

# III JORNADAS DE DOCTORADO EN INFORMÁTICA

21 DE FEBRERO DE 2020,  
UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Luis Iribarne,  
Ester Martín  
y Manuel Berenguel  
(eds.)

## III Jornadas de Doctorado en Informática

© del texto:  
los autores

Libros Electrónicos n.º 118

© de la edición:

Editorial Universidad de Almería, 2021

editorial@ual.es

www.ual.es/editorial

Telf/Fax: 950 015459

α

ISBN: 978-84-1351-083-5

Colabora:

Comisión académica de doctorado en informática

<https://sites.google.com/ual.es/jdi2020/>

@doctoradoINFUAL

doctorado.informatica@Ual

Financiado por:

Escuela Internacional de Doctorado  
y Departamento de Informática



En este libro puede volver al índice  
pulsando el pie de la página

### **III Jornadas de Doctorado en Informática**

21 de febrero de 2020, Universidad de Almería

---

Las III Jornadas de Doctorado en Informática de la Universidad de Almería (JDI2020@UAL) es un evento que se realiza cada año en el marco del Programa de Doctorado en Informática de la UAL cuyo objetivo principal es la realización del seguimiento de la investigación anual de los estudiantes de doctorado, y que sirve, a su vez, como punto de encuentro anual para estudiantes, tutores, directores y miembros de la comunidad universitaria con intereses en la investigación científica en el ámbito de la Informática. Así mismo, estas jornadas pretenden servir como lugar para la difusión y divulgación de los resultados de investigación de la Informática que se están desarrollando en las tesis doctorales soportadas por los actuales proyectos de I+D de los Grupos de Investigación del Departamento de Informática.

En su tercera edición, estas jornadas ha contado con el envío de 23 trabajos de investigación en progreso de los cuales 9 han sido presentados en la jornada de seguimiento. Esta jornada ha contado con la presentación de los resultados de la tesis doctoral ya finalizada en el año 2019 titulada “*Computación de altas prestaciones en el diseño óptimo y control de plantas solares de torre*” presentada por el estudiante egresado Nicolás Calvo Cruz. Además, esta edición también ha contado con la conferencia invitada titulada “*Diseño de Big data para facilitar la toma decisiones y la comprensión de la información*” impartida por la profesora Paloma Díaz Pérez, catedrática del Departamento de Informática de la Universidad Carlos III de Madrid.

<https://sites.google.com/ual.es/jdi2020/>

© 2020

Editores: Luis Iribarne, Ester Martín y Manuel Berenguel  
Programa de Doctorado en Informática  
Departamento de Informática  
Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Almería  
Universidad de Almería

# Contenido

## SECCIÓN I: Trabajos presentados

1.	Francisco García García: "Procesamiento eficiente de consultas y técnicas de particionado en SpatialHadoop".	2
2.	Juan Diego Gil Vergel: "Sistemas de control para las fases de arranque y operación en plantas de destilación solar por membranas a escala industrial".	12
3.	Ángeles Hoyo: "Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones".	22
4.	Manel Mena Vicente: "Digital Dices: Microservicios en el marco de la Web of Things".	31
5.	Juan José Moreno Ridao: "Técnicas de Alto Rendimiento para la Optimización de Planes de Radioterapia de Intensidad Modulada".	40
6.	Juan Jesús Ojeda Castelo: "Interacción Natural: Últimas Publicaciones y el inicio con Deep Learning".	48
7.	Francisco José Orts Gómez: "Un circuito cuántico optimizado para convertir de formato signo-magnitud a complemento a dos".	54
8.	Savins Puertas: "Optimización de la similitud de forma y del potencial electrostático utilizando un algoritmo multi-objetivo".	63
9.	Jerónimo Ramos Teodoro: "Aportaciones al control y gestión de sistemas de producción distribuidos: estado actual de la cuestión y desarrollo de una librería para simulaciones".	70

## SECCIÓN II: Otros trabajos

10.	Darwin Alulema: "Una metodología basada en modelos y servicios para la integración de sistemas IoT".	81
11.	José Jorge Carreño Zágara: "Control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones para sistemas inciertos".	91
12.	Francisco Jose de Haro Olmo: "Revisión sistemática sobre blockchain desde la perspectiva de la privacidad y la anonimización".	100
13.	Francisco José Gómez Navarro: "Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto de Vehículo Urbano Eléctrico Ligero. Almacenamiento y Distribución de Energía".	108
14.	Esther González Revuelta: "Análisis de demandas y expectativas del paciente frente a los nuevos modelos digitales de relación médico-paciente. Desarrollo de herramientas que facilitan la información y comunicación".	116
15.	Safwan Mawlood Hussein: "Distribución segura de claves en redes de sensores para IoT".	121
16.	Ana Paola Montoya Ríos: "Modelado y control de la temperatura en un invernadero por medio de reducción de modelos de alto orden con base en datos reales"	127
17.	Manuel Muñoz-Rodríguez: "Actualización de la plataforma IoT para la agricultura intensiva con MaaS e integración de nuevas plataformas".	137
18.	Luis Ortega López: "Clasificación de cultivos utilizando imágenes multi-espectrales y software eCognition".	143
19.	Diego Rodríguez Gracia: "Arquitecturas adaptativas en tiempo de ejecución mediante transformaciones inteligentes basadas en técnicas de soft-computing y desarrollo de software dirigido por modelos".	150
20.	Enrique Rodríguez Miranda: "Control y modelado de procesos en reactores de microalgas abiertos tipo raceway".	160
21.	José Juan Sánchez Hernández: "Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional y compensación de movimiento controlada por el cliente".	170
22.	Teresa Santamaría López: "Impact of streaming on the increasing demand of modern education and distance".	180
23.	Tobar Farias Galo Wilfredo: "Aplicación de la matemática en la criptografía conmutativa y no conmutativa".	189

# SECCIÓN I

## Trabajos presentados

---

1. Francisco García García: "Procesamiento eficiente de consultas y técnicas de particionado en SpatialHadoop".
  2. Juan Diego Gil Vergel: "Sistemas de control para las fases de arranque y operacion en plantas de destilación solar por membranas a escala industrial".
  3. Ángeles Hoyo: "Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones".
  4. Manel Mena Vicente: "Digital Dices: Microservicios en el marco de la Web of Things".
  5. Juan José Moreno Rida: "Técnicas de Alto Rendimiento para la Optimización de Planes de Radioterapia de Intensidad Modulada".
  6. Juan Jesús Ojeda Castelo: "Interacción Natural: Últimas Publicaciones y el inicio con Deep Learning".
  7. Francisco José Orts Gómez: "Un circuito cuántico optimizado para convertir de formato signo-magnitud a complemento a dos".
  8. Savins Puertas: "Optimización de la similitud de forma y del potencial electrostático utilizando un algoritmo multi-objetivo".
  9. Jerónimo Ramos Teodoro: "Aportaciones al control y gestión de sistemas de producción distribuidos: estado actual de la cuestión y desarrollo de una librería para simulaciones".
-

# Procesamiento eficiente de consultas y técnicas de particionado en SpatialHadoop

Francisco José García García  
E-mail: paco.garcia@ual.es

Universidad de Almería

**Abstract.** Hoy día con el uso omnipresente de aplicaciones que utilizan datos espaciales y el gran tamaño que presentan los datos que estas utilizan y generan, es realmente difícil ejecutar consultas espaciales de forma eficiente en los entornos centralizados tradicionales. Debido a esto, el uso de sistemas distribuidos se ha popularizado en los últimos años y ha motivado la aparición de nuevas tecnologías que utilizan clústeres de ordenadores que no comparten nada, surgiendo los Sistemas de Gestión de Datos Espaciales Distribuidos (SGDED). SpatialHadoop es un SGDED, que mediante el framework MapReduce, utiliza técnicas de indexado que particionan los conjuntos de datos espaciales a lo largo de varias máquinas para mejorar el procesamiento de consultas espaciales respecto a otros sistemas basados en Hadoop. En este trabajo se presentan los resultados de analizar e implementar algoritmos paralelos y distribuidos para dos de las consultas de join basadas en distancias más estudiadas, K Closest Pair Query (KCPQ) y K Nearest Neighbours Join Query (KNNJQ), y su mejora mediante el uso de nuevas técnicas de particionado basadas en distancias (particionado basado en diagramas de Voronoi). Además, se presenta el diseño e implementación de MRSLICE, un nuevo algoritmo MapReduce para la consulta Reverse K-Nearest Neighbor (RKNN) basado en el algoritmo para entornos centralizados SLICE. Por último, se presentan algunas técnicas aplicadas en un trabajo en curso, que mejoran y adaptan a SpatialHadoop la consulta Group K-Nearest Neighbor (GKNN) de Hadoop a SpatialHadoop.

**Keywords:** Big Data · MapReduce · Spark · Spatial Data Processing · Spatial Query Evaluation · SpatialHadoop · LocationSpark · Distance Joins · Partitioning · Voronoi-Diagram · GNNQ · RNNQ.

## 1 Introducción

El análisis y procesamiento de datos a gran escala es actualmente una parte muy importante de muchos grupos de investigación científica y empresas. Hoy en día, con el auge del desarrollo y uso de aplicaciones móviles, se ha producido un aumento enorme del volumen de datos espaciales disponible en todo el mundo. Los desarrollos recientes de grandes sistemas de datos espaciales han motivado la aparición de nuevas tecnologías para procesar datos espaciales a gran escala en clústeres de computadoras en un entorno distribuido. Los Sistemas de Gestión

de Datos Espaciales Distribuidos (SGDED) surgen para paliar las debilidades en cuanto a eficiencia que presentan estos entornos distribuidos cuando se trata de manipular datos espaciales. La mayor deficiencia es la falta de mecanismos de indexado que permitan acceder solo a los datos espaciales de regiones específicas, lo que en definitiva permitirá construir algoritmos de consulta espaciales más eficientes.

Los SGDED se clasifican en basados en disco [14] o basados en memoria principal [32]. Los más representativos basados en disco son SpatialHadoop [4] y Hadoop-GIS [1] y se caracterizan por extender Hadoop con características espaciales. Por otro lado, los SGDED basados en memoria más importantes son GeoSpark [31] y LocationSpark [26] y se caracterizan por estar basados en Spark. Estos sistemas abstraen a los usuarios de los problemas y complejidades de la computación distribuida al trabajar con datos espaciales.

Ante el desafío que supone el procesamiento eficiente de consultas espaciales para grandes volúmenes de datos espaciales, se están proponiendo distintos algoritmos [4] que intentan dar respuesta a diferentes consultas, como rango,  $k$ NN, spatial joins y skyline queries, en este tipo de entornos distribuidos. Por lo tanto, el principal objetivo de esta tesis doctoral es, estudiar diferentes entornos paralelos y distribuidos, que permitan desarrollar nuevos algoritmos eficientes que aprovechen las características que proporcionan dichos entornos. La ejecución de un extenso conjunto de experimentos sobre conjuntos de datos, tanto sintéticos como reales, permitirá demostrar la eficiencia y escalabilidad de nuestras propuestas.

La tesis se enmarca dentro del proyecto TIN2017-83964-R del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) del Gobierno de España.

El resto de este artículo continua con la presentación de los avances realizados durante el último año en el desarrollo de la tesis. Finalmente, se muestran las conclusiones obtenidas hasta el momento y se muestra una descripción de posibles trabajos futuros a realizar.

## 2 Avances

### 2.1 Efficient distance join query processing in distributed spatial data management systems

En [11] se recoge la mejora de nuestros anteriores trabajos [10] y [5] mediante la implementación de nuevos algoritmos ( $k$ NNJQ y  $\epsilon$ DRJQ), su mejora con el uso de técnicas de reparticionado para solucionar problemas de sesgado de datos, la extensión al uso de objetos espaciales complejos (polígonos) y un estudio experimental de los diferentes algoritmos con conjuntos de datos reales en SpatialHadoop y LocationSpark.

La consulta  $k$ NNJQ, dados dos conjuntos de puntos ( $\mathbb{P}$  y  $\mathbb{Q}$ ) y un número positivo  $k$ , encuentra para cada punto de  $\mathbb{P}$ , sus  $k$  vecinos más cercanos en  $\mathbb{Q}$ . Un ejemplo de esta consulta consistiría en encontrar los 5 ( $k$ ) parques más cercanos para cada lago. Nuestra propuesta de algoritmo para entornos distribuidos, basada en [18], consta de las siguientes fases:

- **Bin  $k$ NNJ**, que consiste en un Bin-Spatial Join [33] donde el operando de join es el  $k$ NN.
- **$k$ NNJ en las celdas solapadas**, que aplica  $k$ NN en aquellas celdas que solapan con las listas  $k$ NN parciales de la fase anterior.
- **Combinación de resultados**, de las listas  $k$ NN de las dos fases anteriores.

La consulta  $\varepsilon$ DRJ, dados dos conjuntos de puntos ( $\mathbb{P}$  y  $\mathbb{Q}$ ) y un límite de distancia  $\varepsilon$  encuentra para cada punto  $p_i \in \mathbb{P}$ , todos los puntos en  $\mathbb{Q}$  que se encuentra en la forma circular, centrada en  $p_i$  con radio  $\varepsilon$ . Un ejemplo de  $\varepsilon$ DRJ puede ser encontrar todos los parques en 5 km ( $\varepsilon$ ) para cada lago. La implementación propuesta aprovecha que la distancia  $\varepsilon$  es conocida para adaptar el algoritmo  $k$ NNJQ. Esta consiste en la combinación de las fases *Bin  $k$ NNJ* y  *$k$ NNJ en las celdas solapadas* en una sola fase y la consecuente eliminación de la última fase de *Combinación de resultados*.

La primera extensión de estos algoritmos DJQ en MapReduce añade el procesado de objetos espaciales complejos y no solo puntos. Las técnicas de particionado en SpatialHadoop replican cada geometría en todas las particiones con las que intersecciona. Por ello, es necesario eliminar posibles resultados duplicados utilizando la técnica *reference-point duplicate avoidance technique* [4], la cual consiste en seleccionar un único punto de la geometría y solo trabajar con la partición en la que se encuentra. Además, para simplificar las operaciones y cálculos complejos de distancias en los algoritmos, estos se realizaran sobre el MBR (Minimum Bounding Rectangle) que cubre los diferentes objetos espaciales. De esta manera, los algoritmos basados en barrido del plano solo tienen que calcular la mínima distancia entre MBRs, realizando el cálculo exacto de las distancias solamente en la fase final de las consultas.

De manera general, el problema de datos sesgados (*skewed data*) consiste en que algunas particiones contienen un número mayor de elementos, y su procesado crea un retraso en la obtención del resultado final. Para solucionar este problema se han propuesto dos tipos de técnicas de reparticionado, que utilizando datos ya particionados por SpatialHadoop (ej., Grid, Quadtree), dividen aquellas particiones que exceden un cierto número de elementos. Por un lado, *Reparticionado basado en Grid*, que dado un número máximo de elementos  $L$ , divide la partición original en tantas *filas* y *columnas* como sea necesario para que cada celda tenga como mucho  $L$  elementos. La principal ventaja es ésta técnica de reparticionado es que no se necesita ningún procesamiento previo para dividir la partición en sub-particiones. Por otro lado, una técnica de *reparticionado basado en Quadtree*, que necesita realizar una tarea previa a los algoritmos del DJQ, pero que por lo general obtiene mejores resultados.

Por último, se ha realizado una serie de experimentos que demuestran que los algoritmos DJQ propuestos son eficientes, robustos y escalables mediante el estudio de diferentes parámetros utilizados (tamaño de datos,  $k$ ,  $\varepsilon$ , número de nodos de computación ( $\eta$ ), etc.). Además se ha demostrado que LocationSpark es el ganador en tiempo de ejecución cuando se combinan conjuntos de tamaño mediano, debido a la eficiencia de su procesado en memoria que proporciona Spark. Sin embargo, SpatialHadoop es más rápido con los conjuntos de datos



más grandes, debido a su madurez y robustez, debido al mayor tiempo dedicado para su investigación y desarrollo.

## 2.2 Improving Distance-Join Query processing with Voronoi-Diagram based partitioning in SpatialHadoop

En [8] se extiende el trabajo presentado en [7] sobre el diseño e implementación de una técnica de particionado eficiente basada en Diagramas de Voronoi en SpatialHadoop. Para ello presentamos nuevos métodos de muestreo y algoritmos de clustering para mejorar la calidad de las particiones, mejoras de nuestros algoritmos  $k$ CPQ [10] y  $k$ NNJQ [11] en MapReduce con el uso de nuevas reglas y técnicas de poda, y la ejecución de un extenso conjunto de experimentos que estudian su eficiencia y escalabilidad comparada con otros algoritmos existentes en SpatialHadoop.

Para incorporar este tipo de particionado en SpatialHadoop se implementaron los siguientes fases: (1) Inicialmente, se obtiene una muestra aleatoria,  $\mathcal{S}$ , de un conjunto de datos  $\mathbb{P}$  y los valores de los parámetros  $x$  (número de particiones basado en el tamaño de fichero y la capacidad de bloque HDFS) y  $s = |\mathcal{S}|$  (*Sampleado*). (2) Un conjunto  $\mathcal{R}$  de *pivotes* se obtiene de la muestra aleatoria  $\mathcal{S}$  (*División del espacio*), usando alguna técnica de selección de pivotes. (3) Finalmente, los puntos son asignados a su pivote más cercano  $r_i \in \mathcal{R}$  (*Indexado*) y se calculan algunas propiedades del pivote, tales como el número de elementos, el minimum bounding rectangle  $MBR$ ,  $U(\mathcal{P}_i^{\mathbb{P}})$  y  $L(\mathcal{P}_i^{\mathbb{P}})$ .

La fase de *Sampleado* busca encontrar una pequeña pero representativa muestra del conjunto de datos. En este trabajo, hemos utilizado 3 métodos de muestreo: (1) *sampleado aleatorio uniforme* [4], donde el tamaño de la muestra es un ratio entre la muestra y el conjunto de datos original; (2) *sampleado basado en particiones* [22], mediante el algoritmo  $k$ -means++ [2] realiza un muestreo más sofisticado que utiliza técnicas de clustering; y (3) *sampleado basado en densidad* [21], mediante el algoritmo DENDIS[21] donde los conceptos de distancia se utilizan al muestrear para asegurar una cobertura del espacio y la obtención de clústeres con una determinada forma.

En cuanto a la fase de *División del espacio*, el método de selección de pivotes es muy importante a la hora de crear el Diagrama de Voronoi y en este trabajo se han utilizado varias técnicas. La selección aleatoria que es la más rápida pero no la que proporciona mayor rendimiento en las consultas. En la categoría de selección basada en clústeres de particiones, hemos elegido el algoritmo  $k$ -means [15]. Se ha utilizado la versión de *Sort-Means* [20], la cual acelera  $k$ -means, mediante la desigualdad triangular y el cálculo de distancias medias a pares para eliminar candidatos. Además, se utiliza  $k$ -means++ para el conjunto inicial de pivotes. Cuando los  $k$  clústeres se han generado, el punto medio de cada cluster se selecciona como pivote del particionado basado en Voronoi. Como método de clustering basado en densidades, se ha elegido OPTICSxi [23], que de manera general, crea una clasificación jerárquica de clústeres. Los parámetros principales de OPTICSxi son  $\epsilon$  (un límite superior de la distancia a considerar), *minpts* (el mínimo número de puntos requeridos para formar un clúster) y  $xi$  (parámetro de

contraste que establece el descenso relativo en la densidad). Dado que la salida del algoritmo es una estructura jerárquica, tenemos que encontrar el nivel donde hay al menos  $k$  clústeres. Una vez encontrado, el punto central de cada clúster se elige como pivote.

En cuanto a las técnicas de poda, unas utilizan características de los Diagramas de Voronoi y otras tratan de minimizar los datos utilizados durante las distintas fases de los algoritmos. Los puntos dentro de cada celda de Voronoi  $V_i$  se denotan como  $V_i.core = \{p : p \in V_i\}$ . El conjunto de soporte de una celda de Voronoi  $V_i$ , llamado  $V_i.support$ , contiene los puntos que satisfacen las siguientes 2 condiciones: (1)  $\forall q \in V_i.support, q \notin V_i.core$ , y (2) existe al menos un punto  $p \in V_i.core$  tal que  $q \in KNN(V_i, p, K)$ . El  $V_i.support$  debe ser suficiente para garantizar que el  $KNN$  de todos los puntos de cada celda  $V_i$  se encuentra en  $V_i.core$  y  $V_i.support$ . Un número grande de puntos de soporte incrementa el coste computacional y por lo tanto las reglas [13] tratarán de reducir este número. La primera regla *Poda de celdas de soporte*, que se aplica en la función *map* de la fase *KNNJ en las celdas solapadas*, evita duplicación de datos innecesarios, y reduce el número de celdas de Voronoi para cada punto que deben ser comprobadas con los puntos de los conjuntos de soporte. La segunda regla, *Poda de puntos de soporte*, permite eliminar, en la fase *map* de la fase *KNNJ en las celdas solapadas*, los puntos de las celdas de soporte que no son parte de ninguna listas  $KNN$  parcial. Esto permite reducir aun más los datos manejados y la complejidad del cálculo del  $KNN$  final de cada punto. Además, podemos usar un limite inferior [13] que permite reducir la penalización de aplicar esta regla de poda.

En [17] se introduce la técnica de menos datos (*less data*) para All-KNNQ con el objetivo de reducir el tamaño de los datos manejados y el tamaño de los datos de salida de la fase *KNNJ en las celdas solapadas*. En nuestro algoritmo original, cada punto, que no esta finalizado, se envía a su *reducer* de la fase *KNNJ en las celdas solapadas* con su lista  $KNN$ . Por lo tanto, se añade una carga considerable a la red, especialmente para valores de  $K$  grandes. Aplicando esta técnica se reemplaza la lista  $KNN$  con la distancia al  $K$ -ésimo vecino como un limite, que realmente es la única información que el *reducer* necesita. Las listas  $KNN$  parciales se mezclaran finalmente en la fase *Combinación de resultados*.

Para finalizar, las principales conclusiones obtenidas de la realización de una serie de experimentos sobre la técnica de particionado basada en Diagramas de Voronoi propuesta son: (1) La mejor técnica de muestreo es  $k$ -means++, que es un método de muestreo basado en particiones. (2) La selección de pivotes mediante  $k$ -means muestra el mejor rendimiento global en todos los casos para KNNJQ, porque el tiempo empleado por el algoritmo  $k$ -means en la fase de reparticionado se compensa con la ganancia de rendimiento en fases posteriores. (3) La versión mejorada de *KNNJ* ha sido diseñada para disminuir considerablemente el tiempo de ejecución, especialmente en las fases *KNNJ en las celdas solapadas* y *Combinación de resultados*, reduciendo el tamaño de los datos de entrada, de los datos distribuidos y de los datos que se procesan en el cálculo de los  $KNN$  mediante el uso de diferentes reglas de poda. (4) *Quadtree* mejora a

todas las otras técnicas respecto al tiempo de ejecución para el algoritmo  $k$ CPQ, aunque las técnicas basadas en *Voronoi* presentan un rendimiento ligeramente inferior, especialmente, para la combinación de conjuntos de datos más pequeños.

### 2.3 MRSLICE: Efficient RkNN Query Processing in SpatialHadoop

En [9] se presenta el diseño e implementación de un nuevo algoritmo MapReduce para  $RkNNQ$ , llamado *MRSLICE*, en SpatialHadoop para el procesado paralelo y distribuido de grandes conjuntos de datos espaciales. La ejecución de un conjunto de experimentos para evaluar la eficiencia y escalabilidad de *MRSLICE*, contra *MRSFT* [6], otro algoritmo MapReduce para  $RkNNQ$  en SpatialHadoop, ha mostrado el excelente rendimiento de *MRSLICE* para todos los parámetros de rendimiento considerados.

Dado un conjunto de datos, la consulta  $RkNN$  [12] devuelve los objetos que tienen a un objeto de consulta dentro de sus  $k$  vecinos más cercanos. Es el problema complementario a la consulta  $kNN$  y busca encontrar la influencia de un objeto de consulta sobre todo el conjunto de datos. En [12] se mencionan diferentes casos reales. Una solución inmediata al problema del  $RkNN$  es de  $O(n^2)$ , debido a que hay que encontrar los  $k$  vecinos más cercanos de todos los  $n$  objetos del conjunto de datos [12]. Obviamente, se necesitan algoritmos más eficientes y por lo tanto, la consulta  $RkNN$  se ha estudiado de forma extensa para entornos centralizados [28]. Nuestra propuesta trata de solucionar el problema en entornos distribuidos y busca adaptar técnicas utilizadas en estos entornos centralizados para reducir el espacio de búsqueda y mejorar el rendimiento.

Uno de estos algoritmos  $RkNN$ , denominado SLICE [29], está basado en la poda basada en regiones [25] y mejora significativamente al algoritmo de referencia en términos de tiempo de ejecución. Las técnicas de poda más utilizadas son las basadas en regiones y las de espacio medio [27]. Esta última es generalmente considerada como superior y debido a esto, casi todos los algoritmos  $RkNN$  utilizan y mejoran esta estrategia. Tras observar los puntos fuertes y débiles de ambas técnicas, los autores consideraron que la poda basada en regiones tiene ciertas ventajas que no habían sido aprovechadas anteriormente. El resultado de dicho estudio es la creación del algoritmo SLICE que consigue mejorar el rendimiento de este tipo de poda y eliminar sus limitaciones. Este algoritmo consta de dos fases: (1) en la fase de poda, se reduce el espacio de búsqueda e se identifica aquellos elementos *significantes* que se utilizarán para acelerar la siguiente fase. Y (2) en la fase de verificación se identifican aquellos objetos que se encuentran en el espacio de búsqueda actual y se verifican como resultado de  $RkNN$  si como mucho existen  $k-1$  elementos significantes más cercanos al objeto de consulta.

Nuestro trabajo en curso consiste en aplicar esta filosofía en un entorno distribuido. Las fases de las que consta el algoritmo son las siguientes:

- **Fase 1.** Se realiza la fase de poda de SLICE sobre la partición en la que se encuentra el objeto de consulta.

- **Fase 1.b (opcional).** Se continua el proceso de poda sobre aquellas particiones que todavía forma parte del espacio de búsqueda.
- **Fase 2.** Se realiza la fase de verificación con aquellas particiones que no han sido eliminadas como resultado de aplicar las fases 1 y 1.b.

Por último, se ha demostrado experimentalmente la eficiencia (en términos de tiempo total de ejecución) y la escalabilidad (tamaño de datos,  $k$ , número de nodos de computación ( $\eta$ ), etc.) del algoritmo paralelo y distribuido *MRSLICE* para *RkNNQ* y se ha comparado con el algoritmo *MRSFT* en SpatialHadoop. Además se ha demostrado que *MRSLICE* mejora a *MRSFT* en varias ordenes de magnitud (aproximadamente 5 veces más rápido), gracias a sus capacidades de poda y el menor número de trabajos MapReduce, incluso con valores de  $k$  elevados. Por último, el uso de nodos de computación por parte de *MRSLICE* es pequeño, permitiendo la ejecución de varias consultas en paralelo, al contrario que *MRSFT*, que puede dejar al clúster ocupado.

#### 2.4 MapReduce Algorithms for the K Group Nearest-Neighbor Query in SpatialHadoop

En [16] se realizó una colaboración internacional con la Universidad de Thessaly (Grecia) en el diseño, implementación y experimentación de diferentes algoritmos MapReduce para la consulta de los ( $k$ ) vecinos más cercanos de un grupo ((K) Group Nearest Neighbor Query (GNNQ)). Actualmente se está trabajando en su mejora y adaptación para el entorno de SpatialHadoop.

GNNQ [19] es una extensión de la consulta  $k$ NN que es importante para diferentes aplicaciones. Dados dos conjuntos de puntos, esta consulta obtiene los  $k$  puntos de un conjunto de datos (Entrenamiento) con la menor suma de distancias a cada uno de los puntos del otro conjunto de datos (Consulta). El conjunto de Entrenamiento se considera estático y es consultado por múltiples conjuntos de datos de Consulta. Un ejemplo de su utilidad puede ser cuando tenemos un conjunto de lugares de encuentro (Entrenamiento) y un conjunto de localizaciones de usuarios (Consulta), y queremos encontrar un lugar (o  $k$ ) de encuentro(s) que minimicen la distancia que tengan que recorrer los usuarios para llegar.

Para su adaptación hay que tener en cuenta las características que proporciona SpatialHadoop.

- Al poder utilizar conjuntos de datos previamente particionados e indexados en SpatialHadoop, se pueden utilizar/ ejecutar funciones de filtrado previas a la lectura de los datos desde el sistema HDFS. Cada partición esta representada por su MBR y si aplicamos/transformamos heurísticas y reglas de poda a estos, podemos reducir el espacio de búsqueda de forma considerable a la vez que reducimos operaciones de entrada/salida.
- Otra característica que proporcionan los índices de SpatialHadoop es que podemos tener los elementos agrupados de una partición como entrada de

la fase *map*. De esta manera evitamos tener que leer los elementos espaciales de uno en uno y utilizar la fase *map* para agruparlos en el *reducer* correspondiente a su partición.

- Sin embargo, hay que tener en cuenta que SpatialHadoop esta orientado al almacenamiento eficiente de los datos, es decir, las particiones se crean ajustadas a los parámetros del sistema HDFS. Sin embargo, esto puede provocar que a la entrada de las funciones espaciales nos encontremos con demasiados datos y no aprovechemos la paralelización que aporta el clúster. Para evitar esto podemos usar técnicas de reparticionado [11] que además lidien con problemas de datos sesgados.

### 3 Conclusiones y Trabajos Futuros

El procesamiento de consultas espaciales se ha estudiado activamente en entornos centralizados, sin embargo, para marcos paralelos y distribuidos no ha conseguido una atención similar. Por lo tanto, el principal objetivo de esta tesis doctoral es, a partir del estudio y uso de diferentes entornos paralelos y distribuidos, desarrollar nuevos algoritmos eficientes que aprovechen las características que proporcionan dichos entornos. Durante el último año hemos trabajado principalmente en la mejora de algoritmos espaciales anteriormente presentados, el estudio y la implementación de nuevas consultas y el desarrollo de nuevas técnicas de particionado. Podemos destacar las siguientes contribuciones:

- Hemos implementado nuevos algoritmos ( $k$ NNJQ y  $\epsilon$ DRJQ), mejorado su rendimiento con el uso de técnicas de reparticionado de las zonas espaciales más densas y realizado la extensión de estos y de los presentados en [10, 5] para el uso de objetos espaciales complejos (polígonos) [11].
- Hemos propuesto una técnica de particionado eficiente basada en Diagramas de Voronoi en SpatialHadoop [7] y la hemos aplicado para la mejora de los algoritmos  $k$ CPQ y  $k$ NNJQ en MapReduce.
- Hemos propuesto el diseño e implementación de un nuevo algoritmo MapReduce para  $Rk$ NNQ, llamado *MRSlice* [9], en SpatialHadoop para el procesamiento paralelo y distribuido de grandes conjuntos de datos espaciales.
- Hemos colaborado en el diseño, implementación y experimentación de diferentes algoritmos MapReduce para la consulta GNNQ [16] y su extensión a SpatialHadoop.

Trabajos futuros podrían incluir las siguiente tareas:

- Mejorar el rendimiento de  $k$ NNJQ mediante el uso de características de Spatial Hadoop o LocationSpark, como puede ser los *CombineFileSplits*, que permitirían reducir el tamaño de los datos enviados entre fases y la simplificación del algoritmo para la reducción de los tiempos de ejecución.
- Implementar la técnica de particionado basado en Diagramas de Voronoi en sistemas basados en Spark como GeoSpark [31] o LocationSpark [26].
- Implementar otras consultas espaciales en SGDED, como multi-way distance joins queries [3] o basadas en la consulta Bichromatic  $Rk$ NNQ [30].

- Mejorar el coste de *MRSlice* utilizando el *conjunto guardián* de una región rectangular [24], el cual mejora el algoritmo *SLICE* original.

## Referencias

1. Aji, A., Wang, F., Vo, H., Lee, R., Liu, Q., Zhang, X., Saltz, J.: Hadoop gis: a high performance spatial data warehousing system over mapreduce. *Proceedings of the VLDB Endowment* **6**(11), 1009–1020 (2013)
2. Arthur, D., Vassilvitskii, S.: k-means++: the advantages of careful seeding. In: *SODA Conference*. pp. 1027–1035 (2007)
3. Corral, A., Manolopoulos, Y., Theodoridis, Y., Vassilakopoulos, M.: Algorithms for processing k-closest-pair queries in spatial databases. *Data Knowl. Eng.* **49**(1), 67–104 (2004)
4. Eldawy, A., Mokbel, M.F.: Spatialhadoop: A mapreduce framework for spatial data. In: *ICDE Conference*. pp. 1352–1363 (April 2015)
5. García-García, F., Corral, A., Iribarne, L., Mavrommatis, G., Vassilakopoulos, M.: A comparison of distributed spatial data management systems for processing distance join queries. In: *ADBIS Conference*. pp. 214–228 (2017)
6. García-García, F., Corral, A., Iribarne, L., Vassilakopoulos, M.: Rknn query processing in distributed spatial infrastructures: A performance study. In: *International Conference on Model and Data Engineering*. pp. 200–207. Springer (2017)
7. García-García, F., Corral, A., Iribarne, L., Vassilakopoulos, M.: Voronoi-diagram based partitioning for distance join query processing in spatialhadoop. In: *International Conference on Model and Data Engineering*. pp. 251–267. Springer (2018)
8. García-García, F., Corral, A., Iribarne, L., Vassilakopoulos, M.: Improving distance-join query processing with voronoi-diagram based partitioning in spatialhadoop. *Future Generation Computer Systems* (2019)
9. García-García, F., Corral, A., Iribarne, L., Vassilakopoulos, M.: Mrslice: Efficient rknn query processing in spatialhadoop. In: *International Conference on Model and Data Engineering*. pp. 235–250. Springer (2019)
10. García-García, F., Corral, A., Iribarne, L., Vassilakopoulos, M., Manolopoulos, Y.: Efficient large-scale distance-based join queries in spatialhadoop. *GeoInformatica* (2017) <https://doi.org/10.1007/s10707-017-0309-y> (2017)
11. García-García, F., Corral, A., Iribarne, L., Vassilakopoulos, M., Manolopoulos, Y.: Efficient distance join query processing in distributed spatial data management systems. *Information Sciences* **512**, 985–1008 (2020)
12. Korn, F., Muthukrishnan, S.: Influence sets based on reverse nearest neighbor queries. In: *SIGMOD Conference*. pp. 201–212 (May 2000)
13. Kuhlman, C., Yan, Y., Cao, L., Rundensteiner, E.A.: Pivot-based distributed k-nearest neighbor mining. In: *ECML/PKDD Conference*. pp. 843–860 (2017)
14. Li, F., Ooi, B.C., Özsu, M.T., Wu, S.: Distributed data management using mapreduce. *ACM Comput. Surv.* **46**(3), 31:1–31:42 (2014)
15. MacQueen, J.: Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. pp. 281–297 (1967)
16. Moutafis, P., García-García, F., Mavrommatis, G., Vassilakopoulos, M., Corral, A., Iribarne, L.: Mapreduce algorithms for the k group nearest-neighbor query. In: *Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*. pp. 448–455 (2019)

17. Moutafis, P., Mavrommatis, G., Vassilakopoulos, M., Sioutas, S.: Efficient processing of all-k-nearest-neighbor queries in the mapreduce programming framework. *Data Knowl. Eng. Accepted* (2019) (2019)
18. Nodarakis, N., Pitoura, E., Sioutas, S., Tsakalidis, A.K., Tsoumakos, D., Tzimas, G.: kdann+: A rapid aknn classifier for big data. *Trans. Large-Scale Data- and Knowledge-Centered Systems* **24**, 139–168 (2016)
19. Papadias, D., Shen, Q., Tao, Y., Mouratidis, K.: Group nearest neighbor queries. In: *Data Engineering, 2004. Proceedings. 20th International Conference on*. pp. 301–312. IEEE (2004)
20. Phillips, S.J.: Acceleration of k-means and related clustering algorithms. In: *ALLENEX Conference*. pp. 166–177 (2002)
21. Ros, F., Guillaume, S.: DENDIS: A new density-based sampling for clustering algorithm. *Expert Systems with Applications* **56**, 349–359 (2016)
22. Ros, F., Guillaume, S.: DIDES: a fast and effective sampling for clustering algorithm. *Knowl. Inf. Syst.* **50**(2), 543–568 (2017)
23. Schubert, E., Gertz, M.: Improving the cluster structure extracted from OPTICS plots. In: *LWDA Conference*. pp. 318–329 (2018)
24. Song, W., Qin, J., Wang, W., Cheema, M.A.: Pre-computed region guardian sets based reverse knn queries. In: *DASFAA Conference*. pp. 98–112 (2016)
25. Stanoi, I., Agrawal, D., El Abbadi, A.: Reverse nearest neighbor queries for dynamic databases. In: *ACM SIGMOD workshop on research issues in data mining and knowledge discovery*. pp. 44–53 (2000)
26. Tang, M., Yu, Y., Malluhi, Q.M., Ouzzani, M., Aref, W.G.: Locationspark: a distributed in-memory data management system for big spatial data. *Proceedings of the VLDB Endowment* **9**(13), 1565–1568 (2016)
27. Tao, Y., Papadias, D., Lian, X.: Reverse knn search in arbitrary dimensionality. In: *Proceedings of the Thirtieth international conference on Very large data bases- Volume 30*. pp. 744–755. VLDB Endowment (2004)
28. Yang, S., Cheema, M.A., Lin, X., Wang, W.: Reverse k nearest neighbors query processing: Experiments and analysis. *PVLDB* **8**(5), 605–616 (2015)
29. Yang, S., Cheema, M.A., Lin, X., Zhang, Y.: Slice: reviving regions-based pruning for reverse k nearest neighbors queries. In: *Data Engineering (ICDE), 2014 IEEE 30th International Conference on*. pp. 760–771. IEEE (2014)
30. Yang, S., Cheema, M.A., Lin, X., Zhang, Y.: SLICE: reviving regions-based pruning for reverse k nearest neighbors queries. In: *ICDE Conference*. pp. 760–771 (March 2014)
31. Yu, J., Wu, J., Sarwat, M.: Geospark: a cluster computing framework for processing large-scale spatial data. In: *SIGSPATIAL Conference*. pp. 70:1–70:4 (November 2015)
32. Zhang, H., Chen, G., Ooi, B.C., Tan, K.L., Zhang, M.: In-memory big data management and processing: A survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* **27**(7), 1920–1948 (2015)
33. Zhang, S., Han, J., Liu, Z., Wang, K., Xu, Z.: SJMR: parallelizing spatial join with MapReduce on clusters. In: *CLUSTER Conference*. pp. 1–8 (September 2009)

# Sistemas de control para las fases de arranque y operación en plantas de destilación solar por membranas a escala industrial

Juan D. Gil

Centro Mixto CIESOL, ceiA3, Universidad de Almería.  
{juandiego.gil}@ual.es

**Abstract.** La destilación por membranas alimentadas con energía solar (*Solar Membrane Distillation*, SMD) es una tecnología de desalación en fase de investigación, adecuada para el desarrollo de plantas autónomas capaces de cubrir requerimientos medios-bajos de demanda de agua. Esta tesis tiene como objetivo la aportación de contribuciones, desde el punto de vista de modelado control y optimización, que supongan un avance hacia la comercialización de la tecnología de destilación por membranas. En este trabajo, se presenta una revisión de los avances realizados en el año 2019 en el marco de la presente tesis, entre los cuales se pueden destacar: i) desarrollo de un controlador jerárquico de dos capas para mejorar la fase de arranque de procesos alimentados con campos solares térmicos que incluyan sistemas de almacenamiento directo, como es el caso de la planta SMD que se usa como referencia en la tesis, ii) desarrollo de un controlador predictivo basado en modelo distribuido (*Distributed Model Predictive Control*, DMPC) para la operación eficiente del módulo de desalación de una planta SMD a escala industrial, y iii) desarrollo de un controlador predictivo basado en modelo (*Model Predictive Control*, MPC) para la gestión de una red inteligente que incluye un grupo de invernaderos, una instalación SMD y la red de agua pública.

## 1. Introducción

En las últimas décadas, la escasez de agua se está convirtiendo en uno de los principales retos que debe afrontar la humanidad. El crecimiento de la población junto con el incremento de las actividades agrícolas e industriales, han contribuido a una sobreexplotación de las reservas de agua dulce, sobrepasando el límite de renovación de dicho recurso. De este modo, las tecnologías de desalación se están convirtiendo progresivamente en un elemento necesario fundamental, especialmente en las zonas áridas o semiáridas con escasez de agua. Estas tecnologías requieren intensivos sistemas de generación de energía para su funcionamiento,



Sistemas de control para las fases de arranque y operación en plantas de destilación solar...



**Figura 1.** Instalación piloto de la PSA.

por lo que deben ser asociadas con fuentes de energía renovables para su sostenibilidad económica. El uso de fuentes de energía renovables en los procesos de desalación no solo reduce los costes económicos de dichos procesos, sino que también reemplaza el uso de fuentes tradicionales como los combustibles fósiles, contribuyendo así a un desarrollo medioambiental sostenible y eficiente.

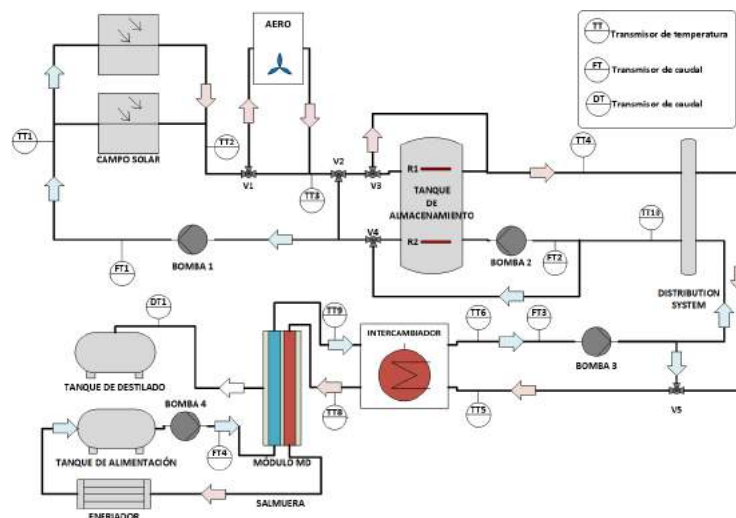
En este contexto, la destilación por membranas con apoyo de energía solar es una tecnología apropiada para el desarrollo de pequeñas plantas autosuficientes de desalación, que pueden ser implantadas en zonas aisladas con unas buenas condiciones de irradiancia solar [1]. Esta tecnología destaca por su baja temperatura de operación, que permite que sea fácilmente acoplable a tecnologías solares. Además, tiene una serie de características que hacen que la planta pueda ser completamente automatizada, como son la sencillez del proceso, la fiabilidad y los bajos requerimientos de mantenimiento. No obstante, esta tecnología se encuentra actualmente en fase de investigación y todavía no ha sido comercializada a escala industrial, debido principalmente a problemas técnicos en el diseño del módulo, problemas de humectación en las membranas, a la baja producción de destilado y a la incertidumbre asociada a los costes económicos [2]. Una de las pocas plantas (ver Fig. 1) descrita totalmente en la literatura [1] se encuentra en la Plataforma Solar de Almería (PSA, [www.psa.es](http://www.psa.es)).

MD es un proceso de separación impulsado térmicamente que se produce en una membrana hidrófoba y microporosa. La fuerza impulsora del proceso es el gradiente de presión que se genera a ambos lados de la membrana, como resultado de una diferencia de temperatura. De esta forma, las moléculas de agua se evaporan y pasan a través de la membrana, mientras que los componentes no volátiles son rechazados. Como todas las tecnologías de destilación térmica, los procesos MD tienen la capacidad de tratar agua con concentraciones de sal elevadas, pero sin necesidad de laboriosos procesos de pretratamiento químico del agua de alimentación, obteniendo permeados de alta pureza. Los sistemas MD suelen ser clasificados dependiendo del lugar donde se produzca la condensación del permeado [3]. Las configuraciones más empleadas son: Destilación por Contacto Directo (*Direct Contact MD*, DCMD) y Destilación por Membranas con Espacio de Aire (*Air Gap MD*, AGMD) en los cuales el proceso de condensación se produce dentro del módulo, y Destilación por Membranas con Barrido de Gas (*Sweeping Gas MD*, SGMD), Destilación por Membrana Líquida (*Permeate Gap*

Sistemas de control para las fases de arranque y operación en plantas de destilación solar...

MD, PGMD) y Destilación en Condiciones de Vacío (*Vacuum MD*, VMD) en los que la condensación tiene lugar en un condensador externo al módulo.

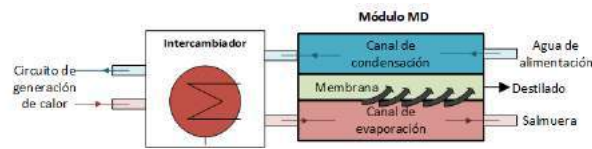
Como se ha mencionado anteriormente, en la PSA se encuentra una de las pocas instalaciones piloto MD que existen en la actualidad, en la cual se llevan a cabo investigaciones dirigidas a la caracterización y evaluación de diferentes tipos de módulos y configuraciones [4]. En la planta MD de la PSA (ver Fig. 2), la energía térmica necesaria para el proceso de destilación la proporciona un campo solar formado por captadores planos dispuestos en dos filas de cinco captadores cada una. La potencia nominal del campo es de 7 kW a unos 90 °C. A la salida del campo solar hay instalado un aerotermo, que se utiliza para evitar excesos de temperatura que puedan dañar las membranas. Posteriormente, se dispone un tanque de almacenamiento térmicamente aislado (1500 L), que se emplea como buffer o almacenamiento energético y que dota a la instalación de un carácter híbrido, permitiendo la producción de destilado en varios modos de operación tal y como se presentó en [5]. A continuación, se encuentra el sistema de distribución, el cual posibilita la conexión de varios módulos simultáneamente al sistema de generación de energía. Cada módulo se conecta al sistema de distribución a través de su propio intercambiador.



**Figura 2.** Diagrama esquemático de la instalación.

Dentro del módulo (ver Fig. 3), la bomba 4 impulsa la solución de alimentación (agua de mar) hacia el canal de condensación del módulo. Cuando dicha solución llega al intercambiador de calor, es calentada con el fluido proveniente del sistema de generación de energía. A continuación, la solución de alimentación caliente es dirigida hacia el canal de evaporación del módulo, de modo que las moléculas volátiles de la solución se evaporan y pasan a través de la membrana,

Sistemas de control para las fases de arranque y operación en plantas de destilación solar...



**Figura 3.** Diagrama esquemático del módulo MD.

mientras que los componentes no volátiles se rechazan en forma de salmuera y son reconducidos al tanque de alimentación. El permeado es posteriormente condensado y vertido en el tanque de destilado. Se debe tener en cuenta que durante una operación, en el tanque de alimentación se va incrementando la temperatura y la salinidad de la solución inicial, debido a la recirculación de la salmuera. Para mantener las condiciones deseadas se utiliza un tanque auxiliar y un enfriador. Toda la planta está completamente monitorizada por medio de un PLC (*Programmable Logic Controller*) y un sistema de supervisión SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) con un tiempo de muestreo de 1 segundo.

En la literatura, hay muy pocos trabajos relacionados con el modelado, control y optimización de procesos MD. La construcción de modelos precisos de los módulos MD permite no solo simular y analizar el comportamiento del módulo bajo diferentes condiciones de operación, sino que también pueden ser usados para el desarrollo de estrategias de optimización en tiempo real, o para realizar diseños óptimos de las plantas, convirtiéndose así en elementos indispensables para la comercialización de la tecnología. Hasta el momento en la literatura, la mayoría de los modelos realizados se desarrollan en base al método estadístico RSM (*Response Surface Methodology*). Este método utiliza funciones cuadráticas para ajustar respuestas de procesos lineales o débilmente no lineales, sin embargo, no proporciona buenos resultados cuando la no linealidad del sistema es alta. Además, en la mayoría de los trabajos uno de los parámetros que más influencia el comportamiento del módulo, la salinidad del agua de alimentación (y que influye de forma no lineal al comportamiento del módulo), no se tiene en cuenta como una entrada del modelo [4,6]. Por otra parte, hay autores que utilizan modelos que se pueden ajustar de una forma más precisa a sistemas no lineales, como es el caso de las redes neuronales. Aunque en estos estudios sí se usa la salinidad como una variable de entrada al modelo, solo se considera la producción de destilado como salida [7,8], sin tener en cuenta el consumo térmico, uno de los factores fundamental en los procesos MD.

Desde el punto de vista del control automático, casi todos los trabajos han sido realizados en simulación, y proponen estructuras de control básicas formadas por lazos individuales. En [9], se desarrolla un modelo de una planta MD y se realiza una optimización fuera de línea de su comportamiento. Posteriormente se propone un sistema de control de temperatura basado en controladores ON/OFF que intenta seguir los puntos óptimos, obtenidos por el algoritmo de optimización, durante una operación real simulada. En [10], nuevamente se

emplean controladores del tipo ON/OFF para el control de la diferencia de temperatura que se produce entre el tanque y el campo solar, de modo que se desarrollan dos modos de operación: diario y nocturno. En [11], se prueban en simulación dos bucles de control destinados a controlar la temperatura del campo solar de alimentación. En [12], se desarrolla un generador de consignas que pretende mantener una diferencia de temperatura predefinida entre las dos partes de la membrana. Un enfoque de control más completo es el presentado en [13], en el cual se propone un algoritmo de control óptimo en tiempo real para regular el caudal de alimentación acorde a las condiciones de operación, intentando maximizar la producción de destilado. En [14], se desarrolla un modelo de red neuronal que se utiliza para el análisis del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación, y que posteriormente es empleado para implementar un sistema de control que optimiza la producción de destilado en base a las condiciones de operación. En [15] se presentó un enfoque de control óptimo libre de modelo obtenido a partir de un controlador MPC para maximizar la producción de destilado de una planta SMD. Además, durante la presente tesis, ya se han presentado varias contribuciones desde el punto de vista de modelado y control, con pruebas tanto en simulación como en la planta real. En primer lugar, se desarrolló un sistema de control directo capaz de mantenerla la temperatura y el caudal del sistema de generación de energía en unos valores deseados [5,16,17,18,19]. En segundo lugar se modeló el módulo MD mediante redes neuronales artificiales y mediante la metodología de superficie de respuesta [20]. En tercer lugar, se han presentado trabajos donde se desarrollan algoritmos de control predictivo para la operación eficiente de la planta en tiempo real, dependiendo de las condiciones de operación en cada instante [21,22,23,24].

En este trabajo se presenta una revisión de los avances realizados en el marco de desarrollo de la presente tesis durante el año 2019. En particular, se ha desarrollado una estrategia de control jerárquica de dos capas para la fase de arranque de la instalación SMD [25]. Además, se ha presentado una estrategia de control DMPC para instalaciones industriales SMD en las cuales la unidad de desalación estén formadas por múltiples módulos MD [26]. Por último, se ha propuesto una estrategia MPC para gestionar una red inteligente compuesta por varios agentes consumidores (i.e., invernaderos), una desaladora SMD y la red de agua pública [27].

## 2. Avances

En esta sección se presentan de forma resumida los avances realizados durante este año.

### 2.1. Sistema de control jerárquico para el procedimiento de arranque de un campo solar térmico con almacenamiento directo

Los campos solares térmicos son combinados habitualmente con sistemas de almacenamiento de energía térmica para mejorar su rendimiento y funcionalidad.

Desde el punto de vista dinámico la fase de arranque en este tipo de sistemas es relevante ya que, si el sistema de almacenamiento térmico está descargado en términos energéticos o muy estratificado, el régimen transitorio hasta al alcanzar el punto de operación requerido puede llevar demasiado tiempo. De este modo, en [25] se propuso un controlador jerárquico de dos capas basado en la metodología MPC y en controladores Proporcionales, Integrales y Derivativos (PID) (ver Fig. 4). El controlador fue probado experimentalmente en la planta piloto SMD de la PSA. Además, se realizaron comparaciones en simulación con una estrategia de operación manual y dos estrategias de arranque propuestas previamente en la literatura. Los resultados obtenidos mostraron los beneficios que se consiguen con la estrategia propuesta ya que se reduce en 34 min el tiempo de arranque respecto a la estrategia de operación manual, y en 26 y 6 min respecto a las dos estrategias previas propuestas en la literatura.

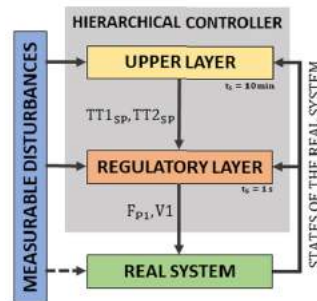


Figura 4. Diagrama esquemático del sistema de control propuesto en [25] .

## 2.2. Gestión óptima de la energía térmica en sistemas distribuidos compuestos por plantas SMD e invernaderos

La escasez de agua en Almería (sureste de España), y en en los países del mediterráneo en general, está comprometiendo la sostenibilidad de uno de sus principales motores económicos, la agricultura. De acuerdo a este hecho, el trabajo presentado en [26] propuso una estrategia de control DMPC para un sistema distribuido de energía compuesto por una planta SMD y un invernadero (ver Fig. 5); el tipo de sistema de cultivo más utilizado en Almería. El controlador presentado se encarga de calcular el caudal óptimo de operación de cada uno de los módulos MD que componen la unidad de desalación de la planta SMD, de acuerdo a la demanda de agua del invernadero y el consumo energético de la planta SMD (uno de los puntos débiles de la tecnología). La estrategia de control se probó en simulación utilizando modelos alimentados con datos meteorológicos reales de dos plantas experimentales localizadas en Almería. Además, los resultados obtenidos de la operación automática se compararon con una operación

## Sistemas de control para las fases de arranque y operación en plantas de destilación solar...

manual, mostrando como el consumo energético se puede disminuir en un 5 % al mismo tiempo que se satisface las demanda de agua del invernadero. Esto supone importantes ahorros térmicos de alrededor de 50 MWh/campaña en un área de cultivo de 8 ha.

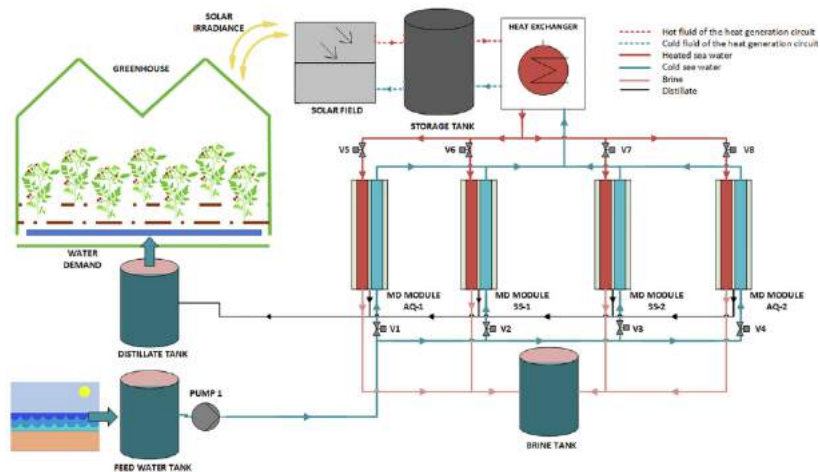


Figura 5. Diagrama esquemático del caso de estudio adoptado en [26] .

### 2.3. Sistema de control basado en el internet de las cosas para una planta SMD usada para el riego de invernaderos

Por último, en [27] se propuso una estrategia de control basada en el internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT) para gestionar una red inteligente (ver Fig. 6) que incluye una planta SMD y un grupo de invernadero que demandan agua. Además, se tuvo en cuenta el agua de la red pública como una agente de la red inteligente. La metodología de control propuesta está basada en un controlador MPC el cual utiliza información, por medio de una plataforma IoT, procedente de los diferentes agentes incluidos en la red inteligente para calcular las acciones de control óptimas en la nube. El objetivo del controlador consiste en minimizar los costes operacionales de la red inteligente considerando los costes del sistema de bombeo de la planta SMD y los costes del agua de la red pública. La estrategia fue probada en simulación demostrando los beneficios que ofrece el sistema de control.

## 3. Conclusiones

En esta sección se muestran las principales conclusiones de los avances realizados durante este año. En primer lugar, los resultados obtenidos con el algoritmo

Sistemas de control para las fases de arranque y operación en plantas de destilación solar...

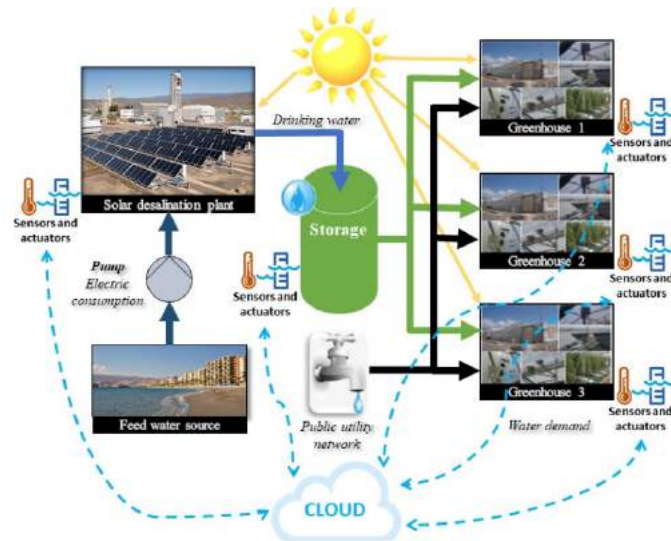


Figura 6. Diagrama esquemático del caso de estudio adoptado en [27] .

de control para la fase de arranque de una instalación SMD mostraron como el uso de un controlador que tenga en cuenta: i) las perturbaciones de radiación en cada instante de muestreo, y ii) que utilice una estrategia de control de horizonte deslizante, puede reducir considerablemente el tiempo empleado en la fase de arranque de la instalación. Este hecho es especialmente notable cuando el tanque de almacenamiento térmico está muy estratificado. Se debe mencionar que una de las principales contribuciones propuestas en este trabajo consiste en el uso de una válvula de mezcla de tres vías como variable de control, en lugar de utilizar solo el caudal del campo solar como se ha hecho convencionalmente [23]. Así, se consiguen mejorar los tiempos de arranque en 34 min respecto a una operación manual, en 26 min respecto a la estrategia propuesta en [23], y en 6 min respecto a la técnica propuesta en [19].

El algoritmo DMPC propuesto para la operación eficiente del sistema distribuido de energía compuesto por una planta SMD y un invernadero mostró claras ventajas respecto a operaciones manuales y operaciones con controladores centralizados. El mayor reto presente en este tipo de instalaciones industriales consiste en manejar el gran número de variables de control que se deben gestionar. En este sentido, se demostró cómo, cuando el número de módulos MD requeridos para satisfacer la demanda de agua aumenta, el algoritmo de control centralizado no es capaz de calcular una solución óptima en el tiempo requerido, mientras que el algoritmo DMPC propuesto sí. Por otra parte, el controlador DMPC mostró ahorros significativos de energía térmica respecto a operaciones manuales, reduciendo hasta en 50 MWh/campaña el consumo térmico en su-

perfiles de cultivo de 8 ha; lo que puede ser bastante relevante para la fase de diseño de este tipo de instalaciones y para la operación diaria.

Por último, los resultados mostrados en [27] demostraron cómo combinando técnicas avanzadas de control (i.e., controladores MPC) con la tecnología IoT se pueden conseguir gestiones eficientes y óptimas de redes inteligentes formadas por plantas SMD, agentes consumidores, y la red de agua pública. No obstante estos fueron resultados preliminares y se debe seguir desarrollando tanto la estrategia de control como la plataforma IoT para su correcto uso.

## Referencias

1. G. Zaragoza, A. Ruiz-Aguirre, and E. Guillén-Burrieza, "Efficiency in the use of solar thermal energy of small membrane desalination systems for decentralized water production," *Applied Energy*, vol. 130, pp. 491–499, 2014.
2. M. Khayet, "Solar desalination by membrane distillation: Dispersion in energy consumption analysis and water production costs (a review)," *Desalination*, vol. 308, pp. 89–101, 2013.
3. A. Alkudhiri, N. Darwish, and N. Hilal, "Membrane distillation: a comprehensive review," *Desalination*, vol. 287, pp. 2–18, 2012.
4. A. Ruiz-Aguirre, J. Andres-Manas, J. Fernández-Sevilla, and G. Zaragoza, "Modeling and optimization of a commercial permeate gap spiral wound membrane distillation module for seawater desalination," *Desalination*, vol. 419, pp. 160–168, 2017.
5. J. D. Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, and M. Berenguel, "Solar membrane distillation: A control perspective," in *23th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2015)*. Torremolinos, Málaga, Spain, 2015, pp. 796–802.
6. M. Khayet, C. Cojocar, and A. Baroudi, "Modeling and optimization of sweeping gas membrane distillation," *Desalination*, vol. 287, pp. 159–166, 2012.
7. M. Khayet and C. Cojocar, "Artificial neural network modeling and optimization of desalination by air gap membrane distillation," *Separation and Purification Technology*, vol. 86, pp. 171–182, 2012.
8. —, "Artificial neural network model for desalination by sweeping gas membrane distillation," *Desalination*, vol. 308, pp. 102–110, 2013.
9. H. Chang, G.-B. Wang, Y.-H. Chen, C.-C. Li, and C.-L. Chang, "Modeling and optimization of a solar driven membrane distillation desalination system," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 2714–2722, 2010.
10. H. Chang, S.-G. Lyu, C.-M. Tsai, Y.-H. Chen, T.-W. Cheng, and Y.-H. Chou, "Experimental and simulation study of a solar thermal driven membrane distillation desalination process," *Desalination*, vol. 286, pp. 400–411, 2012.
11. J.-S. Lin, H. Chang, and G. B. Wang, "Modelling and control of the solar powered membrane distillation system," in *AIChE Annual Meeting*. Minneapolis, MN, USA, 2011.
12. F. Eleiwi, I. N'Doye, and T.-M. Laleg-Kirati, "Feedback control for distributed heat transfer mechanisms in direct-contact membrane distillation system," in *2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*. Sydney, Australia, 2015, pp. 1624–1629.



