

Avances en Informática y Automática

Noveno Workshop



**VNiVERSIDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL



Avances en Informática y Automática

Noveno Workshop

Avances en Informática y Automática

Noveno Workshop

Editores

Juan José Bullón Pérez
Daniel Hernández de la Iglesia
Antonio Gabriel Losada Gómez
Álvaro Lozano Murciego

Publicado en España por:

Departamento de Informática y Automática Facultad de Ciencias
Universidad de Salamanca
Plaza de los Caídos s/n
37008, Salamanca, España
Tel.: + 34 923294653
Fax: + 34 923294514
Web: <http://mastersi.usal.es>
Email: mastersi@usal.es

ISBN 978-84-608-5832-4

Editores:

Juan José Bullón Pérez
Daniel Hernández de la Iglesia
Antonio Gabriel Losada Gómez
Álvaro Lozano Murciego

Prólogo

El Máster Oficial en Sistemas Inteligentes de la Universidad de Salamanca tiene como principal objetivo promover la iniciación de los estudiantes en el ámbito de la investigación. El congreso organizado por el Departamento de Informática y Automática que se celebra dentro del Máster en Sistemas Inteligentes de la Universidad de Salamanca proporciona la oportunidad ideal para que sus estudiantes presenten los principales resultados de sus Trabajos de Fin de Máster y obtengan una realimentación del interés de los mismos.

La novena edición del *workshop* “Avances en Informática y Automática”, correspondiente al curso 2014 - 2015, ha sido un encuentro interdisciplinar donde se han presentado trabajos pertenecientes a un amplio abanico de líneas de investigación, desde los sistemas multiagente y la visualización de la información hasta la minería de datos pasando por otros campos relacionados. Todos los trabajos han sido supervisados por investigadores de reconocido prestigio pertenecientes a la Universidad de Salamanca, proporcionando el marco idóneo para sentar las bases de una futura tesis doctoral. Entre los principales objetivos del congreso se encuentran:

- Ofrecer a los estudiantes un marco donde exponer sus primeros trabajos de investigación.
- Proporcionar a los participantes un foro donde discutir ideas y encontrar nuevas sugerencias de compañeros, investigadores y otros asistentes a la reunión.
- Permitir a cada estudiante una realimentación de los participantes sobre su trabajo y una orientación sobre las futuras direcciones de investigación.
- Contribuir al desarrollo del espíritu de colaboración en la investigación.

Organización

El *workshop* “Avances en Informática y Automática” está organizado por el Departamento de Informática y Automática de la Universidad de Salamanca.

Comité Organizativo

María Gracia Manzano Arjona
María N. Moreno García
Juan M. Corchado Rodríguez
Carlos García-Figuerola Paniagua
Angélica González Arrieta
Francisco J. García Peñalvo
José L. Alonso Berrocal

Índice general

Técnicas de Visualización Aplicadas al Baloncesto	1
<i>Antonio Gabriel Losada Gómez y Roberto Therón Sánchez</i>	
Minería de datos procedentes del International Cancer Genome Consortium .	19
<i>Diego Vaquero Melchor y Luis Antonio Miguel Quintales</i>	
Diseño de sistemas inteligentes para optimización de redes de producción de energía	31
<i>Alvaro Vicente, Silvana Revollar, and Pastora Vega</i>	
Control de calidad en la industria textil mediante sistemas conexionistas .	45
<i>Juan José Bullón Pérez, Angélica González Arrieta y Araceli Queiruga Dios</i>	
Sistema de Sonorización Automática de Grupos Musicales Basada en el Reconocimiento de Instrumentos	73
<i>M.A. Ortiz Amores, A. González Arrieta y A.L. Sánchez Lázaro</i>	
Sistema para la predicción del estado de los electrodos en líneas eléctricas	83
<i>Adolfo Barroso Gallego, Juan Manuel Corchado y Fernando de la Prieta Pintado</i>	
Sistema de gestion inteligente de redes de sensores en eBikes	97
<i>Daniel H. de la Iglesia, J.M. Corchado y Juan F. de Paz</i>	
Filtrado Colaborativo y Computación Social: Sistema de recomendación de rutas ciclistas	111
<i>Álvaro Lozano Murciego, Juan Manuel Corchado y Sara Rodríguez González</i>	
Representación gráfica de sonidos del habla - Rev. Modelos y Técnicas . . .	123
<i>D. Tomás Rodríguez Barrios</i>	
Autores	

Técnicas de Visualización Aplicadas al Baloncesto

Antonio Gabriel Losada Gómez y Roberto Therón Sánchez

Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca. Plaza de los
Caídos s/n. 37008, Salamanca, España
`{alosada,theron}@usal.es`

Resumen La cantidad de información que se maneja hoy día en el ámbito del análisis deportivo está fuera del alcance de la comprensión humana mediante el uso de métodos tradicionales. Esto hace necesaria la aparición de sistemas que organicen y presenten la información de forma visual, mediante elementos y representaciones gráficas que ayuden a comprenderla. El caso del baloncesto es el de un deporte bastante inmerso en el análisis estadístico pero todavía lejano a la analítica visual. El proceso de investigación aquí presentado concluye con la generación de un sistema capaz de permitir a analistas y aficionados a este deporte pasar del clásico planteamiento de estudiar datos globales de manera textual a otro centrado en la visualización de la información de partidos concretos. Haciendo uso de diferentes representaciones, combinadas y enlazadas para proveer la mayor capacidad de análisis posible, la herramienta permite manipular la manera en que se muestran los datos de forma flexible para alcanzar diferentes conclusiones. Con un diseño centrado en la interacción y su fácil comprensión, el potencial de análisis de la información de este sistema gana enteros sobre los métodos utilizados hoy día.

Keywords: analítica visual, analítica deportiva, visualización de información, baloncesto

1. Introducción

El deporte ha experimentado una gran evolución hacia el cada vez más importante análisis del rendimiento, si bien se ha centrado casi exclusivamente en el desarrollo y uso de estadísticas numéricas. En el caso del baloncesto los avances han sido moderados y en la actualidad la mayoría de ellos presentan métricas avanzadas y pocos métodos innovadores de análisis. Estas estadísticas, presentadas de forma textual, no son comprensibles de un modo fácil y rápido.

Las tablas que se generan tras cada partido pueden alcanzar hasta 13 filas (máximo de jugadores por equipo) y cuentan con alrededor de 35 columnas, una por variable. Esto supone 455 celdas a analizar por el usuario mediante su lectura, lo cual supone una carga cognitiva muy elevada como para poder alcanzar conclusiones fácilmente. Si son varios los partidos a considerar por separado, el esfuerzo requerido se dispara. Es clara por tanto la necesidad de técnicas y herramientas que permitan realizar estos estudios de manera alternativa.

La analítica visual es un campo que ha comenzado a introducirse en el ámbito deportivo, aunque todavía no ha logrado alcanzar una adopción significativa. Esto resulta problemático, puesto que no hay un equilibrio entre la generación de nuevas métricas y la forma de trabajar con ellas y obtener conclusiones. Lo más sorprendente es la creación de nuevas métricas cuando todavía no se aprovecha información ya existente, como son los listados de jugadas *Play-by-Play* (*PbP*) con todas las acciones del partido. Del mismo modo, tampoco se ha prestado atención a diversas técnicas de visualización de información que sin ser innovadoras pueden resolver muy fácilmente problemas de análisis difíciles de manejar con los métodos actuales.

Dado que los datos que se suelen analizar están relacionados con valores medios de temporadas, o simplemente representan las estadísticas de un jugador o equipo tras la finalización de un partido, es necesario contar con mecanismos capaces de desglosar esa información y permitir su análisis a un nivel más bajo. Se llegaría así a conclusiones sobre patrones repetidos o acciones sucedidas durante el desarrollo de encuentros individuales, en casos concretos, y se conocerían mejor los comportamientos ante determinadas situaciones. La posibilidad de manipular esta información permitiría a cualquier persona, experta o no, obtener conocimiento relativo a diferentes aspectos del juego de forma sencilla. Sumando a esto el uso de visualizaciones se potenciaría en gran medida la capacidad de análisis ofrecida a los usuarios interesados en él. No solo eso, sino que además se les daría la oportunidad de manipular tales representaciones con el objetivo de ver y conocer solo aquello de su real interés.

Todo esto hace que este proyecto se centre en la visualización de información como vía para el análisis del baloncesto. En él se cubren tanto aspectos básicos como el análisis del desarrollo de un partido mediante la representación de una simple silueta interactiva, hasta otros mucho más complejos como la navegación por secuencias de jugadas o el estudio del juego en equipo de un conjunto, todo ello desde un punto de vista centrado en el uso de representaciones gráficas por encima de las textuales y en una potente interacción con la información.

2. Estado del arte

El tenis fue uno de los primeros deportes en adentrarse en la analítica visual. Jin y Banks [11] mostraron el desarrollo de un partido mediante un esquema de árbol y cada jugada junto a la dirección de golpeo. En la actualidad interesa el trabajo de Polk et al. [25], que permite ver cómo se produjeron en detalle todas las jugadas de un partido mediante matrices y glifos.

Tanto el hockey hielo como el fútbol americano están a la zaga en cuanto al uso de analítica visual. La única propuesta destacable del primero es la de Pileggi et al. [24], que utiliza mapas de calor y coordenadas de lanzamiento para visualizar las zonas desde las que más tira a portería cada equipo. En cuanto al fútbol americano, destaca el trabajo de Owens y Jankun-Kelly [21], basado en diagramas de arcos (Wattenberg [32]) para mostrar el desarrollo de un partido.

En fútbol se ha dado más importancia al uso de visualizaciones que al de métricas complejas. Attribute Explorer (Spence y Tweedie [30]) fue el primer

sistema de ámbito general adaptado a este deporte. SoccerStories [23] usa visualizaciones como mapas de calor o diagramas que indican relaciones fuertes y débiles entre jugadores en base a sus pases. Cava y Freitas [5] desarrollaron una propuesta novedosa para visualizar los resultados de un torneo de fútbol, haciendo uso de glifos personalizados contenedores de distintas informaciones.

En el béisbol se han desarrollado muchas métricas avanzadas. En cuanto al análisis visual, uno de los pioneros fue Graham J Wills [33], que generó visualizaciones combinando cinco representaciones diferentes. Cox y Stasko [7] ofrecieron nuevos métodos y utilizaron otros conocidos [28] para visualizar y manipular la información de forma gráfica y visual. De más peso es la reciente propuesta de Moon y Brah [18], en la que se pueden visualizar las localizaciones a las que lanza un *pitcher* y dónde terminan las pelotas golpeadas por el bateador. De más actualidad es la propuesta de Losada et al. [13], la cual consiste en un sistema interactivo con capacidad de análisis de múltiples temporadas, así como también permite visualizar todos los partidos del presente siglo haciendo uso de un mapa de calor de estructura matricial.

Pasando ya al baloncesto, su crecimiento respecto a la creación y uso de estadísticas para analizar el rendimiento es importante gracias a los trabajos de Oliver [20], Hollinger [10] y Pomeroy [26]. Alagappan [1] dividió los jugadores en trece posiciones fruto de su estudio (actualmente son cinco). Lucey et al. [15] y Chang et al. [6] observaron el deporte desde puntos de vista novedosos para evaluar las posiciones de los jugadores y mejorar las métricas de tiro. En cuanto al análisis visual, *Stats LLC* [12] ha desarrollado SportVU, servicio utilizado en la NBA. Goldsberry [9] y Maheswaran et al. [16] usaron datos de ese servicio para crear visualizaciones relativas a lanzamientos y rebotes. Therón y Casares [31], monitorizaron la posición de cada jugador en el campo con dispositivos GPS. Maymin [17] realizó estudios sobre las zonas con más aceleraciones y los apoyó en representaciones gráficas. Peter Beshai [4] creó un sistema capaz de analizar cualquier lanzamiento a canasta, estudiando estos desde distintas ópticas. Sisneros y Van Moer [29] desarrollaron PluMP, un sistema que permite visualizar estadísticas en cuatro cuadrantes divididos por victorias y derrotas. Por último, Pagno et al. [22] presentaron diversos métodos de visualización sencillos para analizar distintos aspectos de jugadores y equipos.

3. Descripción del problema

El baloncesto ha evolucionado durante los últimos tiempos en cuanto a su análisis, pero repasando el estado del arte se observa cómo todavía son pocas las propuestas que explotan la analítica visual en profundidad. Las que se han adentrado en este ámbito han caído en el problema de ser estáticas (impidiendo la manipulación de los datos) o de centrarse en aspectos concretos del juego (no permitiendo obtener una visión más global de distintos comportamientos).

Se hace necesario el desarrollo de un sistema como el propuesto, capaz de aunar diferentes aspectos y combinarlos de forma interactiva para permitir al usuario la obtención de conclusiones acerca de la información manejada.

Los datos con los que habría que trabajar en un sistema que englobase toda la información posible de un partido se encuentran en diferentes lugares (aun en el mismo sitio web). Esto dificulta la comprensión del conjunto de datos, que ya de por sí resulta masivo. En el caso de un partido cualquiera, se podría trabajar fácilmente con dos tablas como las mencionadas en la introducción (910 celdas en total), un listado *PbP* con todas las jugadas sucedidas en el partido (alrededor de 450, hasta 600 en caso de haber prórrogas), y dos matrices con las coordenadas de todos los lanzamientos realizados por uno y otro equipo (unos 84 cada uno de media en la temporada 2014-15, esto es, 168 pares de coordenadas). En total, cerca de 1500 datos a tratar textualmente en el contexto de un solo partido. La necesidad de herramientas visuales se muestra ahora más clara que nunca.

De la localización de este problema de sobrecarga surgió la propuesta que se discute en este artículo. Dado que los datos generados en cada encuentro son muy diferentes y pueden encuadrarse en distintos ámbitos, fue necesario desarrollar diferentes soluciones para cada uno de ellos. Se crearon por tanto cinco zonas en el sistema. Sí conviene destacar, sin embargo, el enfoque integrador que se quiere dar al sistema completo. Pese a que estas zonas parezcan independientes, es en su vinculación donde reside su potencia real, ya que lo que una muestra puede ser ratificado por el resto fácilmente (a diferencia de lo que ocurre en las propuestas cubiertas en el estado del arte, centradas en aspectos únicos y sin posibilidad de confrontarse con nada).

4. Desarrollo de la propuesta

Partiendo de la cantidad de datos expuesta en la sección anterior, el sistema desarrollado como solución a los resultados de la investigación se presenta en esta. Las diferentes zonas de la herramienta expuestas a continuación buscan solventar el problema del manejo de tal cantidad de información y facilitar la obtención de conclusiones a cualquier usuario.

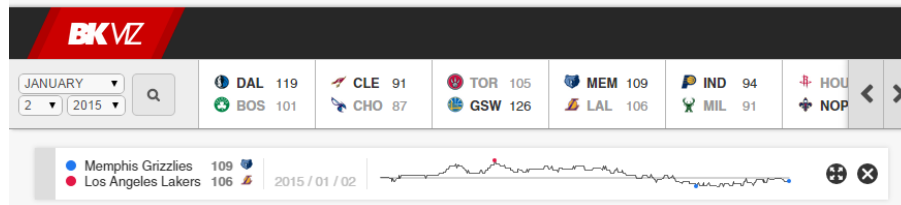


Figura 1: Bloque de selección de partidos y cabecera de un encuentro, incluyendo una *sparkline* que ilustra su desarrollo.

Comenzando por la obtención de los datos, este proceso se realiza a través del sistema eligiendo una fecha concreta, de la cual se vuelcan todos los partidos

disputados ese día (Figura 1). Una vez obtenidos, el usuario puede elegir cualquiera de ellos para pasar a analizarlo. Esto implica acceder a diferentes páginas de la fuente de datos (Basketball-Reference¹) para recuperar toda la información (listado de jugadas *Play-by-Play*, estadísticas y localizaciones de lanzamiento) y generar la hoja de análisis del partido. Lo primero que aparece de ella (al cargarse contraída) es su cabecera, en la que una *sparkline* (Figura 1) permite ver el desarrollo del partido de un vistazo, así como también en qué momentos tomó la máxima ventaja cada equipo y quién terminó ganando el partido (puntos destacados; rojo para el local, azul para el visitante).

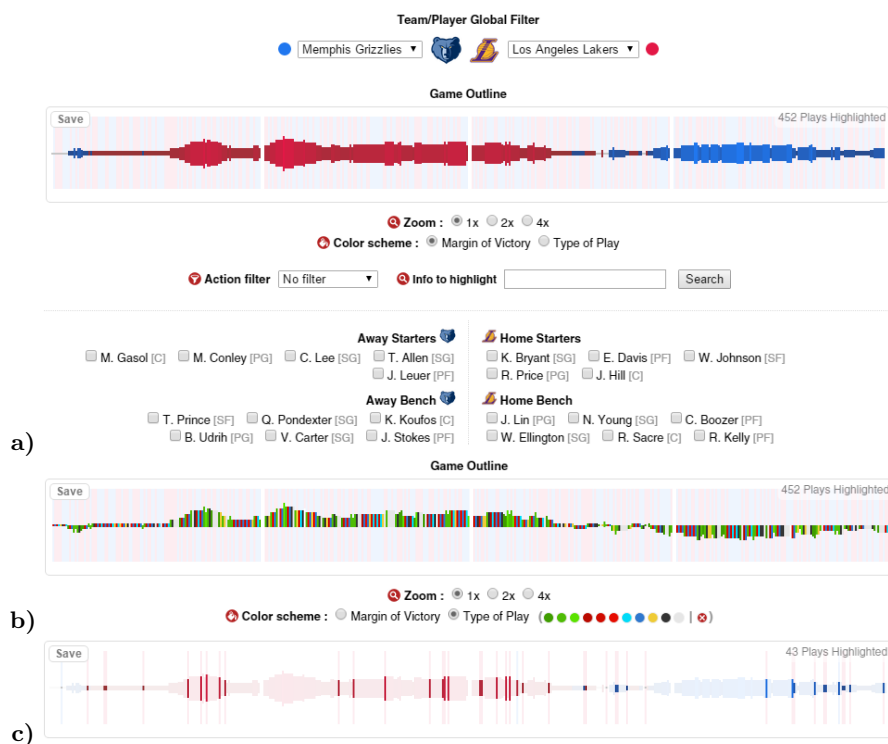


Figura 2: Zona representativa del perfil o silueta del partido. **a)** Sección completa y opciones de filtrado. **b)** Representación por tipo de jugada. **c)** Filtrado de jugadas de un solo jugador concreto.

A modo de extensión de la información de la cabecera, y una vez desplegado el bloque de análisis, se puede ver la primera zona del sistema propuesto (Figura 2.a). Esta representa el perfil del encuentro, visualización formada por una serie de barras consecutivas colocadas a lo largo de un eje que permiten ver el desarrollo del partido en base a la diferencia de puntos entre ambos equipos.

¹ <http://www.basketball-reference.com/>

Se trata de una representación muy simple que facilita conocer en qué momentos hubo mayores y menores diferencias, así como cuándo se produjeron rachas de anotación de uno y otro equipo, cuánto tiempo duraron las ventajas de cada conjunto, o durante cuántas jugadas no varió el resultado. El hecho de realizar divisiones por periodos (incluyendo prórrogas) facilita saber qué ocurrió en cada momento. El fondo de la representación varía entre el azul y el rojo para indicar quién realizó cada acción, dado que el área de la visualización se encuentra dividida en jugadas individuales (barras) accesibles independientemente.

En cuanto al propio área en sí, puede modificarse su representación en base a la diferencia de puntos (por defecto, azul y rojo) o al tipo de jugada (Figura 2.b). En este último caso cada color representa una acción diferente y la visualización varía para representar qué equipo tiene ventaja sobre qué otro (arriba el equipo local). También se puede aplicar zoom para observar en más detalle lo ocurrido con el objetivo de localizar patrones entre los datos.

Pasando al filtrado, este puede realizarse tanto por equipo como por jugador (Figura 2.c). Esto permite conocer qué acciones repite más un jugador o equipo a lo largo del partido, pudiendo llegando a saber qué tipo de juego emplea. Otro filtro aplicable es por tipo de jugada, e incluso pueden introducirse las palabras a buscar en una caja de búsqueda manual. Por último, en la parte inferior (Figura 2.a) se incluyen todos los jugadores de ambos equipos, pudiendo filtrar las jugadas por su presencia en pista. Así, se pueden encontrar comportamientos que ocurren cuando ciertos jugadores se enfrentan, u otros que solo se dan ante la presencia o ausencia de algún jugador.

El segundo bloque de análisis permite visualizar virtualmente el partido en base a su listado de jugadas *PbP* (Figura 3). El reproductor permite navegar por las acciones del partido tanto automática como manualmente. En este último caso, el avance o retroceso se realiza entre secuencias de acciones, lo cual permite ver mejor los comportamientos de un equipo con la visualización de grupos de jugadas aisladas. Estas secuencias se agrupan por posesiones, de manera que en cada una de ellas solo un equipo tiene el balón y trata de anotar. Si no lo consigue, y si hay un cambio de posesión (rebote defensivo, pérdida,...), entonces se pasará a la siguiente secuencia, perteneciente al rival.

El reproductor presenta las jugadas de forma esquemática, haciendo uso de gráficos sencillos basados en líneas (a mayor grosor más tiempo duró la jugada) y figuras geométricas simples como circunferencias y cuadrados. Además, se permite la interacción con dichos gráficos para conocer qué jugada representa cada uno e incluso visualizarla en vídeo (en este caso solo los lanzamientos). Dado que no se dispone de información relativa a la posición en que sucedieron ciertas acciones como pérdidas y rebotes estas se generan automáticamente teniendo en cuenta el contexto de la jugada en que suceden, obteniendo la representación más próxima a la realidad posible.

En la parte inferior de la Figura 3 se ve la zona de búsqueda de secuencias en base a los parámetros fijados por el usuario. Esto permite una serie de resultados coincidentes con estos para después poder visualizarlos. Las secuencias localizadas pueden seleccionarse, pasando a verse su listado de jugadas en la parte derecha del campo (*Play List*), aclarándose así su desarrollo. En cuanto

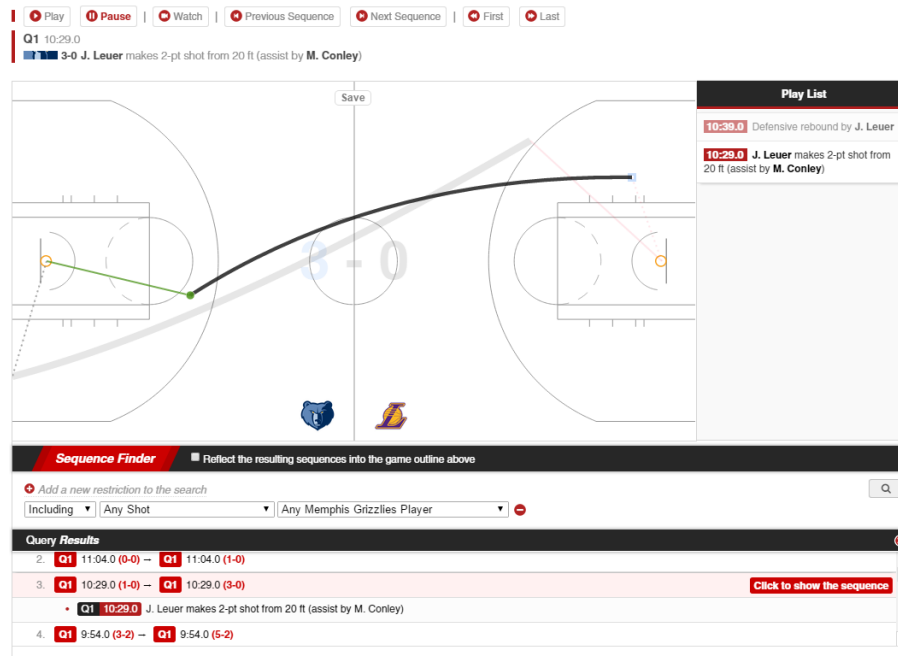


Figura 3: Reprodutor virtual de las jugadas de un partido, incluyendo una búsqueda de secuencias y representando una de ellas junto a su listado de jugadas.

a los filtros, estos pueden ser por tipo de jugada, por jugador, por distancia de lanzamiento, por diferencia de puntos, equipo líder, jugadores en pista, número de jugadas en la secuencia, duración de esta, y jugada que la precede. Además, también se pueden aplicar filtros de exclusión, evitando secuencias contenedoras de ciertas acciones. Los resultados, si se quiere, pueden reflejarse en la silueta del partido.

Uno de los aspectos más interesantes del sistema es la capacidad de visualización de lanzamientos (Figura 4). Se dispone de cinco opciones diferentes (Figura 4.a), si bien son tres las básicas, ya que las otras dos combinan estas (huellas y mapas de calor junto a localizaciones). En cuanto a los filtros, estos permiten visualizar solamente los lanzamientos de un periodo o de todos, y también ver únicamente los anotados o fallados, o ambos a la vez. La visualización por localizaciones exactas permite conocer los puntos concretos desde los que se lanzó a canasta. La representación por huellas de lanzamiento (Figura 4.c) facilita ver desde qué distancias lanzó, anotó o erró más lanzamientos un equipo sin atender a posiciones concretas. La visualización por mapa de calor muestra claramente qué zonas del campo fueron más frecuentadas y explotadas por los lanzadores. En aquellas representaciones que incluyen localizaciones exactas de los lanzamientos se puede interactuar con los gráficos para ver los tiros en vídeo.

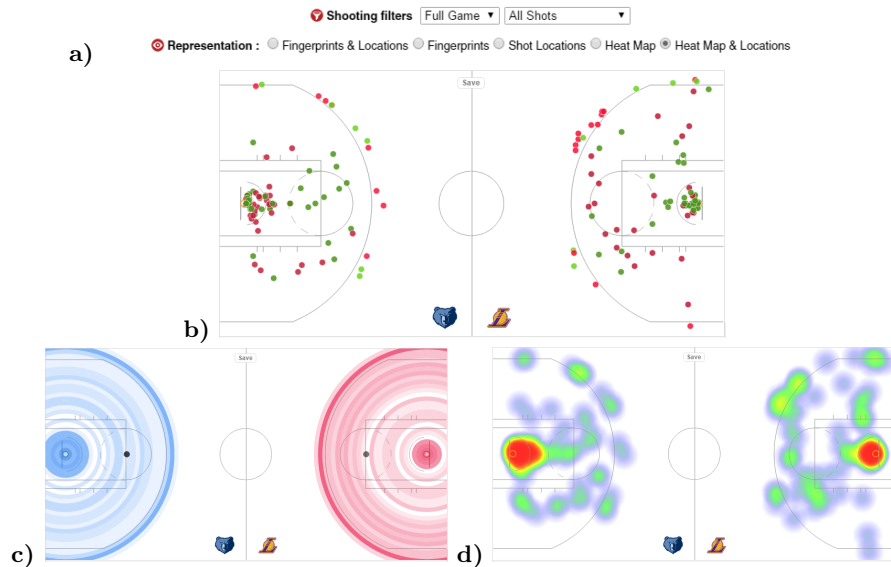


Figura 4: Filtros para la visualización de lanzamientos. **a)** Localizaciones de tiro. **b)** Huellas de lanzamiento radiales por distancias. **c)** Mapa de calor.

La tercera zona que presenta la herramienta es la relativa a la visualización del vídeo del encuentro que se está analizando (Figura 5). Es una zona importante puesto que incluye el mecanismo de análisis más utilizado hoy día, el audiovisual. Permite analizar los partidos mediante una visualización directa de lo que ocurrió en ellos, dejando a un lado cualquier duda que pudiese haber sobre conclusiones obtenidas en otras zonas y representando una información veraz ante todo.

Aunque se recomienda la carga y visualización del vídeo completo del partido, del cual deberá disponer el usuario, también es posible cargar vídeos divididos por periodos. El aspecto que hace del reproductor de vídeo algo muy útil es que todas las jugadas del partido accesibles desde otras zonas (perfil del partido o reproductor virtual) están vinculadas al vídeo mediante tiempos calculados automáticamente (es necesario introducir los tiempos de comienzo y mitad de cada periodo la primera vez), de forma que interactuando con ellas en dichas zonas se reproducen en el vídeo en el momento en que ocurrieron. El cálculo de los tiempos se realizó teniendo en cuenta medias relativas al tiempo perdido tras cada tipo de jugada (faltas, tiros libres, tiempos muertos,...).

Esta zona también incluye un apartado para la toma de notas, las cuales se actualizan cada pocos segundos para reflejar la posible inclusión de nuevos apuntes por parte de otros usuarios. Este sistema colaborativo permite estar al tanto de las conclusiones obtenidas por todos los analistas, y visualizar los momentos en que se tomó cada nota. Para dar una mayor flexibilidad al usuario, se hizo flotante el reproductor de vídeos, de forma que se puede mover por toda

Match Video Analysis

Seleccionar archivo | 24032015-war...blazers.mp4

Q1 Start (12:00)	0 hours	1 minute	30 seconds
Q1 Half (6:00)	0 hours	8 minutes	11 seconds
Q2 Start (12:00)	0 hours	29 minutes	47 seconds
Q2 Half (6:00)	0 hours	37 minutes	3 seconds
Q3 Start (12:00)	0 hours	56 minutes	8 seconds
Q3 Half (6:00)	1 hour	7 minutes	52 seconds
Q4 Start (12:00)	1 hour	31 minutes	13 seconds
Q4 Half (6:00)	1 hour	39 minutes	2 seconds

Offset: Advance | 0 seconds

Refresh panel | New Annotation

- 0:01:40** Klay Thompson scores from two after the screen.
- 0:07:57** Easy layup by Wright for Portland. Soft defense. [Watch](#) [Comment](#) [Delete](#)
- 0:13:19** Good ball movement by Portland leading to a corner three.

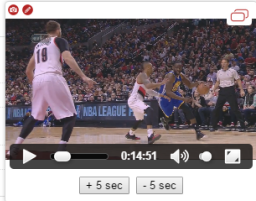


Figura 5: Zona de reproducción de vídeo, con tiempos de comienzo y mitad de cada periodo, versión flotante del reproductor y notas sobre el encuentro.

la hoja de análisis para colocarlo en el lugar más conveniente en cada momento, lo cual evita tener que desplazarse continuamente.

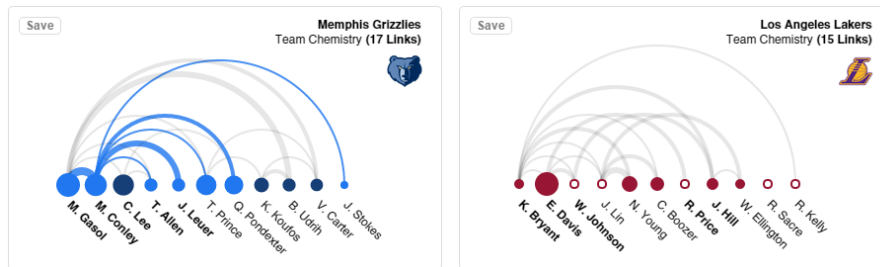


Figura 6: Visualización de las relaciones entre los jugadores de dos equipos independientes en un partido.

La penúltima sección desarrollada (Figura 6) permite ver las relaciones entre los jugadores de un equipo en base a las asistencias que se repartieron entre sí. Puede ser manipulada eligiendo qué dos estadísticas se quieren mostrar en la visualización, variando estas el orden y el diámetro de las circunferencias de los jugadores. Los arcos que vinculan a los jugadores representan las asistencias que dos jugadores se repartieron de manera combinada, sin atender a quién fue el pasador y quién el anotador. El grosor de los vínculos indica qué jugadores tienen una relación más estrecha en pista (a mayor grosor, más relación).

Las circunferencias vacías indican el valor cero para cualquier estadística elegida, pudiendo ver rápidamente qué jugadores no registraron números para alguna de estas. Los tamaños pueden elegirse en base a los máximos marcados por

los compañeros de equipo o por todos los jugadores del partido, lo cual permite analizar a cada jugador en el contexto de su equipo o en el del encuentro. Por último, la interacción con los vínculos hace que se resalten los jugadores que relacionan mientras que la interacción con las circunferencias resalta todos los vínculos salientes de estas y los compañeros a los que llegan.

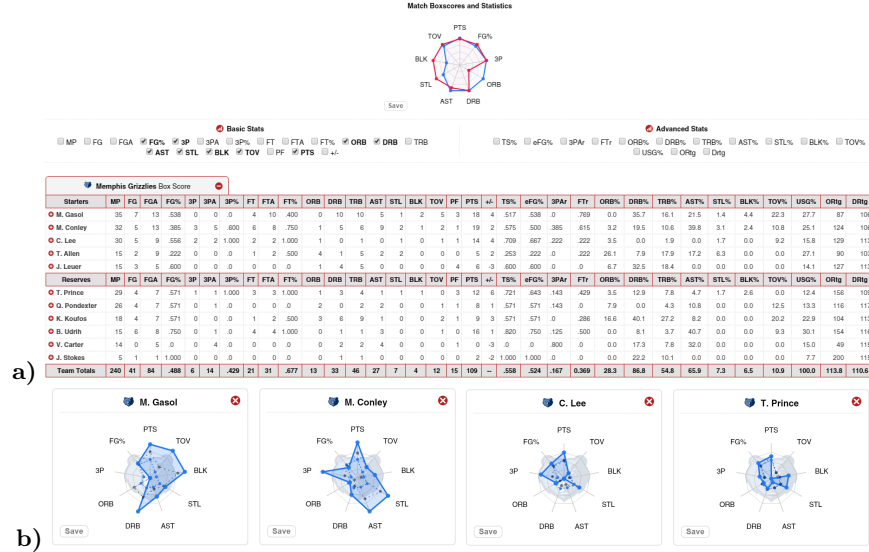


Figura 7: a) Gráfico del partido y tabla de estadísticas. b) Gráficos de jugadores.

La zona final se reservó para la presentación de las estadísticas (básicas y avanzadas) recogidas tras la finalización del encuentro (Figura 7.a). Estas se presentan aunando elementos clásicos (tablas) y otros más novedosos (visualizaciones). Se utilizan dos tablas, una por equipo, contenedoras de los valores numéricos. Encima de estas aparece un pequeño gráfico de estrella (Michael Friendly [8]) que permite ver qué equipo dominó cada faceta del juego, pudiendo así compararlos y encontrar diferencias y similitudes rápidamente sin tener que leer las tablas. El gráfico es modificable de forma dinámica, simplemente variando la selección de los controles que se encuentran bajo su representación.

Desde las tablas es posible añadir gráficos de estrella de jugadores, los cuales se colocan justo debajo de estas (Figura 7.b). En ellos se representa tanto la actuación del jugador (línea continua de color), como la media del equipo (línea punteada de color) y la media histórica del jugador (línea punteada negra). Esto permite ver no solo cómo fue la actuación de un jugador en el partido, sino si fue mejor o peor que las de sus compañeros o si mejoró o no sus medias históricas. Se puede interactuar con cada área, pasando a un tono más opaco y permitiendo ver tanto a quién se corresponde como el valor de cada uno de sus vértices.

Por último, cada sección cuenta con la utilidad de generar informes. Estos consisten en imágenes contenedoras de la información presentada en las visualizaciones. A esa información se le añaden los datos de contexto necesarios para que cualquier persona comprenda lo que representa la imagen fuera del sistema.

5. Casos de estudio

En esta sección se analizan dos equipos diferentes, cada uno con sus señas de identidad, para tratar de probar la utilidad del sistema a la hora de descubrir patrones de juego, ya que se buscará contrastar las hipótesis de partida con los datos localizados en la herramienta.

5.1 San Antonio Spurs: Juego en equipo, rotaciones y búsqueda del mejor lanzamiento posible

El primer caso de estudio se centra en los San Antonio Spurs. El estilo de juego de este equipo se basa principalmente en pasar el balón tantas veces como sea necesario hasta localizar una posición franca de lanzamiento. El objetivo, por tanto, es encontrar ese pase adicional que libere a algún compañero para que este pueda anotar sin oposición.

Esto va unido al uso de las mejores zonas de lanzamiento posibles desde el punto de vista de la analítica (cerca del aro y triples), teniendo una de sus mayores armas en los triples desde la esquina [19][2][14].

Otro de los aspectos que destaca de San Antonio son las rotaciones que realiza y su buena gestión de los minutos de juego de cada uno de los integrantes del equipo. Utilizan un sistema en el que todos participan y las estrellas descansan el máximo tiempo posible para mantenerse frescas.

5.1.1 Denver @ San Antonio, 2015/04/03 .

El partido analizado enfrentó a Denver ante (@, at) San Antonio (siendo estos últimos los locales), y el desarrollo de este puede verse en la Figura 8, que muestra el dominio de los Spurs de principio a fin.



Figura 8: Denver @ San Antonio, 2015/04/03. *Sparkline* del partido.

Lo primero que interesa comprobar es el juego en equipo que realizó el conjunto de Texas. Para ello se puede acudir a la zona de química del equipo y tratar de analizar la visualización correspondiente a sus jugadores.

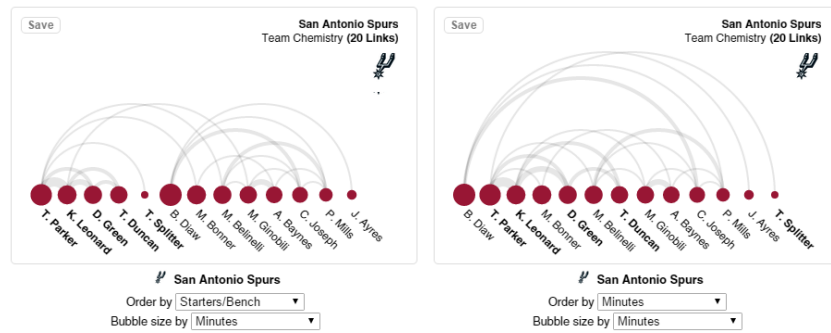


Figura 9: Denver @ San Antonio, 2015/04/03. Química del equipo (San Antonio Spurs). Ordenaciones por titulares/suplentes y por minutos.

En la Figura 9 se incluyen dos representaciones de la misma visualización, con distintas ordenaciones. En primer lugar, se ve cómo fueron 13 (máximo permitido) los jugadores que disputaron minutos, quedando patentes las rotaciones. De esos 13 jugadores, 11 disputaron más de 14 minutos y ninguno más de 25. El equilibrio de minutos queda claro observando el tamaño de las circunferencias. Viendo los jugadores ordenados por minutos, se observa cómo entre los cuatro primeros hay dos suplentes, e incluso uno de ellos fue el que más tiempo de juego tuvo de entre todos, siendo así importantes los reservas para este equipo.

En cuanto a las relaciones, se muestran un total de 20 enlaces. En el caso de haber terminado todas las asistencias en canastas de dos puntos, el juego en equipo habría facilitado 40 puntos, si bien algunos de esos lanzamientos fueron triples y los puntos sumados más. Hay también una buena compenetración de todos los jugadores entre sí, estando los vínculos muy repartidos. Hasta 9 de los 13 jugadores cuentan con tres o más vínculos, y 5 de 13 con cuatro o más. Esto evita al rival la posibilidad de anular a un único jugador para ganar ventaja, ya que son todos los que participan en el juego en equipo eficientemente.

Pasando al análisis de lanzamientos de ambos equipos, interesa ver las tendencias de San Antonio para comprobar si utiliza los tiros de larga distancia con frecuencia (haciendo hincapié en aquellos realizados desde las esquinas).

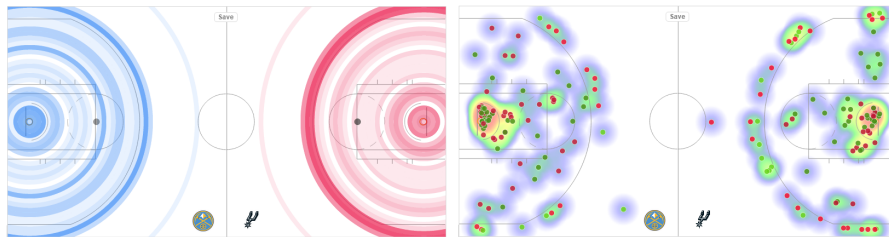


Figura 10: Denver @ San Antonio, 2015/04/03. Huellas de distancias de tiro y mapa de calor con localizaciones.

Para comprobar esta información se pueden usar las visualizaciones de lanzamientos del sistema. Las dos utilizadas para este análisis se ven en la Figura 10. Las huellas radiales por distancias permiten ver cómo San Antonio (parte derecha del campo) lanzó a canasta mayoritariamente desde la zona de triples y el interior. Visualizando el mapa de calor junto a las coordenadas de lanzamiento se observa que se realizaron hasta 11 lanzamientos desde las esquinas de un total de 34 triples intentados, quedando patente el patrón de juego del equipo.

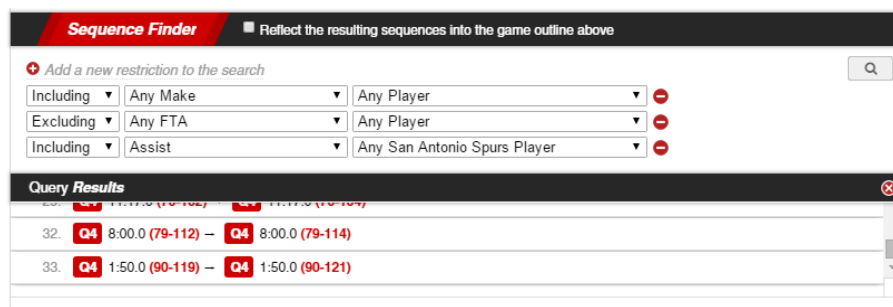


Figura 11: Denver @ San Antonio, 2015/04/03. Búsqueda de canastas con asistencia.

A sabiendas de que este equipo realiza muchos pases para obtener el mejor lanzamiento posible, se pueden buscar secuencias relacionadas con las asistencias. Se buscaron y localizaron todas las anotaciones del equipo fruto del pase de un compañero (Figura 11), registrando este una asistencia. Los resultados muestran un total de 33 coincidencias. Se realizó el mismo procedimiento excluyendo todas las canastas tras asistencia, obteniendo solamente 15 resultados. Como era de esperar, fueron más las canastas asistidas que las no asistidas, confirmando las ideas de las que se partía. Un total de 33 de 48 canastas fueron asistidas (68.7%), mientras que solo 15 de 48 no lo fueron (31.3%).

En este pequeño análisis de un encuentro se confirmaron todas las hipótesis que se enunciaron en la introducción a este caso de estudio. Tanto el marcado juego en equipo de San Antonio, como su capacidad para lanzar desde la esquina y el uso de rotaciones, dando minutos a todos los jugadores del equipo de forma equitativa, han sido ratificados en este análisis.

5.2 Portland Trail Blazers: Defensa de máxima eficiencia

En este caso de estudio se buscó analizar los patrones defensivos de un equipo en lugar de su juego de ataque. Si un equipo destaca estadísticamente en defensa, son los Portland Trail Blazers [3]. Mientras San Antonio destacaba por su capacidad de anotar los lanzamientos de mayor valor, Portland lo hace por restringir al máximo los intentos desde tales posiciones [27].

Portland es el equipo que menos triples (incluyendo esquinas) permiten lanzar (21.8% del total de tiros de sus rivales), el décimo en cuanto a tiros en el interior

permitidos y el que más tiros de media distancia facilita. En resumen, cierran los tiros de máximo valor mientras abren la puerta a lanzamientos poco valorados.

El siguiente estudio trata de corroborar los patrones en lo relativo a todos los lanzamientos realizados por el rival, pudiendo ver si efectivamente se minimizan aquellos de máximo valor.

5.2.1 Memphis @ Portland, 2015/02/22 .

Este partido tuvo periodos de ventaja para ambos equipos, y otros en los que el partido estuvo igualado. En el último cuarto Memphis superó una desventaja de 13 puntos para terminar ganando, como muestra la Figura 12.



Figura 12: Memphis @ Portland, 2015/02/22. *Sparkline* del partido.

Estadísticamente destaca el escaso número de triples que los Blazers permitieron lanzar a Memphis y los tiros libres intentados por los Grizzlies (13, siendo la media 23). Esto refleja otro de los esfuerzos de Portland: tratar de cometer el menor número de faltas posibles para no regalar lanzamientos fáciles al rival.

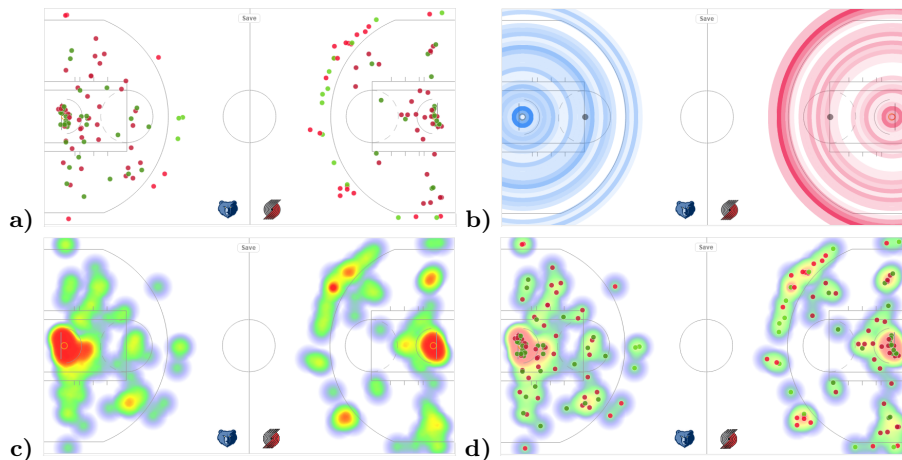


Figura 13: Memphis @ Portland, 2015/02/22. **a)** Localizaciones de tiro. **b)** Huellas de distancias. **c)** Mapa de calor básico. **d)** Mapa de calor y localizaciones.

Pasando al análisis de tiros, la primera representación (Figura 13.a) muestra un contraste grande entre los dos equipos. Mientras que Memphis lanzó 9 triples

(media de la liga en 22), Portland lanzó 33. De entre todos esos tiros a canasta, solamente 3 de Memphis sumaron puntos mientras que 13 de Portland hicieron lo propio. Lanzar tanto desde fuera redujo los intentos interiores de Portland, que además no fueron muy provechosos. El caso de Memphis es el opuesto.

Si bien puede parecer que Portland no pudo contener a los Grizzlies en el interior, lo cierto es que en muchas ocasiones los obligó defensivamente a realizar tiros desde media distancia, como evidencia la Figura 13.b. Los mapas de calor (Figuras 13.c y 13.d) muestran cómo Portland explotó tres zonas fuera de la línea de triples mientras que Memphis se centró en el área interior.

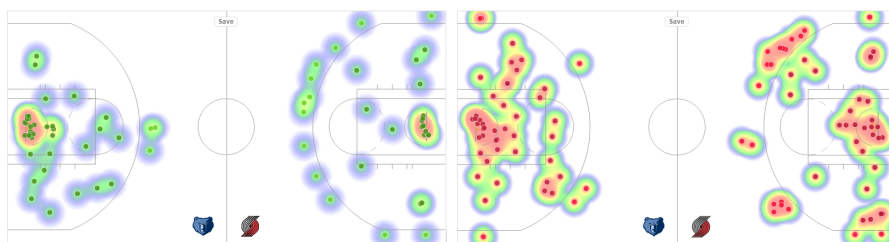


Figura 14: Memphis @ Portland, 2015/02/22. Visualizaciones de lanzamientos fallados y anotados.

Para cerrar el análisis de lanzamientos, diferenciar entre los anotados y los fallados (Figura 14). En cuanto a los fallados, se ve cómo estos, en el caso de Memphis, sucedieron a prácticamente todas las distancias del aro, lo cual invita a pensar que Portland fue capaz de forzar esta distribución gracias a su defensa. Muchos de los anotados, por su parte, los consiguieron en la zona interior del campo, si bien otros tantos llegaron de media distancia debido a la defensa Blazer. Lo que más llama la atención es cómo el gráfico de anotaciones de un equipo es prácticamente inverso al del otro.

Por último, pareció interesante explorar dos lanzamientos fallados por Memphis en vídeo (Figura 15) para corroborar los esfuerzos de Portland. En ambos casos los tiros se produjeron desde la esquina inferior derecha. El primero de ellos (Figura 15.a) muestra a N. Batum (defensa de Portland) encimando al atacante y dificultándole al máximo el lanzamiento sin saltar, evitando así un posible contacto que termine en falta y le dé tiros libres. En la segunda acción la disposición de los jugadores es muy similar (Figura 15.b), si bien R. Lopez, al estar más distanciado del lanzador de Memphis, ha de saltar para cubrir el mayor espacio posible y evitar que el lanzamiento entre. Se observa cómo Portland trata de cerrar al máximo los tiros de sus rivales desde las esquinas dado su gran valor.

Aquí termina el estudio de Portland, en el cual se ha demostrado el estilo de defensa que practica y cómo este obliga a sus rivales a lanzar desde posiciones poco valiosas. Con apenas intentos desde la línea de tres puntos, los rivales de

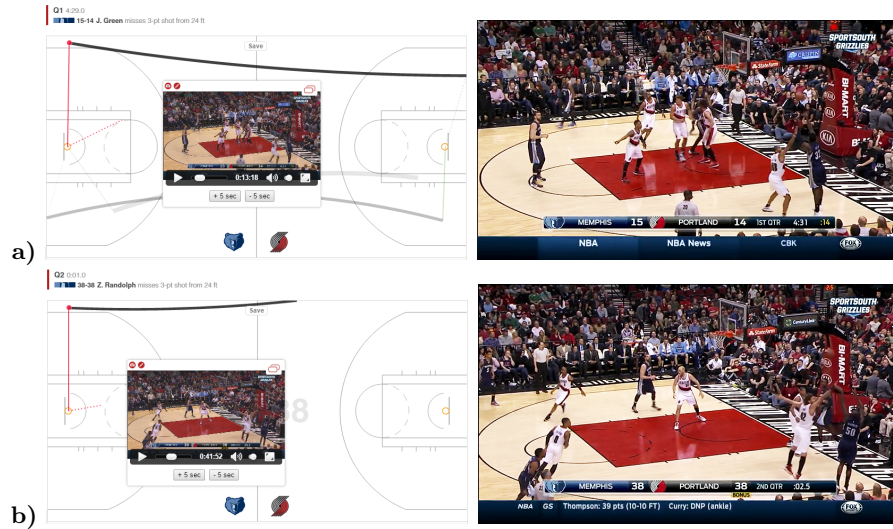


Figura 15: Memphis @ Portland, 2015/02/22. Reproducción en vídeo de dos lanzamientos errados por Memphis.

los Blazers han de buscar alternativas de anotación, y los tiros libres tampoco son una gran opción debido a que Portland minimiza el contacto y las faltas.

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado un sistema de análisis visual de partidos de baloncesto basado en la creación de varias técnicas de visualización novedosas, así como también en el uso de otras clásicas. Con esto se consiguió aproximar la analítica deportiva a la visual, estando ambas bastante distantes hoy día, facilitando a cualquier usuario el estudio de datos relativos al baloncesto.

Uno de los principales puntos de interés fue el procesamiento y presentación de los listados de jugadas *Play-by-Play* mediante técnicas de visualización. Esto se logró, confirmando cómo se puede adaptar cualquier información a alguna visualización que facilite su comprensión. De hecho, no solo estos datos sino los relativos a estadísticas numéricas o lanzamientos se tradujeron en el sistema a diferentes gráficos que permiten a los usuarios entender la información mucho mejor que mediante su lectura. A esto hay que sumar la capacidad de modificar el modo de mostrar la información en cada visualización, aportando así flexibilidad.

En cuanto al enfoque de la propuesta, se buscó que fuese muy concreto, centrado en partidos individuales en lugar de en datos de largos periodos de tiempo. Esto permite alcanzar conclusiones sobre aspectos y patrones variables en cortos espacios temporales.

Como conclusión final, decir que el uso de múltiples visualizaciones interactivas enlazadas y utilizadas de manera combinada, diseñadas para realizar tareas

bien definidas, presenta un gran potencial a la hora de facilitar la obtención de conclusiones y analizar la información. Dado el salto respecto a las propuestas de otros autores, se espera que es este proyecto pueda contribuir a la evolución de la analítica visual en el ámbito del deporte.

Pasando ya a los posibles desarrollos futuros, sería interesante la adición de más visualizaciones o vistas enlazadas que aportasen una mayor cantidad de información y capacidad de análisis al sistema. También se podría tratar de conseguir información posicional de los jugadores, de manera que se supiese en todo momento (en la reproducción virtual de partidos) en qué posición se encuentran. Por último, la realización de reuniones con expertos del deporte del baloncesto permitiría obtener opiniones que marcaran el camino correcto a seguir. Otros aspectos a considerar podrían ser la inclusión de una opción para cargar datos propios (mayor flexibilidad), la incorporación de ciertos datos estadísticos históricos, o la realización de estudios de usabilidad.

