roberto Carlos Redondo Melchor. *Diseño y construcción de un prototipo de captación de datos de ensayos de máquinas eléctricas con LabVIEW*. Trabajo de Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Salamanca. Septiembre de 2001.
- [6] Roberto Carlos Redondo Melchor. *Captación y tratamiento de datos de instalaciones y máquinas eléctricas, y representación de resultados en tiempo real*. Trabajo de Grado de Salamanca. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Salamanca. Mayo de 2005.
- [7] Orden del Ministerio de Industria y Energía de 12 de enero de 1995 *por la que se establecen las tarifas eléctricas*. Boletín Oficial del Estado N° 12, de 14 de enero de 1995.

- [8] F. R. Quintela y R. C. Redondo Melchor. *Definiciones y Conceptos*. Universidad de Salamanca.
<http://www.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/Diccionario/Inicio.php>.
- [9] Real Decreto 1556/2005, de 23 de diciembre, *por el que se establece la tarifa eléctrica para 2006*. Boletín Oficial del Estado N° 310, de 28 de diciembre de 2005.
- [10] Roberto C. Redondo Melchor y M. Margarita Redondo Melchor. *Comentarios técnicos. Nueva forma de recargo y bonificación por consumo de energía reactiva*. Universidad de Salamanca.
<http://www.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/Comentarios/Temas/Recargo2006.php>
- [11] Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, *por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica*. Ministerio de Economía. Boletín Oficial del Estado N° 268, de 8 de noviembre de 2001.
- [12] Ley 54/1997, de 27 de noviembre, *del Sector Eléctrico*. Jefatura del Estado. Boletín Oficial del Estado N° 285, de 28 de noviembre de 1997.
- [13] F. R. Quintela, R. C. Redondo, J. M. G. Arévalo, N. R. Melchor y M. M. Redondo. *Uso de la energía reactiva para evaluar las pérdidas en el sistema eléctrico*. Técnica Industrial. Octubre de 2006.
- [14] F. R. Quintela, R. C. Redondo, J. M. G. Arévalo, N. R. Melchor y M. M. Redondo. *La medida de la energía reactiva, un método imperfecto de evaluación de las pérdidas en el sistema eléctrico*. Universidad de Salamanca.
<http://www.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/Descargas/MaIndicadorDePerdidas.pdf>
- [15] Luís Ignacio Eguíluz. *Flujo de potencias y calidad de suministro*. Universidad de Cantabria
<http://www.diee.unican.es/diee/pdf/potencias.pdf>

-
- [16] Depenbrock, M. *Physical Reasons of Currents RMS Value Increase in Power Systems with Nonsinusoidal Voltage*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, N° 1. January 1993.
- [17] Filipski, P. S., *Polyphase Apparent Power and Power Factor under Distorted Waveform Conditions*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, N° 3. July 1991.
- [18] Willems, J. L., *A New Interpretation of the Akagi-Nabae Power Components for Nonsinusoidal Three-Phase Situations*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 41, N° 4. August 1992.
- [19] Eguíluz L. I., Arrillaga, J. *Comparison of Power Definitions in the Presence of Waveform Distortion*. Int. J. Elect. Enging. Educ. Vol. 32. April 1995.
- [20] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, *Practical Definitions for Power in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, N° 1. January 1996.
- [21] V. B. Bhavaraju, P. Enjeti. *Analysis and design of an active power filter for balancing unbalanced loads*. IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 8, N° 4. 1993.
- [22] Chin-Lin Chen, Chin E. Lin. *An active filter for an unbalanced three-phase system using the synchronous detection method*. Electric Power Systems Research. Vol. 36, Pages 157-161. 1996.
- [23] See-Young Choi, Woo-Cheol Lee, Dong-Seok Hyun, Taeck-Kie Lee. *The control system of the active power filter considering power factor in unbalanced load*. Conference Record of the 2000 IEEE. Vol. 4, Pages 2123-2128. 8-12 October 2000.
- [24] Taotao Jin, Keyue M. Smdley. *Operation of unified constant-frequency integration controlled three-phase active power filter with unbalanced load*. Applied Power Electronics Conference and