## Sistemas de control para las fases de arranque y operación en plantas de destilación solar...

13. A. M. Karam and T. M. Laleg-Kirati, "Real time optimization of solar powered direct contact membrane distillation based on multivariable extremum seeking," in *Control Applications (CCA), 2015 IEEE Conference on*. IEEE, 2015, pp. 1618–1623.
14. R. Porrizzo, A. Cipollina, M. Galluzzo, and G. Micale, "A neural network-based optimizing control system for a seawater-desalination solar-powered membrane distillation unit," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 54, pp. 79–96, 2013.
15. P. Bendevis, A. Karam, and T.-M. Laleg-Kirati, "Optimal model-free control of solar thermal membrane distillation system," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 133, p. 106622, 2020.
16. J. D. Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, M. Berenguel, and J. L. Guzmán, "Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar—parte 1: Esquemas," in *XXXVI Jornadas Automática, Bilbao, España*, 2015.
17. —, "Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar—parte 2: Resultados," in *XXXVI Jornadas Automática, Bilbao, España*, 2015.
18. J. D. Gil, L. Roca, G. Zaragoza, and M. Berenguel, "A feedback control system with reference governor for a solar membrane distillation pilot facility," *Renewable Energy*, vol. 120, pp. 536–549, 2018.
19. J. D. Gil, L. Roca, M. Berenguel, and J. L. Guzman, "A multivariable controller for the start-up procedure of a solar membrane distillation facility," in *3rd IFAC conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control, Gante, Belgica*, 2018.
20. J. D. Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, and M. Berenguel, "Prediction models to analyse the performance of a commercial-scale membrane distillation unit for desalting brines from RO plants," *Desalination*, vol. 445, pp. 15–28, 2018.
21. J. D. Gil, L. Roca, M. Berenguel, A. Ruiz, G. Zaragoza, and A. Gimenez, "Control predictivo para la operación eficiente de una planta formada por un sistema de desalación solar y un invernadero," in *XXXVIII Jornadas Automática, Gijón, España*, 2017.
22. J. D. Gil, L. Roca, A. Ruiz-Aguirre, G. Zaragoza, J. L. Guzmán, and M. Berenguel, "Using a nonlinear model predictive control strategy for the efficient operation of a solar-powered membrane distillation system," in *25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2017)*. Valleta, Malta, 2017.
23. J. D. Gil, L. Roca, A. Ruiz-Aguirre, G. Zaragoza, and M. Berenguel, "Optimal operation of a solar membrane distillation pilot plant via nonlinear model predictive control," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 109, pp. 151–165, 2018.
24. J. D. Gil, P. Mendes, G. Andrade, L. Roca, J. Normey-Rico, and M. Berenguel, "Hybrid NMPC applied to a solar-powered membrane distillation system, In press," in *Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems - 12th DYCOPS, Florianópolis, Brasil*, 2019.
25. J. D. Gil, L. Roca, G. Zaragoza, J. E. Normey-Rico, and M. Berenguel, "Hierarchical control for the start-up procedure of solar thermal fields with direct storage," *Control Engineering Practice*, vol. 95, p. 104254, 2020.
26. J. D. Gil, J. Álvarez, L. Roca, J. Sánchez-Molina, M. Berenguel, and F. Rodríguez, "Optimal thermal energy management of a distributed energy system comprising a solar membrane distillation plant and a greenhouse," *Energy Conversion and Management*, vol. 198, p. 111791, 2019.
27. J. D. Gil, M. Muñoz, L. Roca, F. Rodríguez, and M. Berenguel, "An iot based control system for a solar membrane distillation plant used for greenhouse irrigation," in *2019 Global IoT Summit (GIoTS)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.

# Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones

Doctorando: Ángeles Hoyo

Universidad de Almería.

{angeles.hoyo

}@ual.es

**Abstract.** Desde un punto de vista de control de procesos, los problemas de control más comunes en la industria son relativos al problema de regulación o rechazo a perturbaciones, errores de modelado, no linealidades y retardos. Generalmente las estrategias de control clásicas utilizadas para solucionar estos problemas (feedback linearization, control feedforward, control en cascada...) tienen en cuenta solo el modelo lineal cuando en la realidad, siempre hay fuentes de error que no hacen posible que al aplicarlo se obtenga el rendimiento deseado. Por ello se requiere que, en todas estas estrategias, seamos capaces de amoldarlas y modificarlas para darle ese grado de robustez del cual carecen. Esta tesis tiene como objetivo abordar estos cuatro problemas con estrategias clásicas de control, analizando su robustez y validando su desempeño tanto en simulación como en plantas experimentales (un invernadero y un fotobiorreactor). Este trabajo presenta una revisión de los avances realizados en el curso 2018/2019 en el marco de la presente tesis.

## 1 Introducción

Durante la fase de diseño de un sistema de control, la mayoría de las estrategias de control se basan en un modelo matemático que simula el comportamiento dinámico de los procesos a controlar. De esta manera, el correcto funcionamiento del sistema de control depende en gran medida de la fidelidad del modelo con el sistema real. En el campo del control automático, los modelos más utilizados durante la fase de diseño son los determinísticos, es decir, modelos que no tienen en cuenta posibles errores de modelado o incertidumbres. Sin embargo, en algunas ocasiones, estos no aportan suficiente información para controlar un sistema de forma correcta, siendo necesario tratarlo con técnicas de control robusto que permitan tener en cuenta incertidumbres durante la fase de diseño.

Un proceso real puede ser extremadamente complejo para ser descrito de forma precisa por un modelo matemático, por lo que se obtendrían errores de modelado. Si, además, se trata de describir el sistema con un modelo lineal e invariante en el tiempo, se incluyen otras hipótesis simplificadoras que incrementan los errores (8). De esta forma, se considera que, cualquier modelo matemático

de un proceso real va a ser en mayor o menor grado impreciso, teniendo incertidumbres o errores de modelado. Si se desea controlar de manera eficiente un proceso real, se deberá de tener información sobre las posibles fuentes de incertidumbre, evaluando su efecto sobre el comportamiento del sistema completo.

El campo de aplicación del control robusto abarca todos los problemas que se caractericen por considerar incertidumbres en el modelo que sean tolerables por un controlador fijo lineal e invariante en el tiempo. Dentro de este campo existen múltiples vías para llevar a cabo el diseño de controladores robustos, tales como QFT,  $H^\infty$ , etc. o el diseño de redes de retraso y adelanto que aseguren ciertos márgenes de ganancia y fase en el dominio de la frecuencia. La gran mayoría de estas técnicas de control robusto, tales como  $H^\infty$ , tienen en cuenta los errores de modelado como incertidumbres no estructuradas, donde la incertidumbre se suele representar como una perturbación (incremento) fija  $\Delta P$  sobre la planta  $P$  en todas las frecuencias, obteniéndose resultados bastante conservadores.

Por otro lado, existen otras técnicas de control robusto (QFT) que hacen uso de una representación más exacta de la incertidumbre, conocida como incertidumbre paramétrica o estructurada. En este caso, los errores de modelado vienen dados como límites en los parámetros de los modelos de la planta, de tal manera que su representación gráfica no corresponde a un incremento fijo en cada frecuencia, sino a múltiples incrementos que dan lugar a formas irregulares, aunque permiten obtener resultados mucho menos conservadores que para el tipo de representación anterior. Debido a esta característica (además de su adecuación a los modelos utilizados a lo largo de este trabajo) esta última clase de incertidumbre ha sido la seleccionada para el nuevo enfoque propuesto.

Otra solución típica en la industria para acometer las no linealidades de los procesos es el uso de las técnicas de linealización por realimentación, que mediante un cambio de variable permiten de forma relativamente sencilla aproximar el comportamiento del sistema a una dinámica lineal. Sin embargo, esta estrategia requiere de modelos no lineales del proceso muy precisos que hacen que esta idea matemática no pueda llevarse a la práctica de forma exacta y las cancelaciones que se suponen en la teoría no sean efectivas debido a las discrepancias del modelo con el proceso real y al origen exógeno de las perturbaciones. Debido a este motivo, es habitual capturar estos errores como incertidumbre en los parámetros sobre el modelo lineal que se obtiene de la combinación de la linealización por realimentación con el proceso, haciendo uso posteriormente de estrategias de control robusto para considerar las mismas (7).

En control, las perturbaciones de carga son señales de baja frecuencia que afectan al proceso y alejan al sistema del punto de operación deseado. La reducción eficiente del efecto de las perturbaciones de carga es un tema clave en el control de procesos. Las perturbaciones pueden ser compensadas por el controlador de realimentación, pero la principal consecuencia de esta estrategia es

## Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones

que dicho controlador tiene que ser sintonizado para rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia al mismo tiempo. El control por adelanto proporciona una solución para tratar con el rechazo a perturbaciones de forma independiente aportando acciones de control en el mismo momento que el que la perturbación afecta a la salida del proceso. El compensador por adelanto ideal se forma como las dinámicas negativas entre la salida del proceso y la perturbación divididas por las dinámicas entre la salida del proceso y la señal de control. Este compensador ideal puede no ser realizable debido a un retardo negativo, polos en el semiplano derecho, o comportamientos de fase no-mínima. Sin embargo, incluso en el caso ideal de inversión, es posible que el rechazo de perturbaciones no sea efectivo debido a la presencia de incertidumbre en el proceso. Este hecho ha sido muy poco estudiado en la literatura donde los diseños de los controladores por adelanto son fundamentalmente nominales. Es por ello que resulta interesante abordar el análisis de robustez del problema y el diseño de soluciones de control robustas para el mismo.

Del mismo modo, la mayoría de los procesos industriales poseen retardos. Existen varias causas que originan el retardo en las plantas industriales: la distancia física entre el controlador y el sensor; el tiempo requerido por los actuadores para producir un cambio; el comportamiento dinámico intrínseco del sistema a controlar, el tiempo de procesamiento de los controladores, la transmisión de información en las redes de comunicación, etc. El predictor de Smith (PS) (9) es, sin lugar a dudas, el compensador de tiempo muerto más utilizado en el control de plantas con retardo (6). Su principal ventaja consiste en que elimina el retardo de la ecuación característica del sistema de control en lazo cerrado, cuando su modelo interno describe de forma perfecta el comportamiento dinámico de la planta (6). No obstante, esta estructura de control en presenta limitaciones, entre las que destacan: no puede aplicarse en el control de plantas con integradores, inestables, o con retardo de tiempo variante en el tiempo; pobre desempeño frente a incertidumbres en el modelado de las plantas (10); baja robustez frente a perturbaciones externas medibles o no medibles. Por esto, se realizará un estudio del punto de vista de robustez para analizar el comportamiento del esquema cuando la planta posea incertidumbre.

## 2 Avances

En esta sección se presentan de forma resumida los avances durante este año.

### 2.1 Control robusto PI diseñado con QFT para un esquema de control feedforward

Este artículo analiza el esquema clásico de control feedforward teniendo en cuenta incertidumbre en las perturbaciones como se muestra en la figura 1.

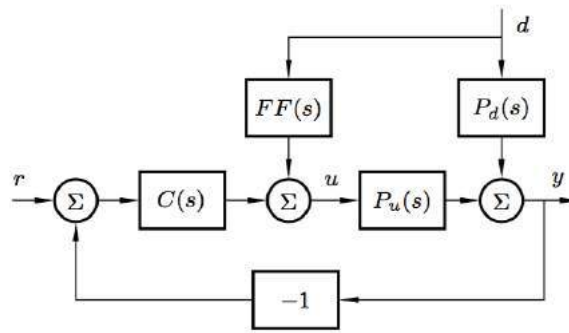


Fig. 1. Esquema clásico de control feedforward

Los esquemas control feedforward son muy conocidos en control de procesos para compensar las perturbaciones. El controlador PID es el más utilizado en el lazo de realimentación, sin embargo este y el controlador feedforward diseñados con los modelos nominales del sistema. Este artículo presenta un análisis de robustez para estudiar cómo las incertidumbres pueden afectar al esquema de control feedforward clásico. Posteriormente, un controlador robusto PI será diseñado utilizando la Teoría de la Retroalimentación Cuantitativa (QFT) para tener en cuenta estas incertidumbres y cumplir con especificaciones sólidas para el problema de control de regulación. Se presentan resultados basados en dominios de frecuencia y tiempo tal y como se muestra en el trabajo completo (4).

### 2.2 Controlador robusto de linealización por realimentación basado en QFT de la temperatura diurna de invernadero mediante ventilación natural

En este artículo, se utiliza un esquema de control basado en la técnica de linealización por realimentación y la teoría cuantitativa de retroalimentación (QFT) para regular la temperatura diurna interna en un invernadero ubicado en el sur de España tal y como muestra la figura 2.

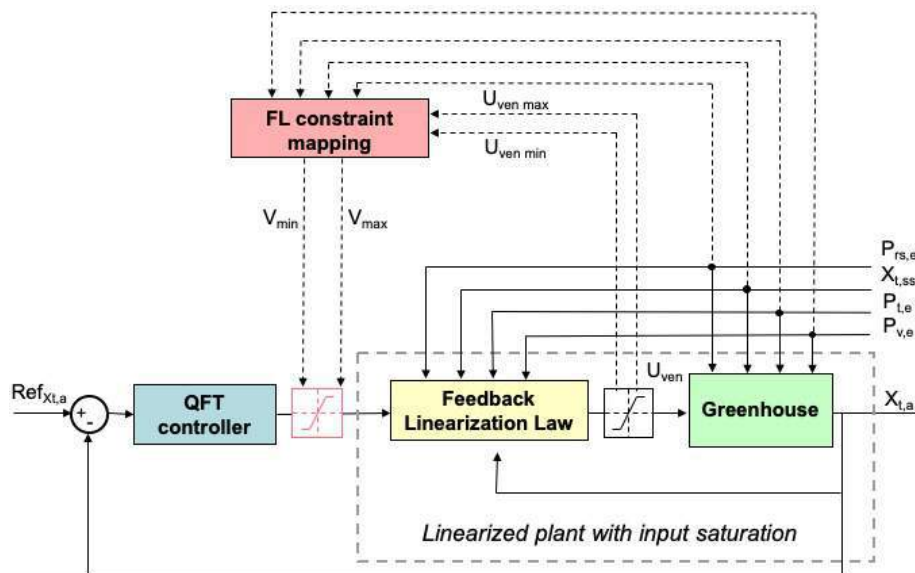


Fig. 2. Esquema de control

En un primer paso, se utiliza un modelo no lineal del invernadero para diseñar un controlador de linealización por realimentación, el cual proporciona un porcentaje de apertura de ventilación en base a la señal virtual proporcionada por un controlador PI robusto. La relación entre la salida del sistema (temperatura interior del invernadero) y la señal de control virtual viene dada por un sistema FOPDT (First Order Plus Dead Time). Los valores para los tres parámetros de este modelo lineal se identifican en el invernadero experimental, aplicando varios cambios de paso en la señal de control virtual y analizando la respuesta del proceso. Se identifican diferentes valores de ganancia, constante de tiempo y retardo. Por lo tanto, se utiliza una descripción lineal incierta para el sistema para diseñar un controlador QFT (teoría de retroalimentación cuantitativa) con una estructura PI. Finalmente, se analizan los resultados experimentales que muestran un desempeño satisfactorio del enfoque de control propuesto. El trabajo completo se encuentra en (5).

### 2.3 Herramienta gráfica para la simulación de reactores raceway

Los reactores raceway de microalgas se han estudiado desde 1950 para proporcionar una solución para el cultivo de microalgas a escala industrial. Hoy en día, debido a su escalabilidad y viabilidad, se consideran la tecnología más adecuada para el cultivo industrial de microalgas. La popularidad de los reactores de canal se debe a su bajo costo de inversión inicial en comparación con otras tecnologías, como los reactores tubulares, que requieren estructuras y equipos más complejos.

Otras ventajas relevantes del reactor de canal son la simplicidad de operación y sus bajos costos de mantenimiento.

Debido a la gran complejidad de estos procesos, es importante desarrollar herramientas que permitan simular fácilmente el comportamiento del modelo y modificar los parámetros principales desde un punto de vista biológico y de control. En este trabajo, se ha presentado una herramienta gráfica para la simulación del reactor de canal. La interfaz gráfica de usuario (GUI) ha sido desarrollada en Matlab y permite acceder y modificar las variables más importantes del proceso, simular el sistema y observar los resultados de manera directa y gráfica como se muestra en la figura 3. El trabajo completo se encuentra en (1)



Fig. 3. Interfaz gráfica

#### 2.4 Control predictivo lineal del pH de un fotobiorreactor raceway

Este trabajo presenta la implementación de un controlador predictivo generalizado (GPC) para el control del pH en un fotobiorreactor raceway para el cultivo

de microalgas. La variable más crítica en los procesos de crecimiento de microalgas es el pH, teniendo relación directa con la productividad del sistema. La dinámica no lineal del pH se ve afectada de manera directa e indirecta por más variables del sistema, como el aporte de  $\text{CO}_2$  al medio de cultivo, el exceso de  $\text{O}_2$  debido a la realización de la fotosíntesis por parte de las microalgas, la radiación solar y la concentración de biomasa. Este tipo de reactores están normalmente controlados mediante controladores clásicos todo/nada que no tienen en cuenta el modelo del sistema ni el consumo de  $\text{CO}_2$ . Debido a la importancia de mantener el pH dentro de unos valores determinados que afectan directamente a la productividad, en este trabajo se ha optado por diseñar un control predictivo lineal que permita acotar la salida del sistema a los valores óptimos que permitan aumentar su productividad, reduciendo el uso de  $\text{CO}_2$  al mismo tiempo. El resultado obtenido es satisfactorio y se puede consultar el trabajo completo en (3)

### 3 Trabajos en desarrollo

Actualmente se están desarrollando los trabajos que se definen a continuación.

– **Control en cascada con saturación.**

Este artículo presentará una solución al problema de saturación en los esquemas de control en cascada. Cuando se introduce el control en cascada en modo lineal sin influencia de la saturación, se pueden lograr mejoras importantes en los sistemas de control industrial. El efecto de perturbaciones y/o comportamientos no lineales del actuador en las principales variables del proceso se puede reducir considerablemente. Sin embargo, cuando surge la saturación en el bucle interno, estas mejoras no se pueden alcanzar e incluso a veces el esquema de control en cascada saturado da peores resultados que un solo bucle de control. Por lo tanto, este trabajo analizará esta situación e introducirá una solución muy simple para resolver este problema y reducir el impacto del efecto de saturación.

– **Control robusto en reactores reales.**

Se ampliarán los resultados obtenidos en (2) con ensayos en fotobiorreactores raceway reales.

– **Control predictivo con reactores reales.**

Se ampliarán los resultados obtenidos con simulación en (3) con ensayos realizados en fotobiorreactores raceway.



## 4 Conclusiones

En esta sección se presentan las principales conclusiones de los avances realizados durante este año.

En primer lugar, con el control robusto PI diseñado con QFT para un esquema de control feedforward se demuestra que el uso del compensador feedforward modifica las especificaciones clásicas de diseño de QFT para el problema de regulación. Esta modificación conduce a dos soluciones diferentes. La primera consiste en usar la misma especificación que el caso sin feedforward, calculándose así los boundaries clásicos de QFT. Este enfoque produce resultados muy conservadores y el hecho de incluir el feedforward no daría ventajas notables. La segunda solución se basa en la modificación de los boundaries para el problema de regulación de QFT para incluir la presencia del feedforward. En este caso, se obtienen nuevos boundaries y el método QFT es usado para diseñar un controlador PI robusto teniendo en cuenta la incertidumbre obteniendo buenos resultados.

En el invernadero, al principio, se implementó la estrategia de linealización por realimentación en el modelo de invernadero y se probó en la planta. A pesar de cancelar las no linealidades del modelo, se observó que las discrepancias del sistema real se podían capturar como incertidumbre paramétrica. Luego, se diseñó un controlador PI usando QFT e se implementó en la planta. El enfoque de control propuesto se evaluó en diferentes días con diferentes condiciones climáticas y de operación. El sistema de control pudo seguir los cambios de punto de referencia propuestos a pesar de los cambios en las perturbaciones y en los puntos de operación.

La herramienta interactiva desarrollada fue probada y contrastada después de su desarrollo por estudiantes obteniendo una respuesta satisfactoria en cuanto a la sencillez de la herramienta, su facilidad de uso y la capacidad para simular diferentes escenarios que pueden ocurrir en un ensayo real.

Por último, en el control predictivo lineal del pH de un fotobiorreactor raceway, la dinámica del proceso ha sido capturada en forma de modelo de bajo orden en torno al punto de operación. Posteriormente, se procedió al diseño de un controlador predictivo generalizado con restricciones que fue evaluado en simulación mediante dos ensayos, obteniendo resultados satisfactorios.

## Bibliography

- [1] Hoyo, A., Guzmán, J.L., Ación, G., Berenguel, M., Moreno, J.C.: A graphical tool to simulate raceway photoreactors. In: 2nd IWA Conference on Algal Technologies for Wastewater Treatment and Resource Recovery. Valladolid, España (Julio 2019)
- [2] Hoyo, A., Guzmán, J.L., Moreno, J.C., Berenguel, M.: Control robusto con qft del ph en un fotobiorreactor raceway. In: XXXVIII Jornadas de Automática. pp. 414–420. Gijón, España (September 2017)
- [3] Hoyo, A., Guzmán, J.L., Moreno, J.C., Berenguel, M.: Control predictivo lineal del ph en un fotobiorreactor raceway. In: XL Jornadas de Automática. pp. 414–420. Ferrol, España (September 2019)
- [4] Hoyo, A., Moreno, J.C., Guzmán, J.L., Hägglund, T.: Robust qft-based pi controller for a feedforward control scheme. In: 3rd IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control PID. Gante, Bélgica (Mayo 2018)
- [5] Hoyo, A., Moreno, J.C., Guzmán, J.L., Rodríguez, F.: Robust qft-based feedback linearization controller of the greenhouse diurnal temperature using natural ventilation. *IEEE Access* **7**, 64148–64161 (2019)
- [6] Normey-Rico, J.E., Camacho, E.F.: Dead-time compensators: A survey. *Control Engineering Practice* **16**(4), 407 – 428 (2008)
- [7] Roca, L.: Contribuciones al modelado y control de una planta de desalación solar. PhD Thesis. Universidad de Almería (2009)
- [8] Rodríguez-Rubio, F., López, M.: Control Adaptativo y Robusto. Universidad de Sevilla (1993)
- [9] Smith, O.: Closer control of loops with dead time. *Chemical Engineering Progress* (1957)
- [10] Tsai, M.H., Tung, P.C.: A robust disturbance reduction scheme for linear small delay systems with disturbances of unknown frequencies. *ISA Transactions* **51**(3), 362 – 372 (2012)

# Digital Dices: Microservicios en el marco de la Web of Things<sup>\*</sup>

Manel Mena

Grupo de Informática Aplicada (TIC-211), *Universidad de Almería*.  
manel.mena@ual.es

**Resumen** La comunicación con distintos dispositivos de Internet of Things (IoT) no es trivial, ya que en este ecosistema conviven dispositivos con multitud de protocolos de comunicación y de transferencia de datos muy heterogéneos. La Web of Things (WoT) intenta aunar todos estos dispositivos en un marco de referencia desarrollado y gestionado por el World Wide Web Consortium (W3C) que se basa en establecer una capa de abstracción basada en tecnologías web. El ecosistema de la WoT ofrece un esquema de definición de dispositivos IoT representados por las interacciones que estos pueden realizar. Por otro lado, los dispositivos IoT suelen presentar una serie de limitaciones, sobre todo en cuanto potencia de cálculo y/o cantidad de memoria. Para intentar solventar tanto el problema de interacción, así como dar solución a la falta de rendimiento, desarrollamos el concepto de Digital Dice (DD). Digital Dice es una implementación parcial del marco establecido por la WoT basada en microservicios. Entre sus principales ventajas destacan la escalabilidad y la usabilidad.

**Keywords:** Internet of Things · Web of Things · Microservicios · Sistemas ciberfísicos · Interoperabilidad.

## 1. Introducción

Trabajar con diferentes tipos de dispositivos IoT es difícil, tanto para los usuarios, como para los desarrolladores. De hecho, los usuarios tienden a utilizar diferente software para cada dispositivo debido a las múltiples tecnologías que estos manejan. En el caso de los desarrolladores, la necesidad de aprender diferentes tecnologías sólo para establecer comunicación con cada dispositivo es una pérdida de tiempo que, en determinadas ocasiones, las empresas no pueden permitirse. Aparte del problema de usabilidad [1], también hay que tener en cuenta que este tipo de dispositivos suele contar con una serie de restricciones computacionales debido a que su arquitectura tiende a minimizar el consumo.

---

<sup>\*</sup> Este trabajo ha sido financiado por EU ERDF y el MINECO español bajo el Proyecto nacional TIN2017-83964-R y el proyecto regional (ref. CEIJ-C01.2), este último coordinado por la UAL y la UCA y financiado bajo CEIMAR. Manel Mena esta financiado por el Gobierno de España mediante la beca de formación FPU17/02010.

Los Digital Dices (DD) [2] son representaciones digitales de sistemas ciberfísicos o de los dispositivos IoT que proponen una solución al problema de usabilidad de este tipo de dispositivos, e intentan solventar en gran medida su problema de rendimiento. El concepto es similar a los Digital Twins [3], pero mientras que en el Digital Twin la virtualización del dispositivo es el factor clave, un Digital Dice se centra en la gestión y el uso del dispositivo.

Por otro lado la Web of Things (WoT) [4] propone un modelo (Thing Description (TD)) para definir diferentes “cosas” sin importar los protocolos de comunicación utilizados. Además de esto, la Web of Things ofrece una serie de patrones comunes utilizados para gestionar diferentes dispositivos, como por ejemplo, comunicación “Thing-to-Thing”, “Edge devices”, o el ya mencionado “Digital Twin”. El concepto de Digital Dice propone una implementación del modelo de Thing Description basada en microservicios. Este concepto tiene en cuenta diferentes aspectos del dispositivo IoT para crear los microservicios necesarios para su gestión. Cada DD ofrece una Thing Description para hacerlo compatible con los sistemas que hacen uso de ese modelo, como por ejemplo Mozilla IoT framework [5] o Eclipse IoT [6].

El uso de la WoT como marco de referencia hace que la solución propuesta adquiera un carácter estándar. Gracias a eso, nuestros DD se convierten en lo que la Web de las cosas llama un sistema *servient* [7]. Un WoT *servient* es una pila de software que implementa parte de las bases establecidas por la WoT. Un *servient* puede alojar y exponer *things* y/o estar compuesto por consumidores de *things*. Los *servient* pueden admitir varios tipos de protocolos para permitir la interacción con diferentes plataformas IoT.

Cabe destacar que Digital Dices es una solución que esta basada en microservicios [8]. Este tipo de soluciones aportan una serie de ventajas:

- La facilidad a la hora de construir y mantener estos sistemas. Las aplicaciones se dividen en un conjunto de fragmentos más pequeños, lo cual aumenta la capacidad de composición.
- Su organización entorno a objetivos de negocio. Martin Fowler [9] explica que los microservicios permiten crear productos y no proyectos. Otro de los preceptos por el cual se establece el uso de microservicios es que Diferentes funciones empresariales pueden requerir enfoques diferentes. Todo ello provoca la realización de servicios adaptables que en muchos casos son extensibles para su uso en múltiples contextos, mejorando su capacidad de reutilización.
- Flexibilidad en el uso de tecnologías. Cada microservicio se puede escribir en diferentes lenguajes de programación, lo que nos da la flexibilidad de adaptar la tecnología al problema particular que queremos resolver.
- Escalabilidad de las soluciones. El hecho de ser que sean fragmentos pequeños que se dedican a solventar aspectos concretos, promueve la facilidad de escalar los microservicios de manera independiente cuando es necesario.
- Promueven equipos autónomos y multidisciplinarios. Una de las ventajas de los microservicios es que otorga a los desarrolladores independencia para trabajar de forma autónoma y tomar decisiones técnicas más rápido.

Este artículo se compone de tres secciones. La Sección 1, establece los problemas y a la vez las soluciones para ellos que propone nuestro concepto de Digital Dice. La Sección 2, resume los avances realizados en la consecución de los objetivos propuestos en la primera sección. Y por último, la Sección 3 describe los avances realizados y las líneas abiertas en el desarrollo del trabajo futuro.

## 2. Avances

En esta sección se exponen los avances realizados en el último año en lo referente a la consecución del trabajo de tesis doctoral.

### 2.1. Definición de los Digital Dices

El primer paso fue realizar una definición formal de el concepto de Digital Dice [10], en la cual proponemos representaciones virtuales de elementos físicos, pero que pueden implicar una serie de mejoras con respecto a ellos. Los DD proponen una abstracción virtual de dispositivos IoT basada en microservicios, siguiendo las tendencias de algunas propuestas actuales [11]. Nuestra solución pretende ser agnóstica a los protocolos utilizados por cada dispositivo IoT. En una primera aproximación, trabajaremos en la integración de protocolos.

En el mismo artículo [10], proponemos una primera aproximación de la definición de los microservicios o facetas en los cuales se basa el Digital Dice. Estos microservicios son:

- a) *Controller*. El controlador establece la comunicación con el usuario y administra la orquestación con el resto de las facetas o directamente al dispositivo IoT según sea necesario.
- b) *Data Handler*. Esta faceta es la que controla la comunicación con la base de datos subyacente. Esta base de datos tiene dos funciones principales; puede registrar diferentes solicitudes realizadas por el usuario para que podamos rastrear posibles problemas originados en nuestros DDs, y también puede actuar como un búfer para el dispositivo IoT. Esto depende de cómo el *Data Handler* maneja las peticiones. Primero intenta recuperar los datos solicitados de la base de datos antes de intentar obtenerlos del dispositivo físico; si los datos solicitados son más recientes que el umbral de tiempo configurado (por defecto 10 segundos), estos datos se enviarán como respuesta.
- c) *Event Handler*. Este aspecto procesa los eventos generados en el dispositivo IoT. Al mismo tiempo, también gestionará la conexión con un futuro subsistema de procesamiento de eventos complejos (CEP) [13].
- d) *User Interface (UI)*. La interfaz de usuario es capaz de establecer un micro-frontend para cada función controlada por nuestros DDs. Cada propiedad o característica que requiera una UI se establecerá en la TD del objeto al que representa nuestro DD. Además de esas interfaces individuales para cada característica, existe un método en el microservicio de interfaz de usuario que puede crear una composición de todas las características individuales

que tienen una interfaz de usuario. Este método ofrece al usuario una interfaz reutilizable simple para interactuar con el dispositivo.

En ese mismo artículo establecemos la arquitectura [14] de gestión de los Digital Dices, la cual se muestra en la Figura 1. La figura establece una posible configuración propuesta para la arquitectura, donde contaremos con la parte *Edge* que está compuesta básicamente por dos tipos de microservicios: (a) por un lado, los Gateway services (puertas de enlace) que se encargarán de redirigir las peticiones pertinentes a nuestros Digital Dices, y (b) los Discovery Services (servicios de descubrimiento), donde, cada vez que se activa una instancia de servicio contenido en el Digital Dices, se registrará en el servicio Discovery Services, permitiendo con esto que nuestros Gateways puedan tener la capacidad de balanceo de carga cuando sea necesario. Por otro lado, la arquitectura cuenta con el *Core* de nuestro sistema, que es donde se despliegan nuestros Digital Dices y una serie de microservicios auxiliares como pueden ser servicios de autenticación o microservicios de CEP. Además, existe una capa de persistencia (*Persistence*) que consta de bases de datos y posibles servicios asociados a las mismas como, por ejemplo, distintos servicios de Open Data o servicios que se dediquen al análisis de datos.

## 2.2. De Thing Description a Digital Dice

El segundo avance realizado para la formalización de la idea de los Digital Dices fue establecer cómo hacer uso de la Web of Things en nuestra solución [2]. En la Figura 2 podemos observar los diferentes usos que hacemos de la Thing Description en nuestro sistema. Por un lado, como base para la creación de los

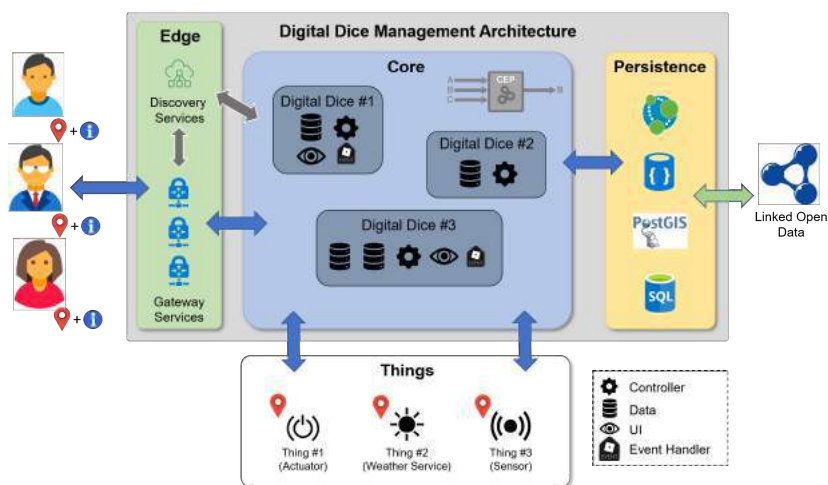


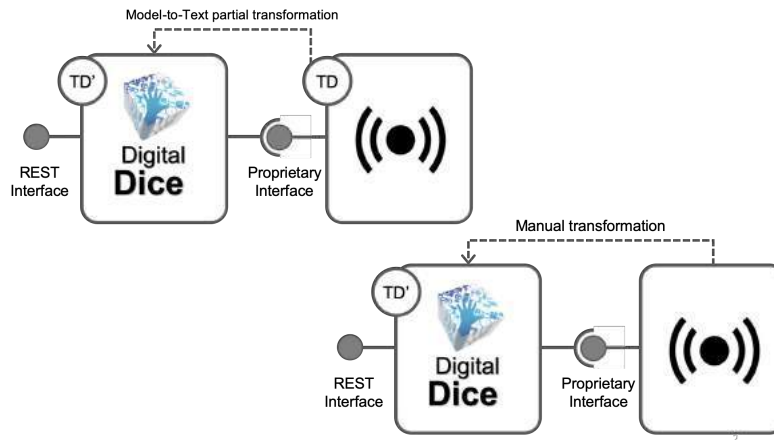
Figura 1. Arquitectura para la gestión de Digital Dices.

DDs con una conversión parcial modelo-a-texto [15]; por otro, como recurso ofrecido a otros sistemas o usuarios para que puedan interactuar con los mecanismos propuestos por la WoT. Es importante remarcar que no importa si el dispositivo representado tiene una TD o no, nuestro DD siempre estará definido por su propia TD para hacer que el dispositivo representado sea manejable por cualquier plataforma compatible con la WoT.

En el trabajo citado anteriormente [2] establecemos un mecanismo para la conversión entre TD del objeto representado y los diferentes microservicios que representarán al mismo. Para ello nos centramos en que la Thing Description nos permite representar una *thing* a partir de las propiedades, acciones o eventos que utilizamos para interactuar con ella. Estas interacciones cuentan a su vez con *forms* o maneras de conectarse a las mismas. Para definir los microservicios e incluso los métodos que utilizamos en los mismos utilizamos esa propiedad de las interacciones. En los *forms* contamos con dos campos que son necesarios para realizar la conversión:

- a) **op** (operación). Campo que contiene una array de elementos que, en el caso de que estemos leyendo propiedades del dispositivos, solo pueden ser *readproperty* y/o *writeproperty*. En el caso de que lo que estemos leyendo sea una acción, solo puede ser un *invokeaction*. Y, si estamos hablando de un evento, solo puede establecerse como *subscribeevent*.
- b) **contentType**. Indica el tipo de formato de transmisión de datos definido para interactuar con la *thing*, por defecto *application/json*.

Las URI generadas en nuestro DD siguen el patrón de `https://{ip-address}:{port}/{thing.name}/{property|action|event}/{IntAffordance.title}/`. Además de las características definidas en nuestro DD, tenemos que ofrecer un URI con la Thing Description que define nuestro DD, a esta definición podemos acceder desde `https://{ip-address}:{port}/{thing.name}/`.



**Figura 2.** Usos de la Thing Description.

En la Figura 3 se describen los microservicios generados por la conversión de las distintas interacciones de una TD en un DD. **Properties** siempre definen un microservicio “Controller”, el “Data Handle” solo se creará si la propiedad contiene la operación *writeproperty*. En la misma figura, podemos discernir cómo las **actions** siempre generan dos microservicios, un “Controller” y “Data Handler”. Sin embargo, si previamente ya se han creado una serie de microservicios debido a las **properties**, las **actions** solo agregarán los métodos necesarios a los microservicios correspondientes. En el caso de los **events**, se creará un “Controller” y un “Event Handler”.

### 2.3. WoTnectivity.

En un trabajo en revisión descubrimos WoTnectivity. WoTnectivity surge por la necesidad de hacer Digital Dices compatibles con diferentes tecnologías. En un principio, el comienzo del desarrollo del Digital Dice nos obligó a tener que aprender múltiples librerías de conexiones sólo para empezar, y no solo eso si no que si queríamos añadir diferentes protocolos en un futuro nos veíamos obligados a revisar la estrategia que el DD en particular utilizaría para conectarse con un dispositivo. Seguir la premisa de añadir diferentes protocolos conforme los íbamos necesitando era insostenible, debido incluso a tener que realizar cambios en el enfoque de los microservicios que representan un DD determinado.

Además, en el proceso de transformación parcial de modelo-a-texto entre las TDs y los DDs, el uso de diferentes librerías hace que este proceso no pueda alcanzar unos objetivos mínimos requeridos. Las plantillas de los microservicios generados por la herramienta de conversión eran demasiado livianas debido a que cuantos mas protocolos introdujésemos en la conversión, mayor variabilidad había que tener en cuenta, dado que esos protocolos tienen repercusiones en las diferentes librerías necesarias. Además, la forma de utilizar esas librerías es demasiado diferente de una a otra. Por ello surge la necesidad de desarrollar un

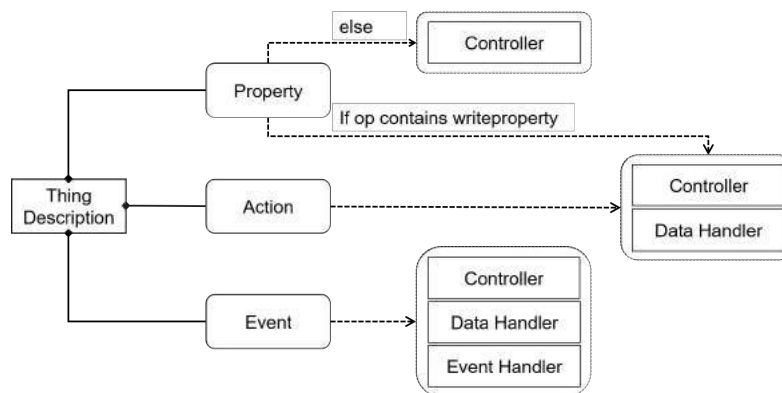


Figura 3. De Thing Description a Digital Dice.



artefacto que nos permitiera establecer un patrón de comunicación común para resolver esos problemas. Este artefacto es el denominado WoTnectivity<sup>1</sup>.

WoTnectivity es una meta-librería que ofrece una interfaz de comunicación común que otros subproyectos pueden implementar para hacer compatible esos proyectos con el ecosistema WoTnectivity, lo que a la vez nos permiten añadir nuevos protocolos de comunicación a nuestros DDs abstrayéndolos completamente de la interfaz de comunicación que estos utilizan. El proyecto está disponible en GitHub, y actualmente hay implementados tres protocolos de comunicación con este patrón, HTTP<sup>2</sup> [16], WS<sup>3</sup> [17] y KNX<sup>4</sup> [18].

Dado que nuestra propuesta de Digital Dice esta desarrollada en Java, WoTnectivity y todo su ecosistema están diseñados para trabajar con versiones de Java a partir de la 11, debido a la inclusión de la computación asíncrona en el lenguaje a partir de esa versión. No obstante, la idea es trasladable a cualquier otro lenguaje de programación.

En el Listing 1.1 se puede observar la interfaz que las librerías que quieran implementar el ecosistema de WoTnectivity deben utilizar. La interfaz solo consta de un método, *sendRequest*, que requiere la definición de tres parámetros diferentes:

```

1  public interface IRequester{
2      CompletableFuture<?> sendRequest(String address,
3          HashMap<String, Object> configuration,
4          Object payload);
5  }
```

**Listing 1.1.** IRequester.java

- **String address.** Este parámetro define la dirección donde se debe enviar la solicitud.
- **HashMap<String, Object>configuration.** Este parámetro permite la personalización de diferentes parámetros de configuración de la solicitud. El tipo de parámetros es muy abierto, siendo un Map donde el valor puede representar cualquier objeto. Necesitamos esta estructura abierta porque diferentes protocolos pueden variar mucho en las configuraciones necesarias para que puedan ser utilizados.
- **Object payload.** El mensaje enviado por la solicitud debe ser lo más genérico posible porque diferentes protocolos pueden administrar diferentes tipos de mensajes en las solicitudes, al igual que los parámetros de configuración.

Otra aspecto importante a tener en cuenta es que nuestra librería sólo funciona con las versiones de Java 11 en adelante dado que la librería esta preparada para trabajar de forma reactiva [19].

<sup>1</sup> <https://github.com/acgtic211/wotnectivity>

<sup>2</sup> <https://github.com/acgtic211/wotnectivity-http>

<sup>3</sup> <https://github.com/acgtic211/wotnectivity-ws>

<sup>4</sup> <https://github.com/acgtic211/wotnectivity-knx>

### 3. Conclusiones y trabajo futuro

El objetivo de los Digital Dices es lograr una verdadera interoperabilidad y gestión de dispositivos IoT heterogéneos. El uso de microservicios aporta la flexibilidad necesaria que un sistema necesita para ser robusto y, al mismo tiempo, fácilmente mantenible. Ser capaces de replicar microservicios individuales justo cuando se necesita, nos ayuda a trabajar con los recursos disponibles con la máxima eficiencia.

En este artículo hemos presentado la definición del concepto de Digital Dices, hemos descrito como la Web of Things aporta un framework que permite la reutilización de DDs por parte de otros sistemas, así como la generación parcial de código mediante el esquema de la Thing Description. También se ha mostrado WoTnectivity, un ecosistema de librerías que establece un patrón de comunicación común que se abstrae de los protocolos de conexión subyacentes.

En este momento estamos experimentando con diferentes protocolos la escalabilidad de la solución, así como la resiliencia de la arquitectura de DDs presentada anteriormente. Además, otro de los puntos a tratar en un futuro, es demostrar empíricamente las ventajas de nuestra aproximación, lo que apoyaremos con diferentes métricas. El trabajo restante a realizar es añadir más protocolos al ecosistema, con el objetivo de que liberar las librerías haga que la comunidad se implique en la colaboración con esta propuesta. Por último, pretendemos establecer un mecanismo de control de eventos complejos en la arquitectura de gestión de DDs, lo que probablemente conlleve a la ampliación del esquema de la Thing Description.

### Referencias

1. Kölmel, B., Bulander, R., Dittmann, U., Schätter, A., Würtz, G.: Usability requirements for complex cyber-physical systems in a totally networked world. In: Conference on Virtual Enterprises. pp. 253–258. Springer, Berlin, Heidelberg (2014).
2. Mena, M., Criado, J., Iribarne, L., Corral, A.: Digital Dices: Towards the Integration of Cyber-Physical Systems Merging the Web of Things and Microservices. In: International Conference on Model and Data Engineering. pp. 195–205. Springer, Cham (2019).
3. Batty, M.: Digital Twins. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. 45. no. 5. pp. 817–820. (2018).
4. W3C: Web of Things. <https://www.w3.org/WoT/>,
5. Mozilla Foundation. Mozilla IoT Web of Things. <https://iot.mozilla.org/>.
6. Ammar, M., Russello, G., Crispo, B.: Internet of Things: A survey on the security of IoT frameworks. J. of Inf. Security and Applications. 38, 08–27. (2018).
7. W3C: Web of Things - Servient definition. <https://www.w3.org/TR/wot-architecture/dfn-servient>.
8. Nadareishvili, I. et al.: Microservice architecture: aligning principles, practices, and culture. O'Reilly Media Inc. (2016).
9. Lewis, J., Fowler, M.: Microservices. <https://martinfowler.com/>. (2014).
10. Mena, M., Criado, J., Iribarne, L., Corral, A.: Una arquitectura de microservicios para componentes digitales en la Web de las Cosas. In: Jornadas de Ingeniería de Software y Bases de Datos (JISBD). Biblioteca Digital - Sistedes. Cáceres, (2019).

11. Lu, D., Huang, D., Walenstein, A., Medhi, D.: A secure microservice framework for iot. In: IEEE Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE). pp. 9–18. (2017).
12. Cugola, G., Margara, A.: Processing flows of information: From data stream to complex event processing. *ACM Comput. Surv.*, 44(3), 15:1-15:62. (2012).
13. Angsuchotmetee, C., Chbeir, R.: A survey on complex event definition languages in multimedia sensor networks. In: *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Management of Digital EcoSystems*, pp. 99–108. ACM, (2016).
14. Krylovskiy, A., Jahn, M., Patti, E.: Designing a smart city internet of things platform with microservice architecture. In: *FiCloud'2015*, pp. 25–30. IEEE, (2015).
15. Rose, L. M., Matragkas, N., Kolovos, D. S., Paige., R. F.: A feature model for model-to-text transformation languages. In: *4th International Workshop on Modeling in Software Engineering*. pp. 57–63. IEEE Press, (2012).
16. Balachander., K.: *Web protocols and practice: HTTP/1.1, networking protocols, caching, and traffic measurement*. Addison-Wesley Professional. (2001).
17. Wang, V., Salim, F., Moskovits., P.: *The definitive guide to HTML5 WebSocket*. vol.1. Apress, New York, (2013).
18. KNX ASSOCIATION.: *KNX System Specifications v2.0*. vol.9. (2009).
19. Malhotra., R.: *Java Reactive Development. Rapid Java Persistence and Microservices*. pp. 251–265. Apress, Berkeley, CA (2019).

# Técnicas de Alto Rendimiento para la Optimización de Planes de Radioterapia de Intensidad Modulada

Juan José Moreno Riado

TIC-146 Supercomputación - Algoritmos, Universidad de Almería, España  
juanjomoreno@ual.es

**Resumen** La Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT) es una técnica común para el tratamiento del cáncer que permite controlar con precisión la geometría e intensidad de los haces de radiación. El objetivo de la planificación en IMRT es depositar dosis prescritas a tejidos tumorales, minimizando al máximo la dosis recibida por los órganos y tejidos sanos que los rodean. En este trabajo exploramos la efectividad de un método basado en descenso por gradiente para la generación de planes IMRT combinado con técnicas de computación de alto rendimiento. Resolvemos un modelo lineal, que minimiza lo máximo posible la dosis a las glándulas salivales y otro no lineal, que busca una mayor homogeneidad dosimétrica de los volúmenes tumorales. La capacidad de generar planes alternativos en cortos periodos de tiempo da a los radiólogos una mayor libertad para explorar diferentes estrategias de planeo.

## 1. Introducción

La investigación de este año se ha centrado en la optimización de planes de Radioterapia de Intensidad Modulada.

La Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT, por sus siglas en inglés) es una técnica común para el tratamiento del cáncer que permite controlar con precisión la geometría e intensidad de los haces de radiación. El objetivo de la planificación en IMRT es depositar dosis prescritas a tejidos tumorales, minimizando al máximo la dosis recibida por los órganos y tejidos sanos que los rodean [2].

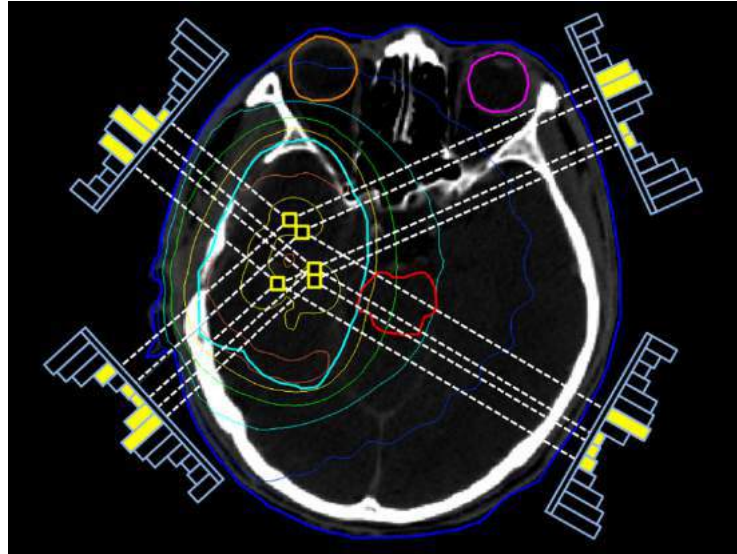
En el planteamiento estándar de optimización, los haces de radiación (*beams*) se discretizan y dividen en *beamlets* bidimensionales, cuya intensidad puede ser controlada independientemente. Nuestros algoritmos de optimización dan como resultado el vector que define las intensidades de cada beamlet, denominado el *mapa de fluencia* [1,5,3].

De la misma forma, el cuerpo del paciente se divide en vóxels tridimensionales, los cuales son categorizados en una o varias regiones de interés. Estas regiones pueden ser órganos, volúmenes tumorales (PTVs) u otros tejidos.

Para obtener la dosis depositada por una determinada fluencia, necesitamos multiplicarla por la Matriz de Deposición de Dosis. Esta matriz dispersa nos dice

## Técnicas de Alto Rendimiento para la Optimización de Planes de Radioterapia de Intensidad Modulada

la influencia de cada beamlet en cada vóxel [9]. Sin entrar en el coste computacional de los algoritmos de optimización, el tamaño de esta matriz es suficiente para justificar el uso de técnicas de alto rendimiento [6,4]. Para cualquiera de los casos de este trabajo, la matriz de dosis tiene cientos de miles de filas (correspondiente al número de vóxels) y decenas de miles de columnas (correspondiente al número de beamlets), con millones de valores no nulos.



**Figura 1.** Ejemplo de IMRT y del planteamiento de la optimización [8]: El cuerpo del paciente (centro) se clasifica en regiones y divide en vóxels. Los *beams* (en este caso cuatro) se posicionan a diferentes ángulos del paciente y se dividen en *beamlets* (en este caso quince por *beam*) con diferentes intensidades. Los *beamlets* tienen una influencia diferente para cada vóxel (expresado en este gráfico con líneas discontinuas) la cual se define en la Matriz de Deposición de Dosis.

## 2. Avances

### 2.1. Descripción del plan a optimizar

Como caso de estudio vamos a utilizar un plan de cabeza y cuello (H&N) con tres volúmenes tumorales (PTVs) y 6 órganos en riesgo con restricciones. A continuación, se listan las regiones de interés, con sus restricciones o prescripciones y su identificador en el modelo:

- **Glándula salival izquierda (ls):** La dosis media no debe superar 26 Gy.
- **Glándula salival derecha (rs):** La dosis media no debe superar 26 Gy.

Técnicas de Alto Rendimiento para la Optimización de Planes de Radioterapia de Intensidad Modulada

- **Tronco encefálico (bs)**: La dosis máxima no debe superar 60 Gy.
- **Médula espinal (sc)**: La dosis máxima no debe superar 50 Gy.
- **Mandíbula (jaw)**: La dosis máxima no debe superar 70 Gy.
- **Tejido normal (nt)**: La dosis máxima no debe superar 74.25 Gy.
- **PTV 1**: Dosis prescrita de 67.5 Gy.
- **PTV 2**: Dosis prescrita de 60 Gy.
- **PTV 3**: Dosis prescrita de 54 Gy.

Dada la importancia del tronco encefálico y la médula espinal, las restricciones de esas zonas se aplican sobre regiones virtuales con un espaciado de 3 milímetros. Para mejorar la calidad de vida del paciente, los profesionales médicos recomiendan como objetivo la minimización de la dosis en las glándulas salivales.

## 2.2. Modelo lineal

A partir de las prescripciones y restricciones anteriormente descritas, se define el siguiente modelo lineal:

$$\begin{aligned}
 \text{mín } f(\mathbf{d}) &:= \frac{1}{|I_{ts}| + |I_{rs}|} \sum_{i \in I_{ts} \cup I_{rs}} d_i \\
 \text{s.t.} \\
 \text{(c,1)} \quad & D\mathbf{x} = \mathbf{d} , \\
 \text{(c,2)} \quad & d_i \geq \alpha P^r , i \in I_{PTV^r} , r \in \{1, \dots, p\} , \\
 \text{(c,3)} \quad & d_i \leq \beta P^r , i \in I_{PTV^r} , r \in \{1, \dots, p\} , \\
 \text{(c,4)} \quad & \frac{1}{|I_{PTV^r}|} \sum_{i \in I_{PTV^r}} d_i \geq \gamma P^r , r \in \{1, \dots, p\} , \\
 \text{(c,5)} \quad & \frac{1}{|I_{PTV^r}|} \sum_{i \in I_{PTV^r}} d_i \leq \delta P^r , r \in \{1, \dots, p\} , \\
 \text{(c,6)} \quad & \frac{1}{|I_{ts}|} \sum_{i \in I_{ts}} d_i \leq 26 \text{Gy} , \\
 \text{(c,7)} \quad & \frac{1}{|I_{rs}|} \sum_{i \in I_{rs}} d_i \leq 26 \text{Gy} , \\
 \text{(c,8)} \quad & d_i \leq 50 \text{Gy} , \forall i : i \in I_{sc} , \\
 \text{(c,9)} \quad & d_i \leq 60 \text{Gy} , \forall i : i \in I_{bs} , \\
 \text{(c,10)} \quad & d_i \leq 70 \text{Gy} , \forall i : i \in I_{jaw} , \\
 \text{(c,11)} \quad & d_i \leq 74,25 \text{Gy} , \forall i : i \in I_{nt} , \\
 \text{(c,12)} \quad & 0 \leq x_j \leq X^U \leq 0,2 , j = 1, 2, \dots, N.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde  $D$  es la Matriz de Deposición de Dosis,  $\mathbf{d}$  es el vector de las dosis de los vóxeles y  $\mathbf{x}$  es el mapa de fluencia, es decir, el vector de intensidades de los beamlets.  $I_{ROI}$  es el conjunto de los índices de los vóxeles que pertenecen a la región, mientras que  $r$  es el número de volúmenes tumorales (PTVs) del plan.

Este modelo se implementa y resuelve utilizando Gurobi<sup>1</sup>, uno de los mejores solvers comerciales para modelos lineales y cuadráticos.

<sup>1</sup> <https://www.gurobi.com/>

### 2.3. Modelo no lineal

Aunque es posible obtener soluciones óptimas para el modelo lineal, las fluencias obtenidas no son clínicamente implementables. Principalmente, estos planes son rechazados por la mala cobertura dosimétrica de los PTVs.

Con el objetivo de mejorar ese aspecto de los planes, nos planteamos utilizar otros modelos. Uno de los más interesantes se basa en la Dosis Equivalente Uniforme (EUD, por sus siglas en inglés), una métrica biológica introducida por Niemerko en [7] que nos dice la dosis equivalente que, irradiada uniformemente, consigue el mismo efecto que la dosis no uniforme:

$$\text{EUD} = \left( \frac{1}{N} \sum_i d_i^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2)$$

donde  $N$  es el número de vóxeles en la región,  $d_i$  es la dosis que recibe el vóxel  $i$  y  $\alpha$  es un parámetro que decide el efecto dosis-volumen.

A partir de esta métrica, Wu [10] define funciones objetivo para PTVs y OARs:

$$f_{\text{PTV}} = \frac{1}{1 + \left( \frac{\text{EUD}_0}{\text{EUD}} \right)^n} \quad (3)$$

$$f_{\text{OAR}} = \frac{1}{1 + \left( \frac{\text{EUD}}{\text{EUD}_0} \right)^n} \quad (4)$$

donde  $\text{EUD}_0$  es el parámetro que describe la dosis prescrita o deseada.

Como muestra la ecuación, nos encontramos ante un modelo no lineal de grado superior a cuadrático, por lo que no podemos utilizar Gurobi para resolver un modelo que utilice estas funciones.

El Descenso por Gradiente es uno de los métodos más populares y versátiles para la optimización de modelos convexos no lineales. Para implementar el modelo necesitamos las derivadas de las funciones objetivo anteriormente definidas.

Para obtener las derivadas seguimos el razonamiento descrito en [10] y optimizamos a partir del logaritmo de la función objetivo, lo que facilita la obtención de las derivadas:

$$\frac{\partial F'}{\partial x_j} = \sum_i \frac{\partial F'}{\partial \text{EUD}} \cdot \frac{\partial \text{EUD}}{\partial d_i} \cdot \frac{\partial d_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \text{EUD}}{\partial d_i} = \text{EUD} \cdot \frac{d_i^{\alpha-1}}{\sum_i d_i^\alpha} \quad (6)$$

Igual que la función objetivo, la derivada de  $F'$  con respecto a  $\text{EUD}$  depende de si la región es tumoral o de riesgo:

$$\left. \frac{\partial F'}{\partial \text{EUD}} \right|_{\text{PTV}} = \frac{n \cdot f_{\text{PTV}}}{\text{EUD}} \cdot \left( \frac{\text{EUD}_0}{\text{EUD}} \right)^n \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial F'}{\partial \text{EUD}} \right|_{\text{OAR}} = -\frac{n \cdot f_{\text{OAR}}}{\text{EUD}} \cdot \left( \frac{\text{EUD}}{\text{EUD}_0} \right)^n \quad (8)$$

## 2.4. Resultados

En esta sección se muestra el resultado obtenido por Gurobi con el modelo lineal y por nuestro algoritmo de Descenso por Gradiente con el modelo no lineal, para el plan descrito anteriormente.

Aunque el objetivo del método de Descenso por Gradiente es resolver modelos no lineales, se validó su funcionamiento haciéndole resolver también el modelo lineal y comparando sus resultados con los obtenidos con Gurobi. En el mismo periodo de tiempo, el Gradiente encuentra resultados similares (aunque ligeramente inferiores) a los conseguidos por Gurobi.

Gurobi implementa un método de punto interior con barrera que, teóricamente, consigue una convergencia más rápida, por lo que estos resultados son los esperados y validan el buen funcionamiento del método. Queda como trabajo futuro intentar mejorar la convergencia del Gradiente.

La Tabla 1 muestra, para las diferentes regiones de interés, la dosis mínima, media y máxima de ambas soluciones. Las Figuras 2 y 3 representan los histogramas de dosis volumen de las soluciones de los modelos lineal y no lineal respectivamente.

Región/Dosis (Gy)	Modelo lineal			Modelo no lineal		
	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max
Glándula salival I	0.00	17.86	60.02	0.00	20.12	62.62
Glándula salival D	0.00	12.42	58.56	0.00	15.86	59.48
Tr. encefálico	0.00	1.91	32.44	0.00	1.08	14.49
Médula espinal	0.97	30.22	49.99	1.14	24.55	48.62
Mandíbula	0.00	32.13	69.93	0.00	30.56	62.76
Tejido normal	0.00	21.54	74.25	0.00	22.81	68.79
PTV 67.50	60.75	66.79	74.25	67.02	67.38	67.71
PTV 60.00	53.99	59.31	65.99	55.26	60.44	67.08
PTV 54.00	49.18	53.53	56.91	53.87	54.51	56.36

**Tabla 1.** Dosis máxima, media y mínima de los planes resultantes del modelo lineal (resuelto con Gurobi) y el modelo no lineal (resuelto con Descenso por Gradiente) para las diferentes regiones de interés.

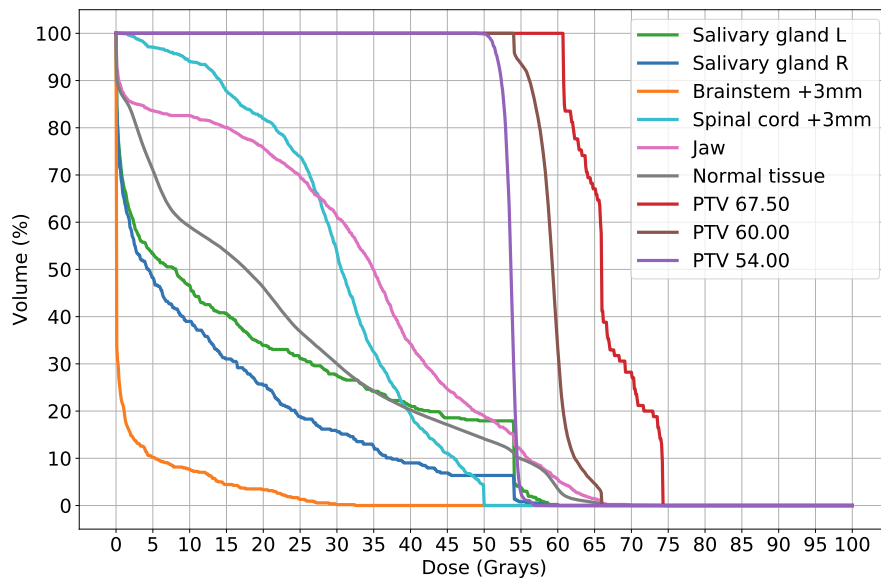
Como se puede observar en las tablas, ambos modelos cumplen las restricciones descritas en la Sección 2.1, obteniendo el modelo lineal dosis medias inferiores más bajas tanto en la glándula salival izquierda como en la derecha.

Sin embargo, los histogramas nos muestran que esta reducción de dosis se debe a una peor homogeneidad de la dosis en los PTVs.

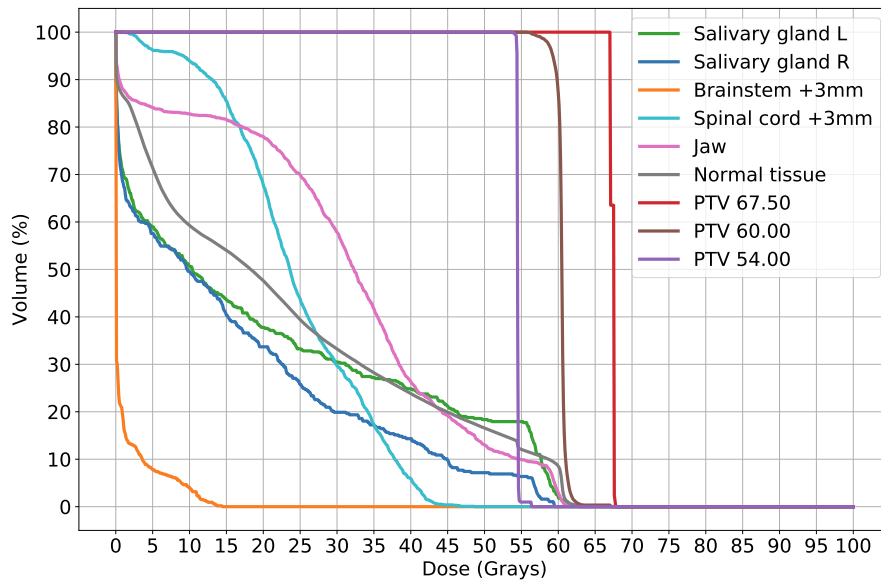
En términos de rendimiento, la comparación entre Gurobi y Gradiente no es relevante ya que, aunque sus rendimientos son del mismo orden, se implementan



Técnicas de Alto Rendimiento para la Optimización de Planes de Radioterapia de Intensidad Modulada



**Figura 2.** Histograma dosis volumen de las regiones de interés del modelo lineal obtenido con Gurobi.



**Figura 3.** Histograma dosis volumen de las regiones de interés del modelo no lineal obtenido con Descenso por Gradiente.

dos métodos y dos modelos totalmente diferentes. En cambio, podemos comparar es el rendimiento del Descenso por Gradiente en CPUs multicore y en GPUs.

La versión CPU del método utiliza las librerías Intel MKL, mientras que la versión GPU utiliza cuSPARSE. Las especificaciones de la plataforma de prueba son las siguientes:

- **CPU:** 2 x Intel Xeon E5-2620 v3 (12 núcleos)
- **GPU:** NVIDIA Tesla K80
- **RAM:** 64 GB DDR4 2133 MHz
- **Versión MKL:** 2020.0.166
- **Versión CUDA:** 10.0.130

La Tabla 2 muestra tiempo medio por iteración y la aceleración de las tres implementaciones: MKL Secuencial, MKL paralelizado con OpenMP y GPU con cuSPARSE. Se puede observar la dominancia de la GPU, con una aceleración que alcanza  $11 \times$ .