Referencias

1. Alagappan, M.: From 5 to 13: Redefining the positions in basketball. mit sloan sports analytics conference (2012)
2. Analytics, B.: The decline of mid range jumpers and related topics. <http://goo.gl/ozWQay>, Último acceso: 2015-05-24
3. Basketball-Reference: 2014-15 nba season summary. <http://goo.gl/eZT4nR>, Último acceso: 2015-05-25
4. Beshai, P.: Buckets: Visualizing nba shot data (2015)
5. Cava, R., Freitas, C.D.S.: Glyphs in matrix representation of graphs for displaying soccer games results. In: SportVIS-Workshop on Sports Data Visualization. Atlanta, Georgia, USA: IEEE VIS (2013)
6. Chang, Y.H., Maheswaran, R., Su, J., Kwok, S., Levy, T., Wexler, A., Squire, K.: Quantifying shot quality in the nba. Second Spectrum Inc. Web (2014)
7. Cox, A., Stasko, J.: Sportsvis: Discovering meaning in sports statistics through information visualization. In: Compendium of Symposium on Information Visualization. pp. 114–115. Citeseer (2006)
8. Friendly, M.: Statistical graphics for multivariate data. In: Proceedings of the SAS User’s Group International Conference. vol. 16, pp. 1157–1162 (1991)
9. Goldsberry, K.: Courtvision: New visual and spatial analytics for the nba. In: 2012 MIT Sloan Sports Analytics Conference (2012)
10. Hollinger, J.: Pro Basketball Prospectus. PRO BASKETBALL PROSPECTUS, Potomac Books, Incorporated (2003), <http://books.google.es/books?id=7DzXAAAACAAJ>
11. Jin, L., Banks, D.C.: Visualizing a tennis match. In: Information Visualization’96, Proceedings IEEE Symposium on. pp. 108–114. IEEE (1996)
12. LLC, S.: Nba player tracking. <http://stats.nba.com/tracking/> (2014), Último acceso: 2015-04-10
13. Losada, A.G., Theron, R., Vaquero, M.: A deep dive into decades of baseball’s recorded statistics. In: Smart Graphics. pp. 15–26. Springer (2014)
14. Lowe, Z.: Life beyond the arc. <http://goo.gl/0nHWxU>, Último acceso: 2015-05-24
15. Lucey, P., Bialkowski, A., Carr, P., Yue, Y., Matthews, I.: “how to get an open shot”: Analyzing team movement in basketball using tracking data. In: MIT Sloan Sports Analytics. MIT Sloan Sports Analytics Conference (2014)

16. Maheswaran, R., Chang, Y.H., Henehan, A., Danesis, S.: Deconstructing the rebound with optical tracking data. In: The MIT Sloan Sports Analytics Conference. Boston (2012)
17. Maymin, P.: Acceleration in the nba: Towards an algorithmic taxonomy of basketball plays. MIT Sloan Sports Analytics Conference (2013)
18. Moon, B., Brath, R.: Bloomberg sports visualization for pitch analysis. SportVIS-Workshop on Sports Data Visualization. Atlanta, Georgia, USA: IEEE VIS (2013)
19. Nation, S.: Gregg popovich hates three-pointers and other notes from a too-long nba finals break. <http://goo.gl/zvhlhM>, Último acceso: 2015-05-24
20. Oliver, D.: Basketball on Paper: Rules and Tools for Performance Analysis. Brassey's, Incorporated (2004), <http://books.google.es/books?id=hDUK-rAVwbQC>
21. Owens, S.G., Jankun-Kelly, T.: Visualizations for exploration of american football season and play data. SportVIS-Workshop on Sports Data Visualization. Atlanta, Georgia, USA: IEEE VIS (2013)
22. Pagno, B., Guedes, L., Freitas, C., Nedel, L.: Nbavis: Visualizing national basketball association information (2002)
23. Perin, C., Vuillemot, R., Fekete, J.D.: Soccerstories: A kick-off for visual soccer analysis. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on 19(12), 2506–2515 (2013)
24. Pileggi, H., Stolper, C.D., Boyle, J.M., Stasko, J.T.: Snapshot: Visualization to propel ice hockey analytics. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on 18(12), 2819–2828 (2012)
25. Polk, T., Yang, J., Hu, Y., Zhao, Y.: Tennis: Visualization for tennis match analysis. In: Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on. IEEE (2014)
26. Pomeroy, K.: Pomeroy college basketball ratings. <http://kenpom.com/>, Último acceso: 2015-04-09
27. Richman, M.: Terry stotts has transformed trail blazers into elite defensive team. <http://goo.gl/K2ShH0>, Último acceso: 2015-05-25
28. Shneiderman, B., Plaisant, C.: Treemaps for space-constrained visualization of hierarchies (1998)
29. Sisneros, R., Van Moer, M.: Expanding plus-minus for visual and statistical analysis of nba box-score data. SportVIS-Workshop on Sports Data Visualization. Atlanta, Georgia, USA: IEEE VIS (2013)
30. Spence, R., Tweedie, L.: The attribute explorer: information synthesis via exploration. Interacting with Computers 11(2), 137–146 (1998)
31. Therón, R., Casares, L.: Visual analysis of time-motion in basketball games. In: Smart Graphics. pp. 196–207. Springer (2010)
32. Wattenberg, M.: Arc diagrams: Visualizing structure in strings. In: Information Visualization, 2002. INFOVIS 2002. IEEE Symposium on. pp. 110–116. IEEE (2002)
33. Wills, G.J.: Selection: 524,288 ways to say “this is interesting”. In: Information Visualization'96, Proceedings IEEE Symposium on. pp. 54–60. IEEE (1996)

Minería de datos procedentes del International Cancer Genome Consortium

Diego Vaquero Melchor ¹ y Luis Antonio Miguel Quintales ²

¹ Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca. Plaza de los Caídos s/n. 37008, Salamanca, España

`diegovaquero@usal.es`

² Instituto de Biología Funcional y Genómica (IBFG). Calle Zacarías González 2. 37007, Salamanca, España

`lame@usal.es`

Resumen Hoy en día los estudios sobre el desarrollo del cáncer generan cantidades ingentes de datos, los cuales deben ser procesados mediante técnicas computacionales.

Las técnicas modernas de secuenciación masiva permiten analizar las diferencias a nivel genómico entre el tejido sano y el tumoral del paciente, lo que hace posible llevar a cabo análisis con el objetivo de estudiar la forma en la que las mutaciones en el genoma afectan al desarrollo del cáncer.

La combinación de nuevas técnicas computacionales y estudios biológicos permiten conocer con mayor precisión cada día las bases moleculares que afectan al desarrollo de dicha enfermedad.

En el presente estudio se aplicarán técnicas de clustering binario y bi-clustering con la finalidad de encontrar relaciones subyacentes entre los catálogos de mutaciones pertenecientes a varios de los proyectos que acoge el International Genome Cancer Consortium.

Keywords: hepatocellular carcinoma, ICGC, biclustering, clustering jerárquico, mutaciones

1. Introducción

El International Cancer Genome Consortium [4] es un proyecto llevado a cabo a nivel internacional con el fin de generar catálogos de anormalidades genéticas sobre más de 50 tipos distintos de cáncer, de tal forma que el acceso a toda esa información recopilada por distintos equipos de trabajo repartidos por todo el globo sea accesible de forma rápida y eficiente.

Hasta el momento la mayoría de los estudios realizados haciendo uso de dichos catálogos de anormalidades genéticas, se centran en encontrar relaciones entre las bases mutadas y sus adyacentes. Entre estos estudios destacan los trabajos sobre el proceso mutacional, como el de Alexandrov et al. [1], quienes aplican dicho proceso a 21 genomas de cáncer de pecho. Dado que los mecanismos que subyacen bajo esas firmas de mutaciones aún se desconocen, algunos autores,

como Nik-Zinal [3], han propuesto posibles papeles de las mismas para familias de genes concretas.

Otros equipos de investigadores optan por realizar estudios sobre los genes afectados en distintos tipos de tumores [2]. El objetivo de esta clase de trabajos consiste en encontrar aquellos genes que mantengan alguna correlación con los patrones de las mutaciones.

Para llevar a cabo la investigación se propone un conjunto de análisis de clustering binario y biclustering con el objetivo de establecer relaciones entre varios tipos de cáncer, representados por cada uno de los proyectos participantes en el ICGC. Para ello se ha seleccionado tres proyectos relacionados con el cáncer de hígado y de forma más concreta con el carcinoma hepatocelular.

El primer estudio a realizar será una aproximación a uno de los trabajos de Alexandrov et al. [1], en el que mediante técnicas de clustering, se intentarán extraer información relativa a las mutaciones individuales del genoma de los donantes. Haciendo uso de información biológica se identifica a cada gen afectado en cada una de las mutaciones detectadas. Una vez realizado el estudio de los genes se han efectuado dos tipos de agrupaciones, en primer lugar de familias de genes y en segundo lugar de bandas citogenéticas o citobandas. El objetivo de estas propuestas consiste en comprobar si el hecho de que un donante tenga afectada una determinada familia de genes (y por lo tanto su funcionalidad) en el primer caso, o una determinada citobanda (y su posición dentro del genoma) son indicativos del desarrollo del tumor en el donante.

Finalmente se aporta una aproximación visual al análisis relativo a la posición de las mutaciones dentro del genoma. El objetivo consiste en intentar identificar qué relación guarda la posición de las variaciones genómicas con el desarrollo del cáncer de hígado.

2. Análisis de los datos

Del posible catálogo de datos que ofrece el ICGC se han seleccionado tres proyectos pertenecientes al cáncer hepático, en concreto al tumor denominado como carcinoma hepatocelular: La Tabla 1 muestra los identificadores y la nacionalidad de los proyectos seleccionados, además su número de donantes:

Nacionalidad	n° donantes
LIHC-US Estados Unidos	188
LICA-FR Francia	234
LINC-JP Japón	244

Tabla 1: Nacionalidad y número de donantes de los proyectos seleccionados

Partiendo del catálogo de variaciones genéticas proporcionado para cada uno de esos proyectos se han generado tablas binarias correspondientes a cada uno de

los cuatro estudios anteriormente expuestos, esto es, las mutaciones, los genes, las familias de genes y las citobandas.

2.1 Donantes y mutaciones

Se ha procedido a realizar un análisis mediante clustering jerárquico haciendo uso de las matrices binarias que almacenan la información relativa a las mutaciones. El resultado ha sido el esperado, no se ha obtenido ninguna conclusión relevante. Este hecho resulta obvio debido a que la probabilidad de que dos donantes sufran una mutación en la misma posición exacta dentro de todo el genoma es prácticamente nula. Las alturas de las ramas del dendograma resultante son mínimas, debido a que generalmente las mutaciones tienen un patrón irregular y están dispersas a lo largo de todo el genoma.

2.2 Donantes y genes

Cada una de las mutaciones del catálogo ha sido mapeada con el gen (o genes) que ocupa esa posición dentro del genoma. El resultado es una tabla binaria en la que para cada donante se indica con “1” si presenta alguna mutación en un determinado gen, o un “0” en caso contrario.

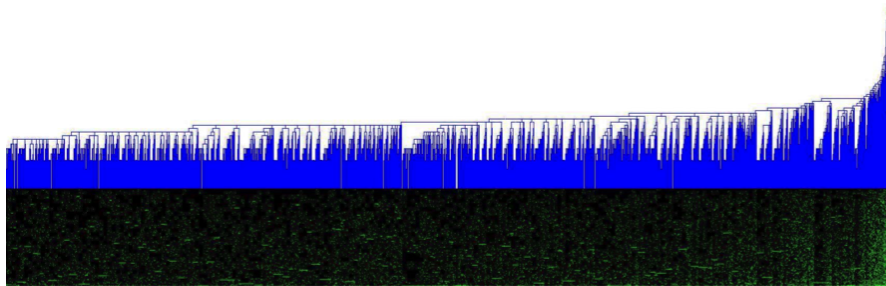


Figura 1: Donantes y genes. LIHC-US

En la mitad inferior de las Figuras 1, 2 y 3 puede verse la matriz binaria resultante tras la aplicación del clustering jerárquico, en forma de heatmap. En esta representación los valores “1” aparecen de color verde y los valores “0” de color negro. La mitad superior de dichas figuras corresponde al dendograma resultante. En el eje horizontal se ven representados todos los genes que poseen mutaciones para cada proyecto y en el eje vertical los donantes.

En la Figura 1 las filas del heatmap representan los 8791 genes que presentan algún tipo de variación genómica en el proyecto LIHC-US. Por su parte las columnas representan a los 188 donantes del proyecto. En el extremo derecho de la figura se aprecia una zona en la que las alturas de las ramas del dendograma son visiblemente más altas que el resto. Los genes correspondientes a estas ramas

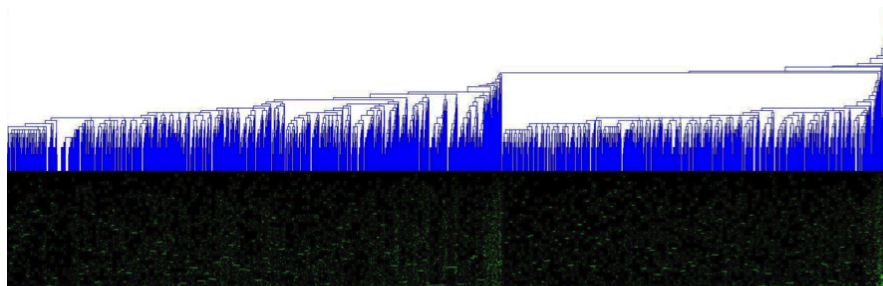


Figura 2: Donantes y genes. LICA-FR

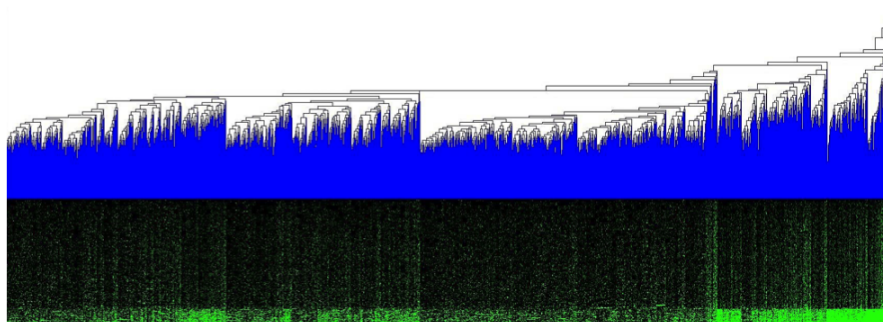


Figura 3: Donantes y genes. LINC-JP

más altas son los que mayor número de mutaciones presentan para el proyecto LIHC-US.

De igual modo, en la Figura 2 aparecen representados el dendograma y el heatmap relativos al proyecto LICA-FR. En este caso el heatmap consta de 5616 columnas que representan a los genes y 234 filas correspondientes a los donantes del proyecto.

En la Figura 3 puede verse el dendograma y el heatmap correspondientes al proyecto LINC-JP. Aparecen representados como las columnas del heatmap los 18274 genes que presentan variaciones para dicho proyecto, para el cual se tienen muestras de 244 donantes, representados en las filas del heatmap. En la parte inferior del mismo, puede apreciarse una franja de color verde correspondiente a un conjunto de 32 donantes que presentan una densidad de mutaciones mucho mayor que el resto.

2.3 Donantes y familias de genes

Una vez efectuada la agrupación de los genes en sus familias correspondientes, se ha realizado el estudio correspondiente a las familias de genes. Las Figuras 4, 5 y 6 corresponden al resultado obtenido tras aplicar el clustering jerárquico a los datos de los proyectos LIHC-US, LICA-FR y LINC-JP respectivamente.

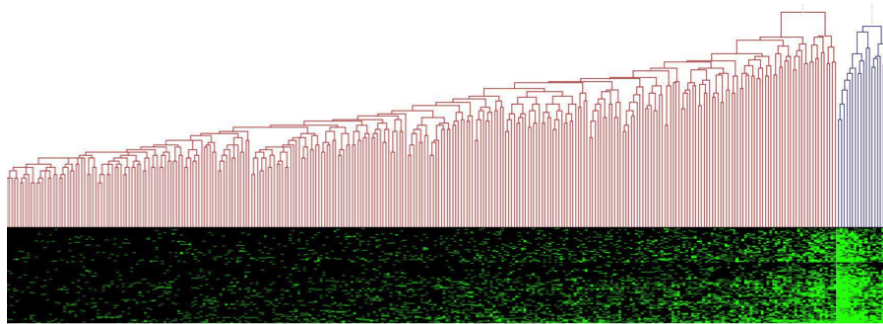


Figura 4: Donantes y familias de genes. LHC-US

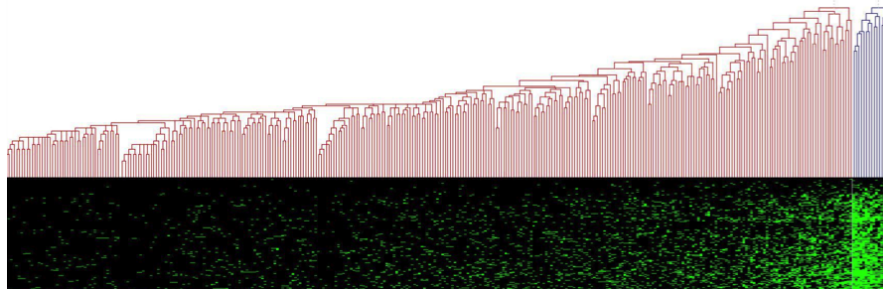


Figura 5: Donantes y familias de genes. LICA-FR

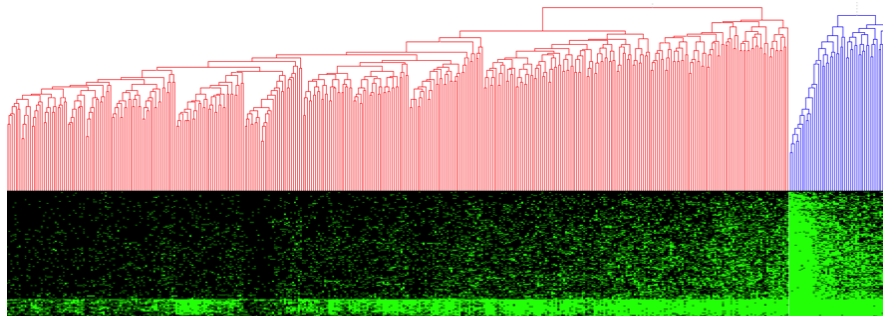


Figura 6: Donantes y familias de genes. LINC-JP

En las Figuras 4, 5 y 6 el eje vertical del dendrograma representa a los donantes del proyecto, y el eje horizontal a las familias de genes. En estas figuras se pueden apreciar dos clusters claramente diferenciados en los tres proyectos, identificados por los colores rojo y azul de las ramas. Analizando las alturas correspondientes éstas, se obtiene que los clusters representados en el extremo derecho de esas figuras agrupan las familias con mayor porcentaje de donantes

afectados. Para los tres proyectos seleccionados (LIHC-US, LICA-FR y LINC-JP) se ha obtenido un total de 316, 348 y 439 familias de genes respectivamente.

LIHC-US	LICA-FR	LINC-JP	
Zinc fingers, C2H2-type	Zinc fingers, C2H2-type	Ankyrin repeat	PHD finger proteins
Fibronectin type III	Fibronectin type III	Solute carriers	Mucins
CD molecules	Solute carriers	Zinc fingers, C2H2-type	BTB (POZ)
Solute carriers	Ankyrin repeat	Fibronectin type III	Armadillo repeat
Ankyrin repeat	EF-hand	CD molecules	Tetratricopeptide repeat
WD repeat	CD molecules	WD repeat	Cadherin-related
Pleckstrin homology	Pleckstrin homology	EF-hand	C2 - ungrouped
RNA binding motif containing	WD repeat	Ring finger proteins	Proteases, serine
EF-hand	Collagens	RNA binding motif containing	Laminins
Ring finger proteins	I-set	Protein phosphatase 1 regulatory subunits	Rho GRPase activating proteins
Dyneins, axonemal	Armadillo repeat	Pleckstrin homology	
Armadillo repeat	Ring finger proteins	Collagens	
BTB (POZ)	RNA binding motif containing	MicroRNAs	
Kinesins	Protein phosphatase 1 regulatory subunits	I-set	
P-type ATPases		Dyneins, axonemal	
Cadherin-related		Endogenous ligands	
Protein phosphatase 1 regulatory subunits		P-type ATPases	
MicroRNAs		Myosins	

Tabla 2: Listado de las familias más mutadas en los tres proyectos

Si se comparan los tres conjuntos de familias mostrados en la Tabla 2 se pone de manifiesto que hay algunas familias comunes en los tres grupos. El diagrama de Venn de la Figura 7 muestra el número de estas familias que comparten los 3 proyectos.

La Figura 7 muestra el número de familias presentes en la Tabla 2 que comparten los tres proyectos. Hay un total de 12 familias comunes a los tres proyectos. El hecho de que estas 12 familias se hayan obtenido mediante tres conjuntos de datos independientes, como son los pertenecientes a cada uno de los proyectos, las identifica como objetivo de futuros estudios con el fin de comprobar si la funcionalidad biológica asociada a cada una de ellas posee algún tipo de relación con el desarrollo del carcinoma hepatocelular. El listado de estas 12 familias es el siguiente:

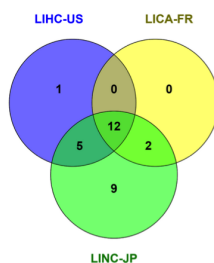


Figura 7: Número de familias en común entre los tres proyectos

- Zinc fingers, C2H2-type
- Fibronectin type III dom. cont.
- CD molecules
- Solute carriers
- Ankyrin repeat dom. cont.
- WD repeat dom. cont.
- Pleckstrin homology dom. cont.
- RNA binding motif containing
- EF-hand dom. cont.
- Ring finger proteins
- Armadillo repeat containing
- Protein phosphatase 1 regulatory subunits

2.4 Donantes y citobandas

Una vez efectuadas las agrupaciones de los genes en relación a su funcionalidad, en este punto se procederá a realizar las agrupaciones en función de su posición dentro del genoma. Para ello se hace uso del concepto de “citobanda”. Para cada uno de los genes presentes en los 3 proyectos seleccionados (LIHC-US, LICA-FR y LINC-JP) se ha identificado la citobanda a la cual pertenecen. Posteriormente, para cada uno de los donantes se han identificado aquellas citobandas para las que presenta alguna variación. En las Figuras 8, 9 y 11 se muestra el resultado del clustering jerárquico para los tres conjuntos de datos.

La mitad superior de las Figuras 8, 9 y 11 muestra los dendogramas resultantes para los proyectos LIHC-US, LICA-FR y LINC-JP respectivamente. En el caso de la Figura 8, a lo largo del eje horizontal se muestran las 506 citobandas presentes en el catálogo del proyecto LIHC-US. Cada una de las filas del heatmap representa a cada uno de los 188 donantes que participan en el proyecto. En la Figura 9, correspondiente al proyecto LICA-FR las columnas del heatmap representan a las 576 citobandas mutadas para este proyecto. Por su parte el heatmap contiene en sus filas la información relativa a los 229 donantes del proyecto.

La Figura 10 muestra una ampliación del extremo derecho de la Figura 9, la zona cuyas ramas tienen mayor altura y por lo tanto tienen un mayor número de

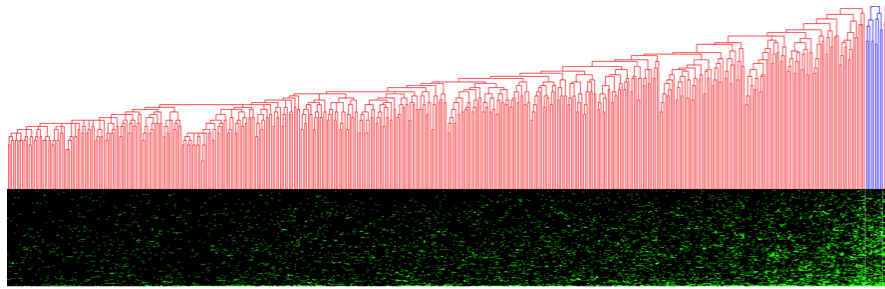


Figura 8: Donantes y citobandas. LIHC-US

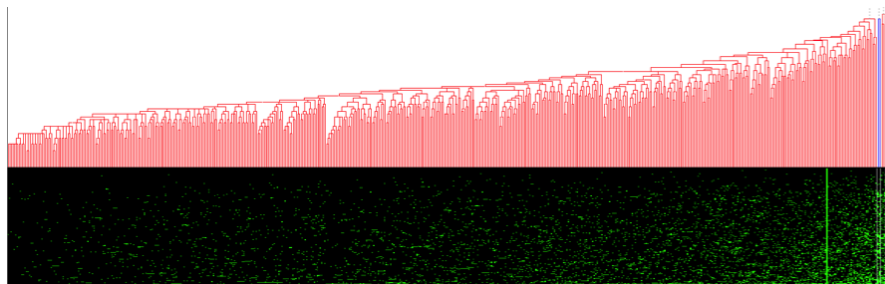


Figura 9: Donantes y citobandas. LICA-FR

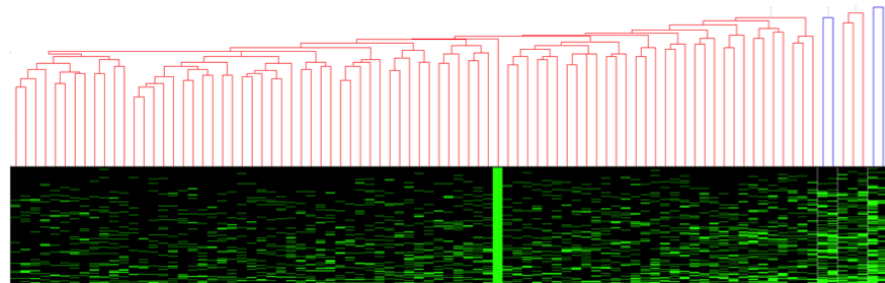


Figura 10: Ampliación de la zona de citobandas más mutadas. LICA-FR

donantes afectados. En el heatmap de esta figura se puede ver claramente una línea vertical de color verde, lo cual indica que los 229 donantes del proyecto han manifestado alguna mutación en la citobanda denominada "10p11.2".

Finalmente, el último estudio mediante clustering jerárquico aplicado las citobandas es el relativo al proyecto LINC-JP, el cual puede verse en la Figura 11. En la mitad superior de la figura aparece representado el dendograma obtenido tras la ejecución del algoritmo de clustering jerárquico. La mitad inferior de la figura la ocupa la representación en forma de heatmap de la matriz binaria correspondiente al proyecto LINC-JP, de tal forma que el color verde indica la

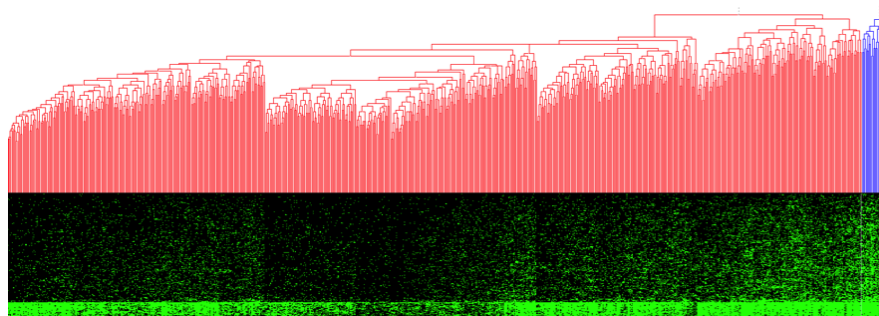


Figura 11: Donantes y citobandas. LINC-JP

existencia de mutaciones en una determinada citobanda, y la ausencia de las mismas aparece representada de color negro. Cada una de las columnas de este heatmap representa a cada una de las citobandas mutadas para el proyecto LINC-JP, un total de 782. Por su parte las filas del heatmap representan a los 244 donantes del proyecto. Atendiendo al color de las ramas del dendograma de la Figura 11, se puede observar que se han obtenido dos clusters de distintos tamaños. El menor de los dos, situado en el extremo derecho de la imagen y cuyas ramas son de color azul, representa a las citobandas con mayor número de mutaciones para el proyecto LINC-JP, un total de 22.

La Tabla 3 contiene las citobandas que han sido identificadas como las más mutadas para cada uno de los tres proyectos:

LHC-US	LICA-FR	LINC-JP	
17q25.3	5q31	3q29	1q21
1q43	3p21	7q34	3p21
17p13.1	11p15.5	4p16.3	16p13.3
11p15.4	6p21.3	21q22.3	6p21.3
11p15	19p13.3	19q13.2	19p13.3
3p21.31	16p13.3	14q11.2	19q13.43
2q31	2q31	17p13.1	17q25.3
1q44		2q31	19p13.42
6p21.3		11p15.5	19p13.2
3p21		5q31	
19p13.3		11p15.4	
5q31		19q13.4	
19p13.2			

Tabla 3: Listado de las citobandas más mutadas en los tres proyectos

El diagrama de Venn de la Figura 12 muestra cómo hay un total de 5 citobandas que en los tres proyectos aparecen entre las más mutadas. Las citobandas más mutadas presentes en los tres proyectos seleccionados son las siguientes:

- 2q31
- 6p21.3
- 3p21
- 19p13.3
- 5q31

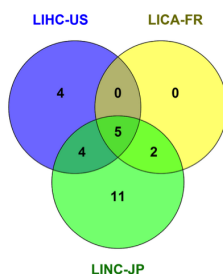


Figura 12: Número de citobandas más mutadas en común entre los tres proyectos

2.5 Análisis visual

Paralelamente al análisis mediante clustering y biclustering binarios se ha desarrollado otra línea de investigación, en la cual se aplican técnicas de visualización con el objetivo de extraer información del mapeo de las mutaciones en las citobandas y los cromosomas. Para ello, se ha desarrollado un pequeño prototipo de herramienta que representa gráficamente los 24 cromosomas que poseen los humanos, las citobandas en las que se dividen cada uno de ellos y las mutaciones que poseen los individuos en cada una de sus posiciones.

El resultado obtenido puede verse en las Figuras 13, 14 y 15. Tras efectuar la comparativa entre las tres figuras, se obtiene la siguiente información:

- Los centrómeros de los cromosomas, en ninguno de los proyectos, para ninguno de los cromosomas manifiestan ninguna mutación
- Para los cromosomas 13, 14 y 15 el brazo pequeño (p) no presenta ninguna mutación en ninguno de los tres proyectos
- Los cromosomas 21 y 22 de los proyectos LICA-FR y LINC-JP presentan un gran parecido, teniendo que en ambos casos el brazo pequeño no tiene mutaciones, salvo una pequeña zona entre las citobandas p11.1 y p11.2 del cromosoma 21. El brazo grande de ambos cromosomas puede manifestar mutaciones a lo largo de toda su longitud. Por su parte, en el proyecto LIHC-US, esta diferencia no resulta tan acusada, ya que la zona del cromosoma 21

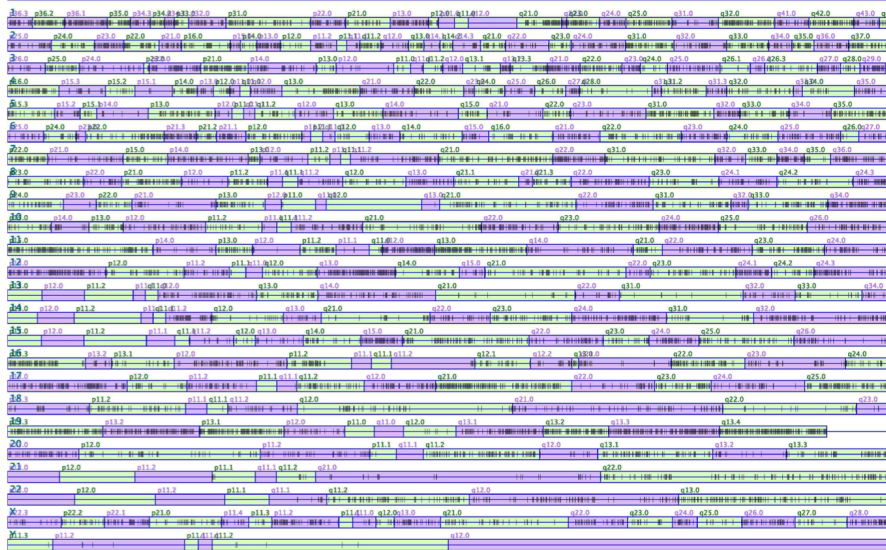


Figura 13: Situación de las mutaciones en LHC-US

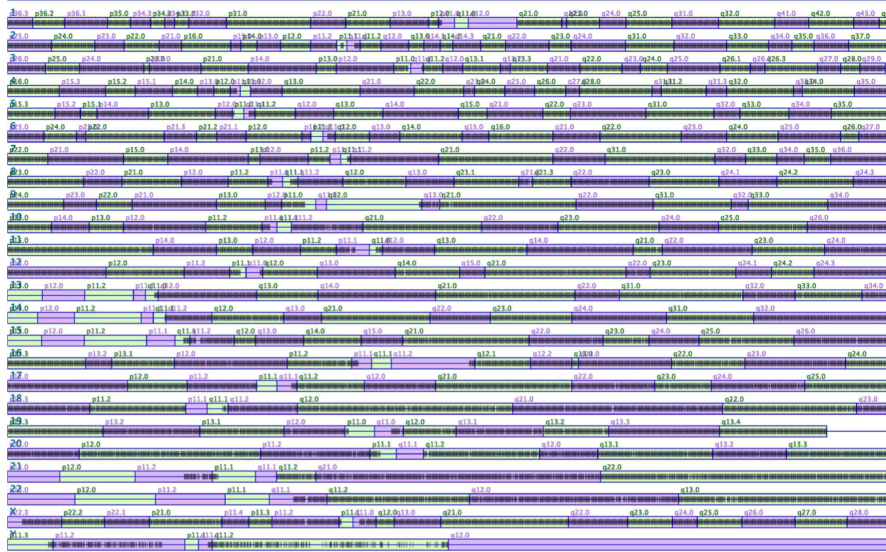


Figura 14: Situación de las mutaciones en LICA-FR

con mutaciones es de menor tamaño, y el brazo grande de los cromosomas 21 y 22 no presenta tanta variedad de mutaciones como en el caso de FR y JP

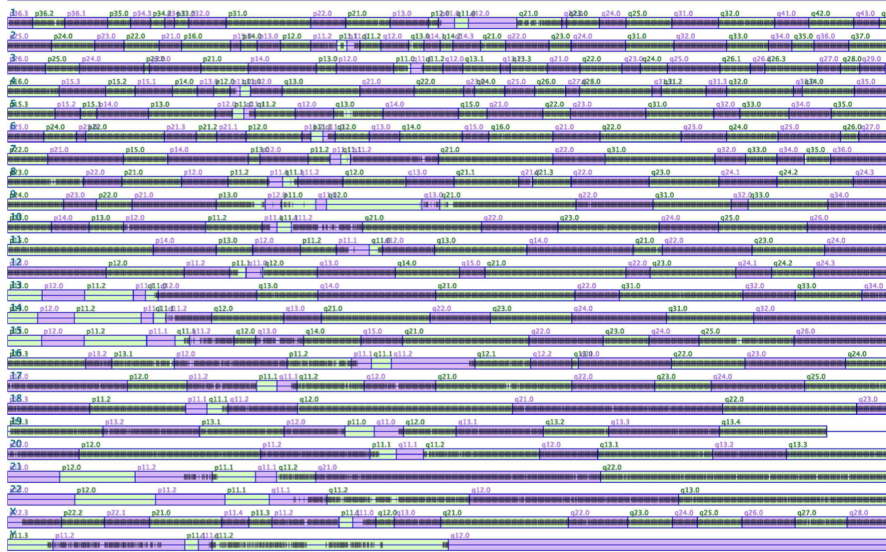


Figura 15: Situación de las mutaciones en LINC-JP

3. Conclusiones

A lo largo del presente documento se han ido exponiendo los distintos resultados obtenidos durante el estudio. Para finalizar extraemos de dichos resultados las siguientes conclusiones.

1. El estudio de la localización de las mutaciones dentro del genoma de los donantes no aporta ningún resultado, ya que es muy improbable que dos o más donantes tengan un cambio de nucleótido en la misma posición exacta del genoma humano, que consta de aproximadamente 3 mil millones de bases (3Gb).
2. Del estudio de los genes mutados para cada donante mediante clustering jerárquico tampoco se obtienen resultados informativos. Dado que se marca como mutado un gen simplemente con que haya una mutación para un solo donante, no se diferencia entre genes para los que muchos donantes lo tienen mutado y aquellos en los que la mutación es una rareza. En el caso del proyecto de Japón (LINC-JP) se ha podido apreciar que la aparición de las mutaciones y su dispersión es más caótica que en el caso de Francia (LICA-FR) y Estados Unidos (LIHC-US). Dado que no se ha encontrado ninguna información sobre el modo de realización de los estudios, se ha dado por supuesto que los tres proyectos han seguido los mismos estándares a la hora de obtener las mutaciones del genoma de los donantes.
3. El estudio relativo a las familias de genes, sí que arroja resultados significativos. Para los tres proyectos se han identificado los clusters correspondientes a las familias más mutadas y tras efectuar la comparativa se han obtenido 12 familias que en común.

4. Con respecto al estudio de las citobandas, se ha identificado un subconjunto de 5 ellas que deberán ser objeto de estudios futuros con el objetivo de esclarecer qué relación guardan con el desarrollo del cáncer de Hígado.
5. Como conclusión final, se ha desarrollado un proceso de trabajo que va desde la recolección de datos procedentes del ICGC hasta su procesamiento y obtención de resultados, de tal forma que el estudio realizado en el presente documento para el cáncer de Hígado, puede ser extendido a los otros 17 tipos de tumor del catálogo del ICGC.

Entre las líneas futuras de trabajo se encuentra el llevar a cabo un análisis detallado de cada una de las 12 familias y las 5 citobandas que aparecen entre las comunes más mutadas. Para ello habrá que realizar un estudio de la funcionalidad biológica de cada una de ellas en detalle. Además, se continuará con el desarrollo del prototipo para el análisis visual de las mutaciones, de tal forma que además de la dispersión permita mostrar las zonas con mayor densidad de mutaciones. Finalmente, se aplicará el proceso de trabajo desarrollado a otros proyectos del ICGC, realizando la comparación entre los conjuntos de datos pertenecientes a otros tipos de tejidos.

Referencias

1. Ludmil B Alexandrov, Serena Nik-Zainal, David C Wedge, Samuel AJR Aparicio, Sam Behjati, Andrew V Biankin, Graham R Bignell, Niccolò Bolli, Ake Borg, Anne-Lise Børresen-Dale, et al. Signatures of mutational processes in human cancer. *Nature*, 500(7463):415–421, 2013.
2. Michael S Lawrence, Petar Stojanov, Craig H Mermel, James T Robinson, Levi A Garraway, Todd R Golub, Matthew Meyerson, Stacey B Gabriel, Eric S Lander, and Gad Getz. Discovery and saturation analysis of cancer genes across 21 tumour types. *Nature*, 505(7484):495–501, 2014.
3. Serena Nik-Zainal, Ludmil B Alexandrov, David C Wedge, Peter Van Loo, Christopher D Greenman, Keiran Raine, David Jones, Jonathan Hinton, John Marshall, Lucy A Stebbings, et al. Mutational processes molding the genomes of 21 breast cancers. *Cell*, 149(5):979–993, 2012.
4. Junjun Zhang, Joachim Baran, A Cros, Jonathan M Guberman, Syed Haider, Jack Hsu, Yong Liang, Elena Rivkin, Jianxin Wang, Brett Whitty, et al. International cancer genome consortium data portal—a one-stop shop for cancer genomics data. *Database*, 2011:bar026, 2011.

Diseño de sistemas inteligentes para optimización de redes de producción de energía

Alvaro Vicente, Silvana Revollar, and Pastora Vega

Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca. Plaza de los
Caídos s/n. 37008, Salamanca, España
{avr103,srevollar,pvega}@usal.es

Resumen Los sistemas híbridos de generación de energía son cada vez más importantes, y tanto su optimización como su control resultan clave. En este trabajo se ha llevado a cabo el diseño e implementación optimizada para el control de un sistema que trabaja con energía solar y eólica, así como un sistema de almacenamiento de hidrógeno. Un algoritmo inteligente se encarga de optimizar el sistema y las reglas heurísticas de control. Además, se realizaron distintas simulaciones para comprobar el funcionamiento de la solución implementada para unas condiciones de partida y estacionalidad variables.

Keywords: Hybrid power generation systems

1. Introducción

Desde hace algunas décadas, se ha está incrementando la preocupación a nivel mundial por el calentamiento global de nuestro planeta, causado principalmente por las emisiones de CO₂ que liberamos a la atmósfera. Esto queda refrendado en los datos actuales y las proyecciones futuras de diversas agencias, entre las que destacamos la IEA (International Energy Agency), organismo autónomo que trabaja para asegurar la energía confiable, económica y limpia en el mundo, con cuatro áreas principales de enfoque: la seguridad energética, el desarrollo económico, sensibilización ambiental y compromiso en todo el mundo.

IEA Desarrolla periódicamente diversos estudios y proyecciones sobre el cambio climático, las emisiones de CO₂ por regiones, las emisiones de CO₂ por tipo de combustible, la demanda energética por región, etc. En todas ellas se pone de manifiesto la necesidad de cambios en las políticas energéticas a nivel mundial, para evitar el empeoramiento de la situación.

La única alternativa que cabe es el uso de energías renovables, que no emiten CO₂ a la hora de generar energía. Además, en los últimos años se ha acrecentado el interés en el desarrollo de estrategias que permitan maximizar la eficiencia energética tanto a nivel industrial como a nivel residencial. Los principales inconvenientes siguen siendo sus desventajas frente a los combustibles fósiles como son la estacionalidad y la elevada densidad energética de los combustibles fósiles.

En Europa se proyecta que el consumo de energía se duplique en los próximos 20 años, sin embargo las políticas de la Unión Europea han establecido como

meta una reducción del 20% en el consumo de energía y en las emisiones de CO₂, reflejado en el trabajo de Galvao et al. En otros lugares del mundo, como por ejemplo Estados Unidos, también se están desarrollando medidas destinadas a reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

En este contexto, la autogeneración con fuentes de energía renovables y la cogeneración se presentan como una excelente solución.

En este trabajo se propone e implementa en Matlab un sistema de control inteligente para microredes con sistemas híbridos, cuyo propósito es la optimización del uso de los recursos de la microred. En el caso en el que se basa este trabajo, el Parque Tecnológico de Boecillo, los recursos utilizados son placas fotovoltaicas, aerogeneradores eólicos y celdas de combustible tipo PEM, obteniendo la energía que pudiera faltar de la red eléctrica. El objetivo del sistema de control inteligente es garantizar la generación, almacenamiento y consumo energético óptimo de la microred para satisfacer la demanda. En este tipo de microredes son muy importantes las condiciones climáticas y se evaluará cómo afectan al sistema diversos tipos de condiciones climáticas que favorecerán o perjudicarán a cada tipo de energía involucrada.

En la estructura de la microred se contempla el uso de diferentes controladores locales, enfocados en la regulación de elementos específicos dentro de su estructura, cuyo alcance no está contenido dentro de este proyecto, y un controlador principal, encargado de la coordinación en tiempo real de las consignas enviadas a cada uno de estos controladores locales.

2. Estado del arte

La búsqueda de recursos energéticos limpios e inagotables ha generado una gran variedad de opciones de producción de energía eléctrica, que además de aprovecharse para lograr suministro en zonas rurales que no lo tienen, también se están utilizando para mejorar la eficiencia energética en centros urbanos a nivel residencial, comercial e industrial.

Dentro de las tecnologías que se están utilizando, la integración de distintas fuentes energéticas o sistemas híbridos de generación, reviste una especial importancia.

El exceso de energía que genera la red híbrida puede ser transportado a otros usuarios o almacenado para su uso futuro, para incrementar la eficiencia del sistema. Los sistemas híbridos generalmente cuentan con fuentes de energía solar y eólica, cuya integración en la red debe realizarse tomando en cuenta la dependencia de estos sistemas respecto de las condiciones ambientales, por lo que se requieren medios de almacenamiento para respaldarlos.

El objetivo de la operación, de estas redes de generación de energía, es garantizar la seguridad de suministro con un sistema de gestión que permita maximizar el rendimiento y minimizar los costes. La supervisión automática de sistemas integrados y redes de distribución de energía es un desafío en la actualidad. El coste de la energía está aumentando, por lo que la eficiencia de estos sistemas debe maximizarse y la calidad de la misma debe mantenerse en unos estándares

adecuados. El sistema de control debe trabajar en forma integrada para lograr el funcionamiento óptimo de la red en términos económicos, satisfaciendo las restricciones técnicas impuestas por los equipos y por el funcionamiento de la red en general.

En la literatura se encuentran distintos trabajos enfocados en el diseño y control de microrredes utilizando técnicas de optimización y control inteligentes. En Rubio-Maya et al. se presenta la síntesis y diseño óptimo del sistema de poligeneración energética para un resort ubicado en España, Otro sistema híbrido para un pequeño hotel puede encontrarse en Galvao et al., donde el modelo energético propuesto permite la reducción de costos y emisiones. Hamada et al. presenta un desarrollo similar que combina celdas de combustible y generación solar para un complejo residencial. Komiyama et al. lleva a cabo un estudio de las ventajas de la inclusión de almacenamiento con hidrógeno en un sistema híbrido de generación de energía en Japón.

En cuanto a la gestión de las redes, tradicionalmente, éstas se han controlado de forma descentralizada, usando controladores locales en cada subred. Si bien, en la actualidad, es común el uso de un controlador central que ejecuta una serie de acciones de control, para garantizar el correcto desempeño del sistema. Esto hace a este tipo de sistemas muy interesantes para aplicar las técnicas de control distribuido y sistemas de control inteligente.

En Lagorse et al. se describe un sistema multiagentes, que permite administrar un sistema híbrido de generación de energía con almacenamiento en baterías y fuentes de energía fotovoltaica, discutiendo las ventajas de este sistema distribuido frente a los sistemas centralizados de administración. Kyriakarakos et al. utiliza el método de optimización del movimiento de las partículas (Particle Swarm Optimization) y el método de simulación de Monte Carlo, para el diseño óptimo de una microrred de poligeneración. Ashkarzadhe et al. llevan a cabo un estudio para el dimensionamiento de un sistema híbrido aislado para generación eléctrica con energías renovables en un área remota de Irán. Continuando con el método de optimización del movimiento de las partículas, en García-Triviño et al. se lleva a cabo un estudio comparando el uso de tres tipos de controladores PI que utilizan el algoritmo PSO. Kyriakarakos et al. propone un sistema de gestión basado en lógica borrosa para una microrred de poligeneración. Kyriakarakos et al. da un paso más allá en la optimización del sistema incluyendo agentes inteligentes. En Collazos et al. se desarrolla un sistema de control predictivo óptimo para aplicaciones domésticas de poligeneración. En Qi et al. se propone una plataforma de control distribuido para una red eléctrica. La arquitectura de control incluye dos MPC que negocian entre sí las acciones a tomar en la operación a corto, medio y largo plazo. En Trifkovic et al. se utiliza una estrategia de control jerárquico para una micro-red independiente que incluye placas fotovoltaicas, un aerogenerador, y celdas de combustible. La estrategia consta de dos niveles, en un nivel supervisor se utiliza un optimizador dinámico en tiempo real (D-RTO) y en el nivel de control se utilizan estrategias convencionales. Hay comunicación bidireccional entre ambas capas y se toman en cuenta perturbaciones externas asociadas a las condiciones medioambientales e internas.

El presente estudio se basa en un esquema similar al propuesto por Trifkovic et al. El sistema de control tiene como finalidad seleccionar, en tiempo real, la potencia óptima, en función de la eficiencia económica, que debe aportar cada elemento de la red para satisfacer la demanda, dando prioridad a las fuentes de energía renovables. Además de los criterios económicos y la relación oferta-demanda, otros aspectos que influyen en la selección son la disponibilidad de recursos asociados a cada fuente de energía y los ciclos de parada y arranque de los equipos. La capa superior de control supervisor enviará las consignas óptimas a las demás unidades de la red en cada instante de muestreo. Las consignas se obtienen utilizando técnicas de optimización y de inteligencia artificial.

3. Optimización

En el control de redes de distribución y generación de energía, las arquitecturas distribuidas (DMPC), caracterizadas por el intercambio de información entre múltiples controladores locales son una alternativa de gran interés. Los sistemas distribuidos pueden clasificarse en independientes o no cooperativos si la función objetivo de cada controlador es local y cooperativos si ésta es global (Scattolini et al.).

El control distribuido se combina con arquitecturas jerárquicas en numerosas ocasiones. Las arquitecturas de control jerárquico son especialmente útiles cuando el proceso se caracteriza por diferentes comportamientos dinámicos y cuando se plantea la optimización de la operación de la planta completa (Scattolini et al.). En el nivel superior se utilizan estrategias de optimización en tiempo real, ya sean estáticas o dinámicas, para enviar las consignas que optimizan de manera global el desempeño del proceso.

El problema de poligeneración es en sí un problema de control distribuido, por la diversidad de elementos que componen el sistema y que tienen requerimientos particulares de control.

Actualmente se ha desarrollado una técnica que engloba la optimización y el control, se denomina Optimización Dinámica en Tiempo Real (Dynamic Real Time Optimization – D-RTO). Esto ha sido posible gracias a la reducción en el tiempo de procesamiento para la optimización de modelos altamente no lineales y de ecuaciones diferenciales algebraicas.

La técnica D-RTO integra los métodos de corrección de los datos de las variables y la actualización del modelo de la planta de la RTO en estado estable y el predictor dinámico del MPC, para realizar la optimización sin necesidad de esperar al estado estable de la planta.

Independientemente del tipo de optimización que lleve a cabo el supervisor, la formulación y resolución del problema de optimización es fundamental. El problema de optimización que se obtiene para la gestión de la microrred es un problema no lineal mixto-entero.

En la actualidad, existen métodos de resolución específicos para distintos tipos de problemas y se han desarrollado distintas implementaciones de esos algoritmos, las cuales se encuentran en la plataforma GAMS, en Matlab y en otros paquetes de optimización.

Entre éstos, los algoritmos genéticos son bastante atractivos para la resolución de problemas mixto-enteros (Revollar et al.). Los Algoritmos Genéticos son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acuerdo a los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin. Imitando este proceso, los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en gran medida de una adecuada codificación del criterio de optimización y sus restricciones.

Dentro del algoritmo hay varios parámetros que influyen de manera significativa en el proceso de búsqueda, como son:

- Tamaño de la población (N_p): es el número de individuos que conforman la población.
- Tasa de cruce (T_{cr}): determina el porcentaje de individuos seleccionados que efectivamente se somete al operador cruce.
- Tasa de mutación (T_m): es un parámetro que regula la mutación de forma tal que solo un pequeño porcentaje de los individuos sea susceptible a este cambio arbitrario en uno de sus genes.
- Número de iteraciones (N_{it}): es el parámetro máximo de generaciones (iteraciones) realizadas por el algoritmo.

Para el caso de un problema de optimización con restricciones, una manera de tratar el problema es aplicar cierta penalización en la función objetivo de cada individuo.

4. Microred en estudio

4.1 Descripción de la microred

Para llevar a cabo el diseño del sistema inteligente, se ha propuesto optimizar la microred del Parque Tecnológico de Boecillo en Valladolid. Las fuentes de energía involucradas en el proyecto son fotovoltaica, eólica y pilas de combustible tipo PEM.

En el proyecto DEPOLIGEN se llevó a cabo un estudio para determinar la dimensión más adecuada de la microred, la potencia instalada para cada recurso energético involucrado y el potencial de utilización del hidrógeno como sistema de almacenamiento, llegando a las siguientes características de operación y limitaciones de la microred:

- La eólica posee un aporte energético bajo, en relación a la potencia instalada, lo cual es debido a los bajos vientos existentes a la altura a la que se pueden instalar los aerogeneradores.
- Si la potencia generada en exceso es superior al valor admitido por el sistema electrolizador (valor de potencia nominal), el exceso es considerado como energía perdida por el sistema y no aprovechada.

- El aprovechamiento del exceso de energía por parte del electrolizador, está muy relacionado con la potencia de los sistemas renovables instalados. Lo más adecuado es que la potencia de electrolizador sea 1/5 de la potencia renovable instalada.
- La posibilidad de cubrir la demanda con el sistema PEM está fuertemente limitado por los costes de inversión.
- Se ha considerado un aporte de cogeneración nulo, pues no parece adecuado instalar un sistema de este tipo dentro de la microred, por lo que el defecto de energía hasta cubrir la energía necesaria, se obtiene de la red eléctrica.

Los valores calculados son (Kw): Sistema Eólico 20, Sistema Fotovoltaico 506, Sistema Celdas PEM 26, Sistema Electrolizador 112 y Depósito (200bar) 5.

4.2 Formulación matemática del problema

4.2.1 Función objetivo

$$J = (C_w \cdot u_{wind,t} + C_s \cdot u_{solar,t} + C_{fc} \cdot u_{fc,t} + C_h \cdot h_t^{store} - C_{yfc} \cdot y_{fc,t} - C_{ye} \cdot y_{e,t}) \quad (1)$$

Donde C_w , C_s , C_{fc} , C_h , C_{yfc} y C_{ye} son los factores de peso asociados con los distintos objetivos a optimizar, $u_{solar,t}$, $u_{wind,t}$ son las consignas de potencia enviadas a los controladores de las fuentes renovables, $u_{fc,t}$ es la potencia solicitada a las celdas, h_t^{store} es la cantidad de hidrógeno producido (m3) en un determinado periodo de tiempo e $y_{fc,t}$, $y_{e,t}$ son binarias, la primera indica si se toma energía de las celdas de hidrógeno y la segunda si se enciende el electrolizador.

4.2.2 Restricciones

1. La demanda de potencia D_t en cada instante de tiempo debe ser satisfecha por la potencia suministrada por las distintas fuentes a la red ($u_{solar,t}$, $u_{wind,t}$), el consumo de potencia del electrolizador ($u_{e,t}$), la potencia generada por las celdas de combustible ($u_{fc,t}$), el consumo para carga/descarga de H_2 y la red global (p_{red}).

$$u_{wind,t} + u_{solar,t} - u_{e,t} + u_{fc,t} - p_{com} + p_{red} = D_t, \forall t \quad (2)$$

2. La potencia exigida a los sistemas eólico y fotovoltaico en un determinado instante de tiempo no puede exceder la producción de los mismos en ese instante.

$$u_{wind,t} \leq R_{wind,t}, \forall t \quad (3)$$

$$u_{solar,t} \leq R_{solar,t}, \forall t \quad (4)$$

$R_{wind,t}$ es la máxima generación eólica posible para las condiciones meteorológicas actuales y $R_{solar,t}$ es la máxima generación solar.

3. El exceso de potenci de la red renovable se calculará mediante:

$$P_{net} = u_{wind,t} + u_{solar,t} - D_t, \forall t \quad (5)$$

Si el exceso de potencia producida por las fuentes renovables es mayor que el 20 % de la potencia nominal de electrolizador, este se enciende para producir H2. Si la potencia de la micro-red es negativa (no satisface la demanda) se pueden utilizar las pilas de H2 como fuente de energía.

$$y_{e,t} \begin{cases} 1 \text{ si } P_{net} \leq 0,2 \cdot P_{max\text{electrolizador}} \\ 0 \text{ si } P_{net} < 0 \end{cases} \forall t \quad (6)$$

$$y_{fc,t} \begin{cases} 1 \text{ si } P_{net} < 0 \\ 0 \text{ si } P_{net} \geq 0 \end{cases} \forall t \quad (7)$$

No deben estar funcionando simultáneamente el electrolizador y las pilas.

$$y_{e,t} \cdot y_{fc,t} \leq 0, \forall t \quad (8)$$

4. Una vez encendidos, tanto el electrolizador como las celdas, pueden alcanzar rápidamente las consignas de potencia y de producción de hidrógeno. La relación potencia consumida/generada e hidrógeno durante el periodo de operación viene dada por:

$$h_{e,t}^{gen} = k_{prodH_2} \cdot u_{e,t} \cdot y_{e,t} \quad (9)$$

$$h_{fc,t}^{con} = k_{conH_2} \cdot u_{fc,t} \cdot y_{fc,t} \quad (10)$$

$$h_t^{store} = h_{e,t}^{gen} - h_{fc,t}^{con} \quad (11)$$

donde k_{prodH_2} y k_{conH_2} son constantes calculadas en función de las especificaciones de los equipos y las propiedades de H_2 .

5. Mientras $h_{d1,t}^{store}$ es la cantidad de hidrógeno producido (m^3) en un determinado periodo de tiempo (t), $h_{tank}[0, max]$ es la capacidad utilizada del depósito. El electrolizador puede funcionar si la capacidad de almacenamiento del depósito está por debajo del 90 %. Las celdas de combustible pueden suministrar potencia si el depósito tiene al menos 20 % de su capacidad disponible.

$$y_{e,t} \begin{cases} 1 \text{ si } h_{tank} \leq 0,9 \\ 0 \text{ si } h_{tank} > 0,9 \end{cases} \forall t \quad (12)$$

$$y_{fc,t} \begin{cases} 1 \text{ si } h_{tank} > 0,2 \\ 0 \text{ si } h_{tank} \leq 0,2 \end{cases} \forall t \quad (13)$$

Los límites de almacenamiento de hidrógeno, así como las condiciones iniciales vienen dados por:

$$H^{min} \leq h_t^{store} \leq H^{max}, \forall t \quad (14)$$

$$h_0^{store} = H^0 \quad (15)$$

5. Implementación

Una vez establecida la formulación matemática del problema, se ha llevado a cabo la implementación usando Matlab.

Se utiliza un algoritmo genético para resolver el problema de optimización en cada instante de muestreo, fue programado en la plataforma GAMS de Matlab para el proyecto DEPOLIGEN. El Algoritmo Genético se encarga de devolver los valores adecuados para: consigna eólica (Ueolica), consigna solar (Usolar), consigna electrolizador (Ue), consigna celdas (Ufc), estado electrolizador (Ee) y estado celdas (Efc).

En nuestro proyecto se lleva a cabo la implementación del diseño del sistema desarrollado anteriormente, en el proceso de evaluación del algoritmo genético, implementando la función objetivo, las restricciones y la heurística que lleva cabo el control en base a las predicciones.

La función objetivo implementada, denominada *costo* en nuestra implementación, que trata de maximizar el uso de los sistemas renovables y del sistema de almacenamiento y de minimizar los arranques y paradas del sistema de almacenamiento.