- Exposition, 2003. APEC '03. 18th Annual IEEE. Vol. 1, Pages 148-153. 9-13 February 2003.
- [25] Amit Kumar Jindal, Arindam Ghosh, Avinash Joshi. *The protection of sensitive loads from interharmonic currents using shunt/series active filters*. Electric Power Systems Research. Vol. 73, Pages 187-196. 2005.
- [26] Brij N. Singh, Parviz Rastgoufard. *A New Topology of Active Filter to Correct Power-Factor, Compensate Harmonics, Reactive Power and Unbalance of Three-Phase Four-Wire Loads*. 18th Annual IEEE. Vol. 1, Pages 141-147. 9-13 February 2003.
- [27] San-Yi Lee, Chi-Jui Wu. *Combined compensation structure of a static VAr compensator and an active filter for unbalanced three-phase distribution feeders with harmonic distortion*. Electric Power Systems Research. Vol. 46, Pages 243-350. 1998.
- [28] Toshiya Ohnuki, Osasuma Miyashita. *A three-phase, active power filter with a predictive-instantaneous-current PWM controller*. Electrical Engineering in Japan. Vol. 130, N° 3. 2000.
- [29] Bhim Singh, Kaman Al-Haddad, Ambrish Chandra. *Harmonic elimination, reactive power compensation and load balancing in three-phase, four wire electric distribution systems supplying non-linear loads*. Electric Power Systems Research. Vol. 44, Pages 93-100. 1998.
- [30] Steven Senini, Peter J. Wolfs. *Hybrid active filter for harmonically unbalanced three phase three wire railway traction load*. IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 15, N° 4. July 2000.
- [31] A. Kern, G. Schröder. *A novel approach to power factor control and balancing problems*. Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1994. IECON '94., 20th International Conference on. Vol. 1, Pages 428-433. 5-9 September 1994.
- [32] M. Rastogi, N. Mohan, A. A. Edris. *Hybrid-active filtering of harmonic currents in power systems*. IEEE Trans. Power Delivery. N° 10, Pages 1994-2000. 1995.

-
- [33] L. Moran, I. Pastorini, J. Dixon, R. Wallace. *Series active power filter compensates current harmonics and voltage unbalance simultaneously*. IEE Proc. Gen. Trans. Distrib. N° 147. 2000.
- [34] Arindam Ghost, Avinash Joshi. *A new approach to load balancing and power factor correction in power distribution system*. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 15, N° 1, Pages 417-422. January 2000.
- [35] Arindam Ghost, Avinash Joshi. *The use of instantaneous symmetrical components for balancing a delta connected load and power factor correction*. Electric Power System Research. Vol. 54, Pages 67-74. April 2000.
- [36] Bor-Ren Lin, Yung-Chuan Lee. *Three-phase power quality compensator under the unbalanced sources and nonlinear loads*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 51, N° 5. October 2004.
- [37] B. N. Singh, Bhim Singh, Ambrish Chandra, Kaman Al-Haddad. *Digital implementation of an advanced static compensator for voltage profile improvement, power-factor correction and balancing of unbalanced reactive loads*. Electric Power Systems Research. Vol. 54, Pages 101-111. 2000.
- [38] Y. Toshio. *Method of compensating reactive power, etc., of power system having generator facilities*. World Patent Index DW 1097, Access number 1997-106256.
- [39] San-Yi Lee, Chi-Jui Wu, Wei-Nan Chang. *A compact control algorithm for reactive power compensation and load balancing with static var compensator*. Electric Power Systems Research. Vol. 58, Pages 63-70. June 2001.
- [40] Bhim Singh, Anuradha Saxena, D. P. Kothari. *Power factor correction and load balancing in three-phase distribution systems*. TENCOM 98. 1998 IEEE Region 10th International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control. New Delhi, India. 17-19 December 1998.

- [41] V. G. Nikolaenko. *Optimal balancing of large unbalanced loads using shunt compensators*. IEEE Harmonics and Quality of Power Proceedings. 8th International Conference. Vol. 1, Pages 537-542. 14-16 October 1998.
- [42] C. E. Lin, T. C. Chen, C. L. Huang. *A real-time calculation method for optimal reactive power compensator*. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 4, N° 2. May 1989.
- [43] Félix Redondo Quintela, Juan Manuel García Arévalo y Roberto Carlos Redondo Melchor. *Procedimiento para equilibrar las intensidades de líneas trifásicas de tres y cuatro hilos y corregir simultáneamente el factor de potencia de su carga*. Patente nº de solicitud P200301509. Número de publicación 2234405. Fecha de publicación de la concesión 16-2-2006.
- [44] F. R. Quintela, J. M G. Arévalo and R. C. Redondo. *Power analysis of static VAr compensators*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Aceptado para su publicación.
- [45] IEEE Virtual Museum. <http://ieee-virtual-museum.org/exhibit/exhibit.php?id=159253> [Consulta: 26 de junio de 2007]
- [46] IEEE Virtual Museum. <http://ieee-virtual-museum.org/collection/event.php?id=3456876> [Consulta: 26 de junio de 2007]
- [47] José Morillo y Farfán. *Curso de Electrotecnia duodécima edición*. Editorial DOSSAT, S. A. Madrid 1965.
- [48] IEEE. *The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms, seventh edition*. IEEE Press 2000.
- [49] REDONDO QUINTELA, Félix; R. C. REDONDO MELCHOR. *Sitio web del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca* [en línea]: *Diccionario de términos, definición de carga de un generador*. Disponible en:

<http://www.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/Diccionario/Diccionario.php?b=id:412> [Consulta: 6 de julio de 2007]

- [50] REDONDO QUINTELA, Félix; R. C. REDONDO MELCHOR. *Sitio web del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca* [en línea]: *Diccionario de términos, definición de carga de una línea.*

Disponible en:

<http://www.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/Diccionario/Diccionario.php?b=id:413> [Consulta: 6 de julio de 2007]

- [51] REDONDO QUINTELA, Félix; R. C. REDONDO MELCHOR. *Sitio web del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca* [en línea]: *Diccionario de términos, definición de carga de un multipolo.*

Disponible en:

<http://www.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/Diccionario/Diccionario.php?b=id:361> [Consulta: 6 de julio de 2007]

- [52] REDONDO MELCHOR, María Margarita. *Estudio comparativo de los sistemas eléctricos español y portugués*. Trabajo de Grado de Salamanca. Departamento de Física, Ingeniería y Radiología Médica. Universidad de Salamanca, Mayo 2007.

- [53] REDONDO QUINTELA, Félix. *Unamuno y la Escuela Superior de Industrias de Béjar*. Ed. Revide. Béjar 1996, pág. 47.

- [54] Encyclopædia Britannica on line.

<http://www.britannica.com/eb/topic-649070/Worlds-Columbian-Exposition>

- [55] IEEE Virtual Museum. <http://iee-virtual-museum.org/collection/people.php?id=1234597>

- [56] Félix Redondo Quintela y Roberto Carlos Redondo Melchor. *Redes Eléctricas de Kirchhoff, 2ª edición*. Ed. REVIDE S. L. Béjar, 2005.

- [57] Redondo Quintela, Félix. *Redes con excitación sinusoidal*. Ed. REVIDE S. L. Béjar (Salamanca) 1997. Pág. 12, nota 4.

- [58] Redondo Quintela, Félix; Redondo Melchor, Roberto Carlos; y Redondo Melchor, María Margarita. *Definición de alternador*. DYNA, Mayo-Junio 2007.
- [59] Norberto Redondo Melchor, Félix Redondo Quintela, Roberto Carlos Redondo Melchor y Juan Manuel García Arévalo. *Seguridad eléctrica de plantas fotovoltaicas con conexión en baja tensión*. DYNA. Aceptado para su publicación.
- [60] Redondo Quintela, Félix y Redondo Melchor, Roberto C. *Redes eléctricas de Kirchhoff 2ª edición*. Ed. Revide. Béjar (Salamanca) 2005. Pág. 412, nota 141.
- [61] REDONDO QUINTELA, Félix; , R. C. REDONDO MELCHOR. *Sitio web del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca* [en línea]: *Diccionario de términos, definición de receptor de corriente continua*. Disponible en:
<http://www.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/Diccionario/Diccionario.php?b=id:326> [Consulta: 7 de julio de 2007]
- [62] REDONDO QUINTELA, Félix; REDONDO MELCHOR, R. C. *Sitio web del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca* [en línea]: *Diccionario de términos, definición de red de corriente continua*. Disponible en:
<http://www.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/Diccionario/Diccionario.php?b=id:333> [Consulta: 12 de julio de 2007]
- [63] IEEE Virtual Museum. <http://iee-virtual-museum.org/collection/tech.php?taid=&id=2345873&lid=1> [Consulta: 12 de junio de 2007]
- [64] REDONDO QUINTELA, Félix; R. C. REDONDO MELCHOR. *Sitio web del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca* [en línea]: *Diccionario de términos, definición de dipolo sinusoidal*. Disponible en:
<http://www.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/Diccionario>