Implementación	Tiempo/iteración (ms)	Aceleración
MKL Secuencial	134.8	1.0 $\times$
MKL OpenMP (8t)	43.8	3.1 $\times$
cuSPARSE	12.1	11.1 $\times$

**Tabla 2.** Tiempo por iteración (en milisegundos) y aceleración de las tres implementaciones del algoritmo de descenso por gradiente en CPU y GPU

### 3. Conclusiones

En este trabajo hemos implementado un método de Descenso por Gradiente para la optimización de modelos lineales y no lineales aplicados a la Radioterapia de Intensidad Modulada.

Comparados con el modelo lineal, el modelo no lineal obtiene planes con mejor cobertura dosimétrica tumoral sin empeorar notablemente la dosis recibida por los órganos en riesgo.

En términos de rendimiento, la plataforma más adecuada para ejecutar este tipo de algoritmos es la GPU, obteniendo aceleraciones de hasta  $11 \times$  con respecto a la versión secuencial.

## Referencias

1. Breedveld, S., van den Berg, B., Heijmen, B.: An interior-point implementation developed and tuned for radiation therapy treatment planning. *Computational Optimization and Applications* **68**(2), 209–242 (nov 2017). <https://doi.org/10.1007/s10589-017-9919-4>
2. Breedveld, S., Craft, D., van Haveren, R., Heijmen, B.: Multi-criteria optimization and decision-making in radiotherapy (aug 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.019>
3. Fu, A., Ungun, B., Xing, L., Boyd, S.: A convex optimization approach to radiation treatment planning with dose constraints. *Optimization and Engineering* **20**(1), 277–300 (mar 2019). <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9409-2>, <http://link.springer.com/10.1007/s11081-018-9409-2>
4. Jia, X., Ziegenhein, P., Jiang, S.B.: GPU-based high-performance computing for radiation therapy. *Physics in Medicine and Biology* **59**(4), R151–R182 (feb 2014). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/4/R151>, <http://stacks.iop.org/0031-9155/59/i=4/a=R151?key=crossref.98a1bfa6c87abf9c16f1744df79cdd70>
5. Lan, Y., Li, C., Ren, H., Zhang, Y., Min, Z.: Fluence map optimization (FMO) with dose-volume constraints in IMRT using the geometric distance sorting method. *Physics in Medicine and Biology* **57**(20), 6407–6428 (2012). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/57/20/6407>
6. Men, C., Gu, X., Choi, D., Majumdar, A., Zheng, Z., Mueller, K., Jiang, S.B.: GPU-based ultrafast IMRT plan optimization. *Physics in Medicine and Biology* **54**(21), 6565–6573 (nov 2009). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/21/008>, <http://stacks.iop.org/0031-9155/54/i=21/a=008?key=crossref.9b00d33c156fbd742d139aac5e2a1fbb>
7. Niemierko, A.: Reporting and analyzing dose distributions: A concept of equivalent uniform dose. *Medical Physics* **24**(1), 103–110 (1997). <https://doi.org/10.1118/1.598063>
8. Otto, K.: Real-time interactive treatment planning. *Physics in Medicine and Biology* **59**(17), 4845–4859 (2014). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/17/4845>
9. Wu, Q., Mohan, R.: Algorithms and functionality of an intensity modulated radiotherapy optimization system. *Medical Physics* **27**(4), 701–711 (2000). <https://doi.org/10.1118/1.598932>
10. Wu, Q., Mohan, R., Niemierko, A., Schmidt-Ullrich, R.: Optimization of intensity-modulated radiotherapy plans based on the equivalent uniform dose. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* **52**(1), 224–235 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0360-3016\(01\)02585-8](https://doi.org/10.1016/S0360-3016(01)02585-8)

# Interacción Natural: Últimas Publicaciones y el inicio con Deep Learning

Juan Jesús Ojeda Castelo<sup>1</sup>

Applied Computing Group (TIC-211), Departamento de Informática, Universidad de Almería<sup>1</sup>

juanje.ojeda@ual.es

**Abstract.** En el último año se han estado escribiendo dos papers de los últimos avances realizados en la investigación. Uno de los artículos corresponde con el objetivo que se fijó para esta Tesis sobre adaptación de la interacción al usuario con el uso de Kinect v2 en un centro de educación especial. El otro artículo trata sobre la detección de varias partes del cuerpo (en este caso manos y la cabeza) para controlar una interfaz de usuario y que de esta forma sea más preciso y más fácil para el usuario interactuar de una manera natural con el sistema. Además, se ha estado leyendo sobre Deep Learning para realizar el reconocimiento de gestos con algoritmos de este campo de la Inteligencia Artificial sin tener que usar ningún dispositivo adicional, sino que se pueda hacer con una webcam estándar.

## 1 Introducción

Uno de los desafíos en la implementación de sistemas de reconocimiento de gestos es diseñar modelos de gestos que funcionen para una amplia variedad de usuarios y entornos. El principal inconveniente de la generalización surge cuando las técnicas de visión artificial se utilizan para derivar características. Las condiciones de iluminación, colocación de la cámara, suposiciones sobre el color de la piel, incluso el de la ropa usada por el usuario puede interrumpir el proceso de reconocimiento de gestos cuando adquieren valores que no han sido contemplados durante el entrenamiento. Con el fin de conseguir una adaptación respecto a la interacción del usuario se creó un modelo dispositivo-interacción, del cual se ha redactado un artículo para una revista.

El campo de la Visión Artificial está cambiando de métodos estadísticos a métodos de redes neuronales de Deep Learning. Todavía hay muchos problemas difíciles de resolver en la visión artificial. Sin embargo, los métodos de Deep Learning están logrando resultados muy buenos en algunos problemas específicos [1].

Lo más interesante no es solo el rendimiento de los modelos de Deep Learning sobre dichos problemas. Es el hecho de que un solo modelo puede aprender el significado de las imágenes y realizar tareas de visión, obviando la necesidad de crear una serie de métodos especializados y realizados manualmente [2].

Deep learning ha sido aplicado a los siguientes problemas de Visión Artificial:

- Clasificación de imágenes
- Clasificación de imágenes con localización
- Detección de objetos
- Segmentación de objetos
- Transferencia de estilo de imagen
- Colorización de imagen
- Reconstrucción de imagen
- Superresolución de imagen
- Síntesis de imagen

Los métodos de Deep Learning son una actualización moderna de las Redes Neuronales que se preocupan por construir redes neuronales mucho más grandes y complejas y, como se comentó anteriormente, muchos métodos se refieren a conjuntos de datos muy grandes de datos analógicos etiquetados, como imagen, texto, audio y vídeo.

Los algoritmos de Deep Learning más populares son:

- **Redes neuronales totalmente conectadas:** Las redes neuronales prealimentadas totalmente conectadas son la arquitectura de red estándar utilizada en la mayoría de las aplicaciones básicas de redes neuronales. Totalmente conectado significa que cada neurona en la capa anterior está conectada a cada neurona en la capa posterior. Y prealimentado significa que las neuronas en cualquier capa anterior solo están conectadas a las neuronas en una capa posterior. Cada neurona de una red neuronal contiene una función de activación que cambia la salida de una neurona dada su entrada.
- **Red neuronal convolucional (CNN)** [3]: Es un tipo de arquitectura de red neuronal profunda diseñada para tareas específicas como la clasificación de imágenes. Las CNN se inspiraron en la organización de las neuronas en la corteza visual del cerebro animal. Como resultado, proporcionan algunas características muy interesantes que son útiles para procesar ciertos tipos de datos como imágenes, audio y vídeo. Un CNN se compone de una capa de entrada. Sin embargo, para el procesamiento básico de imágenes, esta entrada es típicamente una matriz bidimensional de neuronas que corresponden a los píxeles de una imagen. También contiene una capa de salida que generalmente es un conjunto unidimensional de neuronas de salida. CNN utiliza una combinación de capas de convolución escasamente conectadas, que realizan el procesamiento de imágenes en sus entradas.
- **Redes neuronales recurrentes (RNN)** [4]: A diferencia de las redes neuronales de alimentación directa, puede operar de manera efectiva en secuencias de datos con longitud de entrada variable. Esto significa que los RNN utilizan el conocimiento de su estado anterior como entrada para su predicción actual, y podemos repetir este proceso para un número arbitrario de pasos que permiten a la red propagar información a través del estado oculto a través del tiempo. Esto es esencialmente como darle a una red neuronal una memoria a corto plazo. Esta característica hace que los RNN sean muy efectivos para trabajar con secuencias de datos que ocurren con el tiempo.

- **La Red Generativa Antagónica (GAN)**: Es una combinación de dos redes neuronales de aprendizaje profundo: una Red Generadora y una Red Discriminadora. La red del generador produce datos sintéticos, y la red discriminadora intenta detectar si los datos que está viendo son reales o sintéticos.
- **Redes de memoria a corto y largo plazo (LSTM)** [5]: La unidad recurrente principalmente intenta recordar todo el conocimiento pasado que la red ha visto hasta ahora y olvidar datos irrelevantes. Esto se hace mediante la introducción de diferentes capas de función de activación llamadas puertas para diferentes propósitos. Cada unidad recurrente LSTM también mantiene un vector llamado Estado interno de la celda que describe conceptualmente la información que se eligió para ser retenida por la unidad recurrente LSTM anterior.
- **Máquina de Boltzmann profunda (DBM)** [6]: Es un modelo de una red neuronal profunda formada por múltiples capas de neuronas con funciones de activación no lineal. La estructura de una máquina de Boltzmann profunda le permite aprender relaciones muy complejas entre características y facilita un rendimiento avanzado en el aprendizaje de la representación de alto nivel de características, en comparación con las redes neuronales artificiales convencionales.
- **Redes de creencias profundas (DBN)** [7]: Son modelos generativos con muchas capas de variables causales ocultas. Cada capa de un DBN consiste en una máquina de Boltzmann restringida (RBM). Cuando un RBM ha aprendido, sus activaciones de funciones se utilizan como datos para entrenar al próximo RBM en los DBN.

Además, el flujo óptico se utiliza en el reconocimiento de gestos porque esta técnica permanece indiferente al movimiento que se produzca en el background pero sí tiene en cuenta el movimiento del objeto, con lo cual es muy efectiva en backgrounds dinámicos.

El flujo óptico es un método fundamental para calcular el movimiento de intensidades de imagen, que pueden atribuirse al movimiento de objetos en la escena [8]. El flujo óptico es un concepto fundamental que se utiliza de una forma u otra en la mayoría de los algoritmos de procesamiento de vídeo. Los métodos de flujo óptico se basan en cálculos informáticos del movimiento de las intensidades de la imagen a lo largo del tiempo en un vídeo. Los campos de flujo pueden ser analizados para producir segmentaciones en regiones, que podrían estar asociadas con el movimiento de los objetos.

## 2 Progreso de la Investigación

En el último año con las expectativas de entregar la Tesis en el presente curso académico los esfuerzos se han centrado en la redacción, tanto de artículos de investigación como de la memoria de la Tesis.

Se han redactado dos artículos. Uno de ellos basado en la adaptación de la interacción al usuario y otro sobre algunas técnicas que se implementaron para mejorar la interacción con el ordenador.

El primer artículo se centra en la interacción del usuario pero desde una perspectiva de necesidades especiales. El motivo es porque el objetivo consiste en la adaptación de dicha interacción y este colectivo resultaba interesante estudiarlo porque presenta muchas características diferentes que pueden afectar a la forma de interacción con un sistema informático. Con el fin de mejorar la experiencia de interacción se ha desarrollado un modelo dispositivo-interacción. Este modelo permite abordar este caso de estudio desde una perspectiva diferente ya que normalmente la solución a este problema se basa en el usuario. Por el contrario, el modelo dispositivo-interacción se centra principalmente en las características del dispositivo para tratar de adaptarlas a las del usuario. En el proceso de evaluación han participado varios estudiantes de un centro de educación especial con discapacidad física, sensorial y autismo. Los resultados son prometedores puesto que este modelo será útil para ayudar a estudiantes con necesidades especiales a interactuar con sistemas informáticos lo que será un gran beneficio para su desarrollo personal y académico.

En el segundo artículo escrito trata de que en la actualidad la mayoría de las personas utilizan un tipo de interacción natural aunque lo más probable es que no sean conscientes de ello. Los movimientos o gestos que realizan cuando están usando el smartphone o tablet pertenecen a uno de los tipos de interacción natural denominado interacción táctil. Sin embargo, la forma tradicional de interacción (el uso de ratón y teclado) es la que predomina entre los usuarios a la hora de utilizar el ordenador y esta es la razón por la que en esta Tesis se investiga la creación de un modelo para ayudar a que la interacción natural se pueda utilizar no solo en los dispositivos móviles sino también en los ordenadores personales. El hecho de que este tipo de interacción no esté implantada aún, pensamos que puede ser debido a que tiene una tasa de fallos y un tiempo de respuesta mayor que los que tiene la interacción tradicional. Y por ello, en este trabajo se implementan técnicas de visión artificial para utilizar la cabeza y las manos como los medios principales en la interacción con el sistema y de esta forma mejorar el rendimiento y disminuir el tiempo de respuesta. En relación a la detección de la cabeza se ha procedido a identificar el movimiento lateral de la cara y la sonrisa mientras que para las manos se ha utilizado su posición. Se ha implementado un prototipo para controlar diferentes dispositivos que se encuentran integrados en un ambiente inteligente con una placa low-cost (Raspberry Pi 3). Algunos experimentos se han llevado a cabo para comprobar la validez de las diferentes técnicas utilizadas para el reconocimiento de la cara y de la posición de la mano. En el proceso del reconocimiento de la cara ha sido evaluado la precisión de este método cuando el usuario utiliza la Interfaz de Usuario Natural y en el reconocimiento de la posición de la mano se ha alcanzado una tasa de éxito de 91%.

Por otro lado también se ha estado haciendo una lectura sobre la siguiente fase de desarrollo, que implica la utilización de técnicas de Machine Learning o

Deep Learning para el reconocimiento de gestos. Machine Learning es muy útil para una variedad de problemas de la vida real. Es muy usado para tareas como clasificación, reconocimiento, detección y predicción. Además, es muy eficiente para automatizar procesos que usan datos y con esos datos se pueden crear modelos que tienen la capacidad de devolver un resultado. Los algoritmos de Machine Learning pueden clasificar imágenes de diferentes gestos con las manos, tales como el puño, la palma de la mano o cuando se levanta el pulgar. Existe un subconjunto dentro de Machine Learning denominado Deep Learning que se basa en un conjunto de capas que se encargan de procesar los datos de entrada que recibe, extrayendo las características de ellos y creando un modelo matemático. En la actualidad se está utilizando este campo para reconocer de una manera más fiable los gestos que realiza el usuario. Deep Learning suele trabajar con Redes Neuronales Convolucionales las cuales si aplicamos su funcionamiento al problema que nos concierne puede tomar una imagen, asignarle una importancia (pesos) a varios aspectos u objetos en la imagen y ser capaz de diferenciar una de la otra.

El propósito es utilizar diferentes técnicas de Deep Learning para comprobar cuál de ellas tiene una mayor precisión en el reconocimiento de gestos con la ayuda de un dataset de vídeos de gestos con las manos. Este dataset contiene aproximadamente 148.000 vídeos donde se realizan un total de 27 gestos diferentes. Las técnicas de Deep Learning más destacadas actualmente se han descrito en el apartado anterior.

### 3 Conclusiones

Las conclusiones de la investigación realizada son las siguientes:

- Se ha creado un sistema low-cost con el objetivo de reconocer el movimiento y gestos de diversas partes del cuerpo. Este sistema es capaz de reconocer gestos con la cabezas y las manos, así como detectar la sonrisa y hacer un tracking de la nariz. En cuanto a la característica low-cost, los dispositivos en los que se basa dicho sistema son la placa Raspberry Pi y una webcam estándar para reducir al máximo los costes de implantación. En este estudio el reconocimiento de gestos con las manos se ha combinado con la detección del movimiento de la cabeza con el objetivo de facilitar la interacción y ofrecer más opciones para asociar los gestos con acciones del sistema. Las técnicas utilizadas en el reconocimiento de gestos con las manos han sido: la técnica de sustracción de background, de detección de color de la piel y de extracción de geometría de la mano. La tasa de acierto ha sido del 91%. Sin embargo, para la detección de los movimientos de la cabeza y de la sonrisa se ha empleado la técnica de Haar Cascade.
- Se ha desarrollado un modelo dispositivo-interacción cuyo objetivo es adaptar las características del dispositivo que permite reconocer los gestos a la interacción del usuario. En este estudio, el dispositivo de interacción ha sido Kinect v2, del cual los componentes que han sido utilizados para mejorar la interacción han sido: La cámara RGB, el sensor de profundidad y el array



de micrófonos y el tracking del esqueleto. En este caso, además del modelo dispositivo-interacción se incluyó un modelo de usuario basado en características en la arquitectura del sistema y algunas reglas de adaptación que contienen información relevante para la adaptación del usuario al sistema. Este modelo, que está basado en la tupla características-valor, mejora la interpretación del sistema al ser integrado con las reglas de adaptación. Dicho sistema tiene un módulo de actividades que adapta la actividad seleccionada en función de la información almacenada en el modelo de usuario y el modelo dispositivo-interacción. El proceso de evaluación se dividió en una evaluación por expertos y una evaluación en la cual participaron 12 individuos con diferentes tipos de discapacidad. En esta evaluación se midieron como variables el tiempo de realización de la actividad y el número de errores, parámetros que han ido decreciendo en el transcurso de las sesiones.

- Por último se pretende utilizar diferentes técnicas de Deep Learning junto con el flujo óptico, tomando como conjunto de entrenamiento una base de datos de vídeos donde se realizan gestos, con la hipótesis de que la combinación de estos métodos puede ayudar a mejorar la precisión en el reconocimiento de gestos cuando se utiliza una webcam estándar.

## References

- [1] Voulodimos, A., Doulamis, N., Doulamis, A., Protopapadakis, E.: Deep learning for computer vision: A brief review. *Computational intelligence and neuroscience* **2018** (2018)
- [2] Schmidhuber, J.: Deep learning in neural networks: An overview. *Neural networks* **61** (2015) 85–117
- [3] LeCun, Y., Bengio, Y., et al.: Convolutional networks for images, speech, and time series. *The handbook of brain theory and neural networks* **3361**(10) (1995) 1995
- [4] Che, Z., Purushotham, S., Cho, K., Sontag, D., Liu, Y.: Recurrent neural networks for multivariate time series with missing values. *Scientific reports* **8**(1) (2018) 6085
- [5] Cheng, J., Dong, L., Lapata, M.: Long short-term memory-networks for machine reading. *arXiv preprint arXiv:1601.06733* (2016)
- [6] Salakhutdinov, R., Hinton, G.: Deep boltzmann machines. In: *Artificial intelligence and statistics*. (2009) 448–455
- [7] Hinton, G.E.: Deep belief networks. *Scholarpedia* **4**(5) (2009) 5947
- [8] Horn, B.K., Schunck, B.G.: Determining optical flow. *Artificial intelligence* **17**(1-3) (1981) 185–203

# Un circuito cuántico optimizado para convertir de formato signo-magnitud a complemento a dos

Francisco José Orts Gómez<sup>1</sup>

Dpt. de Informática, Universidad de Almería, ceiA3, Almería, España  
francisco.orts@ual.es

**Abstract.** Uno de los problemas críticos para implementar algoritmos cuánticos a día de hoy es la escasez de recursos. Las computadoras y simuladores cuánticos actuales son principalmente prototipos con escasos recursos computacionales. Por lo tanto, es necesario optimizar las operaciones para reducir la cantidad necesaria de puertas y cúbits. Este trabajo presenta un novedoso circuito reversible que puede convertir números binarios con signo de  $N$  dígitos en números en complemento a dos en un entorno cuántico. La profundidad del circuito es  $O(\log N)$ . Está basado en el sumador reversible con acarreo anticipado más rápido disponible actualmente. Este sumador se ha adaptado para realizar la conversión utilizando el número mínimo de puertas y cúbits, siendo más rápido que una suma normal. Además, se ha utilizado una métrica robusta para medir el coste cuántico, el retardo, las entradas auxiliares y las salidas basura, y se ha comparado con otros circuitos presentes en la literatura en base a estas métricas.

**Keywords:** Computación cuántica · Circuito cuántico · Circuito reversible · Complemento a dos · Representación signo-magnitud a complemento a dos

## 1 Introducción

Los ordenadores cuánticos se basan en puertas lógicas reversibles que deben satisfacer los principios de la mecánica cuántica [15]. Existe una amplia variedad de literatura sobre la construcción de circuitos para ordenadores cuánticos mediante puertas reversibles, especialmente circuitos relacionados con operaciones aritméticas. Por ejemplo, existe un interés especial en obtener circuitos aritméticos optimizados para utilizarlos como módulo en el algoritmo de Shor. Hay disponible una gran cantidad de circuitos optimizados para calcular la suma [6, 22], la resta [14, 21], la multiplicación [4, 7] y la división [9, 16].

Sin embargo, diseñar y optimizar circuitos aritméticos no es la única forma de mejorar los circuitos y sus operaciones. A veces, se pueden conseguir mejoras más significativas utilizando nuevos enfoques, como el uso de otros formatos numéricos. Por ejemplo, las computadoras clásicas representan enteros utilizando complemento a dos para simplificar el hardware necesario para sumas y restas [1]. En términos de ordenadores cuánticos, los circuitos sumadores actuales son

Un circuito cuántico optimizado para convertir de formato signo-magnitud a complemento a dos

más rápidos que los restadores disponibles [21, 22]. Utilizando complemento a dos, las restas se pueden calcular como sumas.

En este trabajo, se presenta un circuito conversor de números binarios con signo a complemento a dos. El diseño del conversor cuántico está basado en puertas cuánticas que calculan  $\overline{A} + 1$ . Este circuito se basa en los circuitos sumadores de última generación más optimizados para ordenadores cuánticos, mejorando al resto de conversores actualmente disponibles en términos de velocidad de cómputo. La conversión de un número binario con signo,  $A$ , a complemento a dos se puede calcular como  $\overline{A} + 1$  [10], por lo que se puede hacer negando cada dígito de  $A$  y usando un sumador para calcular  $\overline{A} + 1$ . Los mejores sumadores cuánticos en términos de velocidad son los propuestos en [6, 22]. Se consideran como punto de partida para diseñar un sumador específico para calcular  $\overline{A} + 1$ .

El resto del artículo está distribuido de la siguiente manera: la sección 2 detalla la métrica utilizada para evaluar un circuito cuántico. La sección 3 describe los circuitos conversores disponibles en la literatura. La sección 4 presenta el circuito propuesto y también muestra una comparación seria entre dicho circuito y los estudiados en la Sección 3. Finalmente, la Sección 5 resume las conclusiones.

## 2 Mediciones en un circuito cuántico

Las métricas descritas en [13] han sido adoptadas en este trabajo. Estas métricas definen cuatro factores importantes para medir un circuito en términos de eficiencia:

- Número de entradas auxiliares: entradas constantes utilizadas para realizar operaciones auxiliares.
- Salidas basura: salidas que no se pueden usar al final del circuito ya que es imposible conocer su valor. A menos que estas salidas basura sean restauradas a su valor original, dichas salidas (qubits) no se podrán usar más adelante, lo que resultaría en un desperdicio de recursos. Si se entrelazan con entradas de otros circuitos, producirán resultados anómalos [15].
- Delay: la profundidad lógica del circuito. Es un parámetro importante que está relacionado con la velocidad del circuito [21]. En [13], *bigtriangleup* se define como la unidad de delay.
- Coste cuántico: número de puertas.

Es necesario subrayar que no todas las puertas tienen un tamaño similar. Por ejemplo, es injusto considerar la puerta Pauli-X [24] y la puerta Toffoli [23] similares en términos de coste cuántico o delay, ya que la puerta Toffoli involucra 5 puertas  $2 \times 2$  (2  $V$ -controladas, 1  $V^+$ -controlada [8] y 2 CNOT) y la puerta Pauli-X es una puerta  $1 \times 1$ . Por ello, [13] establece el delay de acuerdo al tamaño de las puertas. En este trabajo se sigue dicha consideración. Una puerta de mayor tamaño tendrá un coste cuántico igual al número de puertas de coste cuántico 1 necesarias para su implementación. Por otro lado, en [13] también se establece

Un circuito cuántico optimizado para convertir de formato signo-magnitud a complemento a dos

el delay de las puertas  $1 \times 1$  y  $2 \times 2$  como  $1\Delta$ , y el delay de una puerta  $N \times N$  se calcula como el número de puertas  $1 \times 1$  y  $2 \times 2$  que tiene su camino crítico. Por ejemplo, como la puerta Toffoli tiene 5 puertas de tamaño  $2 \times 2$ , tiene un coste cuántico de 5 y un delay de  $5\Delta$  (ya que no se pueden realizar operaciones simultáneamente).

Para mayor claridad, los símbolos de las puertas usadas en este trabajo se muestran en las Figs. 1, 2, 3 y 4. Según [13], las puertas Pauli-X y CNOT tienen un coste cuántico de 1 y un delay de  $1\Delta$ . Como se mencionó en el párrafo anterior, la puerta Toffoli tiene un coste cuántico de 5 y un delay de  $5\Delta$ . La puerta Peres está construida con dos puertas  $V^+$ -controlada, una puerta  $V$ -controlada y una puerta CNOT. Por lo tanto, tiene un coste cuántico de 4 y un delay de  $4\Delta$ .

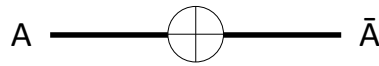


Fig. 1. Símbolo de la puerta Pauli-X.

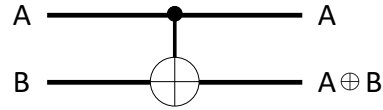


Fig. 2. Símbolo de la puerta CNOT.

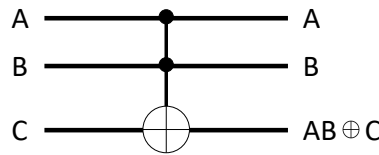


Fig. 3. Símbolo de la puerta Toffoli.

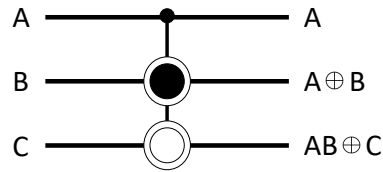


Fig. 4. Símbolo de la puerta Peres.

### 3 Metodología

El complemento a dos de un número de  $N$ -dígitos es su complemento con respecto a  $2^N$ . El rango de números en un sistema en complemento a dos es  $-(2^{N-1}) \leq X \leq (2^{N-1} - 1)$  [10]. A modo de ejemplo, la Tabla 1 muestra la conversión de un número  $A$  de binario con signo a complemento a dos (expresado este último en decimal para mayor comprensión) para el caso  $N = 4$ . La conversión de un número  $A$  de binario con signo a complemento se realiza como se explica a continuación. Si  $A \geq 0$ , no es necesaria ninguna conversión porque ambas representaciones de  $A$ , binario con signo y complemento a dos, son iguales. Sin embargo, si  $A < 0$ , la conversión es necesaria. Se puede calcular como la inversión de todos los dígitos de  $A$  y luego calcular  $\bar{A} + 1$ . Hay dos enfoques para convertir números binarios con signo a complemento a dos. Uno de ellos consiste en diseñar un circuito específico para tal propósito y el otro es utilizar un sumador.

Un circuito cuántico optimizado para convertir de formato signo-magnitud a complemento a dos

Binario con signo	Valor en complemento a dos
0111	7
0110	6
0101	5
0100	4
0011	3
0010	2
0001	1
0000	0
1111	-1
1110	-2
1101	-3
1100	-4
1011	-5
1010	-6
1001	-7
1000	-8

**Table 1.** Representación de números binarios con signo y su valor en complemento a dos (expresado en decimal) para el caso  $N = 4$ .

### 3.1 Conversores dedicados

Existen varias propuestas en la literatura que siguen el enfoque basado en el diseño de un circuito específico. En [17], los autores proponen una nueva puerta, llamada *SSMT*, para calcular la conversión de un número de 4 dígitos. Es una puerta  $4 \times 4$ . Lo describen con un coste cuántico de 1 ya que consideran que el coste cuántico de cada puerta es de 1. No proponen un diseño de circuito (solo su definición matemática), pero la puerta se define mediante las siguientes operaciones ( $O_i$  es la salida  $i$ -ésima y  $I_i$  es la entrada  $i$ -ésima):

- $O_0 = I_0$
- $O_1 = I_1(I_0 + \bar{I}_2\bar{I}_3) \oplus I_0\bar{I}_1(I_3 + I_2)$
- $O_2 = I_2\bar{I}_3 \oplus I_2\bar{I}_0 \oplus I_0\bar{I}_2I_3$
- $O_3 = I_3$

Ya que la salida más larga,  $O_2$ , involucra varias puertas CNOT y Toffoli, siguiendo la métrica descrita en [13] se puede concluir que su coste cuántico es mayor que 1. Debido a estas operaciones, se necesitan al menos 2 puertas Toffoli para implementarlo, por lo que su coste cuántico sería igual o mayor a 10 (de hecho, podemos suponer que el coste es mucho mayor ya que hay otras operaciones complejas). En [2] se propone otra puerta cuántica, llamada *TCG*. De manera similar a la anterior *SSMT*, esta puerta realiza la conversión de un número de 4 dígitos ( $N = 4$ ). El diseño del circuito para la puerta *TCG* consta de 6 puertas CNOT, 3 Toffoli y una versión especial de la puerta Toffoli con 3 qubits de control. Considerando solo las puertas CNOT y las puertas Toffoli, la puerta tiene un coste cuántico de  $21 + Z$ , por lo que el coste cuántico del circuito es  $21 + Z$ , donde  $Z$  es el coste cuántico de la Toffoli de 3 entradas de control (cuyo

coste no es analizado en dicho artículo). En [12], se presenta una puerta Toffoli optimizada de 3 entradas de control con un coste cuántico de 14, por lo que se puede concluir que la puerta  $TCG$  tiene un coste cuántico de 35. La puerta  $TCG$  es optimizada en [3], lográndose el mejor coste cuántico para el caso  $N = 4$ , 35. Sin embargo, su delay también es de  $35\Delta$  al no haber paralelización posible. Además, varias puertas  $TCG$  no pueden actuar en cadena puesto que carecen de acarreo alguno, por lo que queda limitada para el tamaño  $N = 4$ .

### 3.2 Diseño basado en sumadores

Aunque el diseño de un circuito específico para calcular la conversión del complemento a dos es una opción válida, otro enfoque que consiste en usar sumadores existentes es usado habitualmente debido a que son más eficientes en términos de delay que los conversores descritos en la subsección anterior. Como se ha mencionado, la conversión se puede calcular como la inversión de todos los dígitos de  $A$  y luego  $\bar{A} + 1$ , por lo que solo es necesario invertir cada dígito de  $A$  con  $N$  puertas Pauli-X y luego usar un sumador de los disponibles en la literatura para calcular  $\bar{A} + 1$ .

A continuación, se analizan varios sumadores cuánticos para seleccionar uno de ellos como punto de partida de nuestro diseño de convertidor.

**Análisis de sumadores** En la literatura, hay varios artículos sobre circuitos sumadores de dos números enteros [5, 6, 11, 18–20], que es una de las operaciones aritméticas básicas. Los dos circuitos de suma más eficientes en términos de velocidad son [6, 22], con un delay de  $O(\log N)$ .

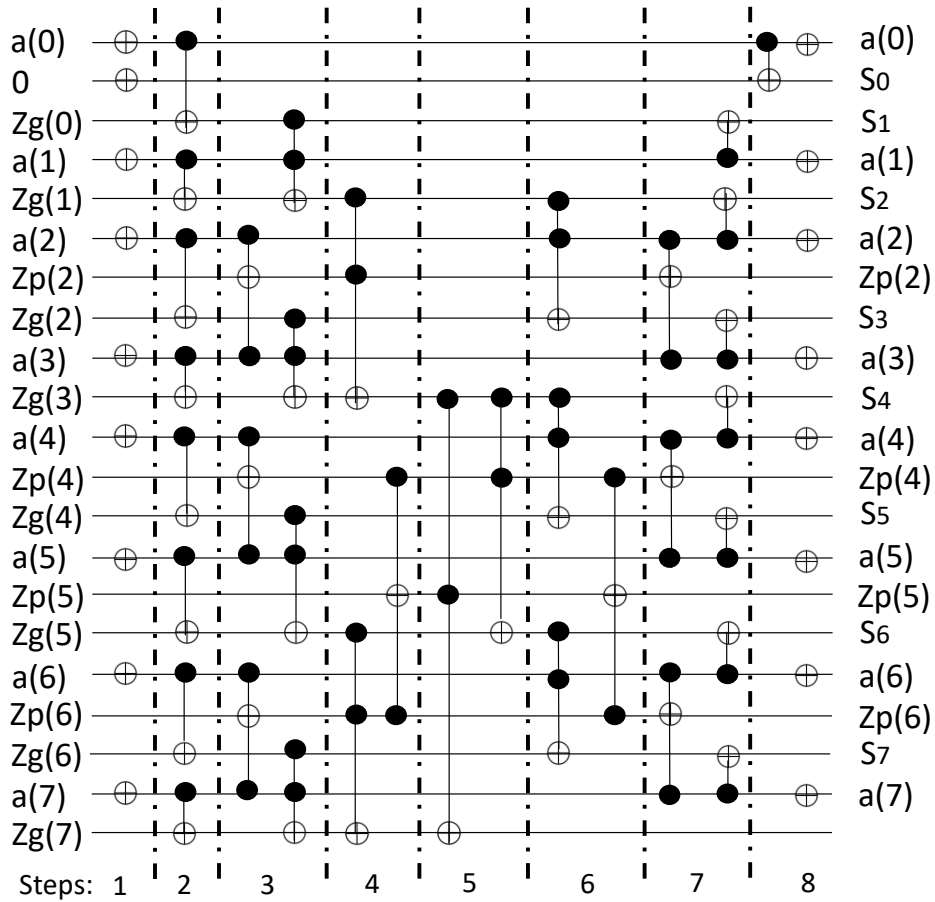
El circuito propuesto en [22] no soporta acarreo de entrada. Tiene varias entradas auxiliares para mejorar el delay y el coste cuántico. No tiene salidas basura. El circuito completo tiene  $4N - 3w(N) - 3\log N$  puertas Toffoli (la puerta Toffoli tiene un coste cuántico de 5),  $(N - 1)$  puertas Peres (la puerta Peres tiene un coste cuántico de 4 [22]) y  $2N$  puertas CNOT, es decir, tiene un coste cuántico de  $26N - 15w(N) - 15\log(N - 4)$ . Tiene un coste cuántico menor que el circuito presentado en [6] (que tiene un coste cuántico de  $28N - 15w(N) - 15\log(N) - 6$ ). Además, [22] tiene un delay de  $\log N + \log N/3 + 2\Delta$ , mientras que el circuito de [6] tiene un delay de  $\log N + \log N/3 + 7\Delta$ . No debemos olvidar que para realizar  $\bar{A} + 1$  es necesaria la inversión de  $A$  con las puertas Pauli-X y otra inversión al final para evitar salidas basura. Esto requiere dos niveles adicionales de profundidad, por lo que el retraso final es  $\log N + \log N/3 + 4\Delta$  y  $\log N + \log N/3 + 9\Delta$  para [22] y [6] respectivamente.

El circuito propuesto en este trabajo se basa en el circuito presentado en [22], que es uno de los dos circuitos mencionados con delay  $O(\log N)$ . Sin embargo, en lugar de utilizar este circuito de forma directa para calcular  $\bar{A} + 1$ , se ha adaptado y mejorado para calcular la conversión de números con signo a complemento a dos. La forma de mejorar el circuito se presenta en la siguiente sección.

Un circuito cuántico optimizado para convertir de formato signo-magnitud a complemento a dos

### 4 Conversor propuesto

Como se ha mencionado en la sección anterior, el circuito propuesto es una adaptación del sumador reversible de acarreo anticipado presentado en [22]. El objetivo es realizar  $\bar{A} + 1$  (suponiendo que  $A$  es un número negativo en formato binario con signo). El sumador mencionado realiza la operación entre dos números  $X$  y  $Y$ , por lo que si  $X = \bar{A}$  y  $Y = 1$ , solo es necesario aplicar una puerta Pauli-X a cada dígito de  $X$  al principio y la conversión podría hacerse. Sin embargo, teniendo en cuenta que  $Y$  siempre es 1, se pueden realizar varias mejoras para reducir el circuito original.



**Fig. 5.** Diseño del conversor para el caso  $N = 8$ .  $a(i)$  es el número a convertir,  $Zg(i)$  contendrá  $S(i + 1)$  (el resultado) y  $Zp(i)$  son qubits auxiliares utilizados para guardar el acarreo anticipado para los dígitos intermedios (son revertidos al finalizar para evitar salidas basura).

Un circuito cuántico optimizado para convertir de formato signo-magnitud a complemento a dos

Centrándonos en el circuito descrito en [22], se pueden hacer varias mejoras ya que  $Y$  siempre será 1. En la Fig. 5 se muestra un ejemplo del circuito resultante para el caso  $N = 8$ . El circuito se divide en 8 pasos para facilitar su explicación. El primer cambio es incluir varias puertas Pauli-X para transformar  $A$  en  $\bar{A}$  (Paso 1 en la Fig. 5). El segundo cambio consiste en eliminar las  $(N - 1)$  puertas Peres (coste cuántico 5) del circuito y reemplazarlas por puertas CNOT (coste cuántico 1) con  $a(i)$  como qubit de control y  $Zg(i)$  como objetivo, siendo  $a(i)$  el dígito  $i$  de  $A$  (con  $0 \leq i \leq N$ ) y  $Zg(i)$  la entrada auxiliar  $i$  definida en el circuito original (Paso 2). Esto se puede hacer ya que la puerta Peres  $i$  calcula  $a(i) \oplus b(i)$ , que siempre es  $a(i)$  si  $b(i) = 0$ . Las puertas Peres tienen un coste cuántico de 5, por lo que este paso reduce el coste cuántico en 4 por cada puerta reemplazada, es decir,  $(N - 1)$ . Además, las entradas de  $B$  se pueden eliminar, excepto la primera, ya que los otros valores son siempre 0. El dígito  $b(0)$  se puede convertir en una entrada auxiliar de valor 0 invertida con una puerta Pauli al mismo tiempo que los dígitos de  $A$  en el Paso 1. De esta manera, el número de qubits se reduce en  $N - 1$ . Todas las puertas CNOT aplicadas al final para restaurar los qubits de  $B$  se pueden eliminar (excepto la que actúa sobre el nuevo qubit auxiliar), por lo que se aplica una reducción de  $N - 1$  puertas CNOT que reduce el coste pero que no reduce el delay. Por otro lado, como las entradas  $a(i)$  se han invertido, se requiere una nueva inversión al final para evitar las salidas basura (Paso 8). Esto agrega  $1\Delta$  al delay global, pero esta operación también sería necesaria para el circuito original si se utilizará para convertir a complemento a dos. El resto de las puertas en las que  $b(i)$  actúa como un qubit de control se modifican para que el nuevo qubit de control sea  $a(i)$  (las puertas Toffoli dentro de los Pasos 3, 6 y 7).

#### 4.1 Análisis comparativo

$N$	[6]	[22]	Circuito propuesto	Mejora(%)
4	69	63	48	24
6	105	95	70	26
8	175	160	125	22
10	214	196	151	20
16	399	369	294	19
32	864	802	647	18
64	1869	1743	1428	18
128	3714	3460	2825	18
256	7539	7029	5754	18
512	15204	14182	11627	18

**Table 2.** Comparación de costes cuánticos para la suma de números  $N$  dígitos. Los trabajos propuestos en [6] y [22] incluyen un coste adicional de  $2 \times N$  ( $N$  para la inversión inicial y  $N$  para restaurar y evitar salidas basura) para actuar como un conversor. La columna de mejora muestra el porcentaje de mejora de nuestra propuesta con respecto a [22].



Un circuito cuántico optimizado para convertir de formato signo-magnitud a complemento a dos

La tabla 2 muestra una comparación de costes cuánticos para la suma de números de  $N$  dígitos. Esta tabla tiene en cuenta las operaciones necesarias para que los sumadores de [6] y [22] puedan realizar la conversión a complemento a dos. Los resultados en la Tabla 2 muestran que nuestro conversor propuesto mejora en términos de coste cuántico respecto al uso de los otros sumadores. A pesar de esta mejora, si comparamos nuestra propuesta con el conversor en [3] (uno de los conversores dedicados más eficientes), este último es más competitivo en términos de coste cuántico, aunque está limitado al caso  $N = 4$ .

La tabla 3 muestra una comparación en términos de delay, el número de entradas y salidas basura de algunos de los circuitos sumadores más relevantes en la literatura. El conversor propuesto en [3] no se ha considerado ya que su delay no es competitivo ( $O(N)$ ). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que [3] es el mejor en términos de costo cuántico, como se describe en la Sección 3. En la Tabla 3, la profundidad lógica de los circuitos incluye los cambios necesarios para permitirles realizar la conversión a complemento de dos. Estos cambios implican negar  $A$  al principio y restaurarlo al final para evitar salidas basura. La tabla 3 muestra que nuestro conversor optimiza el número de entradas del circuito y el delay. Por lo tanto, nuestra propuesta mejora tanto a los conversores dedicados, como [3], como a los sumadores cuánticos, como [6, 22], en términos de delay.

## 5 Conclusiones

Se ha presentado un circuito reversible que es capaz de calcular la conversión de números con signo a complemento a dos. Los resultados obtenidos han demostrado que el circuito propuesto mejora la velocidad de respuesta con respecto a los conversores y sumadores cuánticos actuales. Una ventaja adicional del circuito propuesto es que no contiene ninguna salida basura, por lo que puede entrelazarse con cualquier otro circuito reversible que necesite operar con complemento a dos.

## References

1. Baugh, C.R., Wooley, B.A.: A two's complement parallel array multiplication algorithm. *IEEE Transactions on Computers* **100**(12), 1045–1047 (1973)
2. Chaudhuri, A., Sultana, M., Sengupta, D., Chaudhuri, A.: A novel reversible two's complement gate (tcg) and its quantum mapping. In: *Devices for Integrated Circuit (DevIC)*, 2017. pp. 252–256. *IEEE* (2017)
3. Chaudhuri, A., Sultana, M., Sengupta, D., Chaudhuri, C., Chaudhuri, A.: A reversible approach to twos complement addition using a novel reversible tcg gate and its 4 dot 2 electron QCA architecture. *Microsystem Technologies* pp. 1–11 (2018)
4. Cho, H., Swartzlander Jr, E.E.: Adder and multiplier design in Quantum-dot Cellular Automata. *IEEE Transactions on Computers* **58**(6), 721–727 (2009)
5. Cuccaro, S.A., Draper, T.G., Kutin, S.A., Moulton, D.P.: A new quantum ripple-carry addition circuit. *arXiv preprint quant-ph/0410184* (2004)

## Un circuito cuántico optimizado para convertir de formato signo-magnitud a complemento a dos

6. Draper, T.G., Kutin, S.A., Rains, E.M., Svore, K.M.: A logarithmic-depth quantum carry look-ahead adder. arXiv preprint quant-ph/0406142 (2004)
7. Haghparast, M., Jassbi, S.J., Navi, K., Hashemipour, O.: Design of a novel reversible multiplier circuit using hng gate in nanotechnology. In: World Appl. Sci. J. Citeseer (2008)
8. Hung, W.N., Song, X., Yang, G., Yang, J., Perkowski, M.: Optimal synthesis of multiple output boolean functions using a set of quantum gates by symbolic reachability analysis. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems **25**(9), 1652–1663 (2006)
9. Khosropour, A., Aghababa, H., Forouzandeh, B.: Quantum division circuit based on restoring division algorithm. In: 2011 Eighth International Conference on Information Technology: New Generations. pp. 1037–1040. IEEE (2011)
10. Koren, I.: Computer arithmetic algorithms. AK Peters/CRC Press (2001)
11. Markov, I.L., Saeedi, M.: Constant-optimized quantum circuits for modular multiplication and exponentiation. arXiv preprint arXiv:1202.6614 (2012)
12. Miller, D.M., Wille, R., Sasanian, Z.: Elementary quantum gate realizations for multiple-control toffoli gates. In: Multiple-Valued Logic (ISMVL), 2011 41st IEEE International Symposium on. pp. 288–293. IEEE (2011)
13. Mohammadi, M., Eshghi, M.: On figures of merit in reversible and quantum logic designs. Quantum Information Processing **8**(4), 297–318 (2009)
14. Murali, K., Sinha, N., Mahesh, T., Levitt, M.H., Ramanathan, K., Kumar, A.: Quantum-information processing by nuclear magnetic resonance: Experimental implementation of half-adder and subtractor operations using an oriented spin-7/2 system. Physical Review A **66**(2), 022313 (2002)
15. Nielsen, M.A., Chuang, I.L.: Quantum computation and quantum information 10th edition (2017)
16. Orts, F., Ortega, G., Garzón, E.: A quantum circuit for solving divisions using Grover's search algorithm. In: Proc. 18th Int. Conf. Comput. Math. Method. Sci. Eng (2018)
17. Shukla, V., Singh, O., Mishra, G., Tiwari, R.: Design of a 4-bit 2s complement reversible circuit for arithmetic logic unit applications. In: The International Conference on Communication, Computing and Information Technology (ICCCMIT), Special Issue of International Journal of Computer Applications. pp. 1–5 (2012)
18. Takahashi, Y., Kunihiro, N.: A linear-size quantum circuit for addition with no ancillary qubits. Quantum Information & Computation **5**(6), 440–448 (2005)
19. Takahashi, Y., Kunihiro, N.: A fast quantum circuit for addition with few qubits. Quantum Information & Computation **8**(6), 636–649 (2008)
20. Takahashi, Y., Tani, S., Kunihiro, N.: Quantum addition circuits and unbounded fan-out. arXiv preprint arXiv:0910.2530 (2009)
21. Thapliyal, H.: Mapping of subtractor and adder-subtractor circuits on reversible quantum gates. In: Transactions on Computational Science XXVII, pp. 10–34. Springer (2016)
22. Thapliyal, H., Jayashree, H., Nagamani, A., Arabnia, H.R.: Progress in reversible processor design: a novel methodology for reversible carry look-ahead adder. In: Transactions on Computational Science XVII, pp. 73–97. Springer (2013)
23. Toffoli, T.: Reversible computing. In: International Colloquium on Automata, Languages, and Programming. pp. 632–644. Springer (1980)
24. Williams, C.P.: Explorations in quantum computing. Springer Science & Business Media (2010)

# Optimización de la similitud de forma y del potencial electrostático utilizando un algoritmo multi-objetivo\*

Savíns Puertas Martín<sup>[0000–0001–8956–1733]</sup>

Universidad de Almería, Calle Universidad de Almería, s/n  
04120 La Cañada, Almería, España  
savinspm@ual.es  
<https://hpca.ual.es/es/>

**Resumen** El Cribado Virtual (CV) es una técnica computacional que consiste en encontrar el compuesto más parecido a un blanco farmacológico en bases de datos que pueden contener hasta millones de compuestos químicos. Son varias las características o descriptores que se pueden considerar para ello. Algunos de ellos son la similitud de forma, la similitud de potencial electrostático o las propiedades del campo atómico. La mayoría de las técnicas de CV descritas en la literatura consideran un único descriptor para determinar la similitud entre compuestos. Sin embargo, analizar o encontrar compuestos que sean similares en más de un descriptor de manera simultánea tiene un gran interés químico. En consecuencia, en este trabajo se propone un algoritmo multi-objetivo que optimiza simultáneamente dos descriptores de forma conjunta, la similitud de la forma y del potencial electrostático. Utilizando estas dos funciones objetivo, el algoritmo obtiene un frente de Pareto óptimo que permite al ojo experto seleccionar los compuestos más adecuados según las propiedades del compuesto de referencia y sus intereses. El algoritmo propuesto se ha comparado con otros algoritmos de la literatura utilizando bases de datos conocidas. Los resultados obtenidos son prometedores pues se han encontrado compuestos de interés que no hubieran podido ser obtenidos utilizando las técnicas tradicionales.

---

\* Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España (RTI2018-095993-B-100, CTQ2017-87974-R), la Junta de Andalucía (P12-TIC301, UAL18-TIC-A020-B), la Fundación Séneca-Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia bajo los proyectos 20988/PI/18 y 20817/PI/18. Esta investigación ha sido parcialmente soportada por la infraestructura de supercomputación del NLHPC (ECM-02). Los autores también agradecen los recursos informáticos y el soporte técnico proporcionado por la Plataforma Andaluza de Bioinformática de la Universidad de Málaga. Este trabajo ha sido parcialmente apoyado por las instalaciones informáticas del Centro Extremeño de Tecnologías Avanzadas (CETA-CIEMAT), fundado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Savíns Puertas Martín es un beneficiario del programa español “Formación de profesorado universitario”, financiado por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España. El autor también agradece a Pilar Martínez Ortigosa, Juana López Redondo y Horacio Pérez Sánchez todo el trabajo y apoyo que está recibiendo y que de otra forma este trabajo no sería posible.

Optimización de la similitud de forma y del potencial electrostático utilizando un algoritmo multi-objetivo

**Keywords:** Optimización multiobjetivo · Descubrimiento de fármacos  
· Similitud de forma · Similitud electrostática · Algoritmo evolutivo

## 1. Introducción

Los avances en la química están produciendo un incremento de la información, que directa o indirectamente, engrosa la base de datos de compuestos moleculares. Así pues, dado un compuesto de referencia, identificar aquellos más similares a éste se torna cada vez más difícil. Para dar solución a dicho problema, son varias las herramientas y técnicas que se han ido proponiendo en las últimas décadas. Una de las más utilizadas es el Cribado Virtual (CV). El objetivo de dicha técnica es predecir, de una base de datos, que compuestos son los más similares dado un blanco farmacológico con la intención de encontrar compuestos con los mismos beneficios que el de referencia pero evitando los efectos negativos o desventajas asociados a éste. Dependiendo de la información que se disponga de los compuestos, se pueden llegar a aplicar dos tipos de cribados, Cribado Virtual Basado en Ligandos (CVBL) y Cribado Virtual Basado en Estructuras (CVBE).

Los métodos CVBE requieren de información detallada del compuesto referencia, la cual no siempre se dispone de ella. Por su parte, las técnicas CVBL solo necesitan información de los componentes activos e inactivos. Esta información recibe el nombre de características o descriptores. Existe más de 3000 descriptores (10) que pueden ser utilizados para comparar pares de compuestos. Algunos de ellos son la similitud de forma, la similitud electrostática, las propiedades del campo atómico, el potencial aromático o el potencial de desolvatación.

La idea fundamental en la que se basa el CV consiste en comparar propiedades de compuestos para preseleccionarlos para etapas posteriores in-vitro como puede ser la técnica HTS (11). En el mejor escenario, un blanco farmacológico es comparado frente miles de compuestos en una base de datos, evaluando una o más de sus descriptores. El cálculo de algunos de estos descriptores dependen de la posición que ocupen los compuestos en el espacio tridimensional. Por tanto, puede decirse que las técnicas de CV deben encontrar la alineación óptima que obtenga el mayor valor de similitud para cada descriptor. Esto supone un esfuerzo adicional a la hora de diseñar los algoritmos para que las traslaciones y rotaciones se realicen utilizando la menor cantidad de tiempo y recursos posibles.

A pesar de la gran cantidad de descriptores que existen, la mayoría de métodos que se encuentran en la literatura los analizan de manera individual (2; 8), lo cual tiene un impacto negativo en el proceso de selección pues modela el comportamiento de los compuestos de la forma más básica posible. Son varios los estudios que han mostrado que considerar diferentes descriptores simultáneamente mejora el proceso de selección. Por tanto, las soluciones multi-objetivo, como la que se propone en este trabajo, son de gran interés para este campo.

En este trabajo se ha diseñado un algoritmo evolutivo bi-objetivo donde se optimizan simultáneamente la similitud de forma molecular y la similitud electrostática. Nuestro principal objetivo es obtener un conjunto de soluciones que se

Optimización de la similitud de forma y del potencial electrostático utilizando un algoritmo multi-objetivo

aproximen al frente de Pareto completo. Este conjunto de soluciones son analizadas posteriormente por el ojo experto que es el encargado de seleccionar aquellas más interesantes para el caso de estudio. El enfoque que se le ha dado a nuestro algoritmo adopta las ideas de diferentes algoritmos evolutivos de optimización multi-objetivo e incorpora nuevas características intrínsecas del propio problema a resolver.

## 2. Problema de optimización a solucionar

En este trabajo, un nuevo algoritmo multi-objetivo ha sido desarrollado para optimizar la similitud de forma y potencial simultáneamente.

Para el cálculo de la similitud de forma se utiliza un modelo basado en gaussianas (6; 5; 13). Así pues, cada átomo es representado matemáticamente como una función gaussiana lo cual permite aprovechar las ventajas de ésta. La ecuación que permite el cálculo del solapamiento de dos compuestos es la siguiente:

$$V_{AB}^g = \sum_{i \in A, j \in B} w_i w_j v_{ij}^g \quad (1)$$

donde  $w_i$  y  $w_j$  son pesos asociados a los átomos  $i$  y  $j$  respectivamente, y  $v_{ij}^g$  es un producto de funciones gaussianas que representa el solapamiento de los átomos de dos diferentes moléculas y se calcula de la siguiente forma:

$$v_{ij}^g = \int g_i(r) g_j(r) d\mathbf{r} = \int p e^{-\left(\frac{3p\pi^{1/2}}{4\sigma_i^3}\right)^{2/3}(\mathbf{r}-\mathbf{r}_i)^2} p e^{-\left(\frac{3p\pi^{1/2}}{4\sigma_j^3}\right)^{2/3}(\mathbf{r}-\mathbf{r}_j)^2} d\mathbf{r} \quad (2)$$

donde  $p$  es un parámetro que controla la suavidad de las esferas gaussianas, es decir, el ancho de la función gaussiana original y  $\sigma$  es el radio del átomo, que toma su valor del radio de van der Waals(1).

Por otra parte, para el cálculo del potencial electrostático se ha utilizado el Toolkit Zap de OpenEye (2; 9). Este Toolkit calcula el potencial electrostático de un compuesto solucionando numéricamente la ecuación de Poisson(3). A modo de resumen, la ecuación que devuelve la similitud del potencial electrostático es la siguiente:

$$E_{AB} = \int \phi^A(r) \phi^B(r) \Theta^A(r) \Theta^B(r) d\mathbf{r} \approx h^3 \sum_{ijk} \phi_{ijk}^A \phi_{ijk}^B \Theta_{ijk}^A \Theta_{ijk}^B \quad (3)$$

Para las ecuaciones 1 y 3 hay que tener en cuenta que el valor obtenido depende del número de átomos de las moléculas que se comparan, es decir, cuanto más alto es el número de átomos, mayor puede ser el valor de similitud. De hecho, éste valor está comprendido en el intervalo  $[0, +\infty)$ . Como se habrá podido deducir, los resultados de estas ecuaciones no permiten seleccionar que compuesto es el más parecido. Para normalizar estos valores se utiliza el valor de similitud de Tanimoto (7) que se calcula de la siguiente forma:

Optimización de la similitud de forma y del potencial electrostático utilizando un algoritmo multi-objetivo

$$Tc = \frac{Valor_{AB}}{Valor_{AA} + Valor_{BB} - Valor_{AB}} \quad (4)$$

donde *Valor* representa el valor obtenido desde la evaluación del par de compuestos *AA*, *AB* o *BB* con las funciones objetivo 1 o 3.

### 3. El algoritmo evolutivo multi-objetivo

En trabajos anteriores, se han desarrollado algoritmos evolutivos mono-objetivo para dar soluciones a este tipo de problemas en los que se han diseñado varias técnicas para reducir el tiempo de ejecución manteniendo la buena calidad de las soluciones. Algunas de estas mejoras son la creación específica de las soluciones iniciales, límites de espacio de búsqueda personalizados para cada par de compuestos moleculares y técnicas de enfriamiento simulado para reducir el espacio de búsqueda de las soluciones en cada iteración del algoritmo. Este conocimiento, combinado con técnicas de algoritmos multi-objetivo como el establecimiento de rangos del frente de Pareto, la determinación de soluciones no dominadas y el uso de métricas de distancia para obtener la estimación de la densidad de la solución durante la ejecución del algoritmo han permitido evaluar varias funciones objetivo simultáneamente. En el Algoritmo 1 se muestra la estructura del algoritmo implementado.

**Data:** Dos compuestos moleculares y un archivo de configuración

Definir\_configuracion\_especifica;

Inicializar\_lista\_soluciones;

**while** *Criterio de terminacion no satisfecho* **do**

    Crear\_nueva\_ssolucion(*evaluacioness*);

**if** *length(lista\_poblacion) > Lista\_max* **then**

        | Seleccionar\_solucion(*lista\_poblacion*);

    Mejorar\_solucion(*lista\_poblacion*);

    Actualizar\_lista\_externa;

**if** *length(lista\_externa) > Lista\_max* **then**

        | Seleccionar\_solucion(*lista\_externa*);

    Mejorar\_solucion(*lista\_externa*);

**if** *length(lista\_externa) < Lista\_max* **then**

    | Componer\_pareto;

**Algoritmo 1:** Multi-objective algorithm.

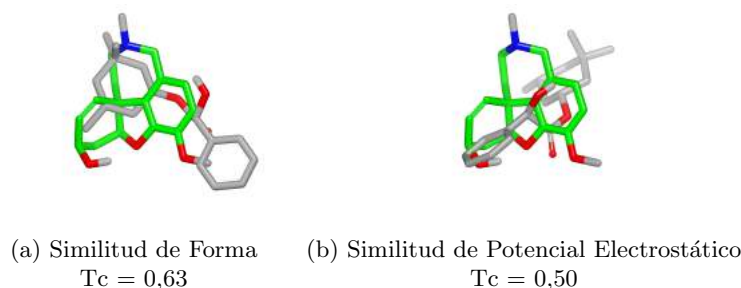
### 4. Resultados

La base de datos utilizada para los experimentos computacionales pertenece al DrugBank (12). El equipo en el que se han realizado los experimentos es un Bullion S8, específicamente 8x Intel Xeon E7 8860v3 (16 núcleos cada uno), 2.3 TB de memoria y 2x300 GB de almacenamiento usando el sistema SAS.

Una práctica extendida en el CVBL cuando se utiliza la similitud de forma y la electrostática es la de optimizar un descriptor y luego evaluar el otro. Este

Optimización de la similitud de forma y del potencial electrostático utilizando un algoritmo multi-objetivo

enfoque a veces puede tener errores al no considerar la información de ambos descriptores simultáneamente. Un ejemplo de este problema se muestra en la Figura 1 donde se comparan dos compuestos, el compuesto de referencia DB00674 en verde y el compuesto DB04838, en gris. En la Figura 1-a se ha optimizado la similitud de forma mientras que en la Figura 1-b estaba la similitud de potencial electrostático. Se puede observar que las soluciones obtenidas son diferentes entre sí tanto en la posición como en el valor de la función objetivo.



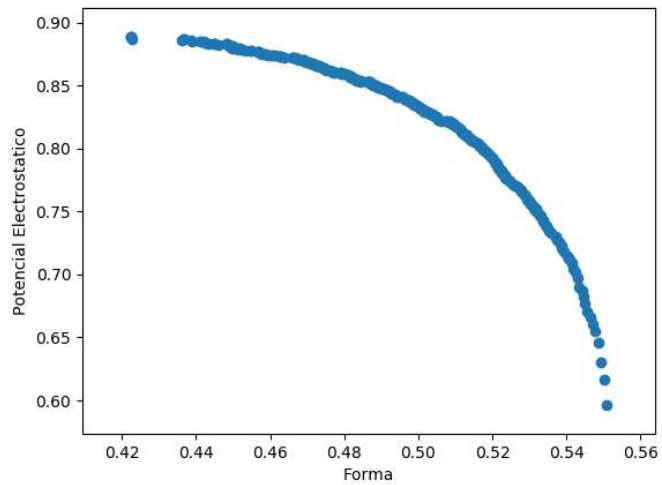
**Figura 1:** Poses finales tras optimizar los compuestos DB00674 (compuesto de referencia, en verde) y DB04838 (en gris) en base a la similitud de forma y potencial electrostático respectivamente.

Por otro lado, la Figura 2 muestra una solución obtenida por nuestro algoritmo multi-objetivo que evalúa los compuestos DB09237 y DB01619. Muestra cómo se distribuyen las diferentes soluciones en función del peso dado a las funciones. Este resultado apoya una de las principales motivaciones de este trabajo, que no es otra que la importancia de considerar diferentes características de los compuestos simultáneamente ya que, dependiendo de la aplicación final, algunas pueden ser más interesantes que otras.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un algoritmo evolutivo bi-objetivo. Se ha diseñado específicamente para resolver un problema CVBL donde se seleccionan los compuestos en base a su similitud de forma y del potencial electrostático. Además, el algoritmo ha sido implementado pensando en el rendimiento de los cálculos necesarios para las rotaciones y traslaciones de los compuestos así como también se han incluido ciertas restricciones propias del problema. La calidad de este nuevo método ha sido probada mediante un estudio computacional exhaustivo utilizando bases de datos específicas para este tipo de problemas, y según los resultados obtenidos, el rendimiento del nuevo algoritmo es prometedor en el sentido de que permite encontrar compuestos que hasta ahora no se habrían obtenido por los métodos tradicionales.

Optimización de la similitud de forma y del potencial electrostático utilizando un algoritmo multi-objetivo



**Figura 2:** El frente de Pareto de evaluar los compuestos DB09237 y DB01619.



## Bibliografía

- [1] Bondi, A.: van der Waals Volumes and Radii. *The Journal of Physical Chemistry* **68**(3), 441–451 (1964)
- [2] Boström, J., Grant, J.A., Fjellström, O., Thelin, A., Gustafsson, D.: Potent Fibrinolysis Inhibitor Discovered by Shape and Electrostatic Complementarity to the Drug Tranexamic Acid. *Journal of Medicinal Chemistry* **56**(8), 3273–3280 (2013)
- [3] Böttcher, C.: *Theory of Electric Polarization: Dielectrics in Static Fields*. Elsevier **1** (1973)
- [4] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* **6**(2), 182–197 (2002)
- [5] Grant, J.A., Gallardo, M.A., Pickup, B.T.: A fast method of molecular shape comparison: A simple application of a Gaussian description of molecular shape. *Journal of Computational Chemistry* **17**(14), 1653–1666 (1996)
- [6] Grant, J.A., Pickup, B.T.: A Gaussian Description of Molecular Shape. *The Journal of Physical Chemistry* **99**(11), 3503–3510 (1995)
- [7] Jaccard, P.: Distribution de la flore alpine dans le bassin des Dranses et dans quelques régions voisines. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* **37**, 241–272 (1901)
- [8] Nicolaou, C.A., Brown, N.: Multi-objective optimization methods in drug design. *Drug Discovery Today: Technologies* **10**(3), 427–435 (2013)
- [9] Software, O.S.: *OEChem Toolkit* (2018)
- [10] Todeschini, R., Consonni, V.: *Handbook of molecular descriptors*, vol. 11. John Wiley & Sons (2008)
- [11] White, R.E.: High-throughput screening in drug metabolism and pharmacokinetic support of drug discovery. *Annual review of pharmacology and toxicology* **40**(1), 133–157 (2000)
- [12] Wishart, D.S., Knox, C., Guo, A.C., Shrivastava, S., Hassanali, M., Stothard, P., Chang, Z., Woolsey, J.: Drugbank: a comprehensive resource for in silico drug discovery and exploration. *Nucleic Acids Research* **34**(suppl.1), D668–D672 (2006)
- [13] Yan, X., Li, J., Liu, Z., Zheng, M., Ge, H., Xu, J.: Enhancing Molecular Shape Comparison by Weighted Gaussian Functions. *Journal of Chemical Information and Modeling* **53**(8), 1967–1978 (2013)
- [14] Zitzler, E., Laumanns, M., Thiele, L.: SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization. In: *Evolutionary Methods for Design Optimization and Control with Applications to Industrial Problems*. pp. 95–100. International Center for Numerical Methods in Engineering (2001)

# Aportaciones al control y gestión de sistemas de producción distribuidos: estado actual de la cuestión y desarrollo de una librería para simulaciones

Jerónimo Ramos Teodoro

Centro mixto CIESOL, Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario (ceiA3),  
Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, Almería 04120, España  
{jeronimo.rt}@ual.es

**Resumen** En los últimos años, el cambio climático y la preocupación por el futuro agotamiento de los combustibles fósiles han favorecido la aparición de políticas que tratan de fomentar el aprovechamiento eficiente de los recursos a escala local junto con el uso de energías renovables. Ante este panorama, la producción distribuida se postula como una alternativa a los sistemas de generación energética tradicionales que requiere del desarrollo de estrategias de gestión y coordinación apropiadas. Este documento recoge las aportaciones realizadas en dicho ámbito hasta febrero de 2020, durante la realización de la tesis doctoral de su autor. Se trata de una librería que permite la definición de problemas de reparto económico, basándose en el modelo de uso más extendido en publicaciones sobre centros de energía, y de una revisión bibliográfica de los enfoques, técnicas de optimización y criterios habitualmente tratados en sistemas de producción distribuidos.