En el programa principal, se cargan los datos de entrada, predicciones, previamente obtenidos y formateados para poder ser utilizados. Las predicciones que se utilizaran son: la radiación solar, el viento y la demanda energética de los edificios. Los dos primeros datos se obtienen de registros antiguos, para poder llevar a cabo la ejecución y comprobar el funcionamiento de la solución creada, de cara al funcionamiento real se aconsejaría obtener automáticamente los datos de las previsiones disponibles online al realizar cada iteración.

En los primeros intentos de implementación, se trató de llegar a una solución con utilización del Algoritmo Genético tanto para la optimización como para el control, con la función a optimizar y las restricciones definidas en base al diseño anterior.

Los valores que podía utilizar el Algoritmo Genético como posible solución, sólo se acotaban por los valores máximos de los equipos instalados. Dentro de la evaluación del Algoritmo Genético se calculaban los valores máximos que podían alcanzar en función de las condiciones de operación y se restringían sus valores mediante las restricciones del propio algoritmo, que le aplicaba la penalización indicaba para intentar encontrar una solución suficientemente buena.

Al intentar esta alternativa, nos encontramos con el inconveniente de que el algoritmo genético, por muchas variaciones y cambios que hiciéramos en su configuración, con sus penalizaciones no llega a descartar valores que no son posibles

dadas las condiciones meteorológicas, por ejemplo, el caso más significativo es que por la noche envía consignas de petición de energía fotovoltaica, en pequeñas cantidades, cuando es imposible que pueda generarse energía fotovoltaica por la noche.

Además, se comprobó que, con pocas restricciones, daba resultados menos malos que cuando se incluían un número más elevado. Entonces, los valores eran bastante peores y no se conseguían mejorar por muchos cambios que se hicieran en la configuración.

Se llegó a la conclusión de que, por sí solo, el Algoritmo Genético no es capaz de llevar a cabo la optimización de la función objetivo y el control de todas las restricciones.

5.1 Optimización con Algoritmo Genético y control con heurística

El primer cambio que se introdujo en la implementación anterior, para mejorar el resultado y controlar resultados imposibles, fue utilizar los datos de entrada de las condiciones climáticas como valores máximos y modificar los valores mínimos exigidos al electrolizador y las celdas, dado que el electrolizador sólo puede funcionar si el excedente de la red es superior al 20% de su potencia nominal, y, aunque no estaba en la definición anterior, las celdas no se permite que arranquen si no van a producir, al menos, el doble del gasto que supone usarlas.

Con estos cambios se mejoró bastante el resultado, principalmente en cuanto a las consignas para las fuentes renovables, pero seguíamos teniendo el inconveniente de que las consignas para el sistema de almacenamiento, también producción resultados imposibles, por ejemplo, si no tenemos excedente de producción renovable, no es posible encender el electrolizador para generar H_2 , por tanto, deberían ser 0 tanto la consigna de energía consumida debería como la variable que indica si se enciende.

Para solucionar estos inconvenientes, las restricciones para el funcionamiento se aplican a las variables que nos devuelve el algoritmo fuera de las restricciones, generando como solución valores que cumplan todo el diseño y no intenten cosas imposibles, si bien, los valores generados son los que se utilizan en la función de optimización para que devuelva el mejor resultado posible.

Además, para maximizar el uso renovable, había una restricción que no se había tenido en cuenta y que es la única que se deja dentro del funcionamiento del Algoritmo, en la cual penalizamos la producción excesiva de energía renovable si el exceso va a superar la potencia nominal del electrolizador, ya que, cuando supera la potencia nominal del electrolizador, éste no puede usarse y se pierde todo el exceso generado.

6. Experimentos

6.1 Diseño de experimentos

- Caso base

Se tomó como caso base un día de operación en el lugar original de la planta

(Valladolid), en período estival con un período de muestreo de 1 hora y con el depósito de H_2 vacío. Se realizan modificaciones en el tamaño de la población, número de iteraciones y penalizaciones de las restricciones para obtener el resultado óptimo.

Tomando el caso base como referencia se realizaron las siguientes variaciones:

- Cantidad inicial del depósito de H_2 Con el período de muestreo óptimo, se consideró el depósito a la mitad y completo para comparar con el caso base en el cual está vacío.
- Estacionalidad
Se comparó la estación con menor radiación (invierno) con el caso base en período estival para establecer la incidencia del sistema fotovoltaico en función de la temporada.

6.2 Resultados

6.2.1 Caso base Después de diversas pruebas para ajustar los valores del algoritmo con sus valores óptimo, se configura con 60 individuos, 80 iteraciones y 10 de penalización. También se llevaron a cabo diversas pruebas para ajustar los pesos de las variables que intervienen en la función de optimización, 20 para la eólica, 40 para la eólica, la generación de hidrógeno y las celdas, y 4 para los arranques y paradas del electrolizador y las celdas. Una vez sintonizados correctamente todos los parámetros del Algoritmo Genético, se ha realizado una simulación para una semana. En la Figura 1, lo primero que se presenta es la relación entre la demanda energética de los edificios (Dt) y la energía utilizada de la red eléctrica (Pelec), podemos comprobar que se reduciría el uso de la red eléctrica en más del 45 %.

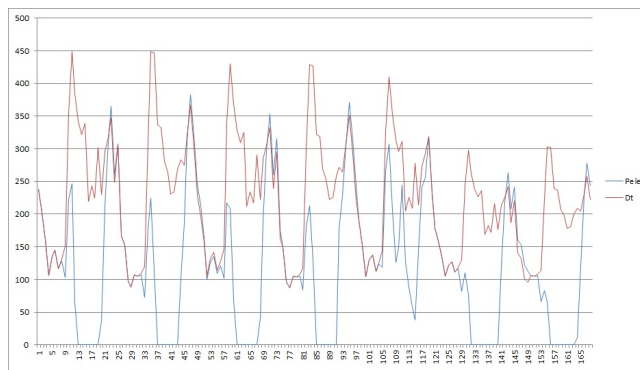


Figura 1: Demanda de los edificios - uso red eléctrica

En la Figura 2, se observa que si utilizáramos toda la energía solar disponible, el exceso sería mayor que la potencia nominal del electrolizador y se desearía,

sin embargo, el sistema optimiza su uso, y al no permitir que esto suceda, siempre que hay exceso, se genera H_2 por parte del electrolizador.

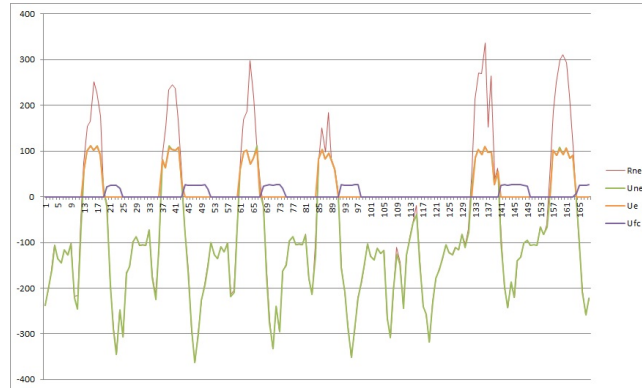


Figura 2: Exceso generado por la red renovable y su uso

En la Figura 2, se puede comprobar que nunca funcionan a la vez el electrolizador (Ue) y las celdas (Ufc), y ambos funcionan siempre que pueden.

6.2.2 Cantidad inicial del depósito de H_2 Una vez encontrados los valores más eficientes para la configuración del sistema diseñado, realizamos una prueba variando la cantidad inicial de H_2 en el tanque, para comprobar su incidencia sobre el comportamiento del sistema.

Se comprueba que el funcionamiento sigue siendo igual de bueno en los dos casos, con la mitad de la cantidad del depósito inicialmente (gráfica superior) y con el depósito inicialmente completo (gráfica inferior). En cuanto al ahorro energético en ambos casos sigue superando el 45%, por tanto, se puede afirmar que la cantidad inicial en el tanque no influye en el comportamiento del sistema.

6.2.3 Estacionalidad Se ha llevado a cabo una simulación con datos en temporada de invierno. Se puede observar en la Figura 3 como el uso de la red eléctrica es mucho más elevado que en el caso base y el sistema proporciona un ahorro de poco más del 18%.

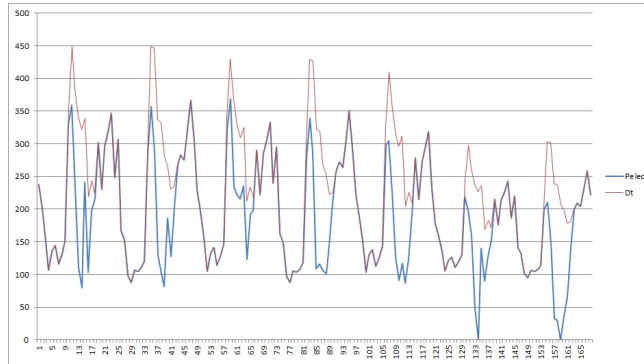


Figura 3: Demanda de los edificios - uso red eléctrica en invierno

En cuanto al uso de las energías renovables disponibles, la energía eólica no alcanzaba el valor mínimo y por tanto no está presente, en cuanto a la energía solar, vemos que el funcionamiento es correcto dado que aprovecha prácticamente la totalidad de la energía solar disponible. Cabe destacar que los niveles son muchos menores y en ningún caso existen picos con mucho exceso disponibles que no se utiliza, como nos pasaba en el caso base. Por tanto no se llega a utilizar el electrolizador, el depósito siempre está vacío y nunca se pueden usar las celdas.

7. Conclusiones

En este trabajo se ha elaborado el diseño e implementación de un sistema de control inteligente para la optimización y el control de un sistema híbrido de generación de energía.

El sistema desarrollado, utilizando un Algoritmo Genético como sistema inteligente, ha alcanzado un nivel elevado de eficiencia, con resultados de ahorro energético superior al 45%. En las simulaciones llevadas a cabo, no sólo se ha comprobado el ahorro que podría suponer a nivel energético, si no, que se ha alcanzado un nivel muy elevado de optimización para el uso de todos los componentes de la red.

Cabe destacar que este trabajo ha puesto de manifiesto la debilidad de los sistemas de almacenamiento en los sistemas híbridos, siendo los que menos ahorro energético aportan, si bien, los costes de estos sistemas son demasiado elevados y aumentar su capacidad no siempre resulta rentable.

También se han llevado a cabo comparaciones entre variaciones. La primera variación estudiada ha sido la cantidad inicial de H_2 en el tanque, se ha comprobado que no influye en el resultado, observando como única distinción, que como las simulaciones empiezan de noche, siempre que hay H_2 en el tanque, se comienza usando las celdas. En cuanto al ahorro energético, no hay prácticamente diferencia.

En cuanto a la variación en la estacionalidad de los datos, se comprueba como influye enormemente en el resultado. El funcionamiento sigue siendo bueno y el sistema trabaja correctamente, pero debido a los bajos datos de radiación y viento, el ahorro energético se reduce a poco más del 18 %.

Además de todos estos resultados, en este trabajo, se ha comprobado la complejidad de intentar llevar a cabo tanto la optimización como el control con el Algoritmo Genético, teniendo que mejorar su funcionamiento mediante la introducción de reglas heurísticas para el control.

En futuros trabajos, se podría llevar a cabo una comparación con otros sistemas de optimización, como por ejemplo, la optimización del movimiento de las partículas (Particle Swarm Optimization), bastante utilizada actualmente en diversos trabajos.

Referencias

1. Askarzadeh, A., Dos Santos Coelho, L.: A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran. *Solar Energy* **112** (2015) 383–396
2. Collazos, A., Marechal, F., Gahler, C.: Predictive optimal management method for the control of polygeneration systems. *Computers and Chemical Engineering* **33** (2009) 1584–1592
3. Galvao, J., Leitao, S., Silva, S., Gaio, T.: Cogeneration supply by bioenergy for a sustainable hotel building management system, *Fuel Processing Technology* **92** (2011) 284–289
4. Hamada, Y., Takeda, K., Goto, R., Kubota, H.: Hybrid utilization of renewable energy and fuel cells for residential energy systems. *Energy and Buildings* **43** (2011) 3680–3684
5. komiyama, R., Otsuki, T., Fujii, Y.: Energy modeling and analysis for optimal grid integration of large-scale variable renewables using hydrogen storage in Japan. *Energy* **81** (2015) 537–555
6. Kyriakarakos, G., Dounis, A.I., Rozakis, S., Arvanitis, K.G., Papadakis, G.: Polygeneration microgrids: a viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel. *Applied Energy* **88** (2011) 4517–4526
7. Kyriakarakos, G., Dounis, A.I., Arvanitis, K.G., Papadakis, G.: A fuzzy logic energy management system for polygeneration microgrids. *Renewable Energy* **41** (2012) 315–327
8. Kyriakarakos, G., Piromalis, D., Dounis, A.I., Arvanitis, K.G., Papadakis, G.: Intelligent demand side energy management system for autonomous polygeneration microgrids. *Applied Energy* **103** (2013) 39–51
9. Lagorse, J., Paire, D., Miraoui, A.: A multi-agent system for energy management of distributed power sources. *Renewable Energy* **35** (2010) 174–182
10. Qi, W., Liu, J., Christofides, P.D.: A distributed control framework for smart grid development: Energy/water system optimal operation and electric grid integration. *Journal of Process Control* **21** (2011) 1504–1516
11. Revollar, S., Francisco, M., Lamanna, R., Vega, P.: Stochastic Optimization for the Simultaneous Synthesis and Control System Design of an Activated Sludge Process. *Latin American Applied Research* **40** (2010) 137–146
12. Rubio-Maya, C., Uche, J., Martinez, A.: Sequential optimization of a polygeneration plant, *Energy Conversion and Management* **52** (2011) 2861–2869

13. Scattolini, R.: Architectures for distributed and hierarchical Model PredictiveControl - A review. *Journal of Process Control* **19** (2009) 723–731
14. Trifkovic, M., Sheikhzadeh, M., Nigim, K., Daoutidis, P.: Hierarchical Control of a Renewable Hybrid Energy System. 51st IEEE Conference on Decision and Control **December 10-13** (2012) Maui, Hawaii, USA.
15. Trifkovic, M., Marvin, W.A., Sheikhzadeh, M., Daoutidis, P.: Dynamic Real-Time Optimization and Control of a Hybrid Energy System. 2013 European Control Conference(ECC) **July 17-19** (2013) Zurich, Switzerland.

Control de calidad en la industria textil mediante sistemas conexionistas

Juan José Bullón Pérez, Angélica González Arrieta y Araceli Queiruga Dios

Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca. Plaza de los
Caídos s/n. 37008, Salamanca, España
{perbu, angelica, queirugadios}@usal.es

Resumen Los sistemas conexionistas se utilizan como una herramienta de gran alcance para muchos problemas del mundo real. En concreto las redes neuronales artificiales han demostrado su utilidad para la resolución de muchos problemas en el ámbito de los productos textiles tales como la predicción de las propiedades del hilo, el análisis de defectos del tejido, la optimización de procesos, etc. El poder de las redes neuronales (ANN) radica en su capacidad para representar relaciones complejas y aprender directamente de los datos que se están modelando. Hoy en día como en cualquier sector industrial, en el sector Textil se demanda la predicción de propiedades o la realización de un proceso de anticipación para minimizar costes y reducir así el tiempo improductivo de la instalación. La capacidad de predecir con precisión estas propiedades se ha convertido en un reto debido a un comportamiento altamente no lineal e interactivo de los materiales textiles. En este trabajo se examina las aplicaciones de las redes neuronales a los problemas de clasificación y predicción de la cadena productiva fibra, tejido y confección (FTC). Además se incluye una revisión de los principales trabajos de investigación publicados.

Keywords: control de calidad textil, redes neuronales artificiales, defectos textiles, visión artificial.

1. Introducción

El mayor o menor rendimiento de los artículos textiles, dependiendo de su uso final, se determina por las propiedades mecánicas y físicas del tejido con el que se ha producido; aspectos tales como suavidad, tacto o confort por su complejidad física son evaluados mediante juicios objetivos según las preferencias de los usuarios ante respuestas fisiológicas. Hasta la fecha los enfoques instrumentales existentes para medir directamente estas características se encuentran con numerosas limitaciones.

Este trabajo presenta la relación existente entre la aplicación de la inteligencia artificial (IA), mediante el uso de la visión artificial y los sistemas conexionistas, principalmente las Redes Neuronales Artificiales al sector industrial textil. La Ingeniería Textil se basa cada vez más en la utilización de modelos computacionales que tienen como objetivo la predicción de las propiedades y el

rendimiento de las diversas estructuras textiles. Se han utilizado distintas herramientas computacionales para representar los tejidos en un medio computacional adecuado y predecir sus propiedades finales. Entre otros, su análisis a través del Método de Elementos Finitos (FEM) ha facilitado principalmente la predicción del comportamiento de la estructura textil bajo cargas mecánicas. En el caso de problemas de clasificación, las Redes Neuronales Artificiales han demostrado ser una herramienta muy eficaz para su solución rápida y precisa. Las RNAs han encontrado una aplicación cada vez mayor en la industria textil, tanto en la clasificación, como en la predicción de las propiedades y los problemas de optimización. En paralelo y de forma complementaria se han utilizado la lógica difusa y las técnicas de algoritmos genéticos.

El trabajo que se presenta examina el uso de la RNAs en la industria textil aplicadas a problemas de clasificación y predicción dentro de sus procesos de fabricación, desde la selección de fibras, elaboración de los hilados y su transformación en tejidos incluyendo el proceso de acabado y confección. Además se incorpora una revisión de los principales trabajos de investigación publicados.

En la primera sección se introduce al lector dentro de la cadena productiva textil, se indican los principales conceptos sobre productos y procesos textiles de forma que entrelazándose unos con otros tejen la estructura del nuevo escenario textil en el que se identifican las tendencias, las líneas de investigación y la tecnología clave necesaria para llevarlas a cabo. A continuación se describe la relación entre la inteligencia artificial, mediante el uso de la visión artificial aplicada al control de calidad en el sector textil. Se muestran los sistemas automatizados de inspección de tejidos existentes en la actualidad y se identifican las técnicas utilizadas para inspeccionar irregularidades en las superficies textiles a través de los enfoques estadísticos, estructurales, basados en filtros y basados en modelos. En la tercera sección, se identifican las funciones de interés de las RNAs, para la Ingeniería Textil la función aproximación: empleada en el sistema de entrada-salida de modelización y predicción, y la función clasificación, utilizada en el reconocimiento de patrones y clasificación de problemas.

Para finalizar se presentan las conclusiones alcanzadas y se proponen futuras líneas de trabajo.

2. Generalidades de la Industria Textil

La industria textil se caracteriza por ser la actividad económica que tiene como objetivo la producción de fibras, hilados, tejidos, ropa de vestir, y artículos textiles para hogar y decoración, así como usos técnicos e industriales. Dentro de las industrias manufactureras, el textil constituye uno de los sectores más antiguos y complejos al incluir un gran número de subsectores que abarcan la totalidad del ciclo productivo, desde las materias primas y productos intermedios, hasta la elaboración de los productos finales. Definida por su fragmentación y heterogeneidad, la industria textil está formada principalmente por pequeñas y medianas empresas, algunas de ellas muy especializadas en procesos concretos. Entre los factores de su complejidad destacan tanto la gran cantidad de materias primas utilizadas en la elaboración de las fibras (algodón, lana, materias

sintéticas, etc.) como la diversidad de procesos de producción, tejidos de calada, tejidos de punto o no tejidos necesarios para su obtención. Y puede clasificarse de diferentes maneras según se haga referencia al proceso productivo, a los productos finales obtenidos, etc.

En base a su aplicación, podemos definir, como estructura textil, aquella estructura, más o menos plana, lo bastante flexible como para poder transformarse en prenda de vestir, textiles de uso doméstico, así como usos industriales donde se requiera cierta flexibilidad.

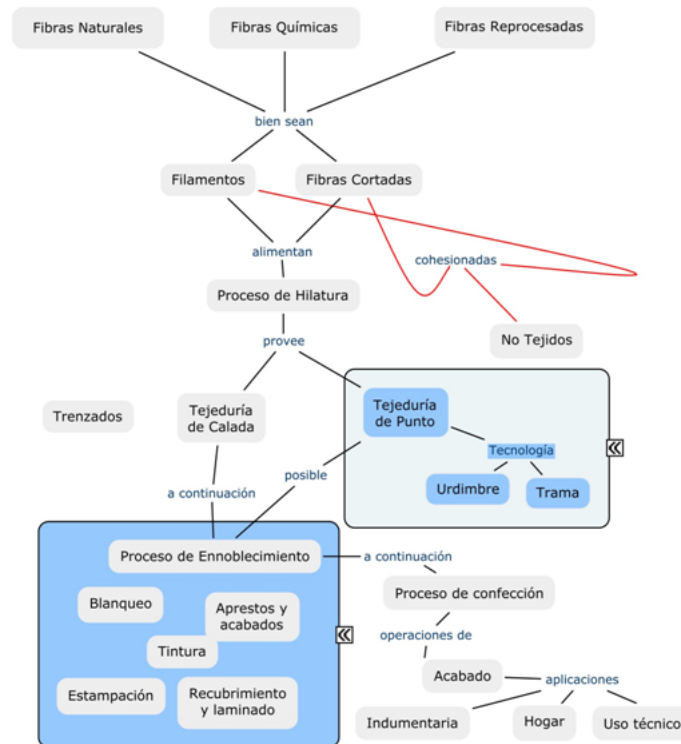


Figura 1: Diagrama del proceso Textil.

Tal como se muestra en la Fig. 1, la elaboración de las estructuras textiles comprende desde la recolección de fibras naturales o la producción de fibras artificiales o sintéticas, seguida o no del proceso de hilatura para la posterior transformación en estructuras textiles planas, telas o tejidos, en forma de tejidos de calada, de punto o malla, telas no tejidas, y otras estructuras no convencionales cosido-tricotado, tufting, etc. Las telas o tejidos son habitualmente tratadas en los procesos de acabado, que incluyen la preparación para el mismo y los eventuales procesos de tintura o estampación, apresto, recubrimiento, laminado o acabados mecánicos, que confieren al tejido nuevas propiedades antes de la

fase de confección, cuando se precisa, que los hace aptos para su utilización en diferentes aplicaciones.

En la cadena productiva textil-confección se diferencian claramente los tres grandes subsectores: el proceso de transformación de materia prima e hilatura, la tejeduría y la confección, que culminan con la etapa de distribución comercial de los artículos textiles facilitando los mismos a los consumidores finales. Este ciclo está constituido por operaciones y procesos tecnológicos muy dispares que se reflejan en estructuras empresariales y sistemas de organización diferentes. Así, actualmente podemos encontrar empresas que controlan solo parte del proceso, mientras que existen estructuras empresariales que comprenden desde el diseño y fabricación de los artículos hasta el desarrollo de sus propios canales de distribución y puntos de venta [25].

En la Fig. 2 se representan las características de la cadena: Fibra, Tejeduría, Confección y distribución comercial, que a continuación se describen.

La cadena productiva textil se caracteriza por ser una de las cadenas industriales más largas en procesos productivos y diversificación de productos, y complicadas por la múltiples variables que intervienen en los procesos, constituyendo un sector fragmentado y heterogéneo que se abastece tanto de fibras naturales como sintéticas con el objetivo de elaborar productos textiles para tres grandes ámbitos: (1) Confección de prendas de vestir. (2) Textil hogar y decoración. (3) Aplicaciones industriales y técnicas. Es una fuente de empleo manufacturero en las economías modernas, consolidándose como una fase crítica del proceso de industrialización de los países en vías de desarrollo y actualmente en un número limitado de países.

En cuanto a las dimensiones de la cadena productiva textil, estas están definidas por grandes volúmenes de producción, bajos precios y tiempos de respuesta mínimos. Indiscutiblemente China se ha convertido en el líder mundial; mientras que Turquía es considerado el principal proveedor de Europa; Bangladesh y Vietnam son los nuevos actores. Grandes Marcas que se desenvuelven en países desarrollados, son las generadoras de tendencias, creando prendas muy exclusivas, y realizando la denominada “democratización del lujo”. Su competitividad se basa en flujos de información, creando redes de distribución propias. Lógicamente, el diseño del producto juega un papel muy importante dentro de la cadena productiva textil. Se gestiona para desarrollar productos a corto plazo y debe considerar la gestión de vida del producto. Se introduce la personalización del diseño como cambio en la forma de definir los productos: (1) Productos estándar. (2) Productos formados por componentes ensamblados en función de las necesidades. (3) Productos únicos.

Las estructuras empresariales tienden a alcanzar el estado de empresas reconfigurables, mediante arquitecturas basadas en controles abiertos y máquinas modulares de alta velocidad. En aras de alcanzar esta situación la tecnología clave a integrar en estas nuevas estructuras pasa por la creación de herramientas sectoriales para el diseño técnico de productos y simulación de productos y procesos; incorporación de tecnologías para la transformación de las máquinas de producción individuales en sistemas digitales integrados. Gestión e integración de la información sobre la base de plataformas digitales y la creación de

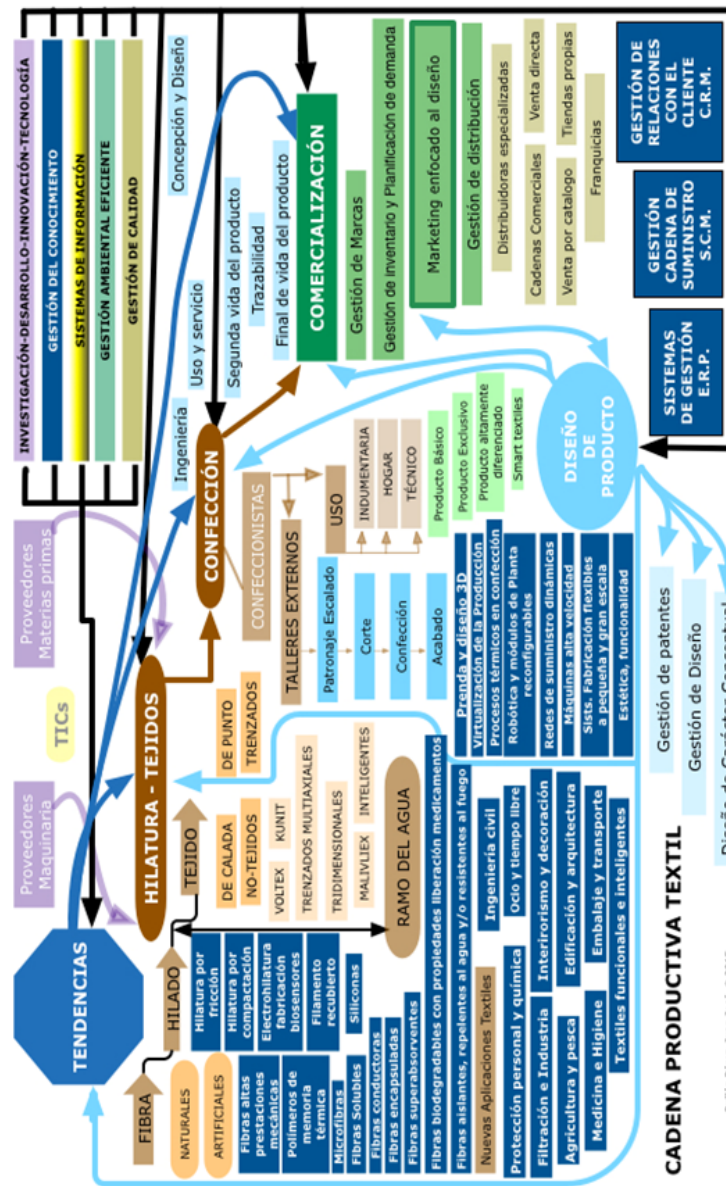


Figura 2: Cadena productiva textil.

estándares en los flujos de información para los sistemas digitales. Desarrollo de herramientas para potenciar la interoperabilidad en los procesos productivos y de interfaces hombre-máquina, con la participación de la inteligencia artificial. Implementación de herramientas digitales para realizar prototipos rápidos

y de las técnicas de visión artificial para la inspección de materiales y control de procesos industriales.

Junto a estas nuevas estructuras aparecen nuevos modelos de negocio que tienen entre otra finalidad la de formar a los máximos responsables en nuevas tendencias de mercados y las posibilidades que ofrece la aplicación de las TIC. Promover el contacto entre las empresas del sector para la formación de alianzas estratégicas y potenciar la creación de negocios basados en redes de empresas sectoriales. Formar a los recursos humanos para que puedan operar en este entorno facilitando el asesoramiento y consultoría que ayude a esta transformación. Para alcanzar estos objetivos debe contarse con la tecnología clave que permita la reorientación de los procesos de la empresa, aplicando las técnicas de reingeniería de procesos; implantando un portal de negocio que permita la comunicación fluida y flexible entre los elementos internos y externos de la empresa, mediante el uso del Cloud Computing.

A continuación se indican las principales líneas de investigación que se están llevando a cabo en los centros de desarrollo de distintos países a nivel mundial.

En cuanto a fibras textiles se está buscando nuevas fibras para mejorar la seguridad, la protección, la salud, el bienestar y el confort humano, aumentando la eco eficiencia de los procesos textiles y neutralizando los procesos químicos severos y menos eficientes; incrementando el uso de materias primas naturales y renovables, y la producción de fibras textiles basada en la fermentación y en otros bio-procesos.

Se tiende a una implementación de los usos y aplicaciones de productos textiles: Agricultura y jardinería y pesca. Construcción y arquitectura. Geotextiles para ingeniería civil. Componentes técnicos para decoración, textil hogar y recubrimiento de suelos. Filtración, limpieza y otros usos industriales. Aeronáutica, ferrocarriles e industria aeroespacial. Transporte y embalaje. Protección medioambiental, química y uso militar. Textiles inteligentes. Sensores. Actuadores. Procesamiento de datos/electrónica, y comunicación [28].

En cuanto a la gestión de la cadena de suministro las líneas de investigación que se están desarrollando son: Tecnologías y sistemas flexibles de fabricación a pequeña escala. Tecnologías de producción para la fabricación en 3D. Innovación/Desarrollo de Producto: utilización de material virtual textil para simulaciones de prendas, predicción de “facilidad de fabricación”, comportamiento de los materiales virtuales.

Gestión de la Producción. Se buscan nuevos conceptos de diseño adaptables a la simulación, optimización, flexibilización, o virtualización de los procesos productivos (individuales o en red). Reducción del ciclo de desarrollo de los nuevos productos vía técnicas de simulación y modelaje en una realidad virtual mediante conceptos y herramientas para promover procesos colaborativos más efectivos entre expertos y redes. Métodos y herramientas de cooperación para el desarrollo de productos con otros sectores empresariales. Combinación de elementos estéticos y técnicos en un único sistema de diseño y desarrollo de productos.

Industriales, profesionales y científicos trabajan dentro del campo de la Gerencia de la calidad total, para asegurar la calidad desde el diseño hasta su reciclaje/eliminación siendo necesario desarrollar nuevos mecanismos, más efec-

tivos de control de calidad durante todo el ciclo de vida, asegurando el registro y trazabilidad de las especificaciones del producto en toda la cadena de suministro. En este sentido, se da prioridad a la investigación científica orientada a:

- Cuantificación de los parámetros de calidad de la materia prima.
- Uso-cuidado del producto terminado y predicción de su desempeño.
- Confort y cumplimiento de estándares y reglamentaciones.

3. Visión Artificial

Toda industria textil tiene por objeto producir artículos competitivos. La mejora de la competencia depende principalmente de la productividad y la calidad de los productos elaborados por cada industria. La gran parte de los defectos que surgen en el proceso de producción de un material textil son todavía detectados por inspección humana. El trabajo de los inspectores es muy lento y tedioso (ver Fig. 3). Tienen que descubrir pequeños detalles que pueden estar ubicados en una amplia zona que se desplaza a través de su campo visual. La tasa de identificación es de aproximadamente 70 %, no se debe obviar que la eficacia de la inspección visual disminuye rápidamente con la fatiga. Las técnicas de procesamiento de imágenes digitales se han aplicado cada vez más para el análisis de texturas en los últimos diez años [102].



Figura 3: Sistema de inspección tradicional [102].

La visión industrial o Visión Artificial (VA), es una disciplina de la Inteligencia Artificial, aplicada a la industria que comprende la informática, la óptica, la ingeniería mecánica y la automatización industrial.

La visión artificial consiste en la captación de imágenes (generalmente en dos dimensiones) en línea, mediante cámaras de estado sólido o CCD y su posterior tratamiento a través de técnicas de procesamiento avanzadas, permitiendo así, poder intervenir sobre un proceso (modificando sus variables) o producto

(detectando unidades defectuosas), para el control de calidad y seguridad de la producción. El sistema de visión artificial capta la imagen de un objeto real y la convierte en formato digital procesándola para obtener los resultados del proceso. Todo sistema de visión artificial se compone de: fuentes de luz, sensor de imagen, tarjetas de captura, algoritmos de análisis de imagen, computador o módulo de proceso y sistemas de respuesta. El conjunto de algoritmos relacionados con la visión artificial es muy amplio y abarca numerosas técnicas y objetivos. Para analizarla dividiremos los algoritmos de procesamiento en varias etapas, según participan en la generación de imágenes [35], [34]:

1. Adquisición de Imagen.
2. Filtrado o preprocesamiento.
3. Segmentación.
4. Representación y descripción.
5. Reconocimiento e interpretación.

En la actualidad existe maquinaria textil con visión artificial o sistemas de inspección visual automática. Además, de la inspección en línea, se requiere realizar pruebas de laboratorio sobre muestras físicas, para determinar la calidad y el cumplimiento de ciertos estándares.

3.1 Sistemas automatizados de inspección de tejidos

Hasta hace unos años la inspección visual se realizaba de forma manual por el operario que identificaba el 100 % del ancho y largo de los tejidos mediante el uso de fuentes de luz indirectas, dependiendo dicha operación del conocimiento y experiencia, es decir, de la habilidad de los inspectores. Los sistemas de inspección de tejidos automatizados se basan en redes neuronales adaptativas, que son entrenadas y aprenden por sí mismas. Lo que permite escanear una superficie del tejido de buena calidad, para realizar la inspección del 100 % del mismo.

A continuación se presenta el estado actual de los sistemas de inspección de tejidos automatizados: Cyclops de BarcoVision, webSPECTOR de Máquinas Shelton, y Fabriscan de Zellweger Uster.

La unidad de inspección del sistema Barco Vision Cyclops (<http://www.visionbms.com/>) utiliza una cabeza de adquisición de imágenes en movimiento, que consiste en una cámara y su iluminación, instalados a la salida del telar. En una serie de posiciones predefinidas, se toma la imagen del tejido y se transfiere a la unidad de procesamiento de imágenes. Aquí, aplicando algoritmos propietarios se analiza la textura del tejido con la posibilidad de detectar desviaciones de la norma. Cualquier defecto detectado se señala en el telar. Los ajustes de iluminación y la cámara se optimizan por el módulo de calibración de software en relación con las características ópticas del tejido. Además, su estructura se identifica automáticamente con el fin de calcular los parámetros del algoritmo para la detección óptima de los defectos.

Webspector (<http://www.sheltonvision.co.uk>) es un sistema de visión artificial desarrollado por Shelton Vision System para la inspección de textiles.

El tamaño del defecto a ser detectado puede llegar, a 0,5mm. Las señales del fallo detectado se utilizan para operar un sistema de etiquetado, que marca los defectos. Las imágenes de la cámara, después de su transformación, identifican todas las características que difieren de la vista normal. La extracción de características utiliza hasta 48 algoritmos debido a la diversidad de los defectos textiles y su naturaleza.

El sistema de Zellweger Uster Fabriscan® (<http://www.uster.com>) clasifica defectos en una matriz llamada Uster Fabriclass. Zellweger Uster comenzó el desarrollo de un sistema de inspección de tejidos de forma automática en 1983. Cuenta con un sistema patentado para la compensación de las vibraciones del telar. Los sensores de imagen están en contacto directo con el tejido, lo que mejora la calidad de la imagen. Esto significa que las grabaciones no son nunca inestables o borrosas como los de un sistema de cámara, obteniendo imágenes precisas de la estructura del tejido, y proporcionando la identificación exacta del defecto.

Todos los sistemas descritos tienen la ventaja de consistencia y robustez en comparación con los seres humanos. La inspección visual humana implica la observación, la atención y la experiencia para detectar correctamente la ocurrencia de fallos. La exactitud de la inspección visual humana disminuye con trabajos aburridos y rutinas interminables. Se necesitan años para entrenar a un buen inspector humano, y estos sistemas automatizados pueden ser instalados y “entrenados” en cuestión de semanas.

La principal preocupación para la mayoría de aplicaciones de inspección de la superficie visual es el estudio de las irregularidades de la superficie de los tejidos.

3.2 Técnicas de inspección

La inspección visual de irregularidades es un método no destructivo que tiene aplicación en gran variedad de superficies por ejemplo textiles, madera, acero, obleas, cerámica, e incluso objetos no planos como las superficies de aviones, y es muy demandado por la industria con el fin de sustituir el proceso subjetivo y repetitivo de la inspección manual.

Existen numerosos trabajos realizados ya en las últimas dos décadas en las que la inspección visual basada en computador se ha convertido en una de las áreas de aplicación más importantes. Los estudios [19] y [93] proporcionaron una amplia visión general de inspección de superficies. Posteriormente, en [73] presentaron alguno de los principales avances en la inspección de superficies.

La Fig. 4 muestra algunos ejemplos de defectos en diferentes tipos de material.

La textura es una de las características más importantes en la identificación de los defectos. La automatización del proceso de inspección visual, como ya se ha indicado, es un problema multivariable y requiere una compleja interacción entre los diversos componentes del sistema. En función de las materias primas y las técnicas de tisaje, el método de inspección puede ser diferente. A continuación se presenta una posible clasificación de las técnicas utilizadas para inspeccionar irregularidades en las superficies textiles:

1. Enfoques estadísticos.

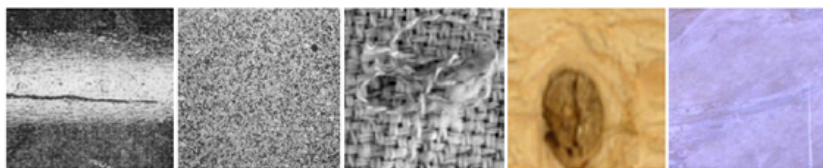


Figura 4: defectos sobre diferentes tipos de superficies. De izquierda a derecha: Acero, piedra, textil, madera, y cerámica [130].

2. Enfoques estructurales.
3. Métodos de filtrado.
4. Enfoques de modelado.

3.2.1 Enfoques estadísticos. Los métodos de análisis de textura estadísticos, describen la imagen como porción de un conjunto de imágenes a menudo caracterizadas por su media y funciones covariantes, midiendo la distribución espacial de los valores de los píxeles. El objetivo de la detección de defectos es separar la imagen de inspección en regiones de distinto comportamiento estadístico. Un supuesto importante en este proceso es que las estadísticas de las regiones libres de defectos son estacionarias, y estas predominan sobre una porción significativa de imágenes de inspección.

Los métodos de detección de defectos que emplean características de textura extraídos de la dimensión fractal, pueden calificarse en: histograma, matrices de co-ocurrencia, autocorrelación y patrones binarios locales, entre otros [22].

Histograma: Podemos considerarlo por ejemplo, para su uso en aplicaciones donde es necesaria una discriminación de tonalidad, o para la clasificación de defectos[121].

Matriz de Co-ocurrencia (GLCM, por sus siglas gray-level co-occurrence matrix): Constituye una de las características de las texturas más conocida y utilizada para la clasificación de imágenes [40].

Autocorrelación: Las estructuras textiles se consideran de naturaleza repetitiva por lo que puede aplicárseles la función de auto correlación. Midiendo la correlación existente entre las variables de la imagen obtenida y su transformada mediante un vector de desplazamiento. Está estrechamente relacionada con el espectro de potencia de la transformada de Fourier.

Las técnicas de procesamiento de imágenes digitales se han aplicado cada vez más para el análisis de muestras de textura en los últimos años. [102] han considerado la detección de defectos en los materiales textiles analizando las imágenes obtenidas de muestras de tejido a partir de la transmisión y reflexión de la luz, y determinando su patrón de entrelazado. Utilizando espectros de Fourier de imágenes de tejido como entradas a una red neuronal artificial para la detección de cuatro tipos de defectos: defectos de ligamento (perdida de pasadas de trama e hilos de urdimbre), manchas y rotura de hilos en el tejido.

Patrones Locales Binarios (LBP): El operador LBP fue introducido por primera vez en 1996 [98] como una medida invariante a la escala de grises, derivado

de una definición general de la textura en una vecindad local. Consiste en la comparación del píxel central con los próximos, considerándose el umbral con respecto a sus vecinos. En la actualidad se ha convertido en el método principal de reconocimiento de texturas, siendo aplicado en la detección de objetos en movimiento en tiempo real, detección de caras y el reconocimiento de expresiones faciales con excelentes resultados [3].

3.2.2 Enfoques estructurales. En [13] propusieron un enfoque estructural para identificar defectos en las imágenes de artículos textiles. La imagen era valorada utilizando el análisis del histograma y luego mapeada en una estructura de datos que representa la estructura básica o de soporte de la textura. Las mediciones estadísticas se tomaron de los histogramas de ubicación y longitud, comparándose con un rango de aceptación predefinido que se aprendió a partir de muestras libres de defectos.

3.2.3 Enfoques basados en filtros. La característica que comparten estas técnicas es la aplicación de filtros en la imagen procesada para posteriormente calcular la energía de sus respuestas. En [63], los autores utilizan filtros finitos lineales de respuesta al impulso (FIR) para detectar defectos en textiles. Tras una selección de filtros basada en el análisis discriminante utilizando funciones objetivo, y el criterio de Fisher, el proceso de filtrado obtiene respuesta tanto de las regiones libres de defectos como de las zonas donde se encuentran los defectos.

3.2.4 Enfoques basados en modelos. La textura se considera generalmente como un patrón gráfico complejo y puede ser definido por un modelo cuya ventaja es que logra producir texturas que pueden coincidir con las texturas observadas. Estos enfoques basados en modelos [65] son adecuados particularmente para imágenes de tejidos con variaciones de su superficie (debido a distintas composiciones de fibra o ruido).

En esta sección se ha presentado una clasificación de las técnicas de análisis de textura utilizados para la detección de defectos. Los métodos basados en estadísticas y filtros son los que aparecen mayoritariamente en más investigaciones y publicaciones. No se puede extraer una conclusión para determinar el mejor método para la detección de defectos, es evidente que los enfoques de filtrado, en particular, el filtrado Gabor, se han aplicado de forma mayoritaria, ya que pueden diseñarse para descomponer texturas con el fin de resaltar defectos. Sin embargo, es notable que hay investigaciones recientes que sugieren un análisis sin filtrado. También se han utilizando métodos basados en el LBP, o en modelos. Debido a las dificultades para derivar explícitamente la representación primitiva y las reglas de desplazamiento, hay relativamente menos publicaciones utilizando los enfoques estructurales. Un método de análisis de texturas debe ser capaz de representar ambos tipos de propiedades, estadísticas y estructurales, con el fin de describirla [44].

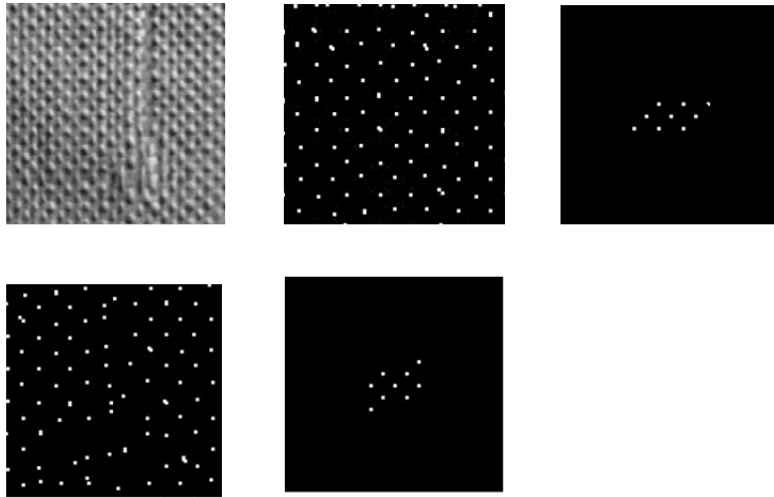


Figura 5: Imagen del tejido con defectos de urdimbre, situaciones reconocidas de los hilos en un sector bueno de la imagen, espectro de Fourier en la zona buena, situaciones reconocidas de los hilos en un sector con defectos, espectro de Fourier en la zona con defectos.

Con el fin de comprender la formación y la naturaleza de los defectos, es importante precisar la localización de las zonas defectuosas en lugar de la clasificación de la superficie. Proporcionando así las posibilidades de clasificar los defectos y sus características. Por último existe una clara necesidad de determinar conjuntos de datos estándar y protocolos experimentales bien definidos con el fin de llevar a cabo análisis comparativos equitativos.

4. Redes Neuronales aplicadas a la Ingeniería Textil

Hasta hace unas décadas el principal uso de las estructuras textiles o tejidos se hallaba limitado principalmente a prendas de vestir y artículos de uso doméstico. Sus aplicaciones para usos técnicos se encontraba restringida por diversos factores como la tecnología a emplear y el uso de nuevas materias primas.

Con la aplicación de las nuevas tecnologías, dedicadas tanto a los procesos productivos como a la obtención de nuevas materias primas, el uso de las estructuras textiles para aplicaciones técnicas o de uso industrial, ha comenzado a extenderse en los últimos años en sectores como la edificación, la medicina, la automoción, la aeronáutica, etc. Este incremento de aplicaciones técnicas ha mejorado tanto el diseño como el proceso de obtención de las estructuras textiles, debido a que los productos textiles independientemente de seguir las tendencias de la moda deben caracterizarse por requisitos técnicos tales como propiedades eléctricas, mecánicas, de durabilidad, de fácil cuidado etc. Lo que implica que a partir de la fase de diseño, dichos artículos puedan ser predecibles en gran

parte de su uso o aplicación por parte del usuario final. Pero debido a la compleja estructura de los artículos textiles y las dificultades que las materias primas añaden, no es posible la utilización de modelos de análisis precisos para su diseño. Por tanto estas actividades de ingeniería textil cada vez más se basan en la utilización de herramientas computacionales, cuyos modelos se aproximan a la predicción de las propiedades y el comportamiento de las estructuras textiles.

Por otro lado, y aplicadas a problemas de clasificación las *Artificial Neural Networks* han demostrado ser una herramienta muy eficaz por su solución rápida y precisa. Estas han encontrado una aplicación creciente en el campo textil en la clasificación de defectos [12], al mismo tiempo que se han utilizado de forma paralela o complementaria a las RNAs, la lógica difusa y las técnicas de algoritmos genéticos aplicadas en el campo textil [37]. Aplicándose en los problemas de clasificación y predicción en la mayor parte de los subsectores textiles, desde la selección de las fibras, fabricación de hilados y tejidos, subsector de aprestos y acabados, así como la técnica del color, tenido y estampación. Es sobre todo a partir de 1990 que las aplicaciones de RNAs en el campo de la ingeniería textil tienen una mayor repercusión. Poco a poco se comprobó que pueden abordar con éxito problemas de ingeniería complejos.

En esta sección se presenta una visión temática de los usos de las RNA en los diversos campos de la cadena productiva FTC.

En general, el control de calidad textil se determina mediante la medición de un gran número de propiedades (incluyendo las mecánicas, físicas, etc.), que en muchos casos sólo se pueden realizar con el concurso de operarios expertos y la utilización de equipos de laboratorio muy costosos. En general, en la industria textil, sus productos se inspeccionan manualmente en busca de defectos, surgiendo en esta inspección visual, algunos inconvenientes o trabas tales como el excesivo tiempo consumido, los factores subjetivos humanos, el estrés y fatiga del operario. Estos problemas influyen en el volumen de producción y la precisión de inspección. Por lo tanto, las técnicas que pueden reemplazar a la inspección manual juegan un papel cada vez, más importante.

En los últimos años, las redes neuronales se han utilizado para inspeccionar hilados, tejidos y sus defectos con el objetivo de identificar sus tipos. Las redes neuronales son de los mejores clasificadores utilizados para la detección de fallos debido a su naturaleza no paramétrica y la capacidad para describir regiones de decisión complejas [66], [112], [84]. Una cuestión clave en muchas aplicaciones de redes neuronales es determinar que características de entrada de las disponibles deben utilizarse para modelar el problema. En su mayoría, los investigadores han usado la función de selección basada en los métodos de procesamiento de imágenes en conjunto con la red neuronal de diferentes maneras. Este sistema generalmente está compuesto por la muestra de tejido, la cámara o el escáner y el conjunto de iluminación [5]. Algunos estudios se han basado también en la tecnología de procesamiento de imágenes de sensores (NINE). Gran parte de los investigadores habían convertido la imagen en color original a niveles de gris para mejorar la velocidad de procesamiento del ordenador y la reducción de las dimensiones de la información. Sin embargo, [117] presentan un método para la

inspección de la tela basada tanto en los niveles de grises y los datos de perfil de alcance 3D de la muestra.

La mayoría de los estudios generalmente han empleado la ecualización del histograma; la operación de reducción de ruido por filtrado, etc., para mejorar la apariencia visual de la imagen [54]. Cuando se utiliza la tecnología de imagen en relación con las redes neuronales, se pueden producir algunos inconvenientes; por ejemplo, la tasa de defectos reconocible puede estar relacionada con las condiciones de la fuente de luz [67]. Una adecuada selección de las características bien puede simplificar la identificación del problema clasificando la función y las características que no afectan a la capacidad de identificación, bien puede aumentar la eficiencia de operación y disminuir el costo de los sistemas de evaluación sin perder precisión. Por este motivo algunos estudios han aplicado el análisis de componentes principales (PCA) como métodos de procesamiento para reducir la dimensión de los vectores de características [64].

Existen numerosas publicaciones sobre las aplicaciones de las redes neuronales que abordan gran variedad de defectos textiles incluyendo hilado, tejido y defectos de prendas de vestir. Algunos de ellos se presentan a continuación.

4.1 Redes neuronales aplicadas a fibras textiles

Las pruebas habituales para identificación de fibras (por lo general consistentes en la realización de ciertas pruebas químicas), además de su dificultad de realización, son casi siempre ensayos destructivos.

La clasificación precisa de las fibras animales utilizadas en la industria de la lana es muy delicada. Algunas técnicas distinguen estas fibras a través de los patrones de sus escamas cuticulares y otras de sus propiedades físico-químicas. De los problemas tipo de clasificación de fibras animales, uno de ellos se ha estudiado mediante Redes Neuronales Artificiales [111]. En el caso del algodón, se han utilizado para la clasificación de las fibras [14], [132], [58], [92]. Se estableció un método para la selección de las balas de algodón sobre la base de ciertos criterios (ver [79] [80]). En el caso de las fibras sintéticas, las RNAs han apoyado la identificación de los parámetros de control de producción [1]. También basado en su uso [108] han desarrollado un sistema para la optimización de la producción de hilo sobre la base de las características de mezcla de fibras y los parámetros del proceso de hilatura.

4.2 Redes neuronales e Hilados

Es bien sabido que el proceso de hilatura es un sistema de fabricación complejo, en el que las materias primas, las metodologías de proceso, y los equipos influyen en la calidad del hilo. Las propiedades físicas del hilado como la resistencia a la tracción, la apariencia, la abrasión y flexión son los parámetros más importantes, que afectan a la calidad y el rendimiento de los productos finales, y también a su coste.

Mientras que la selección de los parámetros adecuados fue el centro de otros investigadores ([129], [135]). El proceso de hilado y su papel en la predicción

de las propiedades del hilo de algodón y poliéster fueron también examinadas [78], [50]. El efecto de las propiedades de las fibras sobre las características del hilo es un tema de gran interés para muchos científicos, con diferentes puntos de vista, métodos de hilatura o la composición específica de fibras ([24], [52], [81]). Un método basado en una combinación de algoritmos genéticos y redes neuronales ha sido utilizado para la predicción y la optimización de las propiedades de hilados [115]. La predicción de las propiedades de tracción de los hilos es de los principales intereses de la comunidad internacional de investigación. Muchas publicaciones tratan de la predicción de propiedades de la resistencia a la tracción de los hilos de forma general ([104], [36], [79], [94], [124], [91], [95]) o en condiciones específicas, como es el caso de los hilados con núcleo [30], o para la estimación del par de torsión de hilos de estambre [120]. El método de predicción ANN se compara con el enfoque de máquinas de vectores de soporte (*Support Vector Machin*, SVM) y se investigan las condiciones bajo las cuales cada método se adapta mejor [31]. La tasa de roturas de urdimbre durante el tejido es una función compleja de las propiedades del hilo y por lo tanto una aplicación para el modelo ANN [133].

La predicción del paralelismo o uniformidad y la vellosidad del hilo es de gran interés práctico, por este motivo se han utilizado RNAs para la predicción de la vellosidad hilados de lana de estambre [61] y de hilados de algodón [4][83]. De una manera similar, las RNAs se han utilizado para la predicción de la uniformidad del hilado de estambre por hilatura de anillos [126] y los hilados de algodón [82] [124] [83] o de la uniformidad de los hilos de rotor mezclados [27].

Estudios posteriores las han utilizado para predecir las propiedades de los hilos empalmados, técnica denominada “splice” (ver [71] y [72]). Los últimos estudios han contribuido a la predicción de los hilos “splice” sus propiedades de tracción, así como la predicción del diámetro del hilo, cubriendo así la carencia de los resultados mecánicos y la presencia visible de los puntos de corte y empalme en el hilo [123]. Las RNAs también se han utilizado para el análisis de falsas torsiones de hilados texturados [21], para la predicción de la retracción del hilo [75] o para el modelado del comportamiento de relajación de hilados [125].

4.3 Redes neuronales y Tejidos

Los tejidos son mayoritariamente el producto final del proceso textil, bien en prenda de vestir o en su formato de pieza apta para el uso final. Sus propiedades deben satisfacer directamente las necesidades de los usuarios; obviamente, su predicción y comportamiento final es muy importante. La inspección de los tejidos para la detección de defectos es una operación muy importante, tradicionalmente realizada por operadores cualificados. Se han hecho muchos intentos con el fin de realizar la inspección de forma automática.

El análisis de tejidos mediante procesamiento de imágenes junto con las redes neuronales han sido ampliamente utilizados para la detección y calificación de defectos, los equipos de investigación han trabajado sobre la detección automatizada de defectos centrandose su interés en ella, mientras que otros han utilizado las redes neuronales para apoyar la tarea de detección de fallos ([121], [107],

[117], [64], [49], [110], [9], [88]). Otro enfoque similar es el uso combinado de sistemas difusos [23] [43] o las bases de paquetes wavelet [41]; [56]. Los defectos del tejido pueden ser detectados también por una máquina de sistema de inspección dinámico de tejido atendiendo a sus niveles de gris [70]. La detección y el reconocimiento de los patrones sobre un tejido pertenece a la misma clase que otros problemas de reconocimiento o clasificación de patrones y por lo tanto susceptible para su uso en RNAs ([54], [20], [76]). Utilizando los mismos principios, [137] investigaron la inspección de las costuras en prendas acabadas.