- rio/Diccionario.php?b=dipolo+sinusoidal [Consulta: 6 de julio de 2007]
- [65] National Instruments Corporation. *LabVIEW 7 Express - User Manual*. Austin, USA. 2003.
- [66] *NI 6070E/6071E Family Specifications* [en línea]. National Instruments Corporation, December 2005. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/370725c.pdf> [Consulta: 12 de marzo de 2007]
- [67] *DAQ E Series. E Series User Manual* [en línea]. National Instruments Corporation, February 2007. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/370503k.pdf> [Consulta: 15 de marzo de 2007]
- [68] National Instruments Corporation. *DAQ Quick Start Guide*. Austin, USA. 2000.
- [69] National Instruments Corporation. *NI Measurement and Control Designer 2004 - The Ultimate Industrial Data Acquisition and Control CD*. Austin, USA. 2004.
- [70] <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3216>
- [71] REDONDO MELCHOR, R. C. *Captación y tratamiento de datos de instalaciones y máquinas eléctricas, y representación de resultados en tiempo real*. Trabajo de Grado de Salamanca. Universidad de Salamanca, Mayo 2005.
- [72] National Instruments Corporation. *LabVIEW 7 Express - Getting Started with LabVIEW*. Austin, USA. 2003.
- [73] National Instruments Corporation. *LabVIEW Tutorial*. November 2001 Edition, Part Number 370178B-01. Incluido con el programa.
- [74] National Instruments Corporation. *Dataflow: the concept behind LabVIEW*. November 2001. Incluido con el programa.

- [75] National Instruments Corporation. *LabVIEW Help*. November 2001 Edition, Part Number 370117B-01. Incluido con el programa.
- [76] National Instruments Corporation. *LabVIEW Context Help*. November 2001. Parte del programa.
- [77] National Instruments Corporation. *NI-DAQ Software for Mac OS - Versions 6.6 and 4.9*. Austin, USA. 2001.
- [78] Prof. W. Kahan. *Lecture Notes on the Status of IEEE 754*. October 1, 1997 Elect. Eng. & Computer Science University of California.
- [79] G. Woodward. *History of a single-phase high-voltage distribution system*. IEE PROCEEDINGS-A, VOL. 140, No. 3, MAY 1993.
- [80] F. R. Quintela, R. C. Redondo, M. M. Redondo. *Power of balanced poly-phase systems, an application of the multi-terminal network power theorem*. The International Journal of Electrical Engineering Education (IJEED), ISSN 0020-7209, Vol. 42, N° 4, octubre de 2005. Reino Unido. (Páginas 325-337)
- [81] Real Decreto 1634/2006, de 29 de diciembre, por el que se establece la tarifa eléctrica a partir de 1 de enero de 2007.
- [82] Félix Redondo Quintela. *Redes con Excitación Sinusoidal*. Ed. REVIDE S. L. Béjar, 1997.
- [83] ITC-BT-43. Reglamento electrotécnico para baja tensión. Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto.
- [84] Félix Redondo Quintela, Norberto Redondo Melchor. *Multi-terminal Network Power Measurement*. International Journal of Electrical Engineering Education (IJEED).39/2, April 2002.
- [85] ITC-BT-06. Reglamento electrotécnico para baja tensión. Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto.
- [86] ITC-BT-07. Reglamento electrotécnico para baja tensión. Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto.

- [87] Martínez Salas J. *Elementos de Matemáticas*. Ed. Lex Nova. Valladolid, 1992.
- [88] F. R. Quintela, R. C. Redondo, M. M. Redondo. *Términos sobre energía eléctrica del Diccionario de la Real Academia Española*. Montajes e Instalaciones. Nº 408, páginas 88-97. Septiembre de 2006.
- [89] Félix Redondo Quintela, Norberto Redondo Melchor, Juan Manuel García Arévalo, Roberto Carlos Redondo Melchor. *Sobretensiones por corte del neutro*. Montajes e instalaciones. Mayo de 2002.
- [90] Juan Manuel García Arévalo. *Desarrollo de un sistema para el equilibrado de cargas trifásicas y la corrección simultánea de su factor de potencia*. Tesis doctoral. Universidad de Salamanca. Septiembre de 2005.
- [91] Filtros de armónicos.
<http://www.abb.com/Product/seitp332/d7c1fbd542d9efdbc1257155004ac17f.aspx>
- [92] Filtros de armónicos de alta tensión.
<http://www.energuia.com/es/productos4.aspx?ID=1087>
- [93] Félix Redondo Quintela y Roberto Carlos Redondo Melchor. *Potencia reactiva y energía reactiva*. Universidad de Salamanca 2007.
<http://www.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/Comentarios/Temas/EnergiaReactiva.php>
- [94] MORILLO Y FARFÁN, José. Curso de Electrotecnia, duodécima edición, tomo primero. Editorial Dossat, S. A. Madrid 1965. pág. 315.