## 1. Introducción

Las políticas energéticas que tratan de fomentar el uso eficiente de la energía limpia han despertado un gran interés en la comunidad científica, como lo refleja el creciente número de publicaciones relacionadas con la gestión de la energía que buscan aumentar la eficiencia en los procesos de producción, transporte, consumo y almacenamiento. Esto es posible, por ejemplo, reduciendo el número de conversiones desde las fuentes primarias a puntos de consumo, evaluando alternativas sostenibles bajas en carbono, o proporcionando flexibilidad y estabilidad a los sistemas de suministro. Para lograr estos objetivos, se han propuesto enfoques basados en la descentralización y distribución de los procesos mencionados anteriormente, incluido el uso de fuentes de energía renovables [1] y la combinación de diferentes portadores de energía para aprovechar sinérgicamente los recursos e infraestructuras disponibles a nivel local [2].

De hecho, el término inteligente en *smart grid* alude al uso de las tecnologías de la información y la comunicación, así como al control de procesos y a la automatización en la toma de decisiones, para operar de manera óptima

las redes de distribución de electricidad. Aunque el uso de estas técnicas no es exclusivo del sector eléctrico, su uso a gran escala entre diferentes productores aún es incipiente. Según el análisis realizado hasta la fecha, las publicaciones que llenan los vacíos en este campo han introducido una variedad de conceptos diferentes (por ejemplo, microrredes, plantas de energía virtuales, centros de energía o sistemas multi-energía) para referirse a los sistemas de producción distribuidos. Esos artículos comparten factores como objetivos, técnicas, metodologías y herramientas. Así pues, los enfoques recientes relativos a la gestión eficiente de recursos se basan en el uso de fuentes renovables y sistemas descentralizados, frente a la producción convencional centralizada. En el ámbito energético, términos como el de *energy hubs* [3], denominados también concentradores o centros de energía, tratan de integrar en un solo modelo, las interacciones que se producen entre los elementos que componen entidades productivas de diferente escala (planta, distrito, región, etc.) y combinando diferentes tipos de recursos en lo que se denominan sistemas multi-energía [4]. Este es el ámbito en el que se desarrollan los proyectos ENERPRO [5] y CHROMAE [6], dentro de los cuales se lleva a cabo el trabajo de tesis del que deriva este documento, bajo la concesión de una beca FPI.

### 1.1. Objetivos de la tesis

En los proyectos mencionados anteriormente se abarca el análisis, diseño y aplicación de técnicas de modelado, predicción, estimación, control y optimización para conseguir una gestión óptima de energía y recursos en entornos productivos que hacen uso de fuentes renovables y de sistemas de almacenamiento, especialmente distritos agroindustriales.

El principal objetivo que persigue esta tesis doctoral es el diseño de técnicas de gestión óptima de recursos en estos entornos, para lo cual se requieren modelos estáticos y dinámicos con distintos niveles de abstracción y la implementación de técnicas de control y optimización (incluyendo el control predictivo basado en modelo) para conseguir adecuar la producción a la demanda. Por tanto, se determinan los siguientes objetivos particulares:

1. Desarrollo de modelos físicos de sistemas generadores, consumidores y almacenadores de recursos con una filosofía modular y distintos niveles de abstracción que permitan la simulación dinámica a corto, medio y largo plazo a nivel de sistema y su uso en la optimización. Se hará especial énfasis en paradigmas de modelado tipo energy hub.
2. Caracterización de la generación, la demanda y las perturbaciones. Diseño de predictores y estimadores.
3. Validación experimental de los modelos desarrollados en condiciones estacionarias y dinámicas.
4. Aplicación de los modelos diseñados en el desarrollo de estrategias de optimización y coordinación de la producción desde los puntos de vista energético, económico y de seguridad.

Aportaciones al control y gestión de sistemas de producción distribuidos:...

5. Desarrollo de estudios de análisis de sensibilidad e incertidumbre usando indicadores basados en la energía y en aspectos económicos en la instalación productiva de referencia. Desarrollo de estrategias de control robustos.
6. Aplicación a las instalaciones de ambos proyectos.

## 1.2. Breve descripción de la planta de ensayos

A modo de planta de pruebas en el proyecto ENERPRO se disponía de un sistema formado por el Centro de Investigación en Energía Solar (CIESOL), un invernadero, un parking fotovoltaico y una desaladora solar que demandan y producen diferentes recursos. Aunque se trata de un conjunto autosostenible, cuenta con suministro hídrico y eléctrico desde la red para ejercer de apoyo. Siguiendo una filosofía similar, en el proyecto CHROMAE se han añadido elementos a la planta anterior para conformar un entorno demostrativo propio de los distritos agroindustriales (figura 1). Para ello se han incluido agentes económicos como explotaciones agrícolas industriales, empresas de transformación y de suministro de insumos. Todos los elementos tienen objetivos y necesidades en ocasiones contrapuestas por lo que requieren de estrategias de coordinación y gestión apropiadas.

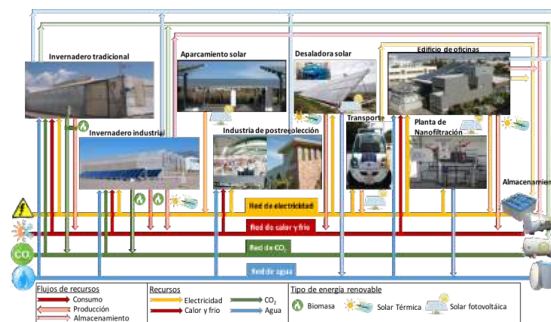


Figura 1: Enfoque y diagrama funcional de la planta de pruebas del proyecto CHROMAE

En los siguientes párrafos se detallan los elementos de interés para el propósito de este trabajo, partiendo de la recopilación realizada en trabajos previos:

- Instalaciones de producción de la Fundación Cajamar. Situadas en la Estación Experimental “Las Palmerillas” en El Ejido (Almería). Se compone de un invernadero tipo parral con calefacción híbrida, mediante propano y una caldera de biomasa con sistema de captura de CO<sub>2</sub>.
- Instalaciones de producción del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA). Situadas en el Centro La Mojonera (Almería) y compuestas por un invernadero industrial y calefacción híbrida, mediante

Aportaciones al control y gestión de sistemas de producción distribuidos:...

un campo solar de captadores planos y una caldera de biomasa con sistema de captura de CO<sub>2</sub>

- Industria de post-recolección y comercialización Hortofrutícola Mabe S.A.T. Ubicada en el término municipal de El Ejido (Almería), dispone de unas instalaciones para el lavado y calibrado de productos hortícolas procedentes de la producción bajo invernadero.
- Edificio de trabajo CIESOL. Se trata de un edificio bioclimático, ubicado en el campus de la Universidad de Almería que dispone de un sistema de refrigeración y calefacción solar apoyado por fuentes convencionales y una instalación fotovoltaica.
- Vehículo eléctrico eCARM. En el campus de la Universidad de Almería se dispone, para tareas de investigación, de un vehículo eléctrico autónomo.
- Aparcamiento solar de la Universidad de Almería. Se trata del aparcamiento del campus, en cuyas marquesinas se ha realizado una instalación fotovoltaica distribuida en trece inversores.
- Planta de desalación solar. Se encuentra ubicada en la Plataforma Solar de Almería, en el término municipal de Tabernas. Es una plataforma de ensayos para módulos de destilación por membranas, compuesta por un campo solar de captadores planos y almacenamiento térmico.
- Planta de nanofiltración. Ubicada en la Plataforma Solar de Almería, consiste en un sistema de tres membranas cuyo objetivo es el tratamiento de agua residual para su posterior uso como agua de riego e industrial.

## 2. Avances y desarrollo de la tesis

El desarrollo de la tesis ha dado lugar a la cotutela de dos Trabajos Fin de Grado [7,8] y a diferentes publicaciones [9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19], a fecha de febrero de 2020. A lo largo del año 2019 pueden destacarse las siguientes contribuciones.

1. Por un lado, el modelado de los sistemas productivos anteriormente mencionados no es trivial, incluso cuando se emplean modelos simplificados en estado estacionario que se obtienen a partir de balances de energía y materia. Por tanto, herramientas para la gestión de *energy hubs*, como la que se ha desarrollado durante 2019 [8,19], son de utilidad para determinar los períodos de funcionamiento de los equipos que componen una planta productiva, basándose en las necesidades previsibles de la misma y bajo la premisa de operar con el mínimo coste económico.
2. Por otro lado, durante este año se ha recopilado información de publicaciones específicas sobre sistemas de producción, y de revisiones realizadas por otros autores, con el fin de presentar un estudio comparativo actualizado centrado pero no limitado a los siguientes enfoques: microrredes, plantas de energía virtuales, centros de energía o sistemas multi-energías. En particular, el objetivo es proporcionar una visión global en términos de terminología empleada, contexto, propósito de investigación, modelos matemáticos, estrategias de optimización y herramientas (software y programación); así como

## Aportaciones al control y gestión de sistemas de producción distribuidos:...

una serie de artículos clasificados desde esa perspectiva, cuyo análisis ayude a identificar fortalezas y debilidades junto con desafíos futuros en el ámbito de los sistemas de producción distribuidos. En relación con esto, se ha enviado un trabajo a la revista *Renewable & Sustainable Energy Reviews* que actualmente se encuentra en revisión.

3. A partir del modelo elaborado en los cursos previos, se han llevado a cabo análisis en diferentes escenarios de reparto económico. Ello incluye su aplicación en el ámbito agrario para la gestión aislada de CO<sub>2</sub> [16] y en combinación con otros recursos [17], así como el reparto de recursos en edificios comerciales [18]. También se ha ampliado la formulación del problema para considerar la coordinación de diferentes centros de energía sobre los que podrían aplicarse estrategias de reparto cooperativas [15].

### 2.1. Sistemas de producción distribuidos: líneas de investigación potenciales

A medida que se siguen desarrollando nuevas técnicas de diseño, programación, control y modelado en los sistemas de producción, se hace evidente que sin una visión integral de los términos y problemas involucrados, como los ofrecidos en la misma, identificar nuevas oportunidades de investigación puede ser realmente complicado. Así pues, en la revisión realizada, cada publicación ha sido analizada para identificar las siguientes características: terminología empleada, contexto, propósito de investigación, modelos matemáticos, estrategias de optimización y herramientas. Las ideas más relevantes que se pueden extraer de esta se analizan en las siguientes líneas.

Actualmente, la mayoría de los trabajos se centran en cuestiones puramente energéticas con incentivos económicos, con el objetivo de alcanzar servicios de producción y transporte limpios, eficientes y sostenibles para los cuales se deben incorporar fuentes de energía renovable. Sin embargo, sus contribuciones son de interés cuando se trata de la gestión de recursos heterogéneos (que pueden ser tanto materiales como energéticos), ya que metodologías similares son aplicables, por ejemplo, en el agua potable o en las redes de CO<sub>2</sub>. Sobre la integración de estos no hay muchas publicaciones y, por lo tanto, es un tema interesante para los investigadores, que podría constituir la evolución futura del término sistema multi-energía a sistema multi-recursos.

Además, aunque en el campo de las microrredes hay ejemplos de plantas experimentales donde se realizan pruebas reales, muchos estudios emplean sistemas simulados. Esto se debe a razones prácticas, ya que la mayoría de las investigaciones se realizan en el ámbito universitario y los sistemas técnicamente más complejos pueden pertenecer a agentes o propietarios diferentes, lo que a menudo hace que la experimentación sea inviable o demasiado costosa. Algo similar ocurre con la consideración de la incertidumbre en los modelos, que bien agrega complejidad al problema y puede ignorarse en aplicaciones no críticas, o bien las herramientas para tratarla no están suficientemente desarrolladas. Para resolver este problema, el control predictivo basado en modelo se presenta a

Aportaciones al control y gestión de sistemas de producción distribuidos:...

veces como un enfoque determinista que permite, en cierta medida, lidiar con la incertidumbre.

## 2.2. La herramienta ODEHubs

La herramienta ODEHubs se ha desarrollado en el proyecto CHROMAE para facilitar la formulación de problemas de reparto de recursos en sistemas multi-energía. Esta incluye una librería en MATLAB® y Simulink® con bloques para representar sistemas de almacenamiento, instalaciones fotovoltaicas y de colectores solares, calderas de combustión y bombas de calor, entre otros (figura 2). Para operar con ella es necesario conocer las características técnicas de los equipos que componen la planta, la demanda horaria de los recursos de salida y el precio de los recursos de entrada, puesto que constituyen los parámetros de entrada de la herramienta [8]. Para demostrar el funcionamiento y la utilidad de la herramienta desarrollada, se mostrarán dos casos de ejemplo diferentes a partir del análisis de los componentes del distrito realizado con anterioridad [15].

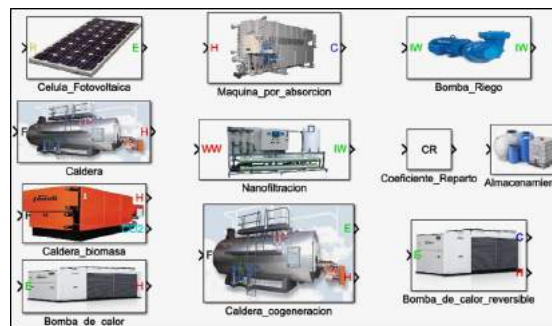


Figura 2: Biblioteca de componentes desarrollada para el proyecto CHROMAE en el entorno de Simulink®

Los bloques disponen de una máscara parametrizable a través de la cual se definen los valores que toman los elementos de los vectores anteriormente definidos. Por ejemplo, en el caso de los sistemas de almacenamiento (figura 3a), se requieren introducir los límites de carga/descarga, así como su capacidad, y los coeficientes de eficiencia que componen las matrices de acoplamiento. De forma análoga (figura 3b), en los dispositivos de conversión se definiría el coeficiente de eficiencia que formaría parte de las matrices de acoplamiento y los límites de funcionamiento del equipo. A parte de cumplimentar los parámetros de cada máscara, es necesario definir el diagrama a partir de los bloques de la biblioteca para generar el problema de optimización tal y como se ejemplifica a continuación.

Aunque es posible el empleo de diferentes estrategias de control a partir del modelo propuesto, para simplificar, se plantea el problema de optimización con-

Aportaciones al control y gestión de sistemas de producción distribuidos:...

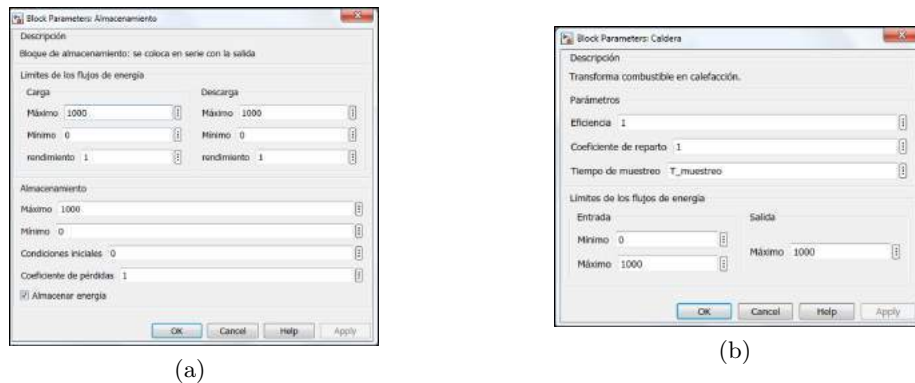


Figura 3: Máscara parametrizable de los bloques de la librería: (a) sistemas de almacenamiento, (b) dispositivos (caldera)

sistente en determinar los flujos de recursos horarios con el menor coste económico para dos sistemas diferentes durante 24 horas. Para mayor detalle en relación con el modelo y problemas planteados se remite a los lectores a los trabajos previamente [12,19].

CIESOL (figura 4a) tiene como recursos disponibles energía eléctrica procedente de la red eléctrica ( $I_1$ ), radiación solar para los módulos fotovoltaicos ( $I_2$ ) y los captadores solares ( $I_3$ ), junto a agua procedente de la red de saneamiento general ( $I_4$ ). Como demandas, electricidad ( $O_1$ ), refrigeración ( $O_2$ ), calefacción ( $O_3$ ) y agua potable ( $O_4$ ). Además, se considera almacenamiento de electricidad ( $S_1$ ), de refrigeración ( $S_2$ ), de calefacción ( $S_3$ ) y de agua potable ( $S_4$ ). Partiendo del diagrama conceptual (figura 4a), es preciso elaborar el esquema análogo en Simulink (figura 4b), empleando los bloques de la biblioteca (figura 2), para determinar el reparto de recursos (figura 6a) gracias a las funciones en MATLAB que se han desarrollado para tal efecto.

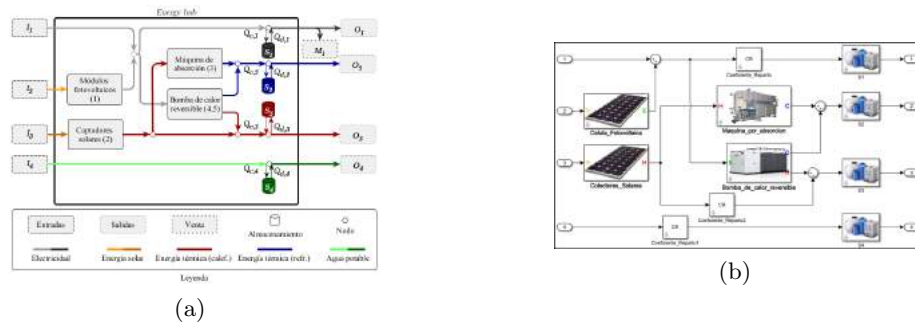


Figura 4: Diagrama conceptual de CIESOL basado en el modelo empleado (a) y diagrama en Simulink de CIESOL con los componentes de la librería (b)



Aportaciones al control y gestión de sistemas de producción distribuidos:...

El invernadero (figura 5a) tiene como recursos disponibles energía eléctrica de la red eléctrica ( $I_1$ ), propano ( $I_2$ ), biomasa ( $I_3$ ) y agua potable de la red de saneamiento ( $I_4$ ). Como demandas, energía eléctrica ( $O_1$ ), calefacción ( $O_2$ ), dióxido de carbono ( $O_3$ ), agua de riego ( $O_4$ ) y electricidad para la bomba de riego cuando está en funcionamiento ( $O_5$ ). Se considera almacenamiento de electricidad ( $S_1$ ), calefacción ( $S_2$ ), dióxido de carbono ( $S_3$ ) y agua de riego ( $S_4$ ). Partiendo del diagrama conceptual (figura 5a), es preciso elaborar el esquema análogo en Simulink (figura 5b), empleando los bloques de la biblioteca (figura 2), para determinar el reparto de recursos (figura 6b) gracias a las funciones en MATLAB que se han desarrollado para tal efecto.

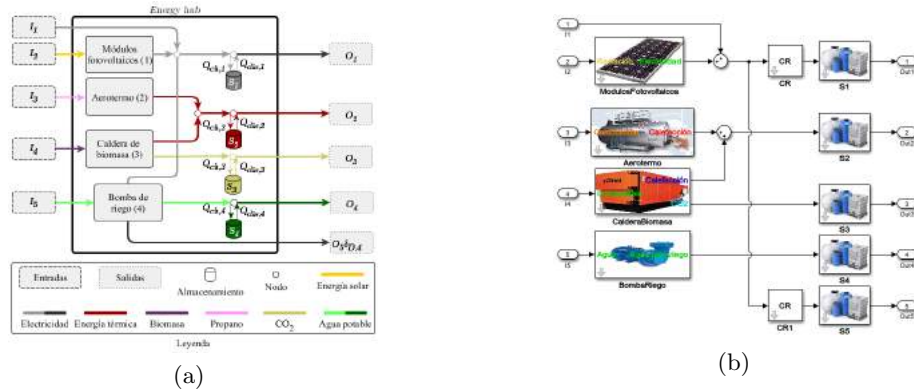


Figura 5: Diagrama conceptual del invernadero basado en el modelo empleado (a) y diagrama en Simulink del invernadero con los componentes de la librería (b)

Las figuras 6a y 6b, que recogen el reparto para los casos de ejemplo, organizan la información de la siguiente forma: en cada gráfica se incluyen los perfiles de demanda horarios para cada salida, trazados en línea gruesa, y el perfil de ventas en el mercado ( $M(k)$ ), apilado sobre el primero, en línea delgada; ambos escalados al eje izquierdo y expresados en términos de potencia o flujo. La línea discontinua, que se escala al eje derecho, representa la evolución de los sistemas de almacenamiento, correspondientes a cada salida ( $S(k)$ ), en términos de energía, masa o volumen. En cada gráfica, el límite superior del eje derecho corresponde a la capacidad máxima de almacenamiento. Las barras de colores apiladas (escaladas al eje izquierdo) indican flujos de entradas ( $I(k)$ ) que cumplen con el perfil de demanda. Por lo tanto, cuando superan los perfiles de demanda y ventas, los sistemas de almacenamiento se cargan (la línea discontinua tiene una pendiente positiva), mientras que se descargan cuando están debajo de ellos.

Aportaciones al control y gestión de sistemas de producción distribuidos:...

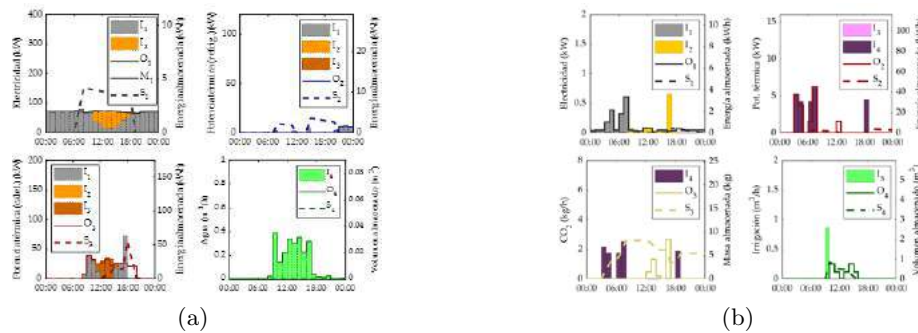


Figura 6: Reparto de recursos de entrada (barras), demanda (línea continua) y evolución del almacenamiento (línea discontinua) en CIESOL (a) y el invernadero (b)

### 3. Conclusiones

Aunque por razones de espacio únicamente se ha limitado a un caso concreto el número de pruebas realizadas, el modelo empleado en la herramienta podría hacerse funcionar con conjuntos de datos reales diferentes a los empleados y adaptarse la estructura de cualquier otro sistema multi-energía. Además, esta formulación del problema contempla la posibilidad de sustituir los submodelos de proceso empleados por otros de mayor o menor complejidad en función de la precisión requerida en los resultados y la capacidad de computación disponible.

Por otro lado, aunque el tiempo invertido para realizar el diagrama en Simulink, parametrizar los bloques y simular los resultados varía en función de la complejidad del diagrama, se consigue de una reducción significativa con respecto a la dedicación que requiere la definición de un problema de optimización mediante código, por lo que se puede concluir que ODEHubs es una alternativa a considerar para la formulación y análisis del reparto de recursos. Es pues una herramienta útil de apoyo a los proyectistas, permitiendo evaluar el impacto económico de la operación del MES durante su fase de diseño.

### Referencias

1. Ehsan, A., Yang, Q.: Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques. *Applied Energy* **210** (2018) 44–59
2. Chicco, G., Mancarella, P.: Distributed multi-generation: A comprehensive view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**(3) (2009) 535–551
3. Geidl, M., Koeppl, G., Favre-Perrod, P., Klöckl, B., Andersson, G., Fröhlich, K.: Energy hubs for the future. *IEEE Power and Energy Magazine* **5**(1) (2006) 24–30
4. Mancarella, P.: MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy* **65** (2014) 1–17

Aportaciones al control y gestión de sistemas de producción distribuidos:...

5. Grupo de Investigación Automática, Robótica y Mecatrónica (ARM-TEP197): Proyecto ENERPRO. [En línea]. Disponible en: <http://www2.ual.es/enerpro/> Accedido: 21/01/2019.
6. Grupo de Investigación Automática, Robótica y Mecatrónica (ARM-TEP197): Proyecto CHROMAE. [En línea]. Disponible en: <http://www2.ual.es/chromae/> Accedido: 21/01/2019.
7. Marchi, L.A.: Modelado de un distrito agroindustrial bajo el paradigma de los sistemas ciber-físicos. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Almería (2019)
8. Giménez-Miralles, A.: Diseño de una interfaz gráfica para el modelado y análisis de energy hubs. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Almería (2019)
9. Ramos-Teodoro, J.: Gestión energética de un sistema de producción heterogéneo bajo el paradigma energy hub. Trabajo Fin de Máster, Universidad Carlos III de Madrid (2017)
10. Ramos-Teodoro, J., Álvarez, J.D., Rodríguez, F., Berenguel, M.: Gestión económica de energy hubs con recursos heterogéneos mediante MINLP. In: IV Simposio CEA de Modelado, Simulación y Optimización. (2018)
11. Ramos-Teodoro, J., Rodríguez, F., Berenguel, M.: Modelado basado en el paradigma de los energy hubs de una explotación agraria bajo invernadero con apoyo de energías renovables. In: I Symposium Ibérico de Ingeniería Hortícola. (2018)
12. Ramos-Teodoro, J., Rodríguez, F., Berenguel, M., Torres, J.L.: Heterogeneous resource management in energy hubs with self-consumption: Contributions and application example. *Appl. Energy* **229** (Nov. 2018) 537–550
13. Ramos-Teodoro, J., Rodríguez, F., Berenguel, M.: Modelado de instalaciones fotovoltaicas para la gestión de un energy hub con recursos heterogéneos. In: XVI Simposio CEA de Ingeniería de Control. (2018)
14. Ramos-Teodoro, J., Rodríguez, F., Berenguel, M.: Estudio comparativo de gestión energética en una planta agroindustrial con autoconsumo. In: Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Agroalimentarias. (2018)
15. Ramos-Teodoro, J., Rodríguez, F., Castilla, M., Berenguel, M.: Modelado de producción, consumo y almacenamiento de recursos heterogéneos de un distrito agroindustrial con energías renovables. In: X Congreso Ibérico de Agroingeniería. (2019)
16. Rodríguez, F., Ramos-Teodoro, J., Berenguel, M., Lorenzo, P.: Gestión económica del enriquecimiento carbónico de un invernadero de tomate con diferentes fuentes de  $\text{CO}_2$ . In: *Aportando valor al  $\text{CO}_2$*  (3ª edición). (2019)
17. Giménez-Miralles, A., Ramos-Teodoro, J., Rodríguez, F., Berenguel, M.: Caso de uso de la herramienta ODEHubs para la gestión de recursos energéticos y materiales de un invernadero tradicional mediterráneo. In: II Symposium Ibérico de Ingeniería Hortícola. (2020)
18. Ramos-Teodoro, J., Castilla, M., Álvarez, J.D., Rodríguez, F., Berenguel, M.: Economic dispatch of a bioclimatic office building considering thermal energy, electricity and water demands. In: 18th International Conference on Renewable Energies and Power Quality. (2020)
19. Ramos-Teodoro, J., Giménez-Miralles, A., Rodríguez, F., Berenguel, M.: Simulación de escenarios de reparto económico en sistemas multi-energía. In: XVIII Simposio CEA de Ingeniería de Control. (2020)

# SECCIÓN II

## Otros trabajos

---

1. Darwin Alulema: "Una metodología basada en modelos y servicios para la integración de sistemas IoT".
  2. José Jorge Carreño Zágara: "Control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones para sistemas inciertos".
  3. Francisco José de Haro Olmo: "Revisión sistemática sobre blockchain desde la perspectiva de la privacidad y la anonimización".
  4. Francisco José Gómez Navarro: "Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto de Vehículo Urbano Eléctrico Ligero. Almacenamiento y Distribución de Energía".
  5. Esther González Revuelta: "Análisis de demandas y expectativas del paciente frente a los nuevos modelos digitales de relación médico-paciente. Desarrollo de herramientas que facilitan la información y comunicación".
  6. Safwan Mawlood Hussein: "Distribución segura de claves en redes de sensores para IoT".
  7. Ana Paola Montoya Ríos: "Modelado y control de la temperatura en un invernadero por medio de reducción de modelos de alto orden con base en datos reales".
  8. Manuel Muñoz-Rodríguez: "Actualización de la plataforma IoT para la agricultura intensiva con MaaS e integración de nuevas plataformas".
  9. Luis Ortega López: "Clasificación de cultivos utilizando imágenes multi-espectrales y software eCognition".
  10. Diego Rodríguez Gracia: "Arquitecturas adaptativas en tiempo de ejecución mediante transformaciones inteligentes basadas en técnicas de soft-computing y desarrollo de software dirigido por modelos".
  11. Enrique Rodríguez Miranda: "Control y modelado de procesos en reactores de microalgas abiertos tipo raceway".
  12. José Juan Sánchez Hernández: "Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional y compensación de movimiento controlada por el cliente".
  13. Teresa Santamaría López: "Impact of streaming on the increasing demand of modern education and distance".
  14. Tobar Farias Galo Wilfredo: "Aplicación de la matemática en la criptografía conmutativa y no conmutativa".
-

# Una metodología basada en modelos para la integración de servicios IoT

Darwin Alulema<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador

<sup>2</sup> Applied Computing Group, University of Almería, Spain  
doalulema@sespe.edu.ec

**Resumen** . ActuaEl creciente número de plataformas y dispositivos finales hacen que el desarrollo de aplicaciones sea una tarea difícil que requiere mucho tiempo. Esta diversidad tiene la dificultad de tener que coordinar la interacción entre dispositivos y plataformas heterogéneas. Por consiguiente, se requiere que los desarrolladores deban tener un alto grado de conocimiento de cada una de las tecnologías empleadas. Una tecnología que puede resolver estos problemas es el modelado, porque permite la reutilización de diferentes elementos para simplificar el trabajo de los desarrolladores. Por este motivo, proponemos el empleo de ingeniería dirigida por modelos (MDE) para generar código automáticamente. Nos centramos en un lenguaje específico de dominio (DSL), un editor gráfico y una transformación de modelo a texto (M2T). Nuestra propuesta se compone de un modelo para la integración por tres capas: (a) Física, (b) Lógica, y (c) Aplicación. Para validar nuestra propuesta se ha analizado escenarios Smart Home, con sensores y actuadores que al combinarse presentan un comportamiento complejo. Las transformaciones M2T generan código para las plataformas de Arduino, Node-red, Ballerina y NCL-Lua.

**Keywords:** Model-Driven Engineering (MDE) · Domain Specific Language (DSL) · Web Services · Integration Pattern · Internet of Things (IoT) · Digital Television (DTV)

## 1. Introducción

Internet de las Cosas (IoT) está transformando la forma en la que las personas se comunican, colaboran y coordinan su vida cotidiana. Este cambio se produce debido al aumento de dispositivos conectados a Internet, que ofrece un ecosistema de integración tecnológica, que permite: (a) extraer datos de la vida cotidiana, (b) analizar datos en un entorno virtual, y (c) dar un valor agregado a través de análisis y algoritmos que permiten la toma de decisiones y respuestas rápidas [15].

El IoT ha crecido significativamente en los últimos años debido al aumento de teléfonos inteligentes, tabletas, televisores inteligentes y altavoces inteligentes, entre otros dispositivos, que llegan al mercado [4]. De hecho, se espera que miles

de millones de dispositivos jueguen un papel importante en la red futura, llevando datos del mundo físico al mundo de los contenidos y servicios digitales [1]. Al incluir sensores, estos dispositivos permiten recopilar continuamente datos de su entorno y personas, sin interferir con las actividades diarias [13].

La convergencia de hardware y software agrupa varias tecnologías, y en este escenario la TV puede tener mucho potencial para controlar objetos domésticos o mantener informadas a las personas [7]. Sin embargo, la interactividad a través de la televisión aún no se ha implementado por completo. Debido a la diferencia entre el número de televisores y las conexiones a Internet.

Crear aplicaciones de IoT en el mundo real puede ser un desafío, incluso para desarrolladores experimentados. Esto se debe principalmente a la heterogeneidad de hardware y software [6]. Por esta razón, se requieren habilidades de programación de bajo nivel relacionadas con la plataforma de hardware, así como un profundo conocimiento del campo de la aplicación y los requisitos del modelo de negocio [12].

Una tecnología que podría facilitar el desarrollo de aplicaciones es la Ingeniería dirigida por modelos (MDE) [17]. MDE permite a los desarrolladores estandarizar y automatizar el proceso de desarrollo de software. De esta manera, es posible continuar expandiendo los sistemas para cubrir una gran parte de las plataformas mediante el uso de modelos y transformaciones para la especificación y generación de aplicaciones semiautomáticas o automáticas [3].

En este documento, proponemos una metodología para la construcción de aplicaciones IoT para DTV. Esta propuesta se ha denominado SI4IoT (Service Integration for IoT). Para lo cual, se ha desarrollado un DSL (lenguaje específico de dominio), así como la generación semiautomática de código. Para este propósito, Eclipse Modeling Framework (EMF), Sirius y Acceleo se han utilizado en la propuesta.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente manera. La sección 2 revisa algunos trabajos relacionados. La sección 3 presenta la propuesta para el desarrollo de sistemas IoT. Finalmente, la Sección 4 presenta las conclusiones principales e identifica algunos trabajos futuros.

## 2. Trabajos relacionados

El alcance de IoT continúa creciendo e integrando más plataformas, lo que dificulta el desarrollo de nuevas aplicaciones. De esta manera, MDE permite a los desarrolladores resolver problemas específicos de integración, considerando y estudiando una solución general independiente de la tecnología.

En el trabajo realizado en [5], los autores proponen una herramienta gráfica DSL para sistemas IoT, en la cual los sensores (acelerómetros, GPS, presión, luz, temperatura, gravedad o proximidad) pueden interconectarse en un sistema IoT a través de JSON objetos. La plataforma permite que el código se desarrolle en múltiples plataformas (Java para Android, C para Arduino, C# para Windows Phone u Objective-C para iPhone). La principal diferencia con nuestra propuesta es la generación de código, que en nuestro trabajo se realizará para DTV.

## Una metodología basada en modelos para la integración de servicios IoT

Los autores en [14] analizan la aplicabilidad de Smart TV en entornos de Internet de las cosas (IoT). Se consideran los posibles roles de la TV (almacenamiento de información, dispositivo de visualización, punto de interacción, procesador de datos y fuente de datos) para la infraestructura de IoT y las características que una plataforma debe tener para actuar en el rol respectivo. La principal diferencia con nuestra propuesta es la implementación de una herramienta que permite el desarrollo de aplicaciones para DTV.

En [11] los autores proponen una arquitectura basada en cinco capas: a) Detección, b) Base de datos, c) Red, d) Respuesta de datos, y e) Capa de usuario. Los autores prueban la arquitectura en un metamodelo para la integración de redes sociales con Industry 4.0. Un Raspberry Pi, un servidor de almacenamiento en la nube y un dispositivo móvil para controlar los procesos de producción en línea se utilizan para la implementación. Una diferencia con nuestro enfoque es el desarrollo de un editor gráfico que permite el diseño de aplicaciones visualmente y el uso de la plataforma Arduino cite arduino, que está más enfocada en el hardware.

### 3. Metodología propuesta

Esta sección describe la metodología propuesta para el desarrollo de aplicaciones para IoT de acuerdo con MDE. La propuesta requiere seis procesos divididos en dos etapas: una para la especificación y otra para el desarrollo.

En la etapa de **especificación**, el DSL está diseñado y se implementa un proceso de transformación M2T. Esta etapa consta de tres procesos. En el lado del rol de Ingeniero, el paso # 1 genera el metamodelo, que define la sintaxis abstracta del lenguaje de acuerdo con las características de las aplicaciones DTV e IoT. Luego puede realizar el paso # 2 de dos maneras diferentes: a) generar el motor de transformación M2T, para generar el código fuente; o b) desarrollar el editor gráfico, que corresponde a la representación gráfica del DSL, de acuerdo con el metamodelo creado en el paso # 1.

En la etapa de **desarrollo** (lado del desarrollador), la aplicación se diseña y se genera el código fuente. Esta etapa consta de tres procesos consecutivos. El primero corresponde a la función establecida en el paso # 3, donde se construye un modelo utilizando el editor gráfico definido en la etapa de especificación. Este editor gráfico se utiliza para describir el escenario de la aplicación y generar el modelo específico del escenario. Este es un paso semiautomático y requiere que el desarrollador configure las propiedades, como el tipo de interfaz, las conexiones entre los componentes y los nombres de los archivos multimedia. Después de eso, se establece el paso # 4, que se encarga de aplicar la transformación de modelo a texto (M2T) mediante el modelo generado en el paso # 3 y el motor M2T. Este proceso crea automáticamente el código fuente de los nodos IoT, Bridge, API RESTful, Orquestador y DTV.

La arquitectura propuesta emplea tres capas: a) una capa física que corresponde a los dispositivos de hardware de los sistemas IoT, formada por sensores, actuadores y unidades de control con hardware de comunicación, b) una capa

## Una metodología basada en modelos para la integración de servicios IoT

lógica que define la comunicación, almacenamiento de información y control del hardware en los sistemas IoT. Para lo cual se crea una API REST, un módulo de interconexión que permite comunicar la API REST con un broker de mensajes y un patrón de integración, y c) una capa de aplicación que permite la visualización e interpretación de datos a través de la DTV. Para la coordinación de servicios en IoT orientados a procesos, se usa la orquestación de servicios o la coreografía de servicios [9]. Además, contemplamos una integración de los dos conceptos, al establecer la posibilidad de coreografías de orquestadores, con el fin de alcanzar acciones más complejas.

En nuestra propuesta desarrollamos un artefacto de software al cual denominamos *Bridge*, que permite realizar una comunicación entre mecanismos basados en mensajería (publicación/subscripción) y arquitecturas distribuidas (petición/respuesta). Además, cada servicio tiene un conjunto de Operaciones (*e.g.*, GET, POST, PUT, DELETE) para acceder a los recursos creados en las bases de datos para cada nodo de hardware. La descripción del servicio consta de un nombre comprensible para los humanos y un URI base que contiene el nombre de host y el número de puerto del recurso de red en el que están contenidos los puntos finales del servicio. De acuerdo con esta consideración las API REST admiten los verbos RESTful:

- GET en `port/device`, se pueden mostrar los valores históricos del sensor o actuador.
- GET en `port/device/last`, se puede mostrar el último valor del sensor o actuador.
- GET en `port/device/{n}`, se puede mostrar un valor en particular del sensor o actuador.
- PUT en `port/device/{n}`, se puede actualizar un valor en particular del sensor o actuador.
- POST en `port/device`, puede ejecutar para insertar un nuevo valor para un sensor o actuador.
- DELETE en `port/device/{n}`, puede ejecutar para eliminar un valor para un sensor o actuador.

El formato para la información que se intercambia en el sistema es una propuesta de estandarización que surge como una modificación de la propuesta de Zhou [16] para el procesamiento de eventos complejos algebraicos para sistemas ciberfísicos. La estandarización del formato de la información propuesto es por medio de objetos JSON, con la siguiente estructura:

- Id: identificador del evento.
- Date: Fecha de ocurrencia del evento.
- Time: Hora de ocurrencia del evento.
- Location: Ubicación física del dispositivo.
- Attribute: Valor que representa el evento.
- Artefact: Identificador del artefacto de software o hardware.
- Property: Identificador del tipo de dato que corresponde el atributo.



## Una metodología basada en modelos para la integración de servicios IoT

Para la integración de todos los servicios asociados a los componentes del sistema se ha considerado el patrón Saga [10], que es una secuencia de transacciones locales donde cada transacción actualiza la información dentro de un solo servicio. Para lo cual se establece un orquestador que les dice a los participantes qué transacciones locales deben ejecutar.

### 3.1. Metamodelo propuesto

Esta sección presenta nuestro metamodelo para describir escenarios IoT. La definición de estos escenarios como modelos permite a los expertos en dominios ignorar la complejidad de la sintaxis concreta de las plataformas de hardware y software que se utilizarán para implementarlos. La figura 1 muestra las metACLases en nuestro metamodelo y sus relaciones. Los componentes del sistema IoT se agrupan principalmente en tres categorías:

- **Infraestructura:** Corresponde a las metACLases que representan las características de los requisitos necesarios para el despliegue de las aplicaciones y corresponde a `Web Server`, `Data Base Server`, `Acces Point` y `Message Broker`.
- **Hardware:** Corresponde a las metACLases para el diseño de los Nodos IoT. En este caso `Sensor`, `Actuators`, `Controller` y `Communication`.
- **Control:** Corresponde a las metACLases para la Integración de los servicios web de cada dispositivo (sensor y actuador) para definir la lógica de negocio. En este caso el `Bridge` y `REST`, abstraen los mecanismos para el acceso a la información, mientras que `Integration Pattern` y `Orchestrator` definen la lógica de negocio del sistema. Para la implementación se han considerado dos posibles alternativas `Function` y `Status` que permiten representar un comportamiento basado en estados binarios a partir de lógica combinatorial y `Condition` que permite implementar condiciones lógicas, de acuerdo con los estados provenientes de los sensores en tiempo real.
- **Interfaz:** Corresponde a las meta clases para la interfaz de usuario. En este caso se ha considerado la `DTV` como interfaz para visualización simplificada de la información del sistema. Las metACLases principales asociadas son `DTV`, `Interface`, `Button` y `Content`.

### 3.2. Editor gráfico propuesto

En esta subsección, presentamos un editor gráfico implementado con Sirius, que admite el modelado de dominios IoT, ocultando los detalles de implementación. Para el diseño de la interfaz se implementó en Sirius el VSM que permite definir las clases y sus relaciones, también permite especificar qué objetos se muestran y cómo se muestran. El VSM incluye: nodos (`WebServer`, `DBServer`, `AccesPoint`, `MessageBroker`, `OutputBridge`, `InputBridge`, `ExternlAPI`), contenedores (`WebService`, `IntegrationPattern`, `IoTNode`, `DTV`, `Banner`, `Accordion`, `Frame`), subnodos (`Orchestrator`, `REST`, `Function`, `Condition`, `Actuator`, `Sensor`, `Controller`), nodos de borde (`InputOrchestrator`, `Out-`

Una metodología basada en modelos para la integración de servicios IoT

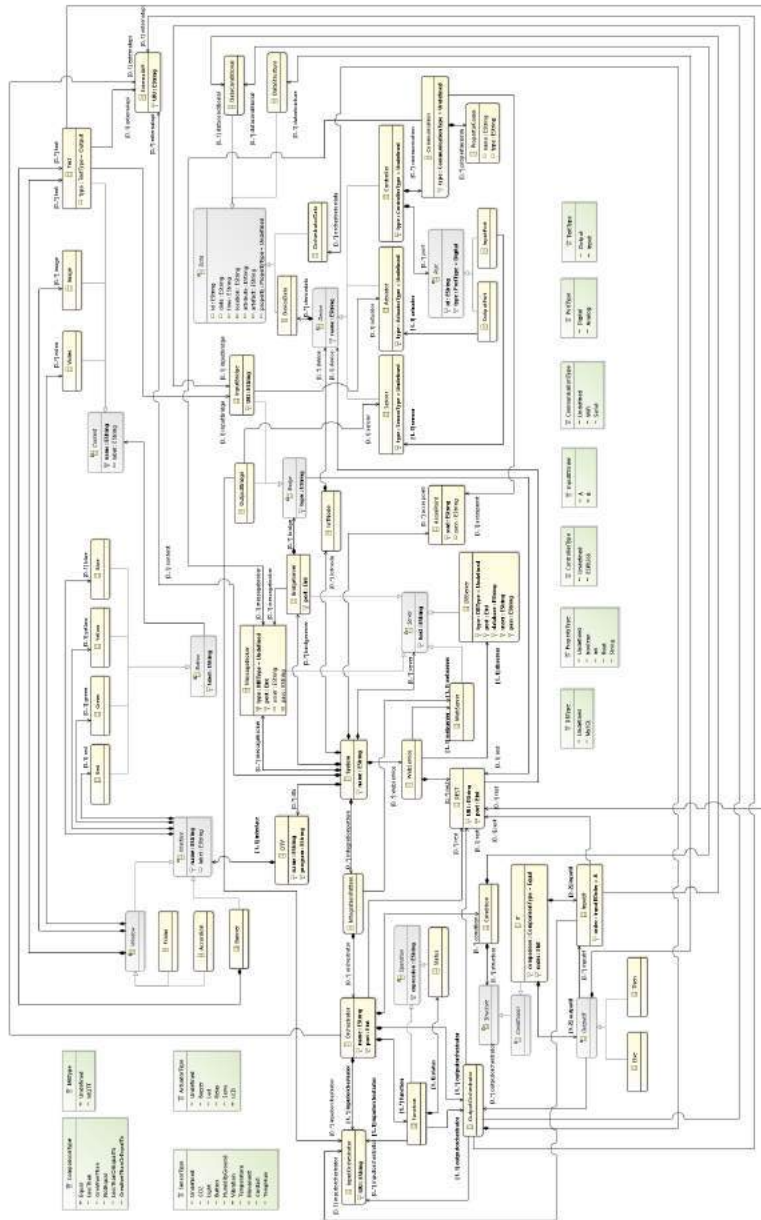
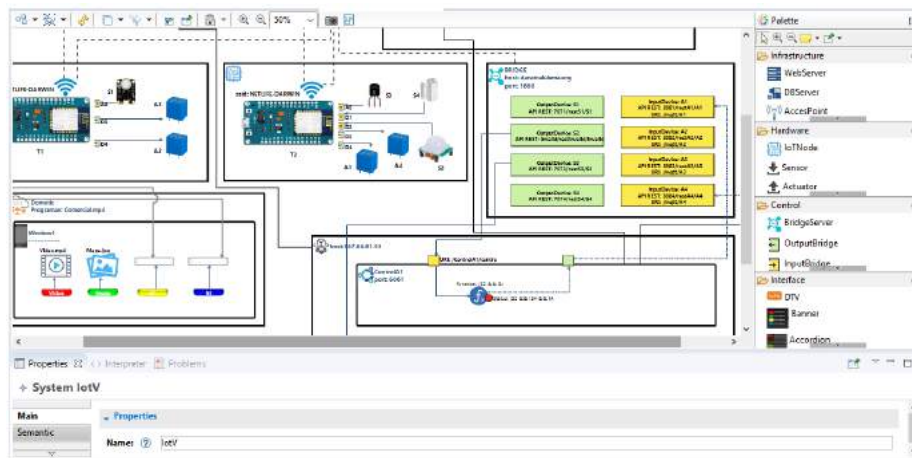


Figura 1. Metamodelo para la integración

## Una metodología basada en modelos para la integración de servicios IoT



**Figura 2.** Captura de pantalla del editor gráfico. (La sección inferior corresponde a las propiedades del sistema. La sección de la derecha corresponde a la paleta de herramientas. La sección central es el lienzo para el diseño del sistema)

putOrchestrator, Status, Communication, OutPort, InputPortcontroller, InputIf) y opciones de herramientas para crear elementos del sistema y las conexiones entre ellos.

La Figura 2 muestra el editor incorporado para la definición de dominio IoT. Este editor tiene principalmente cuatro partes: (1) una paleta de herramientas (panel derecho) desde la cual los expertos del dominio pueden seleccionar los elementos que se incorporarán a sus modelos, (2) un lienzo (panel central) en el que los usuarios pueden arrastrar y colocar tipos de eventos junto con propiedades para un dominio IoT desde la paleta, (3) una vista de propiedades (panel inferior) para agregar o editar información relacionada con los diferentes elementos de un modelo diseñado, por ejemplo, el tipo específico de una propiedad de evento.

### 3.3. Generación de código propuesto

Para la construcción del generador se implementa una transformación de modelo a texto (M2T). En nuestro caso, se ha utilizado la herramienta Acceleo para la generación de código. En los fragmentos de código siguientes presentamos un fragmento de código resumido para la transformación M2T que se realiza de acuerdo con el DSL para generar instancias de los Web Service, *Bridge*, Orchestrator, IoT Node e Interface.

Para definir las reglas de transformación, se consideró la plataforma Arduino por su simplicidad de uso. Para la conectividad se consideró WiFi y para la *Bridge* se empleó Node-Red por su simplicidad para crear flujos de publicación/ suscripción con Tópicos MQTT de los Nodos IoT, clientes REST para consumir los

## Una metodología basada en modelos para la integración de servicios IoT

métodos POST y almacenar la información proveniente de los Nodos, y servicios REST para permitir la comunicación con los Orquestadores. Para los servicios y el orquestador se eligió Ballerina por sus capacidades de llamados a servicios en paralelo. Para la interfaz de DTV se eligió el estándar ISDB-Tb debido a que se adoptó en casi toda Sudamérica y es compatible con IPTV. Estas plataformas fueron elegidas porque reducen la cantidad de código necesaria para la configuración, lo cual se adapta mejor a Acceleo. El proceso de transformación genera archivos de código Arduino (.ino) para el Controlador, para el *Bridge* se genera código (.json) con los flujos que se ejecutan en Node-Red, para los servicios REST, y para el Orquestador se genera código Ballerina (.bal) y para el caso de la DTV el código que se genera es NCL-Lua.

La plataforma elegida para el diseño de Nodos IoT es la ESP8266 Node MCU[8], por su capacidad de recibir y enviar información a través de WiFi embebido [2]. La estructura de los programas Arduino que se ejecutarán en la plataforma se dividen en tres secciones: (a) Declaración de constantes asociadas con sensores y actuadores, el puerto de pin de la placa del controlador que puede ser analógico o digital y llamado a las bibliotecas.

Para el *Bridge* se empleó Node-Red, por su simplicidad para crear flujos de publicación/subscription con Tópicos MQTT de los Nodos IoT, clientes REST para consumir los métodos POST y almacenar la información proveniente de los Nodos, y servicios REST (métodos GET y POST) para permitir la comunicación con los Orquestadores.

Los programas Node-Red que se ejecutarán en la plataforma son de dos tipos: (a) **OutputBridge**, permite enviar por medio de un cliente REST la información proveniente de un mensaje MQTT, de un sensor a un servicio web externo y (b) **InputBridge**, permite enviar información por medio de un API REST a un actuador por medio de un mensaje MQTT, proveniente de un cliente REST externo. Además, los dos componentes consumen los métodos de los servicios web REST asociados a cada sensor o actuador. La estructura de los programas Node-Red constan de: (a) Declaración del **OutputBridge**, y (b) Declaración del **InputBridge**.

Para la creación de los servicios API RESTful de cada uno de los sensores o actuadores se eligió Ballerina. La estructura de los servicios consta de tres secciones: (a) Declaración de la URI del servicio, (b) Definición de los métodos POST, registrar información, **GET/{id}**, buscar por id, **GET/all**, buscar todos los registros, **GET/last**, devuelve el último registro, **PUT/{id}**, actualiza un registro por su id, y **DELETE/{id}**, elimina un registro por su id, y (c) funciones para la gestión de la Base de Datos.

La estructura de los Orquestadores desarrollados en Ballerina siguen los siguientes pasos: a) Declarar la URI del Orquestador; b) Declarar la URI de los servicios participantes; c) Obtener la información de los servicios participantes; d) Evaluar la función lógica del Orquestador con los estados y eventos de los nodos participantes; y e) Publicar del nuevo estado del actuador o servicio destino.

## Una metodología basada en modelos para la integración de servicios IoT

La estructura de la interfaz DTV desarrollada en NCL-Lua sigue los siguientes pasos: a) Definir las regiones y sus descriptores en los cuales se presentarán los componentes; b) Declarar el canal de video sobre el cual se multiplexa la aplicación; y c) Definir una de las interfaces propuestas (Accordion, Banner, Frame).

#### 4. Conclusiones y trabajos futuros

Este documento propone una metodología para desarrollar aplicaciones de IoT integradas con la DTV en el lado del Front End y los nodos IoT en el lado del back end junto con la lógica de negocio. Esta propuesta tiene como objetivo facilitar la creación de aplicaciones, al no tener que profundizar en aspectos específicos de los lenguajes de programación.

Se construye un editor gráfico y una transformación M2T para la generación de código basada en MDE para simplificar el diseño de nodos de hardware para IoT. El enfoque permite estandarizar la descripción de las aplicaciones que los representan como modelos, lo que permite a los desarrolladores definir nuevas arquitecturas sin un profundo conocimiento del hardware y software para el diseño de sistemas IoT. Los nodos creados pueden incluir varios sensores y actuadores, que pueden estar asociados con un servicio de Internet.

Para trabajos futuros, se han identificado las siguientes líneas de investigación: (a) Para mejorar y extender el trabajo actual, pretendemos desarrollar un servicio de indexación y descubrimiento, que permita el uso de múltiples redes remotas para implementar aplicaciones más complejas e inteligentes, (b) Nuestra solución basada en modelos solo ha sido evaluada en el mundo académico y de investigación. Tenemos la intención de aplicarlo en la industria con el propósito de verificar los niveles de aceptación y satisfacción de los expertos comerciales, (c) Desarrollar la interfaz para clientes móviles, para incorporar las prestaciones y los sensores ya incluidos en los dispositivos, y (d) Extender nuestra propuesta para ir más allá de REST y los servicios web y también incluir AMQ y Kafka, que aumente la aplicabilidad de las herramientas a dispositivos IoT más amplios.

#### Referencias

1. Atzori, L., Iera, A., Morabito, G.: From "Smart Objects" to "Social Objects": The Next Evolutionary Step of the IoT. *IEEE Com. Mag.*, pp. 97-105. (2014).
2. Badamasi, Y.: The Working Principle Of An Arduino. *International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, pp. 1-4. (2014).
3. Bruneliere, H., Burger, E., Cabot, J., Wimmer, M.: A feature-based survey of model view approaches. *Software and Systems Modeling. Software and Systems Modeling*, (17):1-22. (2017).
4. Chmielewski, J.: Device-Independent Architecture for Ubiquitous Applications. *Pers Ubiquit Comput.* (18):481-488. (2014)
5. García, C., Espada, J. Núñez-Valdez, E., García-Díaz, V.: Midgar: Domain-specific language to generate smart objects for an Internet of Things platform. *Int. Conf. on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing. IMIS 2014*, pp. 352-357, (2014).

Una metodología basada en modelos para la integración de servicios IoT

6. Gomes, T., Lopes, P., Alves, J., Mestre, P., Cabral, j., Monteiro, and Tavares, A.: A Modeling Domain-Specific Language for IoT-Enabled Operating Systems. Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society pp. 3945–3950. (2017)
7. Kumar, N., Goel, S., Mallick, P.: Smart Cities in India, Features, Policies, Current Status, and Challenges. Int. Conf. on Technologies for Smart-City Energy Security and Power. ICSESP 2018, pp. 1-6. (2018).
8. Mesquita, J., Guimaraes, D., Pereira, C., Santos, F., Almeida, L.: Assessing the ESP8266 WiFi module for the Internet of Things. *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 784-791. (2018).
9. Radia, B., Zahi, J.: IoT coordination: Designing a context-driven architecture. *13th International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems*, pp. 388–395. (2018).
10. Richardson, C.: *Microservices Patterns*. Manning Publications Co.. pp.520 (2018).
11. Rodríguez, J., Cueva, J., Montenegro, C., Granados, J., González, R.: Metamodel for Integration of Internet of Things, Social Networks, the Cloud and Industry 4.0. *J. of Ambient Intell. and Humanized Computing* 9(3):709–23. (2017).
12. Teixeira, S., Alves, B., Gonçalves, J. Filho, P. and Rossetto, S.: The Journal of Systems and Software Modeling and Automatic Code Generation for Wireless Sensor Network Applications Using Model Driven or Business Process Approaches - A Systematic Mapping Study. *Systems and Software* (132):50–71. (2017)
13. Yao, L., Sheng, Q., Benatallah, B. Dustdar, S., Wang, X., Shemshadi, A., Kanhere, S.: WITS: An IoT Endowed Computational Framework for Activity Recognition in Personalized Smart Homes.(4):369–85. (2018).
14. Yusufov, M., kornilov, I: Roles of Smart TV in IoT-environments: a Survey. Proceedings - 13th Conference of open Innovations Association, FRUT 2013, pp. 163-168. (2013).
15. Zheng, D., Carter, W.: Leveraging the Internet of Things for a More Efficient and Effective Military. *Center for Strategic and Int. Studies*, pp. 1-52. (2015).
16. Zhou, C., Feng, Y., Yin, Z.: An algebraic complex event processing method for cyber-physical system. *Cluster Computing*, (3):1–9. (2018).
17. Zolotas, C., Diamantopoulos, T., Chatzidimitriou, K., Symeonidis, A.: From requirements to source code: a Model-Driven Engineering approach for RESTful web services. *Automated Software Engineering*, (24):791–838. (2017).

# Control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones usando compensadores clásicos

Doctorando: Jose Jorge Carreño Zagarra

Universidad de Almería  
jcz360@inlumine.ual.es

**Abstract.** Históricamente, la industria de procesos ha reconocido la importante labor del control automático en el correcto funcionamiento de los procesos de producción. Aunque la estrategia de control preferida en la mayoría de dichas aplicaciones es la implementación de lazos de control PID simples (control proporcional, integral y derivativo), existe una serie de características que algunas veces no son consideradas de manera explícita en el diseño de este tipo de controladores, tales como retardos, perturbaciones, sistemas de fase no-mínima, variables no medibles, incertidumbre en los parámetros, varianza en el tiempo, no-linealidades, restricciones e interacciones multivariadas. En esta tesis doctoral se desarrolla un método de control óptimo por rechazo activo de perturbaciones que garantice seguimiento robusto de referencias en presencia de perturbaciones e incluso incertidumbres en el modelo, teniendo en cuenta limitaciones clásicas como la saturación. Este documento presenta una revisión de los avances obtenidos en el trabajo doctoral durante el período 2018/2019.

## 1 Introducción

La presencia de perturbaciones trae efectos adversos para el desempeño de los sistemas, por lo que su rechazo es uno de los objetivos claves en el diseño de controladores. En la comunidad del control de procesos industriales- como en la industria del petróleo y en la industria metalúrgica- los procesos de producción están influenciados por lo general por perturbaciones externas tales como las variaciones de calidad en materias primas, fluctuaciones de carga de producción, y las variaciones de complicados entornos de producción [11].

En un reactor de microalgas, por ejemplo, las perturbaciones están asociadas a la radiación solar, la cual afecta considerablemente la concentración de biomasa. En la regulación de la glucosa en sangre en pacientes diabéticos las perturbaciones externas están relacionadas con la ingesta de alimentos, la realización de actividad física y el estrés, entre otras [10]. Los esquemas de control de realimentación tradicionales –como los controladores PID- atenúan las perturbaciones de manera relativamente lenta. Aunque se sabe que el control por pre-alimentación (Feedforward control) proporciona un método efectivo para el

## Control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones usando compensadores clásicos

rechazo de las perturbaciones, su implementación requiere que dichas perturbaciones sean medidas por sensores. Desafortunadamente, en muchos casos las perturbaciones son difíciles de medir físicamente por sensores. Para este fin los observadores de perturbaciones proporcionan una efectiva estimación de las perturbaciones para un amplio rango de sistemas dinámicos [7, 11, 10, 8, 13, 4].

Una idea intuitiva para lidiar con este problema es estimar el efecto de la perturbación de las variables medibles, y luego, tomar una acción de control, basada en la estimación para compensar la influencia de la perturbación. Esta idea puede extenderse para tratar la incertidumbre, las no-linealidades y las dinámicas no modeladas como parte de una perturbación global [5]. En consecuencia, la influencia de las incertidumbres podría suprimirse, y la robustez del sistema podría mejorarse significativamente [6].

Durante las últimas décadas, se han propuesto muchos enfoques para eliminar las perturbaciones, incluido el observador de perturbaciones (DO), observador de entrada desconocido (UIO), estimación equivalente de perturbaciones a la entrada (EID), observador de perturbaciones en modo deslizante y observador de estados extendidos (ESO). Aunque todos estos métodos están diseñados de acuerdo con el modelo de planta, los observadores de estado extendido requieren la menor cantidad de información de la planta, tolerando la incertidumbre en el modelo. Debido a tal característica, los esquemas de control basados en ESO (también conocidos como control de rechazo de perturbación activa (ADRC)) se han vuelto cada vez más populares en los últimos años [9, 2, 3].

Una forma natural de expresar el problema de diseño de control es mediante el uso de un problema de optimización matemática. Varios métodos de diseño de control, como LQR/LQG o  $H_\infty$ , plantean el problema de diseño de control de esta manera. Una amplia variedad de problemas relacionados con el diseño se puede convertir en la forma de un problema de optimización matemática. Se trata de hacer la mejor elección posible, con respecto a un criterio predefinido, de un conjunto de opciones de candidatos, que normalmente tienen que satisfacer algunas especificaciones (restricciones).

En el caso del diseño PID, la variable de optimización será el vector de los parámetros del controlador, y las especificaciones se utilizarán como funciones objetivas y de restricción. La especificación que se considera como la más importante jugará el papel de la función objetivo. En este punto, es muy importante formular el problema de optimización de manera que capture todas las especificaciones de los sistemas de control. Si bien los métodos de optimización son muy potentes, pueden generar soluciones poco realistas cuando no se formulan algunas especificaciones [1]. Desafortunadamente, esta situación no es infrecuente en la literatura de control de PID, existen varios métodos en los que se optimiza algún índice de rendimiento, pero no se tiene en cuenta la robustez. Estos métodos pueden dar como resultado controladores con niveles de robustez muy bajos [1]. Sin embargo, existen métodos en la literatura que obtienen controladores robustos óptimos en términos de coste de la realimentación pero en los que no se tienen en cuenta restricciones claves en la práctica como la saturación de los actuadores.