Es difícil dar una descripción objetiva del cayente (propiedad que combina las propiedades mecánicas de un tejido con su percepción sensorial) de un artículo textil, debido a que en la práctica esta evaluación se realiza de forma subjetiva. Sin embargo, se han desarrollado algunos enfoques sistemáticos complejos para su definición, que incluye el estudio del comportamiento conjunto de las propiedades mecánicas del tejido, sometido este a una pequeña tensión. Obviamente, la predicción de la caída o cayente del tejido es equivalente a la predicción de sus propiedades mecánicas bajo esa determinada tensión. Es un problema no lineal, y por lo tanto es un objetivo para la aplicación de RNAs [136], [48], [113], [85]. Los datos del sistema FAST fueron utilizados como similitud al cayente del tejido [106], mientras la lógica difusa se ha combinado con ANN para su evaluación [99], [100]. Las RNAs en combinación con la lógica difusa se han utilizado para la predicción de las propiedades sensoriales de los tejidos, así [53]. Existiendo una relación muy estrecha entre aplicaciones relacionadas con la evaluación objetiva de la apariencia textil [18] y el estudio de la emoción sensorial que produce el textil utilizando RNAs [62].

La predicción de las propiedades mecánicas más simples de los tejidos es un requisito técnico esencial. Las RNAs se han utilizado para la predicción de la resistencia a la tracción [82] y para la curva de tensión-deformación inicial de los tejidos [38]. El mismo problema se ha resuelto utilizando un sistema neuro-fuzzy adaptativo [39]. La rigidez de cizallamiento de los tejidos de lana peinada (2009) y sus propiedades de compresión se han modelado con éxito [90]. En general, la predicción de las propiedades de un tejido sirve de apoyo en la fase de diseño [8]. También La permeabilidad de los tejidos ha sido modelada usando RNAs [118]. Más adelante, ha sido estudiado el impacto de la permeabilidad [119] y se ha evaluado la calidad de los modelos neuronales [119]. La propensión al pilling de los tejidos se ha predicho por [10] y se ha evaluado la formación de bolitas “pilling” en los tejidos [15], [139], mientras que la presencia de fibras al azar ha sido modelada [122]. La evaluación de la arruga de los tejidos se ha realizado sobre una base objetiva con un sistema basado en redes neuronales [114]; [86]. La predicción del enrollamiento del tejido de punto ya relajado [89], así como la calidad global del tisaje [109] y la evaluación subjetiva de los tejidos de punto [57]. La predicción de la resistencia y conductividad térmica de los tejidos textiles se ha realizado con la ayuda de RNAs [11], [29]. La humedad y la transferencia de calor en tejidos de punto ha sido también estudiado de manera similar [134]. La ingeniería de tejidos utilizada en aplicaciones de seguridad y de protección se apoya en RNAs [60], [103]. La predicción de su uso final ha sido también posible a través del mismo método [14]. También ha sido abordado por el modelo de redes

neuronales la optimización de la aplicación de un recubrimiento con capacidad de repeler líquidos y manchas [2].

4.4 Redes neuronales y la tintura-estampación textil

La medición del color, su comparación, evaluación y predicción son acciones importantes en el apresto y el campo del proceso de acabado textil. Aunque la medición del color es posible en el laboratorio con la ayuda de equipo especializado como los espectrofotómetros, existen pocos métodos con capacidades para la predicción de los cambios de color o el aspecto del color final, porque el problema es multivariable.

Un modelo para la predicción del cambio de color después del proceso de hilatura fue desarrollado por [116]. En el campo de la tintura y estampación, la especificación del estudio del color se ha hecho posible gracias el uso de la función de activación de base radial en redes neuronales [105]. Las combinaciones de pigmentos para la tintura textil se pueden determinar [32], a través del estudio del color de las imágenes de los tejidos teñidos; así pueden ser identificados los colores y su separación pueden tener lugar mediante el uso de diferentes tipos ANN [131], [69]. La predicción de los valores CIELab es posible a pesar de los cambios de color después de los procesos químicos [7], de nylon 6,6 y para los tejidos de algodón desmotados [6]. La optimización de las condiciones de procesamiento y la predicción de la calidad de teñido de tejidos de nylon y lycra y la clasificación de defectos de estampación se han llevado a cabo con la ayuda de RNAs y redes neuronales difusas respectivamente [68], [43].

4.5 Redes neuronales y el sector de confección

Los artículos de ropa o prendas de vestir constituyen el producto final del flujo de producción textil. Aunque la precisión de la predicción de las propiedades no es crítica como si de el uso en aplicaciones técnicas se tratase, la estimación de las propiedades finales es esencial para el diseño de ropa, la selección de materias primas y sus propiedades.

Uno de los factores más importantes que afecta a la calidad de prendas de vestir está relacionado con el resultado del proceso de costura. Ciertamente, la predicción de la resistencia de la costura es muy importante, especialmente para los paracaídas [97]. El consumo de hilo se prevé a través de un modelo de ANN [51], mientras se evalúa el fruncido de la costura y optimiza el hilo de coser a través de modelos ANN, respectivamente [84], [74]. La predicción del rendimiento de la costura es también posible gracias a la utilización de RNAs [46], [47]. Las percepciones psicológicas humanas de comodidad sensorial y el análisis de la percepción táctil de los materiales textiles se estudia en [128], [59] y la predicción del rendimiento de la telas de confección y diseño de prendas de vestir en [42], [33]. Los casos de interés especial, como la selección de las entretelas óptimas, o de interés general, como la simulación de una cadena de suministro textil, han sido modelada con éxito por [55] y [96].

4.6 Redes neuronales y no-tejidos

El no tejido es una categoría específica de estructuras laminares textiles obtenidos directamente de las fibras y no de hilos entrelazados. Las telas no tejidas encuentran muchas aplicaciones técnicas y su papel es esencial en el nuevo desarrollo de artículos textiles. Como todo producto industrial se someten a un proceso de inspección con el fin de garantizar su calidad.

El sistema de inspección visual basado en el análisis de la textura por ondas wavelet fue estudiado por [77], y de manera similar con sus transformadas en [45], mientras que un enfoque neuro-fractal se ha utilizado para el reconocimiento y clasificación de imágenes de los no tejidos [101]. Muchos de los problemas de calidad se abordan a través de redes neuronales, como las relaciones estructura-propiedades de las telas no tejidas [16], la construcción de un sistema de predicción de la calidad [69], el modelado de la propiedades de compresión de telas no tejidas punzonadas [26], la simulación del dibujo de unión por hilatura por fusión [17] así como la evaluación objetiva de la formación de pilling en telas no tejidas [138].

5. Conclusiones

La industria textil, en general, ha sido reacia a incorporar los sistemas de información y tecnologías de la información. Como resultado, existe un gran potencial para mejorar las operaciones a través de la aplicación de la información y los sistemas de conocimiento basados en el apoyo a las decisiones. Los sistemas expertos se encuentran en una etapa de inicialización e introducción en algunas áreas de aplicación y solo en determinadas empresas textiles.

En este trabajo se ha presentado una amplia visión de la aplicación de las redes neuronales artificiales para la solución de los problemas complejos y multivariable de la cadena productiva TFC, en un intento de cubrir este campo que está en constante evolución junto con los avances tecnológicos y modelos de negocio actuales. Todo apunta a que la comunidad textil se ha familiarizado con esta poderosa herramienta y que confía cada vez más en ella. Los continuos aumentos de la potencia de cálculo de los ordenadores personales reducen el inconveniente del coste computacional que el uso de RNAs requiere. Por lo tanto, se espera que aumenten su porcentaje de participación en la solución de problemas complejos textiles y apoyen el diseño y los conceptos de ingeniería asistida por ordenador en el campo textil.

Un número considerable de artículos en este estudio se centran en la aplicación de visión artificial y los sistemas inteligentes a los subsectores de “la fibra hasta el hilo” y, “la inspección y evaluación de defectos textiles”. Comparativamente, otros subsectores, como “la confección”, “gestión de la producción”, “el diseño y desarrollo del producto”, “el acabado” y “la comercialización y promoción”, “la distribución del producto” y “la gestión de materiales” han atraído una menor atención. No obstante, estas operaciones son igualmente importantes para el éxito de la cadena de suministro textil y de confección. La explotación del

uso de las tecnologías de inteligencia artificial es útil para mejorar el desempeño de estas áreas y, a su vez, beneficiar a todos los sectores a lo largo de la cadena.

La investigación, basada en una gran parte de los artículos revisados en este estudio también revela que la aplicación de sistemas inteligentes en la industria textil se realiza con la aplicación de ANN y en menor medida algoritmos genéticos, ya que estos son particularmente útiles en la solución de problemas de optimización.

Indicar que muchos expertos presentaron sus resultados en los medios de divulgación de centros de investigación de reconocido prestigio, como Journal of the *Textile Institute*, *Textile Research Journal*, *Fibers and Polymers*, *AUTEX Research Journal* o publicaciones IEEE, entre otros.

En la aplicación de ANN en las diferentes disciplinas de la cadena productiva FTC, se han encontrado las siguientes limitaciones:

- Se observa que en la clasificación de fibras se necesitan estrategias más eficaces de aprendizaje para mejorar la precisión de la clasificación hecha por las redes neuronales.
- Para la fabricación de los hilados hay que ampliar los trabajos para modelar con precisión la cinta y neps utilizando la ANN. Para mejorar las predicciones sobre tales parámetros, son necesarios datos adicionales sobre los pulverizadores específicos. Además, la dificultad en el desarrollo de un modelo empírico universal que pueda predecir con exactitud la vellosidad del hilo para diferentes pulverizadores se deriva de la variabilidad en las metodologías de procesamiento y los equipos utilizados.
- Como existen muchas variables independientes, surge más dificultad en cubrir toda la gama de parámetros con la capacidad de interpolación y extrapolación de las observaciones experimentales o mediciones. Es, por tanto, deseable lograr la capacidad de descubrir directamente las irregularidades a partir de los datos que están siendo modelados, sabiendo que son dinámicos y teniendo en cuenta los cambios en las especificaciones de materiales y de técnicas de procesamiento dentro de un proceso determinado. Las redes MLP, poseen esta característica, por lo que tienen el potencial necesario para una mayor aplicabilidad en la industria textil.
- En cuanto a los tejidos, para una mayor fiabilidad de los resultados obtenidos, deben conocerse sus valores del coeficiente de variación. Además, la predicción de su rendimiento puede mejorarse aún más, mediante la inclusión de estos parámetros como entrada durante la fase de entrenamiento.
- En una red pueden ser reconocidos en la materia prima desde neps hasta la contaminación, es decir, la calidad del hilo mejora el uso de una referencia para el ajuste de los parámetros de fabricación. Pueden inspeccionarse estampados y telas complejas, así como tejidos lisos. Las investigaciones están limitadas por la velocidad de la máquina de tejer, son necesarios más estudios para inspeccionar los defectos del tejido, como en el caso de las máquinas circulares de tejidos de punto.
- La aplicación de ANN en defectos de tejidos debe enfocarse hacia dos aspectos principales: (1) tiene que validarse la aplicabilidad de los métodos

desarrollados; y (2) la investigación actual basada en 2D necesita ser ampliada a la tridimensional 3D.

- Las funciones e interrelaciones de las percepciones sensoriales individuales y la comodidad son desconocidas. Es difícil aprender sus relaciones utilizando ANN.

En conclusión, los principales retos de la utilización ANN en la cadena productiva FTC son la falta de información estandarizada capaz de crear la base de datos a utilizar en la fase de aprendizaje y el largo tiempo de cálculo requerido para el manejo un conjunto de datos de gran tamaño. Para mejorar el rendimiento de los modelos de ANN, se debe considerar incluir algunos factores importantes como la determinación de las entradas adecuadas del modelo, la división de datos y el preprocesamiento, la elección de la arquitectura de red óptima, una cuidadosa selección de algunos parámetros internos que controlan el método de optimización, criterios de parada, y la validación de los modelos.

Las redes neuronales son una de las herramientas a disposición de la industria textil capaz de integrar elementos como la producción, las propiedades de los tejidos, su calidad y coste, y el control estadístico de procesos sin olvidar la optimización de dichos procesos, aportando un gran avance a los requerimientos del sector, como la reducción del tiempo de inactividad y estimaciones fiables de propiedades y parámetros de proceso.

En base a la proyección de las necesidades futuras de la industria, las tendencias actuales y en las lagunas aparentes en la literatura se han identificado algunas áreas potenciales para futuras investigaciones en la aplicación de los sistemas relacionados con la IA. La primera área se refiere a las nuevas tendencias en la integración de información asociada a las tecnologías examinadas. La integración de sistemas puede ayudar a mejorar el rendimiento del negocio al crear asociaciones con los miembros de la cadena de suministro en la industria textil. En ella, se incluye la integración de ERP, intercambio electrónico de datos, identificación por radiofrecuencia (RFID) y otro software de aplicación pueden aplicarse a los procesos de fabricación, de diseño de producto, y/o la gestión de la calidad. Para ayudar a mejorar el rendimiento general de la cadena productiva textil, se debería examinar e incrementar el uso de estas nuevas soluciones técnicas.

La segunda área potencial para futuras investigaciones es la inclusión de las nuevas tecnologías móviles, como RFID, sensores inalámbricos y tecnologías de red, así como la computación en la nube. Dichas tecnologías proporcionarán nuevas oportunidades para la aplicación y extensión de la toma de decisiones y sistemas inteligentes en la industria textil. Por otra parte, los últimos avances tecnológicos, tales como el teléfono inteligente, la tableta móvil y otras tecnologías móviles, son cada vez más populares entre los consumidores. En consecuencia, es razonable concluir que los usuarios de la industria pueden considerar el uso de estos dispositivos para mejorar su eficiencia de trabajo y eficacia, sobre todo en las áreas de control de calidad, tales como detección de defectos en los tejidos, la inspección de mercancías, y la evaluación de productos acabados, entre otras aplicaciones. Sin embargo, también se percibe que este desarrollo puede verse

obstaculizado por cuestiones personales y operativas, sin olvidar los aspectos técnicos, como la seguridad de datos, la conectividad de la red, el estrés laboral y la ansiedad, y los costos.

La trazabilidad y visibilidad son dos áreas en la cadena de suministro y gestión, las cuales pueden mejorarse mediante la tecnología RFID. La tecnología RFID ha existido durante muchos años, pero solo recientemente ha comenzado a ser utilizada en la industria textil y de confección. Dado que el costo de implementación de RFID está disminuyendo, estos sistemas pueden ser utilizados en diversas etapas y procesos diferentes a lo largo la cadena de suministro; por ejemplo, pueden ser utilizados para rastrear y supervisar el progreso durante los procesos de tejido y confección y acabado. Sorprendentemente, ninguna de estas dos áreas ha hecho mucho uso de estas técnicas RFID u otros sistemas inteligentes en el pasado. Por otra parte puede ayudar a las empresas para que el transporte de mercancías sea más efectivo y eficiente.

Por último, pero no menos importante, es que se debe tratar de utilizar las tecnologías de la inteligencia artificial para mejorar en términos de sostenibilidad (desarrollo y medio ambiente). La industria textil está explorando la ruta verde. La cadena de suministro puede hacerse más eficaz mediante el uso de fuentes de energía renovables, y participando activamente en la elaboración de nuevos materiales de energía solar y reciclados, además de reducir el uso del agua y las emisiones de carbono, entre otros. Los sistemas de apoyo a las decisiones y sistemas inteligentes son elementos necesarios en la consecución de los objetivos ambientales en este aspecto y deben aplicarse en el apoyo de prácticas ecológicas.

Referencias

1. Allan, G., Yang, R., Fotheringham, A., & Mather, R. (2001). Neural modelling of polypropylene fibre processing: Predicting the structure and properties and identifying the control parameters for specified fibres. *Journal of materials science*, 36(13), 3113–3118.
2. Allan, G., Fotheringham, A., & Weedall, P. (2002). The use of plasma and neural modelling to optimise the application of a repellent coating to disposable surgical garments. *AUTEX Research Journal*, 2(2), 64–68.
3. Alvarado, J. D., & Fernández, J. (2012). Análisis de textura en imágenes a escala de grises, utilizando patrones locales binarios (LBP). *ENGI Revista Electrónica de la Facultad de Ingeniería*, 1(1).
4. Babay, A., Cheikhrouhou, M., Vermeulen, B., Rabenasolo, B., & Castelain, J. M. (2005). Selecting the optimal neural network architecture for predicting cotton yarn hairiness. *Journal of the Textile Institute*, 96(3), 185–192.
5. Bahlmann, C., Heidemann, G., & Ritter, H. (1999). Artificial neural networks for automated quality control of textile seams. *Pattern recognition*, 32(6).
6. Balci, O., Oğulata, S.N., Sahin, C., & Oğulata, R. T. (2008). Prediction of CIELab data and wash fastness of nylon 6, 6 using artificial neural network and linear regression model. *Fibers and Polymers*, 9(2), 217–224.
7. Balci, O., & Oğulata, R.T. (2009). Prediction of the changes on the CIELab values of fabric after chemical finishing using artificial neural network and linear regression models. *Fibers and Polymers*, 10(3), 384–393.

8. Behera, B. K., & Muttagi, S. B. (2004). Performance of Error Back Propagation vis-á-vis Radial Basis Function Neural Network: Part I: Prediction of Properties for Design Engineering of Woven Suiting Fabrics. *Journal of the Textile Institute*, 95 (1–6), 283–300.
9. Behera, B. K., & Mani, M. P. (2007). Characterization and classification of fabric defects using discrete cosine transformation and artificial neural network. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 32, 421–426.
10. Beltran, R., Wang, L., & Wang, X. (2005). Predicting the pilling propensity of fabrics through artificial neural network modeling. *Textile research journal*, 75(7), 557–561.
11. Bhattacharjee, D., & Kothari V.K. (2007). A Neural Network System for Prediction of Thermal Resistance of Textile Fabrics. *Textile Research Journal*, 77(1), 4–12.
12. Chattopadhyay, R., & Guha, A. (2004). Artificial neural networks: applications to textiles. *Textile Progress*, 35(1), 1–46.
13. Chen, J., & Jain, A. K. (1988). A structural approach to identify defects in textured images. *Systems, Man, and Cybernetics, 1988. Proceedings of the 1988 IEEE International Conference*, 29–32.
14. Chen, Y., Zhao, T., & Collier, B. J. (2001). Prediction of fabric end-use using a neural network technique. *Journal of the Textile Institute*, 92(2), 157–163.
15. Chen, X., & Huang, X.B. (2004). Evaluating fabric pilling with light-projected image analysis. *Textile Research Journal*, 74(11), 977–981.
16. Chen, T., Li, L., Koehl, L., Vroman, P., & Zeng, X. (2007). A soft computing approach to model the structure-property relations of nonwoven fabrics. *Journal of applied polymer science*, 103(1), 442–450.
17. Chen, T., Zhang, C., Li, L., & Chen, X. (2008). Simulating the drawing of spunbonding nonwoven process using an artificial neural network technique. *Journal of the Textile Institute*, 99(5), 479–488.
18. Cherkassky, A., & Weinberg, A. (2009). Objective Evaluation of Textile Fabric Appearance. Part 2: SET Opti-Grade tester. Grading algorithms, and Testing. *Textile Research Journal*.
19. Chin, R.T. (1988). Automated visual inspection: 1981 to 1987. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 41(3), 346–381.
20. Chiou, Y.C., Lin, C.S., & Chen, G.Z. (2009). Automatic texture inspection in the classification of papers and cloths with neural networks method. *Sensor Review*, 29(3), 250–259.
21. Chiu, S.H., Chen, H.M., Chen, J.Y., & Wen, C.Y. (2001). Appearance analysis of false twist textured yarn packages using image processing and neural network technology. *Textile Research Journal*, 71(4), 313–317.
22. Cho, C.S., Chung, B.M., & Park, M.J. (2005). Development of real-time vision-based fabric inspection system. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 52(4), 1073–1079.
23. Choi, H. T., Jeong, S. H., Kim, S. R., Jaung, J. Y., & Kim, S. H. (2001). Detecting fabric defects with computer vision and fuzzy rule generation. Part II: Defect identification by a fuzzy expert system. *Textile Research Journal*, 71(7), 563–573.
24. Dayik, M. (2009). Prediction of yarn properties using evaluation programing. *Textile Research Journal*, 79(11), 963–972.
25. De Juan Vigaray, M. D. (2006). Sector textil-confección (I): evolución y tendencias en producción y distribución comercial. *Distribución y consumo*, 16(85), 110–120.
26. Debnath, S., & Madhusoothanan, M. (2009). Modeling of compression properties of needle-punched nonwoven fabrics using artificial neural network. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 33(4), 392–399.

27. Demiryürek, O., & Koç, E. (2009). Predicting the unevenness of polyester/viscose blended open-end rotor spun yarns using artificial neural network and statistical models. *Fibers and Polymers*, 10(2), 237–245.
28. Detrell, J. (1996). Aplicaciones técnicas de los materiales textiles. *Cuadernos de Tejidos de malla y Telas especiales (TECNITEX)*.
29. Fayala, F., Alibi, H., Benltoufa, S., & Jemni, A. (2008). Neural network for predicting thermal conductivity of knit materials. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 3(4), 53–60.
30. Gharehaghaji, A. A., Shanbeh, M., & Palhang, M. (2007). Analysis of two modeling methodologies for predicting the tensile properties of cotton-covered nylon core yarns. *Textile Research Journal*, 77(8), 565–571.
31. Ghosh, A., & Chatterjee, P. (2010). Prediction of cotton yarn properties using support vector machine. *Fibers and Polymers*, 11(1), 84–88.
32. Golob, D., Osterman, D. P., & Zupan, J. (2008). Determination of pigment combinations for textile printing using artificial neural networks. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 16, 93.
33. Gong, R., & Chen, Y. (1999). Predicting the performance of fabrics in garment manufacturing with artificial neural networks. *Textile research journal*, 69(7), 477–482.
34. González, R. C., & Woods, R. E. (2002). *Digital Image Processing*. Prentice Hall Press.
35. González, R. C., Woods, R. E., Rodríguez, F. D., & Rosso, L. (1996). *Tratamiento digital de imágenes* (Vol. 3). (Addison-Wesley, Ed.) New York.
36. Guha, A., Chattopadhyay, R., & Jayadeva. (2001). Predicting yarn tenacity: a comparison of mechanistic, statistical, and neural network models. *Journal of the Textile Institute*, 92(2), 139–145.
37. Guruprasad, R., & Behera, B. K. (2010). Soft computing in textiles. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 35, 75–84.
38. Hadizadeh, M., & Jeddi, A. A. (2009). The prediction of initial load-extension behavior of woven fabrics using artificial neural network. *Textile Research Journal*, 79(17), 1599–1609.
39. Hadizadeh, M., & Jeddi, A. A. (2010). Application of an Adaptive Neuro-fuzzy System for Prediction of Initial Load-Extension Behavior of Plain-woven Fabrics. *Textile Research Journal*, 80(10), 981–990.
40. Haralick, R. M., Shanmugam, K., & Dinstein, I. H. (1973). Textural features for image classification. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 6, 610–621.
41. Hu, M., & Tsai, I. (2000). Fabric Inspection Based on Best Wavelet Packet Bases. *Textile Research Journal*, 70(8), 662–670.
42. Hu, Z. H., Ding, Y. S., Yu, X. K., Zhang, W. B., & Yan, Q. (2009). A hybrid neural network and immune algorithm approach for fit garment design. *Textile Research Journal*, 79(14), 1319–1330.
43. Huang, C.C., & Chen, I.C. (2001). Neural-Fuzzy Classification for Fabric Defects. *Textile Research Journal*, 71(3), 220–224.
44. Huang, Y., & Chan, K.L. (2004). Texture decomposition by harmonics extraction from higher order statistics. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 13, 1–14.
45. Huang, C.C., & Lin, T.F. (2008). Image inspection of nonwoven defects using wavelet transforms and neural networks. *Fibers and Polymers*, 9(5), 633–638.
46. Hui, C. L., & Ng, S. F. (2005). A new approach for prediction of sewing performance of fabrics in apparel manufacturing using artificial neural networks. *Journal of the Textile Institute*, 96(6), 401–405.

47. Hui, C. L., & Ng, S. F. (2009). Predicting seam performance of commercial woven fabrics using multiple logarithm regression and artificial neural networks. *Textile Research Journal*, 79(18), 1649–1657.
48. Hui, C. L., Lau, T. W., Ng, S. F., & Chan, K. C. (2004). Neural network prediction of human psychological perceptions of fabric hand. *Textile Research Journal*, 74(5), 375–383.
49. Islam, M. A., Akhter, S., Mursalin, T. E., & Amin, M. A. (2006). A suitable neural network to detect textile defects. *Neural Information Processing*, 430–438.
50. Jackowska-Strumillo, L., Cyniak, D., Czekalski, J., & Jackowski, T. (2008). Neural model of the spinning process dedicated to predicting properties of cotton-polyester blended yarns on the basis of the characteristics of feeding streams. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 1(66), 28–36.
51. Jaouadi, M., Msahli, S., Babay, A., & Zitouni, B. (2006). Analysis of the modeling methodologies for predicting the sewing thread consumption. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 18(1), 7–18.
52. Jayadeva, G. A., & Chattopadhyay, R. (2003). A study on the capability of a neural network ranking fibre parameters having an influence on yarn properties. *Journal of the Textile Institute*, 94(3–4), 186–193.
53. Jeguirim, S.E., Dhouib, A.B., Sahnoun, M., Cheikhrouhou, M., Schacher, L., & Adolphe, D. (2009). The use of fuzzy logic and neural networks models for sensory properties prediction from process and structure parameters of knitted fabrics. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(6), 873–884.
54. Jeon, B.S., Bae, J.H., & Suh, M.W. (2003). Automatic recognition of woven fabric patterns by an artificial neural network. *Textile Research Journal*, 73(7), 645–650.
55. Jeong, S., Kim, J., & Hong, C. (2000). Selecting Optimal Interlinings with a Neural Network. *Textile Research Journal*, 70(11), 1005–1010.
56. Jianli, L., & Baoqi, Z. (2007). Identification of fabric defects based on discrete wavelet transform and back-propagation neural network. *Journal of the Textile Institute*, 98(4), 355–362.
57. Ju, J., & Ryu, H. (2006). A study on subjective assessment of knit fabric by ANFIS. *Fibers and Polymers*, 7(2), 203–212.
58. Kang, T. J., & Kim, S. C. (2002). Objective evaluation of the trash and color of raw cotton by image processing and neural network. *Textile Research Journal*, 72(9), 776–782.
59. Karthikeyan, B., & Sztandera, L. M. (2010). Analysis of tactile perceptions of textile materials using artificial intelligence techniques: Part 2: reverse engineering using genetic algorithm coupled neural network. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 22(2/3), 202–210.
60. Keshavaraj, R., Tock, R. W., & Nusholtz, G. S. (1995). A simple neural network based model approach for nylon 66 fabrics used in safety restraint systems: A comparison of two training algorithms. *Journal of applied polymer science*, 57(9), 1127–1144.
61. Khan, Z., Lim, A. E., Wang, L., Wang, X., & Beltran, R. (2009). An artificial neural network-based hairiness prediction model for worsted wool yarns. *Textile research journal*, 78(9), 714–720.
62. Kim, N.Y., Shin, Y., & Kim, E.Y. (2007). Emotion-based Textile Indexing using Neural Networks. *Consumer Electronics, 2007. ISCE 2007. IEEE International Symposium on*, 1–6.
63. Kumar, A., & Pang, G. (2002). Defect detection in textured materials using Gabor filters. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 38(2), 425–440.

64. Kumar, A. (2003). Neural network based detection of local textile defects. *Pattern Recognition*, 36(7), 1645–1659.
65. Kumar, A. (2008). Computer-vision-based fabric defect detection: a survey. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 55(1), 348–363.
66. Kuo, C.F., Wang, C. C., & Hsieh, C. T. (1999). Theoretical Control and Experimental Verification of Carded Web Density Part III: Neural Network Controller Design. *Textile research journal*, 69(6), 401–406.
67. Kuo, C.F., & Lee, C.J. (2003). A back-propagation neural network for recognizing fabric defects. *Textile Research Journal*, 73(2), 147-151.
68. Kuo, C.F., & Fang, C.C. (2006). Optimization of the processing conditions and prediction of the quality for dyeing nylon and lycra blended fabrics. *Fibers and Polymers*, 7(4), 344–351.
69. Kuo, C.F., Su, T.L., Chiu, C.H., & Tsai, C. P. (2007). Analysis and construction of a quality prediction system for needle-punched non-woven fabrics. *Fibers and Polymers*, 8(1), 66–71.
70. Kuo, C.F., Su, T.L., Chang, C.D., & Lee, C. H. (2008). Intelligence control of on-line dynamic gray cloth inspecting machine system module design. II. Defects inspecting module design. *Fibers and Polymers*, 9(6), 768–775.
71. Lewandowski, S., & Drobina, R. (2008). Prediction of Properties of Unknotted Spliced Ends of Yarns Using Multiple Regression and Artificial Neural Networks. Part I: Identification of Spliced Joints of Combed Wool Yarn by Artificial Neural Networks and Multiple Regression. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 5(70), 33–39.
72. Lewandowski, S., & Drobina, R. (2008) Prediction of Properties of Unknotted Spliced Ends of Yarns Using Multiple Regression and Artificial Neural Networks. Part II: Verification of Regression Models. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 6(71), 20–27.
73. Li, Y., & Gu, P. (2004). Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Computer-Aided Design*, 36(13), 1395–1417.
74. Lin, T. (2004). Construction of Predictive Model on Fabric and Sewing Thread Optimization. *Journal of Textile Engineering*, 50(1), 6–11.
75. Lin, J. (2007). Prediction of Yarn Shrinkage using Neural Nets. *Textile Research Journal*, 77(5), 336–342.
76. Liu, S., Wan, Q., & Zhang, H. (2009). Fabric Weave Identification Based on Cellular Neural Network. *The Sixth International Symposium on Neural Networks (ISNN 2009)*. Springer Berlin Heidelberg. 563–569.
77. Liu, J., Zuo, B., Vroman, P., Rabenasolo, B., Zeng, X., & Bai, L. (2010). Visual Quality Recognition of Nonwovens using Wavelet Texture Analysis and Robust Bayesian Neural Network. *Textile Research Journal*, 80(13), 1278–1289.
78. Lu Z.-J., Y. J.-G.-L. (2007). Support Vector Machines for Predicting Worsted Yarn Properties. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 32, 173–178.
79. Majumdar, P. &. (2004). Predicting the Breaking Elongation of Ring Spun Cotton Yarns Using Mathematical, Statistical, and Artificial Neural Network Models. *Textile Research Journal*, 74(7), 652–655.
80. Majumdar, A., & Majumdar, P. &. (2004). Selecting Cotton Bales by Spinning Consistency Index and Micronaire Using Artificial Neural Networks. *Autex Research Journal*, 4(1), 1–8.
81. Majumdar, A. M. (2006). An investigation on yarn engineering using artificial neural networks. *Journal of The Textile Institute*, 97(5), 429–434.

82. Majumdar, A., Ghosh, A., Saha, S., Roy, A., Barman, S., & Panigrahi, D. (2008). Empirical Modelling of Tensile Strength of Woven Fabrics. *Fibers and Polymers*, 9(2), 240–245.
83. Majumdar, A. (2010). Modeling of Cotton Yarn hairiness Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Indian journal of fibre & textile research*, 35(2), 121–127.
84. Mak, K., & Li, W. (2007). Objective Evaluation of Seam Pucker on Textiles by Using Selforganizing Map. *IAENG International Journal of Computer Science*, 35(1), 47–54.
85. Matsudaira, M. (2006). Fabric Handle and Its Basic Mechanical Properties. *Journal of textile engineering*, 52(1), 1–8.
86. Mori, T., & Komiyama, J. (2002). Evaluating Wrinkled Fabrics with Image Analysis and Neural Networks. *Textile research journal*, 72(5), 417–422.
87. Mori, T., & Komiyama, J. (2002). Evaluating Wrinkled Fabrics with Image Analysis and Neural Networks. *Textile research journal*, 72(5), 417–422.
88. Mursalin, T. E., Eishita, F. Z., & Islam, R. (2005). Fabric defect inspection system using neural network and microcontroller. *Statistics*, 50, 100.
89. Murrells, C., Tao, X., Xu, B., & Cheng, K. (2009). An Artificial Neural Network Model for the Prediction of Spirality of Fully Relaxed Single Jersey Fabrics. *Textile Research Journal*, 79(3), 227–234.
90. Murthyguru, I. (2005). Novel Approach To Study Compression Properties in Textile. *Autex Research Journal*, 5(4), 176–193.
91. Mwasiagi, J. H. (2008). Performance of Neural Network Algorithms during the Prediction of Yarn Breaking Elongation. *Fibers and Polymers*, 9(1), 80–85.
92. Mwasiagi, J. I. (2009). The Use of K-means and Artificial Neural Network to Classify Cotton Lint. *Fibers and Polymers*, 10(3), 379–383.
93. Newman, T. S., & Jain, A. K. (1995). A survey of automated visual inspection. *Computer vision and image understanding*, 61(2), 231–262.
94. Nurwaha, D. &. (2008). Comparison of the New Methodologies for Predicting the CSP Strength of Rotor Yarn. *Fibers and Polymers*, 9(6), 782–784.
95. Nurwaha, D. &. (2010). Prediction of Rotor Spun Yarn Strength from Cotton Fiber Properties Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Method. *Fibers and Polymers*, 11(1), 97–100.
96. Nuttle, H., King, R., Hunter, N., Wilson, J., & Fang, S. (2000). Simulation Modeling of the Textile Supply Chain. Part I: The Textile-plant Models. *Journal of the Textile Institute*, 91(1), 35–50.
97. Onal, L., Zeydan, M., Korkmaz, M., & Meeran, S. (2009). Predicting the Seam Strength of Notched Webbing for Parachute Assemblies Using the Taguchi's Design of Experiment and Artificial Neural Networks. *Textile Research Journal*, 79(5), 468–478.
98. Ojala, T., Pietikäinen, M., & Harwood, D. (1996). A comparative study of texture measures with classification based on featured distributions. *Pattern recognition*, 29(1), 51–59.
99. Park, S. H. (2000). Applying Fuzzy Logic and Neural Networks to Total Hand Evaluation of Knitted Fabrics. *Textile Research Journal*, 70(8), 675–681.
100. Park, S. H. (2001). Total handle evaluation from selected mechanical properties of knitted fabrics using neural network. *Journal of Clothing Science and Technology*, 13(2), 106–114.
101. Payvandy, P., Yousefzadeh-Chimeh, M., & Latifi, M. (2010). A note on neurofractal-based defect recognition and classification in nonwoven web images. *Journal of the Textile Institute*, 101(1), 46–51.

102. Ralló, M., Millán, M. S., Escofet, J., & Navarro, R. (2003). Wavelet based techniques for textile inspection. *Opt. Eng.*, 26(2).
103. Ramaiah, G., Chennaiah, R., & Satyanarayanarao, G. (2010). Investigation and modeling on protective textiles using artificial neural networks for defence applications. *Materials Science and Engineering*, 168, 100–105.
104. Ramesh, M. R. (1995). The Prediction of Yarn Tensile Properties by Using Artificial Neural Networks. *Journal of the Textile Institute*, 86(3), 459–469.
105. Rautenberg, S., & Todesco, J. (1999). Color Recipe Specification in the Textile Print Shop Using Radial Basis Function Networks. *Engineering Applications of Bio Inspired Artificial Neural Networks*, 884–892.
106. Sang-Song, L. & Tsung-Huang, L. (2007). FAST System Approach to Discriminate the Characterized Generic Hand of Fabrics. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 32(3), 344–350.
107. Sette, S., & Boullart, M. L. (1996). Fault detection and quality assessment in textiles by means of neural nets. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 8(1/2), 73–83.
108. Sette, S., & Langenhove, L. V. (2002). Optimising the fibre-to-yarn production process: finding a blend of fibre qualities to create an optimal price/quality yarn. *Autex Res. J.*, 2, 57–63.
109. Slah, M., Amine, H.T., & Faouzi, S. (2006). A new approach for predicting the knit global quality by using the desirability function and neural networks. *Journal of The Textile Institute*, 97(1), 17–23.
110. Shady, E., Gowayed, Y., Abouiiiana, M., Youssef, S., & Pastore, C. (2006). Detection and Classification of Defects in Knitted Fabric Structures. *Textile Research Journal*, 76(4), 295–300.
111. She, F. K. (2002). Intelligent Animal Fiber Classification with Artificial Neural Networks. *Textile Research Journal*, 72(7), 633–640.
112. Shiau, Y. R., Tsai, I. S., & Lin, C. S. (2000). Classifying web defects with a back-propagation neural network by color image processing. *Textile Research Journal*, 70(7), 633–640.
113. Shyr, T.W., Lin, J.Y., & Lai, S.S. (2004). Approaches to Discriminate the Characteristic Generic Hand of Fabrics. *Textile Research Journal*, 74(4), 354–358.
114. Su, J., & Xu, B. (1999). Fabric wrinkle evaluation using laser triangulation and neural network classifier. *Opt. Eng.*, 38, 1688.
115. Subramanian, S.N., Venkatachalam, A., & Subramaniam, V. (2007). Prediction and optimization of yarn properties using genetic algorithm/artificial neural network. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 32, 409–413.
116. Thevenet, L., Dupont, D., & Jolly-Desodt, A. (2003). Modeling Color Change after Spinning Process Using Feedforward Neural Networks. *Color Research and Application*, 28(1), 50–58.
117. Tilocca, A. B. (2002). Detecting Fabric Defects with a Neural Network Using Two Kinds of Optical Patterns. *Textile Research Journal*, 72(6), 545–550.
118. Tokarska, M. (2004). Neural Model of the Permeability Features of Woven Fabrics. *Textile Research Journal*, 74(12), 1045–1048.
119. Tokarska, M. &. (2009). Determination of Woven Fabric Impact Permeability Index. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 34, 259–244.
120. Tran, C.D., & Phillips, D.G. (2007). Predicting torque of worsted singles yarn using an efficient radial basis function network-based method. *Journal of the Textile Institute*, 98(5), 387–396.
121. Tsai, I. S., Lin, C. H., & Lin, J. J. (1995). Applying an artificial neural network to pattern recognition in fabric defects. *Textile Research Journal*, 65(3), 123–130.

122. Ucar, N., & Ertugrul, S. (2007). Prediction of Fuzz Fibers on Fabric Surface by Using Neural Network and Regression Analysis. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 15(2), 58–61.
123. Ünal, P.G., Özdil, N., & Taskin, C. (2010). The effect of fiber properties on the characteristics of spliced yarns part I: Prediction of spliced yarns tensile properties. *Textile Research Journal*, 80(5), 429–438.
124. Üreyen, M. & Gürkan (2008). Comparison of Artificial Neural Network and Linear Regression Models for Prediction of Ring Spun Yarn Properties. I. Prediction of Yarn Tensile Properties. *Fibers and Polymers*, 9(1), 87–96.
125. Vangheluwe, L., Sette, S., & Kiekens, P. (1996). Modelling relaxation behaviour of yarns part II: Back propagation neural network model. *Journal of the Textile Institute*, 87(2), 305–310.
126. Wang, K., & Zeng, Y. (2008). A Wavelet Neural Network Applied to Textile Spinning, Aspects of Mathematical Modelling. *Mathematics and Biosciences in Interaction*, 363–369.
127. Wingate, I.B. (1973). *Los géneros textiles y su selección*. Compañía Editorial Continental.
128. Wong, A., Li, Y. Y., P.K.W., & Lee, P. (2003). Neural Network Predictions of Human Psychological Perceptions of Clothing Sensory Comfort. *Textile Research Journal*, 73(1), 31–37.
129. Wu, P., Fang, S.C., Nuttle, H.L., King, R.E., & Wilson, J.R. (1994). Decision surface modeling of textile spinning operations using neural network technology. *Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference*, 0–19.
130. Xie, X. (2008). A review of recent advances in surface defect detection using texture analysis techniques. *Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis*, 7(3)
131. Xu, B., & Lin, S. (2002). Automatic color identification in printed fabric images by a fuzzy-neural network. *AATCC Review*, 2(9), 42–45.
132. Xu, B., Dong, B., & Chen, Y. (2007). Neural network technique for fiber image recognition. *Journal of industrial textiles*, 36(4), 329–336.
133. Yao, G. G. (2005). Predicting the Warp Breakage Rate in Weaving by Neural Network Techniques. *Textile Research Journal*, 75(3), 274–278.
134. Yazdi, M., Semnani, D., & Sheikhzadeh, M. (2009). Moisture and Heat Transfer in Hybrid Weft Knitted Fabric with Artificial Intelligence. *Journal of Applied Polymer Science*, 114, 1731–1737.
135. Yin, X. &. (2007). Selection and Evaluation of Input Parameters of Neural Networks Using Grey Superior Analysis. *Textile Research Journal*, 77(6), 377–386.
136. Youssefi, M., & Faez, K. (1999). Fabric handle prediction using neural networks. *NSIP*, 731–732.
137. Yuen, C.W.M., Wong, W.K., Qian, S.Q., Fan, D.D., Chan, L.K., & Fung, E.H.K. (2009). Fabric stitching inspection using segmented window technique and BP neural network. *Textile Research Journal*, 79(1), 24–35.
138. Zhang, J., Wang, X., & Palmer, S. (2010). Objective Pilling Evaluation of Non-woven Fabrics. *Fibers and Polymers*, 11(1), 115–120.
139. Zhang, J., Wang, X., & Palmer, S. (2010). Performance of an Objective Fabric Pilling Evaluation Method. *Textile Research Journal*, 80(16), 1648–1657.

Sistema de Sonorización Automática de Grupos Musicales Basada en el Reconocimiento de Instrumentos

Miguel Ángel Ortiz Amores, Angélica González Arrieta y Ángel Luis Sánchez Lázaro

Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca. Plaza de los
Caidos s/n. 37008, Salamanca, España
{ma_ortiz, angelica, als1}@usal.es

Resumen El trabajo que pretende describir este artículo ha sido un trabajo de investigación del "Máster en Sistemas Inteligentes". Se ha desarrollado un sistema capaz de reconocer instrumentos musicales aislados mediante un sistema conexionista: el perceptrón multicapa. Con esta base, se podrían modificar ciertos parámetros de cada canal en una mesa de mezclas digital estableciendo un protocolo de paso de datos con ella, donde cada canal correspondería a un instrumento.

Keywords: Música, Reconocimiento, Instrumentos, Clasificación, MLP, ANN, RNA, CQT

1. Introducción

La propuesta de este trabajo se puede resumir en el desarrollo de un módulo de reconocimiento de instrumentos musicales. Se asume que las señales acústicas de los instrumentos vendrán cada una por un canal de comunicación de una mesa de mezclas imaginaria (ya que sería necesario un protocolo de comunicación a este efecto entre un modelo de mezclador y el ordenador), con algo de ruido, tal y como ocurriría en la sonorización de un grupo musical en directo.

Obteniendo el resultado del reconocimiento del instrumento de cada canal, podrían aplicarse de manera automática configuraciones genéricas o predefinidas de ecualización, filtros o incluso compresores y puertas de ruido, sin ser necesaria la intervención del usuario. De esta forma, y si el reconocimiento ha sido realizado correctamente, se obtendría una mejora sustancial del sonido del grupo musical, pudiendo eliminar componentes frecuenciales que aportan demasiada nasalidad a las voces, resaltar las frecuencias fundamentales de la percusión de membrana para ganar potencia, como en el caso del bombo, o aplicar un filtro paso-alto en instrumentos de percusión-metal como en los platos.

En el sistema planteado, el técnico de sonido podría aportar sus conocimientos para mejorar aún más la calidad de la sonorización teniendo en cuenta las características del entorno, ya que mediante el sistema propuesto no se tendrían en cuenta.

Entrando en el apartado más técnico sobre cómo llevar a cabo las tareas de reconocimiento, la idea ha sido utilizar redes neuronales artificiales. Esto es debido a que, visualizando los espectrogramas de diferentes tipos de instrumentos, se pueden apreciar diferencias entre ellos, lo cual sugiere que utilizar esta técnica sería una buena idea. El hecho de que la representación del espectrograma de un tipo de instrumento se vea distinto al de otro tiene su explicación física, y es que el timbre de un instrumento no está determinado por otra cosa más que por la relación entre sus armónicos para cada nota tocada o, siendo más específicos, para cada frecuencia fundamental. Conociendo estos datos, y que en algunos instrumentos puede darse más de una nota al mismo tiempo, se puede deducir que para su reconocimiento será necesario emplear técnicas a mayores más sofisticadas, entrando posiblemente también en el reconocimiento de los acordes. Al ser el tiempo muy limitado para realizar este trabajo de investigación, hemos decidido centrarnos de momento en la posibilidad del reconocimiento de algunos instrumentos sin dicha capacidad, como pueden ser los de percusión. Además, una dificultad añadida, es que la serie armónica de un instrumento varía con la intensidad con la que este se toque, y a lo largo del tiempo en el que suene una determinada nota. [6]

Resumiendo, la hipótesis es que utilizando las redes neuronales artificiales previamente entrenadas off-line en un programa desarrollado en Matlab, sería posible concluir que una señal pertenece a un instrumento con los que se ha entrenado a esas redes neuronales, o concluir que no es un instrumento con el que se haya entrenado al sistema, resultando esta técnica un buen método de reconocimiento para instrumentos sin capacidad de ejecutar acordes. Veamos hasta qué punto lo es.

2. Objetivos

2.1 Objetivos Funcionales

1. Desarrollar un sistema que permita el reconocimiento de instrumentos musicales, asumiendo que cada uno llegaría por un solo canal de comunicación de una mesa de mezclas, tal como se produciría en un espectáculo musical en directo.
2. Minimizar los fallos del sistema, dotándole de la capacidad de indeterminar un instrumento musical en caso de que hubiera dudas (ambigüedad en la decisión), aunque esto pudiera penalizar algo la tasa de acierto.
3. Ofrecer al usuario ventajas derivadas de reconocer automáticamente el instrumento de cada canal, tales como ecualización y aplicación de algunos filtros de manera automática.
4. Facilitar a los usuarios noveles en cuanto a producción musical la labor de la sonorización de un grupo musical en directo.
5. Tratar de obtener una tasa de acierto similar o mejor que las obtenidas en trabajos de investigación anteriores.
6. Establecer una estructura de Redes Neuronales que facilite y busque el reconocimiento del instrumento final, relegando a un papel secundario el reconocimiento de la familia del instrumento.

2.2 Objetivos Personales

1. Tener una primera toma de contacto con un caso real de un trabajo de investigación.
2. Comprobar si el enfoque conjunto de extracción de datos frecuenciales mediante la transformada por constante Q , y la capacidad de clasificación de las Redes Neuronales Artificiales, son una manera correcta de resolver el problema de reconocimiento automático de instrumentos.
3. Trabajar de una manera más profunda con Redes Neuronales Artificiales que la realizada como práctica en la asignatura "Computación Neuroborrosa" del Máster en Sistemas Inteligentes, poniendo en práctica todos los conocimientos y técnicas adquiridas en el curso de la asignatura.
4. Poner en práctica las habilidades aprendidas en el Máster en Sistemas Inteligentes para desarrollar un artículo científico y un informe técnico dignos, mediante el uso del software y plantillas con las que hemos trabajado en la asignatura "Metodología de la Investigación".
5. Desarrollar, por primera vez, un sistema completo en Matlab.
6. Obtener, seleccionar, y filtrar mis propios datos reales para entrenar y probar las Redes Neuronales.

3. Breve Resumen del Estado del Arte

A día de hoy, hay diferentes estudios en marcha sobre el reconocimiento musical en varios aspectos: Reconocimiento de canciones, reconocimiento de acordes, reconocimiento polifónico de instrumentos sobre una canción, y reconocimiento de instrumentos musicales de manera individual. En esta última línea es en la que se basa mi trabajo.

Estos trabajos tratan de extraer las características típicas del timbre de los instrumentos musicales para su posterior clasificación y reconocimiento. A pesar de no ser de las líneas de investigación musical más desarrolladas, se han realizado algunos trabajos con resultados satisfactorios. La parte interesante está en que hay diferentes formas y algoritmos para obtener un sistema. Podría decirse que el problema se puede abordar de diferentes maneras en cuanto a la base de datos, en cuanto a la extracción de características que definan a cada instrumento (sobre todo, basados en frecuencias o en evolución temporal), en cuanto a los algoritmos de clasificación utilizados, en cuanto a cómo utilizar estos algoritmos sobre un archivo de audio, y en cuanto al establecimiento de distancias para determinar que se trata de un cierto instrumento. Además, la mayoría de este tipo de investigaciones tratan de discernir entre algunos de los instrumentos que forman parte de una orquesta, siendo mi objetivo centrarme más en discernir entre instrumentos que usaría una banda musical en directo. Es por esto, que lo que trataré de hacer en mi trabajo es abordar dicho problema de reconocimiento de una manera en concreto para comprobar si es una forma correcta y posible de diferenciar instrumentos musicales, y si aporta resultados que mejoren los resultados obtenidos previamente por otros investigadores, a pesar de que esto puede resultar engañoso y viciado, debido a la variedad y el diferente grado de

similitud de instrumentos que estos sistemas pueden reconocer. Comentaré ahora brevemente los trabajos de otros investigadores que más útiles me han resultado para el desarrollo de mi sistema:

- Antti Eronen y Anssi Klapuri, con “MUSICAL INSTRUMENT RECOGNITION USING CEPSTRAL COEFFICIENTS AND TEMPORAL FEATURES” [3]: los autores se basaron en identificación de instrumentos musicales orquestales. Obtuvieron una tasa de reconocimiento del 80 %, que se puede considerar aceptable y además mejora resultados de investigaciones anteriores, pero es bastante baja comparándola con el caso ideal del 100 %. Para extraer las características, extrajeron ambos tipos, frecuenciales y temporales, con la esperanza de que las temporales (que son las utilizadas con menor frecuencia) les ofrecieran un aumento en la tasa de acierto. En cuanto al algoritmo de clasificación, utilizaron un algoritmo k-nearest neighbors.
- Antti Eronen, en su tesis “AUTOMATIC MUSICAL INSTRUMENT RECOGNITION” [4]: el autor de la tesis realiza un sistema capaz de reconocer muchos instrumentos musicales aunque con una tasa de acierto muy baja. Hay que tener en cuenta que el artículo es del 2001. También realiza un estudio sobre los algoritmos de clasificación más exitosos (encabezados por las Redes Neuronales, aunque también destaca que son los más costosos de entrenar), y un estudio entre el reconocimiento de instrumentos realizado por la máquina y el realizado por un humano, que arroja unos datos muy concluyentes: la tasa de acierto de un humano para estas tareas es muchísimo mayor que la de la máquina. Estos datos invitan a pensar que la tarea de reconocimiento de instrumentos es una tarea muy compleja que lo humanos podemos desarrollar perfectamente debido a nuestro complejo sistema nervioso, pero en un sistema artificial la cosa se complica.
- Slim Essid, Gaël Richard, y Bertrand David, con “Efficient musical instrument recognition on solo performance music using basic features” [2]: los autores del artículo diseñan un sistema de reconocimiento de instrumentos musicales basado en máquinas de soporte vectorial, que es un enfoque reciente y en fases de experimentación y crecimiento.
- Christian Schörkhuber, Anssi Klapuri, Nicki Holighaus, y Monika Dörfler, con “A Matlab Toolbox for Efficient Perfect Reconstruction Time-Frequency Transforms with Log-Frequency Resolution” [1]: aunque este sea un Proyecto orientado al paso de un fichero musical a parámetros y su posterior reconstrucción (función inversa) con la menor pérdida posible, he utilizado el enfoque aquí planteado para obtener las características de los sonidos de mi base de datos. Al ser una idea importante en el desarrollo de mi trabajo, explicaré en el apartado 8 en qué se basa este criterio y sus principales características y parámetros.

La mayoría de los artículos de reconocimiento de instrumentos musicales en solitario tratan de clasificar dos cosas: la familia a la que pertenece el instrumento que se pretende reconocer, y el propio instrumento. En nuestro caso, se ha utilizado una jerarquía de Redes Neuronales similares, pero no con este objetivo, ya que no nos interesa el reconocimiento de la familia del instrumento,

sino el reconocimiento del instrumento en sí mismo. Consideramos que es lo más importante en un caso práctico, y que la relación instrumento-familia a la que pertenece puede ser obtenida a posteriori y de una manera inmediata si fuera necesaria.

4. Métodos

4.1 Transformada por Constante Q

Forma parte de varios proyectos de investigación previos [5] [1]. En nuestro trabajo, es de importante relevancia en el proceso de extracción de datos. Es una transformación derivada de la transformada de Fourier, y al igual que ella se compone de un banco de filtros. La diferencia con la transformada de Fourier original es que las frecuencias de la transformada por constante Q se encuentran separadas geoméricamente. De esta forma, se puede establecer un número de frecuencias por escala.

Los dos parámetros más importantes de esta transformada son f_0 y b . f_0 denota la frecuencia inicial o mínima, y b es el número de divisiones por octava musical que se realizará a partir de f_0 . Por esto, con un valor de f_0 correspondiente a una nota musical y un valor b de 12, se pueden obtener las frecuencias de las notas musicales en un rango de escalas que vendría determinado por f_{max} , otro parámetro que regularía la frecuencia máxima. Como ya se ha dicho, el interés de esta metodología reside en que se pueden obtener de manera instantánea las frecuencias de las notas musicales, por lo que resulta muy útil para propósitos de extracción de datos de música.

Otra característica de la transformada por constante Q es que se asemeja al sistema auditivo humano, en el sentido de que incrementaría la resolución cuanto más agudas fueran las frecuencias.

Se han extraído para cada registro y mediante una toolbox de Matlab que implementaba este método, energías frecuenciales correspondientes a las notas del rango audible del ser humano (20Hz- 20.000Hz). Esto resulta en un total de 115 notas de hasta 10 octavas.

4.2 Redes Neuronales Artificiales y Perceptrones Multicapa

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) en general, son modelos que intentan reproducir y simular el comportamiento del cerebro y su sistema nervioso de los seres vivos para tratar de hacer uso de la capacidad de aprendizaje que poseen estos modelos biológicos, y de su capacidad para generalizar en nuevas situaciones [7]. Estos modelos pueden ser entrenados con datos de una manera similar a como se haría en un proceso natural. Como para este entrenamiento solo se introducen los datos y el sistema se entrena de manera automática sin necesidad de intervenciones externas, son denominados modelos de caja negra.

Una Red Neuronal Artificial está formada por varias neuronas artificiales, dispuestas en capas. Estas neuronas pueden tener diferentes funciones de activación. Las principales son: escalón, lineal, gaussiana, umbral, y sigmoidal o

logística, que es la que ha sido empleada en todas las Redes Neuronales de este trabajo, ya que penaliza los resultados negativos y premia los positivos.

El perceptrón multicapa, o MLP, es un tipo de Red Neuronal Artificial, y ha sido el utilizado en todas las redes del sistema. La característica de este modelo es que está formado por varias capas, lo que le proporciona la capacidad de clasificar problemas que no son linealmente separables.

Para cada Red Neuronal, ha sido necesario un número homogéneo de registros para cada clase objetivo. La proporción de registros de prueba-generalización-entrenamiento ha sido variable para cada Red Neuronal en función a las necesidades y recursos disponibles. Además, la estrategia de entrenamiento empleada para cada una de ellas ha sido "Conjugate Gradient".

4.3 Umbrales de Reconocimiento de Cada Ventana

Hemos decidido que el establecer umbrales que pudieran decidir si interesa aplicar el algoritmo de clasificación en cada ventana de un sonido antes de realizarlo podría mejorar los resultados. Si no interesase, se intentaría con la siguiente ventana a procesar. El motivo es que se han utilizado para el entrenamiento de las Redes Neuronales algunos registros extraídos de ventanas con el sonido a punto de apagarse, o con intensidad baja. Entonces, el sistema, al intentar clasificar nuevas ventanas que tuvieran una energía frecuencial prácticamente nula (es decir, silencio, ventanas que no aportan información válida), las intentaba clasificar como un instrumento. Normalmente obtenía resultados de flauta, violín y saxo. La idea entonces es filtrar estas ventanas que no aportan información, ya que no interesan en nuestro sistema porque pueden viciar los datos.