En esta tesis doctoral se desarrolla un método de control óptimo por rechazo activo de perturbaciones que garantiza seguimiento robusto de referencias en presencia de perturbaciones e incluso incertidumbres en el modelo, teniendo en cuenta limitaciones clásicas como la saturación. Para ello se trabajará en el enfoque de observadores de estado extendidos llamados observadores GPI (Generalized-Proportional-Integral), los cuales tratan el problema de la cancelación utilizando un punto de vista radicalmente nuevo en la estimación de estado no lineal, basado en el álgebra diferencial [12].

## 2 Avances de tesis doctoral

En esta sección se presentan los avances obtenidos hasta ahora en el trabajo de investigación doctoral.

### 2.1 Generalidades de control GPI para sistemas perturbados

Considerar el sistema dinámico  $n$ -dimensional, suave:

$$y^{(n)} = \phi(t, y)u + \psi(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}) \quad (1)$$

donde  $\phi(t, y)$  es conocida, uniformemente acotada y diferente de cero, y la función  $\psi(\cdot) = \psi(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)})$  puede ser desconocida pero uniformemente acotada, al igual que todas y cada una de sus derivadas temporales, las cuales tienen un orden finito  $m$ .

Para fines de diseño, se reemplaza el sistema original por el siguiente sistema simplificado:

$$y^{(n)} = \alpha u + \xi(t) \quad (2)$$

donde  $\alpha$  es una constante conocida y  $\xi(t)$  es llamada la perturbación total del sistema. Si se presume un modelo interno local para  $\xi(t)$  en forma de un polinomio de tiempo de orden  $m - 1$  se llega al siguiente paradigma localmente modificado válido:

$$y^{(n+m)} = \alpha u^{(m)} \quad (3)$$

Un controlador Proporcional Integral Generalizado (GPI, por sus siglas en inglés) para propósitos de estabilización de la salida puede ser sintetizado como:

$$u = - \left[ \frac{k_{m+n-1}s^{m+n-1} + \dots + k_1s + k_0}{s^m (s^{n-1} + k_{2n+m-2}s^{2n+m-2} + \dots + k_{m+n})} \right] y(s) \quad (4)$$

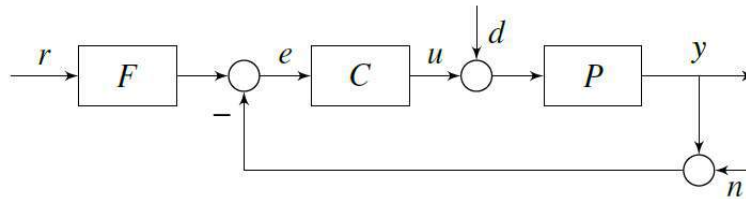
con las ganancias del controlador elegidas para garantizar un polinomio característico de Hurwitz de lazo cerrado.

## 2.2 Diseño de controladores clásicos a través de optimización

Uno de los mayores inconvenientes de los métodos de optimización es que es posible la presencia de muchos mínimos locales y el algoritmo numérico puede quedar atrapado en uno de ellos. Por otro lado, la obtención de una solución puede requerir una carga computacional excesiva. Afortunadamente, algunas clases de problemas de optimización se pueden resolver de manera eficiente y confiable debido a su estructura particular, por ejemplo, linealidad y convexidad.

En contraste con la mayoría de los métodos de ajuste disponibles, que se desarrollan específicamente para algunos valores nominales de los parámetros del modelo de planta, aquí el objetivo es obtener un método de diseño para modelos de planta con ignorancia en sus parámetros, es decir, se asumirá que el vector de los parámetros de la planta pertenece a un conjunto dado que representa la incertidumbre del modelo de la planta. Obviamente, se puede argumentar que los métodos disponibles ya tienen en cuenta la incertidumbre de la planta, ya que generalmente incluyen algunas especificaciones de robustez para un vector de parámetros nominales de la planta, sin embargo, esto en general es cierto solo cuando la incertidumbre es pequeña. En este trabajo, el diseño hace un mayor énfasis en la robustez, ya que se pretende garantizar un comportamiento óptimo del sistema en cuanto a seguimiento de referencias y rechazo de perturbaciones a pesar de la incertidumbre del proceso y de las restricciones de los elementos de control, haciendo uso de estructuras de control clásicas.

Considerar el esquema de control realimentado de dos grados de libertad (2 GDL) presentado en la Figura 1.



**Fig. 1.** Sistema de control realimentado con 2 grados de libertad

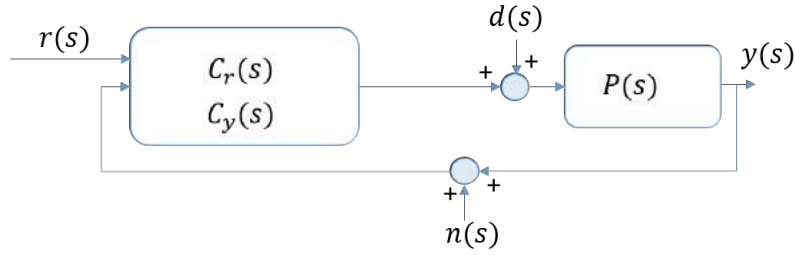
Este sistema de control puede reconfigurarse como el diagrama de bloques de la Figura 2. De esta manera la señal de control estaría dada por la siguiente expresión:

$$u(s) = C_r(s)r(s) - C_y(s)y(s) \quad (5)$$

donde las funciones de transferencia  $C_r(s)$  y  $C_y(s)$  contienen la estructura del controlador de realimentación y el pre-filtro de la entrada.

De la Figura 2 y la ecuación (5), considerando el ruido de medición, la referencia y la perturbación, la variable controlada se puede obtener mediante la siguiente relación:

## Procesamiento eficiente de consultas y técnicas de particionado en SpatialHadoop


**Fig. 2.** Sistema de control de 2 GDL

$$y(s) = M_{yr}(s)r(s) + M_{yd}(s)d(s) + M_{yn}(s)n(s) \quad (6)$$

donde,

$$M_{yr}(s) = \frac{C_r(s)P(s)}{1 + C_y(s)P(s)} \quad (7)$$

$$M_{yd}(s) = \frac{P(s)}{1 + C_y(s)P(s)} \quad (8)$$

$$M_{yn}(s) = \frac{-C_y(s)P(s)}{1 + C_y(s)P(s)} \quad (9)$$

$M_{yr}$  es la función de transferencia desde la señal de referencia a la variable controlada (o función de transferencia de lazo cerrado de servocontrol),  $M_{yd}$  es función de transferencia de la variable controlada con respecto a la perturbación de carga y  $M_{yn}$  es la función de transferencia de la variable controlada con respecto a la señal de ruido.

Por lo tanto, el seguimiento de referencia, libre de ruido, puede describirse de la siguiente manera:

$$y^*(s) = M_{yr}^*(s)r(s) + M_{yd}^*(s)d(s) \quad (10)$$

y en el dominio del tiempo, como sigue:

$$y^*(t) = y_r^*(t) + y_d^*(t) \quad (11)$$

Para el diseño del controlador y filtro que garanticen estabilidad y comportamiento robusto para el seguimiento de referencia ante perturbaciones e incertidumbre paramétrica, los costos funcionales a optimizar se definen respectivamente de la siguiente manera:

$$J_d(\theta_p, \theta_{cy}, \theta_d) = \int_0^{\infty} [y_d^*(\theta_p, \theta_{cy}, \theta_d, t) - y_d(\theta_p, \theta_{cy}, t)]^2 dt \quad (12)$$

$$J_r(\theta_p, \theta_c, \theta_d) = \int_0^{\infty} [y_r^*(\theta_p, \theta_c, \theta_d, t) - y_r(\theta_p, \theta_c, t)]^2 dt \quad (13)$$

donde  $\theta_d$  son los parámetros de diseño seleccionados para que la robustez del sistema de control coincida con un valor objetivo medido utilizando la sensibilidad máxima,  $\theta_p$  son los parámetros de la planta,  $\theta_{cy}$  Son los parámetros de  $C_y$ ,  $\theta_{cr}$  son los parámetros de  $C_r$  y  $\theta_c = \theta_{cr} \cup \theta_{cy}$  los parámetros del controlador.

Para el diseño del controlador de 2 GDL, se optimiza el siguiente costo general funcional:

$$J_T(\theta_p, \theta_c, \theta_d) = J_r(\theta_p, \theta_c, \theta_d) + J_d(\theta_p, \theta_{cy}, \theta_d) \quad (14)$$

El problema de optimización consiste en la minimización de dicha función objetivo sujeta al cumplimiento de una especificación de robustez en términos del valor máximo de sensibilidad del sistema en lazo cerrado.

### 2.3 Control de pH en fotobiorreactor tipo Raceway

Para el diseño del controlador se utiliza un modelo lineal con incertidumbre paramétrica. El  $pH$  del cultivo está influenciado principalmente por dos fenómenos: el suministro de  $CO_2$  y absorción de este como función de la disponibilidad de luz. El  $CO_2$  suministrado, a través de los gases de combustión, contribuye a la formación de ácido carbónico causando una disminución en el  $pH$  del cultivo. Además, las microalgas realizan fotosíntesis en presencia de radiación solar consumiendo  $CO_2$  y produciendo  $O_2$ , provocando así un aumento gradual del  $pH$ . Por otro lado, el aumento de la radiación solar produce variaciones en la tasa de fotosíntesis ocasionando con ello el aumento de la tasa del  $pH$ .

Considerando que la salida del proceso es el  $pH$  del cultivo, la apertura de la válvula de inyección de los gases de combustión es la variable manipulada y la irradiación solar es la principal perturbación del sistema, el comportamiento del proceso puede representarse mediante modelos lineales simplificados.

El modelo lineal que relaciona el nivel de  $pH$  con la irradiancia y la entrada de inyección de  $CO_2$  alrededor de un punto de operación está representado por la siguiente expresión:

$$pH(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-\lambda s} u(s) + \frac{k_r}{\tau_r s + 1} e^{-\lambda_r s} I(s) \quad (15)$$

donde  $pH$  es el nivel de  $pH$  del cultivo,  $u$  es la cantidad de  $CO_2$  inyectado o señal de control, e  $I$  es la irradiancia solar. Los parámetros obtenidos alrededor del punto de operación son los siguientes:

$$k = [-2.57 \quad -1.19] pH\%^{-1}, \quad \tau = [56.5 \quad 83.9] min, \quad \lambda = [1.67 \quad 2.33] min$$

$$k_r = 7 * 10^{-4} pH m^2 W^{-1}, \quad \tau_r = 91 min, \quad \lambda_r = 1.5 min$$

Debido a la representación de la dinámica de las entradas por medio de modelos de primer orden con retardo, se presentan errores de modelado. Sin embargo, esos errores no son un problema si se emplea una técnica de control robusta a perturbaciones externas e incertidumbre paramétrica en el modelo.

## 2.4 Resultados y discusión

Para validar el desempeño del esquema de control propuesto se empleó un simulador del fotobioreactor a pequeña escala. Los valores de radiación solar empleados en la simulación corresponden a las mediciones tomadas en la estación experimental Las Palmerillas los días 31 de octubre (día soleado) y 14 de noviembre (día nublado), ambos en el año 2014.

Con base a las ecuaciones (4) y (15) se propone la siguiente ley de control:

$$u = u^* - k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) (y - y^*) \quad (16)$$

donde  $y^*$  es la trayectoria de referencia suave que puede ser generada por la adición del filtro  $F(s)$  a la entrada de la planta y  $u^*$  es la entrada de control nominal. El problema de diseño, consiste en obtener los parámetros de la ecuación (16) y la constante de tiempo de la función de transferencia del siguiente filtro de primer orden:

$$F(s) = \frac{1}{\tau_f s + 1} \quad (17)$$

Minimizando la función objetivo de la ecuación (14), para una sensibilidad máxima de 1.6, se obtienen los siguientes parámetros del controlador y filtro:

$$k_p = -6.59, \quad T_i = 166 \text{ min}, \quad \tau_f = 65 \text{ min}$$

La Figura 3 muestra los resultados de simulación obtenidos con el esquema de control robusto propuesto usando un valor de referencia de  $pH$  de 7.4. En dichos resultados se puede apreciar que el controlador robusto diseñado por medio de optimización numérica estima en línea el efecto de las perturbaciones externas y logra garantizar un seguimiento preciso de la referencia, tanto para el escenario soleado como el caso nublado.

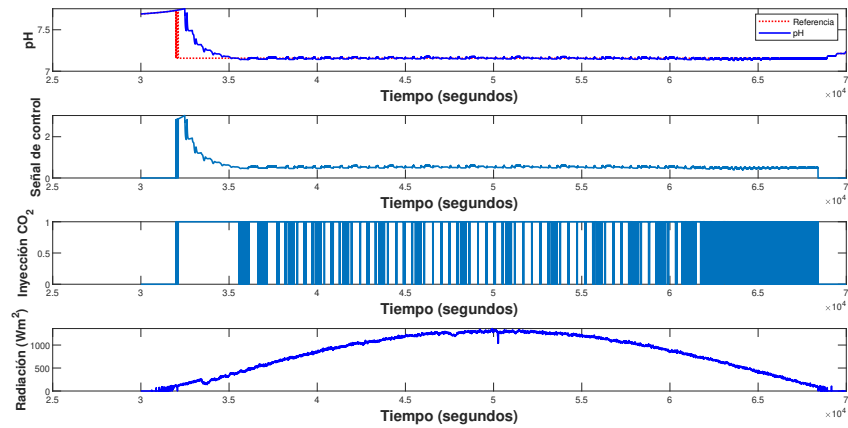
## 3 Conclusiones

En esta sección se presentan las principales conclusiones obtenidas de los avances alcanzados en la tesis doctoral durante este año.

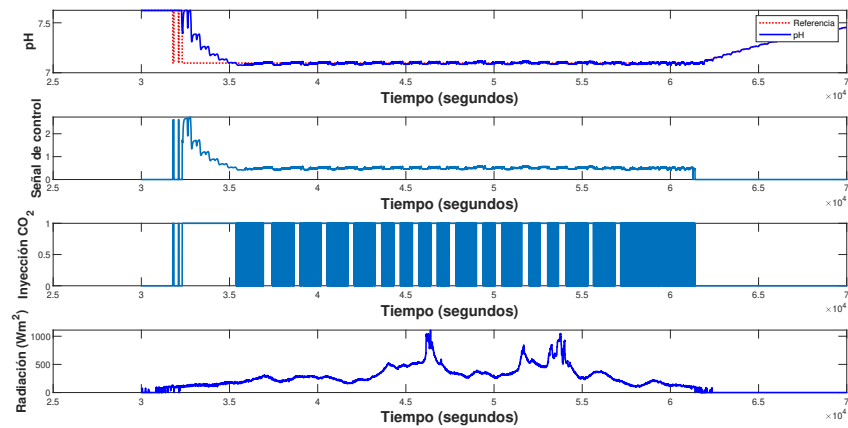
Durante el presente año se ha desarrollado un método de control por rechazo activo de perturbaciones óptimo que garantiza seguimiento robusto de referencias en presencia de perturbaciones e incluso incertidumbres en el modelo. Para ello se ha trabajado en el enfoque de observadores de estado extendidos llamados observadores GPI (Generalized-Proportional-Integral), los cuales tratan el problema de la cancelación utilizando un punto de vista radicalmente nuevo en la estimación de estado no lineal, basado en la propiedad de planitud diferencial, que tienen muchos sistemas dinámicos.

El problema de optimización consiste en minimizar una función objetivo que contiene el seguimiento de la referencia y el rechazo de las perturbaciones externas e internas. Dicha función objetivo está sujeta al valor máximo de sensibilidad (el cual determina la robustez del sistema) y las restricciones de los actuadores.

## Procesamiento eficiente de consultas y técnicas de particionado en SpatialHadoop



(a) Día soleado



(b) Día nublado

**Fig. 3.** Control óptimo-robusto basado en rechazo activo de perturbaciones para fotobiorreactor

El esquema de control propuesto ha logrado implementarse en un simulador de un fotobiorreactor a pequeña escala, disponible en la Universidad de Almería. Los resultados de simulación demuestran que el controlador obtenido logra un seguimiento casi preciso de la referencia en presencia de perturbaciones debidas a la radiación solar y dinámicas no modeladas.

Por último, lo que se planea realizar durante el presente año es la implementación experimental de dicho esquema de control en la planta real del fotobiorreactor tipo Raceway y en un invernadero industrial.

## References

1. Åström, K.J., Hägglund, T., Astrom, K.J.: Advanced PID control, vol. 461. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society Research Triangle ... (2006)
2. Carreño-Zagarra, J., Guzmán, J., Moreno, J., Villamizar, R.: Linear active disturbance rejection control for a raceway photobioreactor. *Control Engineering Practice* **85**, 271–279 (2019)
3. Carreno-Zagarra, J., Villamizar, R., Moreno, J., Guzmán, J.: Active disturbance rejection and pid control of a one-stage refrigeration cycle. *IFAC-PapersOnLine* **51**(4), 444–449 (2018)
4. Chen, W.H.: Nonlinear disturbance observer-enhanced dynamic inversion control of missiles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **26**(1), 161–166 (2003)
5. Chen, W.H., Yang, J., Guo, L., Li, S.: Disturbance-observer-based control and related methods—an overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **63**(2), 1083–1095 (2015)
6. Han, J.: From pid to active disturbance rejection control. *IEEE transactions on Industrial Electronics* **56**(3), 900–906 (2009)
7. Huang, Y., Messner, W.: A novel disturbance observer design for magnetic hard drive servo system with a rotary actuator. *IEEE Transactions on Magnetics* **34**(4), 1892–1894 (1998)
8. Komada, S., Machii, N., Hori, T.: Control of redundant manipulators considering order of disturbance observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **47**(2), 413–420 (2000)
9. Li, S., Yang, J., Chen, W.H., Chen, X.: Disturbance observer-based control: methods and applications. CRC press (2016)
10. Palumbo, P., Pepe, P., Panunzi, S., De Gaetano, A.: Observer-based closed-loop control for the glucose-insulin system: local input-to-state stability with respect to unknown meal disturbances. In: 2013 American Control Conference. pp. 1751–1756. IEEE (2013)
11. Ping, Z., Xiang, B., Tianyou, C.: Improved disturbance observer (dob) based advanced feedback control for optimal operation of a mineral grinding process. *Chinese Journal of Chemical Engineering* **20**(6), 1206–1212 (2012)
12. Sira-Ramírez, H., Luviano-Juárez, A., Ramírez-Neria, M., Zurita-Bustamante, E.W.: Active disturbance rejection control of dynamic systems: a flatness based approach. Butterworth-Heinemann (2018)
13. Umeno, T., Hori, Y.: Robust speed control of dc servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design. *IEEE Transactions on industrial electronics* **38**(5), 363–368 (1991)

# Blockchain desde la perspectiva de la privacidad y la anonimización.

Francisco José de Haro Olmo<sup>[0000-0003-3130-0877]</sup>

Universidad de Almería.  
fdo730@inlumine.ual.es

**Abstract.** En la actualidad uno de los activos más importantes que existen son los datos y la información que de ellos se deriva, que unido a la fecha límite para la implantación del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) da lugar a la necesidad de tomar conciencia de la importancia que tiene el control sobre los datos y quien puede acceder a los mismos que en la mayoría de ocasiones se encuentran accesibles de una u otra forma a través de internet. Téngase en cuenta el auge del internet de las cosas (IoT), sistemas SCADA y la Industria 4.0, retos para la seguridad de nuestros tiempos. Por otro lado ponemos el foco en blockchain, lo que supone una tecnología emergente que se aplica, no solo como base de la moneda digital en sus múltiples variantes, sino también a los contratos inteligentes así como otras finalidades como la trazabilidad de productos y servicios. En este trabajo llevamos a cabo una revisión sistemática de bibliografía con el fin de conocer los mecanismos empleados para la implementación de la privacidad y la anonimización mediante blockchain.

**Keywords:** Blockchain · Privacy · Anonymity.

## 1 Introducción.

El 25 de mayo de 2018 fué la fecha límite para la implantación de la GDPR (General Data Protection Regulation) [1], a partir de la cual se hace un especial esfuerzo en tratar de garantizar la privacidad de los datos de carácter personal. Para ello se plantean unos retos tecnológicos para cumplir con la norma [1,29] en todas sus dimensiones en cuanto a almacenamiento de datos, procesamiento, control de acceso, gestión de identidad, seguridad de los sistemas informáticos así como las posteriores medidas a considerar ante una violación de las medidas de seguridad y brechas de seguridad [30,31] y asegurar la trazabilidad de las transacciones, cuestión sumamente importante a la hora de reconstruir la información en caso de catástrofe o ataque, incluso posibilita la reconstrucción de la información y de los hechos acontecidos desde una perspectiva de la informática forense. Es a partir de este momento cuando se hace especial hincapié en el concepto de privacidad y en utilizar la tecnología y mecanismos adecuados que hagan esto posible. Concepto que está directamente relacionado con el otro término que incluimos en la investigación: anonimización. Estos dos conceptos pertenecientes al ámbito de la ciberseguridad y del tratamiento de los



datos de carácter personal, privacidad y anonimización, es lo que pretendemos analizar mediante este trabajo, el cómo se está gestionando mediante la tecnología blockchain, analizar los diferentes mecanismos empleados así como sus ventajas e inconvenientes.

## 2 Metodología de investigación.

En esta investigación, una revisión sistemática de bibliografía [3,4]. Inicialmente se ha identificado una serie de cuestiones a las que se desea dar respuesta mediante este trabajo de investigación. A continuación, se realiza una búsqueda sistemática de publicaciones a través de diferentes motores de búsqueda de publicaciones científicas bajo unos parámetros previamente definidos: palabras clave que deseamos incluir y excluir, rango de fechas. En primer lugar seleccionamos las publicaciones obtenidas con estas coincidencias. Posteriormente procedemos a la localización de bibliografía adicional en la que encontrar información sobre las cuestiones que van apareciendo relacionadas con el objeto de la investigación. Finalmente extraemos la información categorizada según las cuestiones previamente planteadas y que nos permita ofrecer respuestas diferenciadas según los resultados obtenidos en los pasos anteriores.

### 2.1 Identificación de la investigación.

El objetivo de este artículo es evaluar en qué medida y cómo blockchain trata la privacidad y la anonimización, indicando si es posible y los mecanismos mediante los cuales se implementa, así como los inconvenientes si los hubiera y propuestas futuras que se plantean pendientes de resolver.

- Q1. ¿Permite blockchain la privacidad?
- Q2. ¿Permite blockchain la anonimización?
- Q3. Identificar mecanismos de implementación de privacidad.
- Q4. Identificar mecanismos de implementación de anonimización.
- Q5. ¿Se han encontrado inconvenientes?
- Q6. Propuestas para futuras investigaciones que ofrecen las publicaciones.

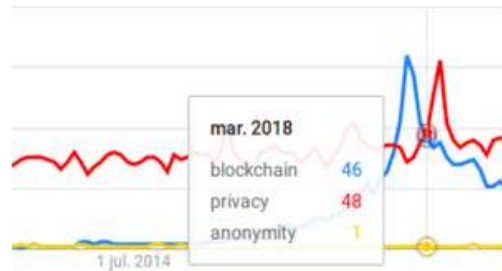
En un primer momento nos interesa conocer si es posible o no afirmar que blockchain hace posible de una forma eficaz obtener privacidad (Q1) y a su vez ofrece la posibilidad de la anonimización (Q2) de forma que no se pueda ocultar la identidad de todos o algunos de los intervinientes. Una vez encontrada respuesta a estas cuestiones, vamos más allá tratando de conocer qué mecanismos se emplean tanto para conseguir gestionar la privacidad (Q3) como la anonimización (Q4) en las diferentes publicaciones analizadas y que a su vez tratan diversos aspectos y enfoques de la tecnología blockchain. Estos diferentes puntos de vista ofrecen diferentes formas de abordar las cuestiones (Q3, Q4) aportando soluciones muy variadas que enriquecen las posibilidades que ofrece

## Blockchain desde la perspectiva de la privacidad y la anonimización

la tecnología blockchain en todo su conjunto. En algunos casos nos encontramos con inconvenientes (Q5) que suponen una dificultad para alcanzar total o parcialmente tanto la privacidad como la anonimización. Una última cuestión a la que queremos dar respuesta (Q6) son las propuestas de investigaciones futuras que dejan planteadas en algunos de los documentos analizados y que por lo tanto no habrían encontrado respuesta a fecha de hoy.

## 2.2 Búsqueda de publicaciones.

La investigación la llevamos a cabo a través de varios motores de búsqueda de referencias bibliográficas y publicaciones científicas. Las palabras clave empleadas fueron: “blockchain”, “anonymity”, “privacy” y excluyendo los resultados que contenían la palabra clave “bitcoin”.



**Fig. 1.** Incremento de popularidad del término privacidad frente a blockchain

En las búsquedas iniciales detectamos que fue a partir de 2016 cuando se incrementaron las publicaciones relacionadas con blockchain. Para ello accedimos a través de las siguientes:

Google Scholar (<http://scholar.google.com>).  
 ACM Digital Library (<http://dl.acm.org>).  
 Springer (<http://link.springer.com>).  
 IEEE Xplore Digital Library (<http://ieeexplore.ieee.org>).  
 Science Direct (<http://www.sciencedirect.com>).  
 Scopus (<http://www.scopus.com>).

## 2.3 Extracción de los datos y síntesis.

Uno de los principales retos fue clasificar la información extraída de los diferentes artículos analizados sin perder el enfoque sobre las cuestiones principales de privacidad y anonimización que suponen el centro de atención de nuestra

investigación. Por una parte pretendemos clasificar los mecanismos empleados para asegurar la privacidad de los datos y/o de los diferentes elementos que pueden intervenir en la estructura de blockchain y por otro estudiar los mecanismos disponibles para la anonimización de los datos, hasta el punto de averiguar si este paso es reversible o irreversible, aportando un mayor grado de seguridad sobre los datos que componen las transacciones de blockchain. Resaltar que para diferentes ámbitos de aplicación de la blockchain en la vida real, encontramos mecanismos distintos para asegurar cada una de las cuestiones de esta investigación, si bien todas se apoyan en las características principales de blockchain a la hora de apostar por la gestión de la privacidad y la anonimización. Cuestión no menos importante, es detectar los inconvenientes destacados en cada una de las publicaciones analizadas sobre la tecnología blockchain respecto a la privacidad y la anonimización, dejando al descubierto posibles vulnerabilidades o fallos de seguridad en algunos de los casos. Una de las cuestiones de las que también tomamos nota son las propuestas para futuras investigaciones ya que en algunas publicaciones aparecen problemáticas parcialmente resueltas o no concluyentes, trazando así una futura línea de investigación. Este dato nos aporta información relevante sobre la fase de madurez de una determinada propuesta tecnológica.

Todo el proceso de extracción de datos está destinado a responder a las cuestiones iniciales que nos planteamos (Q1-Q6) al inicio de la investigación y que es, al fin y al cabo, sobre la que deseamos obtener una idea de la situación actual así como aportar las conclusiones de dicho trabajo.

Existe una relación entre los términos privacidad y anonimato en varios de los estudios analizados, encontrando que en algunos se aborda únicamente los mecanismos relacionados con la privacidad [9, 11, 12, 14, 19] mientras que en sólo dos [8,15] únicamente enfoca la atención en el anonimato asociado a las transacciones que intervienen mediante blockchain. Destacamos que la mayoría de estudios seleccionados para la extracción de datos tratan tanto la privacidad como el anonimato encontrando una relación intrínseca entre ambos términos [7, 10, 13, 16, 17, 18, 20, 21].

### 3 Análisis de resultados.

En la literatura revisada encontramos diferentes ámbitos o campos sobre los que se está implementando la tecnología blockchain para dar respuestas a los cambios situacionales y nuevos retos derivados del continuo avance así como nuevas necesidades referentes a la privacidad y seguridad de la información. Entre estos campos de trabajo destacan los siguientes:

- Ámbito de la salud. Donde nuevos desafíos, requisitos de seguridad y privacidad [6] deben abordarse para que el intercambio de datos a gran escala tenga éxito.

## Blockchain desde la perspectiva de la privacidad y la anonimización

- IoT. La tecnología blockchain ha revolucionado el IoT [7] por su eficiencia y escalabilidad, si bien pretende dar solución a la forma en que se relacionan los diferentes dispositivos que intervienen creando un entorno de confiabilidad y seguridad así como la transferencia de información entre dispositivos de una forma fiable. En [9] destaca la necesidad de desarrollar un estándar para compartir conjuntos de datos de IoT de forma que permita aprovechar el potencial de blockchain para facilitar el intercambio seguro de datos así como asegurar el propio sistema de IoT. Uno de los problemas más importantes a resolver [19] sería la suplantación de dispositivos, la autenticación falsa o la poca confiabilidad que podría darse en el intercambio de datos.
- Bigdata. El enfoque que se hace desde este ámbito [10] con respecto al uso de la tecnología blockchain es el de incrementar el nivel de confidencialidad, sobre todo de la información que se comparte.
- Almacenamiento de información. Donde [11] opta por la característica que ofrece la tecnología blockchain de inmutabilidad inherente que garantiza la resistencia frente a la modificación o eliminación de datos almacenados y pretende un aumento del nivel de privacidad.
- Red ad-hoc vehicular. En este caso [14], donde se emplean los vehículos como nodos de una red centra su atención en la confianza y privacidad ya que siguen siendo problemas abiertos y es crucial evitar que los vehículos emitan mensajes falsificados y al mismo tiempo preservar la privacidad ante los distintos tipos de ataques posibles.
- Negocios. En este campo, distintas empresas han optado por la implantación de la tecnología blockchain [15] como solución a problemas como el de la trazabilidad, transparencia, auditoría y otras posibles aplicaciones aún por explorar.
- Industria v.4.0. En el campo de la industria [16] se apuesta por blockchain como forma de proporcionar garantías de privacidad y seguridad así como la autenticación anónima de dispositivos, la capacidad de auditoría de los procesos industriales y la confidencialidad de los datos tratados. Una característica destacable de la tecnología blockchain que es especialmente atractiva para este campo de actuación sería la posibilidad de escalado que presenta.
- Criptomonedas. Aunque en este trabajo de investigación hemos evitado entrar en las diferentes monedas criptográficas que se sustentan en la tecnología blockchain y que es el campo donde más difusión ha tenido blockchain, es más que notorio destacar que una de las aplicaciones estrellas de esta tecnología es la gestión de criptomonedas. Existen en la actualidad multitud de tipos de monedas criptográficas y es conveniente destacar que hay determinados proyectos como podría ser ALASTRIA [22] que pretende integrar a diferentes bancos y dotar de interoperabilidad bancaria a través de blockchain. Por otro lado encontramos ETHEREUM [23] que aporta otros usos y aplicaciones para la tecnología blockchain además de criptomonedas.

Una vez revisada la literatura seleccionada para la extracción de información damos respuesta a las diferentes cuestiones planteadas al inicio de este artículo. Información de momento reservada para la publicación del artículo en una revista de impacto.

## 4 Conclusiones

En esta investigación pretendemos aportar una perspectiva relacionada con la seguridad en la tecnología blockchain considerando las características como la privacidad y la anonimización en varios campos de aplicación y ofrecer una visión panorámica de la situación actual dando respuesta a unas cuestiones planteadas al inicio del estudio.

En varios campos de aplicación (salud, negocios, compañías de seguros, finanzas, IoT, industria) de la tecnología donde los datos y la información adquieren una importancia vital en la actualidad donde las empresas pugnan por adquirir gran cantidad de datos ya sean de carácter personal o cualquier otro tipo de datos y engrosar los sistemas de almacenamiento de información con la que posteriormente poder extraer una rentabilidad mediante la explotación de la información transformada en conocimiento de la cual se puede extraer ventajas, ya sean económicas o estratégicas a la hora de la toma de decisiones.

Añadir la opción de seguir investigando acerca de la taxonomía de blockchain resaltando la posibilidad de diseñar estándares que ofrezcan funcionalidad abierta entre diferentes plataformas haciendo posible la intercomunicación entre diferentes sistemas de blockchain.

## Referencias

1. EUGDPR - Information Portal. [En línea]. Disponible en: <https://www.eugdpr.org/>
2. (2018) ICO., Guide to the General Data Protection Regulation (GDPR). [En línea]. Disponible en <https://ico.org.uk/for-organisations/guide-to-the-general-data-protection-regulation-gdpr/accountability-and-governance/>
3. B. Kitchenham, Procedures for Performing Systematic Reviews, Joint Technical Report, Department of Computer Science, Keele University and Empirical Software Engineering, National ICT Australia Ltd., 2004
4. B. Kitchenham, S. Charters, Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering, EBSE Technical Report EBSE-2007-01 Version 2.3, School of Computer Science and Mathematics, Keele University and Department of Computer Science, University of Durham, 2007.
5. Hristov, P., and W. Dimitrov. "The Blockchain as a Backbone of GDPR Compliant Frameworks." *Quality - Access to Success*, vol. 20, 2019, pp. 305-310.
6. W. J. Gordon and C. Catalini. "Blockchain Technology for Healthcare: Facilitating the Transition to Patient-Driven Interoperability". *Computational and Structural Biotechnology Journal*. vol 16, pp 224-230. Junio 2018.
7. D. Eddine Kouicem, A. Bouabdallah and Hicham Lakhlef. "Internet of things security: A top-down survey". *Computer Networks*, vol 141, pp 199-221. Agosto 2018.
8. M. T. Hammi, B. Hammi, P. Bellot, A. Serhrouchni. "Bubbles of Trust: A decentralized blockchain-based authentication system for IoT". *Computers Security*, vol 78, pp 126-142. Septiembre 2018.

9. M. Banerjee, J. Lee and K. Raymond Choo. "A blockchain future for internet of things security: a position paper". *Digital Communications and Networks*, vol 4, pp 149-160. Agosto 2018.
10. Reyna, C. Martín, J. Chen, E. Soler and M. Díaz. "On blockchain and its integration with IoT. Challenges and opportunities". *Future Generation Computer Systems*, vol 88, pp 173-190. Noviembre 2018.
11. A. Dorri, S.I S. Kanhere and R. Jurdak. "MOF-BC: A memory optimized and flexible blockchain for large scale networks". *Future Generation Computer Systems*, vol 92, pp 357-373. Octubre 2017.
12. R. Lai and D. LEE Kuo Chuen. *Handbook of Blockchain, Digital Finance, and Inclusion. Vol 2*. Singapore: Singapore University of Social Sciences, 2018, pp. 145-177.
13. J.Wang, M. Li, Y. He, H. Li, K. Xiao and C.Wang. "A Blockchain Based Privacy-Preserving Incentive Mechanism in Crowdsensing Applications". *IEEE Access*, vol 6, pp. 17545-17556. Marzo 2018.
14. Z. Lu, W. Liu, Q. Wang, G. Qu and Z. Liu. "A Privacy-Preserving Trust Model Based on Blockchain for VANETs". *IEEE Access*, vol 6, pp. 45655-45664. Agosto 2018.
15. W. Viriyasitavat and D. Hoonsopon. "Blockchain characteristics and consensus in modern business processes". *Journal of Industrial Information Integration*. Julio 2018.
16. C. Lin, D. He, X. Huang, K. Raymond Choo and A. V. Vasilakos. "BSeIn: A blockchain-based secure mutual authentication with fine-grained access control system for industry 4.0". *Journal of Network and Computer Applications*, vol 116, pp. 42-52. Agosto 2018.
17. M. García, A. Dubey and Vicent Botti. "Introducing the new paradigm of Social Dispersed Computing: Applications, Technologies and Challenges". *Journal of System Architecture*, vol 91, pp. 83-102. Noviembre 2018.
18. J. Yang, Z. Lu and J. Wu. "Smart-toy-edge-computing-oriented data exchange based on blockchain". *Journal of System Architecture*, vol 87, pp. 36-48. Junio 2018.
19. N. Manoj Kumar and P. Kumar Mallick. "Blockchain technology for security issues and challenges in IoT". *Procedia Computer Science*, vol 132, pp. 1815-1823. 2018.
20. D. Efanov and P. Roschin. "The All-Pervasiveness of the Blockchain Technology". *Procedia Computer Science*, vol. 123, pp. 116-121. 2018.
21. B. Wang, J. Sun, Y. He, D. Pang and N. Lu. "Large-scale Election Based On Blockchain". *Procedia Computer Science*, vol 129, pp. 234-237. 2018.
22. ALASTRIA. [En línea]. Disponible en <https://alastria.io>
23. ETHEREUM. [En línea]. Disponible en <https://www.ethereum.org/>
24. FinTech Observatorio Finanzas y Tecnología. [En línea] Disponible en <https://www.fin-tech.es/2016/10/corda-la-plataforma-blockchain-codigo-abierto.html>
25. Hyperledger. [En línea] Disponible en <https://www.hyperledger.org/projects/fabric>
26. Hyperledger Fabric. [En línea] Disponible en <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-1.4/>
27. Sweeney, L. k-anonymity: A model for protecting privacy. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 10(5), 557-570. Octubre 2002. <https://doi.org/10.1142/S0218488502001648>
28. S. Nakamoto, Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system, 2008. Disponible online: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (Accessed 24 November 2018).

Blockchain desde la perspectiva de la privacidad y la anonimización

29. Christina Tikkinen-Piri, Anna Rohunen, Jouni Markkula. EU General Data Protection Regulation: Changes and implications for personal data collecting companies, *Computer Law Security Review*. Volume 34, Issue 1, Febrero 2018, Pages 134-153, ISSN 0267-3649. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2017.05.015>.
30. CENTRO CRIPTOLÓGICO NACIONAL/Guía de Seguridad de las TIC CCN-STIC 817. Esquema Nacional de Seguridad. Gestión de ciberincidentes. Julio 2016.
31. ISO 27035 Information security incident Management.
32. A.H. Mohsin et al. Blockchain authentication of network applications: Taxonomy, classification, capabilities, open challenges, motivations, recommendations and future directions. *Computer Standards Interfaces*. Diciembre 2018. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2018.12.002>.

# Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto de Vehículo Urbano Eléctrico Ligero. Almacenamiento y Distribución de Energía.

Francisco José Gómez Navarro

Universidad de Almería  
Carretera Sacramento s/n  
04120 La Cañada de San Urbano  
Almería - España  
<https://www.ual.es/>

**Resumen** El presente trabajo tiene por objeto, dar a conocer el avance del proyecto de investigación sobre un nuevo concepto de vehículo eléctrico urbano ligero, que aprovecha las diversas fuentes de energía renovable disponibles, optimizando su uso, al objeto de maximizar la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero ligados al transporte urbano de personas y bienes. Durante este periodo, con la ayuda del lenguaje de modelado Modelica<sup>®</sup> [1] y la herramienta de modelado Dymola<sup>®</sup> [2], se han desarrollado los modelos correspondientes al almacenamiento y distribución de energía del vehículo. Se ha desarrollado y validado un modelo dinámico que simula adecuadamente el comportamiento de baterías del tipo Litio-Ferrosulfato ( $LiFePO_4$ ) y que supone una aportación significativa respecto a los modelos de baterías Ion-Litio ( $Li-ion$ ) encontrados en la bibliografía y que son de uso común en los vehículos eléctricos. También se ha desarrollado un modelo dinámico lineal de convertidor CC/CC bidireccional que permite la conexión de los distintos elementos generadores y consumidores de energía del vehículo a un bus de energía común.

**Keywords:** Vehículo Eléctrico, Movilidad Urbana, Energías Renovables, Reducción CO<sub>2</sub>, Modelado Orientado a Objetos, Modelica, Batería, Convertidor DC/DC

## 1. Introducción

La sociedad moderna ha basado su desarrollo en gran medida en la posibilidad de desplazar cantidades suficientes de bienes y personas entre distintas localizaciones de forma eficaz. El transporte consume el 19% de la energía a nivel mundial y emite el 23% del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) debido al consumo energético [3]. Con la tendencia actual, el uso de energía para el transporte aumentará un 50% para 2030 y más de un 80% para 2050.



El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) advierte que para evitar las desastrosas consecuencias del cambio climático, las emisiones globales de CO<sub>2</sub> deben disminuir, al menos, un 50 % de aquí al año 2050 [4]. El transporte juega un papel decisivo en la consecución de este objetivo, resulta indispensable por tanto incidir en la necesaria adaptación de los modos actuales de desplazamiento. En Europa, se han establecido las bases para una política de transportes competitiva y sostenible[5], entre las que cabe destacar:

- La eliminación progresiva de los vehículos de «propulsión convencional» en el entorno urbano es una contribución fundamental a una reducción significativa de la dependencia del petróleo, las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación atmosférica local y la contaminación acústica.
- Debe fomentarse el uso de vehículos de pasajeros más pequeños, más ligeros y más especializados en el transporte por carretera.

El transporte ligero, fundamentalmente orientado a personas, consumió en 2006 el 47 % de la energía dedicada al transporte [3]. El parque mundial de vehículos ligeros (Ligh Duty Vehicle - LDV) es previsible que se triplique para el año 2050, principalmente debido al incremento en países en vías de desarrollo[6]. De lo expuesto anteriormente, se puede concluir que uno de los focos de actuación preferentes para la consecución del objetivo de reducción de la emisión de gases de efecto invernadero está en el **transporte urbano ligero** y en el uso de **fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles**. Estas fuentes deben:

- Ser renovables para evitar su agotamiento.
- Estar disponibles en la zona para evitar la dependencia energética de terceros.
- Ser acumulables para poder disponer de las reservas adecuadas que equilibren la capacidad de producción y la demanda.

### 1.1. Motivación

El trabajo de investigación propuesto viene justificado por dos motivaciones diferentes y complementarias:

- Necesidad de disponer de modelos adecuados que permitan analizar y anticipar las prestaciones y comportamientos de las distintas alternativas tecnológicas en estudio para el caso de los sistemas de transporte urbano del futuro. La necesidad de disponer de sistemas de propulsión y fuentes energéticas alternativas obliga a disponer de modelos modulares, con capacidad para integrar y simular el comportamiento dinámico del sistema completo, integrando las distintas tecnologías y desde distintos niveles de abstracción. Si bien hay un elevado número de investigadores que han desarrollado e investigado sobre modelos que analizan las posibilidades de estas nuevas tecnologías de alimentación y propulsión, en la mayoría de los casos se basan en la simple adaptación de la concepción tradicional del vehículo a esta nueva realidad.

Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto de Vehículo Urbano Eléctrico Ligero..

- Necesidad de avanzar en nuevas propuestas de movilidad urbana, basadas en vehículos más ligeros, mas adaptados al uso específico para transporte ligero de corta distancia, con máximo aprovechamiento de las fuentes de energía renovable disponibles y con esquemas de uso que optimicen su capacidad.

## 1.2. Hipótesis

La hipótesis principal que se pretende demostrar, es la viabilidad de un nuevo concepto de movilidad urbana basado en el uso intensivo de fuentes de energía renovable, al que podremos llamar Very Light Urban Vehicle (VLUV). Como hipótesis secundaria, se pretende demostrar cómo este concepto consigue una reducción importante en la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y disminuye el consumo de combustibles fósiles y otras fuentes de energía no renovable [7].

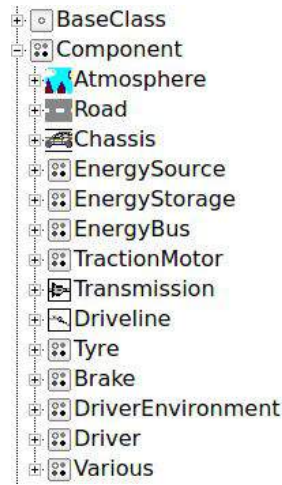
## 2. Avances

El primer paso del trabajo de investigación, tras la revisión bibliográfica, ha consistido en la determinación de un concepto genérico de vehículo ligero para desplazamiento urbano que permita la investigación y desarrollo de los modelos correspondientes a cada uno de los componentes, sus interfaces y la simulación del conjunto completo bajo distintas configuraciones y condiciones de contorno. Para el desarrollo de los distintos modelos se ha optado por el Modelado Orientado a Objetos con ayuda del lenguaje de modelado Modelica<sup>®</sup>. Este estándar abierto tiene las siguientes ventajas desde el punto de vista del modelado y la simulación de sistemas multi-físicos [8][9]:

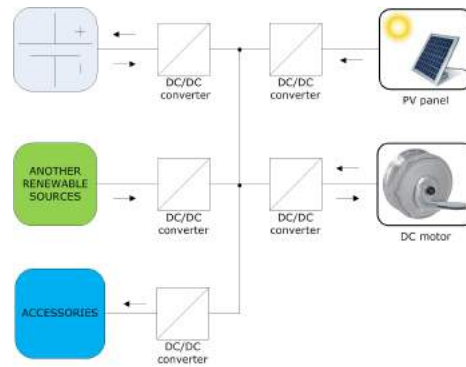
- Encapsulamiento del conocimiento.
- Capacidad de interconexión topológica.
- Modelado jerárquico.
- Instanciación de objetos.
- Herencia de clases.
- Capacidad de interconexión generalizada.

Se utiliza la herramienta de desarrollo Dymola<sup>®</sup> [10], basada en el lenguaje de modelado de código abierto Modelica<sup>®</sup> para el desarrollo, simulación y optimización de los modelos. Para la definición de las clases base, los interfaces de conexionado y la estructuración general del modelo se ha tomado como referencia la librería VehicleInterfaces de Modelica [11]. Esta librería proporciona una serie de definiciones de interface normalizadas para uso en subsistemas de automoción y modelos de vehículos. Su objetivo es el de promover la compatibilidad entre las distintas librerías de componentes de automoción y proporcionar una estructura flexible y potente para el modelado de vehículos.

La estructura final de los modelos componentes del vehículo se pueden apreciar en la figura 1. Con los diferentes modelos desarrollados de cada uno de los distintos componentes, se pueden conseguir las distintas configuraciones deseadas de vehículos que nos ayudarán en la simulación dinámica, análisis y evaluación de resultados.



**Figura 1.** Estructura básica de la librería de componentes



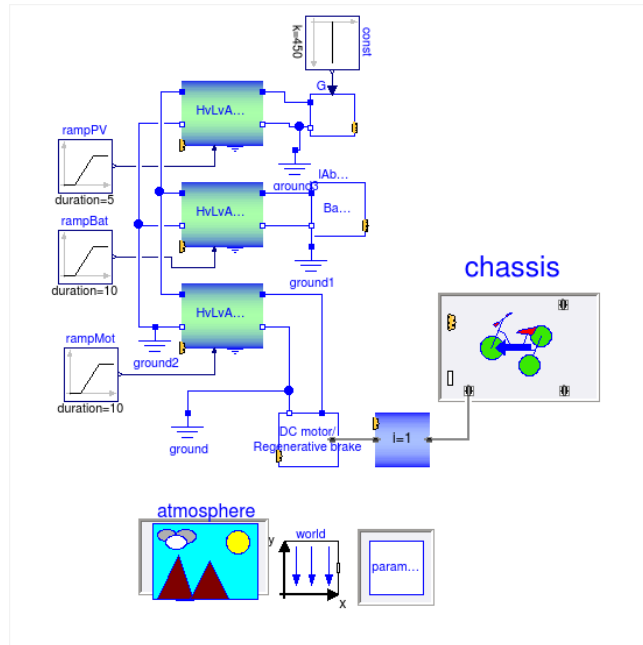
**Figura 2.** Esquema general del clúster inteligente

## 2.1. Modelado del vehículo

Al objeto de la simulación dinámica del vehículo completo, de su control y del análisis del balance energético de su actuación, se ha desarrollado un modelo de clúster de energía inteligente, que agrupa los diferentes elementos componentes del vehículo que aportan o consumen energía. Tal como se aprecia en la figura 2, está compuesto principalmente por el panel fotovoltaico (PV), la batería, los convertidores de tensión DC/DC, el motor de accionamiento del vehículo (que puede funcionar como freno regenerativo), los accesorios del vehículo y otras posibles fuentes de energía renovable en estudio. También se aprecia en la figura los sentidos del flujo de energía posibles en cada uno de los componentes. Los componentes que aportan energía son: la batería (en modo descarga), el panel PV, el motor (en modo freno regenerativo) y las otras fuentes de energía

Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto de Vehículo Urbano Eléctrico Ligeró..

renovable instaladas. Los componentes que consumen energía son: la batería (en modo carga), el motor de accionamiento del vehículo y los accesorios. Todos los componentes se interconectan mediante un bus DC a través de los convertidores DC/DC funcionando en modo uni ó bidireccional.



**Figura 3.** Modelo completo del vehículo en Modelica

En la figura 3 se muestra el modelo completo del vehículo en Modelica.

## 2.2. Modelado de la batería

De entre los distintos elementos componentes del vehículo eléctrico, la batería es el que juega un papel más destacado, puesto que de su capacidad y comportamiento dependerán en gran parte las prestaciones finales del vehículo, fundamentalmente en lo relativo a la autonomía, fiabilidad y coste de operación. Resulta fundamental por tanto, disponer de unos modelos de batería suficientemente fiables, que permitan su uso en simulaciones de tiempo real y que se adapten a las distintas tecnologías disponibles en el mercado, de uso habitual en vehículos eléctricos.

Se ha desarrollado y validado por tanto un modelo dinámico que simula adecuadamente el comportamiento de baterías del tipo  $\text{LiFePO}_4$  y que supone una aportación significativa respecto a los modelos de baterías *Li-ion* encontrados en la bibliografía [12]. Este modelo es de aplicación directa a baterías *Li-ion* y con

Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto de Vehículo Urbano Eléctrico Ligeró..

pequeñas modificaciones a otras tecnologías habituales como las de plomo-ácido (LA), níquel-hidruro metálico (Ni-MH) o níquel-cadmio (Ni-Cd). Los resultados de esta investigación han sido remitidos para su publicación.

### 2.3. Modelado del convertidor

Tal como podemos ver en la figura 2, cada componente del vehículo que consume o aporta energía al sistema, está unido al mismo mediante un convertidor DC/DC. La función del convertidor es la de adaptar la tensión del bus de continua del vehículo a la tensión necesaria para el accionamiento de cada componente, en el caso de consumidores, o de adaptar la tensión generada por el componente a la del bus en el caso de generadores. Se ha desarrollado dinámico lineal de convertidor DC/DC bidireccional que permite la conexión de los distintos elementos generadores y consumidores de energía del vehículo al bus de energía común. Puesto que hay una instanciación múltiple del mismo, es muy importante disponer de un modelo base suficientemente preciso y que permita la simulación en tiempo real del vehículo completo. Sobre este modelo lineal se implementarán los algoritmos de control.

## 3. Publicaciones

La siguiente contribución ha sido presentada a congreso internacional:

”Modelling a Smart-Grid for a Solar Powered Electric Vehicle”  
Francisco J. Gomez, Luis J. Yebra, Antonio Gimenez  
Type of submission: Discussion Contribution  
9th International Conference on Mathematical Modelling  
Vienna, Feb 21-23, 2018  
ISBN 978-3-901608-91-9  
DOI: 10.11128/arep.55.a55113

El siguiente artículo ha sido publicado:

”Modelado de Baterías para Aplicación en Vehículos Urbanos Eléctricos Ligeros”  
Francisco J. Gómez, Luis J. Yebra, Antonio Giménez, José L. Torres  
Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial  
Comité Español de automática

El siguiente artículo ha sido enviado, en espera de decisión del editor:

”DC-DC Linearized Converter Model for Faster Efficiency Analysis of Lightweight Urban Electric Vehicles”  
Francisco J. Gómez N., Luis J. Yebra M., Francisco J. Gómez M. y Antonio Giménez F.  
IEEE Access

## 4. Conclusiones

Se ha realizado la introducción y descripción del proyecto de investigación en curso. Se han revisado las motivaciones y justificaciones del mismo, así como del estado de avance. Los trabajos en curso, una vez definidas las clases base e interfaces a utilizar, están orientados a conseguir el modelo dinámico completo de un clúster de energía inteligente para ser usado en un vehículo animado por energía solar y otras fuentes de energía renovable, con el propósito del diseño y optimización del control del mismo. El modelo será utilizado para realizar las simulaciones en tiempo real que permitan la optimización de los algoritmos de control de los distintos componentes. Se han presentado los principales componentes, su esquema de interconexión, así como los flujos de energía. Se ha presentado un ejemplo del modelo completo del vehículo en Modelica. Se han presentado un nuevo modelo de batería que permite simular adecuadamente el comportamiento específico de la tecnología  $\text{LiFePO}_4$  y que es válido para los otros tipos de batería de uso corriente en vehículos eléctricos (LA, Li-ion, Ni-Cd, Ni-MH). Se ha presentado el desarrollo de un convertidor linealizado DC/DC que permite la interconexión de los distintos componentes con el bus de energía y la simulación en unos valores de tiempo razonables.

## Referencias

1. P. Fritzson, *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: A Cyber-Physical Approach*, 2nd ed. Linköping - Sweden: John Wiley & Sons - IEEE Press, 2015. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=wgIaBgAAQBAJ>
2. Dassault Systèmes AB, “Dymola - Dynamic Modeling Laboratory - User Manual,” Lund - Sweden, p. 847, 2018. [Online]. Available: <http://www.dymola.com>
3. International Energy Agency, “IEA Response System for Oil Supply Emergencies 2012,” International Energy Agency, Paris, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EPPD\\_Brochure\\_English\\_2012\\_02.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EPPD_Brochure_English_2012_02.pdf)
4. J. M. Ogden and L. Anderson, “Sustainable Transportation Energy Pathways: A Research Summary for Decision Makers,” Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, Tech. Rep., 2011. [Online]. Available: [http://www.its.ucdavis.edu/?page\\_id=10063&pub\\_id=1499](http://www.its.ucdavis.edu/?page_id=10063&pub_id=1499)
5. European Commission, *A sustainable future for transport - Towards an integrated, technology-led and user-friendly system*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2009.
6. United Nations Environment Programme, “Hybrid Electric Vehicles: And overview of current technology and its application in developing and transitional countries,” United Nations Environment Programme, Nairobi, Tech. Rep., 2009. [Online]. Available: <https://www.globalfueleconomy.org/transport/gfei/autotool/approaches/technology/Hybrid%20Electric%20Vehicles%20final%20cs2.pdf>
7. G. Pasaoglu, M. Honselaar, and C. Thiel, “Potential vehicle fleet CO<sub>2</sub> reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in Europe,” *Energy Policy*, vol. 40, no. C, pp. 404–421, 2012. [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:enepol:v:40:y:2012:i:c:p:404-421>

Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto de Vehículo Urbano Eléctrico Ligero..

8. Fritzson P., *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*. Wiley-IEEE Press, 2004. [Online]. Available: <http://www.wileyurope.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471471631.html>
9. M. Association, “Modelica ® - A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling Language Specification,” *Interface*, vol. 5, no. 6, p. 250, 2010. [Online]. Available: [www.modelica.org](http://www.modelica.org)
10. Dassault Systèmes AB, Ed., *Dymola - Dynamic Modeling Laboratory - User Manual*. Lund - Sweden: Dassault Systèmes AB, 2012, vol. 1, no. May. [Online]. Available: <http://www.dymola.com>
11. Modelica Association, “VehicleInterfaces Library (Version 1.2.4) Reference Guide,” 2016. [Online]. Available: <https://build.openmodelica.org/Documentation/VehicleInterfaces.html>
12. O. Tremblay and L. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 3, pp. 1–10, 2009.

## **Análisis de demandas y expectativas del paciente frente a los nuevos modelos digitales de relación médico-paciente. Desarrollo de herramientas que facilitan la información y comunicación.**

González Revuelta, María Esther<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tecnologías de la Información y Comunicación. C.H.Torrecárdenas.Almería

### **Abstract.**

El acceso del paciente a su Historia Clínica Electrónica mediante el uso de herramientas informáticas que posibiliten la disponibilidad de sus datos clínicos y de su proceso asistencial inmediato de forma on-line es algo cada vez más demandado e incluso utilizado. Conocer la opinión de los pacientes en cuanto a la sustitución de los métodos tradicionales de comunicación y atención por parte del profesional, sustituyendo una atención personal insitu por otra en remoto y virtual es importante, servirá como base para la toma de decisiones por parte de los propios servicios de salud y para el abordaje de actuaciones orientadas a ofrecer una mejor calidad en la atención sanitaria.

El avance en el desarrollo y puesta en marcha de herramientas informáticas tipo Apps que aporten mayor autonomía al paciente e incrementen el uso de dispositivos móviles, apostando por las nuevas tecnologías para fomentar la interacción digital, son retos que nos planteamos y sobre los que estamos trabajando y forman parte del objeto de estudio y avance de este trabajo.

**Keywords:** mHealth, Aplicaciones móviles, telemedicina

## **1 Introducción**

El Sistema Sanitario está sujeto a la influencia de la evolución digital en la que todo nuestro entorno está inmerso. La incorporación de las nuevas tecnologías suponen un cambio en las formas de trabajo y en las formas de relacionarnos.

Del mismo modo ocurre en el ámbito de la atención sanitaria. El uso de las TIC supondrá una mejora para el usuario, para el profesional y para el centro sanitario.



Análisis de demandas y expectativas del paciente frente a los nuevos modelos digitales...

Algunos de los retos actuales en el sector salud y en base a los cuales estamos desarrollando nuestro análisis son:

- Los pacientes cada vez están mejor formados y más informados, lo cual supone un incremento de las expectativas.
- La coordinación entre la atención primaria y la atención especializada cada vez es más necesaria para tener capacidad de respuesta rápida al paciente y de calidad, facilitando la continuidad de la atención.
- La relación médico-paciente y en general profesional sanitario con paciente está cambiando y los medios y las formas por tanto también.

Para hacer frente y ser capaz de abordar estos retos es imprescindible incorporar las nuevas tecnologías y nuevos modelos de trabajo que se apoyen sobre ellas.

Por otro lado, no hay que perder de vista otra cuestión en la que interviene altamente la tecnología y es en el desarrollo de la Historia Clínica Electrónica. Cada vez se almacena una mayor cantidad de datos relativos a la Salud, datos que hay que procesar de forma masiva. Por tanto, también aquí las TIC son instrumento fundamental.

Nuestro análisis basado principalmente en conocer y reflejar la opinión real de los pacientes en relación al uso de las nuevas tecnologías para el seguimiento de su proceso asistencial y de su relación con el centro sanitario.

En general a partir de las encuestas y el análisis de las mismas determinan que la utilización de las TIC en el sector salud ofrecen una mejora significativa en los procesos de modernización, de innovación e incluso de racionalización económica.

Además nuestra asistencia a diferentes foros de trabajo en este ámbito han reforzado los resultados. Destacar que en estas nuevas formas de comunicación es imprescindible mantener la seguridad de la información, ya que no nos olvidemos que estamos tratando con datos personales catalogados en el más alto nivel de privacidad. Mejorar la comunicación reforzando la seguridad y facilitar la información al paciente sobre el tratamiento y sobre el cuidado de su Salud son otros de los retos planeados y a abordar.

Nos planteamos inicialmente los siguientes objetivos:

- Determinar el grado de interés de los pacientes en conocer información propia de su proceso asistencial a través de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) Participando de forma más activa en el desarrollo de su proceso.
- Evaluar el grado de conocimiento de los pacientes inmersos en un Proceso Asistencial determinado, sobre los pasos a seguir durante todo el proceso.
- Nivel de uso Internet y conocimiento de herramientas informáticas para el acceso a

Análisis de demandas y expectativas del paciente frente a los nuevos modelos digitales...

la información y el seguimiento de su historia clínica electrónica.

Además complementamos estas respuestas, analizando las diferencias en función de datos de filiación como sexo, edad, zona de residencia y otros datos relacionados con su situación profesional: nivel de estudios y situación profesional. Además de otros factores influyentes como estado de salud personal, entorno familiar y hábitos de actuación.

## **2 Avances**

Realizamos un análisis de aquellas áreas del entorno sanitario que como pacientes tenían más desconocimiento y sobre las que tendrían interés en conocer y obtener información. Es decir, más concretamente a través de encuestas realizadas a profesionales especializados y pacientes, reuniones con brainstorming, con aportación de ideas y análisis de pros y contras para el abordaje.

Como objetivo nos planteamos realizar un desarrollo para conocer realmente el nivel de uso de la tecnología ante la disponibilidad de herramientas que faciliten esta actuación. No solo nos planteamos el análisis de las TIC para el acceso a su Historia Clínica, sino también para el conocimiento de la oferta de servicios que puede ofrecerle un Centro sanitario, ya sea un hospital o un centro de salud. Servicios y recursos que con total probabilidad deberá usar en algún momento, bien sea por uso personal o por uso de algún familiar. Nos proponemos valorar la opinión ante el planteamiento de acercar los servicios de salud al usuario a través de una aplicación móvil (APP) que ofreciera de forma personalizada información detallada sobre protocolos, procedimientos, campañas de Salud y recomendaciones sobre hábitos de vida saludable. Además otro objetivo ha sido facilitar la accesibilidad de los usuarios mediante el conocimiento de los centros y la localización de los mismos.

Actualmente en pleno proceso de desarrollo de la aplicación, principalmente centrados en la actualización de contenidos.

Conforme vamos avanzando se ratifica que existe interés por parte de los pacientes, que cada vez tienen un nivel de exigencia mayor y así lo transmiten, quieren conocer más y mejor sobre su proceso asistencial, sobre su estado de salud, sobre su Historia Clínica en particular y sobre los recursos y servicios que el sistema sanitario le ofrece en general.

## **3 Conclusiones**

La expectativa del paciente crece demandando mejor servicio en tiempo y forma y su implicación en el proceso es mayor y comparten la visión de la necesidad de disponer de herramientas informáticas para el acceso a los datos a través de internet.

Análisis de demandas y expectativas del paciente frente a los nuevos modelos digitales...

El uso de aplicaciones móviles por parte de pacientes actualmente tiene un porcentaje bajo, no más del 5%. Sí tiene una mayor notoriedad para el caso de seguimiento de actividad física. Aún existen claras reticencias a la sustitución de la atención presencial por la atención virtual o incluso la eliminación de consultas avaladas por información transmitida a través herramientas digitales.

Importante el papel del profesional sanitario que aún no refleja un nivel de confianza alto en delegar algunas actuaciones al uso de Apps. El porcentaje de profesionales sanitarios que recomiendan páginas Web y Apps están en un tramo de 6-7 %. Aun siendo todavía reacios al uso de los nuevos canales de comunicación, en un futuro próximo la prescripción de app podría ser algo bastante más habitual y reconocido en el entorno profesional.

En diferentes foros se tratan los temas sobre los que se está trabajando y se plantean diferentes enfoques.

Como parte de las actividades realizadas en el seno de esta labor de investigación y desarrollo he asistido a diferentes foros especializados donde se tratan los temas sobre los que se está trabajando y se plantean diferentes enfoques. Concretamente en la Escuela Andaluza de Salud Pública, Jornadas de e-Salud, realidades y retos del futuro, se trataron y expusieron por profesionales especializados temas directamente relacionados como: salud móvil en la sociedad del conocimiento, estrategia en salud móvil y relación con el ciudadano, normativa en seguridad y aspectos legales en eSalud, seguridad en recursos tecnológicos en eSalud, evaluación e integración de aplicaciones móviles en salud, telemedicina...

Para concluir, incidir en que el registro, uso y disponibilidad de las nuevas tecnologías nos abren un amplio abanico para avanzar en las diferentes áreas de la Salud. Conocer la opinión de los usuarios/pacientes es primordial y ofrecer herramientas que lleven a la práctica esta posibilidad reforzarán o no si estamos dando respuesta a las demandas reales de la sociedad y si estamos trabajando en la línea adecuada.

#### **4 Bibliografía**

1. Sotillos-González B, Buiza-Camacho B, Herrera-Usagre M, Escobar-Ubreva Á, Fernández-Bermejo M, Santana-López V, et al. Visión ciudadana sobre la prescripción de aplicaciones móviles de salud y el uso de tecnologías de la información y la comunicación en el entorno sanitario en Andalucía. *Journal of Healthcare Quality Research*. 2018;33(4):225-33.
2. Mira JJ. Tecnologías móviles e inalámbricas para cuidar nuestra salud. *Journal of Healthcare Quality Research*. 2018;33(4):183-6.

Análisis de demandas y expectativas del paciente frente a los nuevos modelos digitales...

3. Baldwin JL, Singh H, Sittig DF, Giardina TD, editors. Patient portals and health apps: Pitfalls, promises, and what one might learn from the other. Healthcare; 2017: Elsevier.
4. Dehling T, Gao F, Schneider S, Sunyaev A. Exploring the far side of mobile health: information security and privacy of mobile health apps on iOS and Android. JMIR mHealth and uHealth. 2015;3(1):e8

# Distribución segura de claves en redes de sensores para IoT

Safwan Mawlood Hussein<sup>1</sup>

Engineering Faculty, Tishk International University, 44001 Erbil, KRG, Iraq  
Departamento de Matemáticas, Universidad de Almería, 04120, Almería, España  
[safwan.mawlud@ishik.edu.iq](mailto:safwan.mawlud@ishik.edu.iq)  
<http://www.ishik.edu.iq/engineering>

**Resumen** La profundización de la investigación y desarrollo en el campo de los sistemas embebido ha propiciado que el paradigma de lo que se conoce como Internet de las Cosas (IoT) esté ganando un gran impulso. Esta tecnología se está incrementando el uso de aplicaciones que hacen uso de dispositivos conectados de forma continua proporcionando y recibiendo información. IoT se construye sobre redes de sensores que permiten una gran variedad de soluciones para aplicaciones en muy diversos campos, tales como la sanidad, la industria, la defensa, etc. Las comunicaciones inalámbricas son indispensables para aprovechar estas redes de sensores, pero esto implica nuevos requerimientos para la seguridad y la privacidad de las comunicaciones. La seguridad en redes inalámbricas (WSN) es, por tanto, un desafío que ha de ser abordado para extender el uso de las aplicaciones de IoT. Además, hay que tener en cuenta las limitaciones de la capacidad de cómputo de los sensores, así como la energía que se consume. Esto ha hecho que las técnicas utilizadas en redes convencionales no sean aplicables en general. Ante tal escenario, los criptosistemas de tipo simétrico son preferibles, aunque aparece entonces el problema de la distribución de clave. Se propone, de este modo en este trabajo un método de distribución de claves en grupo escalable basado en curvas elípticas. El intercambio inicial de clave se lleva a cabo haciendo uso de información pública de cada uno de los sensores y, en tan solo dos rondas de comunicaciones. Las actualizaciones de clave siguientes se llevan a cabo mediante el uso de un único mensaje preservando la seguridad respecto a estados anteriores y posteriores de la red.

**Keywords:** Redes de sensores · Distribución de claves · Curvas elípticas.

## 1. Introducción

Una red de sensores, núcleo para IoT, consiste en una red de dispositivos diminutos de bajo coste y poder energético y que llevan a cabo tareas de monitorización. Las redes de sensores, usualmente inalámbricas pueden ser hoy en día encontradas en numerosas aplicaciones civiles, véase la Figura 1. Los dispositivos

se denominan nodos sensoriales y los datos monitorizados son usualmente recogidos y enviados a una estación base, y más tarde son procesados en servidores encargados de dicha tarea.



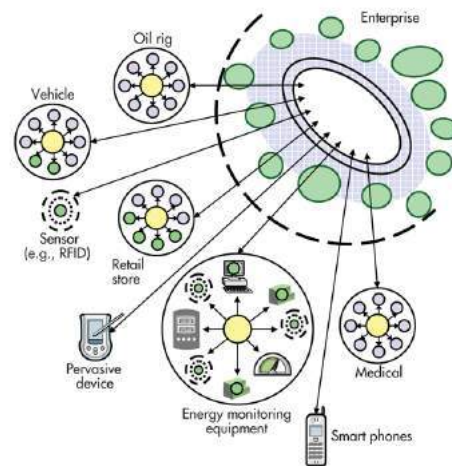
**Figura 1.** Redes de sensores y acciones de activación sobre sistemas ciberfísicos.

El control y distribución de claves es una preocupación fundamental debido al enorme desarrollo de las comunicaciones en grupo que se aplican en muy diversas situaciones actualmente. Una de ellas es el Internet de las Cosas, que usualmente utiliza redes ad hoc y miembros en una red que continuamente se unen y abandonan el grupo de comunicación. Un ejemplo puede apreciarse en la Figura 2.

Por este motivo el control de claves en grupos está convirtiéndose en una tendencia y existen numerosas aproximaciones que intentan proporcionar protocolos que aporten una solución eficiente y efectiva. En un protocolo distribuido de control de claves, los miembros colaboran para construir una clave común que será usada en lo sucesivo para proporcionar confidencialidad a las comunicaciones. De este modo, los miembros de la red se encuentran de algún modo federados y, al mismo tiempo, se obtiene un cierto nivel de confianza en los datos que son enviados a los servidores. Los ataques a estos servicios son bastante simples si las fuentes de los datos no son seguras. Estos servicios son usados para implementar técnicas de minado, con lo que un cierto nivel de confianza en los mismos es requerido. Un ejemplo interesante es el que se proporciona en “nodered” (<http://nodered.org/>), una herramienta que permite enlazar dispositivos hardware., APIs y servicios online, que es usada en ambientes como [1]. Una herramienta que por defecto no es segura, puede ser accedida por cualquiera a través de la dirección IP y el puerto a través del que está enviando datos y acceder al editor y llevar a cabo cambios. Sin embargo, en ambientes en los que se usa un protocolo de control de claves en grupo, los nodos están asegurados formando un grupo confidencial y los datos que se envían son de confianza.

El primer intercambio de clave y que dio origen a lo que hoy conocemos como criptografía de clave pública fue introducido por Diffie y Hellman en [5] y muestra como este hecho puede llevarse a cabo de un modo colaborativo entre dos partes comunicantes que se ponen de acuerdo en una clave común. Sin embargo, este proceso entre dos miembros de un grupo no escala cuando se trata de un proce-

## Distribución segura de claves en redes de sensores para IoT



**Figura 2.** Dispositivos agrupados y en cola para proveer servicio.

so de comunicación en un grupo cuyos miembros cambian de forma continua y constante. Por tanto, muchos autores han intentado obtener extensiones del intercambio a dos de Diffie-Hellman que escale para grupos dinámicos. Una de las propuestas más ampliamente conocidas y extendidas es CLIQUES, introducida en [8], donde los autores proporcionan dos extensiones distintas del protocolo de Diffie-Hellman y que se comportan de modo realmente eficiente en el proceso de refresco de la clave, haciendo uso de un único mensaje para este fin. En [6] los autores reportan un serio problema de seguridad de una de estas extensiones propuestas en [8], a menos que se utilice algún tipo de información que proporcione autenticación. En [3] los autores proponen una segunda versión de los protocolos anteriormente mencionados, mediante el uso de un doble intercambio de Diffie-Hellman, para, de algún modo, autenticar la clave construida tras los mismos, aunque estos no pueden evitar cualquier posible amenaza, a menos que se cuente con una infraestructura de clave pública por medio de certificados, lo que es materialmente imposible en el uso de comunicaciones en grupos tales como las que se usan en las redes ad hoc que definen estas redes de sensores. Sin embargo, en ambas aproximaciones, tanto la que hace uso de información adicional para la autenticación, como la inicialmente propuesta, el acuerdo inicial de una clave requiere de demasiadas rondas con demasiados mensajes y hacen que el ancho de banda consumido en esta etapa inicial sea, en algunas ocasiones, demasiado para el tipo de red y dispositivos utilizados en el grupo de comunicaciones.

Este es el caso también de [7], es decir, el intercambio inicial de mensajes que proporciona el primer acuerdo de clave no se comporta de un modo eficiente a medida que crece el número de miembros de la red de comunicaciones. Una aproximación destacada en este punto es la que se introduce en [10], donde el acuerdo inicial de clave se lleva a cabo en tan solo dos rondas, independientemente del número de miembros del grupo de comunicaciones, aunque las operaciones

de refresco de la clave de grupo revelan que esta propuesta no es tan eficiente como [8].

Sin embargo, más recientemente, en [2], los autores proponen un esquema que aúna las virtudes de las dos anteriores aproximaciones comentadas, es decir, se trata de una propuesta que proporcionando un alto nivel de confidencialidad, consta de un intercambio inicial de clave que se lleva a cabo tan solo en dos rondas, tal y como en la propuesta de [10], independientemente del número de usuarios del grupo de comunicaciones, a la vez que el proceso de refresco de la clave tiene lugar, como en [8], mediante un único mensaje enviado a toda la red.

Nuestro objetivo, por tanto, es el de proveer una aplicación práctica del protocolo introducido en [2] para un grupo de comunicaciones dinámico y haciendo uso de la criptografía de clave pública que proporciona la estructura ampliamente usada de las curvas elípticas.

## 2. Avances

Se ha configurado una red de sensores en la que los nodos sensoriales así como los nodos principales de la red fueron ejecutados con la configuración Minimum Viable Device (MVD), que consiste en un dispositivo equipado con un procesador ARM, con chipset Qualcomm MSM8974 Snapdragon 800, CPU Quad-core 2.3 GHz Krait 400, GPU Adreno 330 (not used). Storage: 16/32 GB. RAM 2 GB.

Se ha emulado el mencionado MVD usando gem5 [11], que es un simulador de micro-arquitectura muy preciso. Para la simulación de la micro-arquitectura con ARM ISA, actualmente solo el modelo O3 es funcional. Este modelo es capaz de simular un sistema completo.

Existe una clara necesidad de asignar el nodo más potente con el nodo que ejerce de distribuidor del mensaje de refresco final dado que las necesidades de cómputo se incrementan con el número de usuarios, lo que afecta al resto del protocolo. Todos los nodos excepto el nodo que actúa como controlador realizan siempre una suma y cuatro multiplicaciones modulares según se indica en [2]

La Figura 3 muestra que el nodo que representa al controlador necesita más tiempo en las operaciones cuando el tamaño de los enteros son más grandes. Se han probado tipos de datos nativos, dado que con los no nativos el nodo controlador experimenta un retraso grande. En cualquier caso, el protocolo se comporta bien con un número enorme de nodos, como por ejemplo del orden de 1024.

La Figura 4 muestra que el cuello de botella real se encuentra con la memoria necesitada para almacenar el mensaje que necesita ser enviado al resto de nodos de la red, dado que se trata de una estructura de datos que contiene una lista de items cuyo tamaño es proporcional al número de nodos participantes den la red de comunicaciones. La figura 4 muestra que incluso en el caso de 1024 nodos y usando una longitud de clave también de 1024, el tamaño del mensaje es de menos de 1MB (0.523776 MB).



Distribución segura de claves en redes de sensores para IoT

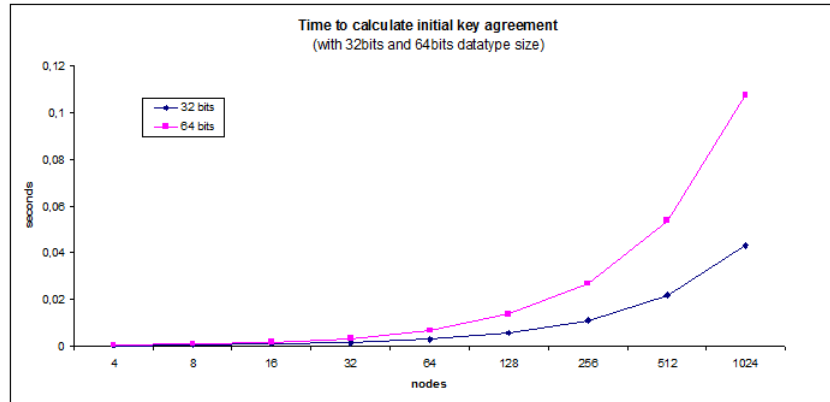


Figura 3. Tiempo que  $U_c$  precisa para crear el mensaje inicial.

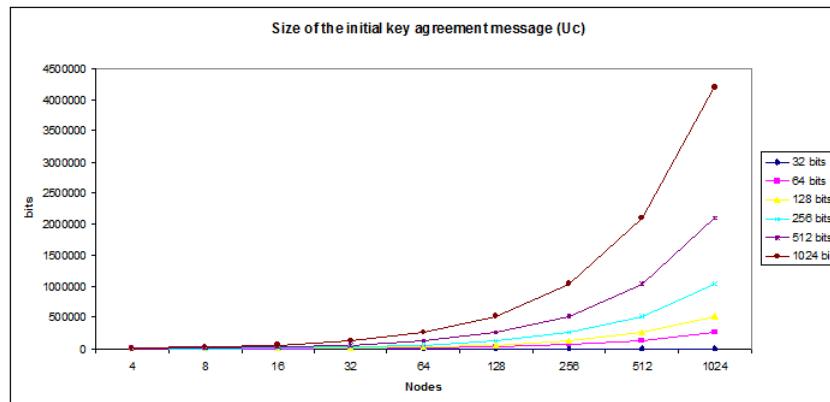


Figura 4. Tamao del mensaje creado por  $U_c$ .

### 3. Conclusiones

Un aspecto interesante de los sistemas embebidos (parte fundamental del Internet de las cosas) es el ambiente de operaciones restringido al que se encuentran atados (capacidad de cómputo, capacidad energética, etc...). En este trabajo hemos presentado un esquema altamente escalable para control de claves en grupos de comunicaciones. El acuerdo de una clave se lleva a cabo usando mensajes multicast. La propuesta reduce el tiempo de operación para el acuerdo de clave. Un método alternativo para evitar posibles cuellos de botella es agrupar los nodos en subgrupos, es decir, una segmentación de la red. Las operaciones de unión a cada uno de estos subgrupos se lleva a cabo mediante un proceso muy ligero al tiempo que eficiente.

### Referencias

1. A. Villalba, J.L.Pérez, D. Carrera, C. Pedrinaci, L. Panziera, servIoTicy and iServe: A Scalable Platform for Mining the IoT, *Procedia Computer Science*, vol. 52, 1022–1027, 2015.1877-0509.
2. López Ramos, J. A., Rosenthal, J., Schipani, D., and Schnyder, R. An application of group theory in confidential network communications. *Math. Meth. Appl. Sci.*, 41: 2294–2298. 2018.
3. G. Ateniese, M. Steiner, G. Tsudik, New Multiparty Authentication Services and Key Agreement Protocols, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 18(4), 1–13, 2000.
4. Burmester, M., Desmedt, Y.: A secure and efficient conference key distribution system, *Advances in Cryptology EUROCRYPT'94*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 959, 275–286, 2006.
5. Diffie, W.D., Hellman, M.E.: New directions in cryptography, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 22(6), 644–654, 1976.
6. Schnyder, R., Lopez-Ramos, J.A., Rosenthal, J., Schipani, D: An Active Attack on a Multiparty Key Exchange Protocol, *J. Algebra Comb. Disc. Struc. Appl.* 3(1), 31–36, 2015.
7. Steer, D.G., Strawczynski, L., Diffie, W., Wiener, M.: A Secure Audio Teleconference System, *Advances in Cryptology CRYPTO88*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 403, 520–528, 2000.
8. Steiner, M., Tsudik, G., Waidner, M.: Key agreement in dynamic peer groups. *IEEE Transactions of Parallel and Distributed Systems*, **11** (2000), no. 8, 769–780.
9. Ingemarsson, I., Tang, D., Wong, C.: A Conference Key Distribution System, *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 28, no. 5, pp. 714–720, 1982.
10. Burmester, M., Desmedt, Y.: A Secure and Efficient Conference Key Distribution System, *Proc. Advances in Cryptology - EUROCRYPT '94*, 1995.
11. Binkert, N., Beckmann, B., Black, G., Reinhardt, S.K., Saidi, A., Basu, A., Hestness, J., Hower, D.R., Krishna, T., Sardashti, S., Sen, R., Sewell, K., Shoaib, M., Vaish, N., Hill, M.D., Wood, D.A.: The gem5 simulator. *SIGARCH Comput. Archit. News*, 39(2):17, Aug. 2011

## Modelado y control de la temperatura en un invernadero por medio de reducción de modelos de alto orden con base en datos reales.

Montoya, A.P.<sup>1</sup>

Centro mixto CIESOL, Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario (ceiA3),  
Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, Almería 04120, España  
apmontoy@gmail.com

**Resumen.** Con el fin de aplicar técnicas modernas para el control de la temperatura del aire en un invernadero, se hace necesario contar con modelos que describan el comportamiento dinámico de éste. Se obtuvieron modelos reducidos para el diseño de controladores con base en datos reales. Se aplicó la técnica de identificación de sistemas para la obtención de modelos autorregresivos de alto orden tipo *MISO*, para describir el comportamiento dinámico de la temperatura del aire al interior de un invernadero y su correlación con otras variables ambientales. El modelo resultante es reducido empleando análisis transitorio. El modelo fue validado contra datos reales presentando una media del error inferior  $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un ajuste superior al 91%. Dicho modelo es empleado para el diseño de un controlador tipo *PI* y tres controladores por adelanto para la compensación de las perturbaciones. Los controladores fueron probados en simulación mostrando buen desempeño.

**Palabras Clave:** Identificación de sistemas · modelos autorregresivos · control por adelanto · control *PI* · simulación.

## Greenhouse modeling and temperature control through reducing high-order models based on real data

**Abstract.** In order to apply modern control techniques for controlling the inside air temperature a greenhouse, it is necessary to have models that describe the dynamic behavior of the environmental variables. Reduced models were obtained with the aim of design controllers based on real data. The system identification technique was applied to obtain *MISO*-type high-order autoregressive models, to describe the dynamic behavior of the air temperature inside a greenhouse and its correlation with other environmental variables. The resulting models were reduced using transient analysis. The overall model was validated employing real data, presenting a mean error below  $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  and an adjustment greater than 91%. This model was used to design a *PI* type controller and three feedforward controllers to compensate the environmental disturbances before these affect the air temperature. The controllers were tested in simulation showing good performance.

Modelado y control de la temperatura en un invernadero por medio de reducción de modelos...

**keywords:** System identification · autorregresive models · Feedforward control · *PI* Control · simulation

## 1 Introducción

La temperatura del aire afecta gran cantidad de procesos fisiológicos realizados por las plantas, en el cultivo bajo invernadero se hace necesario mantener dicha variable entorno a unos rangos adecuados para el crecimiento y desarrollo del cultivo [1], lo cual no es simple debido a que se encuentra sometida a fuertes perturbaciones [11], entre otros. La literatura presenta diversos modelos complejos que describen la dinámica de la temperatura del aire en el interior de un invernadero, los cuales no son adecuados para el diseño de controladores [2] tipo *PI*, por lo que se hace necesario contar con modelos simplificados.

El modelado de un sistema dinámico es un proceso complejo, que depende de las características de la dinámica del proceso objeto de estudio. Estos pueden ser basados en primeros principios o en datos experimentales. Existen diferentes técnicas de modelado empírico y debido a que estos sistemas presentan un comportamiento lineal en torno a determinados puntos de trabajo, los modelos lineales constituyen una de las herramientas más utilizadas en el modelado con fines de control. Se han desarrollado y comparado diversas estructuras de modelos lineales con base en datos obtenidos de modelos a escala de invernaderos, presentando los buenos resultados, pero los autores no establecen si dichos resultados pueden ser aplicables a invernaderos de tamaño real. Para invernaderos tipo Venlo ubicados en zonas frías se han propuesto múltiples modelos [3, 12], que no pueden ser extrapolados a zonas cálidas y otro tipo de invernaderos, dada la singularidad de los modelos.

Para controlar la temperatura interna de los invernaderos se han empleado diversas técnicas de control [7, 8], siendo las técnicas clásicas las más usadas a nivel comercial [4]. Al emplear éste tipo de técnicas no se tiene en cuenta las perturbaciones medibles que afecta la dinámica de la temperatura, por lo que sería provechoso emplear técnicas de control que compensen dichas perturbaciones antes de que estas modifiquen la variable a controlar.

En éste reporte se desarrolla un modelo de alto orden de la temperatura del aire al interior de un invernadero tipo Parral. Empleando la técnica de identificación de sistemas [6], con base en datos reales, se detalla el desarrollo de un modelo auto regresivo de múltiples entradas y una salida (*MISO*), que describe el comportamiento dinámico de la temperatura del aire en un invernadero y su correlación con las variables ambientales: temperatura externa ( $T_{ext}$ ), temperatura del suelo ( $T_s$ ), velocidad del viento ( $V_v$ ) y radiación ( $Rad$ ). Con base en la técnica de análisis transitorio [9] se simplifican los modelos de alto orden y se obtienen modelos de primer orden con fines de control. Empleando los modelos simplificados se desarrollan y simulan controladores por adelanto (*FF*) para la compensación de la  $T_{ext}$ ,  $Rad$  y  $V_v$ , además de un control proporcional-integral (*PI*) para la regulación de la temperatura del aire en un invernadero.

## 2 Estado y contexto de la tesis

El objetivo de la tesis doctoral es realizar aportaciones significativas en el campo del control climático de invernaderos, concretamente en el control de la temperatura diurna por medio de ventilación natural usando algoritmos de control por adelantado, y el control de la temperatura nocturna en época invernal, por medio del uso combinado de dos sistemas de calefacción usando una estrategia de control híbrida. El proyecto de tesis se viene desarrollando bajo la tutela del Grupo Automática, Robótica y Mecatrónica (ARM, TEP-197 del Plan Andaluz de Investigación) de la Universidad de Almería, en el marco del proyecto de investigación "Control y gestión óptima de recursos heterogéneos en distritos productivos agroindustriales integrando energías renovables (CHROMAE) (DPI2017-85007-R)", financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Donde el desarrollo de éste trabajo se está desarrollando siguiendo los lineamientos propuestos en el objetivo 2 del proyecto CHROMAE (Desarrollo de estrategias de control de las variables descriptivas de funcionamiento de los elementos del distrito para satisfacer los objetivos cumpliendo especificaciones técnicas y minimizando el uso de los recursos)

El estado de la tesis se encuentra en el último año de desarrollo y se plantea finalizarla éste año. En la actualidad ya se cuenta con dos capítulos escritos del documento de tesis, una publicación referente al control de la temperatura en época invernal empleando estrategias de control híbrido, se han realizado ensayos de identificación y control de temperatura en época cálida. Se está a la espera de realizar ensayos concernientes al control por adelantado de temperatura al interior del invernadero para validar los modelos que se resumen en éste documento.

## 3 Materiales y métodos

Se empleó la técnica de identificación de sistemas para obtener moldeos de alto orden que describan el comportamiento dinámico de la temperatura del aire del invernadero y su relación con las variables microclimáticas internas y externas.

La identificación de sistemas consiste en monitorear observar la respuesta de las variables de salida de un sistema, en éste caso la temperatura del aire, ante diversos estímulos en las variables de entrada, para éste caso el porcentaje de apertura de la ventilación y las perturbaciones medibles. Con base en el análisis de los datos se genera un modelo matemático lineal. Para desarrollar un modelo utilizando la técnica de identificación de sistemas es recomendable seguir los pasos propuestos por [6]: diseño del experimento, procesamiento de datos, selección de la estructura, estimación de parámetros y validación de modelos.

Para la etapa de diseño del experimento se diseñaron y aplicaron entradas tipo escalón y multinivel de ventilación con el objetivo de excitar de forma persistente la variable de salida [9]. Posteriormente se realizó el acondicionamiento de las señales y se dividieron los datos dos partes, unas para modelación y otras para validación cruzada. Para la selección del tipo de estructura se realizaron pruebas ensayo y error [5, 6].

## Modelado y control de la temperatura en un invernadero por medio de reducción de modelos...

Los modelos autorregresivos son unos de los mas usados para describir la dinámica de sistemas con base en datos experimentales. En dichos modelos su respuesta o salida depende de los valores pasados y presentes de las entradas y salidas. Se trata de sistemas lineales invariantes en el tiempo, que por norma general y dado que se trabaja con datos muestreados se representan en forma discreta [9]. Estos modelos estándar pueden representar gran cantidad de sistemas dinámicos que pueden ser descritos mediante la Figura 1, siendo una de las formulaciones más implementadas las tipo *ARX*, las cuales son empleados para describir gran cantidad de sistemas dinámicos complejos [6].

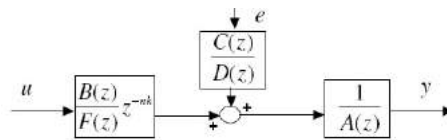


Figura 1: Estructura general de modelos autorregresivos

La estimación de los parámetros del modelo ( $A(z)$ ,  $B(z)$ ,  $C(z)$ ,  $D(z)$  y  $F(z)$ ) se plantea como un problema de optimización, en lo que se desea minimizar es la diferencia entre los datos reales y la salida o respuesta del modelo [6]. La estimación se realiza empleando el método de mínimos cuadrados recursivos, donde se busca encontrar las constantes numéricas de la ecuación que se ajusten a los datos reales de interés de acuerdo al criterio del mínimo error cuadrático.

Finalmente el ajuste de los modelos es evaluado por medio de técnicas de validación cruzada, la simulación y el análisis de residuos, donde se seleccionan los modelos que presenten mejor ajuste a los datos reales considerando la complejidad del modelo.

Se adelantaron experimentos de identificación de sistemas en un invernadero tipo Parral de 877 m<sup>2</sup> de superficie, con altura promedio de 3.6 m, ubicado en la Estación Experimental "Las Palmerillas" de la Fundación Cajamar, latitud 36° 48'N, longitud 2° 43' O y altitud de 63 m sobre el nivel del mar, como se detalla en la Figura 2. El invernadero cuenta con ventilación lateral y cenital motorizada, además del hardware-software necesario para adelantar los ensayos de identificación.

Teniendo en cuenta que la variable a modelar es la temperatura del aire al interior del invernadero y en base al conocimiento previo que se tiene del sistema, en el diseño del experimento se determinó que era necesario medir la temperatura del aire,  $T_s$ ,  $T_{ext}$ ,  $Rad$ ,  $V_v$ , la apertura de la ventilación lateral y cenital. Se realizaron un total de diez experimentos de identificación, en donde se llevaron a cabo diferentes combinaciones de porcentaje de apertura de ventilación a lo largo de diferentes días. En éstos ensayos se utilizaron señales de ventilación tipo escalón y multinivel, almacenándose los valores de cada una de las variables cada minuto. Una vez realizados los ensayos, todos los datos almacenados fueron procesados para eliminar los datos erróneos y filtrar los ruidos de alta frecuencia.

Modelado y control de la temperatura en un invernadero por medio de reducción de modelos...



Figura 2: Vista exterior invernadero

Para identificar los modelos siguiendo la metodología propuesta, se empleó el ToolBox de identificación de sistemas del Software MATLAB® [5], el cual permite dividir los datos para estimación y validación, seleccionar y probar diferentes estructuras de modelos. Por último, se validaron los modelos obtenidos mediante validación cruzada, análisis de residuos y del error de predicción.

Con base en el modelo  $ARX$  de alto orden, se procede a la etapa de reducción de modelo con fines de control [9]. En esta fase se analizan cada una de las curvas de reacción de forma manual y se obtienen funciones de transferencia de primer orden que relacionan la temperatura interna del invernadero con cada una de las entradas de interés. El desempeño de los modelos reducidos es comparado con el del modelo de alto orden y los datos reales mediante simulación dinámica.

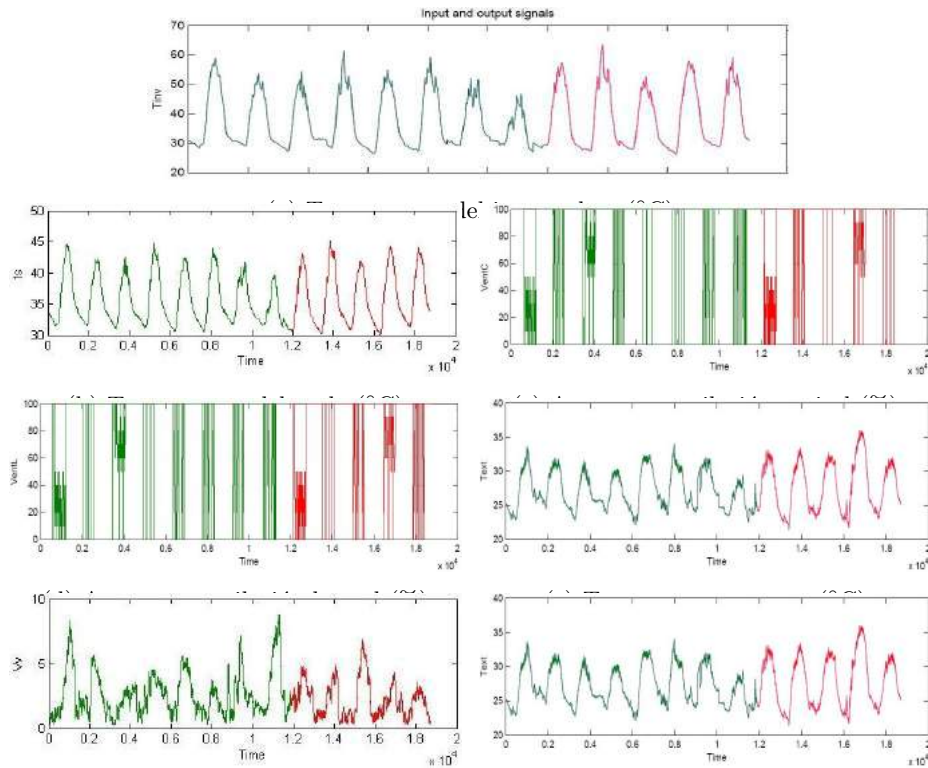
Partiendo de los modelos lineales simplificados es posible diseñar controladores de la temperatura interna del aire al interior del invernadero. Debido a que se trata de un sistema sometido a fuertes perturbaciones medibles [10], se propone compensarlas mediante controladores  $FF$  la  $V_v$ ,  $Rad$  y  $T_{ext}$ , además de emplear un controlador clásico tipo  $PI$  para la regulación de la temperatura interna en un rango de funcionamiento establecido.

## 4 Resultados

Siguiendo el procedimiento de identificación de sistemas se realizan los experimentos de identificación y se obtienen los datos del comportamiento dinámico del sistema, como se aprecia en la Figura 3. Los datos son procesados y limpiados, para posteriormente ser divididos en datos de modelamiento (verde) y datos de validación (rojo). Se analizaron más de mil modelos, donde se apreció que los modelos que contaban con la ventilación lateral, ventilación cenital, temperatura externa, velocidad del viento, temperatura del suelo y radiación, presentaban mejores ajustes (91.53%) que los que no contenían todas las variables.

El modelo que presentó mejor ajuste fue el tipo  $ARX_{443}$  con 6 entradas (2 entradas controlables y 4 perturbaciones medibles) y una salida (la temperatura del aire interna) cuya estructura se detalla en la ecuación (1). La descripción detallada del modelo se aprecia en la Tabla 1.

Modelado y control de la temperatura en un invernadero por medio de reducción de modelos...



(f) Velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ )

(g) Radiación ( $\text{W m}^{-2}$ )

Figura 3: Comportamiento dinámico de las variables climáticas y la apertura de las ventilaciones durante 13 días de ensayo en época estival.

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (1)$$

En la Tabla 1 se observa que el modelo  $ARX_{443}$  presenta un ajuste con los datos de validación cruzada del 91.53% y media de error comparable con el valor de precisión que presentan los sensores de temperatura utilizados. La Figura 4 muestra el ajuste entre la temperatura real del invernadero y la temperatura simulada con el modelo  $ARX_{443}$ , donde se aprecia que el modelo presenta una dinámica similar a la de los datos reales.

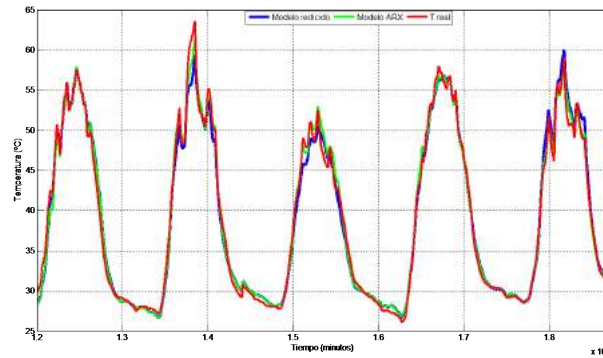
En la Figura 5 se puede apreciar la curva de reacción de la respuesta transitoria de cada una de las variables de entrada sobre la temperatura interna del invernadero. Se observa que todas las respuestas, exceptuando la temperatura del suelo, son de tipos sigmoidal y pueden ser modeladas por medio de funciones de transferencia de primer orden, mientras que la temperatura del suelo se puede modelar por medio de una función de transferencia de cuarto orden, como se aprecia en la Tabla 2. La comparación del comportamiento dinámico del modelo reducido frente a los datos reales y el modelo de alto orden se puede apreciar en la Figura 4.



Modelado y control de la temperatura en un invernadero por medio de reducción de modelos...

Tabla 1: Detalle de modelo de alto orden obtenido empleando la técnica de identificación de sistemas.

Modelo $ARX_{443}$	
Número de salidas	1: Temperatura del aire interna
Número de entradas	6: Ventilación cenital, ventilación lateral, temperatura externa, velocidad del viento, temperatura del suelo y radiación.
Ajuste	91.53%
Orden	8
na	[4]
nb	[4 4 4 4 4 4]
nk	[3 3 0 0 0 0]
Polinomio $A(q)$	$A(q) = 1 - 1.145q^{-1} - 0.1101q^{-2} + 0.07028q^{-3} + 0.1911q^{-4}$
Polinomio $B(q)$	$B_1(q) = -9.354 \times 10^{-5}q^{-3} - 3.428 \times 10^{-5}q^{-4} + 2.642 \times 10^{-6}q^{-5} - 4.608 \times 10^{-5}q^{-6}$ $B_2(q) = -0.0001363q^{-3} - 7.982 \times 10^{-5}q^{-4} - 6.114 \times 10^{-5}q^{-5} - 2.5 \times 10^{-5}q^{-6}$ $B_3(q) = 0.05246 - 0.06033q^{-1} + 0.00823q^{-2} + 0.003358q^{-3}$ $B_4(q) = -0.0001545 - 0.01797q^{-1} + 0.00133q^{-2} + 0.0134q^{-3}$ $B_5(q) = 5.191 \times 10^{-5} + 3.447 \times 10^{-5}q^{-1} + 0.857 \times 10^{-6}q^{-2} - 1.977 \times 10^{-5}q^{-3}$ $B_6(q) = 0.6663 - 0.4621q^{-1} - 0.2932q^{-2} + 0.0933q^{-3}$
Máximo error absoluto	3.2 °C
Media del error absoluto	0.7 °C
Desviación estándar	0.5 °C


 Figura 4: Comparación de la temperatura real del invernadero ( $T_{real}$ ), temperatura simulada con el modelo  $ARX_{443}$  (modelo  $ARX$ ) y temperatura simulada con el modelo reducido (Modelo reducido)

Donde  $T_{inv}$  es la temperatura del aire interior del invernadero,  $T_{ext}$  la temperatura del aire exterior,  $T_s$  la temperatura del suelo,  $V_v$  la velocidad del viento,  $Rad$  la radiación exterior y las posiciones de cada una de las ventilaciones,  $V_{enC}$  para ventilación cenital y  $V_{enL}$  para ventilación lateral. Puesto que ambos sistemas de ventilación funcionan de forma conjunta se suman las funciones de transferencia de cada una de las ventilaciones (ecuaciones (2) y (3)) y se obtiene la ecuación (11).

Con base en los modelos simplificados se diseñó y simuló un controlador  $PI$  empleando el método de cancelación de polos, con constante proporcional  $K_p = -25 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$  y tiempo integral  $T_i = 70$  segundos, empleando la función de

Modelado y control de la temperatura en un invernadero por medio de reducción de modelos...

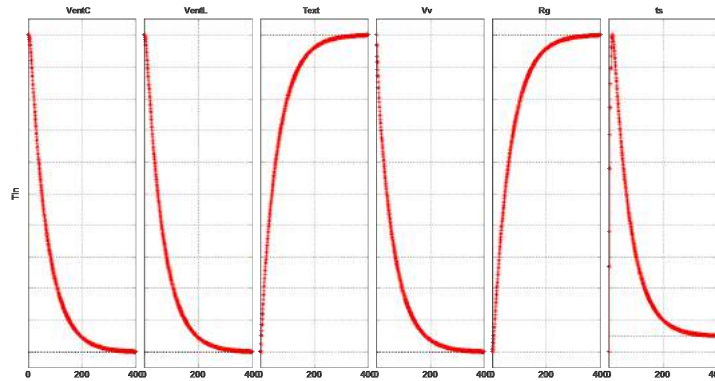


Figura 5: Respuesta transitoria del modelo de alto orden.

Tabla 2: Funciones de transferencia de modelos reducidos y controladores por adelanto

Funciones de transferencia	Controladores por adelanto
$\frac{T_{inv}}{Ven_C} = \frac{-0.0289}{70s + 1}$ (2)	
$\frac{T_{inv}}{Ven_L} = \frac{-0.0511}{70s + 1}$ (3)	
$\frac{T_{inv}}{T_{ext}} = \frac{0.628}{55.5s + 1}$ (4)	$FF_{T_{ext}} = \frac{43.96s + 0.628}{4.4s + 0.08}$ (5)
$\frac{T_{inv}}{V_v} = -\frac{0.564}{57s + 1}$ (6)	$FF_{V_v} = \frac{-39.48s - 0.564}{4.56s + 0.08}$ (7)
$\frac{T_{inv}}{Rad} = \frac{0.0119}{65s + 1}$ (8)	$FF_{Rad} = \frac{0.833s + 0.0119}{5.2s + 0.08}$ (9)
$\frac{T_{inv}}{T_s} = \frac{0.6663s^4 + 1.764s^3 + 4.382s^2 + 2.639s + 0.01448}{s^4 + 1.655s^3 + 6.026s^2 + 1.363s + 0.0201}$ (10)	
$\frac{T_{inv}}{Ven} = \frac{-0.08}{70s + 1}$ (11)	

transferencia dada en la ecuación (11). Al lazo de realimentación se le adicionó un bloque *antiwindup* para suavizar la acción integral del controlador, de forma que no saturase el actuador. Adicionalmente se diseñaron tres controladores por adelanto para compensar las variables,  $T_{ext}$ ,  $V_v$  y  $Rad$ . Dichos controladores fueron diseñados empleando el método de cancelación exacta usando las ecuaciones (4), (6) y (8) y se encuentran descritos por las funciones de transferencia dadas en las ecuaciones (5), (7) y (9).

Modelado y control de la temperatura en un invernadero por medio de reducción de modelos...

Los controladores por adelantado fueron programados en el ToolBox *Simulink* del software MATLAB<sup>®</sup>, en donde se realizaron las simulaciones de su comportamiento utilizando como planta el modelo de alto orden *ARX443*. En la Figura 6 se puede apreciar la respuesta del sistema empleando solo el controlador *PI* y la combinación *PI + FF*.

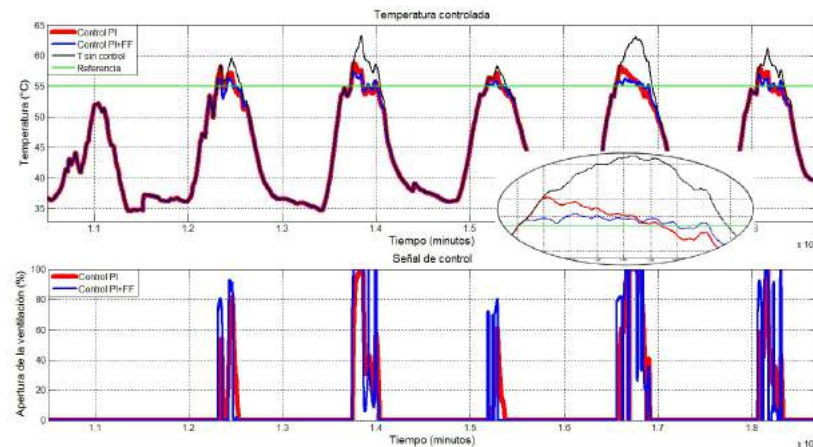


Figura 6: Comparación de la temperatura controlada empleando los controladores *PI+antiwindup* y *PI+ antiwindup+FF* y de las respectivas señales de control.

Se observa que la temperatura controlada con la estrategia que emplea *FF* presenta menor desviación de la referencia que el control *PI*. Sea precia que la acción por adelantado previene que la temperatura sobrepase la referencia constantemente suavizando la respuesta de la ventilación. El análisis de errores mostró que al emplear la estrategia combinada *PI+FF* se presentó una media del error menor que al emplear la estrategia *PI* sola, con valores de medias del error de 0.019 °C y 0.03 °C respectivamente.

## 5 Conclusiones y trabajos futuros

La metodología de modelado implementada permitió obtener controladores adecuados para la regulación de la temperatura del aire al interior de un invernadero. Por medio de la técnica de identificación de sistemas es posible obtener modelos de alto orden que describan de forma ajustada (91%) la dinámica de la temperatura interna de un invernadero y su correlación con las variables microclimáticas internas y externas. Dichos modelos pueden ser reducidos con fines de control con el objeto de diseñar controladores por adelantado que compensen las perturbaciones de temperatura externa, velocidad del viento y radiación antes que estas afecten la dinámica de la temperatura. El empleo de estrategias de control *FF* más control *PI* con *antiwindup* permiten reducir la desviación de

la consigna frente a estrategias tradicionales con la *PI* en simulación, más se hace necesario validar los resultados de la simulación en un montaje real para contratar los resultados.

Con el objetivo de validar los resultados de los controladores por adelantado propuesto se realizarán ensayos de control de la temperatura en el invernadero de la Estación Experimental "Las Palmerillas" de la Fundación Cajamar, con lo cual se terminará la parte experimental del proyecto de tesis.

## Referencias

1. Bakker, J., Bot, G., Challa, H., Van de Braak, N.J.: Greenhouse climate control. An integrated approach. Wageningen Academic Publishers, Wageningen (1995)
2. Berenguel, M., Rodríguez, F., Guzmán, J.L., Lacasa, D., Pérez-Parra, J.: Greenhouse diurnal temperature control with natural ventilation based on empirical models. *Acta Horticulturae* **719**, 57–64 (2006). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.4>
3. Davis, P.F., Hooper, A.W.: Improvement of greenhouse heating control. *IEE Proceedings D: Control Theory and Applications* **138**(3), 249–255 (1991). <https://doi.org/10.1049/ip-d.1991.0035>
4. Kamp, P.G.H., Timmerman, G.J.: Computerized Environmental Control in Greenhouses: A Step by Step Approach. IPC-Plant (2002), <https://books.google.com.co/books?id=BNDsvgEACAAJ>
5. Ljung, L.: System identification toolbox. For use with MATLAB. The MathWorks, Inc (1995)
6. Ljung, L.: System Identification: Theory for the User. Prentice Hall PTR, New Jersey (1999)
7. Piñón, S., Camacho, E.F., Kuchen, B., Peña, M.: Constrained predictive control of a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture* **49**(3), 317–329 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.08.007>
8. Ramírez-Arias, A., Rodríguez, F., Guzmán, J.L., Berenguel, M.: Multiobjective hierarchical control architecture for greenhouse crop growth. *Automatica* **48**(3), 490–498 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.01.002>, <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2012.01.002>
9. Rivera Flores, D.E.: Una metodología para la identificación integrada con el diseño de controladores IMC-PID. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial* **4**(4), 5–18 (2007). [https://doi.org/10.1016/s1697-7912\(07\)70240-6](https://doi.org/10.1016/s1697-7912(07)70240-6), [http://dx.doi.org/10.1016/S1697-7912\(07\)70240-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1697-7912(07)70240-6)
10. Rodríguez Díaz, F.: Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero. Ph.D. thesis, Universidad de Almería Escuela Politécnica Superior (2002)
11. Sigrimis, N., Rerras, N.: A linear model for greenhouse control. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **39**(1), 253–261 (1996), <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0029679282&partnerID=40&md5=0d657c599b4f12c9699519e2aa3ba807>
12. Young, P., Chotai, A.: Data-based mechanistic modeling, forecasting, and control. *IEEE Control Systems Magazine* **21**(5), 14–27 (oct 2001). <https://doi.org/10.1109/37.954517>

# Actualización de la plataforma IoT para la agricultura intensiva con MaaS e integración de nuevas plataformas

Manuel Muñoz Rodríguez

Centro Mixto CIESOL, ceiA3, Departamento de Informática, Universidad de Almería.

**Resumen** El siguiente artículo describe los avances obtenidos durante el año 2019 relacionados con la temática de la tesis. Un nuevo término (GMaaS) ha sido desarrollado durante este último año, el cual está basado en modelos de invernaderos como servicio. Esta solución es la que los modelos están disponibles en la nube como servicios en línea y sin ninguna dependencia de software/dispositivos permite acceder a los modelos de clima, crecimiento de cultivos y riego a través de un servicio REST API. Los modelos pueden ser solicitados para diferentes objetivos: como herramienta de simulación donde las entradas del modelo pueden ser obtenidas de datos históricos o de un servicio de previsión meteorológica; como sensor virtual en tiempo real para propósitos de control/feedback donde el modelo es invocado sólo un paso adelante; y como servicio gráfico DSS desde una aplicación web. Otras aportaciones relacionadas con la tesis han sido: integración completa con sistemas externos en una única plataforma IoT, la integración de una arquitectura de IoT para la gestión de recursos hídricos en entornos agroindustriales.

**Keywords:** GMaaS · REST API · DSS · IoT.

## 1. Introducción

Un artículo reciente de Business Insider señala que Internet de las cosas (IoT) está en aumento en la agricultura. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas, el mundo necesitará aumentar la producción en un 70 % más en un periodo de 30 años. IoT es la interconexión de dispositivos físicos que tienen conectividad de red que permite recopilar e intercambiar datos entre ellos. Esta tecnología es una gran oportunidad para que los agricultores puedan monitorizar sus cultivos y aumenten la productividad [1].

Esta tesis se encuentra dentro del marco del proyecto europeo Internet of Food and Farms 2020. El cual tiene como objetivo el desarrollo de soluciones inteligentes para la Internet de las Cosas para el sector agroalimentario.

Uno de los principales objetivos de la tesis es ayudar a solucionar el problema de interoperabilidad que existe entre diferentes proveedores de servicios, lo que significa que cada empresa encargada de la venta de sensores y actuadores dispone de su propia plataforma cerrada e inaccesible para la consulta de los datos, lo

que plantea un problema dada la necesidad de consultar varias plataformas para obtener la información de un único invernadero y además evitando la interconexión entre servicios, lo cual sería un punto fuerte a la hora de complementar las carencias de un sistema con otro.

Hoy en día, el sector industrial está sujeto a una gran modificación y adaptación debido a la revolución de las nuevas tecnologías. Nuevos conceptos como IoT, Cloud Computing, Big Data, o Industry 4.0 están cambiando el modo de operación, el acceso a los datos, la gestión de datos y las metodologías de apoyo a la decisión en las empresas. Entre todas estas tecnologías, todo como un Servicio (XaaS) es una tendencia reciente en la que las aplicaciones o productos se entregan a través de Internet en lugar de ser accedidos localmente con herramientas independientes [2].

El sector agrícola es un ejemplo de este cambio tecnológico. Por ejemplo, Smart Farming representa la integración de nuevas tecnologías en el campo de la agricultura, facilitando la llamada "tercera revolución verde". Esta revolución se basa en la combinación de herramientas como el IoT [3] [4], el procesamiento de datos en Big Data [5], la computación en nube [6], y la inteligencia artificial o Deep Learning [7]. Como resultado, la agricultura de precisión está siendo omnipresente y se está incorporando en los sistemas de apoyo a la toma de decisiones asistida por ordenador para la gestión de las explotaciones agrícolas. El AgroDSS es un claro ejemplo, que es una caja de herramientas de apoyo a las decisiones basada en la nube para integrar los sistemas de información de gestión agrícola existentes, permitiendo a los agricultores cargar sus propios datos, utilizar varios métodos de análisis de datos y recuperar sus resultados [8].

Así pues, otros de los objetivos de la tesis se centra en este contexto, en el que se trata de aportar nuevos servicios como soluciones basadas en las nubes para la agricultura, y concretamente en el ámbito de la producción de cultivos de invernadero. El objetivo principal de los invernaderos es aumentar los beneficios económicos del agricultor que busca un equilibrio entre los ingresos, el costo de obtener las condiciones climáticas óptimas para el crecimiento del cultivo, y el cumplimiento de las normas sobre agricultura y medio ambiente. Por lo tanto, se requiere un conocimiento profundo de todas estas diferentes dinámicas de procesos en el sistema de invernadero. La dinámica existente en los invernaderos ha sido ampliamente estudiada en la literatura, donde se dispone de modelos de clima de invernadero, modelos de crecimiento de cultivos y modelos de irrigación [9]. Sin embargo, la mayoría de estos modelos se aplican con fines de investigación o se incluyen como parte de sistemas específicos de DSS. Por lo tanto, el uso de los modelos por otros usuarios (investigadores o agricultores) suele ser limitado y complicado.

Por ese motivo, se presenta una solución en la que los modelos están disponibles en la nube como servicios en línea y sin ninguna dependencia de software/dispositivos. La arquitectura propuesta se denomina Greenhouse Models as a Service (GMaaS) [10], donde se puede acceder a los modelos de clima, crecimiento de cultivos y riego a través de un servicio REST API.

## 2. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis doctoral es el desarrollo de sistemas de ayuda a la toma de decisiones en cultivos de invernadero basados en tecnologías relacionadas con el IoT. Este objetivo conlleva investigaciones en el ámbito del modelado de datos en IoT, interconectividad entre diferentes servicios e integración de modelos predictivos para ayuda en la toma de decisiones. Como se ha indicado, la tesis doctoral se circunscribe en este reto, pudiéndose distinguir los siguientes subobjetivos para cubrir el objetivo principal:

1. Análisis del estado tecnológico en la aplicación de las tecnologías relacionadas con el IoT en la producción de cultivo en invernadero. Estudio de mejoras que se pueden ofrecer respecto al estado actual.
2. Análisis y desarrollo de un modelo de datos para la implementación del paradigma del IoT en agricultura intensiva.
3. Estudio y diseño de una arquitectura IoT para su aplicación en agricultura protegida.
4. Desarrollo de una plataforma tecnológica IoT que facilite la toma de decisiones del agricultor y garantice la interoperabilidad e interconexiones de diferentes proveedores.
5. Desarrollo de algoritmos que permitan fusionar datos heterogéneos, modelos y sistemas de predicción para optimizar distintas funciones de coste relacionadas con la producción, teniendo en cuenta las distintas escalas temporales asociadas al problema. Integración de modelos de clima, riego y crecimiento de cultivo.
6. Establecimiento de un sistema de alertas.
7. Realización de ensayos experimentales para validar la tecnología desarrollada.

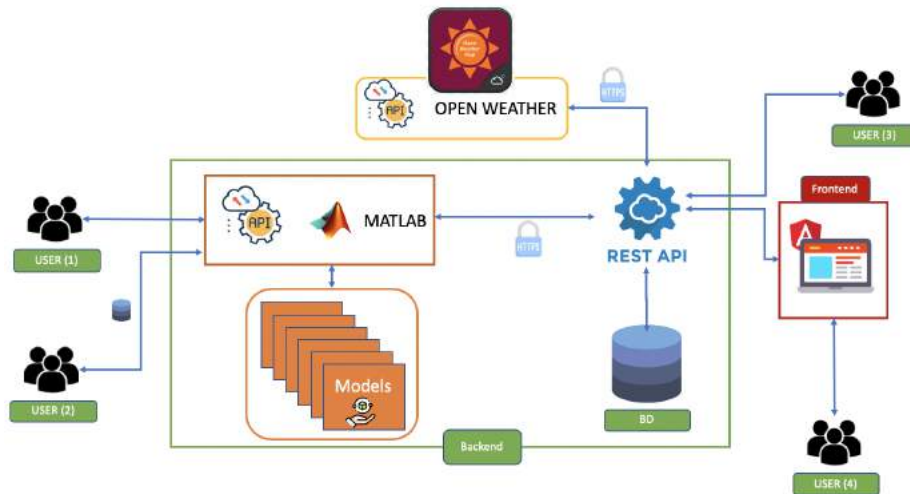
## 3. Avances

Este apartado resume los avances en el desarrollo de la tesis. Se han realizado aportes y contribuciones en algunos de los objetivos mencionados anteriormente, los cuales serán descritos a continuación.

- *Greenhouse Models as a Service (GMaaS) for Simulation and Control* En este trabajo se ha presentado una solución basada en la nube para proporcionar modelos de invernadero como un servicio. El sistema propuesto permite utilizar los modelos con fines de investigación como un simulador o como un sensor virtual en tiempo real, o con fines agrícolas/empresariales utilizando una aplicación gráfica basada en la web. Se pueden utilizar diferentes datos de origen para las capacidades de simulación, siendo posible utilizar datos históricos, datos de previsiones meteorológicas o información actual de los sensores. Se dispone de modelos para el clima de los invernaderos, el crecimiento de los cultivos de tomates y pimientos y el riego mediante el servicio resultante de REST API (ver Fig. 1). El modelo de crecimiento del cultivo

Actualización de la plataforma IoT para la agricultura intensiva con MaaS e integración...

de tomates se utilizó para mostrar las principales capacidades del sistema. Este artículo fue presentado en el congreso IFAC en Australia y publicado en ELSAVIER IFAC-PapersOnLine [10].

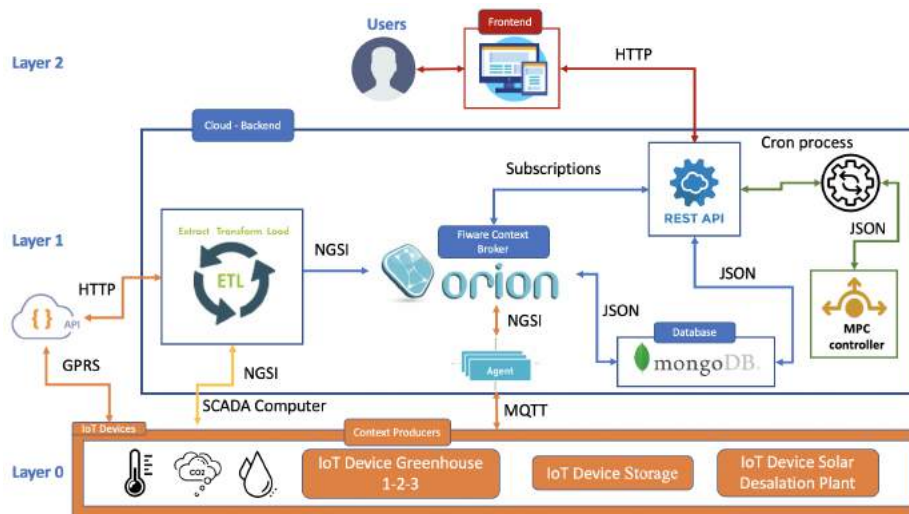


**Figura 1.** Arquitectura del sistema GMaaS

- *An IoT Architecture for Water Resource Management in Agroindustrial Environments: A Case Study in Almería (Spain)*. En este artículo se abordó la elaboración de una arquitectura (ver Fig. 2) de gestión del agua basada en IoT que se aplicará en los distritos agroindustriales, incluidas las plantas de desalinización, la conexión a la red de servicios públicos y varios agentes consumidores. El núcleo de la plataforma se basaba en el uso de FIWARE y un controlador MPC que reflejaba la estrategia operacional en tiempo real. Como banco de pruebas de la simulación se utiliza un estudio de caso inspirado en tres instalaciones reales situadas en Almería (sudeste de España). Los resultados obtenidos muestran cómo se puede ahorrar alrededor del 75 % del total de los costos de explotación con la aplicación del enfoque propuesto, que podría ser muy significativo para disminuir los costos del agua desalada y, por lo tanto, para mantener la sostenibilidad del sistema agrícola. Artículo publicado en la revista Sensors [11].
- *Experiencias en el uso de Internet de las Cosas en las tareas de producción en invernaderos mediterráneos*. En este trabajo se presenta un caso de estudio real de aplicación de IoT en agricultura protegida en el sureste del mediterráneo. En el se describen los ensayos realizados en siete invernaderos comerciales en producción y un invernadero experimental describiendo los beneficios y desventajas del uso comercial de estaciones IoT. La plataforma ha sido probada durante un ciclo de cultivo, con gran aceptación por parte



Actualización de la plataforma IoT para la agricultura intensiva con MaaS e integración...



**Figura 2.** Arquitectura del sistema agroindustrial

de los agricultores incorporados al proyecto IoF2020, que no sólo la utilizan y les sirve de apoyo en las decisiones sino que existe un feedback sobre posibles mejoras. Entregado recientemente en el congreso sibeh2020 en Portugal disponible en Marzo de 2020.

#### 4. Conclusiones

En la presente tesis doctoral se pretende desarrollar sistemas de ayuda a la toma de decisiones en cultivos de invernadero basados en tecnologías relacionadas con el IoT, interoperabilidad entre diferentes servicios y desarrollo de una aplicación la cual englobe todo lo mencionado.

Este año se dio un paso adelante enfocando la tesis doctoral en los sistemas a la ayuda a la toma de decisiones como servicios, dando lugar al termino GMaaS publicado en el congreso [10] y un nuevo artículo de revista Q1 ampliando estos sistemas el cual esta pendiente de aprobar. Además se centro en la integración del IoT en diferentes sistemas agroindustriales dando lugar al artículo [11] en la revista Sensors Q1. Otra contribución fue los problemas derivados de uso de estaciones comerciales en entornos hostiles como invernaderos enviado al congreso.

#### Referencias

1. J. Liu and J. P. Tao, "Research and application of agricultural greenhouse intelligence platform based on IoT (Internet of Things) and cloud computing," Int. J. Simul. - Syst., Science and Tech., vol. 17, no. 5, p. 8.1-8.5, 2016.

Actualización de la plataforma IoT para la agricultura intensiva con MaaS e integración...

2. Duan, Y. et al. (2015) 'Everything as a Service (XaaS) on the Cloud: Origins, Current and Future Trends', in 2015 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing. IEEE, pp. 621–628. doi: 10.1109/CLOUD.2015.88.
3. Liu, J. and Tao, J. P. (2016) 'Research and application of agricultural greenhouse intelligence platform based on IoT (Internet of Things) and cloud computing', International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology. UK Simulation Society, 17(5). doi: 10.2013/IJSSST.A.17.05.08.
4. Gubbi, J. et al. (2013) 'Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions', Future Generation Computer Systems, 29, pp. 1645–1660. doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
5. Kamilaris, A., Kartakoullis, A. and Prenafeta-Boldú, F. X. (2017) 'A review on the practice of big data analysis in agriculture', Computers and Electronics in Agriculture. Elsevier, 143, pp. 23–37. doi: 10.1016/J.COMPAG.2017.09.037.
6. Shamshiri, R. et al. (2018) 'Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture', International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(1), pp. 1–22. doi: 10.25165/IJABE.V11I1.3210.
7. Kamilaris, A. and Prenafeta-Boldú, F. X. (2018) 'Deep learning in agriculture: A survey', Computers and Electronics in Agriculture. Elsevier, 147, pp. 70–90. doi: 10.1016/J.COMPAG.2018.02.016.
8. Rupnik, R. et al. (2019) 'AgroDSS: A decision support system for agriculture and farming', Computers and Electronics in Agriculture. Elsevier B.V., 161, pp. 260–271. doi: 10.1016/j.compag.2018.04.001.
9. Rodríguez, F. et al. (2014) Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth. doi: 10.1007/978-3-319-11134-6.
10. Muñoz, M. et al. (2019) 'Greenhouse Models as a Service (GMaaS) for Simulation and Control', IFAC-PapersOnLine, 52(30), pp. 190–195. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.520.
11. Muñoz, M. et al. (2020) 'An IoT Architecture for Water Resource Management in Agroindustrial Environments: A Case Study in Almería (Spain)', Sensors. MDPI AG, 20(3), p. 596. doi: 10.3390/s20030596.

## Clasificación de cultivos utilizando imágenes multispectrales y software eCognition

Luis Ortega López<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Almería,  
Departamento de Informática,  
Almería, España.  
lol.teleco@gmail.com

**Resumen.** La línea de investigación se basa en el uso de imágenes de diferentes espectros arrojadas por una cámara multispectral (Sequoia Parrot). Dichas imágenes han sido procesadas para eliminar las distorsiones propias de las lentes y poder reconstruir una imagen completa y superpuesta de cultivos en un entorno real. Actualmente se está utilizando un software puntero en análisis y extracción de información sobre imágenes denominado eCognition. Este software utiliza un método novedoso basado en identificar diferentes jerarquías de objetos en la propia imagen, que permite un análisis de grupos de píxeles como un único objeto, a diferencia de los métodos clásicos de análisis de imágenes que procesan los píxeles de la imagen por separado. Este software nos permite elaborar algoritmos multispectrales complejos para clasificar y separar la materia vegetal del resto del entorno, así como nos proporciona herramientas para poder llegar a segmentar regiones concretas de las plantas y poder llegar a hacer una clasificación basada en especies como objetivo futuro.

**Palabras clave:** Cultivos, procesado de imagen, multispectral, eCognition, segmentación, clasificación, agricultura de precisión.

### 1 Introducción

El uso de cámaras multispectrales y el abaratamiento debido a la industrialización de su producción abre nuevas posibilidades de investigación en el campo de la agricultura de precisión. El trabajo desarrollado se ha centrado en un modelo concreto de cámara multispectral, la Parrot Sequoia (Figura 1), que cuenta con cuatro receptores de espectros de interés en cultivos: NIR (near infrared 790±40nm), GRE (green 550±40nm), RED (red 660±40nm) y REG (red edge 735±10nm).