Se han establecido por tanto dos filtros por cada ventana que se intentase reconocer. Este sistema se basa en las energías frecuenciales medias contenidas en cada ventana, como veremos a continuación. El primero de los filtros anteriormente mencionados consiste en solo comprobar las ventanas cuya energía media frecuencial de los 115 valores que contiene es mayor al valor umbral de 0.00035. Dicho valor ha sido obtenido realizando distintas pruebas y observando en qué valor se realizaba el proceso de clasificación de instrumentos de manera innecesaria. El segundo de los filtros se calcula realizando un barrido de todas las ventanas del fichero de audio que se sometería al reconocimiento, almacenando un sumatorio con los valores, y posteriormente calculando la energía frecuencial media de las ventanas. El filtro consistiría en que solo serían evaluados para su clasificación las ventanas que tengan una energía frecuencial mayor al 42% de la energía media de todas las ventanas calculada anteriormente. Las ventanas que superen estos dos filtros a la vez serán las que se evalúen para intentar clasificar el instrumento.

4.4 Enfoques Utilizados en Cada Parte del Proceso

A lo largo del desarrollo del sistema ha sido necesaria la toma de varias decisiones para la obtención de la versión actual. Estas decisiones y otros puntos

que caracterizan al sistema que hemos desarrollado y tienen un impacto en él lo diferenciarían de otros sistemas creados previamente:

- **Juego de ensayo:** la totalidad de ficheros de audio de mi juego de ensayo ha sido obtenida de bases de datos gratuitas de internet. Con estos ficheros han sido entrenadas todas las Redes Neuronales Artificiales de mi sistema, por lo que el juego de ensayo utilizado es algo que tiene un fuerte impacto en el resultado final.
- **Características que definen a un instrumento:** en mi caso he decidido utilizar la transformada por constante Q , que, como ya he explicado anteriormente en Sec. 8, es una derivación de una transformada de Fourier que contempla las frecuencias de cada nota musical (12 notas de la escala cromática) en distintas octavas.
- **Extracción de características frecuenciales:** he extraído a mano las ventanas que he considerado que más caracterizaban a cada sonido de cada instrumento de la base de datos de la que dispongo. También ha sido de utilidad escoger ventanas de sonidos de instrumentos a punto de apagarse para poder entrenar a las Redes Neuronales para su reconocimiento en estas circunstancias.
- **Algoritmo de clasificación:** sobra decir que hay muchos tipos de algoritmos de clasificación. En este caso, el seleccionado ha sido el algoritmo de Redes Neuronales Perceptrón Multicapa. Tanto el resultado como el procedimiento y el tiempo empleado en él, habrían variado de elegir otras opciones a las nombradas en la Sec. 8.
- **Estructura de redes:** he utilizado un diseño en cascada de Redes Neuronales para el proceso de clasificación, como el que se puede ver en la Fig. 1. La principal ventaja de este diseño es que se reparte la carga entre varias Redes Neuronales.

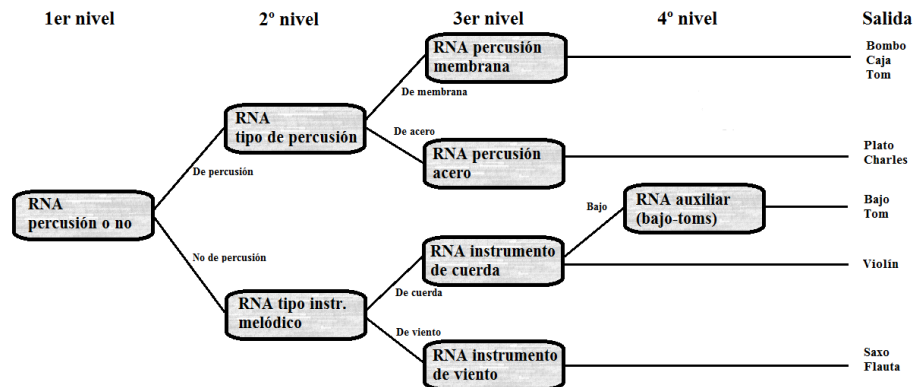


Figura 1: Diseño en cascada del sistema

Cabe destacar la Red Neuronal Auxiliar, que distingue entre bajo y toms. Su creación fue necesaria ya que en muchas ocasiones la Red Neuronal Artificial del primer nivel, que distingue entre instrumentos de percusión o instrumentos melódicos, clasificaba a los toms como instrumentos melódicos erróneamente. Traté de mejorar estas Redes Neuronales en particular, pero no pude obtener mejores resultados. Esto seguramente fuera debido a la gran variedad de componentes frecuenciales obtenidas en los registros extraídos de los toms, que presentaban espectrogramas muy variados.

- Proceso de reconocimiento: he resuelto que, teniendo un fichero de audio, el proceso de reconocimiento se realice aplicando el algoritmo de clasificación previamente entrenado en una de cada 20 ventanas de dicho fichero (en caso, por supuesto, de que la ventana interesase habiendo superado los filtros y los umbrales de sonido explicados en el apartado 8). Cada iteración de las realizadas incrementa un contador con el tipo de instrumento que se haya identificado. Al realizar el barrido por todas las ventanas seleccionadas de un fichero de audio, se comparan los contadores resultantes, y el sistema da como válido el instrumento cuyo contador asociado superase en al menos un 25% a cualquier otro. Si no hubiera un contador que cumpliera esta condición, el sistema considera que no se ha obtenido la suficiente certeza de que es un instrumento en concreto, y la salida que propone sería la de "Indeterminado".
- Elección de filtros de umbral para evaluar la aplicación del algoritmo: para realizar correctamente el reconocimiento instrumental, ha sido necesario establecer filtros que evalúen la conveniencia de aplicar el proceso de clasificación sobre una ventana del sonido o no, como se explicó en el punto 8. Se ha comprobado que el establecimiento de unos buenos filtros para evaluación de ventanas tiene un impacto muy fuerte en los resultados del sistema final, siendo este un punto crítico, por lo que en el futuro resultaría muy interesante realizar estudios que mejorasen estos filtros de umbral para intentar maximizar la tasa de acierto sin siquiera modificar los algoritmos de clasificación.

Real/Pred	BOMBO	CAJA	TOMS	PLATOS	CHARLES	BAJO	VIOLÍN	SAXO	FLAUTA	INDETERM
BOMBO	80.25 %	3.7 %	2.46 %	0 %	0 %	3.7 %	0 %	0 %	0 %	9.87 %
CAJA	0 %	81.63 %	0 %	0 %	5.10 %	0 %	0 %	2.04 %	0 %	11.22 %
TOMS	0 %	2.63 %	76.31 %	0 %	0 %	2.63 %	7.89 %	2.63 %	0 %	7.89 %
PLATOS	0 %	0 %	0 %	81.25 %	3.12 %	0 %	0 %	6.25 %	0 %	9.37 %
CHARLES	0 %	0 %	0 %	11.91 %	85.58 %	0 %	0 %	0 %	0 %	2.5 %
BAJO	3.03 %	0 %	0 %	0 %	0 %	87.87 %	0 %	0 %	0 %	9.09 %
VIOLÍN	0 %	0 %	0 %	4.05 %	0 %	0 %	55.4 %	2.7 %	16.21 %	21.62 %
SAXO	0 %	4 %	2 %	0 %	0 %	0 %	2 %	76 %	4 %	12 %
FLAUTA	0 %	0 %	0 %	1.75 %	0 %	0 %	3.5 %	3.5 %	63.16 %	28.07 %

Tabla 1: Matriz de confusión del sistema

5. Resultados

A continuación se mostrará un cuadro con los resultados obtenidos en porcentajes en forma de matriz de confusión, con las pruebas del sistema realizadas sobre los ficheros de audio del juego de ensayo:

Las filas de la Tabla 1 indicarían los valores reales, y cada columna los valores predichos. La matriz identidad sería el porcentaje de aciertos para cada tipo de instrumento, y la columna indeterminación sería el porcentaje de veces que el sistema ha sido incapaz de predecir el instrumento.

Los colores están marcados según el grado de acierto o fallo. El verde indica los aciertos, el rojo los fallos, y el naranja las indeterminaciones, que son indecisiones del sistema a la hora de actuar. Se ha preferido aumentar el número de indeterminaciones en detrimento del número de fallos, ya que las indeterminaciones se producen cuando el sistema podría predecir un instrumento pero sin demasiada seguridad.

Dado el uso que se le podría dar al sistema, y asumiendo que se produciría en el directo de un grupo musical, obteniendo los datos de forma continuada desde la mesa de mezclas, las indeterminaciones no son preocupantes: si un instrumento no ha sido predicho en un momento, es posible que sea predicho más adelante, pero en caso de no poder predecirse con cierto grado de seguridad es preferible no efectuar ninguna ecualización ni ningún cambio de parámetro a hacerlo de forma equivocada.

La media de aciertos sería por tanto de 76'4%. Resulta un poco absurdo comparar estos datos con los de otro sistema desarrollado con anterioridad, ya que cada autor puede penalizar/incrementar ciertos resultados y cada sistema puede reconocer diferente cantidad de instrumentos y de diferente naturaleza. Aun así, el porcentaje de aciertos es bastante bueno y similar al de otro tipo de proyectos en la misma línea pero con distintas técnicas utilizadas. Además, hay que tener en cuenta que se ha preferido obtener indeterminaciones a elevar el número de aciertos y fallos sin tener el sistema datos suficientemente relevantes. Si eliminásemos las indeterminaciones el porcentaje de acierto subiría, pero el comportamiento del sistema decaería en casos reales. De cualquier manera, los resultados obtenidos son satisfactorios, pudiendo mejorarse aún más modificando algunos enfoques (como la mejora de las energías frecuenciales umbral para cada ventana), y mediante la adición de otras Redes Neuronales Artificiales auxiliares entrenadas con un juego de ensayo mayor que mejorasen la capacidad de reconocimiento del violín, confundido a menudo en el sistema actual con la flauta.

6. Conclusiones

Antes de plantearnos este proyecto, sabíamos que el timbre de un instrumento venía caracterizado por una serie armónica particular. Esto es una de las cosas que nos motivaron a llevar a cabo este trabajo, ya que parecía evidente que se podrían alcanzar resultados muy buenos en la tarea de reconocimiento

automático de instrumentos con cualquier algoritmo de clasificación. Pronto nos dimos cuenta de que no iba a ser tan sencillo, ya que esas series armónicas, en ocasiones, no estaban tan bien definidas como podría pensarse, dependiendo de una gran cantidad de factores. Observando otros trabajos previos empleando otros enfoques, vimos que las tasas asumibles de acierto en el reconocimiento se movían en rangos más bajos de los que esperábamos a priori. De hecho, hay estudios [4] que demuestran que el rendimiento de una máquina al reconocer instrumentos musicales es muy inferior al de un humano, siendo el rendimiento de los humanos en estas tareas muy cercano al 100 %.

Por tanto, la serie armónica de un instrumento siendo tocado en una determinada nota, no es tan fácil de diferenciar de la serie armónica de otro instrumento distinto. En el estándar MIDI, la síntesis de la serie armónica en la simulación de distintos instrumentos es generada mediante tonos puros, sin ruido. Podría decirse que esta era la idea en la que se basaba mi trabajo: el reconocimiento automático de un fichero MIDI sería algo trivial debido a la naturaleza de su síntesis, debiendo ser algo similar en un caso real con algo más de dificultad debido a posible ruido. Sin embargo, en los casos reales se producía mucho más ruido del esperado, las series armónicas no están para nada perfectamente definidas como en MIDI, y existe una gran cantidad de formas, intensidades, técnicas y tipos de pulsaciones a la hora de tocar un instrumento. Es por esto que, por ejemplo, un violín sintético nos suena al oído humano más artificial que un violín real, y es muy probable que pudiéramos diferenciar el uno del otro.

Echando un vistazo a los resultados obtenidos en este trabajo y a los obtenidos en otros trabajos anteriores de la misma índole, se puede concluir que el rendimiento del sistema es bastante bueno, a pesar de las dificultades. Se reconoce cada instrumento con un porcentaje de acierto bastante elevado, siendo además, por lo general, los porcentajes de error bajos. Esto quiere decir que los enfoques utilizados, principalmente en el módulo extractor de características y en el módulo de clasificador mediante redes neuronales artificiales, son perfectamente válidos y eficientes para desempeñar estas tareas de reconocimiento.

Estos resultados satisfactorios no indican que el sistema se encuentre en su rendimiento óptimo, ya que se podría seguir mejorando mediante el estudio, análisis y variación de los enfoques que he comentado previamente en el punto 8. Lo que sí indican es que el conjunto de estos enfoques constituye un paradigma válido entre otros muchos para afrontar el problema del reconocimiento automático, concretamente el de instrumentos musicales.

Referencias

1. Schörkhuber, C., Klapuri, A., Holighaus N., Dörfler M.: A Matlab Toolbox for Efficient Perfect Reconstruction Time-Frequency Transforms with Log-Frequency Resolution. AES 53rd international conference, London, UK. (2014)
2. Essid, S., Richard, G., David, B.: Efficient musical instrument recognition on solo performance music using basic features. AES 25th international conference, London, UK. (2004)
3. Eronen, A., Klapuri, A.: Musical instrument recognition using cepstral coefficients and temporal features. IEEE International Conference - Volume 02. (2000)
4. Eronen, A.: Automatic musical instrument recognition. 2001
5. Blankertz, B.: The Constant Q Transform.
6. Quintanilla, M.: Timbre de un instrumento y timbre de un sonido. <http://cpms-acusticamusical.blogspot.com.es/> (2015)
7. Daza, S. P.: Redes neuronales artificiales Fundamentos, modelos y aplicaciones. <http://www.monografias.com/> (2015)

Sistema para la predicción del estado de los electrodos en líneas eléctricas

Adolfo Barroso Gallego , Juan Manuel Corchado y Fernando de la Prieta
Pintado

Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca. Plaza de los
Caídos s/n. 37008, Salamanca, España
{adolfbg, corchado, fer}

Resumen El mantenimiento de líneas eléctricas es un proceso con un gran impacto económico. Las propuestas existentes en el estado del arte no se centran en la optimización del coste económico de estas tareas. Con el objetivo de avanzar en el mantenimiento eficiente de este tipo de instalación industrial, en el presente trabajo se introduce un sistema multiagente organizativo que hace uso de la inteligencia de enjambre y algoritmos predictivos para lograr una optimización del proceso.

Keywords: sistema predictivo, mantenimiento, apoyo eléctrico, líneas eléctricas, delaunay, sistemas multiagente, swarm intelligence.

1. Introducción y motivación

Hoy en día, la demanda de energía sigue una tendencia creciente a medida que aumenta la población mundial y el uso de nuevas tecnologías dependientes de electricidad, suponiendo un verdadero reto en países emergentes, carentes de infraestructura. Además, también sucede lo mismo en naciones desarrolladas, las cuáles deben renovar sus instalaciones para mantener una tasa de servicio activa lo más alta posible.

Para lograr un sistema robusto de generación y distribución de energía eléctrica es necesario llevar a cabo revisiones periódicas en cada uno de los elementos constituyentes de la red eléctrica. Dichas revisiones periódicas están impuestas por la normativa de cada país, especificando los procesos que deben seguirse y los valores umbrales permitidos para cada magnitud observable, y tienen como objetivo asegurar el bienestar del componente y de las personas que puedan encontrarse en su entorno cercano.

Dentro de los elementos constituyentes en la red eléctrica, los apoyos desempeñan un papel relevante dentro del transporte de energía eléctrica. Dichos apoyos, también denominados torres eléctricas, son estructuras, normalmente en celosía de acero, de gran altura que proporcionan soporte a los conductores eléctricos que transportan la electricidad a través de largas distancias.

Un fallo en un apoyo puede causar la interrupción en el servicio durante horas, hasta que los técnicos especializados se desplacen a la ubicación de la

torre eléctrica y arreglen la avería. La naturaleza de los fallos es de distinta índole, pudiendo ser provocados por tormentas eléctricas, corrosión, caídas o acumulación de hielo. En particular, cuando un rayo impacta sobre uno de estas estructuras metálicas es necesario que la corriente se derive a tierra de forma efectiva. De otro modo, la sobrecarga dañaría la estructura, provocando una parada del suministro e incluso incendios, si la zona no está bien acondicionada.

Para lograr una correcta derivación a tierra se instalan una serie de electrodos enterrados o semienterrados, los cuales son conductores que permanecen en contacto directo con el terreno y cumplen funciones como (i) la derivación a tierra de cargas descargas eléctricas atmosféricas o (ii) limitar las tensiones de paso y contacto en las inmediaciones del apoyo. La derivación a tierra depende de las tensiones de paso y contacto, que son dos magnitudes difíciles de medir en comparación con otras como puede ser la resistencia de puesta a tierra, siendo conveniente encontrar un método que relacionara las tres magnitudes, permitiendo medir únicamente la resistencia de puesta a tierra. Con este objetivo, se ha trabajado en este trabajo de Tesis de Máster, en el marco del proyecto de investigación *Tablón*, número de referencia IDI-20140885, financiado por el Centro de Desarrollo Tecnológico e Industrial.

Con el objetivo de combatir los métodos clásicos que están basados en robótica para el mantenimiento de infraestructuras eléctricas, en esta Tesis de Máster se aborda el problema desde una perspectiva diferente, basada en la predicción de estos valores utilizando técnicas de inteligencia artificial como son las redes neuronales y otros métodos estadísticos; los cuales se integran gracias al uso de un Sistema Multiagente (SMA) basado en Organizaciones Virtuales (OV) que le proporciona otras características como son el dinamismo y la auto-adaptación, lo que ha permitido modelar los algoritmos a través de técnicas de Inteligencia de Enjambre (IE). Así, en este proyecto, la primera fase se centra en la predicción de la resistencia de puesta a tierra de un apoyo en función de las condiciones ambientales, la configuración del apoyo y otros factores.

En el apartado 2 se presentan algunas propuestas relativas al estado del arte teniendo en cuenta distintas áreas de conocimiento. El apartado 3 define la arquitectura del sistema propuesto así como los algoritmos que forman parte de él. El apartado 4 resume la aplicación del sistema propuesto en dos casos de estudio, y finalmente, en el apartado 5 se recogen las conclusiones de este trabajo y las posibles líneas futuras de investigación.

2. Estado del arte

En esta sección se lleva a cabo una revisión del estado del arte desde donde se incluye mantenimiento industrial aplicado a líneas eléctricas, teoría de agentes, y otras tecnologías complementarias que se han utilizado en el marco de este Trabajo de Fin de Máster.

2.1 Mantenimiento industrial

El mantenimiento industrial se puede definir como los distintos tipos de mantenimiento aplicadas a la conservación de líneas eléctricas. Según el Diccionario de la lengua española, de la Real Academia Española, la palabra “mantenimiento” en su segunda definición es el “*conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que instalaciones, edificios, industrias, etc., puedan seguir funcionando adecuadamente*”. Si bien en este trabajo se habla de mantenimiento, también se aplican técnicas de la denominada **ingeniería del mantenimiento**. Este último término se define en [1] como “*la función del personal especializado cuya responsabilidad es asegurar que las técnicas del mantenimiento son efectivas, el equipo se diseña y modifica para ser más sostenible, se investigan los problemas técnicos de los mantenimientos en curso y se aplican acciones correctivas apropiadas*”.

A continuación se presentan los distintos tipos de mantenimiento, que serán detallados en profundidad en las secciones siguientes. Estos tipos son los siguientes [2]:

- **Mantenimiento correctivo.** Consiste en arreglar los fallos existentes para que el sistema vuelva a funcionar correctamente. A su vez se puede dividir en dos nuevos tipos:
 - Mantenimiento correctivo no planificado. La incidencia se resuelve de forma aleatoria, sin necesidad de intervención.
 - Mantenimiento correctivo planificado. El fallo se corrige de forma intencionada, ya que ha sido detectado gracias al mantenimiento predictivo y/o preventivo. Estas técnicas aseguran una disminución en los costes y duración de la reparación.
- **Mantenimiento preventivo.** Trata de reducir los fallos del equipo buscando soluciones a los problemas antes de que ocurran. Así pues, se evitan los mantenimientos correctivos no planificados. Este tipo de mantenimiento conlleva mayor fiabilidad y ahorro económico, sin embargo, no garantiza que no se produzcan fallos en el futuro. En este sentido, el estado del arte presenta trabajos que planifican cuando será necesario el mantenimiento a medio y largo plazo a través de modelos, principalmente, matemáticos [3] [4] [5].
- **Mantenimiento predictivo.** Surge como un complemento a los mantenimientos correctivo y preventivo. Monitoriza una serie de parámetros para que después se analicen y se determinen posibles anomalías. El mantenimiento predictivo es el más atractivo desde el punto de vista de la informática y de las matemáticas, ya que no trabaja con los elementos constituyentes sino con los valores o el estado de éstos. Fundamentalmente se centra en predecir la acumulación de hielo [6] y su eliminación [7]. Así mismo estudio la degradación de infraestructuras como los transformadores eléctricos [8] [9]. Finalmente, también se han encontrado trabajos en el estado del arte que analizan gases [10].
- **Mantenimiento proactivo.** Es una estrategia de mantenimiento preventivo que sirve para estabilizar la fiabilidad de la maquinaria o el equipo.

Este tipo de mantenimiento utiliza mantenimiento preventivo y predictivo. En este tipo de mantenimiento se distinguen el mantenimiento perfecto e imperfecto en función de como sea el resultado de las tareas de mejora y el coste de las mismas [11]. Los trabajos encontrados, tratan de modelar el impacto de cada uno de los dos tipos de mantenimiento de forma teórica, en función de la vida útil residual y la generación de un modelo de fallos [11].

2.2 Teoría de agentes

En el campo de la Inteligencia Artificial (IA), la teoría de agentes es una línea de investigación que lleva estudiándose durante décadas. Originalmente el concepto es definido por Russel y Norvig en [12], aunque con el tiempo la definición se ha refinado, destacando la propuesta por Wooldridge en [13]: *Un agente es un sistema informático que se encuentra en un ambiente, y que es capaz de realizar acciones autónomas en dicho ambiente para alcanzar sus objetivos de diseño.*

Por otro lado, los agentes se clasifican según varios principios y criterios definidos por diferentes autores [12], [14], [15],[13]. De entre todas las citadas, la propuesta de Wooldridge [13] basada en la arquitectura interna del agente, es la más interesante, porque enuncia la arquitectura deliberativa donde los agentes poseen capacidades de razonamiento avanzadas. El máximo exponente de este tipo de arquitectura es el modelo BDI (*Belief-Desire-Intention*) [16] en el cual los agentes poseen (i) creencias, proposiciones que el agente considera como ciertas; (ii) deseos, metas u objetivos, propiedades que el agente desea cumplir o hacer verdaderas; y (iii) intenciones, acciones planificadas que tienen como fin alcanzar un estado deseado.

Por tanto, un agente software cuya arquitectura interna sea de tipo BDI, debe ser considerado, al igual que los agentes humanos, como entes sociales, ya que tienen la capacidad para observar el entorno, hacer una representación interna del mismo, generar diferentes comportamientos y seleccionar aquel que resulta más adecuado a sus objetivos internos.

En sentido, cuando dos o más agentes trabajan de forma conjunta para resolver un objetivo se habla de **sistemas multiagente** SMA [17]. Los SMA poseen propiedades [18] como previsibilidad, seguridad, adaptabilidad, comunicación, tolerancia a fallos, modularidad y agregación.

La inteligencia de enjambre (IE) es un paradigma para la resolución de problemas distribuidos complejos, que tiene su origen en la biología, donde ciertos animales (hormigas, aves, abejas y peces, entre otros) demuestran un comportamiento inteligente cuando trabajan en grupo, que de otro modo no podrían alcanzar individualmente [19].

Parunak et al. [20] proponen un modelo basado en agentes alternativo, basado en IE. En él, existen dos tipos principales de agentes: **Heavyweight Agents**, que realizan tareas complejas y de interacción con el usuario, capaces de cumplir estándares de comunicación como FIPA; y **Lightweight Agents**, agentes simples que usan sensores y actuadores para comunicarse. De entre todas la

implementaciones se destaca *swarm as subroutine* donde los *lightweight agents* realizan tareas especializadas para ayudar a los *heavyweight agents*.

3. Sistema propuesto

El sistema propuesto nace tras realizar un análisis exhaustivo de la información disponible proporcionada en el marco del proyecto Tablón. En este análisis se trato de calcular la resistencia de puesta a tierra de un apoyo mediante RNA, sin que se obtuvieran resultados concluyentes. Sin embargo, sirvió para conocer la información y definir el concepto de apoyo.

Así, se puede definir un apoyo o torre eléctrica como una estructura, generalmente de acero, que sirve de soporte para los conductores eléctricos aéreos, empleados en el transporte de la energía eléctrica. Desde el punto de vista de esta investigación, un apoyo posee: (i) una configuración, que define el modelo, la localización y otros aspectos estáticos; (ii) un estado, que agrupará un conjunto de magnitudes eléctricas observables y podrá ser redefinido según sea necesario; y (iii) un histórico de revisiones, donde se almacenarán todos los estados que no correspondan al estado actual.



Figura 1: Fotografía donde se pueden ver distintos apoyos o torres eléctricas.

Para lograr el objetivo de optimizar el mantenimiento de líneas eléctricas, se modela un SMA abierto, basado en organizaciones, que incluye algoritmos de IE. Este SMA se diseña formalmente siguiendo la metodología GORMAS [21]. En primer lugar, a continuación, se identifican los roles que interactuarán con el sistema, sus motivaciones y expectativas:

- **Usuario:** Representa al usuario potencial del sistema, que utilizará las herramientas proporcionadas para lograr un mantenimiento óptimo de las líneas eléctricas. Es el encargado de solicitar al sistema la reducción el tamaño de la muestra y la generación de predicciones acerca del estado de los apoyos.

- **Proveedor:** Este agente se encarga de proporcionar datos al sistema acerca de nuevas mediciones. Este rol, puede estar representado por agentes reales (medidas tomadas por operarios), o por agentes virtuales (estimaciones realizadas por el propio sistema).
- **Apoyo:** El agente Apoyo es una representación virtual de un apoyo real. Contendrá información relativa a la configuración del apoyo, estado, posicionamiento, histórico de revisiones, etc.
- **Predicción:** Este agente representa la capacidad de predicción del estado de un apoyo del sistema. Debe contar con acceso al repositorio de apoyos, para poder incorporar información extra en la estimación
- **Reducción:** Reduce el tamaño de una muestra para economizar el proceso de revisión.

En base a estos roles, siguiendo la metodología, se presenta en la 2 la Vista Funcional del sistema, que incluye las misiones, objetivos y servicios que se proporcionan

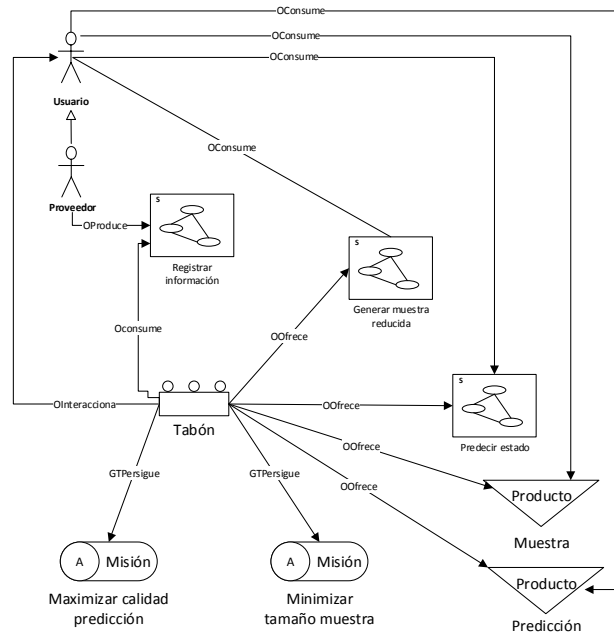


Figura 2: Diagrama de vista funcional (misión) del modelo de organización para el sistema propuesto.

A partir de la Vista Funcional, es posible obtener los servicios refinados que se ofertan, incluyendo las actividades que lo conforman, mediante un diagrama de bloques en el que se especifica la entrada y salida para cada una de las mismas. Así, en primer lugar, en la Figura 3, se presenta desde un punto de vista de

alto nivel el algoritmo que permite la Generación de la Muestra Reducida, el cual es capaz de determinar el subconjunto de apoyos que son necesarios medir (realmente), con respecto al numero total de apoyos de una línea.

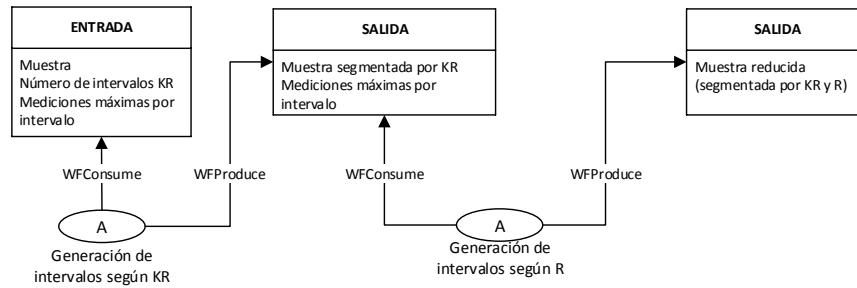


Figura 3: Modelo de actividad (Perfil) del servicio *Generar muestra reducida*.

Del mismo modo, en la figura 4 se presenta, también desde alto nivel, el algoritmo que permite estimar los valores de los apoyos a partir del uso de métodos predictivos e Inteligencia de Enjambre.

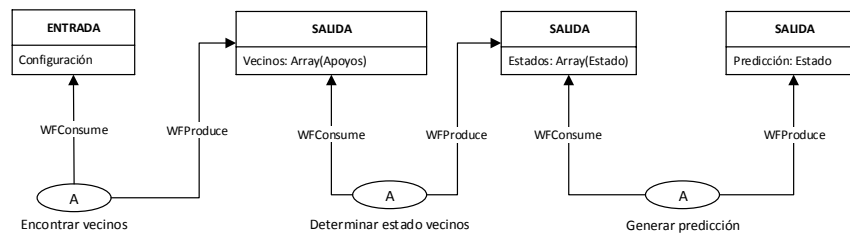


Figura 4: Modelo de actividad (Perfil) del servicio *Predecir estado*.

4. Caso de estudio para la predicción y reducción

Con el objetivo de validar la arquitectura propuesta y los algoritmos desarrollados, se han desarrollado dos casos de estudio, uno centrado en la reducción de la muestra y otro en la predicción de los apoyos. En cada uno de ellos se han realizado diferentes experimentos, con diferentes conjuntos de datos, que han permitido validar la arquitectura y los algoritmos propuestos. Así pues, en los siguientes apartados se presentan cada uno de estos casos de estudio.

4.1 Predicción del estado de un apoyo

Se utiliza como muestra inicial el conjunto de información sobre el cual se ha podido calcular los valores de las variables K_R y *Resistividad*, el cual tiene un tamaño de 24181 instancias. El objetivo consisten en calcular la resistencia de puesta a tierra (*VMEDIDO*) de un apoyo en función de sus vecinos, la cual debe estar contenida en el intervalo [2, 2394].

Para ello, en primer lugar, en la primera fase del algoritmo se calcula la malla de apoyos mediante una triangulación de Delaunay (figura 5), que permite enlazar todos los apoyos de forma que es posible calcular los vecinos mas cercanos de un determinado apoyo.

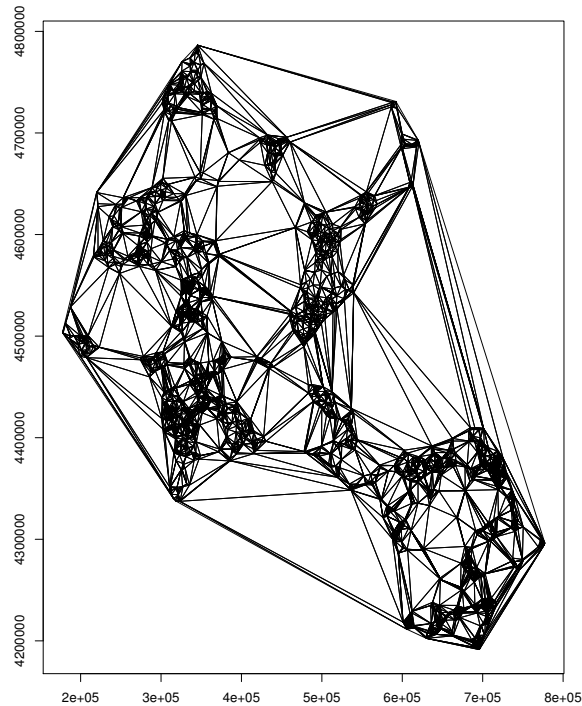


Figura 5: Triangulación de Delaunay generada a partir de la información contenida en la muestra.

A partir de este calculo inicial, en la segunda fase es cuando se puede restringir el espacio de búsqueda, especificando la distancia máxima respecto al apoyo sobre el que se está generando la predicción. Después, mediante técnicas de IE como *swarm as a subroutine*, los *lightweight agents Apoyo* proporcionan

la información necesaria para el cálculo de la predicción en el *heavyweight agent*, que es el que implementa este algoritmo.

Los resultados de este proceso, en términos de precisión del algoritmo se presenta en la tabla 1, la cual ofrece una comparativa del rendimiento según se limite el cálculo de los vecinos dentro de una distancia máxima permitida.

Tipo de restricción	EAM
Ninguna	28.33617
Vecinos restringidos en un radio de 50 km	28.29404
Vecinos restringidos en un radio de 5 km	27.57119
Vecinos restringidos en un radio de 1 km	23.69374

Tabla 1: precisión del algoritmo de predicción.

4.2 Reducción del tamaño de la muestra

Se utiliza como muestra inicial el conjunto de información sobre el cual se ha podido calcular los valores de las variables del Coeficiente de Resistencia (K_R) y la *Resistividad*, el cual tiene un tamaño de 24181 instancias. En la figura 6 se puede observar la distribución de frecuencias de la variable K_R , distinguiéndose claramente tres grupos diferenciados, cuyos valores son: (i) $K_R \in [0,0890, 0,1550]$, (ii) $K_R \in [0,4910, 0,4991]$ y (iii) $K_R = 0,6$.

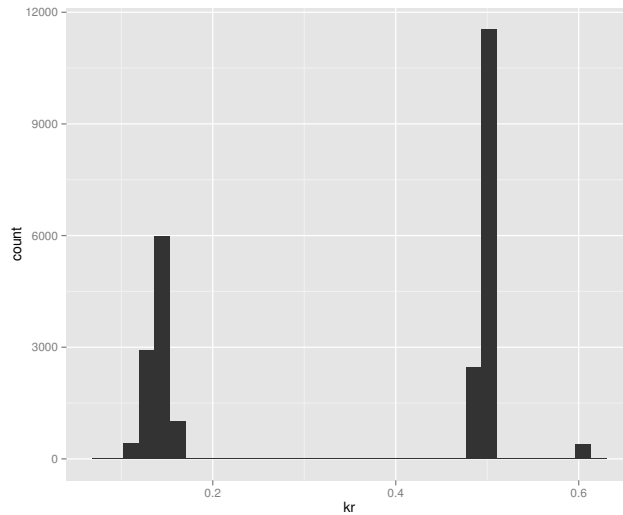


Figura 6: Distribución de frecuencias en la muestra utilizada para verificar el algoritmo de reducción.

Tras aplicar una iteración del algoritmo, en la tabla 2 se muestran los tamaños de muestra para cada grupo y sublista, denotando los percentiles de forma genérica. En esta tabla, se marcan también en negrita aquellos valores que son demasiado elevados, y que se desean reducir a través de sucesivas invocaciones del algoritmo.

Percentil	Grupo K_R 1	Grupo K_R 2	Grupo K_R 3
0 - 10	295	99	84
10 - 20	20	18	9
20 - 30	14	5	1
30 - 40	11	3	4
40 - 50	12	2	1
50 - 60	10	3	4
60 - 70	18	13	2
70 - 80	25	2	6
80 - 90	8971	1	1571
90 - 100	7891672	1	385696

Tabla 2: Resultados intermedios tras aplicar el algoritmo una vez.

Posteriormente, después de aplicar el algoritmos sucesivas veces, se puede comprobar en la tabla 3 cómo se consigue decrementar el numero de mediciones tras aplicar la variante del algoritmo propuesta.

Intervalo conflictivo	Tamaño de muestra inicial	Tamaño de muestra reducido
Grupo 1 Intervalo 1	295	29
Grupo 1 Intervalo 8	25	5
Grupo 1 Intervalo 9	8971	40
Grupo 1 Intervalo 10	7891672	42
Grupo 2 Intervalo 1	99	9
Grupo 3 Intervalo 1	84	13
Grupo 3 Intervalo 9	1571	16
Grupo 3 Intervalo 10	385696	36

Tabla 3: Comparativa de los intervalos conflictivos tras aplicar la división reduccional.

Finalmente, se presentan los resultados finales tras aplicar el algoritmo en las tablas 4 - 6. En total, juntando el tamaño de la muestra en cada una de los grupos, se deben medir 350 apoyos, que suponen un **1.44 % del tamaño de la muestra inicial**, significando un ahorro económico considerable.

Intervalo de Resistividad	Número de mediciones
1.90 - 8.91	20
8.94 - 13.93	4
13.93 - 20.65	5
20.65 - 32.5758	20
32.5758 - 45.4545	14
45.4545 - 59.3912	11
59.3912 - 76.2963	12
76.2963 - 95.3079	10
95.3079 - 117.3079	18
117.74 - 131.96	2
131.96 - 146.63	3
146.63 - 163.49	4
163.49 - 179.35	2
179.62 - 197.95	2
197.95 - 217.74	4
217.74 - 241.28	6
241.94 - 271.30	12
271.99 - 307.92	10
307.92 - 346.45	16
348.70 - 393.94	26
TOTAL	201

Tabla 4: Muestra segmentada reducida para el grupo de $K_R \in [0,0890, 0,1550]$.

Intervalo de Resistividad	Número de mediciones
0.46 - 4.01	5
4.01 - 8.01	4
8.0144 - 12.6477	18
12.6477 - 17.4314	5
17.4314 - 22.0397	3
22.0397 - 26.0469	2
26.0469 - 30.7943	3
30.7943 - 36.0649	13
36.0649 - 46.0829	2
46.0829 - 84.1515	1
84.1515 - 1995.9267	1
TOTAL	57

Tabla 5: Muestra segmentada reducida para el grupo de $K_R \in [0,4910, 0,4991]$.

Intervalo de Resistividad	Número de mediciones
0.38 - 3.53	12
3.67 - 5	1
5 - 8.65	9
8.65 - 10.55	1
10.55 - 13.93	4
13.93 - 16.667	1
16.667 - 21.2667	4
21.2667 - 25.333	2
25.333 - 31.6667	6
31.67 - 35.33	1
36.17 - 48.33	15
50.00 - 59.33	7
59.67 - 73.83	13
73.83 - 114.33	16
TOTAL	92

Tabla 6: Muestra segmentada reducida para el grupo de $K_R = 0,6$.

5. Conclusiones y líneas futuras de trabajo

En este artículo se aborda el problema del impacto económico que supone el mantenimiento de las líneas eléctricas. Como solución al mismo, se propone crear una arquitectura y algoritmos innovadores para solucionar este problema, a través de la predicción del estado de los apoyos de una línea, con el objetivo de reducir el número de revisiones que se deben realizar.

Se ha utilizado el paradigma de agentes para modelar un SMA que consigue alcanzar el objetivo principal de este trabajo, gracias a los algoritmos propuestos de predicción del estado de un apoyo y la reducción del tamaño de la muestra, implementados como servicios ejecutados por agentes dentro del SMA.

Como se puede observar en este trabajo, se ha implementado un sistema que permita gestionar el mantenimiento de líneas eléctricas utilizando los algoritmos definidos, diseñándolo mediante la metodología GORMAS. Por este motivo, la principal línea futura de trabajo se centrará en el desarrollo de una interfaz para la aplicación que permita al operador hacer uso de los avances propuestos en esta tesis. También se proponen otras líneas complementarias como la ampliación del algoritmo de predicción para tener en cuenta nuevas variables o incluso mejorar la precisión del modelo propuesto, basándose en nuevas restricciones como el filtrado avanzado de vecinos por igualdad de configuración, pertenencia a la misma línea, valores límites de resistencia de puesta a tierra, etc.

Referencias

1. K. Mobley, L. Higgins, and D. Wikoff, *Maintenance Engineering Handbook*. McGraw-Hill handbooks, McGraw-Hill Education, 2008.
2. H. de Faria, J. a. G. S. Costa, and J. L. M. Olivas, "A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 46, pp. 201–209, June 2015.
3. A. Badri, A. N. Niazi, and S. M. Hoseini, "Long term preventive generation maintenance scheduling with network constraints," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1889–1895, 2012.
4. Y. Feng, W. Wu, B. Zhang, and J. Gao, "Transmission line maintenance scheduling considering both randomness and fuzziness," *Journal of Uncertain Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 243–256, 2011.
5. M. Fotouhi Ghazvini, H. Morais, and Z. Vale, "Coordination between mid-term maintenance outage decisions and short-term security-constrained scheduling in smart distribution systems," *Applied Energy*, vol. 96, pp. 281–291, Aug. 2012.
6. A. Zarnani, P. Musilek, X. Shi, X. Ke, H. He, and R. Greiner, "Learning to predict ice accretion on electric power lines," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, no. 3, pp. 609 – 617, 2012.
7. S. A. Taher and I. Sadeghkhani, "Estimation of magnitude and time duration of temporary overvoltages using ANN in transmission lines during power system restoration," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 18, pp. 787–805, June 2010.
8. D. Zhou, H. Zhang, and S. Weng, "A novel prognostic model of performance degradation trend for power machinery maintenance," *Energy*, vol. 78, pp. 740–746, Dec. 2014.
9. R. Murugan and R. Ramasamy, "Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities," *Engineering Failure Analysis*, vol. 55, pp. 182–192, Sept. 2015.
10. A. J. Trappey, C. V. Trappey, L. Ma, and J. C. Chang, "Intelligent engineering asset management system for power transformer maintenance decision supports under various operating conditions," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 84, pp. 3–11, June 2015.
11. P. Do, A. Voisin, E. Levrat, and B. Iung, "A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 133, pp. 22–32, Jan. 2015.
12. S. J. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1995.
13. M. Wooldridge, *An introduction to Multiagent Systems*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
14. H. S. Nwana, "Software agents: An overview," *The knowledge engineering review*, vol. 11, no. 03, pp. 205–244, 1996.
15. D. Cvetkovic and I. Parmee, "Agent-based support within an interactive evolutionary design system," *AI EDAM*, vol. 16, no. 05, pp. 331–342, 2002.
16. A. S. Rao and M. P. Georgeff, "An abstract architecture for rational agents.," *KR*, vol. 92, pp. 439–449, 1992.
17. A. Mas, *Agentes software y sistemas multiagente: conceptos, arquitecturas y aplicaciones*. Prentice Hall, 2005.

18. M. Kolp, P. Giorgini, and J. Mylopoulos, “Multi-agent architectures as organizational structures,” *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 3–25, 2006.
19. E. Bonabeau and C. Meyer, “Swarm intelligence,” *Harvard Business Review*, vol. 79, no. 5, pp. 106–114, 2001.
20. H. V. D. Parunak, P. Nielsen, S. Brueckner, and R. Alonso, “Hybrid multi-agent systems: integrating swarming and bdi agents,” in *Engineering Self-Organising Systems*, pp. 1–14, Springer, 2007.
21. E. Argente Villaplana, *Gormas: Guías para el desarrollo de sistemas multiagente abiertos basados en organizaciones*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), June 2008.

Sistema de gestion inteligente de redes de sensores en eBikes

Daniel H. de la Iglesia, J.M. Corchado y Juan F. de Paz

Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca. Plaza de los
Caidos s/n. 37008, Salamanca, España
{danihiglesias, corchado, fcofds}@usal.es

Resumen Los vehículos eléctricos y en concreto las bicicletas eléctricas asistidas, están experimentando un incremento en el numero de usuarios en los últimos años. Entre las razones de este incremento de usuarios, destaca la ausencia de emisiones de gases nocivos a la atmósfera, facilidad de aparcamiento, un coste económico muy reducido y ser una actividad beneficiosa para la salud del usuario. Frente a las bicicletas tradiciones, las bicicletas eléctricas suponen una mejora en la experiencia del usuario ya que al contar con la asistencia suministrada por el motor, los trayectos mas largos o escarpados, se suavizan de una manera considerable. Estas bicicletas funcionan a través de la energía suministrada por una batería eléctrica. En este trabajo, se busca optimizar el recorrido que un usuario realiza con su bicicleta eléctrica de manera habitual a través de los valores de los sensores desplegados.

Keywords: red de sensores, optimization, swarm intelligence, ebike

1. Introducción

La gran mayoría de los países desarrollados del mundo, han adoptado un conjunto de medidas para tratar de frenar el cambio climático actual, persiguiendo el objetivo de reducir el calentamiento global que esta teniendo ya importantes consecuencias. Se persigue el reto de reducir para el año 2.050 las emisiones de gases de efecto invernadero en un 80-90 % en comparación con los niveles del año 1.990. Mientras que muchos sectores, en particular la industria, han conseguido importantes avances en esta materia, el objetivo global se encuentra aun muy lejos.

El principal problema lo encontramos en las emisiones producidas por el transporte, mientras que en otros sectores se han conseguido reducir los niveles de gases emitidos, las emisiones causadas por los vehículos han aumentado significativamente respecto a los valores del año 1.990. De esta manera, si no se consigue reducir de manera drástica estas emisiones, alcanzar los objetivos marcados para el año 2.050 sera imposible. En las ultimas décadas ha crecido el numero de combustibles y fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles tradicionales. El bioetanol, el biodiesel o el hidrogeno son solo algunos ejemplos de

combustibles que tienen una menor emisión de gases y también una menor dependencia de fuentes no renovables como el petróleo. Pero sin duda, una de las fuentes de energía más prometedoras en el sector del transporte en los últimos años es la energía eléctrica. Hoy en día es fácil encontrar vehículos eléctricos en la industria de la automatización. Las grandes empresas del sector tienen ya sus primeros modelos de coches 100% eléctricos en el mercado, y se espera que su crecimiento en ventas sea exponencial en los próximos años. En este trabajo nos centraremos en el uso de bicicletas eléctricas (e-bikes) como medio alternativo de transporte. El uso de este tipo de bicicletas para viajes cortos (de menos de 20 km/día) se está extendiendo en las grandes ciudades donde cada día se producen grandes aglomeraciones y congestión de tráfico. Su uso en el desplazamiento diario en las ciudades es interesante por dos motivos. En primer lugar tiene un componente social ya que se disminuye la emisión de esos gases nocivos para el planeta y al mismo tiempo, se consigue reducir la congestión del tráfico en las ciudades.

En segundo lugar, tiene un beneficio personal para la persona que monta en bicicleta ya que toma un papel activo en el viaje, realizando un ejercicio moderado y beneficioso para su salud, mas aun si se trata de personas con una vida sedentaria. Tampoco se puede negar que el coste de realizar estos traslados en bicicleta ya sea convencional o eléctrica es mucho mas económico que en cualquier otro medio de transporte.

En este trabajo se va hacer uso de los sensores instalados en una bicicleta eléctrica y al usuario junto con otros sensores externos para lograr optimizar el consumo de batería que una bicicleta eléctrica requiere para realizar una ruta dada. Numerosos estudios se han centrado en la obtención de algoritmos para generar rutas optimas a través de dos puntos GPS (punto inicial y punto final). Estas rutas, marcan al usuario las coordenadas por las que debe circular para obtener una conducción mas eficiente y por lo tanto menor consumo de combustible. Pero, ¿Que ocurre cuando el usuario no quiere una ruta alternativa?. Existen numerosos casos en que para ir desde un punto "A" a un punto de destino "B", no queremos ir por el camino mas corto o por el mas optimo, sino que deseamos ir por una ruta habitual que conocemos mejor, o que nos cae de camino a otro lugar, esta ruta puede ser la mas optima, mas corta, la mas segura, o la que mas le interese al usuario por cualquier motivo. El objetivo es optimizar esta ruta. Para conseguir optimizar estas rutas habituales que los usuarios realizan continuamente, vamos a tratar de analizar los valores mas significativos de los sensores desplegados en la bicicleta eléctrica. Se buscara una configuración de niveles de asistencia que suponga una mejora en cuanto al consumo de la batería eléctrica, aumentando así su autonomía, a través de algoritmos de optimización basados en inteligencia de enjambre.

2. Objetivos

En este trabajo se plantea la hipótesis de que es posible la optimización energética de las rutas realizada de manera habitual por un usuario de bicicleta

eléctrica a través del análisis de los datos recogidos por los diferentes sensores que se despliegan en una e-bike.

Para alcanzar esta hipótesis se van a realizar diferentes tareas a lo largo del desarrollo de este trabajo:

- Investigación sobre el estado del arte actual en redes inalámbricas de sensores, repasando las diferentes topología que pueden ser aplicadas a estas redes, algoritmos de encaminamiento, protocolos de transmisión de datos y gestión inteligente.
- Estudio del estado del arte sobre tecnologías de Inteligencia Ambiental, destacando conceptos como computación ubicua, computación sensible al contexto, o inteligencia ambiental aplicada al transporte.
- Estado del arte de algoritmo de optimización aplicando mecanismos de inteligencia artificial, algoritmos evolutivos e inteligencia de enjambre (Swarm intelligence).
- Recolección y análisis de datos provenientes de los diferentes sensores que pueden ser desplegados en una e-bike en un dispositivo móvil Smartphone.
- Obtención de rutas habituales de los usuarios y descomposición de las mismas en tramos a los que asignar un nivel de asistencia determinado.
- Búsqueda de valores óptimos para el consumo y el tiempo de los diferentes tramos de los que se compone una ruta, a través de técnicas de aprendizaje y procesamiento automático.
- Generación de un conjunto de niveles de asistencia que optimicen el recorrido seleccionado por el usuario, a través de técnicas de inteligencia de enjambre.

El tema del presente trabajo se engloba dentro de una de las líneas de investigación en las que se trabaja dentro del Grupo de Biomedicinas, Sistemas Informáticos Inteligentes y Tecnología Educativa (BISITE) de la Universidad de Salamanca dentro del cual me encuentro colaborando actualmente. Este grupo, junto con la empresa StageMotion S.L. se encuentran desarrollando el proyecto ebikemotion.

La motivación como miembro del grupo de investigación y del equipo de desarrollo de la aplicación para dispositivos móviles ebikemotion®, es buscar la manera de optimizar el consumo de las baterías de las bicicletas eléctricas asistidas en las que se centra este proyecto, a través del conjunto de sensores que se despliegan.

3. Estado del arte

En esta sección se van a repasar los diferentes estados del arte de las tecnologías que se han investigado en este trabajo, la sección tienen los siguientes apartados:

- Redes inalámbricas de sensores
- Algoritmo de optimización aplicando mecanismos de inteligencia artificial
- Tecnologías de Inteligencia Ambiental

3.1 Redes inalámbricas de sensores

Los sensores han sido tradicionalmente instrumentos imprescindibles en la tecnología debido a su capacidad para monitorizar diferentes elementos. Una red de sensores es una infraestructura compuesta por sensores (mediciones), procesamiento y elementos de comunicación, que aportan al administrador la capacidad y los instrumentos para observar y reaccionar ante eventos y fenómenos en un entorno específico [1].

Las redes inalámbricas de sensores (o por sus siglas en inglés WSN, Wireless Sensor Network) se definen como una red de dispositivos llamados nodos que son capaces de obtener una medida (nivel de CO₂, temperatura de un motor, altura de un avión, estado de una válvula, etc.) del entorno en el que se localizan y enviar esa información registrada a un nodo principal o central a través de un enlace inalámbrico que puede usarla localmente o transmitirla a una estación de procesamiento ubicada en otra zona mediante el acceso a otras redes (como Internet) [2]. Es decir, una red de sensores inalámbricos, no es más que una red compuesta por una gran cantidad de equipos terminales que cooperan entre sí para medir y registrar algún parámetro del entorno que los rodea para transmitirlos de forma inalámbrica a un equipo que los procesará. Estos nodos pueden encontrarse en movimiento o estar fijados en un punto.

3.2 Algoritmos de optimización

Una de las metas más comunes de la inteligencia artificial (IA) es buscar una solución óptima en problemas de complejidad alta, tanto en espacios continuos como en espacios discretos [3]. Un algoritmo de optimización es un método numérico que encuentra un valor

$$\theta_i \in R^n \quad (1)$$

donde

$$R^n \quad (2)$$

es un espacio n-dimensional de búsqueda, que minimiza o maximiza una función

$$j(\theta) \quad (3)$$

por medio de la selección sistemática de valores de la variable θ posiblemente con algunas restricciones. La variable

$$\theta_i \quad (4)$$

puede ser un valor escalar o un vector de valores discretos o continuos llamados funciones factibles, mientras que

$$j(\theta) \quad (5)$$

es llamada función objetivo.

Una solución factible que minimiza o maximiza la función objetivo es llamada una solución óptima. Un tipo de problemas de optimización son aquellos que requieren combinaciones de valores, y se le denomina de optimización combinatoria.

Según los autores en [4], las técnicas utilizadas para resolver problemas complejos de optimización combinatoria han evolucionado progresivamente de métodos constructivos a métodos de búsqueda local y finalmente a algoritmos basados en poblaciones. Estos últimos son muy populares actualmente puesto que proveen buenas soluciones al utilizar un método constructivo para la obtención de la población inicial, y una técnica de búsqueda local para mejorar la solución de la población. Además los métodos basados en poblaciones tienen la ventaja adicional de ser capaces de combinar buenas soluciones en orden de obtener unas mejores, ya que se considera que las buenas soluciones comparten componentes con las soluciones óptimas. A estos métodos se les conoce como algoritmos de computación evolutiva (Evolutionary Computation).

3.2.1 Inteligencia de enjambre (Swarm intelligence) La Inteligencia de enjambres corresponde a un grupo de técnicas que están basadas en el estudio del comportamiento colectivo en sistemas auto-organizados y descentralizados (distribuidos). Estos sistemas están conformados típicamente por una población de agentes computacionales simples capaces de percibir y modificar su ambiente de manera local. Tal capacidad hace posible la comunicación entre los individuos, que detectan los cambios en el ambiente generado por el comportamiento de sus semejantes. Aunque normalmente no hay una estructura centralizada de control que dictamina cómo los agentes deben comportarse, las interacciones locales entre los agentes usualmente llevan a la emergencia de un comportamiento global. Otra característica adicional es la inexistencia de un modelo explícito del ambiente. Dentro de esta rama las técnicas principales son la optimización por enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization – PSO) y la optimización por colonia de hormigas (Ant Colony Optimization – ACO). Existen otros algoritmos que pueden ser catalogados dentro de esta rama, como lo son la optimización por enjambre de bacterias (Bacteria Swarm Foraging Optimization – BSFO), la búsqueda por difusión estocástica (Stochastic Diffusion Search – SDS) y el algoritmo de colmena de abejas artificiales (Artificial Bee Colony Algorithm – ABC).

3.3 Inteligencia Ambiental

La inteligencia ambiental (Ambient intelligence, AmI) es un campo de la computación que busca aportar inteligencia a nuestros entornos cotidianos y hacer que estos entornos sean sensibles para nosotros, aprendiendo de nuestras necesidades y reaccionando de manera transparente para mejorar nuestro día a día [5]. La base principal de la inteligencia ambiental está en los avances en sensores, redes de sensores, computación ubicua y la inteligencia artificial.