Clasificación de cultivos utilizando imágenes multiespectrales y software eCognition



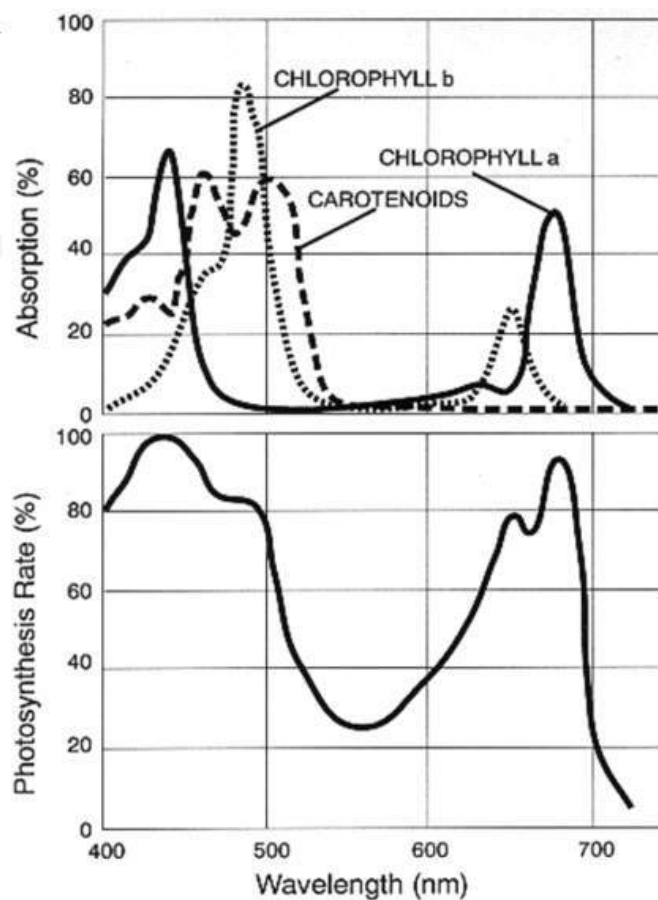
**Fig. 1.** Cámara multiespectral Parrot Sequoia

Los espectros seleccionados por el fabricante de la cámara cuentan con un gran interés en multitud de campos. Dentro del campo de la industria agrícola y agroalimentaria, podemos destacar los siguientes usos:

La espectroscopia en el **infrarrojo cercano (NIR)** se aplica ampliamente en la agricultura para determinar la calidad de los forrajes para ganado, granos y productos de granos, semillas oleaginosas, café, té, especias, frutas, verduras, caña de azúcar, bebidas, grasas y aceites, productos lácteos, huevos, carne y otros productos agrícolas. Se utiliza ampliamente para cuantificar la composición de los productos agrícolas porque cumple los criterios de ser preciso, fiable, rápido, no destructivo y barato [1]. El comportamiento de la reflectancia de la materia vegetal en el espectro NIR podrá variar en función del tipo de clorofila que esté presente en la materia vegetal.

El **borde rojo (REG)** hace referencia a la región de cambio rápido en la reflectancia de la vegetación en el rango del infrarrojo cercano del espectro electromagnético. La clorofila contenida en la vegetación absorbe la mayor parte de la luz en la parte visible del **espectro rojo (RED)**, pero refleja las longitudes de onda superiores a 700 nm. El cambio puede ser de un 5% a un 50% de reflectancia al pasar de 680 nm a 730 nm, y la utilidad para las estructuras vegetales de reflejar estos espectros es que impide el sobrecalentamiento durante la fotosíntesis. Esta particularidad define la región espectral de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), que se puede comprobar en la Figura 2.

Clasificación de cultivos utilizando imágenes multiespectrales y software eCognition



**Fig. 2.** Espectros de absorción para la clorofila A, la clorofila B y los carotenoides extraídos en una solución de cloroplastos [2].

La variabilidad en la reflectancia en una ventana espectral tan reducida permite posibilidades muy interesantes en telemetría. El fuerte brillo de la materia vegetal en la fotografía infrarroja se utiliza ampliamente en teleobservación para elaborar índices de vegetación (por ejemplo, Índice de vegetación de diferencia normalizada). De hecho se ha sugerido que podría ser útil para detectar los organismos recolectores de luz en planetas distantes [3].

De la misma manera, el **espectro verde (GRE)** es fuertemente reflejado por la materia vegetal, ya que ambos tipos de clorofila son incapaces de absorber las frecuencias medias del espectro visible. Se espera una gran reflexión de la luz a esta frecuencia en la materia vegetal.

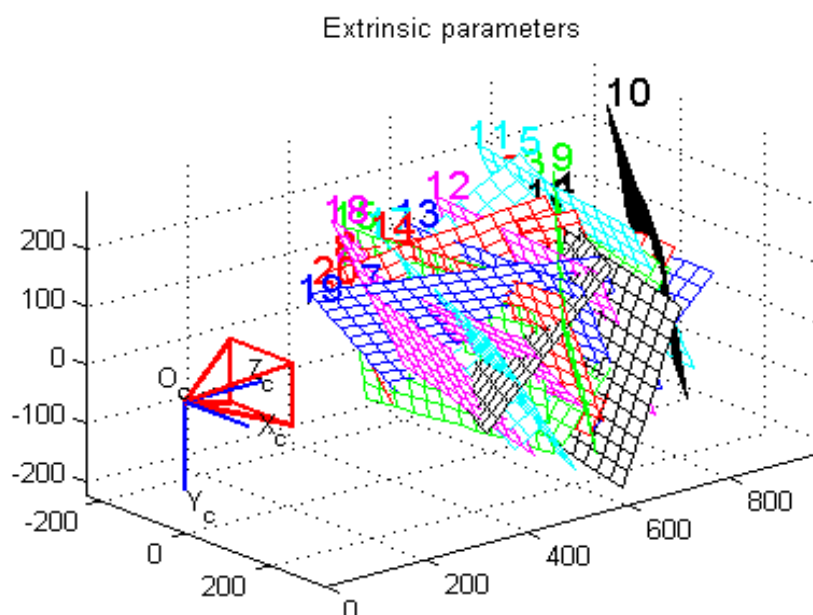
La estrategia de caracterización de la materia vegetal se basa en la diferente reflectancia que presentará a las frecuencias de registro de la cámara. A pesar de que existe un margen de incertidumbre en las frecuencias registradas, la distribución de dichas frecuencias en el espectro de interés permitirá presumiblemente discernir la materia vegetal, e incluso diferenciar las diferentes estructuras vegetales entre sí.

## 2 Trabajo desarrollado

El trabajo desarrollado tiene como objetivo separar y clasificar la materia vegetal del resto del entorno, utilizando los registros tomados en los espectros anteriormente mencionados. Para alcanzar este objetivo, los registros son sometidos a un preprocesamiento, y finalmente llevados al entorno del software eCognition, que permite una clasificación basada en grupos de píxeles. A continuación se describe el procedimiento de caracterización de las lentes, preprocesado y análisis de las diferentes imágenes:

- Se obtienen imágenes de calibración de las diferentes lentes.
- Se obtienen los parámetros característicos ópticos de las lentes mediante el toolbox de calibración de Matlab, para poder realizar una corrección de la distorsión con calibración obtenida.
- Se obtienen las imágenes reales de campo con la cámara multiespectral.
- Se corrige la distorsión de las imágenes con la calibración obtenida.
- Se realiza un corregistro de los diferentes espectros en una única imagen multiespectral.
- Se realiza el procesado de la imagen multiespectral con el software eCognition para determinar la materia vegetal en la imagen.
- Una vez obtenida la materia vegetal, es posible aplicar estrategias de clasificación con el objetivo de segmentar las diversas partes de las plantas, e incluso clasificar las plantas por especie.

Para el primer paso, se ha seguido una estrategia de calibración clásica basada en fotografiar un elemento conocido, en este caso un damero, y calcular las aberraciones de la lente y sus parámetros característicos en función de la distorsión obtenida. Este proceso se ha realizado con Matlab utilizando el Camera Calibration Toolbox [4]. En la Figura 3 puede comprobarse cómo el Toolbox es capaz de reconocer las diferentes posiciones del elemento conocido respecto a la cámara, obteniendo una media de los parámetros de las lentes por separado.



Clasificación de cultivos utilizando imágenes multiespectrales y software eCognition

**Fig. 3.** Matlab Calibration Toolbox en el proceso de calibración de una de las lentes. El damero es reconocido en diferentes posiciones y se calculan los parámetros de la cámara como la media de todas ellas, eliminando las imágenes con mayor desviación.

Las imágenes de campo (Figura 4) son entonces corregidas con los parámetros calculados, obteniendo varias imágenes que luego podemos superponer manualmente utilizando una referencia conocida (Figura 5). Este proceso lo realizamos con Matlab, y obtenemos una imagen multiespectral que podemos utilizar en fases posteriores de nuestro procesamiento. Se adjunta una representación RGB de una imagen multiespectral en la Figura 6.

REG                      GRE                      RED                      NIR

**Fig. 4.** Imágenes de campo tomadas con la Parrot Sequoia.

REG                      GRE                      RED                      NIR

**Fig. 5.** Imágenes rectificadas al plano principal tras la corrección de la distorsión.



**Fig. 6.** Representación RGB de una imagen multiespectral.

#### Clasificación de cultivos utilizando imágenes multiespectrales y software eCognition

La imagen multiespectral obtenida puede utilizarse en diversidad de aplicaciones. Nosotros la tomaremos como base para el software eCognition [5], que es capaz de analizar imágenes multiespectrales e hiperespectrales.

La fortaleza del software eCognition es que es capaz de analizar una imagen mediante clústeres de píxeles similares, en vez de pixel a pixel. Esta estrategia permite realizar operaciones complejas de segmentación, análisis y clasificación a nivel de cluster.

Actualmente el trabajo de investigación consiste en establecer las mejores estrategias posibles para separar la materia vegetal del suelo. A priori se desconoce el comportamiento del terreno en las frecuencias registradas, pero por la selección de las frecuencias es razonable suponer que la firma espectral del suelo será sustancialmente diferente a la de la materia vegetal. Puede comprobarse un ejemplo de la clusterización obtenida, así como de la clasificación suelo/material vegetal en la Figura 7.

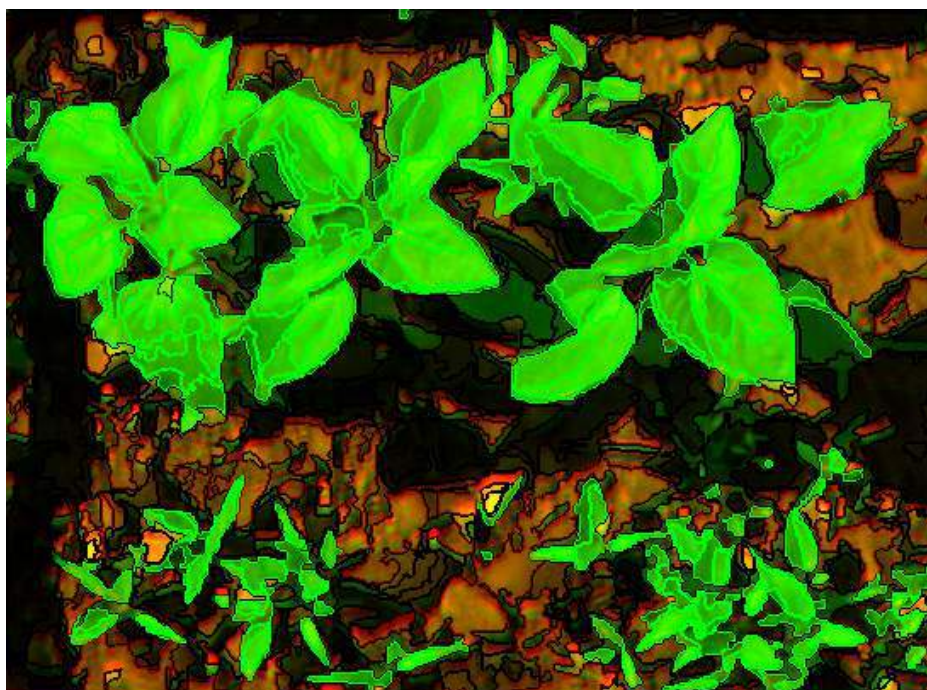


Fig. 7. Ejemplo de trabajo actual de clusterización y clasificación con el software eCognition.

Aunque actualmente el algoritmo de clasificación se basa en niveles de reflectancia relativos, el software permite muchas posibilidades, como comprobar el nivel de correlación entre formas geométricas y los clústeres de píxeles obtenidos.

El software eCognition resulta en una herramienta potente de análisis multiespectral, sobre la cual será necesario realizar un trabajo de ajuste hasta determinar los mejores algoritmos para poder alcanzar los objetivos propuestos.

### 3 Conclusiones y líneas futuras de investigación

Las principales conclusiones extraídas hasta la fecha son las siguientes:

- La selección de registros espectrales de la cámara Parrot Sequoia es interesante para el estudio de materia vegetal.
- La firma espectral del suelo estudiado y de la materia vegetal es suficientemente diferente para permitir una clasificación simple basada en niveles de luminosidad percibidos.



Clasificación de cultivos utilizando imágenes multispectrales y software eCognition

- eCognition es una herramienta muy interesante para procesado de imágenes multispectrales, ya que permite adoptar una perspectiva mayor al trabajar con clústeres de píxeles, y proporcionar algoritmos multispectrales para clasificación y segmentación

Como tareas futuras, queda abierta la posibilidad de ampliar el estudio a diferentes especies de plantas y diferentes tipos de suelo. También es muy interesante seguir trabajando en los algoritmos de clasificación para que estos sean capaces de discriminar las diferentes plantas, y clasificar secciones enteras como hojas o tallos. Idealmente, el objetivo final sería segmentar y clasificar especímenes de plantas completas con la información que nos proporciona esta cámara y los algoritmos adecuados.

## Referencias

1. Burns, Donald; Ciurczak, Emil, eds. (2007). Handbook of Near-Infrared Analysis, Third Edition (Practical Spectroscopy). pp. 349–369. ISBN 9781420007374.
2. GS Singhal, G Renger, SK Sopory, K-D Irrgang and Govindjee, Narosa Publishers/New Delhi; and Kluwer Academic/Dordrecht, "Concepts in Photobiology: Photosynthesis and Photomorphogenesis", pp. 11-51.
3. Seager, S.; Turner, E.L.; Schafer, J.; Ford, E.B. (2005). "Vegetation's Red Edge: A Possible Spectroscopic Biosignature of Extraterrestrial Plants". *Astrobiology*.
4. Proceso de calibración en Matlab. Instituto de Tecnología de California (Caltech): [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/htmls/example.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/example.html)
5. Descripción del producto eCognition en la web del fabricante (Trimble): <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/ecognition>

# ARQUITECTURAS ADAPTATIVAS EN TIEMPO DE EJECUCIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA COMPUTACIONAL Y DESARROLLO DE SOFTWARE DIRIGIDO POR MODELOS

Diego Rodríguez Gracia

<sup>1</sup> Grupo de Informática Aplicada

<sup>2</sup> Universidad de Almería

diegorg@ual.es

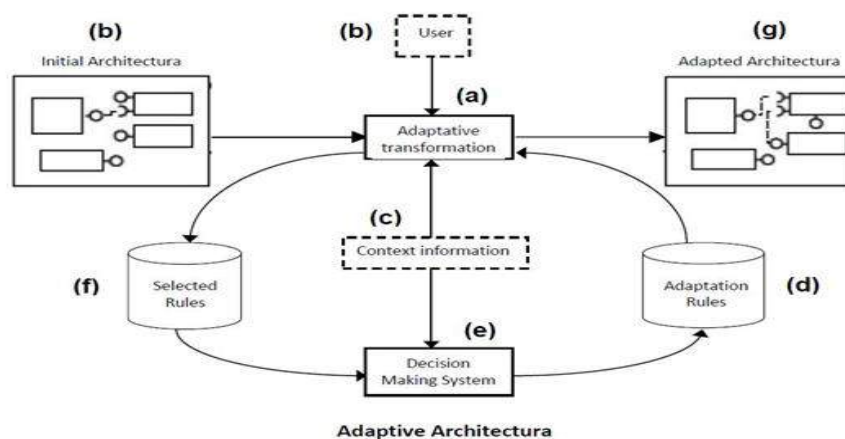
**Abstract.** En los últimos años, el uso de servicios para el desarrollo de Sistemas Abiertos se ha consolidado y fortificado. Avances en la comunidad Ingeniería de Servicios (SSE), promovidos por el refuerzo de los Servicios Web, las tecnologías desarrolladas en la Web Semántica y la presencia de nuevas técnicas de computación en la nube como la proliferación de soluciones de microservicios, han permitido que en el desarrollo de software se experimente y desarrollen nuevas formas de construir sistemas informáticos abiertos y adaptables en tiempo de ejecución en dominios como la domótica, edificios inteligentes, robótica, interfaces gráficas de usuario, etc. . Esta tesis se centra en desarrollar arquitectura de software para la adaptación de Sistemas Informáticos Dinámicos (DCS) usando técnicas interdisciplinarias de Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE) , Ingeniería de Servicios y Soft Computing. Dicha propuesta de arquitectura gestiona un esquema de microservicios orquestados para conseguir una arquitectura adaptativa de software basada en componentes en tiempo de ejecución. Este esquema se ha desarrollado como un proceso de transformación adaptativa de tres capas que es compatible con un servicio de toma de decisiones basado en reglas implementado mediante una máquina de aprendizaje. Como desarrollo experimental de la arquitectura propuesta se implementará la arquitectura adaptativa en tiempo de ejecución propuesta en el Centro de Investigación de Energía Solar (CIESOL) para control domótico del mismo.

**Keywords:** Arquitectura adaptativa, run-time, Soft Computing.

## 1 Introducción.

Esta tesis surge como evolución en nuestra investigación para conseguir la adaptación de sistemas en tiempo de ejecución mediante arquitecturas adaptativas basadas en

Arquitecturas adaptativas en tiempo de ejecución mediante técnicas de inteligencia...



**Fig. 1.** Esquema de arquitectura de transformación en tiempo de ejecución.

componentes. Para llegar a conseguir este objetivo se ha desarrollado una metodología basada en componentes que proporcionan las funcionalidades requeridas por el sistema en un momento determinado. Estos componentes pueden presentar dependencias entre sí de manera que un componente puede influir en el funcionamiento de uno o más afectando así al comportamiento del global del sistema. Además, esta metodología que se presenta basa su capacidad de adaptación en la reconfiguración de su arquitectura siempre que sea necesario y de esta manera poder dar respuesta a los requisitos del sistema si se producen cambios en el contexto del mismo. Esta reconfiguración óptima es posible gracias al aprendizaje del sistema mediante la interacción con el contexto. En anteriores trabajos se ha justificado la utilidad de nuestra propuesta en interfaces de usuario [1],[2]. En este trabajo se amplía el ámbito de aplicación de la metodología a cualquier dominio de arquitectura software basada en componentes de manera que, mediante esta propuesta, se consigue que el sistema evolucione adaptando su comportamiento no sólo a la variación de las variables exógenas o contexto (interacción con el usuario, cambios en los requisitos del sistema, etc.) sino que también a las variables endógenas (existencia de nuevos componentes).

## 2 Arquitectura de transformación adaptativa en tiempo de ejecución.

La propuesta de arquitectura de adaptación evolutiva en tiempo de ejecución basada en componentes surgida como fruto de la tesis que se está desarrollando y que se presenta en este trabajo consta de una secuencia de transformaciones M2M (a) que, tomando como entradas un modelo arquitectónico inicial (b) y las acciones ejecutadas por el usuario, (c) un modelo que contiene la información de contexto

necesaria para conseguir la adaptación del sistema, (d) las reglas de adaptación generadas por el sistema de toma de decisiones (e) y como salida el nuevo modelo de arquitectura adaptado (g) (Fig. 1). En esta propuesta de arquitectura, la cual surge como evolución a anteriores trabajos [1],[2], mediante la inclusión del sistema de toma de decisiones agregamos a nuestra propuesta de arquitectura la capacidad de aprendizaje del sistema con el entorno y con el usuario. Este aprendizaje adquirido se traduce en poder generar en tiempo de ejecución las reglas de adaptación que dotarán al sistema de la capacidad de transformar, a partir de un modelo de arquitectura inicial, el modelo de arquitectura final que mejor se adapta al usuario y a las variables de contexto del sistema.

### 3 Transformación Adaptativa.

Como se ha indicado en el apartado 2, nuestra propuesta de arquitectura se compone de una secuencias de transformaciones M2M (adaptive transformation) mediante las cuales se consigue, dado un modelo de arquitectura inicial, generar en tiempo de ejecución un modelo de arquitectura adaptada al usuario y a las variables de contexto del sistema.

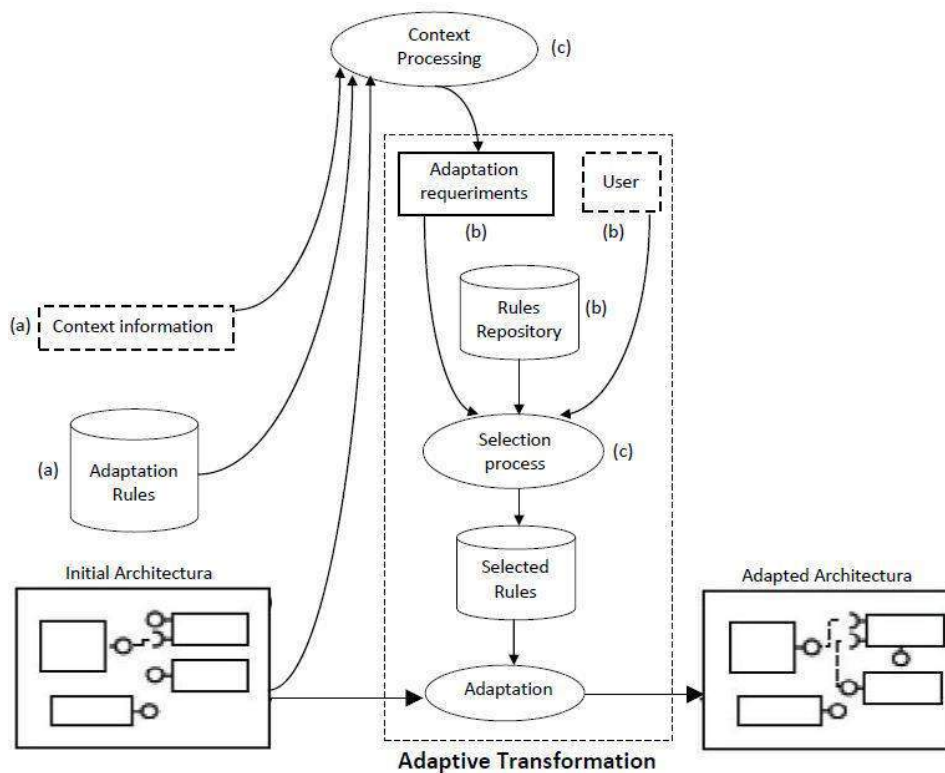


Fig. 2. Esquema de transformación adaptativa.

El modelo de arquitectura generado depende de (a) las reglas de adaptación generadas por el sistema de toma de decisiones y la información de contexto del sistema, (b) la interacción con el usuario, los requerimientos de adaptación y el repositorio de reglas de adaptación y (c) de la lógica definida en la selección de reglas y en el procesamiento del contexto (Fig. 2).

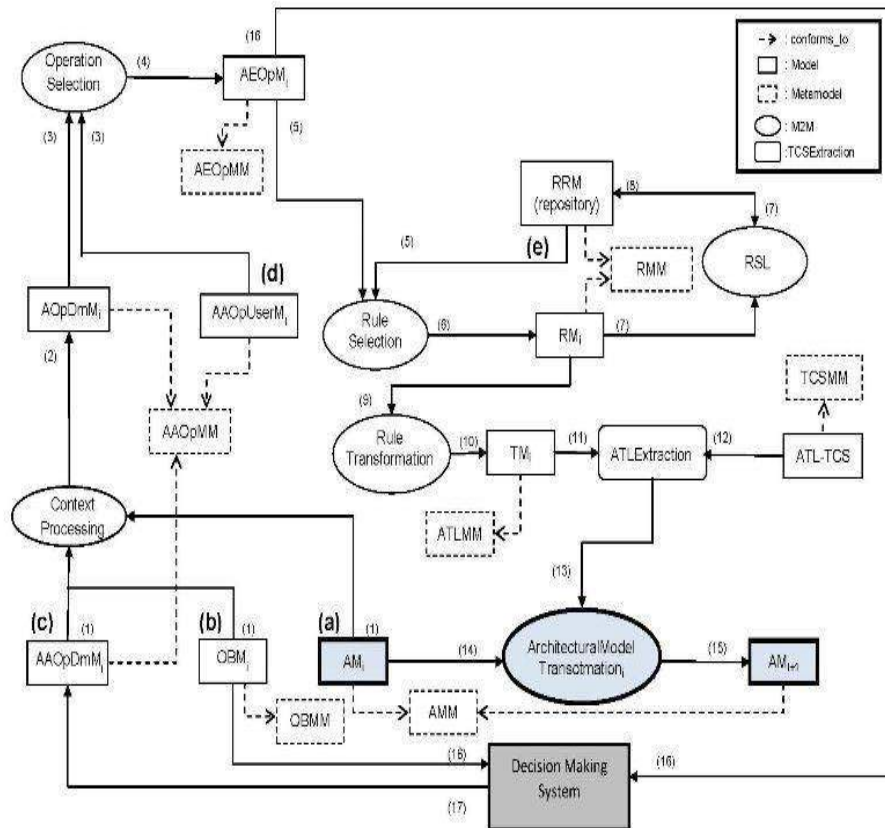


Fig. 3. Arquitectura de transformación de modelos en tiempo de ejecución.

Los procesos y la secuencia de transformación de modelos en tiempo de ejecución son los siguientes (Fig. 3):

- **ContextProcessing.** Es una transformación M2M que tiene como entradas el modelo de arquitectura inicial ( $AM_i$ ), el modelo con las variables de contexto del sistema ( $OBM_i$ ) y el modelo con las reglas generadas por el Decision Making System ( $AAOpDmM_i$ ) y genera como salida el modelo de reglas a ejecutar por el sistema ( $AOpDmM_i$ ).
- **OperationSelection.** Es una transformación M2M en la cual se comparan las operaciones a ejecutar sobre los componentes (reglas) seleccionadas por el usuario ( $AAOpUserM_i$ ) con las generadas por el ContextProcessing ( $AOpDmM_i$ ) y en

caso de que se dieran coincidencias seleccionará las decididas por el usuario (AAOpUserM<sub>i</sub>) generando el modelo de reglas a ejecutar (AEOpM<sub>i</sub>).

- **RuleSelection** es un proceso de transformación M2M de las reglas seleccionadas.
- **RSL** es una transformación M2M que modifica los atributos del repositorio de reglas basándose en las reglas seleccionadas.
- **RuleTransformation** es una Higher-Order Transformation (HOT) [4],[5], que se encarga de traducir las reglas de adaptación seleccionadas al modelo de reglas ATL
- **ATLExtraction** es un proceso de extracción Textual Concrete Syntax (TCS) responsable de generar el código ATL a partir del modelo de reglas ATL.
- **ArchitecturalModelTransformation** es la transformación M2M creada dinámicamente como resultado de la secuencia de transformación y se encarga de adaptar el modelo arquitectónico inicial mediante la aplicación de las reglas de transformación seleccionadas.

#### 4 Sistema de toma de decisiones.

Como se ha comentado en el apartado "2 Arquitectura de transformación adaptativa en tiempo de ejecución", nuestra propuesta se basa en el esquema para la adaptación dinámica de sistemas informáticos en tiempo de ejecución [1], [2] añadiendo la novedad de que las reglas de adaptación definidas a priori no son estáticas, sino que por el contrario, pueden ser modificadas e incluso se pueden generar reglas nuevas en el tiempo como fruto del aprendizaje con el que el sistema de toma de decisiones que incluimos en la actual propuesta dota al sistema. Este aprendizaje es resultado de la interacción del sistema de toma de decisiones con el usuario y con el contexto del sistema. De esta manera, con nuestra actual propuesta, el sistema evoluciona en el tiempo adaptándose al comportamiento del usuario y a las variables de contexto del sistema.

El sistema de toma de decisiones tiene como entradas (a) la información del contexto del sistema y las reglas de adaptación que han sido seleccionadas en el proceso adaptativo. Además, (d) las reglas de adaptación generadas por el sistema de toma de decisiones dependen (c) de los clasificadores considerados como los más óptimos según los requisitos del sistema y de los parámetros a tener en cuenta a la hora de seleccionar las reglas generadas a lo largo del tiempo por esos clasificadores (Fig. 4).

##### 4.1 DBUpdate.

Este es el primer proceso que se ejecuta en el sistema de toma de decisiones (Decision Making System). Es ejecutado cuando se ha generado al menos una nueva regla en el modelo de operaciones a ejecutar (AEOpM<sub>i</sub>). Es en este proceso donde se genera el aprendizaje del sistema mediante la retroalimentación del mismo con el usuario (AAOpUserM<sub>i</sub>) y con las variables de entorno (OBM<sub>i</sub>). El proceso (BDUpdate) actualiza la base de datos de conocimiento (KnowledgeDB) conforme a las variables de entorno del sistema (OBM<sub>i</sub>) y la regla o reglas (AEOpM<sub>i</sub>) a ejecutar por el sistema de transformación de modelos en tiempo de ejecución. Estas reglas a ejecutar

(AEOpM<sub>i</sub>) dependen de las variables del entorno del sistema (OBM<sub>i</sub>), del estado de los componentes del modelo de arquitectura inicial (AM<sub>i</sub>), de las reglas generadas por el sistema de toma de decisiones para i-1 (AAOpDmM<sub>i</sub>) y de la acción o acciones (reglas) que el usuario decide ejecutar (AAOpUserM<sub>i</sub>). El proceso (BDUpdate) es el siguiente: una vez que el sistema de transformación de modelos en tiempo de ejecución ha seleccionado las reglas a ejecutar (AEOpM<sub>i</sub>), el proceso (BDUpdate) generará nuevos registros en la base de datos de conocimiento (KnowledgeDB) donde las variables de entorno del sistema (OBM<sub>i</sub>) serán los atributos y las reglas a ejecutar (AEOpM<sub>i</sub>) serán las correspondientes clases del clasificador.

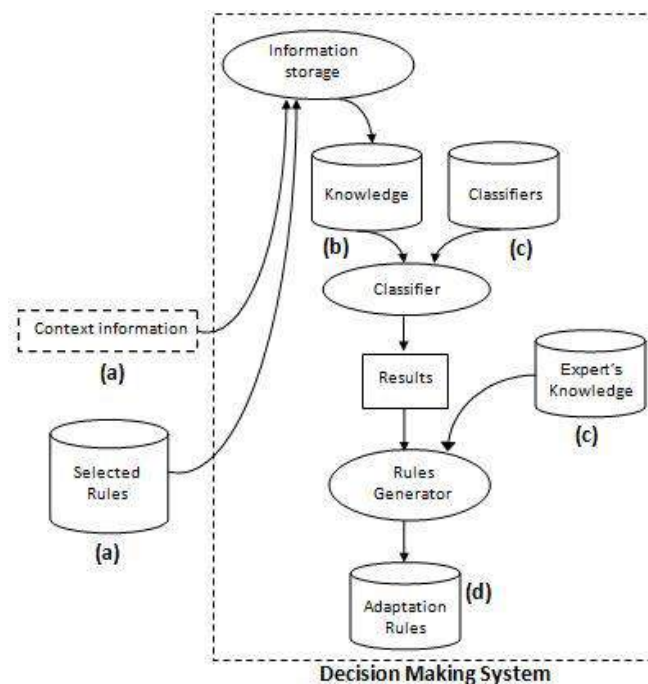


Fig. 4. Esquema del Sistema de toma de decisiones.

A continuación se describen a modo de resumen los procesos que componen el sistema de toma de decisiones y la secuencia de ejecución de los mismos (Fig. 5).

#### 4.2 TMTClass.

Su entrada son las reglas a ejecutar por el sistema de transformación de modelos en tiempo de ejecución (AEOpM<sub>i</sub>) que se han ido generando en el tiempo y como salida genera las clases (componentes) implicadas en esas reglas (ClassifiedClass). De esta manera, Classifier procesará sólo los atributos y clases de la base de datos de conocimiento (KnowledgeDB) que son significativos para la posible generación de

nuevas reglas evitándose el procesamiento (Classifier) innecesario de registros de la base de datos que no han sufrido modificaciones en el momento de la ejecución, con lo cual se reduce el tiempo de cómputo

#### 4.3 Classifier.

Se ejecutan los clasificadores sobre la KnowledgeDB generándose las correspondientes reglas. La ejecución de los clasificadores incluye tres procesos. El primero de ellos es la selección de características ((6.a) Feature Selection).

Una vez realizada la selección de características se ejecuta el proceso mediante el cual se construye el modelo de reglas ((6.b) BuildModel) y seguidamente se evalúa este modelo de reglas generado ((6.c) Validation), es decir, se entrena y evalúa el clasificador. Los resultados de la validación del modelo generado son los que posteriormente utilizará el siguiente proceso (RulesGenerator) para comparar entre el modelo de reglas generado y el modelo de reglas almacenado y seleccionar aquel que haya obtenido mejores resultados según los criterios definidos a priori por los expertos (Expert'sKnowledgeDB). Como entradas este proceso (Classifier) tiene el registro del comportamiento del sistema de transformación de modelos en tiempo de ejecución en su interacción con el entorno a lo largo del tiempo (KnowledgeDB). A su vez, otra entrada es el registro de las clases implicadas en las reglas que se han ido generando en el sistema de transformación de modelos a lo largo del tiempo (ClassifiedClass), el cual, una vez finalizados los procesos BuildModel y Validation es reiniciado. Finalmente, como entrada de Classifier tenemos ClassifiersDB que es donde se almacenan los distintos tipos de clasificadores que deben ejecutarse. La selección de estos clasificadores así como los distintos parámetros asociados a los mismos (Rhoa, Cross-Validation, etc.) surgen del preprocesamiento de los datos y son seleccionados por los expertos atendiendo a los criterios más idóneos según los requisitos del sistema de transformación de modelos en tiempo de ejecución. Para los procesos tanto de construcción y entrenamiento (BuildModel) como el de evaluación del modelo de reglas generado (Validation) se desarrolla una aplicación en lenguaje java que utiliza los algoritmos y librerías incluídas en la plataforma Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA) [3].

#### 4.4 RulesGenerator.

Es en este proceso donde se generan las reglas a ejecutar por el sistema de transformación de modelos (Rules). Las entradas del proceso (RulesGenerator) son:

- a) Las reglas óptimas generadas por el clasificador (ClassifierResults).
- b) El registro de los resultados óptimos obtenidos en alguna de las anteriores ejecuciones ( $t = i-n$ ) del clasificador (ClassifierResultsLog).
- c) Los criterios y parámetros a comparar entre los resultados obtenidos para seleccionar de entre las reglas generadas aquellas que mejor se ajustan a las especificaciones del sistema (Expert'sKnowledgeDB). Estos parámetros son definidos por los expertos.



Como salida de este proceso, si los resultados obtenidos son mejores que los que actualmente están almacenados se actualiza el registro de resultados (ClassifierResultsLog) y se almacenan las reglas a ejecutar por el sistema de transformación de modelos (Rules).

#### 4.5 ActionsSelection.

Este procedimiento es una Higher-Order Transformation (HOT) [4], [5], que traduce las reglas generadas por el DecisionMaking (Rules) en el modelo de reglas ATL a ejecutar por el sistema de transformación de modelos en tiempo de ejecución (AAOpDmM<sub>i</sub>).

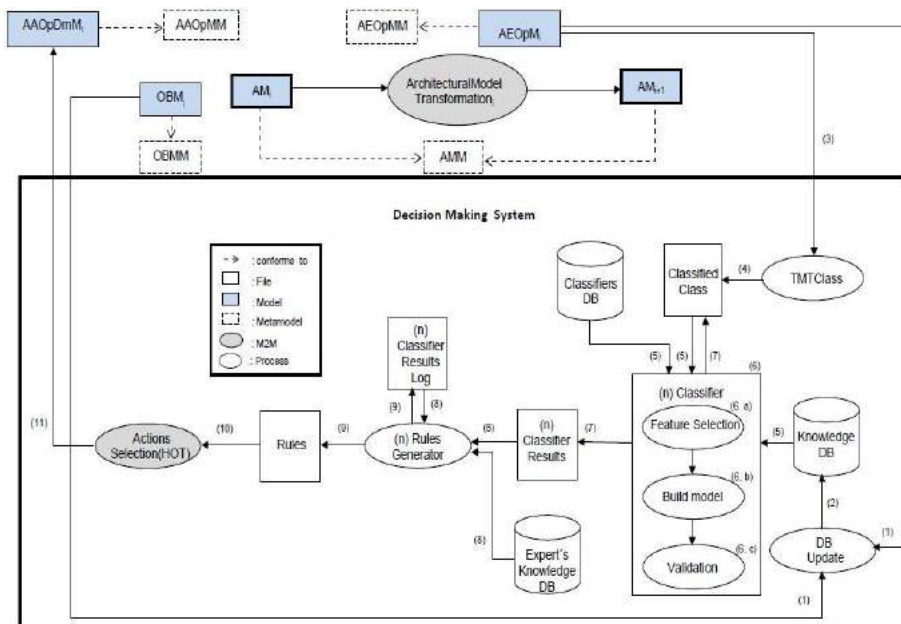


Fig. 5. Arquitectura del Sistema de toma de decisiones.

## 5 Arquitectura adaptativa basada en microservicios.

Con el objetivo de distribuir la carga computacional del esquema adaptativo presentado en "2 Arquitectura de transformación adaptativa en tiempo de ejecución" se ha desarrollado un esquema para adaptar modelos de sistemas de software basados en componentes bajo una Arquitectura Orientada a Servicios (SOA) [6] en la que las operaciones de los subsistemas de adaptación y toma de decisiones se implementan como microservicios que pueden ser invocados localmente o remotamente. De esta manera, los servicios se pueden distribuir en diferentes servidores siguiendo un enfoque basado en microservicios [7]. En consecuencia, cuando un cliente desea ejecutar una de las funcionalidades ofrecidas, puede ser necesario organizar un

Arquitecturas adaptativas en tiempo de ejecución mediante técnicas de inteligencia...

conjunto de servicios para que se ejecuten en un orden específico para, por ejemplo, obtener un modelo de arquitectura adaptado de uno inicial.

En esta propuesta de arquitectura adaptativa basada en componentes y orientada a servicios, algunos servicios están relacionados con las transformaciones M2M mientras que otros forman parte del proceso de toma de decisiones (Fig. 6).

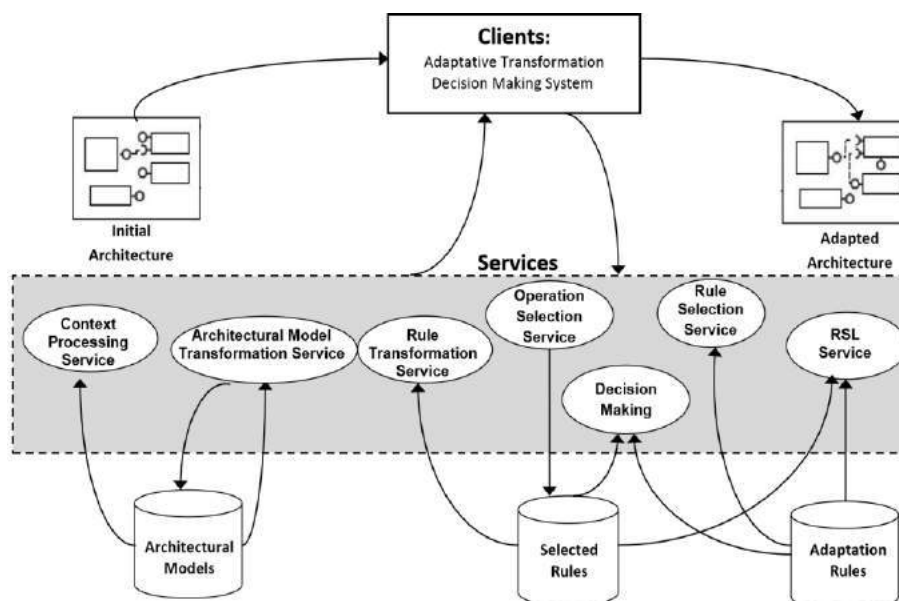


Fig. 6. Arquitectura adaptativa orientada a servicios.

## 6 Conclusiones.

En este trabajo se han presentado los avances realizados en nuestra investigación para conseguir la adaptación de sistemas en tiempo de ejecución mediante arquitecturas adaptativas basadas en componentes.

Se ha presentado el esquema de adaptación en tiempo de ejecución de arquitecturas basadas en componentes y orientadas a servicios mediante transformaciones modelo a modelo (M2M). Mediante este esquema se puede abordar de forma efectiva la construcción de sistemas informáticos abiertos y adaptables en tiempo de ejecución utilizando técnicas interdisciplinarias de ingeniería basada en modelos, ingeniería de servicios y soft computing.

Las principales características de la propuesta presentada son las siguientes:

- Nuestra propuesta de esquema adaptativo en tiempo de ejecución no es adecuada para todos los tipos de sistemas. En concreto, su aplicación es para sistemas basados en componentes.
- Los sistemas generados mediante el esquema propuesto son escalables permitiendo una fácil integración de posibles nuevos componentes.

Arquitecturas adaptativas en tiempo de ejecución mediante técnicas de inteligencia...

- La arquitectura propuesta incluye un sistema de decisiones implementado con algoritmos de aprendizaje automático. Las reglas de adaptación generadas por estos algoritmos son fáciles de interpretar y además la máquina de aprendizaje combina múltiples clasificadores que permiten encontrar una solución a la transformación requerida con el menor número de reglas de adaptación generadas.

Como continuación a este trabajo se aplicará el esquema adaptativo propuesto en el dominio de los sistemas de control de los edificios ecológicos [8].

## 7 Referencias.

1. Criado, J.; Rodríguez-Gracia, D.; Iribarne, L.; Padilla, N. Toward the Adaptation of Component-based Architectures by Model Transformation: Behind Smart User Interfaces. *Softw. Pract. Exp.* 2015, 45, 1677–1718.
2. Rodríguez-Gracia, D.; Criado, J.; Iribarne, L.; Padilla, N. A Collaborative testbed Web Tool for Learning Model Transformation in Software Engineering Education. *Comput. Hum. Behav.* 2015, 51, 734–741.
3. I. H. Witten, E. Frank, “Data Mining, Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations,” Morgan Kaufman Publishers, San Mateo, CA, 1999.
4. Tisi, M.; Jouault, F.; Fraternali, P.; Ceri, S.; Bezivin, J. On the Use of Higher Order Model Transformations. In Proceedings of the 5th European Conference on Model Driven Architecture Foundations and Applications (ECMDA'09), Enschede, The Netherlands, 23–26 June 2009; pp. 18–33.
5. Tisi, M.; Cabot, J.; Jouault, F. Improving Higher-Order Transformations Supporting ATL. In Proceedings of the 3rd International Conference on Model Transformation (ICMT'10), Málaga, Spain, 28 June–2 July 2010; pp. 215–229.
6. Erl, T. *Service-Oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design*, 1st ed.; Pearson Education, Inc.: Crawfordsville, Indiana, USA, 2005; pp. 2–51, ISBN 0-13-185858-0.
7. Newman, S. *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems*, 1st ed.; O'Reilly Media, Inc.: Sebastopol, CA, USA, 2015; pp. 2–251, ISBN 978-1-491-95035-7.
8. Rodríguez-Gracia, D.; Piedra, J.A.; Iribarne, L. Adaptive Domotic System in Green Buildings. In Proceedings of the 4th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI AAI 2015), Okayama, Japan, 12–16 July 2015; IEEE Press: NJ, USA, 2015.

# Control y modelado de procesos en reactores de microalgas abiertos tipo raceway

Enrique Rodríguez Miranda

**Resumen** La producción de biomasa a partir de microalgas es un proceso que cada vez está más extendido, incluso a nivel industrial. La principal ventaja de las microalgas reside en la capacidad de llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, consumiendo CO<sub>2</sub> para aumentar la biomasa, la cual puede usarse en un amplio rango de aplicaciones. Por ello, la tesis se centra en el diseño de algoritmos de control que permitan la mejora en el control de las variables que afectan a las microalgas, como el pH o la temperatura, así como el desarrollo de modelos que reproduzcan el comportamiento de dichas variables. Este trabajo presenta un desarrollo de los avances realizados en el último año en relación a los objetivos propuestos. Cabe destacar el control (PI y control basado en eventos) de pH efectuado durante el día y la noche; y el desarrollo de un modelo de temperatura para reactores abiertos tipo raceway.

**Keywords:** Microalgae · Raceway reactor · Control · Modelling

## 1. Introducción

La producción de biomasa de microalgas se ha vuelto muy popular hoy en día debido a su gran potencial para producir productos de alto valor y biocombustibles. La biomasa obtenida en estos procesos puede ser útil para aplicaciones tales como cosméticos o productos comestibles en la industria farmacéutica, o incluso productos para la agricultura o la piscicultura, además de la producción de biocombustibles. Más aún, el proceso de producción de biomasa puede combinarse con el tratamiento de agua residual en el mismo reactor (Bahadar and K., 2013). Entre muchas ventajas, estos sistemas biológicos destacan por la capacidad de las microalgas para producir compuestos valiosos a partir del proceso de fotosíntesis mientras consumen CO<sub>2</sub> y nutrientes, incluso provenientes de gases de combustión o agua residuales.

Los sistemas biológicos tienen dinámicas complejas, difíciles de controlar y pueden verse afectados por varias variables. El crecimiento de microalgas depende de la temperatura, la radiación solar, el pH y el oxígeno disuelto (Costache et al., 2013). La incidencia de la radiación solar y las condiciones de temperatura están determinadas por el diseño del reactor. Por lo tanto, las variables controladas son el pH y el oxígeno disuelto, ambos alterados por la radiación solar (Pawlowski et al., 2015). Concretamente, el pH es más crítico en el proceso de crecimiento debido a su influencia directa en el proceso de fotosíntesis y, por lo tanto, es la variable controlada analizada.

Existen principalmente dos tipos de reactores: fotobioreactores cerrados y abiertos (Oswald and Golueke, 1960; Weissman and Goebel, 1987). Por un lado, los fotobioreactores cerrados permiten un control preciso de las condiciones de operación y se

## Control y modelado de procesos en reactores de microalgas abiertos tipo raceway

centran en microalgas de alto valor que son susceptibles a contaminación. De este tipo, los fotobiorreactores tubulares son los más utilizados, donde la calidad es más importante que el volumen de producción. Por otro lado, los reactores abiertos se caracterizan por mayores volúmenes de producción de biomasa y están orientados a cepas de microalgas resistentes, ya que no es posible controlar todas las variables que afectan el crecimiento de las microalgas. Los reactores abiertos más extendidos son los reactores abiertos tipo raceway, que son más económicos y más fáciles de mantener que los fotobiorreactores cerrados.

Se requiere un control adecuado en este tipo de procesos, ya que el pH tiene un rango óptimo que maximiza la producción de biomasa, además de influir en la salud del cultivo, siendo letal si se excede de ciertos límites. Por otro lado, las inyecciones de  $\text{CO}_2$  no deben ser arbitrarias. Un suministro excesivo de  $\text{CO}_2$  produce pérdidas a la atmósfera y desperdicio innecesario.

Por lo general, el control del pH en los reactores abiertos se ejecuta exclusivamente durante el período diurno, lo que permite que este valor evolucione libremente durante la noche. Este efecto produce variaciones en el pH entre el día y la noche, que pueden llegar a ser considerables y afectar la salud de las microalgas. Además, debido a esta diferencia entre la noche y el día, el control tradicional Todo/Nada realiza una inyección más grande al comienzo del día para reducir el error, consumiendo grandes cantidades de  $\text{CO}_2$ . Otros tipos de control pueden resolver el efecto, pero la variación del pH durante la noche aún continúa. El control de pH nocturno evitaría este problema y reduciría la inyección de  $\text{CO}_2$  que ocurre durante el día, especialmente con el control Todo/Nada, ya que el pH permanecería cerca del punto de ajuste durante la noche. Además, el control basado en eventos permite establecer una relación entre el rendimiento y el esfuerzo de control para mantener el pH a valores óptimos sin realizar una gran cantidad de inyecciones, reduciendo así la inyección de  $\text{CO}_2$ .



Figura 1: Reactor abierto

## 2. Reactor abierto

El reactor abierto tipo raceway utilizado (figura 1) se encuentra en el centro IFAPA, cercano a la Universidad de Almería. El reactor tiene una superficie total de  $80 \text{ m}^2$ , compuesto por dos canales de  $80 \text{ m}$  de largo, conectados por bandas en U de  $1 \text{ m}$  de ancho.

## 3. Trabajo realizado

En esta sección se presenta el trabajo desarrollado durante este año de doctorado. Principalmente se destacan el desarrollo de un modelo de temperatura para reactores abiertos y el control de pH en reactores abiertos de tipo raceway, efectuado durante los periodos diurno y nocturno.

### 3.1. Modelo de temperatura para reactores abiertos

Se ha desarrollado un modelo que simula la temperatura del medio en el reactor abierto a partir de las variables ambientales. El modelo se define a partir de un balance térmico que se basa en primeros principios y fórmulas empíricas definidas para la transferencia de energía debida a la irradiancia solar, la radiación de onda larga, la evaporación, la convección y la conducción.

Tomando como base el modelo descrito en (Slegers et al., 2013), se han comprobado y establecido los balances de energía que afectan de forma determinante al medio de cultivo y se ha desarrollado un nuevo balance que permita estimar la temperatura del medio en que se desarrolla el cultivo a partir de variables fácilmente medibles. La entrada de radiación solar procede de datos medidos por un sensor de radiación. La radiación de onda larga se calcula mediante la expresión de Stefan-Boltzmann (Duffie and Beckman, 1991). La información respecto al flujo de evaporación es variada en la literatura (Bechet et al., 2011) y su cálculo no es sencillo (Sartori, 2000). En este caso, el balance de energía por evaporación se calcula a partir de los coeficientes de intercambio de calor introducidos por (McMillan, 1971). La convección se expresa mediante la Ley de enfriamiento de Newton. Por último, la conducción se expresa como la transferencia de calor entre la masa de agua del reactor y la capa de polietileno que aísla el reactor del suelo. Como resultado del cálculo de los balances energéticos introducidos, el balance térmico se expresa a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_{Total} = Q_{irradiancia} + Q_{radiación} + Q_{evaporación} + Q_{convección} + Q_{conducción} - Q_{acumulado} \quad (1)$$

dónde  $Q_{Total}$  (W) representa el resultado del balance térmico,  $Q_{acumulado}$  (W) es el calor acumulado en el reactor,  $Q_{irradiancia}$  (W) representa el flujo de calor a partir de la luz solar,  $Q_{radiación}$  (W) es el flujo de calor a partir de radiación de onda-larga,  $Q_{evaporación}$  (W) muestra el flujo de calor producido por el proceso de evaporación,  $Q_{convección}$  (W) es el flujo de calor causado por convección y  $Q_{conducción}$  (W) representa el flujo de calor entre el reactor y el polietileno bajo el mismo a través del proceso de conducción.

Control y modelado de procesos en reactores de microalgas abiertos tipo raceway

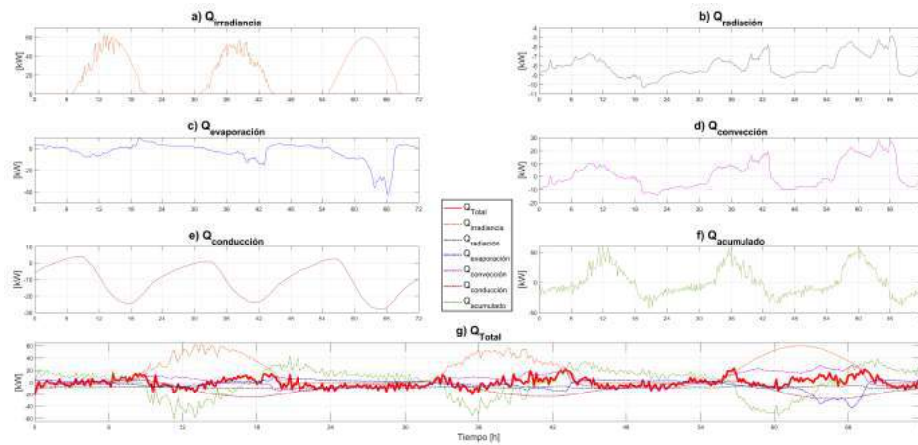


Figura 2: *Balances térmicos individuales y balance total de calor (rojo).*

La figura 2 muestra los valores de cada balance térmico para un periodo de tres días utilizando datos reales de temperatura. Observando la figura 2, en azul (a - f) se muestran los términos de potencia que intervienen en el balance global, mientras que la gráfica roja (g) representa el resultado del balance expresado en la ecuación del balance térmico. Como se puede observar en la primera gráfica (2.a) de la imagen, el flujo de calor por irradiancia supone la entrada de calor principal en el reactor y depende de la radiación solar. La gráfica 2.b de la imagen representa las pérdidas de calor por radiación, las cuales reducen el calor acumulado en el reactor y dependen de la diferencia de temperatura entre el reactor y el cielo. La gráfica 2.c representa el flujo de calor por evaporación, que depende de la diferencia entre las presiones de vapor del agua y del ambiente. El valor de este flujo puede ser positivo por el proceso de condensación nocturna o negativo por el proceso de evaporación. El flujo de calor por convección se muestra en la gráfica 2.d y depende de la diferencia de la temperatura del reactor y el ambiente. Tal como se puede apreciar, este flujo de calor es positivo durante el periodo diurno en el que gana calor del aire y negativo durante el periodo nocturno en el que el reactor cede calor al ambiente por el proceso de convección. La gráfica 2.e presenta el calor por conducción, que depende de la diferencia entre la temperatura del reactor y la temperatura bajo su superficie. El suelo actúa como una capacitancia térmica donde se almacena calor durante el periodo diurno (cedido por el reactor) y que cede calor durante el periodo nocturno.

La evolución dinámica de la temperatura se obtiene a partir de la ecuación superior en el equilibrio, basada en los balances térmicos descritos y reformulada como la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 V \cdot C_p \cdot \rho \cdot \frac{dT_w}{dt} = & Q_{irradiancia} + Q_{radiación} + \\
 & + Q_{evaporación} + Q_{convección} + Q_{conducción}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

## Control y modelado de procesos en reactores de microalgas abiertos tipo raceway

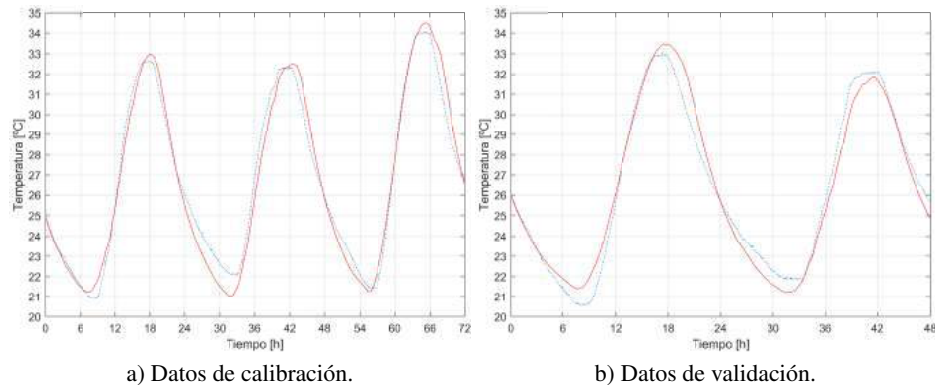


Figura 3: Temperatura real (azul) vs temperatura estimada (rojo).

A partir de unas condiciones iniciales de temperatura, es posible estimar la temperatura del reactor a lo largo del tiempo a partir de la ecuación propuesta.

La figura 3 muestra una comparación entre la temperatura real (segmentada azul) y la temperatura estimada por el modelo (rojo) para dos casos de estudio: un periodo de tres días (figura 3.a), utilizado para calibración, que corresponde al balance térmico y, por otro lado, un ensayo de validación que corresponde a un período de dos días consecutivos (figura 3.b). En la figura 3.a se aprecia como la temperatura estimada sigue la misma tendencia que la temperatura real, con un error máximo de  $MAX_{err} = 1,66$ , las cuales son tolerables para el estudio en el comportamiento de las microalgas. Como índice de precisión se ha empleado el error cuadrático medio entre las dos curvas, obteniéndose un valor de  $RMSE = 0,67$ .

En el caso de validación presentado en la figura 3.b, se muestra otro ensayo de temperatura estimada para dos días, en el que se aprecia un ligero desajuste en el primer día respecto al segundo. Para este caso, el error cuadrático medio es de  $RMSE = 0,70$ , mientras que el error máximo obtenido es de  $MAX_{err} = 1,88$ , un valor aceptable y dentro de los límites de tolerancia aplicados.

### 3.2. Control de pH diurno y nocturno para reactores abiertos

Se ha desarrollado una arquitectura de control de pH para el reactor abierto descrito en la sección 2. El objetivo es establecer una comparación entre la operación tradicional de control Todo/Nada del reactor y una arquitectura de control PI, además del método basado en eventos SSOD-PI.

#### Control Todo/Nada diurno

El control Todo/Nada es el método de operación más común para los reactores abiertos, donde el pH se controla solo durante el período diurno. La operación de este tipo de control es la más simple que se puede aplicar, en la cual, cuando el pH excede de un valor determinado, la válvula se abre al máximo para disminuir el valor.



## Control y modelado de procesos en reactores de microalgas abiertos tipo raceway

Los resultados obtenidos durante la prueba de dos días realizada con la arquitectura de control Todo/Nada se presenta en la figura 4. El control tradicional Todo/Nada se caracteriza por un control simple y rápido que no tiene en cuenta las limitaciones de error. Con este tipo de control, la válvula  $\text{CO}_2$  se abre al máximo hasta que el pH cae por debajo de la referencia y el error disminuye, pero sin actuar contra la disminución del pH por debajo de la referencia.

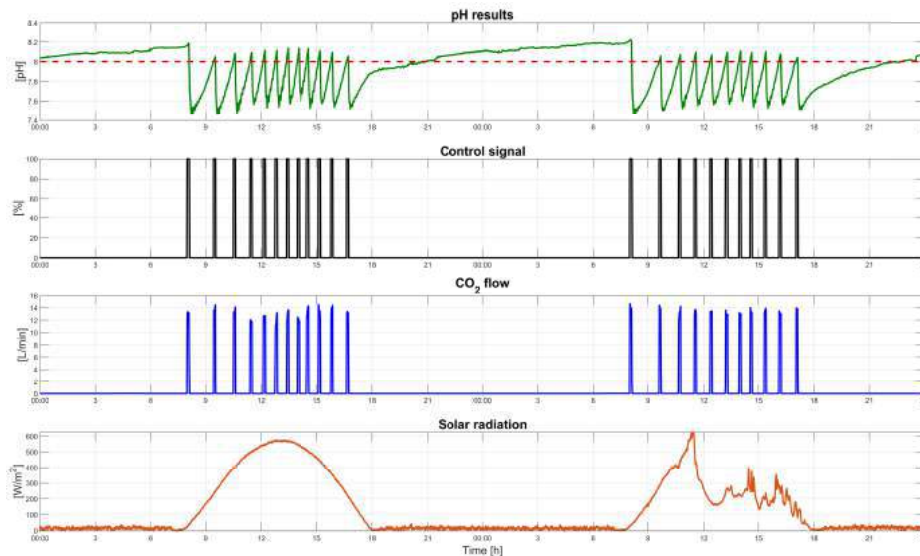


Figura 4: Resultados del control Todo/Nada

De la figura 4, se pueden observar los efectos del control Todo/Nada en el pH, que oscila considerablemente, alejándose de su valor de producción óptimo. De hecho, este comportamiento provoca inyecciones de  $\text{CO}_2$  con una duración excesiva, causando una disminución del pH.

### Control PI

Se pueden encontrar muchos ejemplos, con resultados satisfactorios, de controladores PI para el control de pH en reactores abiertos en la literatura. El pH presenta diferentes dinámicas en los periodos diurnos y nocturnos. Por lo tanto, se han diseñado dos controladores para cada modelo, obtenido previamente, según el período del día.

Para diseñar ambos controladores, se ha utilizado el método SIMC (Grimholt and Skogestad (2012)). Esta regla de ajuste establece que para una mayor robustez, se debe usar una constante de tiempo de bucle cerrado mayor o igual que el retardo del sistema. En este caso, se ha establecido una constante de tiempo de bucle cerrado de 369 segundos para el período diurno. Este valor se calcula de acuerdo con 0.05 veces la constante de tiempo de bucle abierto durante el día, para garantizar una respuesta rápida y evitar

## Control y modelado de procesos en reactores de microalgas abiertos tipo raceway

acciones de control agresivas. Por otro lado, para el período nocturno se ha utilizado un valor constante de tiempo de bucle cerrado de 180 segundos, correspondiente al tiempo de retraso. En ambos casos, se realizaron simulaciones para seleccionar los parámetros de control que proporcionan resultados adecuados. Por lo tanto, se obtuvieron los siguientes controladores PI:

$$C(s)_{daytime} = -149 \cdot \left( 1 + \frac{1}{2192s} \right)$$

$$C(s)_{nighttime} = -224 \cdot \left( 1 + \frac{1}{1440s} \right)$$

Debido a que la válvula de CO<sub>2</sub> es discontinua, se ha realizado una transformación de modulación por ancho de pulso (PWM) para controlar el rango de apertura de 0 a 100 %, correspondiente a un caudal de 0 a 15 [L/min].

Los resultados de control de PI obtenidos durante los períodos diurnos y nocturnos se presentan en la figura 5. El pH varía en un rango entre 7.97 y 8.04, estando en la zona de producción óptima. Para mantener el pH en este rango, durante la noche, la señal de control PI (entrada del PWM) mantiene aproximadamente un 10 % del caudal de inyección total, correspondiente a un caudal de CO<sub>2</sub> de 0.5 L/min; y un 20 % del caudal total de inyección durante el período diurno, correspondiente a un caudal de CO<sub>2</sub> de 2 L/min.

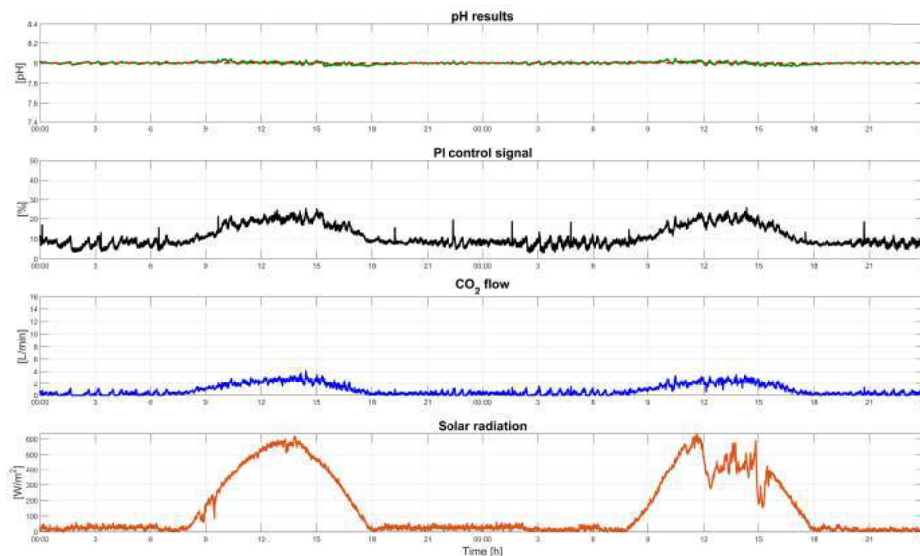


Figura 5: Resultados del control PI

## Control y modelado de procesos en reactores de microalgas abiertos tipo raceway

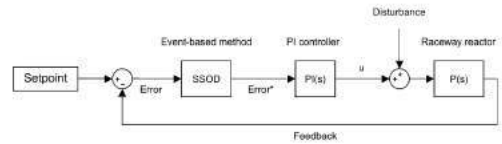


Figura 6: Arquitectura de control SSOD-PI

### Control basado en eventos

La arquitectura de control basada en eventos desarrollada se muestra en la figura 6, y representa un bucle de control PI con un tratamiento en el error correspondiente a un método basado en eventos. Este método se llama Symmetric-Send-On-Delta (SSOD), presentado en (Beschi et al. (2012)), y es una modificación del conocido método Send-On-Delta (SOD) (Miskowicz (2006)).