El término “Inteligencia Ambiental” aparece en el año 1999 como una propuesta realizada por el Information Society Technology Programme Advisory Group (ISTAG) de la Comunidad Europea [6]. Esta propuesta se basa en los conceptos planteados por la computación ubicua, la cual tiene inferencia en áreas como la Inteligencia Artificial, la domótica, los agentes inteligentes, etc. La AmI influye en el diseño de protocolos, comunicaciones, integración de sistemas, dispositivos, etc. [7], haciendo que la tecnología se adapte a las necesidades de los usuarios, y no los usuarios a la tecnología.

4. Entorno desplegado

Como se ha comentado en puntos anteriores, el principal objetivo que se persigue en este trabajo es desarrollar un sistema que sea capaz de optimizar una ruta realizada de manera habitual por un usuario de bicicleta eléctrica asistida. Gracias a todos los datos capturados durante el recorrido por los diferentes sensores desplegados, tenemos un conjunto de datos significativos que pueden ser tratados para obtener la configuración de niveles de asistencia óptima que se debe aplicar en el transcurso del recorrido realizado por el usuario.

En este apartado se van a describir todos los elementos necesarios para la realización de este proyecto. Se va a definir el concepto de bicicleta eléctrica asistida, definiendo sus componente principales. También se va a repasar la bicicleta eléctrica utilizada para el desarrollo de este trabajo, los sensores que se van a desplegar y la aplicación para dispositivos móviles que se va a encargar de recoger, analizar y almacenar toda la información.

4.1 Bicicleta eléctrica asistida

Dentro del mercado actual podemos encontrar dos tendencias diferentes a la hora de comercialización de estos sistemas. Por un lado existen fabricantes de bicicletas eléctricas que desarrollan un producto compacto de mecánica (bicicleta) y electrónica (motor y batería) y por otro lado existen kits de modificación de bicicletas convencionales para convertirlas en bicicletas eléctricas. Una bicicleta eléctrica asistida (de cualquier tipo) tiene cuatro componentes principales:

- Motor
- Sistema de transmisión
- Sistema de control
- Fuente de energía

4.1.1 Motor Existen dos tipos de motores para bicicletas eléctricas en la actualidad: Los motores de corriente continua con escobillas (conexión eléctrica del motor) y que deben ser reemplazadas cada 15.000km y los motores “brushless” sin escobillas y sin mantenimiento (más avanzados).

Las tres características principales que hay que tener en cuenta a la hora de elegir un motor son: Mayor eficiencia, mínimo mantenimiento y alta densidad de potencia. Los motores eléctricos de corriente continua son los más utilizados.

En la mayoría de los países europeos, si la potencia de salida del motor no es superior a 200W, no se necesitará ningún documento o seguro para circular con ellas. Además, la velocidad tiene que estar limitada a 15-25 km/h de velocidad en asistencia, que suele ser el límite de los motores inferiores a 200W.

4.1.2 Sistema de transmisión Existen diferentes métodos de transmitir la potencia del motor al movimiento de la bicicleta:

Movimiento por fricción: Basado en la fricción entre un pequeño rodillo (conectado al motor) que se sitúa sobre el neumático. Este método es el menos eficiente ya que si se mueve un poco el rodillo o se quedan partículas de arena o agua entre la rueda y el rodillo del motor, se producen saltos en la transmisión que reducen la velocidad.

Motor en el eje del pedalier: El motor que se sitúa en el eje de los pedales impulsa la rueda trasera a través de una caja de velocidades conectada a la cadena de transmisión de la bicicleta que a su vez conecta con los piñones de la rueda trasera. Este es el método utilizado por la mayoría de bicicletas convencionales que se modifican para convertirse en bicicleta eléctrica.

Motor directo en la rueda: Este es el método más sencillo y fácil de instalar. El moto está encerrado en el eje de la rueda. Como no hay fricción ni acoplamiento en el sistema de transmisión, se ahorra espacio, es silencioso y no necesita mantenimiento. Además, este método tiene mayor fiabilidad de funcionamiento y una mayor eficiencia. La tendencia actual es que los fabricantes de bicicletas coloquen el motor en el eje de la rueda delantera o trasera, lo que aumenta significativamente el coste de fabricación.

4.1.3 Fuente de energía Actualmente en el mercado podemos encontrar diferentes tipos de baterías especialmente diseñadas para trabajar con los motores de las bicicletas eléctricas. El voltaje de estas baterías suele oscilar entre los 24V y los 36V.

4.1.4 Consumo de una batería eléctrica Puesto que este trabajo se centra principalmente en la optimización del consumo de batería en función de los datos de los diferentes sensores, es preciso mencionar como se calcula el consumo de energía de un motor en una bicicleta eléctrica. Como ya se ha mencionado, las baterías más utilizadas para ser montadas en bicicletas eléctricas tienen voltajes comprendidos entre los 24V y los 36V, mientras que la capacidad de carga (Ah

– amperios-hora) puede variar en función de los tipos y modelos de baterías. La energía consumida por un dispositivo eléctrico se mide en vatios-hora (Wh).

Si tenemos por ejemplo una batería de 24V y 8Ah, la potencia total de la batería sería de 192Wh con el 100% de carga. A la hora de calcular una aproximación de la autonomía de una batería en kilómetros, podemos aplicar la siguiente fórmula:

$$\text{Autonomía (Km)} = V \cdot i \cdot \text{Velocidad Max.} / \text{Potencia Motor} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta que esta fórmula es solo una estimación aproximada a la autonomía real, ya que no se tienen en cuenta de manera directa el peso soportado ni la pendiente del recorrido. Siguiendo dicha fórmula podemos deducir que: Una bicicleta eléctrica con un motor de 250W y una batería de 36V y 10Ah que llega a una velocidad máxima de 25Km/h tiene una autonomía de 36km (Aprox.).

5. Sensores Desplegados

Cuando un usuario realiza una ruta en bicicleta eléctrica es importante que se registren ciertos parámetros durante el trayecto que nos den información útil para poder generar una optimización de la misma. En la siguiente Figura 1 se muestra un esquema de los sensores desplegados.

Sensor de velocidad de la rueda: Este sensor mide la velocidad que lleva la rueda a través de un imán colocado en uno de los radios. Está conectado por cable al motor.

Sensor de cadencia: Este sensor mide la frecuencia de pedaleo del usuario, es utilizado como sensor complementario para medir la velocidad del usuario. Se conecta de forma inalámbrica por bluetooth.

Pulsómetro: Este sensor es portado por el usuario que se encuentra realizado un ejercicio con la bicicleta eléctrica, se utiliza para medir la frecuencia cardíaca en tiempo real. Consta de una banda de goma elástica y de un electrodo que se coloca en la parte central del pecho. Este dispositivo se conecta también de manera inalámbrica por medio de una conexión Bluetooth.

Motor: El motor es el elemento central (junto con la batería) de una bicicleta eléctrica, en el caso de nuestro motor, nos proporciona diferentes parámetros registrados a través de los diferentes sensores internos de los que dispone:

- **Nivel de asistencia:** El motor nos facilita la información del nivel de asistencia que el usuario ha seleccionado a través de un control con 2 botones situado en el manilla.

- Nivel de batería restante: Al encontrarse la batería conectada al motor, este puede leer diferentes valores a través de sus sensores. El nivel de batería restante nos facilita un porcentaje estimado de la carga que le queda a la pila.
- Tensión instantánea de la batería: El motor nos facilita el voltaje de la batería en cada instante.
- Corriente instantánea de la batería: Al igual que la tensión, se nos facilita también la corriente.
- Temperatura: Podemos obtener el dato de temperatura de la batería y del motor en cada instante.



Figura 1: Sensores Desplegados

Hub bluetooth: Toda la información facilitada por el motor y descrita anteriormente junto con la información del sensor de velocidad, se envía a través de un bus de datos cableado a esta placa electrónica. La finalidad de esta placa es emitir y recibir datos entre dispositivos inalámbricos y el motor. Para ello dispone de un chip bluetooth encargado de realizar las comunicaciones entre los dispositivos y el bus de datos del motor.

Smartphone: El uso de un dispositivo móvil inteligente (smartphone) juega un doble papel en nuestro sistema, por un lado, se hace uso de diferentes senso-

res de los que disponen la gran mayoría de dispositivos, como el sensor GPS, la brújula y el acelerómetro. Y por otro lado, es el elemento central de nuestro sistema, encargado de capturar y procesar todo los datos de la red y almacenarlos en una base de datos. Para ello se hace uso de una aplicación que se describe en el siguiente punto de esta memoria.

5.1 Aplicación ebikemotion

El grupo de investigación BISITE (Bioinformática, Sistemas Informáticos Inteligentes y Tecnología Educativa) de la Universidad de Salamanca en el cual estoy desarrollando mi trabajo actualmente y la empresa StageMotion S.L. se encuentran desarrollando actualmente la aplicación para bicicletas eléctricas ebikemotion.

6. Sistema Propuesto

En este apartado se detalla el sistema propuesto para alcanzar los diferentes objetivos que se han planteado en apartados anteriores y partiendo del entorno descrito en Entorno desplegado. En primer lugar se describe el procedimiento de división de un recorrido en diferentes tramos, después se detalla el proceso de estimación del consumo de una bicicleta eléctrica durante un recorrido a los que posteriormente y siguiendo diferentes técnicas de optimización basado en inteligencia de enjambre, asignaremos un nivel de asistencia óptimo que minimice dicho consumo.

6.1 División del recorrido en tramos

Uno de los primeros problemas que nos encontramos a la hora de tratar un recorrido es la división del mismo en tramos. El propósito de esta división es poder asignarle un nivel de asistencia óptimo a cada uno de ellos. El criterio principal seguido para realizar esta división es la diferencia de pendientes en los distintos puntos del recorrido. El pseudocódigo sería de la siguiente forma:

```
Mientras existan localizaciones
Si pendiente > 0
Si pendiente tramo actual > 0 y Si magnitud del tramo actual = magnitud pen.
Add localizacion al tramo actual
SiNo
Nuevo tramo
Si pendiente < 0
Si pendiente del tramo actual < 0 y Si magnitud tramo actual = magnitud
Add localizacion al tramo actual
SiNo
Nuevo tramo
```

```

Si pendiente = 0
Add localizacion al tramo actual
Fin

```

6.2 Cálculo del consumo

En el apartado anterior, Consumo de una batería eléctrica, se han descrito los principios básicos para comprender como se puede calcular el consumo, la capacidad y la autonomía de una batería eléctrica en una bicicleta eléctrica asistida.

A través de la fórmula de autonomía, estimamos la autonomía media de la bicicleta a 25km/h (máximo por ley) para nuestra configuración de motor + batería (en condiciones ideales):

$$\text{Autonomía (Km)} = 36 \cdot 13 \cdot 25 / 250 \quad (7)$$

Dado que los valores de la batería son nominales y en la práctica, alcanzar consumos al límite de la capacidad de la pila es peligroso como se explica en diversos estudios [8], se estima entonces un factor de corrección de los kilómetros totales de autonomía de un 70 % del valor obtenido para evitar dañar el sistema.

Autonomía (con un margen de seguridad) = 32,76 km

En este caso de estudio se trata de minimizar dos aspectos por una lado el consumo y por el tiempo en realizar los recorridos. Hay que tener en cuenta que son dos aspectos contrapuestos y lo primero a plantear es definir una función objetivo que tenga en cuenta dos aspectos para ello, se busca relacionar los amperios consumidos con el tiempo empleado en consumir un amperio para poder evaluar las mismas unidades. La función objetivo a minimizar tiene en cuenta ambos aspectos y queda definida de la siguiente manera:

$$f(t, g) = (\sum t_s / k) + \sum g_s \quad (8)$$

6.3 Algoritmo de optimización

A la hora de optimizar la función descrita en el apartado anterior para obtener el valor mínimo de consumo y tiempo, se propone el uso de técnicas de

Swarm Intelligence o Inteligencia de enjambre. Estas técnicas están especialmente diseñadas para obtener valores óptimos en problemas complejos.

Finalmente el algoritmo propuesto para minimizar nuestra función objetivo es el algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas. En este algoritmo, en el espacio de soluciones planteado, existe una población (enjambre) de partículas (insectos) que tiene un tamaño que actúan como elementos de búsqueda de la solución óptima y se mueven en el conjunto de las soluciones, guiadas por los miembros del enjambre que han obtenido las mejores posiciones (que son los mejores valores para la función objetivo f).

A continuación plantearemos el pseudocódigo del algoritmo teniendo en cuenta todas estas características:

```

Para Cada partícula i
  Iniciar la posición de las partículas aleatoriamente
  Inicia i a su posición inicial aleatoria
  Si solución i < solución global Entonces
    solución global = solución local
  Iniciar velocidad de i
  Hacer
    Para Cada partícula
      elegir valores aleatorios [0,1]
      actualizar la velocidad de la partícula
      actualizar posición de la partícula
      Si solución actual < solución anterior Entonces
        actualizar mejor posición local
      Si solución local < solución global Entonces
        actualizar mejor posición global
  Hasta encontrar solución satisfactoria

```

Aplicamos redes neuronales para poder calcular los valores de consumo y tiempo de la función objetivo (8). Con todos los datos obtenidos de las diferentes veces que el usuario ha realizado la ruta habitual a optimizar, entrenamos dos redes neuronales para poder estimar los parámetros a través de los niveles de asistencia óptimos calculados por el algoritmo en cada iteración. Para realizar el entrenamiento se ha utilizado un perceptrón multicapa, en la capa intermedia o capa oculta se han colocado $2 + 1$ neuronas siguiendo el teorema descrito por Kolmogorov. Las funciones de activación de la red neuronal elegidos son funciones sigmoideas y se han escalado los valores al rango $[0,2-0,8]$ para que haya un mejor entrenamiento.

7. Caso de estudio

Con el fin de validar el sistema propuesto en el anterior apartado, se va a desarrollar un caso de estudio con datos reales analizando un recorrido y buscan-

do optimizar los valores de consumo de batería. En primer lugar, se ha realizado una ruta con el entorno descrito en Entorno desplegado de 3.8 km. Mientras que para la tabla localizaciones, donde se almacenan los datos sobre los que realizaremos los cálculos, se han almacenado 274 tuplas para este recorrido. Los tramos en los que se ha dividido la ruta han sido 23 tramos que se ajustan de manera clara al recorrido.

A la hora de trabajar con el algoritmo de optimización y con las redes neuronales necesarias para estimar los parámetros descritos en la fórmula a optimizar, se decidió trabajar con la herramienta matemática MATLAB. Esta herramienta software ofrece un entorno integrado para el desarrollo de pruebas a través de un lenguaje de programación propio (lenguaje M) y está disponible en múltiples plataformas. Facilita el proceso ya que cuenta con numerosos scripts para trabajar con algoritmos de inteligencia de enjambre y con una potente toolbox de redes neuronales que facilita el proceso de interacción entre ambas.

En primer lugar, entrenamos las dos redes neuronales que vamos a necesitar para estimar los valores de consumo y de tiempo. Los datos utilizados para realizar el entrenamiento de las redes son los obtenidos de cada una de las localizaciones del recorrido de prueba visto en este caso de estudio y que son importadas con un fichero CSV a la herramienta MATLAB a través de su Toolbox.

MATLAB también dispone de un función (particleswarm) para ejecutar algoritmos de optimización a través del algoritmo de enjambre de partículas. Usaremos esta función para realizar la experimentación del caso de estudio. Los elementos de entrada de la función serán:

- fun: La función objetivo que se describe a continuación.
- nvars: Es el número de tramos para los que hay que calcular un nivel de asistencia, 23 en nuestro caso.
- lb: Es el límite inferior del espacio de búsqueda, en nuestro caso el nivel 0 de asistencia.
- ub: Es el límite superior del espacio de búsqueda, en nuestro caso es el nivel 9.

Una vez finalizada la ejecución, obtenemos como salida un vector de niveles de asistencia que se corresponden con los valores de posiciones globales más óptimos de todas las partículas al finalizar la ejecución de la función.

Con el fin de validar estos datos para comprobar si aplicando los niveles de asistencia obtenidos en un recorrido igual al experimentado se tendría un nivel menor de consumo de la batería, se realizó de nuevo el mismo recorrido. Para ello se memorizó los puntos de inicio de cada tramo y los niveles de asistencia asociados en la aplicación móvil.

La distancia es la misma en los dos casos (3,88km) ya que se ha realizado el mismo recorrido, pero en la ruta optimizada, la duración es algo mayor (12,6 min frente a 11,3min) debido a que el nivel de asistencia global es mas bajo, pero manteniendo prácticamente constante las pulsaciones del usuario por lo

que podemos decir que la relación entre asistencia de la bicicleta y esfuerzo del usuario es correcta. En el caso del consumo, se ha conseguido una reducción sustancial del 10 % del gasto, lo que aumenta la autonomía de la batería. Como contrapartida, tenemos que el tiempo aumenta en torno al 9 %, que para un recorrido de tan solo 4 kilómetros es un resultado aceptable aunque con potencial para ser mejorado.

8. Resultados y conclusiones

Como hemos visto en los resultados obtenidos el caso de estudio, tras aplicar las técnicas de optimización planteadas, se produce una mejora sustancial del consumo sin aumentar el tiempo considerablemente, esto supone una mayor autonomía para la bicicleta eléctrica que será capaz de recorrer mayor distancia con la misma carga de batería. En caso de querer dar mayor relevancia al tiempo, habría que modificar la ponderación de la función objetivo. También se puede plantear en un trabajo futuro, otras alternativas a estos algoritmos o el uso de varios algoritmos combinados que mejoren los resultados de optimización, sin aumentar e incluso buscando disminuir el tiempo empleado en realizar un recorrido.

El uso de las redes neuronales, me ha permitido aproximar funciones no lineales asociadas a la estimación del consumo y de la velocidad que nos permite calcular el tiempo por tramo. Las redes neuronales, se han empleado con combinación que swarm intelligent para permitir calcular el resultado óptimo de una función objetivo, ha sido necesario aplicar esta técnica debido a que la función objetivo no era lineal siendo por tanto imposible aplicar programación lineal para resolver el problema planteado.

Como conclusiones debemos destacar cómo el uso de la inteligencia artificial aplicada al campo de la optimización de recursos y energía es un campo cada vez más extendido e importante en un mundo con cada vez menos recursos energéticos. Los sistemas de sensorización y los nuevos sensores desarrollados, juegan un papel fundamental a la hora de capturar y procesar los datos.

Referencias

1. K. Sohraby, D. Minoli, and T. Znati, *Wireless Sensor Network Technology, Protocols, and Applications*. 2007.
2. C. A. Suescún, G. Alberto, M. López, I. Electrónico, and E. Telecomunicaciones, “Revisión del estado del arte de redes de sensores inalámbricos,” 2009.
3. a. M. n. Mario, a. L. Jesús, and F. C. Eduardo, “Inteligencia de enjambres: sociedades para la solución de problemas (una revisión) Swarm intelligence: problem-solving societies (a review),” *Ingeniería e Investigación*, vol. 28, no. 2, pp. 119–130, 2008.
4. A. Hertz and D. Kobler, “A framework for the description of evolutionary algorithms,” *European Journal of Operational Research*, vol. 126, pp. 1–12, Oct. 2000.
5. E. H. Aarts and J. L. Encarnaçao, *True Visions: The Emergence of Ambient Intelligence*. 2006.
6. I. A. Group and I. A. Group, “Ambient Intelligence: from vision to reality,” *Most*, 2005.
7. F. Reynolds, “The ubiquitous web, upnp and smart homes,” vol. 1, no. 5, pp. 1–5, 2006.
8. M. Yilmaz and P. T. Krein, “Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 2151–2169, May 2013.

Filtrado Colaborativo y Computación Social: Sistema de recomendación de rutas ciclistas

Álvaro Lozano Murciego, Juan Manuel Corchado y Sara Rodríguez González

Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca. Plaza de la
Merced s/n. 37008, Salamanca, España
{loza, corchado, srg}@usal.es

Resumen En este artículo se presenta el diseño de un sistema de recomendación destinado a realizar recomendaciones de rutas ciclistas a usuarios de una red social deportiva. El sistema empleará técnicas relacionadas con el Filtrado Colaborativo e incluirá aspectos del contexto del usuario a la hora de realizar la recomendación. Para llevar a cabo este sistema, se elaborará un estado del arte en el que se estudiarán distintos algoritmos que podrán ser empleados, diferentes paradigmas para incluir el contexto en el sistema y soluciones a los problemas que conlleva aplicar el contexto al sistema de recomendación.

Keywords: Filtrado Colaborativo, Computación Social, Sistemas de Recomendación, Slope One, SVD.

1. Introducción

En la actualidad existen multitud de sistemas informáticos como redes sociales, sitios web de comercio electrónico, aplicaciones móviles etc. que podrían ser denominados “*máquinas sociales*” englobadas dentro de un área importante de la informática llamada *Computación Social*. Éstas utilizan la información y las interacciones de los usuarios, entre sí y con el sistema, para realizar tareas de forma colaborativa.

Esas tareas pueden ser, por ejemplo, resolver una duda que un programador pueda tener en cierto momento y que pregunta en una *máquina social* como *Stack Overflow*. Esta duda es resuelta gracias a la interacción de otros usuarios en el sistema mediante contestaciones con posibles soluciones. Al mismo tiempo, estas soluciones son validadas también por los propios usuarios del sistema, valorando positiva o negativamente las soluciones que se han propuesto. La solución es encontrada y refinada de manera colaborativa entre los usuarios del sistema y éste proporciona los medios para que esto se lleve a cabo (permitiendo realizar las preguntas, respuestas, valoraciones, comentarios y asignando reputación a los usuarios, etc.).

En otros sistemas como los sitios web de comercio electrónico, un objetivo primordial es aumentar las ventas del sistema, por lo que una de las tareas más comunes de estos sistemas es hacer recomendaciones de artículos al usuario para llevar a cabo tal objetivo. En este caso, tanto los usuarios como el sistema juegan

un papel decisivo: el sistema se vale de las interacciones de los usuarios entre sí y con éste para realizar posteriormente recomendaciones a los usuarios, con el objetivo de que encuentren artículos que coincidan con sus gustos, y que más adelante los compren.

Estos sistemas de recomendación llevan ya muchos años entre nosotros y actualmente están en auge. Chris Anderson en *The Long Tail* [1] [2] [3] hacía esta declaración: “*Estamos dejando la era de la información y entrando en la era de la recomendación*”; y en el artículo *The race to create a "smart" Google* [4] [3] se menciona una frase que captura muy bien cuál es la clave de este cambio de era y lo que los sistemas de recomendación pueden conseguir:

“La web está dejando la era de la búsqueda y entrando en la era del descubrimiento. ¿Cuál es la diferencia? Buscar es lo que haces cuando tratas de encontrar algo. Descubrir es lo que ocurre cuando algo espectacular que no sabías que existía, o que no habías preguntado por ello, te encuentra.”

En el presente artículo se plantea que es posible crear un sistema de recomendación basado en técnicas de filtrado colaborativo que incorpore información del contexto del usuario. La investigación estará centrada en encontrar aquellos algoritmos que mejor se ajusten al caso de estudio propuesto y añadir a estos, factores del contexto de la petición de recomendación, con el fin de desarrollar un sistema de recomendación híbrido y sensible al contexto.

2. Estado del arte

2.1 Computación Social

La computación social (*social computing*) es un término general en el área de las ciencias de la computación que hace referencia a la intersección del comportamiento social y los sistemas computacionales (Figura 1).

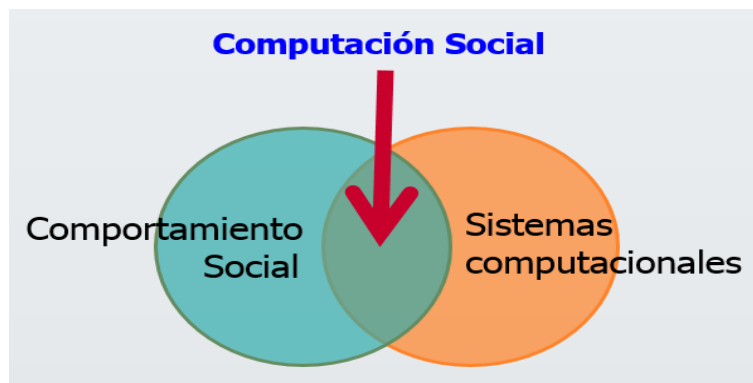


Figura 1: Computación social

La computación social es fundamentalmente el uso de ordenadores (o cualquier tipo de dispositivo computacional) para propósitos sociales. Previamente a la aparición de Internet, los ordenadores eran ampliamente utilizados como herramientas para incrementar la productividad.

Posteriormente, Internet y las redes sociales han introducido un elemento social donde los usuarios comparten intereses, publican sus inquietudes y utilizan los ordenadores para mucho más que agilizar su trabajo más rápido.

Tom Erickson de IBM [5] define la Computación Social como sistemas que permiten el comportamiento social entre las personas y el sistema para luego usar este comportamiento social para distintos propósitos. Grupos de personas que “*computan*” socialmente algo.

Por otro lado Leo Von Ahn [6] la describe como la tecnología que permite cualquier tipo de comportamiento social a través de sistemas computacionales, por ejemplo, blogs, email, wiki, redes sociales etc. Otros expertos como David Robertson [7] señalan que el gran poder de la computación social reside en la posibilidad de programar las contribuciones de humanos y computadores.

2.2 Filtrado Colaborativo

El Filtrado Colaborativo [8][9][10], a partir de ahora CF (*Collaborative Filtering*) es un popular algoritmo de recomendación que basa sus predicciones y recomendaciones en las valoraciones (*ratings*) o en el comportamiento de otros usuarios en el sistema.

La base fundamental detrás de estos métodos es que las opiniones de otros usuarios pueden ser seleccionadas y agregadas de cierta forma, para proporcionar una predicción razonable de las preferencias de un usuario seleccionado. Intuitivamente, se asume que, si los usuarios están de acuerdo con la calidad o relevancia de algunos artículos, entonces es probable que se pongan de acuerdo al valorar otro artículo.

2.2.1 Filtrado Colaborativo: User-User User-User CF, también conocido como k-NN Collaborative Filtering, fue el primero de los métodos de CF automatizados. Fue introducido por primera vez en un artículo del grupo de investigación GroupLens [11] sobre el recomendador Usenet. User-User CF es una interpretación algorítmica simple y directa de la premisa principal del Filtrado Colaborativo: buscar otros usuarios cuyas valoraciones sean similares a las del usuario que se tiene como objetivo y utilizar esas valoraciones para predecir lo que le gustará al usuario

2.2.2 Filtrado Colaborativo: Item Item Item-Item CF fue descrito en la literatura por primera vez por Sarwar et al. [12] y Karypis [13], aunque por aquella época Amazon también utilizaba este tipo de algoritmos [14]. En lugar de utilizar las similitudes entre los usuarios, Item-Item CF utiliza similitudes entre patrones de valoraciones de artículos.

2.2.3 Filtrado Colaborativo: Slope One [15] La idea original de *Slope One* es simple y está basada en lo que los autores llaman un “*diferencial de popularidad*” entre artículos para los usuarios.

En general el problema consiste en encontrar funciones de la forma $f(x) = x + b$ (por este motivo se le llama *Slope One*, *pendiente uno* en español) que predicen, para un par de artículos, la valoración de un artículo a partir de la valoración del otro.

2.3 Reducción dimensionalidad: SVD

Para una matriz M , su SVD es la factorización de M en 3 matrices constituyentes tal que $M = U\Sigma T^t$, Σ es una matriz diagonal cuyos valores σ_i son los valores singulares de la descomposición y U y T son ortogonales. Lo que se logra es la introducción de un espacio vectorial intermedio representado por Σ . Si M es la matriz de valoraciones, ΣT^T transforma vectores del espacio de los artículos en un espacio intermedio.

En una forma pura de SVD, U es $m \times \hat{k}$, Σ es $k \times \hat{k}$ y V es $n \times \hat{k}$, donde M es $m \times n$ y tiene un *ranking* \hat{k} , aunque no supone una ganancia significativa. Σ puede, sin embargo, ser truncada para solo mantener los k valores singulares más grandes obteniendo Σ_k . La descomposición es una aproximación de M . Además, usando la norma matricial *Frobenius* como medida del error, es la mejor aproximación *ranking-k*.

$$R \approx U\Sigma T^T \quad (1)$$

2.4 Sistemas de recomendación híbridos

Es natural considerar la posibilidad de combinar distintos algoritmos de recomendación en un sistema de recomendación híbrido [16]. En algunas aplicaciones, los distintos sistemas híbridos han superado el rendimiento de algoritmos individuales [8]. Los sistemas híbridos pueden ser beneficiosos cuando los algoritmos incluidos cubren distintos casos de uso o diferentes aspectos del conjunto de datos. Por ejemplo, Item-Item CF no funciona cuando no hay nadie que haya valorado un artículo todavía; sin embargo, los métodos basados en contenido sí lo hacen.

2.5 Sistemas de recomendación sensibles al contexto

El uso de información contextual en un sistema de recomendación se puede introducir con el trabajo de Herlocker and Konstan [17] quienes sentaron las hipótesis de incluir información conocida de las tareas habituales del usuario en los sistemas de recomendación de algunas aplicaciones.

A continuación, se enumeran las posibles estructuras que pueden presentar los sistemas de recomendación sensibles al contexto [18]. De forma general, un sistema de recomendación puede describirse como una función que toma información sobre las preferencias del usuario como entrada y produce una lista de

recomendaciones para el usuario como salida. Hay que tener en cuenta, que como se indica en la Figura 2 [18], una vez que la función es definida o construida en función de los datos disponibles, la lista de recomendaciones para un usuario u se genera usando la función de recomendación con el usuario u y todos los artículos candidatos para obtener la lista de artículos ordenados por la valoración predicha.



Figura 2: Componentes de un sistema de recomendación tradicional.

Los sistemas de recomendación tradicionales se construyen basándose en el conocimiento de *una parte de las preferencias del usuario*. Por ejemplo, los datos de entrada para un sistema de recomendación tradicional sería de la forma (*usuario, artículo, valoración*). Por otra parte, en los sistemas de recomendación sensibles al contexto la entrada sería (*usuario, artículo, contexto, valoración*).

Es posible aplicar la información del contexto en distintas etapas del proceso de recomendación, en función de cuando se aplica esta información se pueden considerar 3 tipos que se citan a continuación [18]:

- **Pre filtrado contextual:** o contextualización de los datos de entrada. En este paradigma, la información del contexto c se utiliza para la selección o la construcción de los datos de entrada para el algoritmo. De este modo, es posible calcular las predicciones utilizando cualquier sistema recomendador con los datos seleccionados
- **Post filtrado contextual:** o contextualización los datos de salida. En este paradigma de recomendación, la información de contexto inicialmente se ignora y se calculan las predicciones utilizando un algoritmo de recomendación corriente sobre todo el conjunto de datos. Más tarde, se ajusta (contextualiza) el conjunto de recomendaciones para el usuario utilizando la información del contexto.
- **Modelado contextual:** o contextualización la función de recomendación. En este paradigma, la información contextual se utiliza directamente en el modelo como parte de la predicción de las valoraciones.

3. Sistema propuesto

Tras el estudio de los distintos sistemas de recomendación existentes, se ha optado por el diseño de un sistema de recomendación híbrido y sensible al contexto. El diagrama general del sistema se puede observar en la Figura 3.

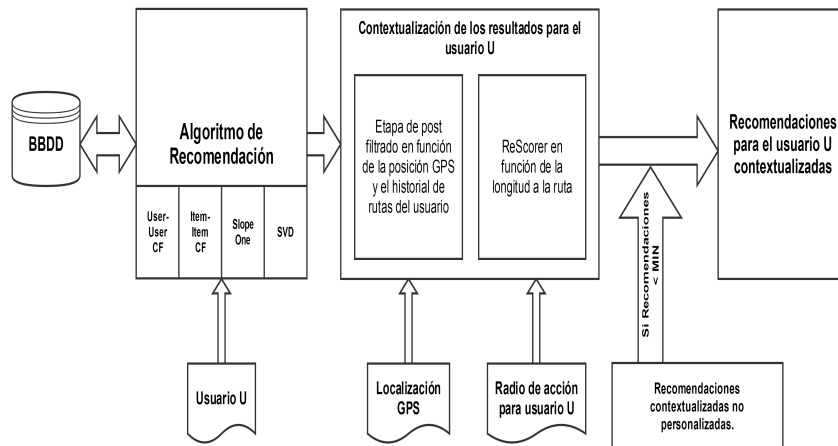


Figura 3: Diagrama general del sistema

A continuación se describirán de forma general las distintas partes de las que está compuesto el sistema mostrado en la Figura 3 así como las razones de su diseño.

3.1 Algoritmos de recomendación

En primer lugar, el sistema consta de un algoritmo de recomendación clásico que realizará las predicciones de las valoraciones de los artículos para el usuario U objetivo. Con el fin de obtener los mejores resultados se ha considerado evaluar el funcionamiento de varios algoritmos para posteriormente seleccionar aquel que presente los mejores resultados. Se presentan a continuación los algoritmos elegidos (Figura 4):

- **User-User CF:** se realizarán pruebas del funcionamiento de este algoritmo en este dominio. A priori, no es uno de los candidatos a seleccionar para el sistema debido a que a la hora de implantarlo en un sistema real no escala bien.
- **Item-Item CF:** se comprobará su funcionamiento con distintas medidas de similitud entre las rutas.

- **Slope One:** [15] este popular algoritmo ha demostrado funcionar realmente bien en otros contextos por lo que, a priori, debería presentar buenos resultados para el sistema.
- **SVD:** este tipo de algoritmos, que son tendencia hoy en día, presentan también muy buenos resultados por lo que es un fiel candidato para ser incluido en el sistema final.



Figura 4: Diagrama del algoritmo de recomendación

Posteriormente, se comprobarán los resultados obtenidos con cada uno de ellos y se optará por el que mejor funcione para esta etapa en el sistema de recomendación final.

3.2 Contextualización de los resultados

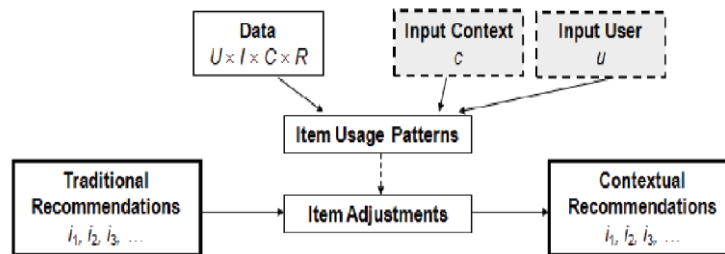


Figura 5: Paradigma de postfiltrado

A la hora de incluir el contexto en el sistema de recomendación, de los distintos paradigmas vistos con anterioridad [18], se ha elegido un enfoque centrado

en realizar recomendaciones *dirigidas por contexto mediante licitación y estimación*, y como paradigma de diseño, se ha optado por un esquema de postfiltrado o contextualización de los datos de salida (Figura 5).

De esta forma, es posible utilizar algoritmos de recomendación clásicos y, más adelante, aplicar una serie de filtros y reevaluaciones para obtener finalmente las recomendaciones i para el usuario U (Figura 5).

Por lo tanto, la parte del sistema encargada de contextualizar los resultados (Figura 6) tendrá tres etapas bien diferenciadas: postfiltrado en función del radio de acción del usuario U , evaluación de los resultados según su distancia a la posición del usuario U y, en el caso de no existir o no cumplir el mínimo de recomendaciones solicitadas, se añadirán otras no personalizadas pero contextualizadas.

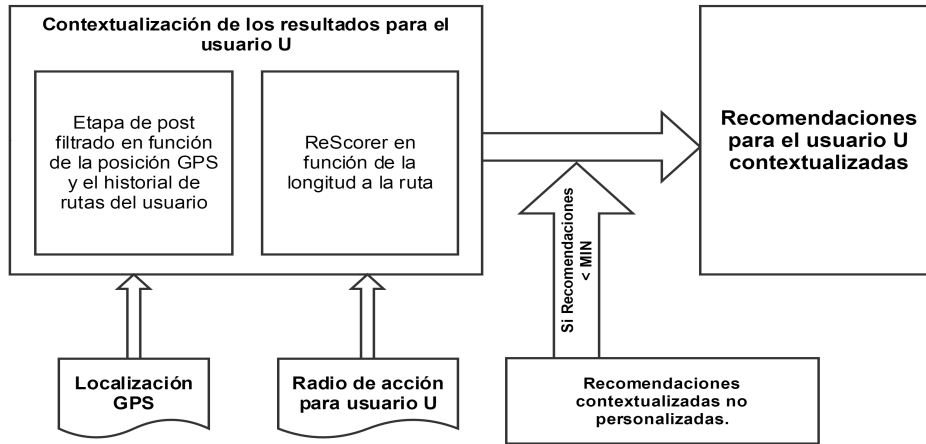


Figura 6: Contextualización de resultados

El resultado final constará de las recomendaciones contextualizadas para el usuario U según su posición GPS y su actividad anterior en el sistema. A continuación se detallan cada una de las etapas de esta parte del sistema.

3.2.1 Filtrado por radio de acción para el usuario U Una vez obtenidas las recomendaciones del algoritmo de recomendación, estas deben ser filtradas por su localización GPS. Solo se seleccionarán aquellas que estén dentro del *radio de acción del usuario U* .

El radio de acción del usuario U se basará en su historial de actividades. En función de los desplazamientos realizados por el usuario en sus actividades anteriores se calculará el radio de acción que el usuario está dispuesto a moverse a la hora de realizar una nueva actividad. En el caso de no existir actividades anteriores, se considerará un radio de acción R por defecto relativamente pequeño.

Se define D_u como el conjunto de las distancias de las actividades realizadas por el usuario U a su lugar de residencia. Se define también d como el valor máximo de las distancias de D_u . Para que el usuario descubra rutas más allá del máximo desplazamiento que ha realizado anteriormente, el radio de acción R para el usuario U se establece como d más un margen que corresponderá a un 20 % de d (ecuaciones 2 y 3).

$$d \in D_u / \forall x \in D_u, x \leq d \quad (2)$$

$$R = d * 1,2 \quad (3)$$

3.2.2 Evaluación de los resultados en función de la distancia para el usuario U Una vez obtenidas las recomendaciones para esa zona delimitada por el radio de acción definido para el usuario, al igual que en LARS [19], en el sistema propuesto se realizará una reevaluación personalizada para el usuario U de las puntuaciones obtenidas, añadiendo una puntuación P sobre 2 puntos a los resultados. Dependiendo del historial del usuario y de sus desplazamientos, éste realizará actividades a mayor o menor distancia con mayor facilidad por lo que la puntuación que se añada dependerá de estos datos. Se define P como un valor sobre 2 puntos correspondiente al porcentaje de distancias $d \in D_u / d \geq d_r$, siendo d_r la distancia del usuario a la ruta que actualmente se está evaluando. La puntuación P sobre 2 puntos en función de la distancia será añadida a la predicción obtenida anteriormente por el algoritmo de recomendación (ecuación 5):

$$P = \frac{|d \in D_u / d \geq d_r|}{|D_u|} * 2 \quad (4)$$

$$p(u, i)' = p(u, i) + P \quad (5)$$

3.2.3 Recomendaciones no personalizadas ajustadas al contexto Finalmente, se desarrollará una etapa auxiliar, encargada de calcular una serie de recomendaciones no personalizadas pero contextualizadas, para aquellos casos en los que no se complete el mínimo de recomendaciones requerido para una consulta.

Este problema puede ser debido al *arranque en frío* o a la dispersión que presentan habitualmente los datos. Realizar recomendaciones no personalizadas es una buena opción en casos en los que no se posee información acerca del usuario o no existen elementos que se puedan recomendar en ese contexto. Estadísticamente, en estos casos, es mucho más probable realizar una buena recomendación si se hace de esta forma.

Según la clasificación de sistemas de recomendación híbridos de Burke [16], este sistema podría clasificarse como un sistema intercambiable o mixto ya que cambia o combina, según la necesidad, las salidas de dos sistemas de recomendación distintos.

4. Resultados

Se presentan a continuación los resultados obtenidos tras evaluar cada uno de los algoritmos que se han utilizado para realizar las recomendaciones. Se comentarán los resultados obtenidos y se expondrán las causas que los han producido.

4.1 Medidas basadas en predicción de valoraciones

En la Tabla 1, se pueden observar el error medio absoluto (*Mean Absolute Error - MAE*) y el error cuadrático medio (*Root Mean Square Error - RMSE*) sin realizar en postfiltrado de los algoritmos que se han empleado. Se trata, por tanto, de los resultados obtenidos si no se tuviese en cuenta el contexto del usuario. Se ha utilizado un vecindario fijo $k = 50$ para las pruebas y distintas medidas de similitud entre usuarios y rutas.

Algoritmo	MAE	RMSE
UserUserPearsonSimilarity	0.8922	1.6216
UserUserSpearmanSimilarity	0.8471	1.0593
ItemItemPearsonSimilarity	0.5792	0.8373
ItemItemUncenteredCosineSimilarity	0.4836	0.6802
Slope One	0.6224	0.8007
SVD++	0.6015	0.7251
Random	0.7922	1.0662

Tabla 1: Resultados de los errores: MAE y RMSE sin postfiltrado

Se puede observar en la tabla anterior que el algoritmo que menor error presenta a la hora de predecir las valoraciones de las rutas es *ItemItemUncenteredCosine*. Así mismo, también el error de un algoritmo aleatorio *Random* para poder comparar el rendimiento del resto de algoritmos. Se puede apreciar igualmente un mejor rendimiento de los algoritmos *Item-Item CF* frente a los *User-User*.

Posteriormente, en la Tabla 2, se pueden observar de nuevo los dos errores una vez aplicado el postfiltrado. Se puede apreciar un aumento evidente del error a la hora de predecir, una vez realizado el postfiltrado en todos los algoritmos. Este aumento del error es lógico, ya que tras aplicar el postfiltrado, es decir, contextualizar las recomendaciones que ha generado el algoritmo, el número de rutas que es posible recomendar se reduce notablemente, por lo que se reducen las posibilidades de encontrar recomendaciones muy precisas en ese espacio de recomendaciones.

Se puede apreciar como el error de todos los algoritmos sin distinción se dispara incluso llegando a funcionar peor que el algoritmo *Random*. Se hace

evidente que el hecho de incluir el contexto del usuario introduce un error considerable a la hora de predecir. No obstante, este viene determinado también por la densidad de datos que exista en la zona de la localización empleada en la recomendación.

Algoritmo	MAE	RMSE
UserUserPearsonSimilarity	1.3385	1.6216
UserUserSpearmanSimilarity	1.2537	1.5632
ItemItemPearsonSimilarity	1.1214	1.3368
ItemItemUncenteredCoineSimilarity	1.1270	1.3584
Slope One	1.2261	1.4849
SVD++	1.2158	1.4545
Random	1.1515	1.3947

Tabla 2: Resultados de los errores: MAE y RMSE con postfiltrado

4.2 Medidas de Recuperación de la Información

Se han evaluado otras medidas relacionadas con el campo de la Recuperación de la Información y más en concreto, con la toma de decisiones. Se muestran a continuación en la Tabla 3 algunas de las medidas que permite obtener *Apache Mahout*:

Algoritmo	Precision@3	Recall@3	F1Measure
UserUserPearsonSimilarity	0.1282	0.1111	0.1190
UserUserSpearmanSimilarity	0.0763	0.1319	0.0967
ItemItemPearsonSimilarity	0.1737	0.2361	0.0142
ItemItemUncenteredCoineSimilarity	0.0902	0.1527	0.1134
Slope One	0.0069	0.0069	0.0069
SVD++	0.1111	0.1493	0.1274
Random	0.0486	0.0520	0.0502

Tabla 3: Medidas de Precision@3, Recall@3 y F1Measure

Precision@N y Recall@N [20] son las medidas habituales, pero teniendo en cuenta solo los N primeros resultados. En los sistemas de recomendación es común utilizar estas métricas, ya que es muy interesante conocer que porcentaje

de las N recomendaciones que se ofrecen son buenas para el usuario. Por otra parte, el F1Score es una métrica que conjuga las dos anteriores.

Aunque los valores de Precision@3 no parecen a priori muy buenos resultados, es evidente que esto puede variar mucho dependiendo del contexto y de la cantidad de datos empleada.

4.3 Líneas de trabajo futuras

Tras la investigación llevada a cabo, se describen una serie de posibles líneas de trabajo futuras con las que mejorar el sistema y llevarlo a un escenario más cercano al caso real de uso.

- **Utilización de un conjunto de datos real de *Ebikemotion*:** una vez se desarrolle la funcionalidad del sistema correspondiente a las valoraciones y los usuarios puedan expresar sus gustos por las rutas que realizan o por la de sus compañeros.
- **Implantación del sistema de recomendación en *Ebikemotion*:** incluir el sistema desarrollado como una funcionalidad más del sistema *Ebikemotion*.
- **Sistema de recomendación basado en contenido:** diseñar un sistema de recomendación basado en contenido para aquellos casos en los que no se puedan proporcionar recomendaciones basadas en las preferencias de los usuarios.
- **Inclusión del contexto en el modelo:** en el presente artículo se ha optado por un enfoque de postfiltrado, podría ser muy interesante utilizar otro en el que se incluya el contexto dentro del propio algoritmo de recomendación.
- **Integrar sistema de reputación de los usuarios:** incluir otros aspectos en la recomendación, como puede ser la reputación de los usuarios en el sistema.
- **Añadir relaciones de amistad:** se podría estudiar la posibilidad de incluir las relaciones de amistad existentes en el sistema.
- **Factores en tiempo real:** incluir en el sistema de recomendación factores que pueda aportar el sistema en tiempo real, como el tiempo atmosférico o la cantidad de personas que se encuentran realizando una ruta.
- **Mejora de la dispersión de los datos:** mediante técnicas que aporten más valoraciones a las rutas existentes como, por ejemplo, usuarios que realicen una ruta y la valoren pueden haber recorrido parte u otra de otro usuario, por lo que se podría inferir la valoración de esa ruta de algún modo.

Efectivamente, existen multitud de factores y mejoras que pueden ser incluidos en el sistema. No obstante se deberán estudiar detenidamente y ser probar antes de aplicarlos a un sistema en producción.

Referencias

1. C. Anderson, "The Long Tail: Why the Future of Business Is Selling Less of More by Chris Anderson," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 24, no. 3, pp. 1–30, 2007.
2. L. R. Services, "Recommendation in E - Commerce,"
3. X. Amatriain, "The Recommender Problem Revisited," no. August, 2014.
4. J. M. O'Brien, "The race to create a 'smart' google," November 20 2006.
5. T. Erickson, "Social Computing," *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed.*, 2014.
6. E. Law and L. V. Ahn, *Human Computation*. Morgan & Claypool Publishers, 2011.
7. F. G. Robertson and Dave, "The social computer combining machine and human computation," *Computer*, no. May, 2010.
8. M. D. Ekstrand, "Collaborative Filtering Recommender Systems," *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, vol. 4, no. 2, pp. 81–173, 2010.
9. P. Resnick and H. R. Varian, "Recommender systems," *Communications of the ACM*, vol. 40, pp. 56–58, Mar. 1997.
10. N. Tintarev and J. Masthoff, *Recommender Systems Handbook*, vol. 54. 2011.
11. P. Resnick, N. Iacovou, M. Suchak, P. Bergstrom, and J. Riedl, "GroupLens," in *Proceedings of the 1994 ACM conference on Computer supported cooperative work - CSCW '94*, (New York, New York, USA), pp. 175–186, ACM Press, Oct. 1994.
12. B. Sarwar, G. Karypis, J. Konstan, and J. Riedl, "Item-based collaborative filtering recommendation algorithms," in *Proceedings of the tenth international conference on World Wide Web - WWW '01*, (New York, New York, USA), pp. 285–295, ACM Press, Apr. 2001.
13. G. Karypis, "Evaluation of Item-Based Top- N Recommendation Algorithms," in *Proceedings of the tenth international conference on Information and knowledge management - CIKM'01*, (New York, New York, USA), p. 247, ACM Press, Oct. 2001.
14. G. Linden, B. Smith, and J. York, "Amazon.com recommendations: item-to-item collaborative filtering," *IEEE Internet Computing*, vol. 7, pp. 76–80, Jan. 2003.
15. D. Lemire and A. Maclachlan, "Slope One Predictors for Online Rating-Based Collaborative Filtering," 2005.
16. R. Burke, "Hybrid web recommender systems," *The adaptive web*, pp. 377–408, 2007.
17. J. Herlocker and J. Konstan, "Content-independent task-focused recommendation," *IEEE Internet Computing*, vol. 5, no. 6, pp. 40–47, 2001.
18. L.-C. Wang, X.-W. Meng, and Y.-J. Zhang, "Context-Aware Recommender Systems," *Journal of Software*, vol. 23, no. 1, pp. 1–20, 2012.
19. J. J. Levandoski, M. Sarwat, A. Eldawy, and M. F. Mokbel, "LARS: A Location-Aware Recommender System," in *2012 IEEE 28th International Conference on Data Engineering*, pp. 450–461, IEEE, Apr. 2012.
20. J. L. Herlocker, J. a. Konstan, L. G. Terveen, and J. T. Riedl, "Evaluating collaborative filtering recommender systems," *ACM Transactions on Information Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 5–53, 2004.

Representación gráfica de sonidos de habla

Revisión de Modelos y Técnicas

Dionisio Tomás Rodríguez Barrios y Ángel Luis Sánchez Lázaro

Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca. Plaza de los
Caídos, S/N. 37008 - Salamanca. España
`tomas.rb@usal.es, als1@usal.es`

Resumen En este trabajo se presenta un estudio, análisis y revisión de modelos y técnicas relacionadas con el habla.

En concreto se ha realizado un análisis de las técnicas de obtención de información de las ondas de sonido que contienen la voz o el habla humana, y para ello previamente se revisa la fisiología de la comunicación humana, la extracción de datos y parámetros característicos de las señales acústicas (ondas de sonido) y de sus posibles formas de visualización.

A partir de esto, se ha profundizado en la revisión de técnicas que hacen uso de visualizaciones del habla como terapia de educación y aprendizaje de idiomas, entrenamiento y rehabilitación de personas con dificultades del habla, con el objeto de comprender mejor esas técnicas para poder aplicarlas en un futuro. Por ejemplo en el diseño de sistemas de ayuda para la detección de problemas de pronunciación en el aprendizaje de un idioma, o de ayuda en la rehabilitación de habilidades motoras del aparato fonador y de la producción del habla.

Se ha pretendido "Diseñar un futuro sistema que permita obtener diferentes representaciones gráficas de una señal acústica de habla", planteando las bases para el desarrollo de una futura aplicación práctica que permita mostrar la "presentación visual" de un modelo con la pronunciación correcta de un texto, junto con su reproducción acústica, para que un usuario pronunciara el texto mostrado en pantalla (suponiendo que es un fragmento que pronuncia mal) y se representaría su dicción visualmente para poder compararlas (la correcta y la realizada por el usuario).

Keywords: Sonidos, Habla, Aplicación, Algoritmos, Visualización, Sounds, Speech, Software, Algorhytms, Visualization

1. Introducción

Con este trabajo titulado "**Representación gráfica de sonidos de habla-Revisión de Modelos y Técnicas**", se pretende "Diseñar un futuro sistema que permita obtener diferentes representaciones gráficas de una señal acústica de habla", y como medio para ello, se realiza previamente un análisis de algunas de las técnicas existentes actualmente para la extracción de información de las ondas de sonido que contienen señales acústicas del habla humana.

En este trabajo fin de máster se ha realizado una recopilación de modelos y técnicas de tratamiento del sonido, sus formas de representación gráfica, diferentes aplicaciones prácticas incluyendo el reconocimiento del habla, clasificación de datos característicos, algunas aplicaciones software para tratamiento, aprendizaje, rehabilitación de la voz, etc., y librerías de código con funciones para su integración en otras aplicaciones.

Primeramente, para entender el problema de tratar el sonido del habla, se hace un repaso por la fisiología de la comunicación humana y sus posibles trastornos, después se estudian los algoritmos, fórmulas y técnicas para la extracción de datos y parámetros característicos de las señales acústicas que contienen voz, además de examinar sus posibles formas de visualización de esos datos.

A continuación se revisan una serie de técnicas más avanzadas enfocadas a la aplicación práctica de los datos extraídos del habla, tanto algoritmos de manipulación, técnicas de reconocimiento y clasificación, integración en sistemas de aprendizaje y ayuda a la práctica de la pronunciación: aprender idiomas, corregir pronunciación, rehabilitar el habla, entrenamiento de pronunciación para personas sordas.

2. La Comunicación Humana

El lenguaje hablado es, sin duda, el método de comunicación más natural, intuitivo y eficiente para los seres humanos, donde el intercambio de información mediante el habla juega un papel fundamental.

2.1 Fisiología de los Mecanismos del Habla

El habla es el resultado final de un acto voluntario en el que intervienen órganos pertenecientes al sistema respiratorio y digestivo. El control del proceso lo lleva a cabo el sistema nervioso central, utilizando la realimentación de información a través del oído.

El aparato fonador humano (figura 1) encargado de la producción de la voz, se puede dividir en tres bloques atendiendo a la función que desarrolla cada uno de los elementos: Generador de Energía, Sistema Vibrante y Sistema Resonante. En cada uno de ellos se realiza una parte principal del trabajo físico de la producción de los sonidos, y en concreto del habla.

Dependiendo de la movilidad de los órganos articulatorios se clasifican en:

- **Órganos Activos:** labios, lengua, dientes inferiores, velo del paladar.
- **Órganos Pasivos:** dientes superiores, alvéolos superiores, paladar.

El estudio del aparato fonador humano, como fuente y filtro del sonido es lo que va a proporcionar las ideas y técnicas para la creación de sistemas de habla automáticos, aunque también son la base para el estudio de la extracción de características de la voz.

Por otra parte, el estudio del sistema auditivo del ser humano también proporciona numerosas ideas y técnicas para la captura, preparación y filtrado de

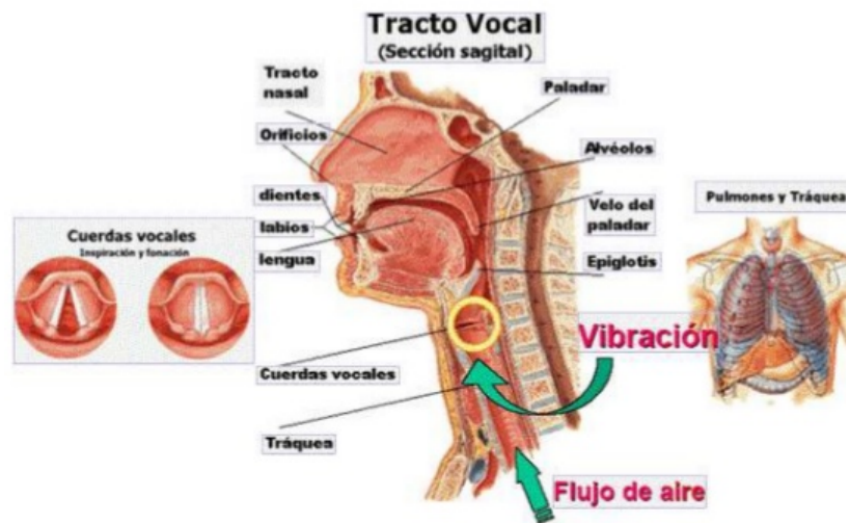


Figura 1: Órganos del aparato fonador humano.

sonidos, de la extracción de características, y de numerosos enfoques de organización de las características extraídas en vectores de datos para aplicarlos al reconocimiento del habla, clasificación e identificación de vectores, creación de bases de datos de sonidos \longleftrightarrow vectores \longleftrightarrow etiquetas identificativas. Está formado por tres partes fisiológicamente diferenciadas:

Del oído, la parte que más interesa es el **Oído Interno** ya que es la parte del oído que transforma las vibraciones mecánicas de los huesecillos del oído medio en excitaciones eléctricas de sus fibras neuronales.

La forma de hablar de cada individuo viene caracterizada por la fisiología, los mecanismos y por los procesos que ponen en funcionamiento esos mecanismos.

El habla es un fenómeno dinámico más que un fenómeno estático, pues los elementos articuladores están en un estado de constante movimiento durante la pronunciación.

Al describir los sonidos del habla individuales se expresan en términos de posiciones de destino, mientras que para el habla continua es mejor expresarlos en términos de movimiento.

Se resumen algunos conceptos acerca de la dinámica del habla:

Coarticulación: Durante el proceso de crear un sonido, la posición de los elementos articuladores suele estar preparada anticipadamente para el sonido que le sigue, es decir, que los sonidos en una palabra no se suceden como las palabras impresas, al hablar se solapan unos sonidos con otros. La coarticulación existe porque durante el habla hay demasiadas demandas sobre sus elementos motores que no hay tiempo suficiente para cumplirlas. Una conversación normal se produce a una velocidad media de entre 10-20 segmentos por segundo, lo que

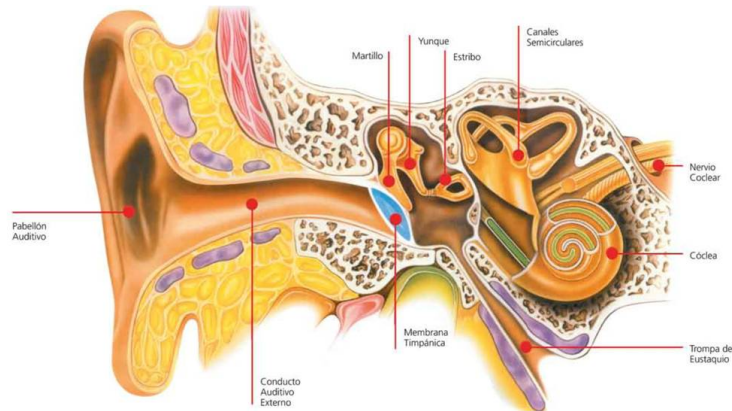


Figura 2: Órganos del aparato auditivo humano.

implica un máximo de 100 milisegundos por segmento. Sin embargo, se necesita mucho más que esto para completar cualquier gesticulación en el habla y luego regresar al punto de partida. Por tanto se realizan gestos de compromiso.

Asimilación: La asimilación se refiere a los cambios que cruzan los límites fonéticos y redundan en un cambio fonético mucho más importante, pues el cambio resultante es un sonido (fonema) diferente. En la coarticulación las diferencias no son fonémicas. En la asimilación hay un cambio importante en el lugar de la articulación, el modo, o la sonoridad de un segmento, de manera que el sonido cae en una categoría fonémica diferente.

Fenómenos Combinatorios: Existen otros tipos de fenómenos que afectan a la pronunciación como la Elisión o Elipsis (omisión de pronunciación de partes de una palabra), la Epéntesis (adición o intercalación de un segmento que no existe en la palabra), o la Metátesis (inversión de dos segmentos adyacentes normalmente por cuestiones de dialecto).

Prosodia: La prosodia es el conjunto de fenómenos fónicos que abarcan más de un fonema o segmento: entonación, acentuación, ritmo, velocidad de habla, etc.; por lo que se les denomina fenómenos suprasegmentales. La prosodia cumple una función clave en la organización e interpretación del discurso y, además, transmite información emotiva, sociolingüística y dialectal.

2.2 Trastornos del Habla y la Voz

Dentro de los mecanismos del habla y sus procesos de producción, aparecen otros factores que modifican y alteran en un mayor grado la correcta pronunciación. Las alteraciones del habla hacen referencia a todos aquellos trastornos que afectan a la correcta articulación de los diferentes sonidos y palabras o al ritmo y fluidez de la expresión verbal [8].

La clasificación y estudio de los trastornos del habla permite investigar acerca de las posibilidades de rehabilitación que puede realizarse mediante un sistema

informático que tome los sonidos que pronuncia un paciente, y/o algún sistema adicional que detecte la posición de los órganos articulatorios del mismo.

Se citan los posibles trastornos del habla:

Disglosia: Alteración de la articulación debida a la malformación (anatómica y/o fisiológica) de los órganos fonoarticulatorios (cavidad bucal, paladar, lengua, dientes, labios y cavidad nasal).

Disartria: Trastorno de la articulación causado por lesiones del sistema nervioso (central y/o periférico) que impiden un adecuado control muscular de los órganos que intervienen en el procesos fonoarticulatorios.

Dislalia o Dislalia funcional: Trastornos de articulación que no tienen una base orgánica conocida. La dislalia supone un problema de pronunciación de determinados fonemas sin que exista lesión en el sistema nervioso central ni malformación de los órganos de fonación.

Disfemia: Trastornos en la fluidez del habla no existiendo anomalía en los órganos de fonación. En los sujetos con este trastornos, también denominado tartamudez, se observa una alteración en el ritmo del discurso, junto con una deficiente coordinación fono-respiratoria.

Disfonía: Trastorno de la emisión vocal, caracterizado por una alteración, temporal o permanente, de alguna de las características acústicas de la voz (intensidad, tono y timbre). Atendiendo a su etiología las disfonías pueden ser orgánicas, psicógenas y funcionales.

Afonía: Es la pérdida total o parcial de la voz como consecuencia de una incapacidad o de la dificultad en el uso de las cuerdas vocales. Puede producirse por un uso excesivo de las cuerdas vocales, alteraciones de la laringe o por causas psicológicas. Se considera una alteración más grave que la disfonía.

2.3 Modelado de los Procesos de Comunicación

Con el objetivo de aplicar técnicas de procesado digital de señales a los problemas de detección y reconocimiento del habla, es esencial comprender tanto los fundamentos del proceso de producción de voz como los fundamentos del procesado digital de señales.

Esta teoría proporciona la base para la aproximación clásica al modelado de la señal de voz como salida de un sistema lineal variante en el tiempo (tracto vocal) excitado por una secuencia de pulsos cuasi periódicos o ruido blanco, dependiendo el tipo de voz producida, sonora o sorda, respectivamente.

Esta aproximación se aplica para obtener modelos discretos en el tiempo para la señal de voz.

Producción del Habla

Los modelos de producción del habla se justifican en función de la teoría acústica y formulados en función de los principios de filtrado digital, son la base del estudio y revisión de las técnicas de procesado de señal de voz en el apartado 12.

En la figura 3 se muestra la representación simplificada del mecanismo fisiológico completo de producción de voz.

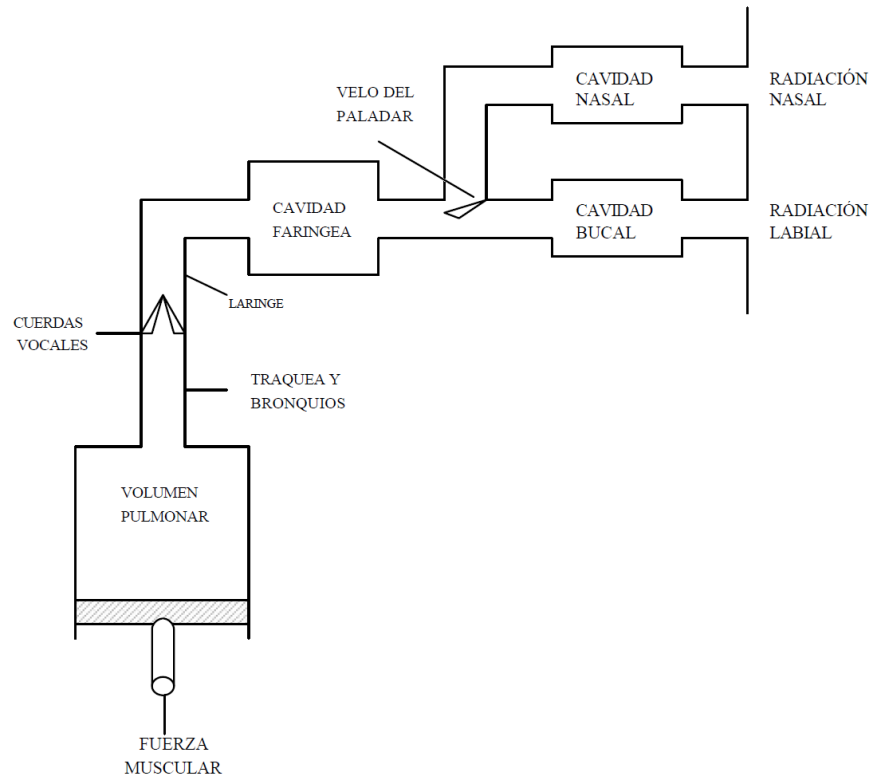


Figura 3: Esquema simplificado de la Producción del Habla.

Modelo de Producción Lineal

El mecanismo más comúnmente aceptado de producción del habla es el denominado "Mecanismo Fuente y Filtro", en el que una fuente de excitación genera una onda de sonido la cual se ve alterada por un filtro que depende de la forma del tracto vocal.

Para aceptar la validez de un modelo de producción lineal, éste debe ser equivalente al real en sus terminales de salida, pero su estructura interna no tiene por qué reproducir los verdaderos mecanismos físicos de producción.

En la figura 4 se representa el esquema del modelo de producción lineal clásico, o de la "Fuente y Filtro", donde las cuerdas vocales serían la fuente de señales periódica, el tracto bucal la fuente aperiódica de ruido, y las cavidades supraglóticas el filtro.

Modelo de Tubos

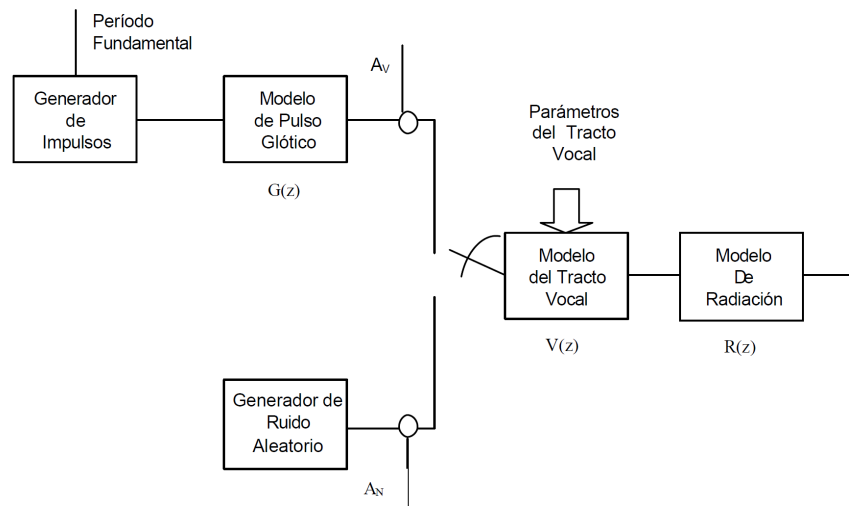


Figura 4: Modelo de Producción Lineal del Habla o mecanismo "Fuente y Filtro".

Un modelo de producción de voz ampliamente utilizado es el que se basa en la suposición de que el tracto vocal puede ser representado como una concatenación de tubos acústicos sin pérdidas, como se muestra en la figura 5. Esta suposición está basada en considerar plana la onda propagada a través del tracto vocal, esto quiere decir que la onda sonora se propaga en una sola dimensión, a lo largo de un eje, en el tracto vocal para la mayoría de las frecuencias de interés del sonido hablado.

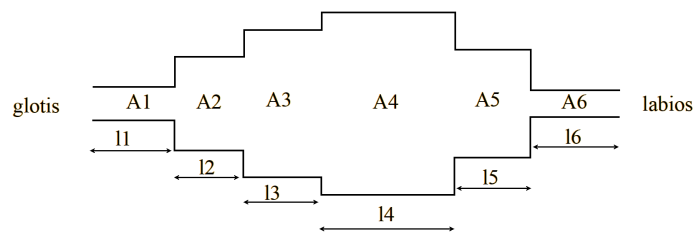


Figura 5: Modelo de Tubos de Producción del Habla.

3. Extracción de Parámetros, Interpretación y Visualización

En este apartado se analizan las diversas técnicas de extracción de parámetros de las ondas de sonido relativos a la voz humana, sus diversas formas de interpretación y sus posibles formas de visualización.

Se incluyen aquí, además, diferentes fases que pueden aplicarse a las señales acústicas para prepararlas, adaptarlas, mejorarlas o modificarlas convenientemente antes de ser procesadas en la extracción de datos característicos.

3.1 Audio Digital

Para los propósitos de investigación sobre los sonidos y el habla, las características se extraen de archivos de audio que están en formato digital, no de formato analógico, pues no puede ser procesado numéricamente.

Digitalización:

Una señal analógica puede ser representada en forma digital midiendo el nivel de señal a intervalos regulares de tiempo. Con esto se obtiene una secuencia discreta de números que se aproxima a la señal analógica original. Si el intervalo de tiempo entre cada muestra es alto, se perderá precisión en la digitalización de la señal, es decir, se perderán datos significativos acerca de los cambios y variaciones que tendrá la señal provocando que no se pueda reconstruir adecuadamente la señal original.

Una buena digitalización se basa en el *Teorema de Nyquist* que demuestra que para poder reconstruir una señal analógica sin pérdidas, al menos se debe muestrear al doble de velocidad que el período de la frecuencia más alta de la señal que queremos conservar. Con esto, si deseamos capturar una señal analógica del habla, con frecuencias en el rango de los 50Hz a unos 4000Hz, se deberán tomar muestras el doble de rápido que la frecuencia más alta, es decir, al menos a 8000Hz, o lo que es lo mismo, 8000 muestras por segundo. A la velocidad de captura de las muestras se le denomina "sampling rate".

Oscilogramas:

Un oscilograma o forma de onda "waveform" es la representación gráfica de las muestras digitales tomadas de una señal analógica y muestra las variaciones de amplitud de la señal (eje vertical) a lo largo del tiempo (eje horizontal). Como ejemplo de visualización de oscilogramas, se muestra en la figura 6 la captura de la pronunciación de la palabra "hola" realizada de cuatro maneras diferentes en ritmo y velocidad.

Desde el punto de vista del habla, un oscilograma puede usarse para realizar un análisis visual de la sonoridad de la pronunciación (análisis oscilográfico), ya que se muestra la amplitud (intensidad) de la pronunciación, la duración, las pausas (en caso de silencios), la acentuación (ataques o cambios de intensidad), la velocidad y el ritmo de la pronunciación.

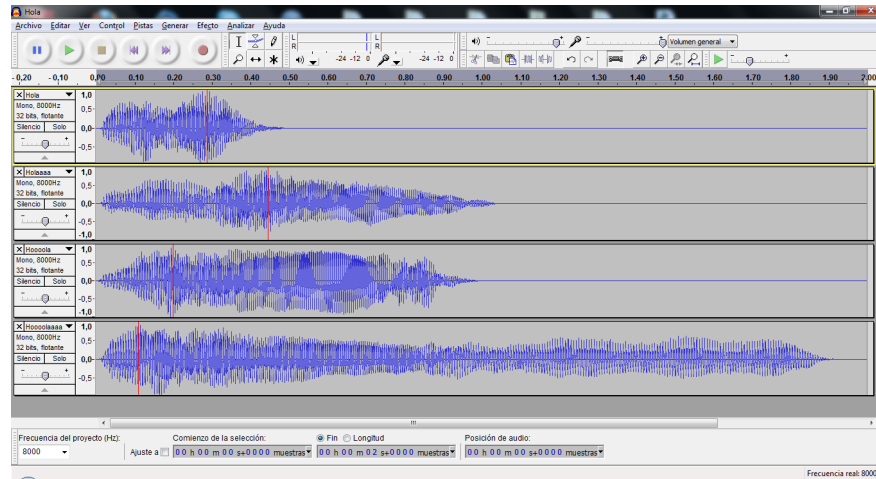


Figura 6: Oscilograma o forma de onda de la pronunciación de la palabra "hola" a diferentes ritmos y velocidades.

Dado que las formas de onda muestran amplitudes frente al tiempo, los análisis que de ellas puedan derivar se consideran en el "dominio del tiempo".

3.2 Espectro de la Señal

Con la excepción de las ondas de sonido generadas artificialmente, todas las ondas contienen un espectro de frecuencias diferentes y variado, cada una de las cuales posee su propia amplitud y fase.

El espectro de una señal es un gráfico que muestra las amplitudes relativas de las diferentes frecuencias que componen la señal de audio.

Transformada Rápida de Fourier - FFT

Para obtener el espectro de una señal se utiliza un proceso denominado "Análisis de Fourier" que descompone una onda en sus componentes de fase y frecuencia. La función matemática que lo permite es la "Transformada de Fourier".

Esta transformación permite considerar a las señales dentro del "dominio de la frecuencia".

Se puede rehacer una señal representada en el dominio de la frecuencia dentro del dominio del tiempo aplicando el proceso inverso, conocido como "Transformada de Fourier Inversa".

El análisis de Fourier hace posible la extracción de muchas características interesantes del sonido, y es por tanto una de las partes esenciales de un sistema de extracción de características.

Espectro FFT o Histograma Frecuencial

La representación de la amplitud obtenida tras aplicar la FFT (eje vertical) frente a las frecuencias (eje horizontal) permite representar el espectro de frecuencias o histograma en un instante de tiempo de la señal.

Esta representación visual da una serie de pistas, desde el punto de vista del análisis del habla, acerca de la sonoridad y la estructura formántica (timbre o tono de la cuerdas vocales y sus armónicos).

Una ejemplo de visualización que permite hacer el análisis visual de un espectro FFT se muestra en la figura 7. En este caso se aprecian una serie de picos que destacan en la gráfica, y que se corresponden con la frecuencia fundamental (identificada en línea roja a unos 151 Hz.) y una serie de armónicos múltiples de esa frecuencia que son los denominados formantes desde el punto de vista del habla.

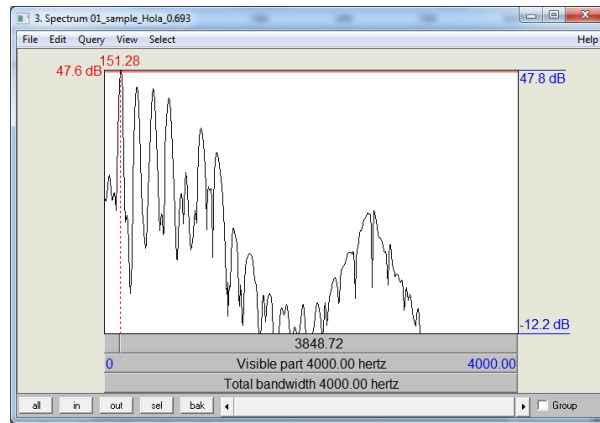


Figura 7: Ejemplo de Espectro FFT.

Espectrograma y Espectrograma 3D

Del análisis espectrográfico pueden extraerse informaciones muy útiles para el tratamiento del sonido, pero utilizando la visualización del espectro FFT, no permite apreciar la evolución de una señal, es decir, los cambios frecuenciales y de amplitud a lo largo del tiempo.

Dado que el histograma frecuencial está dado en un instante de tiempo, si se representan secuencialmente cada uno de los histogramas a lo largo del tiempo, se puede obtener una representación del espectro mucho más rica y visual.

Por ejemplo (figura 8), si se representan en el eje vertical las frecuencias, en el eje horizontal el tiempo, y los valores de la amplitud de las frecuencias como una escala de color (gris por ejemplo), se obtiene el denominado "Espectrograma".

Ahora bien, si en lugar de mostrar los valores de amplitud como puntos se usan como coordenada Z de una representación tridimensional, tendremos un "Espectrograma en 3D", donde se puede apreciar mucho más visualmente la

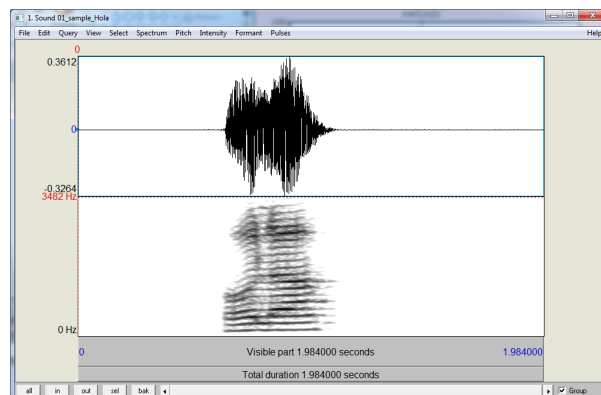


Figura 8: Ejemplo de Espectrograma básico de "hola" con escala de grises.

evolución de la señal tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo. En la figura 9, se visualiza una muestra de sonido en forma de malla en tres dimensiones, representándose en el eje X (de izquierda hacia el centro) el tiempo, en el eje Y (del centro a la derecha) las frecuencias, y en el eje Z la amplitud de la señal.

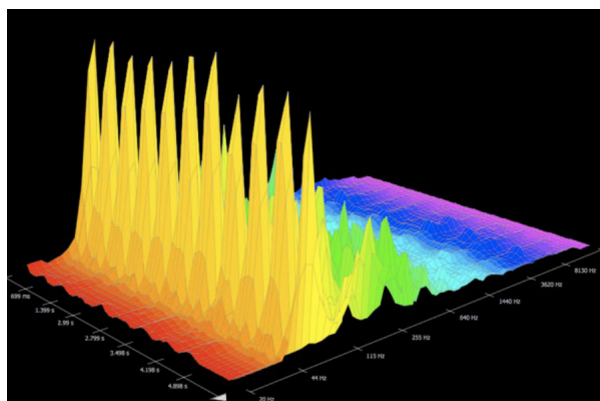


Figura 9: Ejemplo de Espectrograma en 3D de un sonido pulsado de baja frecuencia.

Análisis Melódico y Análisis de Intensidad

A través de la información en el dominio de la frecuencia, se pueden analizar los puntos de las frecuencias que más predominan a lo largo del tiempo. Básicamente la frecuencia predominante durante el habla sonora es la "Frecuencia Fundamental" F_0 , y gracias a su representación visual se puede extraer información muy útil. A esta representación se le denomina "Curva Melódica" (Pitch

Contour), y muestra las variaciones de la frecuencia fundamental de la voz (eje vertical) a lo largo del tiempo (eje horizontal).

Con eso se pueden realizar fácilmente análisis de la melodía de la pronunciación, el acento y la entonación.

Si en lugar de visualizar las variaciones de tono de la frecuencia fundamental, se tienen en cuenta las variaciones de la amplitud, o energía sonora de la señal, se tendrá lo que se denomina "Curva de Intensidad". La representación de la curva de intensidad muestra la variación de la energía (eje vertical) a lo largo del tiempo (eje horizontal).

Como ejemplo combinado con la curva melódica se muestra en la figura 10 ambas curvas (la de intensidad en amarillo) para la realización de tres palabras con espacios entre fonemas y silencios entre ellas para poder apreciar los cortes en las curvas analizadas.

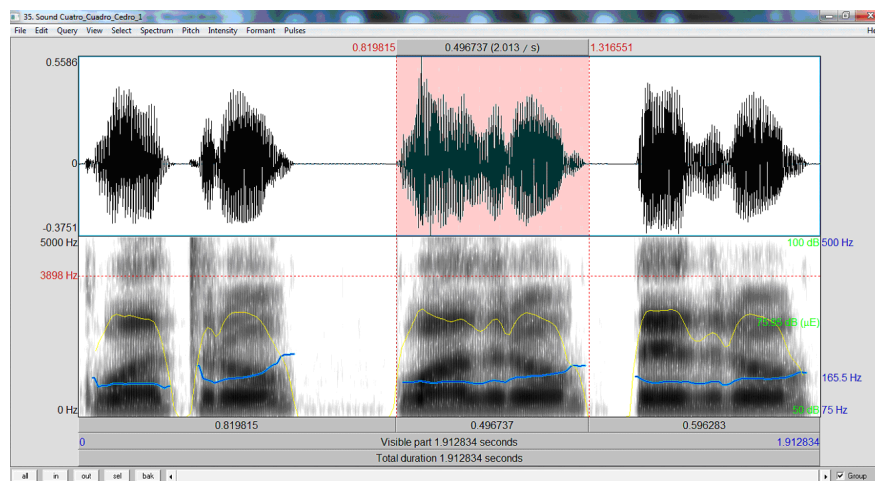


Figura 10: Ejemplo de visualización de la Curva Melódica y Curva de Intensidad de la palabras "cuatro", "cuadro" y "cedro".

El uso de este tipo de representación es el de realizar análisis de la amplitud (intensidad) de la pronunciación, la acentuación, el ritmo y las pausas o silencios.

3.3 Entramado y Enventanado de la Señal

Para respetar las características singulares de la señal de voz, la mayoría de los parámetros utilizados en los sistemas de reconocimiento del habla se calculan basándose en la segmentación en tramas. La voz es un proceso estocástico, esto es, sus variaciones temporales son aleatorias. Por eso, a pesar de que la persona tiene control sobre lo que dice al hablar, debe tenerse en cuenta la aleatoriedad de la señal.

Entramado o "Framing":

Debe recordarse que la voz no es un proceso estacionario, por lo tanto, para hacer abordable el análisis, se utiliza la propiedad de que el espectro cambia lentamente, por lo menos en un espacio corto de tiempo, con que se pueden tomar segmentos cortos de la señal, de forma que se pueda suponer estacionariedad en ellos. Esta suposición permite que la mayoría de los parámetros en los sistemas de reconocimiento sean calculados trama a trama. Dentro de una trama, las características probabilísticas de la señal se consideran, aproximadamente, estacionarias.

Habitualmente en la implementación del entramado de la señal se considera tanto la duración de las tramas (N) como la separación entre tramas consecutivas (M), y para que exista una correlación en el espectro resultante y no se pierda parte de la señal de voz ni que la estimación espectral resultante contenga una componente ruidosa, se hace que haya solapamiento entre las tramas, es decir, que ($M < N$). Cuanto más solapamiento haya ($M \ll N$), la estimación espectral estará más suavizada.

La elección apropiada de N y M depende directamente de la velocidad de articulación (velocidad de cambio de estado del tracto vocal) del sistema de producción de voz. Los valores adecuados para estos parámetros resultarán de alcanzar un compromiso entre la velocidad a la que cambia el espectro, la complejidad del sistema diseñado y la fiabilidad de las medidas.

Enventanado o "Windowing"

Dado que el tratamiento de cada trama por la transformación de Fourier produce ciertas distorsiones espectrales, con el fin de reducirlas se aplica alguna función de ventana con el fin de reducir las distorsiones. Se desea que la función ventana satisfaga, fundamentalmente, dos características: Que posea una alta resolución frecuencial, esencialmente un lóbulo principal estrecho y agudo, y que posea una gran atenuación de los lóbulos laterales con respecto al principal, para que los primeros no afecten al espectro de la señal.

Se muestran en las figuras 11 y 12 dos de las funciones de ventana que mejor satisfacen las características indicadas. Se puede apreciar que la respuesta frecuencial de ambas ventanas (Hamming y Hann) son muy finas y altas en el centro, y que en los bordes poseen una gran atenuación, en concreto la ventana de Hann.

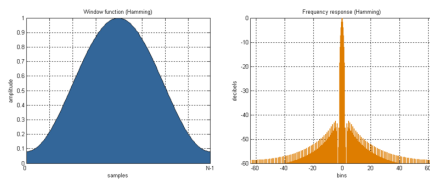


Figura 11: Ventana Hamming

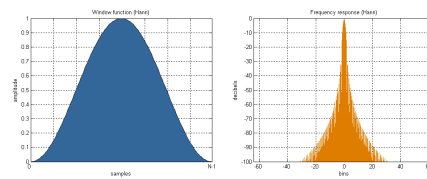


Figura 12: Ventana Hann

3.4 Preproceso

Las muestras de audio se suelen procesar previamente de varias maneras antes de que se extraigan las características de ellas. Esto se realiza, entre otras razones, para aumentar la eficacia de las características cuando son procesadas por algoritmos de aprendizaje, reconocimiento o clasificación.

De las diversas formas de preprocesamiento de la señal, cabe destacar: Eliminación de Silencios, Normalización de Amplitud, Reducción de Samples o "Downsampling", y Preénfasis.

Todos ellos son procesos previos a la utilización de la señal para un análisis frecuencial.

3.5 Extracción de Características en el dominio del Tiempo

Las características referentes al dominio del tiempo son calculadas directamente de la secuencia de muestras que representan la señal digital.

Con el objeto de que el análisis de los datos sea simétrico, es muy común elegir un tamaño de ventana que coincida con el mismo número de muestras para los marcos utilizados en los cálculos de las transformadas discretas de Fourier.

Estas características son extraídas de las ventanas de muestras de tamaño fijo, que van desde unos pocos milisegundos hasta segundos o minutos.

Una lista de las características más interesantes en el análisis del habla:

- **Zero Crossing:** o "Número de Cruces por Cero", se utiliza para detectar inicios de sonidos principales, ignorar silencios, ruidos de corta duración, etc.
- **Strongest Frequency via Zero Crossings:** La "Frecuencia más Fuerte vía cruces por cero" es una medida primitiva de la frecuencia dominante que se calcula basándose en los cruces por cero y la frecuencia de muestreo. Puede proporcionar una forma básica de seguimiento del tono para señales monofónicas que no tengan ruido.
- **RMS - Root Mean Square:** La "Raíz Cuadrada Media" es una medida de distancia aplicada en el contexto del análisis de sonido para calcular la amplitud del audio en una ventana de proceso, por lo que se calcula para cada una de ellas.
- **Relative Difference Function:** La "Función de Diferencias Relativas" es una medida de la cantidad de cambio en una señal relativa a su nivel de señal.
- **Fraction of Low Energy Frames:** La "Fracción de Marcos de Baja Energía" es una característica en la que se toman las ventanas anteriores cuyo RMS está por debajo de un determinado umbral. Esta característica da una idea de la proporción de silencios o silencios cercanos en la porción de señal analizada.
- **LPC - Linear Prediction Coefficients:** Los "coeficientes de predicción lineales", se calculan usando la autocorrelación y la recursión Levinson-Durbin. Es una operación matemática donde los valores futuros de una señal se estiman como función lineal de las muestras anteriores.

Es un método para analizar la señal hablada. Se utiliza para hacer la estimación de los formantes (bandas del espectro correspondientes a las frecuencias de resonancia del tracto vocal), filtrarlos, y estimar la intensidad y la frecuencia del "zumbido" residual que se supone que es la señal de excitación original.

3.6 Extracción de Características en el dominio de la Frecuencia

El que la voz sea en la realidad un proceso estacionario o no, dependerá de la longitud del intervalo de observación (trama) que se utilice.

La señal de voz es una señal de evolución lenta en el sentido de que, cuando se examina en intervalos de tiempo suficientemente cortos (típicamente, entre 10 y 30 ms), sus características son prácticamente estacionarias, y se habla, entonces, de señal casi estacionaria. Sin embargo, vista en intervalos largos (del orden de 1/4 de segundo o más) las características de la señal cambian para reflejar los diferentes sonidos que se están pronunciando, dando lugar a una señal no estacionaria.

Se mencionan a continuación algunos de los diversos parámetros que pueden extraerse a partir de los datos en el dominio frecuencial:

- **Power Spectrum:** La "Energía del Espectro" es un histograma derivado de la DFT que indica las cantidades relativas de energía contenida en varias regiones del espectro frecuencial sobre una ventana de tiempo.
- **Magnitude Spectrum:** La "Magnitud del Espectro" es un histograma donde el valor de cada banda es la raíz cuadrada del valor de la energía del espectro en esa banda. Se utiliza cuando se desea prestar atención a la actividad espectral de baja energía.
- **Strongest Partial:** La "Parcial más fuerte" es la frecuencia central de la banda de magnitud mayor, donde se concentra la mayor energía del espectro. Puede servir como una forma primaria de seguimiento del tono.
- **Spectral Variability:** La "Variabilidad Espectral" es la desviación estándar de los valores de las bandas de la magnitud del espectro. Da una indicación de lo alto que es el espectro y si hay regiones de frecuencia más prominentes que otras.
- **Spectral Centroid:** El "Centroide Espectral" indica el centro de masas de la energía del espectro. Perceptivamente, esta característica indica cuanto es de "brillante" u "oscuro" un sonido.
- **Partial-Based Spectral Centroid:** El "Centroide Espectral Parcial" se basa en los cálculos del centroide espectral, donde en lugar de usar todas las bandas de energía, se utilizan aquellas bandas cuya energía proporciona un pico de altura.
- **Partial-Based Spectral Smoothness:** En la **Suavidad Espectral Parcial** se aplica un algoritmo de ponderación logarítmica sobre los picos espectrales localizados mediante la energía del espectro. Proporciona una idea de la evolución dinámica de la energía.

- **Compactness:** La "compactabilidad" está intimamente relacionada con la suavidad espectral, como lo define McAdams [28]. La diferencia radica en que en lugar hacer el sumatorio sobre las derivadas parciales, la compactación se hace sobre el sumatorio de las bandas de frecuencia de una FFT. Se utiliza como indicador de la ruidosidad de la señal.
- **Spectral Roll-off Point:** La "Atenuación Espectral" se define como la frecuencia por debajo de la cual una fracción (típicamente el 85 % o el 95 %) de la energía acumulada en el espectro está por debajo de este punto. Es especialmente importante en el análisis del habla para diferenciar entre zonas de pronunciación sonoras y sordas.
- **Spectral Flux:** El "Flujo Espectral" se define como la correlación espectral entre ventanas adyacentes. Se utiliza habitualmente como un indicador del grado de cambio del espectro entre las diferentes ventanas.
- **Partial-Based Spectral Flux:** El "Flujo Espectral Parcial" es similar al anterior, pero se calcula utilizando un vector de picos localizados en la magnitud del espectro que se han mantenido a través de las tramas.
- **Method of Moments:** El "Método de los Momentos" es una característica que consiste en los primeros cinco momentos estadísticos de la magnitud del espectro. Estos momentos son el área (de orden cero), la media (primer orden), la densidad espectral de la potencia (segundo orden), el sesgo espectral (tercer orden), y la curtosis espectral (cuarto orden). Aquí la curtosis espectral se usa como indicador de la presencia de series de transiciones y sus localizaciones en el dominio de la frecuencia.
- **Area Method of Moments:** Esta característica trata las series de marcos de datos espectrales como un área o una imagen 2D, la cual es analizada utilizando la técnica del método de los momentos aplicada a las dos dimensiones [16]. La matriz construida consiste en la magnitud del espectro en una dimensión y el número de marco en la otra. Con esto se obtiene una descripción del espectrógrafo y sus cambios durante los tiempos relativamente cortos de los marcos.
- **Mel-Frequency Cepstral Coefficients - MFCC:** Los "Coeficientes Cepstrales de Frecuencia de Mel", se calculan aplicando una serie de bancos de filtros sobre el espectro de frecuencias de una señal. Se utiliza para describir la ventana del espectro de la señal.

Es sobradamente conocido que la información más útil de las frecuencias en la voz humana están dentro del rango de los 100-5000Hz, por tanto, sólo los armónicos de las frecuencias que pertenecen a este rango se utilizan en los espectrogramas. Tras la normalización logarítmica de las amplitudes armónicas de la señal se puede aplicar el filtrado denominado "**Filtrado de Mel**" (Mel-Filtering).

La fórmula de conversión entre la escala de Mel y la frecuencia es:

$$melscale(f) = 2595 \log_2 \left(1 + \frac{f}{700} \right)$$

donde f es la frecuencia en Hz (hercios).

La transformación cepstral se aplica a las salidas del banco de filtros de Mel para obtener los MFCC para cada marco analizado.

El término **cepstrum** es indicativo de haber realizado una transformación inversa del espectro (obsérvese la inversión intencionada del orden de las primeras letras con respecto a "spectrum"). La variable independiente del cepstrum se denomina **quefrecy** (proveniente de la variable inglesa "frequency", también invertida) y tiene carácter temporal.

4. Revisión del Estado del Arte y Aplicaciones Prácticas

En este apartado se ha hecho una revisión del estado del arte de diversas técnicas, trabajos y aplicaciones relacionadas con el tratamiento del sonido, extracción de características, clasificación y reconocimiento, uso de sensores adicionales, visualización, educación, rehabilitación de la voz, etc.

Según el tipo de técnica o aplicación práctica, se han organizado en diferentes categorías, cada una con una serie de trabajos analizados. Se revisan o destacan además las aplicaciones prácticas (y posibles) que surgen como consecuencia en alguna medida de la visualización de los parámetros extraídos de las señales del habla, o de sensores aplicados al aparato fonador.

4.1 Extracción de Características

El primer paso para realizar buenas aplicaciones prácticas basadas en las señales acústicas, es realizar una buena extracción de características, y con ellas posteriormente, realizar algún tipo de clasificación o reconocimiento.

Se destaca aquí el análisis de un trabajo, "Speech Recognition Experiments with Silicon Auditory Models" [25] en el que se plantea el diseño de un circuito electrónico (microchip) dedicado a la extracción de características de una señal de audio en tiempo real. El sistema utiliza modelos de circuitos analógicos de audición biológica para calcular las características del sonido.

El chip diseñado se considera de propósito especial para la conversión analógica a digital de las señales de audio. La conversión se lleva a cabo en varias etapas de pre-procesamiento auditivo en el dominio analógico antes de la digitalización propiamente dicha.

Como ejemplo demostrativo, los autores aplican el sistema a un reconocedor de voz capaz de reconocer unas 13 palabras independientes del hablante, y se plantean la idea de disponer en paralelo estos chips, configurados cada uno de ellos de forma diferente, para producir diferentes extracciones de características en respuesta a la entrada analógica, y así poder mejorar la respuesta al reconocimiento del habla.

4.2 Clasificación y Reconocimiento

Se han revisado varios trabajos centrados en la clasificación de los patrones que se pueden generar a partir de los vectores de características, entendiendo por clasificación cualquier método que permita la comparación de esos vectores de datos de entrada con otros para determinar la clase de cada uno de ellos.

Dentro del campo de la clasificación de las características obtenidas se incluye el reconocimiento automático del habla (ASR - Automatic Speech Recognition) [48,5], o incluso la utilización de representaciones en forma de grafos para la clasificación del habla de un gran número de personas a la hora de crear sistemas de reconocimiento adaptables independientes del individuo [21].

Aunque el trabajo aquí desarrollado se centra principalmente en los sonidos del habla, existen numerosos métodos de clasificación que son aplicables en esta área, con lo que se revisan algunos que tratan del tema de forma indirecta, como por ejemplo el trabajo "A Method of Similarity Measure and Visualization for Long Time Series Using Binary Patterns" [26] que analiza un sistema de representación y de reducción de la dimensionalidad de series temporales, como por ejemplo las ondas de sonido, y medir su similitud con determinadas funciones de distancia. El mapa de bits de series temporales está basado en el "juego del caos" y se propone una versión para generar mapas de bits de largas serie temporales, lo cual puede ser útil tanto para la representación de los sonidos del habla como para realizar la clasificación de los patrones obtenidos (mapas de bits).

Una técnica que podría ser una herramienta para ayudar en el etiquetado de catalogación de grandes juegos de palabras se describe en "A Novel Visualization Tool for Manual Annotation when Building Large Speech Corpora" [24], en el que se describe la reducción de una señal acústica pregrabada en regiones, las cuales se van uniendo según su similitud y distancia, construyendo un **Dendograma de Sonido** que facilita tanto la detección y visualización de los límites de fonemas, como la anotación manual de los mismos a la hora de construir grandes corpus de palabras.

En el trabajo "Fast Algorithm for Automatic Alignment of Speech and Imperfect Text Data" [46], se trata el problema de **generar la segmentación del habla basado en textos que no se ajustan al sonido**. Esto es importante para muchas aplicaciones de procesamiento del habla, como los modelos de entrenamiento acústicos ligeramente supervisados, sistemas de indexación multimedia para permitir el acceso web a los programas de radio y televisión, anotación automática y segmentación de audio-libros para personas invidentes, generación de títulos y etiquetas para programas de televisión, indexación de vídeos de presentación, etc.

En este trabajo, describen una posible solución al problema del alineamiento rápido en una sola pasada, de las transcripciones imperfectas del habla, con el objetivo de crear un software que permita la creación rápida de subtítulos para los programas y series de televisión según los textos proporcionados. Los autores desarrollan un algoritmo de segmentación sencillo de implementar, que utiliza la transcripción original durante el proceso de segmentación. Las palabras se alinean en la misma secuencia que aparecen en el texto original, pero con la posibilidad de eliminar aquellas palabras que no están contenidas en el audio. Sin embargo, las palabras del audio que no aparecen transcritas en el texto son

ignoradas automáticamente durante la segmentación. La capacidad de saltar partes del audio que no se corresponden con palabras habladas, o expresiones que no aparecen en el texto original, o incluso silencios, se realiza por medio de un "modelo de relleno".

En el trabajo "Graphic Representation Method and Neural Network Recognition of Time-Frequency Vectors of Speech Information" [48], los autores introducen la **componente temporal dentro de los sistemas de reconocimiento del habla** para salirse de los convencionalismos típicos de este campo.

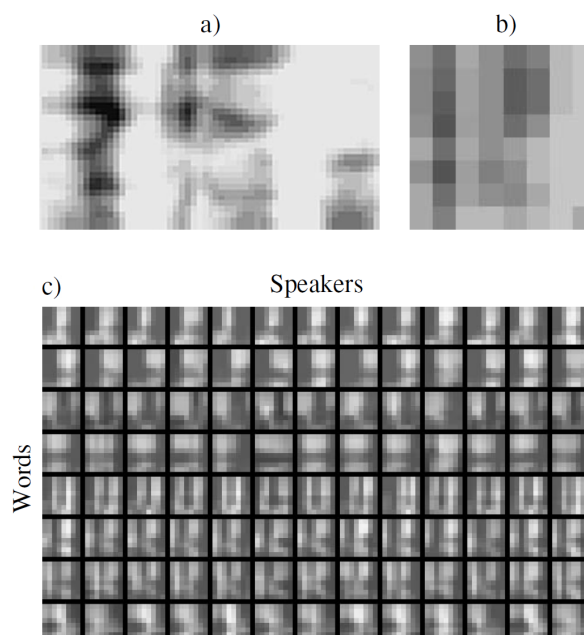


Figura 13: Escalado final y normalización de a) un espectrograma de una palabra, a b) un vector de 8x8 características. c) Ejemplos de representaciones de vectores de diferentes palabras y personas.

En el análisis del sonido se utilizan varios tipos de representación en el dominio del tiempo y de la frecuencia, las cuales son convenientes para proporcionar una sensación visual del sonido a la persona, pero por otra parte son discutibles ese tipo de representaciones a la hora de utilizarlas en problemas de reconocimiento del habla.

En la mayoría de los sistemas de reconocimiento, el sonido se considera como un flujo secuencial de vectores de características en el dominio frecuencial. Esos vectores contienen normalmente datos cepstrales y sus derivadas (primer y segundo orden). Los datos cepstrales se construye a partir de la normalización

de los datos frecuenciales aplicando una función logarítmica y una transformada discreta del coseno (DCT) a los componentes de amplitud de la transformada rápida de Fourier (FFT) que se aplica a la señal de entrada de audio en ventanas Hamming típicamente de 20-30 ms.

Los autores consideran que es posible clasificar o reconocer las palabras basándose solamente en la distribución de la energía en tiempo y frecuencia, en lugar de considerar detalles de la información propia del sonido, organizando los vectores de características adecuadamente y usando reconocimiento de patrones mediante redes neuronales.

Desarrollan una base de datos de piezas bidimensionales de transformaciones de ondas "wavelets" con los datos de baja frecuencia (son más estables) de los componentes de frecuencia y tiempo para utilizarla como base para la clasificación en la red neuronal.

Han demostrado experimentalmente que la resolución óptima para las piezas (desde el punto de vista del reconocimiento posterior con la red neuronal) es de 8×8 , y para mejorar el reconocimiento de los vectores, además, se normalizan a cero expectativa y varianza unitaria, con lo que queda una matriz como la que se muestra en la figura 13. Cada uno de los vectores se puede organizar en una clase concreta que facilite posteriormente su búsqueda/clasificación por el sistema.

En el trabajo "FastDTW: Toward Accurate Dynamic Time Warping in Linear Time and Space" [42], se plantea la técnica de **Alineamiento Temporal Dinámico Rápido** o **FastDTW**.

Se diseña el algoritmo "FastDTW", en el que se introduce la idea de **realizar una aproximación que evite el sistema de "fuerza bruta" de la programación dinámica del algoritmo DTW clásico**. Esto se consigue utilizando una aproximación multi-nivel.

El alineamiento temporal no-lineal, del inglés "Dynamic Time Warping" (DTW), es en sus orígenes, una técnica aplicada en el reconocimiento automático del habla (Automatic Speech Recognition - ASR), para solucionar los problemas que surgían a la hora de comparar los patrones de datos de diferentes grabaciones para la misma palabra o conjunto de palabras pronunciadas.

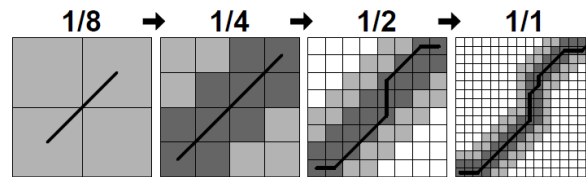


Figura 14: Diferentes resoluciones evaluadas en la ejecución del algoritmo FastDTW.

Principalmente, en la comparación de patrones se tenían problemas de falta de sincronización a lo largo del tiempo (alineamiento temporal) de las diferentes

muestras, y también de variabilidad en el tiempo de las pronunciaciones, sobre todo en la duración de los fonemas (grupos fónicos) obtenidos tras el procesamiento de esas grabaciones [37].

En FastDTW, las series temporales se toman inicialmente muestreadas con una resolución muy baja, buscándose una ruta de alineamiento para esa resolución. La ruta obtenida, de más baja resolución, se "proyecta" sobre las series temporales muestreadas en una resolución mayor. Se realiza el proceso de forma incremental hasta llegar a la resolución máxima de las muestras originales, es decir que, la ruta proyectada se refina y proyecta de nuevo sobre una resolución de datos mayor, continuando el proceso de refinamiento y proyección hasta que se haya encontrado una ruta de alineamiento para la máxima resolución de las series temporales.

Para refinar la ruta proyectada, se ejecuta el algoritmo DTW con restricciones específicas, donde sólo sean evaluadas las celdas que se encuentren en la ruta de alineamiento proyectada (celdas sombreadas más oscuras en 14). Esto va a permitir encontrar la ruta óptima a través del área de la ruta de alineamiento proyectada desde una resolución más baja.

En este trabajo, "Dynamic Estimation of Phoneme Confusion Patterns with a Genetic Algorithm to Improve the Performance of Metamodels for Recognition of Disordered Speech" [5], se presenta un enfoque para **obtener estimaciones de fonemas aplicando optimizaciones con algoritmos genéticos (GA) para mejorar el rendimiento en el reconocimiento automático del habla (ASR)** en personas con disartria (trastorno de la articulación causado por lesiones del sistema nervioso que impiden un adecuado control muscular).

Las personas con disartria hablan de forma diferente al habla normal, ya que se ve afectada por anomalías de la respiración y la articulación, que hace que el reconocimiento automático del habla tenga fallos de detección o que disminuya su rendimiento considerablemente. Las anomalías reducen la inteligibilidad del habla y restringen el repertorio orador de la persona, por lo que algunos sonidos o fonemas no pueden ser pronunciados o articulados correctamente. Esto provoca que en la detección automática del habla aumente el número de borrados, inserciones y sustituciones de fonemas a la hora de su alineamiento o clasificación.

Los autores aplican varias técnicas en el diseño de un modelo de reconocimiento del habla utilizando redes neuronales, algoritmos genéticos, y modelos ocultos de Markov.

En el diseño, la codificación de un cromosoma (figura 15) para el algoritmo genético contendrá 10 genes con los pesos de las 10 matrices de confusión de fonemas utilizadas, 10 genes para los factores de escala de la gramática utilizada s_k , y 2 genes para almacenar las longitudes de los contextos de inserción Q y R .

En este estudio, "A survey of tagging techniques for music, speech and environmental sound" [13], se plantean una serie de cuestiones acerca del **etiquetado del sonido**, entendiendo etiquetado por la caracterización, clasificación e identificación de diferentes tipos de sonidos para almacenarlos en un banco de

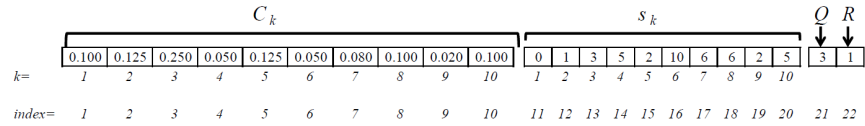


Figura 15: Cromosoma que representa los parametros de los Metamodelos y la estimación dinámica de la matriz de confusión.

datos. Posteriormente el banco de datos será utilizable para la búsqueda de las características de sonido concreto y poder identificarlo de entre todos.

De entre todos los tipos de sonidos, la música, el habla, y los sonidos ambientales son las áreas principales de investigación.

El objetivo de los autores es proporcionar una visión general sobre el estado del arte de estas tres áreas, una serie de ejemplos de aplicaciones de etiquetado del sonido, técnicas de etiquetado bajo un enfoque manual, automático y semi-automático, la enumeración de diferentes conjuntos de datos publicados como posibles bancos de sonidos.

La necesidad de disponer de una base de datos de sonidos debidamente caracterizados y etiquetados es vital para el desarrollo de aplicaciones de reconocimiento, en concreto, la base de datos sería utilizada para dar respuestas a preguntas mediante técnicas de minería de datos.

4.3 Aprendizaje de Idiomas y Corrección de la Pronunciación

En lo referente a las posibilidades de aplicación para mejorar el aprendizaje de idiomas, la corrección de la pronunciación, o incluso corregir el propio idioma, surgen numerosos trabajos de investigación que tratan de ayudar en este campo. Se unen además, los estudios acerca de la fisiología de la comunicación humana y la producción del habla, consiguiendo incluso sistemas de visualización articulatorios para el entrenamiento de la pronunciación asistido por ordenador.

En el trabajo, "Visualizing Syllables: Real-Time Computerized Feedback Within a Speech-Language Intervention" [12], se experimenta sobre una serie de **ejercicios de pronunciación de palabras con visualización de las sílabas, el tono y la amplitud** enfocado a personas con problemas cognitivos (niños con autismo) en los que la información visual es la manera más destacada y efectiva de llevar a cabo terapias del habla.

En la figura 16 se muestran cuatro ejemplos con ejercicios de pronunciación de una palabra de tres sílabas. Las sílabas de la palabra a ejecutar se representan diferenciadas, indicando con la posición X el tiempo o momento de la pronunciación, con la posición Y el tono, y el tamaño o área de las formas el volumen de la pronunciación.

En el caso **a)** las formas de las sílabas son formas circulares rellenas, siendo la de color verde más oscuro la realización correcta (arriba), y la de verde menos oscuro (debajo) la realización del niño. En el caso **b)** las formas de las sílabas

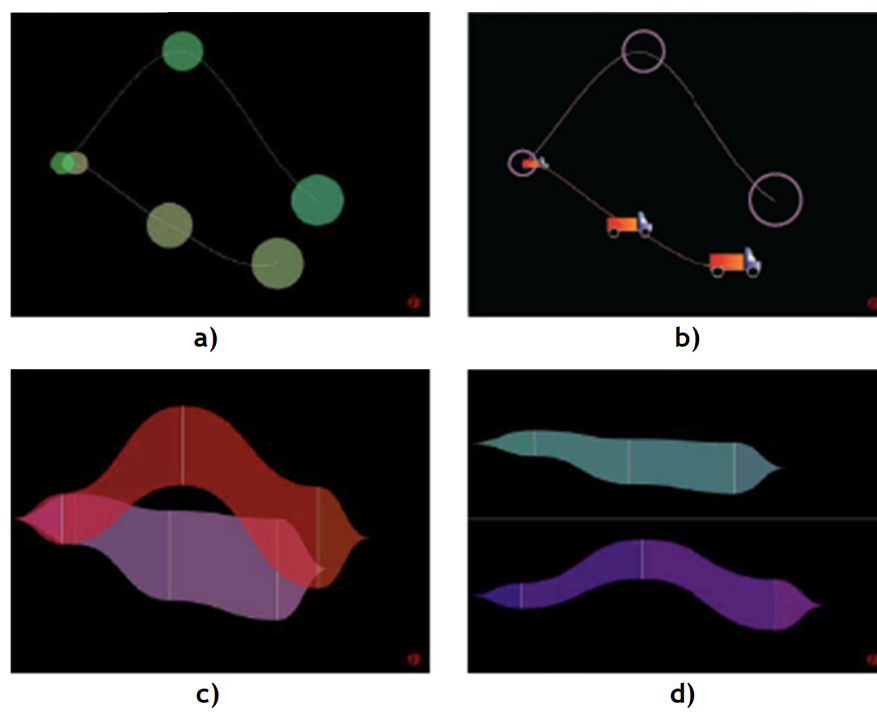


Figura 16: Ejemplos de visualización con ejercicios de prosodia.

a realizar son formas circulares sin rellenar, y la realización del niño se muestra con imágenes de un camión, el objetivo aquí es encajar la imagen dentro del círculo para que la pronunciación sea correcta. En **c)** las sílabas se marcan con una barra vertical en color blanco, el grosor (altura) de la forma es el volumen de la pronunciación, la realización correcta (arriba) es la forma de color rojo-anaranjado, y la realización del niño (debajo) es la forma de color morado. El caso **d)** es la visualización separada en paralelo de las formas del caso **c)**.

Con este tipo de visualizaciones se muestran de una forma clara y amigable tanto las condiciones de ejecución de los ejercicios de pronunciación, como la realización de la pronunciación en tiempo real que hace una persona adulta o un niño, aumentando la percepción de su propia pronunciación con la información visual mostrada, y mejorando notablemente los resultados de la terapia.

Como estudio teórico-experimental sobre el origen del habla, el trabajo "Formation of Language-Specific Characteristics of Speech Sounds in Early Ontogeny" [35], prueba que **los sonidos del habla en los niños de diferentes grupos étnicos durante el primer año de vida no tienen diferencias significativas en la formación de su repertorio de sonidos**. Se comprobó que los sonidos básicos suenan similar y aparecen en el mismo orden en todos los niños de diferentes grupos étnicos.

Una serie de trabajos demostraron que la sucesión de la aparición de las vocales, así como determinadas consonantes palatales, dorsales y velares, está relacionada con la formación de los receptores de vibración de la superficie dorsal de la lengua, que hacen posible el proceso de articulación. El repertorio total de sonidos del habla se organiza durante el primer año de vida durante el transcurso de los balbuceos y parloteos. Al mismo tiempo, surge la cuestión de la formación y organización específica del idioma, junto con los sonidos básicos, del repertorio de fonemas de un niño. Esto, a su vez, plantea la cuestión de la determinación hereditaria o ambiental de la naturaleza específica de una lengua, y en relación con esto, las peculiaridades de la formación específico de la forma de hablar típica de idioma.

En este trabajo, "Combined X-ray and facial videos for phoneme-level articulator dynamics" [7], aparte de realizar un estudio sobre la dinámica de los movimientos internos (articulaciones) y externos (expresiones faciales) que están involucradas en el habla, los autores consiguen **implementar un modelo en 3D de una "cabeza parlante"** (figura 17), **que genera en tiempo real tanto la producción de los sonidos de los fonemas, como la visualización de los mismos durante su ejecución**.

En la figura 17 se muestran en **a)** y **b)** las secciones internas de las articulaciones que afectan a la fonación (úvula, lengua, mandíbula, paladar, frente alveolar, dientes, faringe), así como las secciones externas de la cara en **c)** que afectan a la expresión (cráneo, piel, labios), y en **d)** el resultado final. Todos los datos de los diferentes elementos se han capturado inicialmente y reconstruido después para el modelo en 3D.

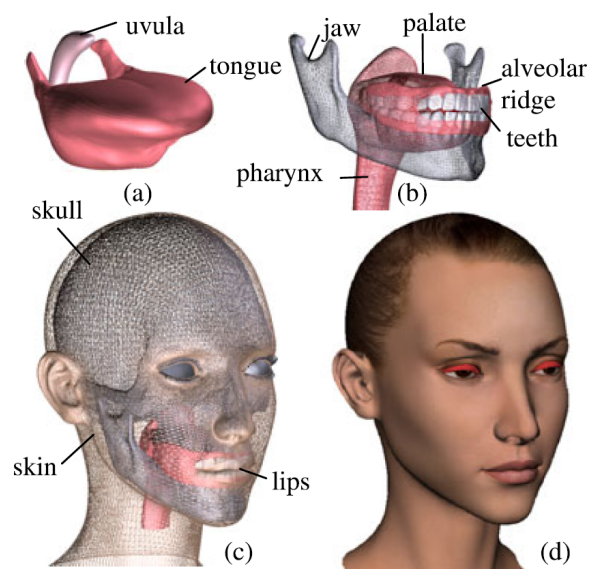


Figura 17: Modelado de cabeza parlante en 3D, que simula en tiempo real los sonidos, movimientos y expresiones del habla.

Para la realización de este trabajo se desarrolla una base de datos con la información de las posiciones de las articulaciones a nivel de fonema y se sintetizan de nuevo en la cabeza parlante en 3D durante la realización de palabras ya que se sincroniza la segmentación de los fonemas de un habla natural con el virtual.

4.4 Rehabilitación del Habla

En "Game System for Speech Rehabilitation" [41], los autores han diseñado un entorno de trabajo (framework) integrado con un motor de juegos para facilitar el **desarrollo rápido de juegos interactivos enfocado a la rehabilitación del habla**. Combinando avances tecnológicos recientes en el seguimiento y rastreo del movimiento, unido a la tecnología ya existente de los juegos interactivos, se han desarrollado novedosas herramientas clínicas que pueden mejorar los puntos débiles de los métodos de rehabilitación tradicionales.

El framework desarrollado se basa en la integración del motor de juegos "Unity 3D Game Engine" con un hardware que sirve como sistema de seguimiento y rastreo del movimiento (Wave motion tracking system) [1], el cual es el responsable del seguimiento en tiempo real de los sensores fijados en diferentes puntos de la boca del paciente (labios, lengua, paladar, traquea, y cabeza como referencia).

Las medidas recogidas son canalizadas a una capa de software intermedia que procesa los datos de movimiento y los convierte a su vez en instrucciones de

movimiento para los objetos del juego. Por último, las instrucciones se envían al motor de juegos que se encarga de generar la visualización final en la pantalla del paciente.



Figura 18: Dispositivo NDI-Wave y tres capturas del juego de la abeja.

Un ejemplo de juego enfocado a la rehabilitación sería el de “guiar a la abeja”, en el que el paciente debe guiar a una abeja hacia las flores que se encuentra por su camino, y debe aterrizar en ellas utilizando el movimiento de la lengua.

En la figura 18 pueden verse unas imágenes del dispositivo hardware utilizado, así como tres capturas de pantalla del juego.

En esta versión, el paciente utiliza la lengua para guiar a la abeja a lo largo de los ejes cardinales ya que los movimientos básicos de la lengua es una de las fases más tempranas en la rehabilitación tras un ictus. Aquí cada tarea completada con éxito hace que el usuario gane puntos. El médico/terapeuta del habla, puede configurar el juego en función de las habilidades específicas que deba practicar cada paciente, como por ejemplo, simplificar los movimientos (arriba/abajo o izquierda/derecha), o puede dificultarlos incluyendo obstáculos que deban rodearse, o incluir “enemigos” que se deban evitar, escapar de ellos, etc.

En este estudio, “Joining Data Mining with a Knowledge-Based System for Efficient Personalized Speech Therapy” [10], se presenta un **sistema software “TERAPERS”** que aprovecha las técnicas de minería de datos, del conocimiento base de los sistemas expertos, y de la extracción de características del

habla para ayudar y asistir en las decisiones que deben tomar los terapeutas del habla ante pacientes con desórdenes del habla. En concreto se utiliza para establecer una terapia personalizada a cada paciente en función de la información analizada y recomendada por el sistema.

Este sistema se utiliza desde Marzo de 2008 por los terapeutas del Centro Regional de Terapia del Habla de Suceava.

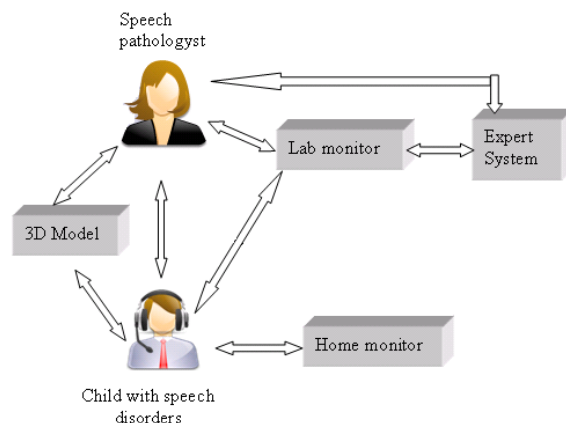


Figura 19: Esquema de bloques del sistema experto de apoyo a las terapias de desórdenes del habla.

4.5 Educación de la pronunciación en personas sordas

Este apartado se separa de la rehabilitación del habla, pues aunque sean similares, se considera un caso aparte más especializado dada la dificultad del problema, ya que conseguir que una persona sorda, que no se oye a sí mismo, pronuncie correctamente es una tarea compleja, pues las aplicaciones de software deben disponer de sistemas de visualización bastante potentes, incluso deben apoyarse en algún hardware externo adicional para complementarse; en concreto sistemas de detección de movimientos de la cara y/o de generación de expresiones faciales, etc.

En "Similarity structure in visual speech perception and optical phonetic signals" [20], se plantea la **necesidad de integrar en el reconociendo del habla la detección de imágenes visuales del interlocutor** para extraer ciertas señales que complementen la señal de habla del mismo.

En numerosas ocasiones (y algunos idiomas), es necesario ver los labios del hablante para llegar a comprender lo que oímos, bien por condiciones de ruido ambiental, o porque la pronunciación de fonemas en ese idioma es muy similar entre sí y se distinguen mucho mejor si "vemos" su pronunciación.

Se utiliza un sistema de escáner en 3D para detectar diferentes posiciones faciales durante la pronunciación de diferentes palabras.

En este trabajo se crea una base de datos con los datos obtenidos del análisis 3D de las expresiones faciales relacionados con los sonidos pronunciados en cada momento, con el objetivo de categorizarlos.

Intenta demostrar que las categorías fonéticas, que a menudo se consideran conceptos mentales con relaciones arbitrarias con las expresiones físicas, sí que tienen relación y que existe una similitud entre ellas.

El trabajo "Correct Speech Visemes as a Root of Total Communication Method for Deaf People" [38], describe el desarrollo de **una herramienta para crear correctamente visemas del habla y generar modelos de caras en los que las personas sordas hagan la lectura de los labios como forma principal de comunicación.**

Los análisis de la comunicación que utilizan las personas sordas concluyen que al 80La gente sorda quiere interactuar libremente con personas de habla normal, y prefieren la comunicación oral frente al lenguaje de signos.

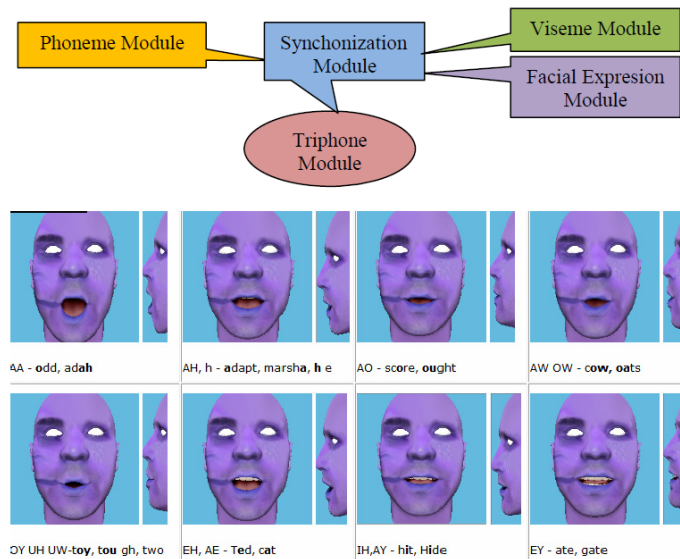


Figura 20: Esquema de los módulos del sistema (arriba), y ejemplos de caras con algunos visemas generados (abajo).

La aplicación en conjunto es una potente herramienta que proporciona una buena sincronización automática de los labios con los sonidos que se pronuncian (o deben pronunciar), tiene capacidades de edición de detalles de expresión, y permite generar la visualización en secuencia de dicha pronunciación enfocada

a que personas sordas puedan “leer” las expresiones generadas (los labios) y entender lo que se está diciendo.

5. Aplicaciones y Librerías Software

5.1 Librerías de Software

Se incluyen aquí las librerías o aplicaciones informáticas que permiten su utilización de forma embebida en otras aplicaciones propias.

- **jAUDIO - A Feature Extraction Library** [32,34]

Es un framework pensado para la extracción de características acústicas, diseñado para facilitar el cálculo de características a partir de una señal de audio.

Este sistema proporciona una biblioteca de algoritmos de análisis de sonido preparados para su utilización desde otras aplicaciones de forma embebida (como librería externa), de forma independiente a través de la línea de comandos, o para su utilización manual gracias a la interfaz gráfica que implementa.

La extracción de características de las señales de audio es de vital importancia en muchos proyectos o investigaciones en los que se deben procesar este tipo de señales acústicas, bien para temas musicales, para el habla humana, análisis de sonidos de animales, o de ruidos y sonidos cotidianos.

jAUDIO está implementado en Java para que sea utilizable en cualquier plataforma y a la vez extensible mediante un sistema de plugins agregados.

El soporte de jAUDIO para calcular características permite que sean multidimensionales, sobre todo para agrupar aquellos cálculos que generan múltiples datos como resultado, como por ejemplo los coeficientes cepstrales (MFCC - Mel-Frequency Cepstral Coefficients) o los coeficientes de predicción lineal (LPC - Linear Prediction Coefficients), esto permite además generar cálculos de derivadas y otras meta-características que contendrán el mismo número de dimensiones que sus originales.

- **jMIR: TOOLS FOR AUTOMATIC MUSIC CLASSIFICATION** [33,31]

jMIR es una suite de herramientas de software desarrollado para su uso en investigación centrada en la recuperación de información musical (MIR) y por herencia en la clasificación automática de esa información.

El paquete está compuesto por una serie de componentes o aplicaciones independientes, multiplataforma y de código abierto, interconectadas entre sí por archivos de datos. Incluye los componentes de extracción de características “jAudio”, “jSymbolic” y “jWebMiner”, el sistema de meta aprendizaje ACE, el formato ACE XML como intercambio de información mediante ficheros, el software de gestión de datos musicales “jMusicMetaManager” y los conjuntos de datos musicales “Codaich”, “Bodhidharma MIDI” y “SAC”.

Los principales objetivos que hay detrás de jMIR es el de proveer a los investigadores musicales de un conjunto de herramientas "listas para usar" sin importar el nivel de formación técnica que posean, fomentar las investigaciones que derivan de los estudios del sonido, simbolismos y cultura musical, y sobre todo del desarrollo de la recuperación de información musical y la realización de investigaciones de clasificación de música original.

Aunque este conjunto de software se ha utilizado y utiliza en numerosos trabajos sobre la clasificación musical, es fácilmente adaptable y configurable para realizar trabajos de clasificación de la voz.

- **jTRACE - model of speech perception and spoken word recognition** [44,43]

jTRACE es un software multiplataforma desarrollado en JAVA, de libre uso, y con disponibilidad del código fuente mediante petición por correo electrónico. Es una reimplementación del software desarrollado en C denominado TRACE, con muchas mejoras y un rico interfaz gráfico que permite su manejo a cualquier usuario inexperto en la programación.

La utilidad principal de jTRACE es para investigadores y terapeutas relacionados con el habla, pues permite realizar tareas de simulación de los procesos que intervienen en el habla, en la percepción y en el reconocimiento de palabras, en concreto se utiliza para recrear modelos psicológicos de los procesos del habla, analizar su comportamiento, simular problemas de reconocimiento o dificultades de cognición, etc.

El modelo TRACE es una red conexionista con una capa de entrada y tres capas de procesamiento: capa de características (a partir de la representación pseudoespectral de entrada), capa de fonemas y capa de palabras.

- **Vamp** [15]

La librería "Vamp" es un sistema de plugins para el procesamiento de señales de audio.

Permite extraer información descriptiva de los archivos de audio, típicamente se utiliza como sistema de plugins para el análisis y la extracción de características de las ondas de sonido.

Un plugin desarrollado dentro de Vamp es un módulo de programa compilado, que debe ser cargado desde una aplicación "host" para poder ser utilizado. No son plugins que generan efectos o procesan el audio, sino que generan información simbólica del sonido ya que extraen datos característicos de las señales de audio, como por ejemplo calcular los momentos en los que una nota se activa, visualizar los espectrogramas del audio, o sus curvas de potencia, frecuencia fundamental, etc.

Los plugins de Vamp pueden utilizar los bloques de una señal de audio de dos formas diferentes, en el dominio del tiempo, y en el dominio de la frecuencia, y generar las salidas de datos característicos en función del cálculo o los cálculos para los que cada plugin esté programado.

5.2 Aplicaciones para el Tratamiento y Visualización del Sonido

- **Sonic Visualiser: An Open Source Application for Viewing, Analyzing, and Annotating Music Audio Files [6]**

La aplicación "Sonic Visualiser" sirve para la visualización y análisis del contenido de archivos de audio. Está diseñada como aplicación "host" de plugins "Vamp" comentada anteriormente en el punto 12.

La intención de este software es el de servir como aplicación para la investigación y el estudio de señales de audio, en lugar de un mero reproductor. Está enfocada particularmente para musicólogos, investigadores en el campo del procesamiento de señales, y en general a cualquiera que le interese "ver lo que se oculta" dentro de una señal acústica.

La aplicación es software libre, disponible en los sistemas operativos más utilizados: Linux, Mac OS/X, Windows.

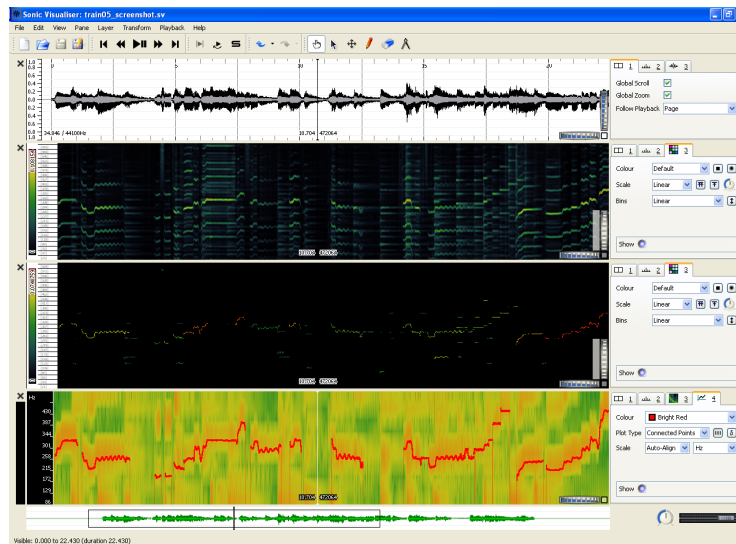


Figura 21: Vista de la aplicación "Sonic Visualiser".

Como "Sonic Visualiser" utiliza la tecnología de plugins de "Vamp", siendo una aplicación "host" para ellos, pueden integrarse todos los plugins que sean necesarios para poder realizar los procesos, cálculos y análisis que se deseen sobre las señales de audio. Incluso pueden programarse extensiones propias utilizando el kit de desarrollo de "Vamp" para el desarrollo de plugins.

- **Sonogram: Acoustical Frequency Analysis Tool [9]**

Sonogram es una aplicación de tratamiento de ondas de audio la cual transforma el audio digitalizado en el dominio del tiempo (samples) a información en el dominio de la frecuencia aplicando métodos de análisis de Transformada

Rápida de Fourier (FFT), Coeficientes de Predicción Lineal (LPC), Análisis Cepstral y transformaciones de Ondas (Wavelets). Soporta los formatos de audio y video más comunes, y permite visualizar toda la información extraída en un formato gráfico de 2D, o de 3D en el caso de las FFT. El análisis de la señal acústica se puede configurar de diversas formas para ajustar los resultados gráficos, los cuales pueden exportarse en formatos de datos CSV, o gráficos vectoriales SVG o de puntos BMP, PNG. Está desarrollada en Java, con lo que puede funcionar en cualquier plataforma que lo soporte.

En la figura 22 se muestran varias capturas de pantalla de la aplicación durante su ejecución, siendo: **a)** Ventana Principal con la vista de espectrograma y vista de onda (debajo); **b)** Diálogo de configuración y ajuste de parámetros; **c)** Ventana de forma de onda; **d)** Ventana de Fourier (FFT); **e)** Ventana con los Coeficientes de Predicción Lineal (LPC); **f)** Ventana la transformación en Octavas de la Onda (Wavelet); **g)** Ventana con los Coeficientes Cepstrales; **h)** Ventana con el dialogo de información;

■ **Praat: doing phonetics by computer** [2]

Praat es uno de los softwares más utilizados para el tratamiento de las señales acústicas del habla. En su versión actual en estos momentos, la versión 5.4.12, posee una serie de características que la hacen muy potente:

- Análisis del Habla.
- Síntesis de Habla.
- Etiquetado y Segmentación.
- Experimentos.
- Algoritmos de Aprendizaje.
- Generación de Estadísticas.
- Generación de Gráficos y visualizaciones.
- Programación automatizada.

El análisis que se puede hacer con Praat permite reconocer no solamente la frecuencia fundamental de la onda sonora sino también reconocer los distintos formantes de una letra de tal manera que, a partir de lo que se ve en la pantalla es posible reconocer los sonidos que conforman un texto hablado.

Se muestran en las figuras 23 y 24, las realizaciones de tres palabras similares en cuanto a pronunciación, con rasgos característicos diferenciados en una de sus consonantes y en una vocal. Se puede ver la forma de onda original, debajo el espectrograma asociado con una línea azul que se corresponde con la frecuencia fundamental de la pronunciación del hablante, y la línea amarilla con la entonación de cada fonema. Los puntos rojos de la figura 24 son los formantes de los sonidos, pudiendo reconocer a partir de estos de qué letra se trata ya que un sonido vocálico tendrá los formantes más definidos que los sonidos de las consonantes, sobre todo los sonidos sordos como la "s" o a la "f", que los tendrán más difuminados debido a que en la fonación se genera ruido. Además en la figura 24 se muestra la segmentación en niveles, separadas en alófonos, sílabas y palabras.

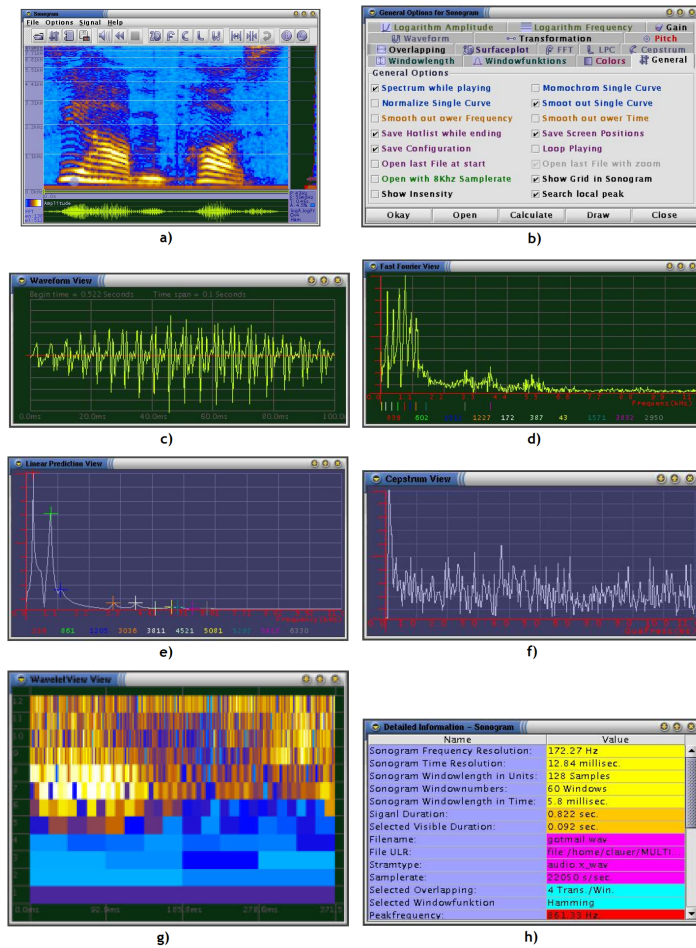


Figura 22: Varias vistas de la aplicación "Sonogram".

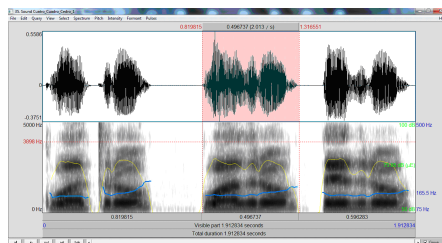


Figura 23: Praat: Realización de tres palabras de pronunciación similar.

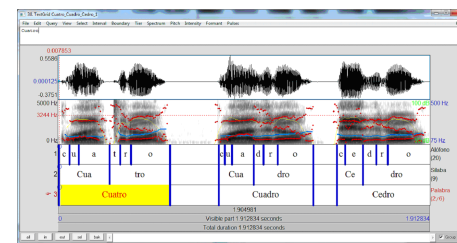


Figura 24: Praat: Segmentación en niveles: alófono, sílaba, y palabra.

5.3 Aplicaciones para la Educación y Entrenamiento de la Pronunciación

■ Phonetics - Sounds of Speech [36]

Este es un software inicialmente desarrollado en Flash para su utilización a través de internet, aún accesible desde un submenú de su página web <http://soundsofspeech.uiowa.edu/spanish/spanish.html> [36], actualizado para ser utilizado como aplicación móvil, descargable para los principales sistemas operativos "iOS" y "Android". Está disponible para los idiomas Inglés, Español y Alemán. En ella se puede estudiar y sobre todo **ver** la fonética del idioma correspondiente por medio de la selección de las consonantes y vocales, organizadas y clasificadas en diferentes categorías según la forma de articular sus sonidos. Se complementa con la visualización de animaciones gráficas de la mecánica articulatoria de cada uno de los fonemas, con secuencias paso a paso de la animación y con videos mostrando la producción del fonema tanto de forma aislada como en diversas palabras que lo contienen.

En la figura 25 se muestra un ejemplo con la selección de una consonante por el modo nasal de producción del sonido, y la serie de pasos necesarios para su correcta articulación.

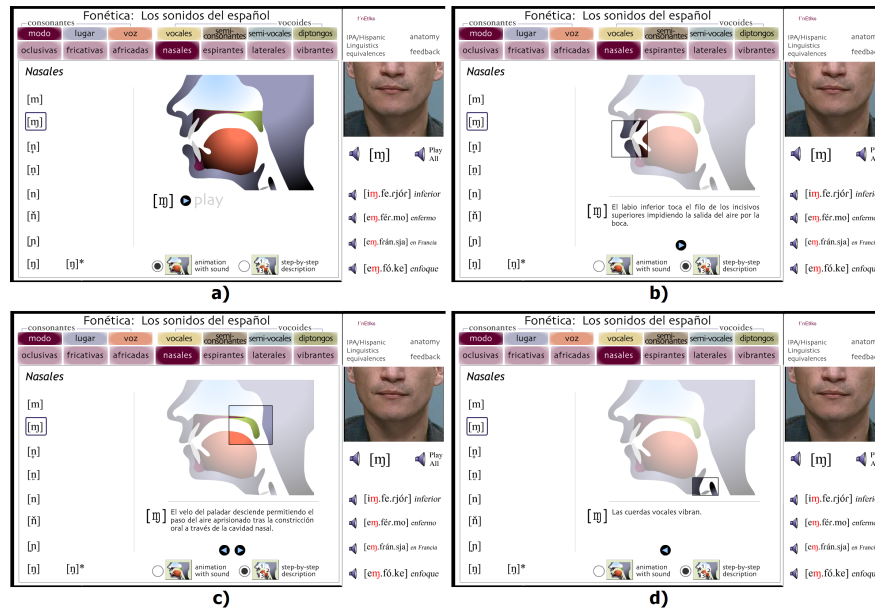


Figura 25: Ejemplo de visualización de la aplicación "Sound of Speech".

■ Metavox V3 [14]:

La aplicación "MetaVox V3" es una herramienta enfocada a la enseñanza de la pronunciación española, así como al tratamiento de distintos trastornos de la articulación. Particularmente eficaz en el tratamiento de dislalias y otros trastornos de la articulación.

Permite visualizar los movimientos de los órganos de fonación que intervienen en cada uno de los sonidos de la lengua española. Se muestra en la figura 26 un ejemplo en el que se compara la pronunciación de los fonemas correspondientes a las letras "p" y "b". La programación que contienen los videos facilita que el usuario identifique sin esfuerzo el lugar de articulación, la disposición específica que adquieren los órganos de fonación en cada sonido, así como la acción del aire en el momento de la articulación. El interfaz del programa ofrece la posibilidad de visionar al mismo tiempo los videos y la explicación teórica.



Figura 26: Ejemplo de ejecución del software "Metavox V3".

5.4 Aplicaciones para la Rehabilitación y Mejora del Habla

- **Speech Viewer III** [19]:

Este software desarrollado por IBM es un sistema enfocado para los patólogos del lenguaje y habla, profesores y otros profesionales que lo utilizan para modificar los patrones de pronunciación. Actualmente está descatalogado, aunque sigue siendo utilizado en el ámbito de la logopedia.

Contiene un conjunto de ejercicios que pueden utilizarse con pacientes que tengan trastornos de audición, del lenguaje y del habla. Es especialmente útil para personas que deseen modificar su inflexión, pronunciación y calidad vocal. El programa permite conocer y ejercitar las características de la voz (tono, intensidad, duración y sonoridad) mediante una retroalimentación visual y auditiva de las producciones verbales. Asimismo, contiene ejercicios cuyo objeto es la reeducación fonológica y la prosodia.

■ **Proyecto COMUNICA** [11,40]:

El proyecto "COMUNICA" engloba un conjunto de herramientas para la mejora de la comunicación de personas con alteraciones del habla.

Pretende hacer llegar a la comunidad de logopedas, maestros de educación especial, maestros de audición y lenguaje, y docentes de la lengua española en general, un conjunto de herramientas totalmente gratuitas y de libre distribución para ayudarles en su trabajo diario con alumnos que tienen déficits en el habla y el lenguaje.

Cada una de las aplicaciones de las que está formado el proyecto toca alguno de los aspectos de las alteraciones del habla, como por ejemplo, trabajar diferentes elementos del prelenguaje y monitorizar la emisión vocalica del alumno ("Prelingua"), mostrar gráficamente al alumno cómo posicionar la lengua correctamente en la articulación vocálica ("Articula"), trabajar el nivel articulatorio del lenguaje mediante la repetición de palabras, frases y adivinanzas simples ("Vocaliza"), trabajar el nivel pragmático del lenguaje mediante el planteamiento de escenas que el alumno tiene que resolver ("Cuéntame"), ver en una sola pantalla la intensidad, frecuencia fundamental y formantes del alumno ("ViVo"), y ayudar en la adquisición de registros fonológicos de los alumnos de logopedia ("ReFoCas").

En la figura 27 se muestran las pantallas de algunas de las aplicaciones.

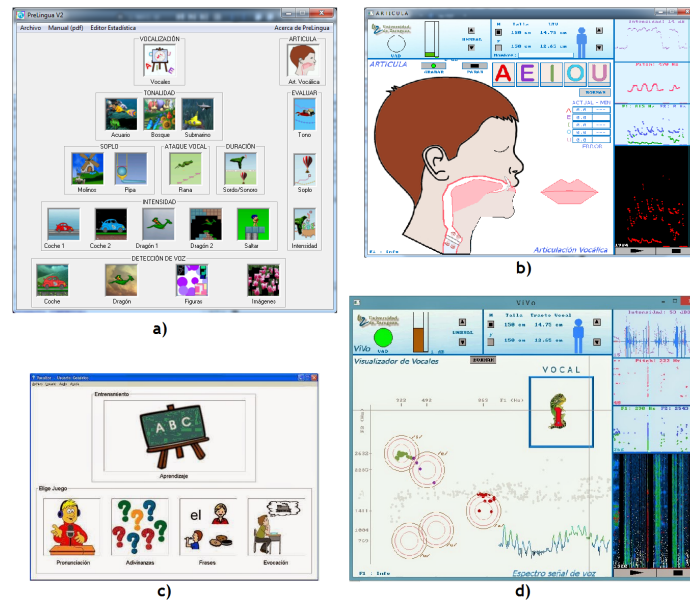


Figura 27: Proyecto COMUNICA: Aplicaciones a) "Prelingua", b) "Articula", c) "Vocaliza" y d) "ViVo".

6. Aplicación Práctica

Se plantea aquí una futura aplicación software que haga la extracción de características del habla, su representación gráfica, y los posibles experimentos realizables.

Es deseable que la aplicación implemente las mayoría de las características principales analizadas en este trabajo, en concreto:

- Carga de ficheros de sonido tipo Wav, Mp3, Ogg y similares.
- Captura de señales de audio desde un dispositivo de entrada (micrófono, línea).
- Almacenamiento de señales de audio capturadas.
- Adaptación, si es necesario, de las muestras de audio a una frecuencia de trabajo uniforme (Downsample)
- Adaptación de las señales mediante normalización, preénfasis.
- Extracción de características en el dominio del tiempo.
- Cálculo de LPC.
- Cálculo de FFT.
- Extracción de características en el dominio de la frecuencia.
- Cálculo de MFCC.
- Cálculo de Derivadas 1ª y 2ª de los MFCC.
- Creación de vectores de características.
- Carga y Almacenamiento de vectores de características con etiquetas identificativas.
- Visualizaciones gráficas de los pasos intermedios de cada una de las fases.
- Disponibilidad de etapas de Reconocimiento y/o de Clasificación de vectores.
- Planteamiento de juegos de test.

7. Conclusiones y Líneas Futuras

7.1 Conclusiones

Este trabajo de fin de master ha permitido profundizar en una serie de técnicas hasta ahora poco conocidas por el autor. En concreto ha servido para:

- Entender los procesos que intervienen en la comunicación humana,
- Ampliar y descubrir los conocimientos relacionados con la digitalización de las señales acústicas, la extracción de diversas características que pueden ayudar a describir una señal de voz y poder clasificarla,
- Explorar diferentes investigaciones y trabajos técnicos para mostrar el estado del arte de las posibles aplicaciones prácticas,
- Localizar numerosas aplicaciones de software y librerías para la programación, enfocadas al tratamiento y extracción de datos de sonido, su representación visual, y en otros casos su utilización para resolver problemas concretos relacionados con la voz, como por ejemplo el aprendizaje de idiomas, su corrección, o la rehabilitación de personas con enfermedades en su sistema fonador.

- Plantear una aplicación práctica que agrupe una serie de técnicas y algoritmos revisados en este trabajo para la comparación y corrección de la pronunciación de palabras aisladas.

*** Y en particular para que el autor se inicie en el duro campo de la investigación, que tantas horas consume sin ver avances, hasta que un día se da con la clave o la idea que permite salir de la incertidumbre, y se sigue adelante hasta que se llega al final, momento en el que todos los esfuerzos realizados se ven recompensados.

7.2 Líneas de Trabajo Futuras

Sobre posibles líneas futuras de investigación y desarrollo acerca del tema tratado en este trabajo, se plantean algunas ideas:

- Implementación de la aplicación planteada en este trabajo.
- Investigar la aplicación de diversas técnicas de búsqueda y clasificación analizadas en este trabajo para probar su eficacia y conveniencia.
- Aprovechando desarrollos revisados en este trabajo, desarrollar una batería de algoritmos enfocados tanto a la extracción de parámetros característicos del habla, como a la aplicación de varias técnicas de reconocimiento y clasificación que sean independientes del interlocutor, de la velocidad de la pronunciación, de los estados de ánimo y del idioma, con el objeto de conseguir un sistema robusto para el reconocimiento de fonemas con un alto porcentaje de aciertos.
- Aplicar los conocimientos en los diversos campos tratados en este trabajo para desarrollar una serie de aplicaciones-juegos para PC, Móviles y Tablets que faciliten la educación y el aprendizaje del idioma español (y de otros), enfocadas especialmente a la escuelas infantil y primaria.

Estas líneas de trabajo, guiadas y tratadas adecuadamente, podrían ser incluso líneas de investigación para la realización de diversos trabajos de doctorado.

Referencias

1. J. Berry. Accuracy of the ndi wave speech research system. *Speech Language, and Hearing Research* 54, 1295-1301, 2011.
2. Paul Boersma and David Weenink. Praat: doing phonetics by computer. <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>, (last visit 2015-07-14).
3. V.P. Bondarenko, A.N. Kvasov, A.A. Konev, R.V. Meshcheryakov, E.L. Choinzonov, and S.Yu. Chizhevskaya. Software for speech signal research in patients with malignant diseases of the throat. *Biomedical Engineering*, 43(4):183–186, 2009.
4. Fatma Bouali, Sébastien Devaux, and Gilles Venturini. Visual mining of time series using a tubular visualization. *The Visual Computer*, pages 1–16, 2014.
5. Santiago Omar Caballero-Morales and Felipe Trujillo-Romero. Dynamic estimation of phoneme confusion patterns with a genetic algorithm to improve the performance of metamodels for recognition of disordered speech. In Ildar Batyrshin and

- MiguelGonzález Mendoza, editors, *Advances in Computational Intelligence*, volume 7630 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 175–187. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
6. C. Cannam, C. Landone, and M. Sandler. Sonic visualiser: An open source application for viewing, analysing, and annotating music audio files. In *Proceedings of the ACM Multimedia 2010 International Conference*, pages 1467–1468, Firenze, Italy, October 2010.
 7. Hui Chen, Lan Wang, Wenxi Liu, and Pheng-Ann Heng. Combined x-ray and facial videos for phoneme-level articulator dynamics. *The Visual Computer*, 26(6-8):477–486, 2010.
 8. Belloch Consuelo. Recursos tecnológicos para la intervención en trastornos del habla y la voz. Unidad de Tecnología Educativa (UTE). Universidad de Valencia. <http://www.uv.es/bellochc/logopedia/NRTLogo5.wiki>, (last visit 2015-07-12).
 9. Lauer Christoph. Sonogram - acoustical frequency analysis tool. <http://www.christoph-lauer.de/sonogram>, (last visit 2015-07-05).
 10. Mirela Danubianu. Joining data mining with a knowledge-based system for efficient personalized speech therapy. In Costin B?dic?, NgocThanh Nguyen, and Marius Brezovan, editors, *Computational Collective Intelligence. Technologies and Applications*, volume 8083 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 245–254. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
 11. Grupo de Tecnologías de las Comunicaciones. Proyecto comunica. <http://dihana.cps.unizar.es/~alborada>, (last visit 2015-07-11).
 12. Laura DeThorne, Mariana Aparicio Betancourt, Karrie Karahalios, Jim Halle, and Ellen Bogue. Visualizing syllables: Real-time computerized feedback within a speech?language intervention. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, pages 1–8, 2014.
 13. Shufei Duan, Jinglan Zhang, Paul Roe, and Michael Towsey. A survey of tagging techniques for music, speech and environmental sound. *Artificial Intelligence Review*, 42(4):637–661, 2014.
 14. Euphonía Ediciones. Metavox v3. <http://www.euphoniaediciones.com>, (last visit 2015-07-10).
 15. Centre for Digital Music. The vamp audio analysis plugin system. Queen Mary, University of London. <http://vamp-plugins.org>, (last visit 2015-07-11).
 16. Fujinaga. Adaptive optical music recognition. PhD thesis, McGill University, 1997.
 17. Carstens Medizinelektronik GmbH. 3d electromagnetic articulograph. http://www.articulograph.de/?page_id=1194, (last visit 2015-07-02).
 18. Machine Learning Group. Weka - university of waikato, hamilton, new zealand. <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>, (last visit 2015-07-09).
 19. IBM. Speechviewer iii for windows. <ftp://ftp.software.ibm.com/sns/spv3>, (last visit 2015-06-10).
 20. Jintao Jiang, EdwardT. Auer, Abeer Alwan, PatriciaA. Keating, and LynneE. Bernstein. Similarity structure in visual speech perception and optical phonetic signals. *Perception & Psychophysics*, 69(7):1070–1083, 2007.
 21. Z.N. Karam and W.M. Campbell. Graph embedding for speaker recognition. In Yun Fu and Yunqian Ma, editors, *Graph Embedding for Pattern Analysis*, pages 229–260. Springer New York, 2013.
 22. Brent Kievit-Kylar and MichaelN. Jones. Visualizing multiple word similarity measures. *Behavior Research Methods*, 44(3):656–674, 2012.
 23. BerndJ. Kröger, Peter Birkholz, Rüdiger Hoffmann, and Helen Meng. Audiovisual tools for phonetic and articulatory visualization in computer-aided pronunciation

- training. In Anna Esposito, Nick Campbell, Carl Vogel, Amir Hussain, and Anton Nijholt, editors, *Development of Multimodal Interfaces: Active Listening and Synchrony*, volume 5967 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 337–345. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
24. She Kun, Chen Shuzhen, Yang Shen, and Zou Lian. A novel visualization tool for manual annotation when building large speech corpora. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 11(2):381–384, 2006.
 25. John Lazzaro and John Wawrzynek. Speech recognition experiments with silicon auditory models. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 13(1-2):37–51, 1997.
 26. Hailin Li, Chonghui Guo, and Libin Yang. A method of similarity measure and visualization for long time series using binary patterns. In Longbing Cao, JoshuaZhexue Huang, James Bailey, YunSing Koh, and Jun Luo, editors, *New Frontiers in Applied Data Mining*, volume 7104 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 136–147. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
 27. Z.V. Lyubimova, G.Zh. Sisengalieva, N.Yu. Chulkova, O.I. Smykova, and S.V. Selin. Role of tactile receptor structures of the tongue in speech sound production of infants of the first year of life. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 127(2):115–119, 1999.
 28. S. McAdams. Perspectives on the contribution of timbre to musical structure. *Computer Music Journal*, 23:85–102, 1999.
 29. NeilP. McAngus Todd and GuyJ. Brown. Visualization of rhythm, time and metre. *Artificial Intelligence Review*, 10(3-4):253–273, 1996.
 30. J. L. McClelland and J. L. Elman. The trace model of speech perception. *Cognitive Psychology*, 18, 1-86, 1986.
 31. Cory McKay. jmir - tools for automatic music classification. Marianopolis College. <http://jmir.sourceforge.net/>, (last visit 2015-07-03).
 32. Cory McKay, Ichiro Fujinaga, and Philippe Depalle. jaudio: A feature extraction library. In mcgill.ca, editor, *Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval*, pages 600–3, 2005.
 33. Cory McKay, Ichiro Fujinaga, and Philippe Depalle. jaudio: A feature extraction library. In mcgill.ca, editor, *Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval*, pages 600–3, 2005.
 34. Cory McKay and Daniel McEnnis. jaudio project - sourceforge.net. <http://jaudio.sourceforge.net/>, (last visit 2015-06-29).
 35. E.Kh. Midaeva and Z.V. Lyubimova. Formation of language-specific characteristics of speech sounds in early ontogeny. *Human Physiology*, 34(5):649–652, 2008.
 36. University of Iowa. Sounds of speech - fonética los sonidos del español. University of Iowa Research Foundation. <http://soundsofspeech.uiowa.edu/spanish/spanish.html>, (last visit 2015-06-27).
 37. Javier Ortega García and Joaquín González Rodríguez. Apuntes de clase: Dtw. alineamiento temporal dinámico (dtw). Universidad Autónoma de Madrid. http://arantxa.ii.uam.es/~jortega/DTW_AlinTempDinam_ASAL.pdf, (última visita 2015-07-10).
 38. Eva Pajorová and Ladislav Hluchý. Correct speech visemes as a root of total communication method for deaf people. In Gordan Jezic, Mario Kusek, Ngoc-Thanh Nguyen, RobertJ. Howlett, and LakhmiC. Jain, editors, *Agent and Multi-Agent Systems. Technologies and Applications*, volume 7327 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 389–395. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
 39. Michael Pouris and DeborahI. Fels. Creating an entertaining and informative music visualization. In Klaus Miesenberger, Arthur Karshmer, Petr Penaz, and Wolfgang

- Zagler, editors, *Computers Helping People with Special Needs*, volume 7382 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 451–458. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
40. William Ricardo Rodríguez Dueñas and Eduardo Lleida Solano. Pre-lingua: Una herramienta de apoyo para el pre-lenguaje. <http://dihana.cps.unizar.es/~alborada/herramientas.html>, (last visit 2015-07-11).
 41. Mark Shtern, M. Brandon Haworth, Yana Yunusova, Melanie Baljko, and Petros Faloutsos. A game system for speech rehabilitation. In Marcelo Kallmann and Kostas Bekris, editors, *Motion in Games*, volume 7660 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 43–54. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
 42. Salvador Stan and Philip Chan. Fastdtw: Toward accurate dynamic time warping in linear time and space. <http://cs.fit.edu/~pkc/papers/twm04.pdf> (last visit 2015-07-10), 2004.
 43. T. J. Strauss, H. D. Harris, and J. S. Magnuson. jtrace computational cognitive neuroscience of language lab. <http://magnuson.psy.uconn.edu/jtrace/>, (last visit 2015-06-25).
 44. Ted J. Strauss, Harlan D. Harris, and James S. Magnuson. jtrace: A reimplementation and extension of the trace model of speech perception and spoken word recognition. *Behavior Research Methods*, 39(1):19–30, 2007.
 45. Izabela Szczurowska, Wiesława Kuniszyk-Jozkowiak, and Elżbieta Smolka. Speech nonfluency detection using kohonen networks. *Neural Computing and Applications*, 18(7):677–687, 2009.
 46. Natalia A. Tomashenko and Yuri Y. Khokhlov. Fast algorithm for automatic alignment of speech and imperfect text data. In Miloš Ježek, Ivan Habernal, and Andrey Ronzhin, editors, *Speech and Computer*, volume 8113 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 146–153. Springer International Publishing, 2013.
 47. Y. Yunusova, M. Baljko, G. Pintilie, K. Rudy, P. Faloutsos, and J. Daskalogianakis. Acquisition of the 3d surface of the palate by in-vivo digitization. *Speech Communication* 54, 923–931, 2012.
 48. A. O. Zhirkov, D. N. Kortchagine, A. S. Lukin, A. S. Krylov, and Yu. M. Bayakovskii. Graphic representation method and neural network recognition of time-frequency vectors of speech information. *Programming and Computer Software*, 29(4):210–218, 2003.

Autores



Adolfo Barroso Gallego, natural de Salamanca, completó la base de su educación superior en el año 2014 obteniendo el título de Graduado en Ingeniería Informática por la Universidad de Salamanca. En la misma universidad amplió su formación realizando el Máster Oficial en Sistemas Inteligentes en 2015. Sus trabajos se han centrado fundamentalmente en el análisis exploratorio de datos.

Juan José Bullón Pérez, es Ingeniero Técnico en Tejidos de Punto por la Universidad Politécnica de Cataluña (1986), Graduado en diseño y tecnología textil (2014) por la Universidad de Salamanca. Ha completado su formación con el Máster Universitario en Sistemas Inteligentes (2015) de la Universidad de Salamanca. Realizado diversas publicaciones relacionadas con el Control de Calidad en la industria Textil y la Ingeniería Industrial. Desde 1988 desarrolla su actividad docente en la Universidad de Salamanca, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Béjar, y en la Facultad de Ciencias Químicas.



Juan M. Corchado Rodríguez es catedrático de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial. Actualmente es Vicerrector de Investigación y Transferencia de la Universidad de Salamanca y Director del Grupo en Biotecnología, Sistemas Inteligentes y Tecnología Educativa de esta misma universidad (<http://bisite.usal.es>). Doctor en Informática por la Universidad de Salamanca, España (1998) y doctor en Inteligencia Artificial por la University of the West of Scotland, Reino Unido (2000). Es Coordinador Académico del Instituto de Arte y Tecnología de la Animación. Anteriormente ha sido Subdirector de la Escuela Superior de Ingeniería Informática en la Universidad de Vigo (España, 1999-00) e investigador en la Universidad de Paisley (1995-98). Colabora, como investigador, con el Laboratorio Oceanográfico de Plymouth (Reino Unido) desde 1993. Ha dirigido más de 70 proyectos de Inteligencia Artificial con financiación tanto internacional, como nacional o autonómica. Ha dirigido 16 tesis doctorales y es co-autor de más de 300 libros, capítulos de libros, artículos en revistas científicas, etc. la mayoría de ellos presentan aspectos tanto prácticos como teóricos relacionados con los Sistemas Híbridos de Inteligencia

Artificial, la Biomedicina, la Inteligencia Ambiental, los Sistemas Inalámbricos y la Oceanografía. Es autor de más de una veintena de propiedades intelectuales y patentes.

Angélica González Arrieta es doctora en Informática por la Universidad de Salamanca. Cuenta con una amplia experiencia investigadora en el campo de la Computación Neuroborrosa y las Redes Neuronales. Es Profesora Titular del Departamento de Informática y Automática de dicha Universidad. Actualmente compatibiliza su labor docente e investigadora con la dirección de diversas actividades formativas sobre seguridad informática, colaborando activamente con la Academia de la Policía Nacional de Ávila.



Daniel Hernández de la Iglesia, nacido en Salamanca en el año 1990, es Ingeniero Técnico en Informática de Sistemas por la Universidad de Salamanca (2013) y Graduado en Ingeniería Informática por la misma universidad (2014). Su proyecto fin de carrera se centraba en el uso de tecnologías de realidad aumentada y reconocimiento de imágenes aplicado a la industria turística. Fue galardonado con el primer premio en la I edición del concurso de datos abiertos otorgado por la Junta de Castilla y León (2013) y con una beca “T-CUE” otorgada por la fundación general de la Universidad de Salamanca (2015). Ha completado su formación con el Máster Oficial en Sistemas (2015) y actualmente forma parte del grupo de investigación BISITE donde ha realizado varias publicaciones sobre sus proyectos y trabajos de investigación.

Antonio Gabriel Losada Gómez, nacido en Salamanca, completó la base de su educación superior en el año 2014 obteniendo el título de Graduado en Ingeniería Informática por la Universidad de Salamanca. En la misma universidad amplió su formación realizando el Máster Oficial en Sistemas Inteligentes en 2015. Sus trabajos se han centrado primordialmente en el desarrollo de sistemas de análisis basados en la visualización de información, los cuales le han permitido llegar a publicar artículos de investigación al respecto. Sus líneas de investigación, dentro del mencionado ámbito, siempre han estado relacionadas con el estudio de diversos deportes, destacando el análisis estadístico y visual de la historia completa del béisbol norteamericano y el examen interactivo de diversos sucesos acontecidos durante el desarrollo de cualquier partido de baloncesto.





Álvaro Lozano Murciego, natural de Salamanca es Ingeniero Técnico en Informática de Sistemas y Graduado en Ingeniería Informática por la Universidad de Salamanca en la que realizó el Máster en Sistemas Inteligentes. Su labor se ha centrado principalmente en el desarrollo de aplicaciones y middleware para sistemas ERP como SAP Business One y Microsoft Dynamics. Su investigación durante el Máster ha abordado el campo de los sistemas de recomendación y el filtrado colaborativo. Actualmente se encuentra trabajando en el campo de la movilidad con el desarrollo de aplicaciones para Android y realizando los estudios de doctorado en Ingeniería Informática.

Luis Antonio Miguel Quintales Doctor en Informática y Automática por la Universidad de Salamanca. Es profesor titular en el Departamento de Informática y Automática de la Universidad de Salamanca e investigador en el Instituto de Biología Funcional y Genómica (IBFG) centro mixto de investigación de titularidad compartida entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) 188 y la Universidad de Salamanca. Las líneas de investigación en las que trabaja son la computación de altas prestaciones, la minería de datos y la genómica computacional. Como resultado de su trabajo de investigación ha publicado en algunas de las revistas más prestigiosas del ámbito de la Bioinformática como son: Briefings in Bioinformatics, Bioinformatics y BMC Bioinformatics.



Miguel Ángel Ortiz Amores, de Alba de Tormes, en la provincia de Salamanca. Cuenta en su haber con los títulos de Ingeniería Técnica Informática de Sistemas (2013), Grado en Ingeniería Informática (2014), y Máster en Sistemas Inteligentes (2015). El máster ha sido cursado en la Universidad de Salamanca teniendo una media de 8'9/10. Además, obtuvo una Matrícula de Honor en la asignatura "Fundamentos de Sistemas Inteligentes" cursando el Grado.

Juan Francisco de Paz Santana Doctor en Informática y Automática por la Universidad de Salamanca en 2010. Actualmente es Profesor Ayudante Doctor en Departamento de Informática y Automática de la Universidad de Salamanca e investigador del grupo de BISITE (<http://bisite.usal.es>). Ingeniero técnico en Informática de Sistemas (2003), Ingeniero Informático (2005) y Diplomado en Estadística (2007) por la Universidad de Salamanca. Es coautor de 130 artículos publicados en diversas revistas de ámbito nacional e internacional, workshops y simposios. Es miembro del Grupo de Investigación BISITE de la Universidad de Salamanca, donde ha participado en diversos proyectos de I+D.



Fernando de la Prieta Pintado es Doctor en Ingeniería en Informática por la Universidad de Salamanca. Como investigador se ha centrado en los sistemas multiagente, organizaciones virtuales, inteligencia artificial distribuida, computación en nube y tecnológica educativa. Ha publicado artículos en revistas internacionales y prestigiosas conferencias internacionales. También ha participado en proyectos de investigación a nivel internacional y nacional, así como en la organización y en el comité científico de diferentes congresos y revistas internacionales..

Araceli Queiruga Dios es Licenciada en Ciencias Físicas (especialidad Electrónica) por la Universidad de Salamanca. Ha obtenido el título de Doctor por la misma Universidad de Salamanca en el Departamento de Matemática Aplicada, con la tesis titulada: “Avances recientes en el criptoanálisis del criptosistema de Chor-Rivest: aplicaciones criptográficas”. Actualmente es profesor Contratado Doctor en el Departamento de Matemática Aplicada en la Escuela Técnica superior de Ingeniería Industrial de la Universidad de Salamanca. Forma parte del grupo de investigación reconocido de la Universidad de Salamanca “Grupo de Investigación en Criptografía, Seguridad de la Información y Matemática Discreta (GICSIMAD)” y colabora activamente en proyectos de criptografía y seguridad de la información. Sus líneas de investigación abarcan la criptografía de clave pública, malware y seguridad de la información, así como métodos numéricos y aplicaciones de las matemáticas en ingeniería.





Silvana Roxani Revollar Chávez Profesora asociada en el área de Ingeniería de Sistemas y Automática: Automatización y Control.

D. Tomás Rodríguez Barrios, natural de Zamora, Ingeniero Técnico en Informática de Sistemas (1995), Ingeniero Superior en Informática (2000) y Máster Oficial en Sistemas Inteligentes (2015) por la Universidad de Salamanca. Desde Septiembre de 2006 es Profesor Asociado para el Departamento de Informática y Automática de la Universidad de Salamanca, destinado en la Escuela Politécnica Superior de Zamora e impartiendo docencia relacionada con la programación de Sistemas Operativos y el Desarrollo de Aplicaciones Web entre otras materias. Profesionalmente ha trabajado desde el año 1992 en diversas empresas del sector de las nuevas tecnologías y de formación, simultaneándolo con sus estudios universitarios. Además ha participado en el desarrollo de diversos proyectos informáticos para empresas de todo tipo de forma independiente desde el año 2003, sobre todo en el campo del desarrollo de aplicaciones de control, aplicaciones para la administración pública, aplicaciones de gestión vía Web y aplicaciones para dispositivos móviles y/o embebidos (PDA's, Raspberry). En la actualidad su actividad profesional se centra en la Consultoría Informática, en la que dirige a un grupo de personas independientes que trabajan en numerosos proyectos y campos de actuación relacionados con el desarrollo de aplicaciones multidispositivo (web y nativas), implantación de aplicaciones y estándares para la administración pública, sistemas de control de maquinaria automático, instalaciones multimedia para exposiciones, demostraciones y espectáculos, sistemas de gestión en general para la empresa privada, etc. En el campo de la investigación fué premiado en Marzo de 2014 en el I Concurso Transfronterizo de Prototipos Orientados al Mercado – INESPO, con un prototipo de captura de información geológica y generación de informes, en colaboración con profesores del área de Obra Civil de la Escuela Politécnica Superior de Zamora.



Ángel Luis Sánchez Lázaro Doctor y Profesor Titular en el área de conocimiento de Lenguajes y Sistemas Informáticos de la Universidad de Salamanca.

Roberto Therón Sánchez cursó sus estudios de Informática en la Universidad de Salamanca (Diplomatura) y la Universidad de la Coruña (Licenciatura). Tras entrar a formar parte del Grupo de Investigación en Robótica de la Universidad de Salamanca, presentó su trabajo de Tesis recibiendo el Premio Extraordinario de Doctorado. Posteriormente ha obtenido los títulos de Licenciado en Comunicación Audiovisual (Universidad de Salamanca) y Licenciado en Humanidades (Universidad de Salamanca).



En la misma Universidad de Salamanca continúa realizando su trabajo de investigador, como encargado del grupo VisUsal (dentro del Grupo de Investigación Reconocido MiDa) que se centra en la combinación de enfoques procedentes de la Informática, Estadística, Diseño Gráfico y Visualización de Información, para obtener una adecuada comprensión de conjuntos de datos complejos. En los últimos años, se ha dedicado al desarrollo de herramientas de visualización avanzada para datos multidimensionales. En el área de Analítica Visual desarrolla productivas colaboraciones con grupos e instituciones de reconocido prestigio internacional, como el Laboratorio de Ciencias del Clima y del Medio Ambiente (París) o el Centro de Analítica Visual Avanzada de la ONU (Suiza). Es autor de más de 70 artículos en revistas y congresos internacionales.



Diego Vaquero Melchor, de Puebla de Sanabria, es Ingeniero Informático por la Universidad de Salamanca y un amante de las nuevas tecnologías. Como formación especializada cuenta con el Máster Oficial en Sistemas Inteligentes de la misma universidad. Tras haber realizado incursiones en campos como el control de vehículos aéreos no tripulados y la minería de datos bioinformáticos, actualmente centra sus estudios en la aplicación de dispositivos móviles

al campo de Open Data con el grupo MISO de la Universidad Autónoma de Madrid.

Pastora Isabel Vega Cruz es Doctora por la Universidad de Salamanca y Catedrática del área de conocimiento de Ingeniería de Sistemas y Automática.





Alvaro Vicente Rodríguez, natural de Bilbao, es Ingeniero Técnico en Informática de Sistemas (2011) y Graduado en Ingeniería Informática (2012), por la Universidad de Salamanca. Ha completado su formación con un Master en Project Management (2012), impartido en ESDEN Business School de Madrid, obteniendo la certificación PMP del PMI y posteriormente con el Máster Oficial en Sistemas Inteligentes, impartido en la Universidad de Salamanca. Trabaja en Ingeniería de Software Avanzado desde 2008, donde inició su andadura como Operador de Sistemas y actualmente es Técnico de Sistemas Open en el CPD de un importante grupo energético nacional.