Como se puede ver en 6, este método basado en eventos se combina con un controlador PI que puede ser diseñado mediante cualquier regla de ajuste. Esta es una de las ventajas más poderosas de este método basado en eventos, al poder convertir cualquier controlador PI en un controlador basado en eventos, simplemente agregando el bloque SSOD en el bucle de control, antes del controlador PI. Este método basado en eventos se aplicó con los controladores PI previamente diseñados para evaluar diferentes bandas muertas en el error de pH. Se pueden encontrar más detalles sobre el diseño del enfoque de control en (Rodríguez-Miranda et al., 2019). La tolerancia en las bandas muertas de error se establece con el parámetro  $\Delta$  siendo un parámetro variable más en la arquitectura de control.

La figura 7 muestra los resultados realizados con la arquitectura de control basada en eventos SSOD-PI durante dos días. Se ha utilizado un valor de  $\Delta = 0,1$  para la banda de error. Este valor establece la amplitud de cambio en la banda muerta de la señal de error, por lo que el error del sistema aumenta o se reduce en intervalos de  $\Delta$ . Este comportamiento puede verse en la evolución del pH, que varía entre 7.9 y 8.1 durante la noche, con la característica dinámica lenta de este período. Por otro lado, durante el día, el pH varía entre 7.9 y 8.2 debido a las perturbaciones causadas por la radiación solar. La señal de control durante el período nocturno muestra un comportamiento similar al control Todo/Nada con pulsos de menor amplitud cuando el pH excede el umbral de la banda de error impuesto por el parámetro  $\Delta$ . Durante el período diurno, la señal de control PI está más activa que durante la noche. Con respecto al caudal de  $\text{CO}_2$ , se caracteriza por pulsos de inyección de amplitud y duración variables según el período del día en que el pH excede el umbral de la zona de error. Durante la noche, los pulsos de inyección son cortos y con una amplitud de  $5 \text{ L/min}$ , mientras que, durante el día, los pulsos de inyección se alargan con una amplitud promedio de  $6 \text{ L/min}$ .

## 4. Conclusiones

Referente al modelo de temperatura para reactores abiertos, los resultados de la evolución dinámica de la temperatura obtenidos a partir del modelo muestran unos valores

## Control y modelado de procesos en reactores de microalgas abiertos tipo raceway

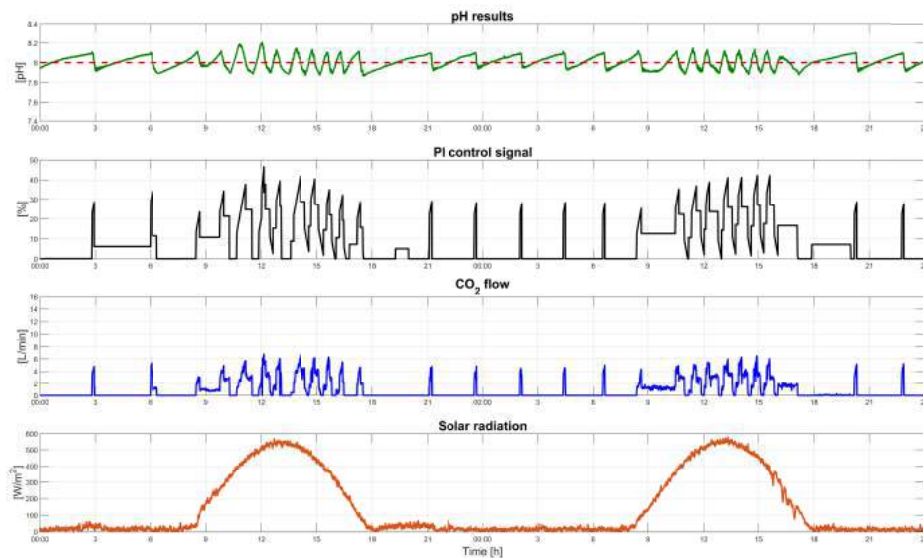


Figura 7: Resultados control basado en eventos

satisfactorios que se asemejan en gran medida a los valores de temperatura reales medidos en el reactor. Se ha demostrado en la literatura el gran impacto de la temperatura en la productividad de las microalgas y, es por ello, que este tipo de modelos tienen un papel fundamental en el desarrollo de nuevos y más completos modelos de microalgas que permitan comprender en profundidad todos los parámetros que afectan a su crecimiento. El uso de modelos en los que se tengan en cuenta todas las variables que afectan a las microalgas es escaso en la práctica, por tanto, este modelo de temperatura tiene como objetivo complementar el uso de modelos más completos que permitan desarrollar aplicaciones de evaluación precisas en el campo de las microalgas, como control óptimo de reactores, estudios de impacto de variables, mejora de rendimiento o estimación de parámetros. En futuros trabajos se analizará la presencia de perturbaciones que pudieran afectar a los balances de flujos de calor, como por ejemplo, las pérdidas por evaporación.

Por otro lado, en cuanto al control de pH, los resultados con respecto al error muestran que el control PI reduce el error en 95 % respecto a la arquitectura de control Todo/Nada, manteniendo el pH muy cerca de la referencia, en el valor de producción óptimo durante 24 horas. Para lograr esto, el control PI aumenta ligeramente el consumo de  $\text{CO}_2$ , pero aumenta el rendimiento del sistema en un 50 %. Por otro lado, la arquitectura de control basada en eventos SSOD-PI aumenta el error absoluto de la integral (IAE) con respecto al control PI, pero reduce el consumo de  $\text{CO}_2$  durante el período nocturno, mejorando el esfuerzo de control y la utilización de gas.

## Bibliografía

- Bahadar, A., K., B., 2013. Progress in energy from microalgae: A review. *Renewable Sustainable Energy Reviews* 27, 128–148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.029>.
- Bechet, Q., Shilton, A., Park, J.B., Craggs, R.J., Guieysse, B., 2011. Universal temperature model for shallow algal ponds provides improved accuracy. *Environmental Science and Technology* 45, 3702–3709. doi:<https://doi.org/10.1021/es1040706>.
- Beschi, M., Dormido, S., Sánchez, J., Visioli, A., 2012. Characterization of Symmetric-Send-On-Delta PI controllers. *Journal of Process Control* 22, 1930–1945. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2012.09.005>.
- Costache, T., Ación, F.G., Morales, M., Fernández-Sevilla, J., Stamatina, I., E., M., 2013. Comprehensive model of microalgae photosynthesis rate as a function of culture conditions in photobioreactors. *Applied Microbiology and Biotechnology* 97, 7627–7637. doi:<https://doi.org/10.1007/s00253-013-5035-2>.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. Solar engineering of thermal processes. In 2nd ed. Wiley-Interscience doi:<https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
- Grimholt, C., Skogestad, S., 2012. Optimal PI-Control and verification of the SIMC tuning rule. *IFAC Proceedings Volumes. 2nd IFAC Conference on Advances in PID Control* 45(3), 11–22. doi:<https://doi.org/10.3182/20120328-3-IT-3014.00003>.
- McMillan, W., 1971. Heat dispersal – lake trawsfynydd cooling studies. In *Symposium on Freshwater Biology and Electrical Power Generation* 1, 41–80.
- Miskowicz, M., 2006. Send-On-Delta: an event-based data reporting strategy. *Sensors* 6, 49–63. doi:<https://doi.org/10.3390/s6010049>.
- Oswald, W.J., Golueke, C.G., 1960. Biological transformation of solar energy. *Applied Microbiology and Biotechnology* 2, 223–262. doi:[https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(08\)70127-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)70127-8).
- Pawlowski, A., Mendoza, J.L., Guzmán, J.L., Berenguel, M., Ación, F.G., Dormido, S., 2015. Selective pH and dissolved oxygen control strategy for a raceway reactor within an event-based approach. *Control Engineering Practice* 44, 209–218. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.08.004>.
- Rodríguez-Miranda, E., Beschi, M., Guzmán, J.L., Berenguel, M., Visioli, A., 2019. Daytime/Nighttime event-based PI control for the pH of a microalgae raceway reactor. *Processes* 7(5), 247–263. doi:<https://doi.org/10.3390/pr7050247>.
- Sartori, E., 2000. A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces. *Solar Energy* 68, 77–89. doi:[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00054-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00054-7).
- Slegers, P.M., Lösing, M.B., Wijffels, R. H. and van Straten, G., van Boxtel, A.J., 2013. Scenario evaluation of open pond microalgae production. *Algal Research* 2, 358–368. doi:<https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.05.001>.
- Weissman, J., Goebel, R., 1987. Design and analysis of pond system for the purpose of producing fuels. Solar Energy Research Institute, SERI/STR-231-2840, US Department of Energy doi:<https://doi.org/10.2172/6546458>.

# Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional y compensación de movimiento controlada por el cliente

José Juan Sánchez Hernández<sup>1</sup>

Universidad de Almería, Ctra. Sacramento, s/n, Almería, 04120. España

**Abstract.** Este trabajo propone una estrategia para la transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 de alta resolución utilizando técnicas de actualización condicional y compensación de movimiento, en arquitecturas cliente/servidor que hagan uso del estándar de compresión JPEG2000 y el protocolo JPIP. Una de las principales contribuciones que se realizan en este trabajo, es que la actualización condicional y la compensación de movimiento se realizan en el lado del cliente, de modo que la técnica propuesta es compatible con cualquier servidor JPIP estándar. Este trabajo aprovecha la escalabilidad espacial que ofrece JPEG2000 para reutilizar los precintos de imágenes que ya han sido reconstruidas y visualizadas previamente por el cliente, y permite determinar qué precintos de la siguiente imagen de la secuencia han cambiado. De modo que el cliente en lugar de solicitar todos los precintos de la siguiente imagen, sólo solicitará aquellos que hayan cambiado y realizará una reconstrucción de la siguiente imagen haciendo uso de los precintos existentes de imágenes previas junto a los nuevos precintos que ha solicitado al servidor. Los resultados de nuestros experimentos demuestran que la calidad de las imágenes reconstruidas mejoran significativamente cuando además de la actualización condicional también se realiza una compensación de movimiento.

**Keywords:** JPEG2000 · JPIP · conditional-replenishment · motion-compensation.

## 1 Introducción

Entre las principales características del estándar JPEG2000 [4] podemos destacar la eficiencia al realizar compresión de datos con pérdida y sin pérdida, el acceso aleatorio a los datos comprimidos, la decodificación incremental de los datos y la alta escalabilidad. Estas características hacen que JPEG2000 sea una solución idónea para la exploración remota de imágenes de alta resolución. En la Parte 9 [5] del estándar se define el protocolo JPIP, que es el protocolo que permite a los clientes explorar datos de imágenes remotas de forma interactiva especificando una ventana de interés (WOI). Este intercambio de datos entre cliente y servidor utiliza el ancho de banda disponible de manera eficiente y no requiere la

recodificación de las imágenes, ni ningún procesamiento adicional. En este proceso de intercambio el servidor extrae sólo los datos requeridos de las imágenes comprimidas y los transmite a los clientes.

En particular, el protocolo JPIP ha demostrado ser muy eficiente para la visualización de imágenes solares. Actualmente está siendo utilizado por el Proyecto JHelioviewer [6] para permitir a los investigadores y al público en general explorar datos de imágenes solares de diferentes observatorios espaciales, hacer zoom de manera interactiva en áreas de interés y reproducir secuencias de imágenes de alta resolución con diferentes niveles de cadencia temporal.

Dependiendo de la resolución de las imágenes, su contenido y la cadencia temporal que el usuario ha seleccionado, la cantidad de datos que deben enviarse desde el servidor hasta el cliente puede ser muy elevada. Este problema es más evidente cuando aumenta el número de usuarios que están realizando peticiones al servidor de forma concurrente. Para resolver este problema de escalabilidad, nosotros proponemos explotar la redundancia temporal que existe en las secuencias de imágenes que se están transmitiendo, realizando compensación de movimiento y refresco condicional.

Aunque el uso de compensación de movimiento y refresco condicional ya han sido utilizados en otros trabajos [1–3, 7–9], nuestra propuesta es la primera en ser compatible al 100% con cualquier servidor JPIP. Esto significa que cualquier servidor JPIP estándar, como el que se está utilizando actualmente en el Proyecto JHelioviewer, puede hacer uso de esta solución. De hecho, nuestra propuesta [10] sólo requiere que los clientes tengan algún grado de acceso aleatorio espacial a las imágenes en el servidor.

## 2 MCCR (Motion Compensated Conditional Replenishment)

Esta sección describe MCCR, una propuesta totalmente compatible con el estándar JPIP [5] que permite la transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 utilizando las técnicas de compensación de movimiento y refresco condicional de precintos JPEG2000. La lógica de MCCR está implementada exclusivamente en el lado del cliente, mientras que el servidor no necesita realizar ningún cambio. Precisamente esta característica es la que hace que esta propuesta sea realmente interesante.

Mediante el protocolo JPIP, los clientes pueden solicitar ventanas de interés (WOIs) a los servidores, que responden con uno o más *data-bins*, que son fragmentos de *codestream* de un archivo JPEG2000. Es importante tener en cuenta que: (1) los clientes solicitan WOIs al servidor, no solicitan paquetes ni *data-bins* y (2) debido a que dos o más WOIs pueden solaparse, los clientes almacenan los paquetes que reciben en una caché local, de modo que los servidores JPIP pueden conocer el estado de las cachés de los clientes con el objetivo de evitar tener que enviar los mismos datos que ya ha enviado previamente a los clientes en la misma sesión JPIP.

## 2.1 Descripción

Para facilitar la descripción de MCCR, vamos a suponer que el cliente va a solicitar la secuencia de imágenes en su máximo nivel de resolución temporal, es decir, no van a existir imágenes intermedias entre  $I_i$  and  $I_{i+1}$ . Sin embargo, MCCR permite utilizar cualquier resolución temporal en el cliente para renderizar la secuencia de imágenes.

A continuación se describe la secuencia de pasos del algoritmo MCCR.

1. En primer lugar se descargan las dos primeras imágenes de la secuencia en su máximo nivel de resolución y con el máximo número de capas de calidad. A estas imágenes las denominamos  $I_i$  y  $I_{i+1}$ , donde  $i$  representa en qué iteración del algoritmo nos encontramos.
2. Las imágenes renderizadas que se muestran en el cliente se denominan  $\tilde{I}$ . Para las dos primeras imágenes de la secuencia tenemos que las imágenes que hemos descargado son las mismas imágenes que se visualizan en el cliente, es decir,  $\tilde{I}_i = I_i$  y  $\tilde{I}_{i+1} = I_{i+1}$ .
3. Realizamos la estimación de movimiento entre las imágenes  $\tilde{I}_i$  y  $\tilde{I}_{i+1}$  utilizando una precisión subpixel igual a  $A$  y un área de búsqueda de  $S \times S$  pixels. Para calcular los vectores de movimiento,  $\vec{V}$ , utilizamos un estimador de movimiento basado en bloques de tamaño  $B \times B$  pixels.
4. Una vez calculados los vectores de movimiento, generamos una imagen predicción  $\hat{I}_{i+2}$ , proyectando los vectores de movimiento  $\vec{V}$  sobre la imagen  $\tilde{I}_{i+1}$ . Es decir,

$$\hat{I}_{i+2} = \vec{V}(\tilde{I}_{i+1}). \quad (1)$$

Hay que tener en cuenta que que estamos suponiendo que existe un movimiento constante de los bloques entre las imágenes de la secuencia.

5. A partir de la imagen  $\hat{I}_{i+2}$  obtenemos una representación en un bajo nivel de resolución,  $\text{Thumbnail}(\hat{I}_{i+2})$ .
6. Solicitamos al servidor una representación en un bajo nivel de resolución de la imagen  $I_{i+2}$ ,  $\text{Thumbnail}(I_{i+2})$ .
7. Calculamos las diferencias a nivel de pixel que existen entre el *thumbnail* de la siguiente imagen de la secuencia,  $\text{Thumbnail}(I_{i+2})$  y el *thumbnail* de la imagen predicción,  $\text{Thumbnail}(\hat{I}_{i+2})$ .

$$E = \text{Thumbnail}(I_{i+2}) - \text{Thumbnail}(\hat{I}_{i+2}) \quad (2)$$

8. Calculamos la media del error  $E$  que existe en cada una de las WOIs y ordenamos la lista de WOIs en modo descendente. De modo que el resultado contiene una lista  $L$  de WOIs que están ordenadas por distorsión. Las WOIs que aparezcan en primer lugar serán las primeras WOIs que deberemos solicitar al servidor.
9. A partir de la lista  $L$  y dependiendo del ancho de banda disponible, solicitamos un número determinado de WOIs (con todos los niveles de calidad) de la imagen  $I_{i+2}$ . Las WOIs seleccionadas serán las que aparezcan en las primeras posiciones de la lista  $L$ .



Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...

10. Creamos la imagen  $\tilde{I}_{i+2}$ , que será el resultado de mezclar los precintos (WOIs) que hemos recibido de la imagen  $I_{i+2}$  con los precintos que teníamos previamente en la imagen  $\hat{I}_{i+2}$ . La imagen resultado  $\tilde{I}_{i+2}$  será la que visualizará en el cliente.
11.  $i \leftarrow i + 1$ . Ir al paso 4.

## 2.2 Requisitos de compresión de las imágenes

Para poder usar MCCR, es necesario: (1) tener acceso aleatorio sobre los datos comprimidos de la imagen que se corresponden con las WOIs que utilizamos para calcular las predicciones, y (2) las imágenes deben estar comprimidas teniendo en cuenta que deben tener el mismo número de precintos en cada nivel de resolución. También habrá que tener en cuenta que el número  $D$  de niveles DWT (Discrete Wavelet Transform) que podemos aplicar sobre las imágenes debe seleccionarse teniendo en cuenta la resolución que queremos que tengan los *thumbnails* con los que vamos a trabajar.

## 3 Resultados experimentales

### 3.1 Stockholm

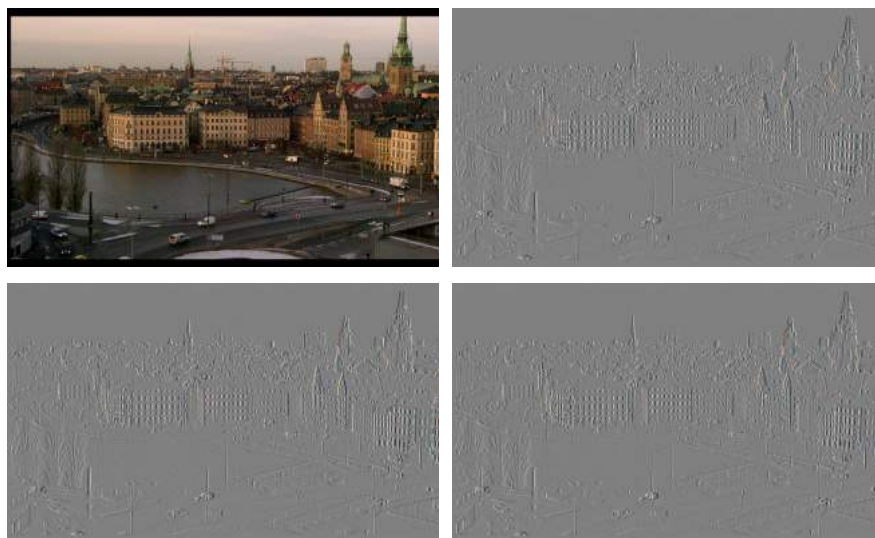
Stockholm es una secuencia de imágenes a color de  $1280 \times 720$ , con un nivel de movimiento medio, donde una cámara realiza una panorámica del paisaje de la ciudad de Estocolmo a 50 frames/segundo. En la secuencia aparecen casas, agua y coches en movimiento. La Figura 1 muestra las cuatro primeras imágenes de la secuencia, la primera muestra la imagen original de la secuencia y las tres imágenes siguientes muestran las diferencias que existen en cada imagen respecto a la primera imagen.

Las primeras 100 imágenes de la secuencia Stockholm han sido comprimidas con JPEG2000, generando 3 niveles de resolución espacial y 8 capas de calidad. El tamaño de code-block es de  $32 \times 32$  coeficientes. Los precintos en el máximo nivel de resolución tienen unas dimensiones de  $128 \times 128$ , y para la estimación de movimiento se han utilizado los siguientes valores  $A = 2$  y  $S = 4$ .

La Figura 2 muestra la calidad de las reconstrucciones que se han obtenido simulando diferentes escenarios con distinto ancho de banda. En cada simulación la cantidad de bytes que se ha transmitido para cada imagen va desde los 11000 bytes hasta los 51000 bytes. En este caso tenemos una secuencia con mayor movimiento que en la secuencia Speedway, y los resultados muestran el comportamiento esperado:

1. Cuanto más complejo es el movimiento de la secuencia, existe menor correlación temporal entre las imágenes de la secuencia y por lo tanto MCCR ofrece menor beneficio en las reconstrucciones.
2. Si el bit-rate de las transmisiones es muy pequeño, entonces el número de WOIs que son actualizadas en la predicción no es suficiente para obtener una buena reconstrucción de las imágenes. Este efecto se puede observar cuando

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...



**Fig. 1.** Frames 3, 4, 5 y 6 de la secuencia Stockholm. Se muestra la imagen 3 y las diferencias que existen en las imágenes 4, 5 y 6, respecto a la imagen 3 de la secuencia. Las diferencias muestran que en esta secuencia existe un movimiento mayor que el de la secuencia Speedway.

utilizamos un bit-rate de 11000 bytes por imagen y puede ser resuelto monitorizando la calidad en el cliente y solicitando una imagen “intra” cuando la calidad de las reconstrucciones se encuentre por debajo de un umbral que esté controlado por el usuario.

La Figura 3 muestra las reconstrucciones que se han obtenido para MCCR y Motion JPEG2000 cuando se transmiten 16000 bytes por imagen de la secuencia Stockholm. Igual que ocurría en Speedway, la calidad visual que proporciona MCCR es superior a la que ofrece Motion JPEG2000.

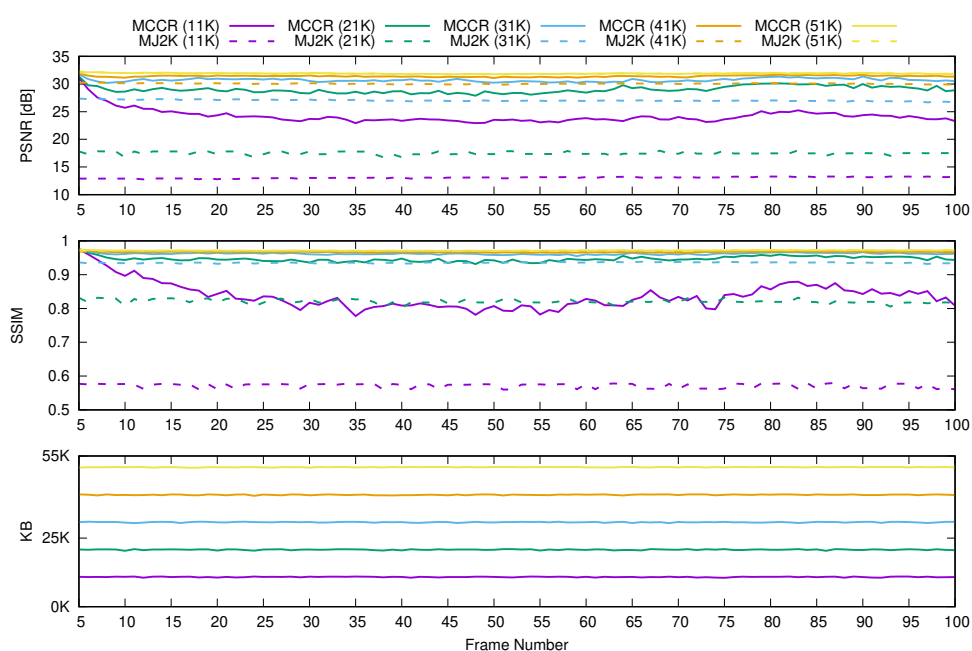
## 4 Avances

### 4.1 Estimación del movimiento con *Optical Flow*

En la primera versión de MCCR hemos estado utilizando una técnica de *block matching* para calcular la estimación de movimiento entre las imágenes consecutivas de la secuencia de vídeo. Durante el último año hemos estado investigando la posibilidad de mejorar los resultados de MCCR utilizando la estimación del flujo óptico para calcular la estimación del movimiento.

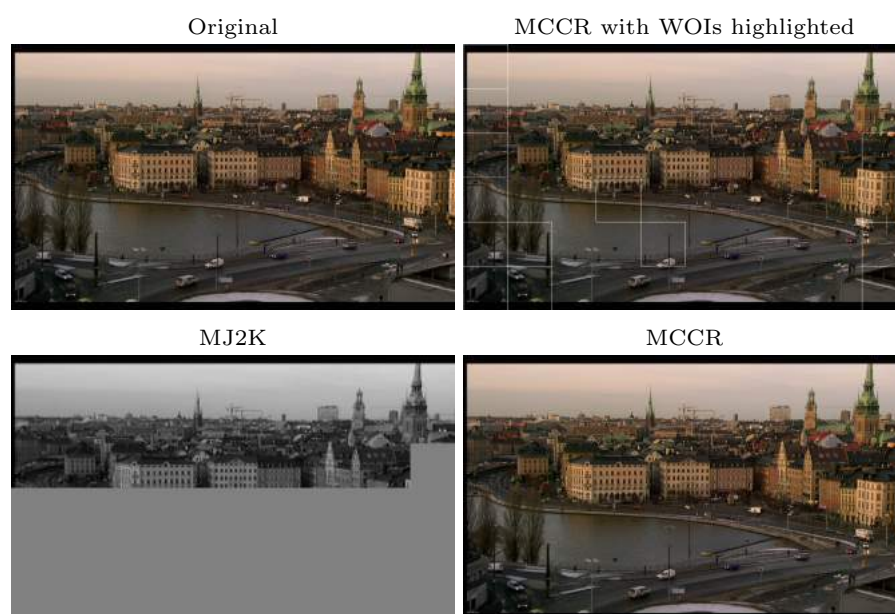
El flujo óptico es el patrón del movimiento de los objetos que aparecen en una escena entre dos frames consecutivos dentro de una secuencia de vídeo, el

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...



**Fig. 2.** Calidad de las reconstrucciones de las primeras 100 imágenes de la secuencia Stockholm utilizando MCCR y Motion JPEG2000 (MJ2K). Se han simulado varios escenarios con diferente ancho de banda donde la cantidad de bytes transmitidos por imagen en cada uno de ellos varía desde los 11000 hasta los 51000 bytes. Se han utilizado dos métricas para evaluar la distorsión de las reconstrucciones: PSNR y SSIM.

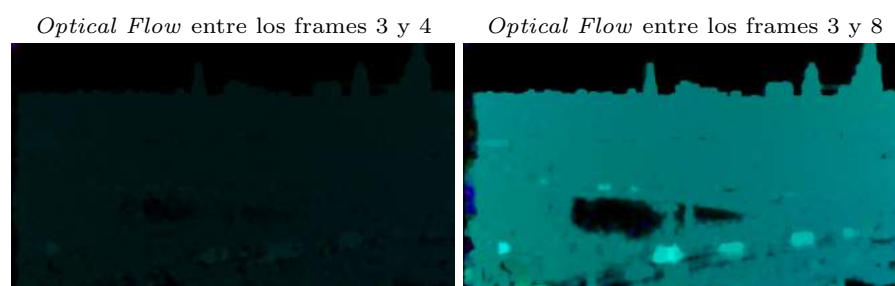
Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...



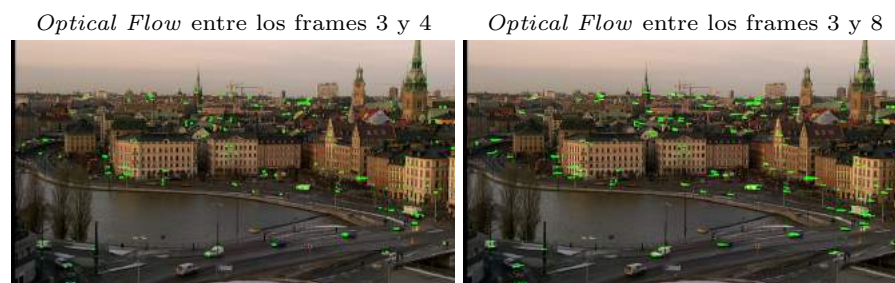
**Fig. 3.** Reconstrucción de la tercera imagen de la secuencia Stockholm utilizando MCCR y Motion JPEG2000 cuando se transmiten 16000 bytes por imagen. En la esquina superior izquierda se muestra la imagen original, en la esquina superior derecha está la reconstrucción obtenida con MCCR, se han resaltado las WOIs que se han actualizado. En la esquina inferior derecha tenemos la misma imagen pero sin resaltar las WOIs y en la esquina inferior izquierda está la reconstrucción obtenida con Motion JPEG2000.

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...

movimiento detectado puede ser debido al movimiento de los objetos o de la cámara. Se trata de un conjunto de vectores 2D donde cada vector es un vector de desplazamiento que muestra el movimiento de los píxeles desde el primer frame hasta el segundo.



**Fig. 4.** Ejemplo del cálculo del flujo óptico utilizando el método Farneback entre imágenes de la secuencia Stockholm



**Fig. 5.** Ejemplo del cálculo del flujo óptico utilizando el método Lucas-Kanade entre imágenes de la secuencia Stockholm

#### 4.2 Transmisión de secuencias de video 360° utilizando MCCR

Otra de las líneas de investigación que hemos estado explorando durante este último año, ha sido la posibilidad de aplicar MCCR a la transmisión de secuencias de video 360°. Uno de los principales inconvenientes que presenta la transmisión de secuencias de vídeo 360° es la necesidad de un gran ancho de banda entre cliente y servidor. El problema que existe en la transmisión de estas

secuencias es similar al que resolvemos con MCCR, de modo que nuestra propuesta puede ser utilizada para optimizar la transmisión de secuencias de vídeo 360° y utilizar el ancho de banda disponible entre cliente y servidor de manera eficiente.

Durante los últimos meses hemos estado recopilando información sobre el estado del arte en la transmisión de secuencias de vídeo 360° y hemos estado estudiando las soluciones actuales.

## 5 Conclusiones y trabajo futuro

El trabajo que se ha realizado hasta este momento demuestra que MCCR puede llegar a ser una alternativa más eficiente que Motion JPEG2000 cuando se requiere obtener una secuencia de imágenes JPEG2000 con poco movimiento desde un servidor JPIP. Lo que diferencia MCCR de otras propuestas existentes, es que puede ser compatible con cualquier servidor JPIP estándar sin tener que realizar ninguna modificación en el servidor.

Las líneas de investigación relacionadas con MCCR que se plantean como trabajo futuro son las siguientes:

- Mejorar la estimación del movimiento estudiando otros estimadores que puedan mejorar el rendimiento y las reconstrucciones obtenidas actualmente con MCCR.
- Estudiar el comportamiento de MCCR con precintos de menor tamaño. El tamaño de los precintos determina el tamaño de la WOI más pequeña que podemos solicitar al servidor, por lo tanto, en secuencias de imágenes con movimientos complejos, podríamos obtener mejores resultados si el tamaño de los precintos fuese más pequeño.

## References

1. Alvaro Luis Bustamante, José M. Molina López, M.A.P.: MIJ2K: Enhanced video transmission based on conditional replenishment of JPEG2000 tiles with motion compensation. *Journal of Visual Communication and Image Representation* pp. 332–344 (May 2011)
2. Devaux, F., Meessen, J., Parisot, C., Delaigle, J., Macq, B., Vleeschouwer, C.D.: A flexible video transmission system based on JPEG 2000 conditional replenishment with multiple references. In: 2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP '07. vol. 1, pp. I-825–I-828 (April 2007). <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2007.366035>
3. Devaux, F., Meessen, J., Parisot, C., Delaigle, J., Macq, B., Vleeschouwer, C.D.: Remote interactive browsing of video surveillance content based on jpeg 2000. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* **19**(8), 1143–1157 (Aug 2009). <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2009.2022777>
4. International Organization for Standardization: Information Technology - JPEG 2000 Image Coding System - Part 1: Core Coding System (2004)
5. International Organization for Standardization: Information Technology - JPEG 2000 Image Coding System - Part 9: Interactivity Tools, APIs and Protocols (2005)

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...

6. Müller, D., Nicula, B., Felix, S., Verstringe, F., Bourgoignie, B., Csillaghy, A., Berghmans, D., Jiggins, P., García-Ortiz, J.P., Ireland, J., Zahniy, S., Fleck, B.: JHelioviewer. Time-dependent 3D visualisation of solar and heliospheric data. *Astronomy & Astrophysics* **606**, A10 (Sep 2017). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730893>
7. Naman, A.T., Taubman, D.: A novel paradigm for optimized scalable video transmission based on JPEG2000 with motion. In: 2007 IEEE International Conference on Image Processing. vol. 5, pp. V - 93-V - 96 (Sept 2007). <https://doi.org/10.1109/ICIP.2007.4379773>
8. Naman, A.T., Taubman, D.: Optimized scalable video transmission based on conditional replenishment of JPEG2000 code-blocks with motion compensation. In: Proceedings of the International Workshop on Workshop on Mobile Video 2007. pp. 43-48 (Sept 2007). <https://doi.org/10.1145/1290050.1290061>
9. Naman, A.T., Taubman, D.: Rate-distortion optimized delivery of JPEG2000 compressed video with hierarchical motion side information. In: 2008 15th IEEE International Conference on Image Processing. pp. 2312-2315 (Oct 2008). <https://doi.org/10.1109/ICIP.2008.4712254>
10. Sánchez-Hernández, J.J., García-Ortiz, J.P., González-Ruiz, V., García, I., Müller, D.: Transmission of low-motion jpeg2000 image sequences using client-driven conditional replenishment. In: Proceedings of the International Conference on Signal Processing and Multimedia Applications. pp. 1-6 (July 2011)

## **Impact of streaming on the increasing demand of modern education and distance**

Teresa Santamaria-López

Universidad de Almería, Sacramento S/N, Almería, España  
tsantamaria710@gmail.com

**ABSTRACT:** The streaming is a phenomenon whose growing popularity has earned him great attention from educational environments looking to become more dynamic and direct with his students, being independent salons or class schedules. Yet precisely because it has become a trend in education methodologies should be analysed from the point of effectiveness and quality, since aspects such as safety and efficiency should be evaluated when they are focused on households, which are the largest claimants of its contents. Factors such as congestion, available bandwidth, the costs of the servers for its performance, resilience in situations of failure, among others will be reviewed in this article. Finally noting examples of implementation in operating rooms or proposals for expansion in the form of games, will analyse new opportunities of development for these technologies.

**KEYWORDS:** Streaming, modern education, educational methodologies, adaptation algorithms.

### **1 Introduction**

Multicasting and steaming content technologies are emerging technologies with an enormous potential for education. [1]. most is content to educational institutions, universities and colleges, allowing more and reach more people and use of self-learning or so-called e-learning methods. This has changed the way in which teachers prepare their lessons and yes same as students can take advantage of these lessons.

One of these e-learning methods are called classes or virtual lessons, which due to the advancement of information technologies, can be now received at any time, in any place, how many times as necessary, sharing sounds, images and text continuously and in real-time. [2].



### Impact of streaming on the increasing demand of modern education and distance

This has allowed to emerge the so-called virtual universities, which developed a mode of education at distance [7]. However, this type of virtual classes is still being put to the test by educational institutions that do not consider to be worth credits for classes that are not handed down in a same room or several rooms but at the same time (by way of teleconference).

There are also multiple architectures of streaming apart from those mentioned, which try to transmit several; multimedia users, with the highest possible quality, low-latency, low loss, high interactivity, high resolution and guarantees security in the transmission of its contents. This is determined according to a study by Cisco System, which provides more than half of the data transmitted through the internet are related to audio or video content. [8].

Finally, you can evaluate these various technologies of streaming in a challenging environment as the practical education of resident students in surgery, where classes are conducted via streaming without any physical presence in an operating room. Or also to see proposals for interaction of multimedia content in environments such as games, where while the content still images, videos and audio, its interaction with the student is much more intuitive and innovative.

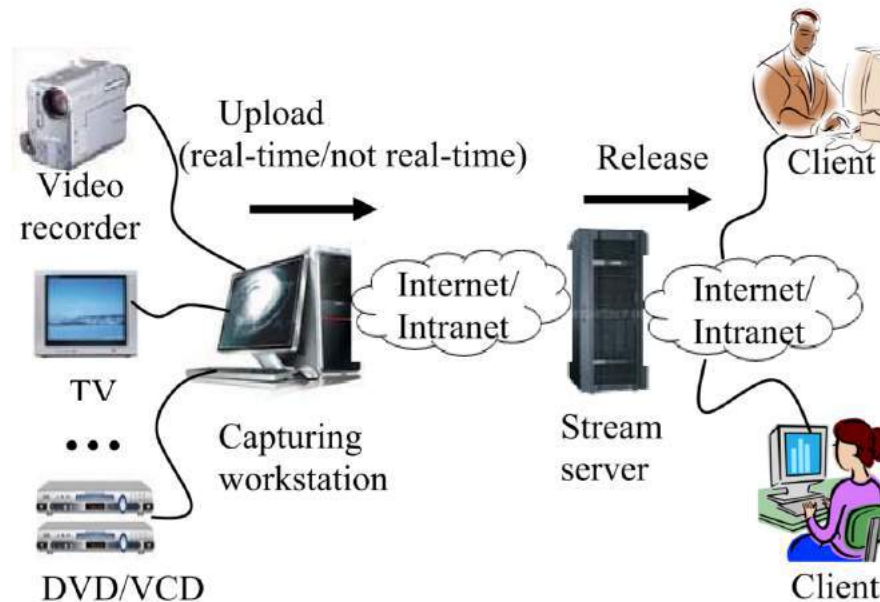
#### **1.1 Modern education through the streaming**

To begin addressing this issue must first adequately define the term streaming and as its structure fosters the interaction of content with users online.

#### **1.2 Streaming media technologies**

Content streaming technology allows the distribution in real time or on demand of media using internet-based technologies. [9] its main structure can be seen in the following figure.

Impact of streaming on the increasing demand of modern education and distance



**Figure 1:** Streaming media technologies

This structure we can see three components, firstly we have the server's stream, which provides digital multimedia information captured by a computer named workstation. The server provides the information when it is requested you, but since it is not towards a single customer, but many, and even several at the same time, this requires adaptive bandwidth to this situation.

Secondly we have the workstation, which is which is responsible for collecting media, together with the audio and video files in real time.

Finally, there is the client, which through a hallway team via a Web browser can access content well either in real time or files stored on the server.

After observing the structure of a streaming environment, we can begin to detail each of the resources that it needs to operate. First of all, we have the content transport protocols, these directly affect the quality of the sending of the information, and therefore the streaming itself. IETF has designed various protocols that support the sending of content streaming, these are real-time Transport Protocol (RTP) for the flow of multimedia data, real-time Transport Control Protocol (RTCP) which together with the RTP may provide control of flow and congestion; and finally real-time Streaming Protocol (RTSP) defining as one of multiple applications can transmit multimedia data via IP network.

Now after the transport protocols we must analyse the content streaming playback modes. The first is On demand and broadcast, this stands out based on what (either server or client) is active on the connection. In the On mode demand is customer who access the Active Server, then the user is you can select content to initialize the connection, as well as start, stop, rewind, fast-forward or pause the transmission. This allows maximum control of the transmission of streaming. But since multiple clients can request this playback mode bandwidth is being severely compromised. Parallel to this we have the process of broadcast in which the client user can receive streaming content passively, however, it cannot control the transmission of content. Pause, backward and forward are not allowed. In this way a simple package of content is to send simultaneously to all user clients on the network. Therefore, it also represents a high consumption of bandwidth.

The following playback mode streaming that is, is the unicast and multicast. When each packet of information can be transferred only to a client through a particular individual channel between the client and the server, referred to as unicast. Since the server must send the content to each user based on their preferences, through various channels but simultaneously; You can stay in queues that take long time to respond and even redundancies that may even lead to the server falls and is out of line. This not depends directly on the bandwidth for each channel is has a unique bandwidth for this, however the ability to respond to multiple requests, and the amount of time to process these applications force streaming coordinators to purchase of equipment to ensure the quality of content and transport. On the other hand, the multicast technology extends the functionality of the unicast, but replicating information simultaneously to multiple computers client through various channels only once, because of this one server can send data continuously without delay. The bundle is replicated to all clients that share the same address by reducing the total number of packets transmitted to the network.

### 1.3 Application of streaming in education

There are various ways in which streaming can be applied to an educational environment, the first to be analysed is the E-learning. This is defined as classroom lessons or events that can be recorded and issued on the internet to be viewed in real time, or which can also be stored in a file drawer online so they can be played back later upon request. It is formed in this way a concept of "presence" to receive the content, regardless of factors such as weather or the geographic location from which you can see the content.

Another way in which streaming can be applied to education is through the Real time learning, in this situation takes advantage of the factor that events that are transmitted have the nature that occur outside a classroom, so if not for this medium not would have the opportunity to observe these phenomena. Examples of these events are: political recordings, sporting events, wildlife, fashion show or a theatre performance. Also situations outside the classroom-live recordings are part of this category.

The following application to analyse is the environment of a virtual workshop, in which videos are purely instructions or indication processes. The procedures or steps

shown to accomplish a task where there are risks affecting the health or hazardous situations. The purpose of these workshops is to put within the reach of student's environments complex or difficult to understand for people who are not experts in the field, showing where you can get once the expertise acquired. At a first sight offers the same content that the former way of Real time learning, only that this time are content are exclusive to education environments.

Another application is called the Resource sharing, which works to share videos or material that, in principle, not expected that it could be used in education by what were kept and stored. With the passing of time documentaries or news became and they can now be used by the students.

The last environment that looks is the cooperative learning, in which both teachers and students can be content creators to share with others, where also the role of Professor can be assumed by various students switching from one to another.

## 2 Possible effects of virtual classes via streaming

Based in a Studio in Japan, where assessed contexts of e-learning in the United States and Japan, could appreciate the following [10]

### 2.1 Creation of contents of virtual classes and teaching methods

If evaluated the goals of an independent kind of the type of material that is, everything depends on that information be presented clearly to the students, that your questions can be resolved effectively. Taking as an example two taught courses differently, one with virtual material and another with only interaction between students and teachers. Arose whether the aim of the course is fulfilled any of the methodologies. However, is can pose various points to consider depending on competition you want to reinforce.

If it seeks to promote students to freely express their views, a setting where to interact with each other is essential and share ideas through a forum or a discussion board fails to comply with the objectives. Here we can think that courses or classes whose objective is to promote the free ideas discussion not should be dictated virtually already that this component of social presence, or at least the way how individuals perceive it is not appreciated.

If on the other hand, the course contains experiments in collaboration environments to build or develop parts or equipment, issues that they should be discussed among students and teachers, among others. they are difficult to implement in an isolated manner using virtual classroom environments.

At this point might seem that virtual classes not could replace traditional teaching methods, however if they can focus with the appearance to which the course or class wants to encourage, very considerable advantages can be.

Distinguish between just wanting to offer knowledge without any practical environment, without promoting the discussion or answer the questions immediately be considered to implement virtual classes. This would allow that the teachers of these classes can save time developing classes for to focus more on those who need practice environments.

Impact of streaming on the increasing demand of modern education and distance

### **3 Effects of time, place and methods of communication**

By means of questionnaires to students taking virtual classes in the years 2001 to 2003. The following events might appreciate.

#### **Figure 2: Virtual classes**

The first aspect to be evaluated was at what time of the day students accessing the content to view it. In this aspect the virtual classes clearly surpass traditional lessons. In these hours from 18 to 2, teachers are not available and may result in the best moments so students concentrate on the content.

Impact of streaming on the increasing demand of modern education and distance

**Figure 3:** Virtual classes

The second aspect to be evaluated was where students accessing the content. Where absolute as the answer was at home or in their homes. This aspect also evidence that classes can be better accepted if they are in a space friendly or recognized by a student achieving better focus on her.

Impact of streaming on the increasing demand of modern education and distance

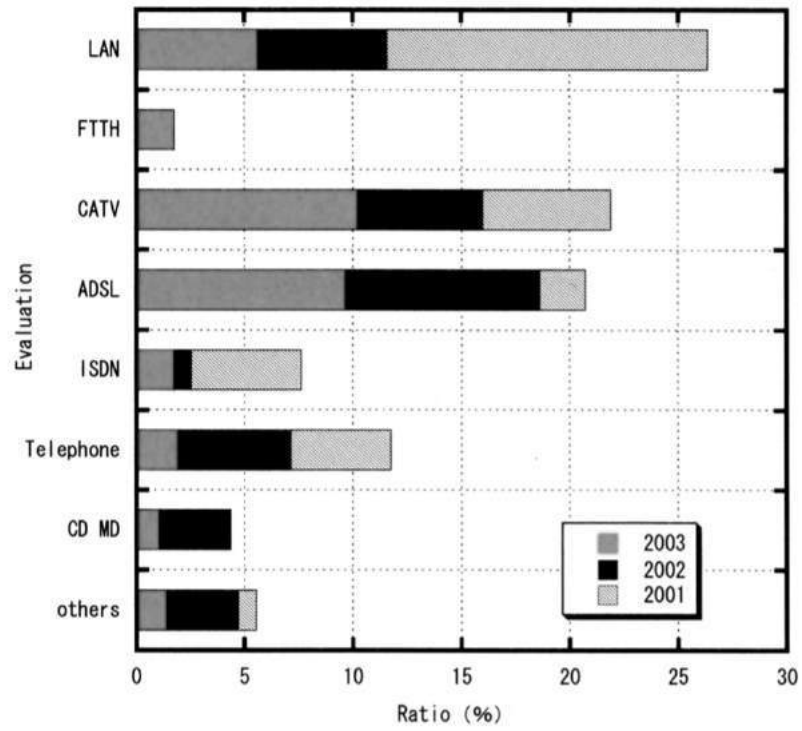


Figure 4: Student evaluation

## Referencias

1. Li, J., & Chen, B. (2009, August). Application of streaming media technology for modern education. In 2009 IEEE International Symposium on IT in Medicine & Education (Vol. 1, pp. 454-457). IEEE.
2. Pereira, J. A., Pleguezuelos, E., Merí, A., Molina-Ros, A., Molina-Tomás, M. C., & Masdeu, C. (2007). Effectiveness of using blended learning strategies for teaching and learning human anatomy. *Medical education*, 41(2), 189-195.
3. Doe, N. P., John, R., Sitti, M., & Thirunavukkarasu, N. (2018). Interactive e-learning with integrated virtual reality. *Journal of Innovation in Computer Science and Engineering*, 8(1), 1-5.
4. Rizzo, A., Marti, P., Decortis, F., Rutgers, J., & Thursfield, P. (2018). Building narrative experiences for children through real time media manipulation: POGO World. In *Funology 2* (pp. 479-492). Springer, Cham.
5. Mendes, A. Q., Bastos, G., Amante, L., Aires, L., & Cardoso, T. (2019). Virtual pedagogical model: development scenarios.
6. Li, S. H., Lin, B. S., Tsai, C. H., Yang, C. T., & Lin, B. S. (2017). Design of wearable breathing sound monitoring system for real-time wheeze detection. *Sensors*, 17(1), 171.
7. Power, M. (2008). The emergence of a blended online learning environment. *MERLOT Journal of Online Learning and Teaching*, 4(4), 503-514.
8. Raman, S., & O'Toole Jr, J. W. (2005). U.S. Patent No. 6,910,078. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
9. Conklin, G. J., Greenbaum, G. S., Lillevold, K. O., Lippman, A. F., & Reznik, Y. A. (2001). Video coding for streaming media delivery on the Internet. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 11(3), 269-281.
10. Okutsu, M., DeLaurentis, D., Brophy, S. y Lambert, J. (2013). Enseñar un curso de diseño de ingeniería aeroespacial a través de mundos virtuales: una evaluación comparativa de los resultados del aprendizaje. *Computadoras y educación*, 60 (1), 288-298.



# Aplicación de la matemática en la criptografía conmutativa y no conmutativa

Tobar Farias Galo Wilfrido<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Almería (España), estudiante Doctorado en Informática, Master en Educación Informática, Guayaquil-Ecuador  
galotobar@gmail.com, galo.tobarf@ug.edu.ec

**Abstract.** La criptografía ha pasado por diferentes etapas para llegar lo que es actualmente. Se le considera el intercambio de información de manera oculta entre un emisor y un receptor, es el arte para codificar y a la vez de descodificar mensajes burlando a intrusos. Constantemente con nuevas estrategias y métodos en: una ciencia que usando las matemáticas como herramienta principal para su desarrollo. En este artículo se da un breve repaso de su historia, la importancia de las matemáticas para la codificación y descodificación de manera conmutativa y no conmutativa, las dos presentan diferentes interpretaciones de los mensajes, el paso a las encriptaciones de las llaves públicas como privadas con la innovación de los algoritmos en la criptografía desarrollada en la no conmutativa, permitiendo limitar hasta un cierto punto la información para los destinatarios. Las técnicas de seguridad es requisito en las empresas por la confidencialidad y la integridad del mismo por aspectos que influyen a diario a las encriptaciones de mensajes esto se debe a los robos de información, estafas valiéndose de las tarjetas de crédito procediendo a las extorsiones de cantidades de dinero según lo importante para la recuperación de los mismos, por ello, la importancia de recurrir e innovar cada día a las encriptaciones disfrazando los mensajes a códigos encubiertos. Cifrar el contenido del mensaje dependerá de cuán importante la organización el individuo considere a qué nivel de protección tendrá que adquirir en equipos de seguridad tecnología.

**Keywords:** Matemáticas, Criptografía, Conmutación de datos.

## 1 Antecedentes de la Criptografía

### 1.1 Historia de la Criptografía

El surgimiento de la criptografía se dio por asuntos militares, comerciales y religión, volviéndose poco a poco el medio indicado para poder transmitir un mensaje a su destinatario, la manera clásica de poder enviar por métodos que solo el emisor y receptor comprenderán, pero con el mensaje encubierto por códigos ocultos para su desenvolvimiento, según (FERNÁNDEZ, 2004):

“Los sacerdotes egipcios manipularon el escritura hierática, que era visiblemente incomprensible para la población. Los antiguos babilonios asimismo utilizaron técnicas criptográficas en sus escritos cuneiforme.”

Hierática es el término griego de escritura formal, esterilizada, como sencilla que permitía a los escribas, los sacerdotes y científicos redactaran con rapidez y simplificada de manera religiosa o administrativa plasmarlo en papiros, como lo indica (CORTÉS, 2005)

La escritura no podía ser transcrita de forma corriente, ni en pincel en los papiros, en jeroglíficos cursivos. Las administraciones del Estado en busca de exclusividad para sus escritos, los escribas crearon la “Hierática”. Una escritura de líneas rectas siendo una simplificación de los jeroglíficos. Debido a que la velocidad de las escrituras se podía modificar a razón del carácter pictórico en las decoraciones y detalles omitidos, la llegada de la escritura hierática cambio este suceso.

## 1.2 Escítala Espartana

Los griegos desarrollaron la criptografía mediante las interacciones de bastones con tiras, en donde se ocultaba el mensaje cifrado. Indica (FERNÁNDEZ, 2004).

El primer caso claro de uso de métodos criptográficos se dio durante la guerra entre Atenas y Esparta. Historiador Plutarco, indica a la escítala del siguiente método:

La escítala como palo o bastón, enrollaba en forma de espiral una tira con material de cuero. En la tira se redactaba en columnas el mensaje al eje del bastón horizontalmente. Mostrada el texto en una tira sin correlación supuesta en el texto precedente, pero que lograba leerse retornando enrollando la tira envuelta al bastón de igual diámetro que el originario.

Un palo con características parecidas en longitud y grosor. Elaboraciones en tira cuero y papiro. El sistema consistía en ser del mismo grosor, enrollarlo con cintas a los bastones en forma de espiral, con escrituras longitudinalmente, las letras aparecían según las vueltas de cinta se haya colocado. El receptor descifra el mensaje a base de una misma vara para la lectura original.

Menciona (LUIS, 2013):“Antigua Grecia, específicamente en Esparta nació un nuevo sistema criptográfico escítala espartana, donde el mensaje implicaba incoherente a menos de tener una escítala parejo a la persona que redactó el mensaje”

Permitía la eficacia en cada una de las instrucciones a los generales de los ejércitos exitosamente confidenciales, impulsando a la utilización en los periodos de guerras. Mediante esta estrategia tanto el emisor como el receptor podrían tener facilidad de enviar mensajes sin recelo a intermediarios inoportunos.

## 1.3 Cifrado de César

César Julio (100-44 a.C) romano político que llegó a ver la necesidad de ocultar sus mensajes con el fin de evitar enemigos, los mismos eran enviados a legiones que conformaban a su mando, consistía en sustitución por letras ubicadas de tres lugares diferentes a su posición habitual, se desplaza tres espacios, A en tres puestos siendo D sucesivamente hasta Z a C. Ejemplo:

Aplicación de la matemática en la criptografía conmutativa y no conmutativa

**Tabla 1--Alfabeto del cifrado de César.**

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
U	V	W	X	Y	Z				
X	Y	Z	A	B	C				

Fuente: Elaboración propia

Como, por ejemplo:

La palabra " UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL " transformado:

**Tabla 2-- Alfabeto del cifrado de César**

U	N	I	V	E	R	S	I	D	A	D	D	E	G	U	A	Y	A	Q	U	I	L
X	Q	L	Y	H	U	V	L	G	D	G	G	H	J	X	D	B	D	T	X	L	O

Fuente: Elaboración propia

Se define con el siguiente código en:

"XQLYHUVLGDG GH JXDBDTXLO "

## 2 Atbash hebreo

Palabra procedente del hebreo, conocido como un método clásico espejo, en donde consiste en sustituir los lugares habituales de las letras del abecedario por otras, la primera con la última, por la necesidad de no atribuir a babilonia en sus escritos, o algún mensaje relacionado con el mismo, según (FERNÁNDEZ, 2004).

Jeremías.25,26 Libro de la Biblia, Babilonia: Babel se cambia a Sheshash. Las letras del mensaje de comienzo se reemplazan una a una, acorde con la norma siguiente: si el originario se halla en la línea superior se reemplaza por la letra adecuada de la línea inferior, y a la inversa. Asimismo, la a (aleph) se cambia en t (aw), y la letra b(eth) se convierte en sh(in). Por tanto, la palabra Babel se convierte en Sheshash.

**Tabla 3-- Alfabeto Atbash.**

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Z	Y	X	W	V	U	T	S	R	Q
K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
P	O	N	M	L	K	J	I	H	G
U	V	W	X	Y	Z				
F	E	D	C	B	A				

Fuente: Elaboración propia.

Retomando el ejemplo de "M A T E M A T I C A S" se transforma en:

**Tabla 4-- Aplicación del Alfabeto Atbash**

M	A	T	E	M	A	T	I	C	A	S
N	Z	G	V	N	Z	G	R	X	Z	H

Fuente: Elaboración propia

Se define en código en:

``S F N Z M R W Z W``

## 2.1 Criptografía medieval

Con herramientas sencillas, papel, lápiz, maquinaria sencilla, dio paso a las encriptaciones de mensajes más allá de las sustituciones. Bases que permitieron el desarrollo de criptoanálisis (interpretar y romper mensajes ocultos), la computación, electrónica, pasos a los primeros mensajes a cambios actuales. Etapa en que la criptografía asimétrica (dos tipos de claves: Llave pública y privada) se estandarizó con algoritmos siendo una nueva estrategia en los años 70 por parte de los gobiernos. Como indica (PABLO, 2014): “La máquina enigma utilizada principalmente para las comunicaciones alemanas durante la guerra tenía un funcionamiento complejo. Se fundamentaba en cinco rotores que alteraban cada vez que se pulsaba una tecla, cada letra del alfabeto brindaba un número alto de posibilidades”. El Ejército alemán cambiaba la posición de los rotores una vez al mes. Los señorías alemanes de la época veían a Enigma como indescifrable.

El enigma fue clave exitosa para la guerra, pero, para la humanidad, las tragedias más grandes hasta la historia, lo que permitió esta máquina es descifrar de manera clara el mensaje que estaba transmitiendo el enemigo entre las comunicaciones de los militares, por ello el nombre, estas variaban según sus pulso de tecla, las posibilidades que arrojaba en el alfabeto, de manera que no se podría descifrar fácilmente por parte contraria, Alemania por su parte, a medida que pasaba el tiempo se cambiaba los rotores al menos una al mes, en ese entonces era indescifrable.

Entonces los británicos, con su grupo de inteligencia con su misión de descifrar el código denominado enigma, y gracias a los análisis matemáticos determinaron posiciones de rotores. Como se ha evolucionado a partir de los métodos más sencillos se han ido implementando constantemente mejoras a las habilidades de encriptación de mensajes. Asegura (FERNÁNDEZ, 2004). Durante siglos la criptografía caminó por la senda de la sustitución y la transposición. En los escritos asombraban con términos como Thfpflxctxs y Oobice. Escondiendo sus nombres, los copistas manejaban el alfabeto zodiacal, establecían anagramas trastornando el orden de las letras (oobice, anagrama de Boecio) o acudían a una técnica designado fuga de vocales, en el que éstas se reemplazaban por consonantes o por puntos arbitrarias (Thfpflxctxs por Theoflactus). Esta facilidad descubrió que el reemplazo fuera el medio dominante. Por la época, muchos estudiosos creían indescifrable.

## 2.2 Criptografía Moderna

La criptografía clásicamente escondía el mensaje y el receptor tenía que dedicarse al tipo de clave enviada y el tiempo que ocupaba descifrarlo. La criptografía moderna permite el cambio a métodos de cálculos rápidos, estabilidad y seguridad.

El avance matemático dio paso a los sistemas seguros criptográficos. Encriptaciones que se volvieron factores como cifrarlo para el público, por los avances de algoritmos.

En esta etapa de desarrolló los criptosistemas como públicos, cuya llave se mantiene en secreto.



**Fig. 1.** La figura muestra el proceso de transmisión de los datos en una comunicación simple entre el transmisor y receptor.

Las claves, transformaciones de claves, espacios de textos cifrados, espacios claves, espacio de mensajes, llevan procesos donde se debe codificarse de manera correcta. Las codificaciones permiten que los códigos sean formulados mediante las pautas necesarias para llevar un correcto proceso de encriptación. Como indica (YEISON, 2016).

Las codificaciones son las transformaciones de las formulaciones de los mensajes a través de las normas o reglamentos de los códigos o un lenguaje anticipado. También se determina codificar a las operaciones con mayor de complejidad que se requiera menos interlocutores. Ejecutada por información emitida como código Morse.

Una programación inoportuna puede ocurrir que el programa no realice las funciones inicialmente planificadas. La confidencialidad como integridad son aspectos fundamentales, los cuales, de brindar disponibilidad a los sistemas, es importante el entorno de intercambios de informaciones que testificada mediante el internet.

Las nuevas bases surgidas ininteligiblemente a los sistemas criptográficos manipulando metodologías de cifrados dependiendo de los bloques que se clasifiquen, según los tipos de claves en tipos (dos) o en principales (familias), Claves como: Simétrica y pública.

### 3 Matemáticas en la criptografía

La matemática se presenta en diferentes áreas, puesto que, las matemáticas tienen a relacionarse con todas las demás materias de alguna manera, siendo la raíz de las ciencias. Los fundamentos matemáticos dan paso a las innovaciones algorítmicas, permite el camino a la aplicación de los cálculos matemáticos necesarios.

Como lo redacta (JULIA, 2017): “Las matemáticas están en nuestra vida y son un pilar fundamental de la ciencia, porque es el lenguaje donde se han escrito los modelos físicos que, después, han dado paso a la aplicación a través de la ingeniería”, explica un entusiasta Bellido, que va más allá y asegura que por “sí mismas las matemáticas empiezan a ser tecnología.

Aplicación de la matemática en la criptografía conmutativa y no conmutativa

La criptografía se clasifica de tres corrientes: Criptoanálisis, encargado de los averiguar el diseño del sistema que posee su escritura ocultando el mensaje, criptología encargado de las nuevas formas que proporciona la tecnología permitiendo el mejor avance a las comunicaciones, criptoanálisis, rompe el mensaje cifrado.

Indica (PAZ, 2006), en su determinado momento el entorno común de campos informáticos, criptográficos y las comunicaciones a base de áreas en matemáticas se los consideraban poco aplicadas o puras, pero las mismas han sido pieza fundamental para los avances tecnológicos.

La criptografía clásica ha pasado por fases de operaciones, permitiendo paso a los algoritmos, lo cual fue de gran importancia y relevancia de las matemáticas en la encriptación de mensajes.

María Cristina (CHALER, 2007) indica: “La matemática es el origen de las Ciencias Exactas y su exposición desarrolla en el hombre la tendencia abstracta, analógico, deductivo e inductivo”. La particularidad de la presunción la despierta el trabajo de pensar. Todo ser que piensa, genera estrategias y deduce, se está empleando en los mecanismos que las matemáticas.

### 3.1 Criptografía Conmutativa

Generalmente se presenta la criptografía de manera conmutativa. Base a ecuación, logaritmos, funciones de la recta, límites, es la manera criptográfica que se basa a realizar las programaciones a bases de operaciones matemáticas.

Unas de las definiciones a trabajar es la Criptograma, siendo mensajes escritos con códigos. Este método se lo puede realizar mediante matrices, donde, consiste en asignar números al alfabeto (espacios en blanco cero) de tal manera:

**Tabla 5- Método Criptograma.**

<b>A</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>	<b>g</b>	<b>h</b>	<b>i</b>	<b>j</b>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>K</b>	<b>l</b>	<b>m</b>	<b>n</b>	<b>o</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>r</b>	<b>s</b>	<b>t</b>
11	12	13	14	16	17	18	19	20	21
<b>U</b>	<b>v</b>	<b>w</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>	<b>_</b>	<b>.</b>		
22	23	24	25	26	27	0	28		

Fuente: Elaborado por autores.

Convertido, los mensajes pasan a ser repartidos en diferentes matrices cada uno de ellos con “n” elementos. Multiplicando las filas conformadas por “n” elementos, por cada matriz de orden “n” cuadrada, regular, para convertirla en su debido momento a inversa, para el proceso de decodificación.

Ejemplo:

<b>C</b>	<b>R</b>	<b>I</b>	<b>P</b>	<b>T</b>	<b>O</b>	<b>G</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>F</b>	<b>I</b>	<b>A</b>
3	19	9	17	21	16	7	19	1	6	9	1

Fuente: elaborado por autores

Aplicación de la matemática en la criptografía conmutativa y no conmutativa

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[3 \ 19 \ 9] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [21 \ -4 \ 60]$$

$$[17 \ 21 \ 16] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [49 \ 29 \ 80]$$

$$[7 \ 19 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [9 \ -4 \ 64]$$

$$[6 \ 9 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [8 \ 4 \ 33]$$

Mensaje cifrado entonces sería:

21 -4 60 49 29 80 9 -4 64 8 4 33

Con la matriz clave:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Consecutivamente la inversa de A:

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} & & \\ & & \\ & & \end{bmatrix}$$

$$[3 \ 19 \ 9] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [ \quad \quad ]$$

Aplicación de la matemática en la criptografía conmutativa y no conmutativa

$$[17 \ 21 \ 16] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [ \quad \quad \quad ]$$

$$[7 \ 19 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [ \quad \quad \quad ]$$

$$[6 \ 9 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [ \quad \quad \quad ]$$

Con apoyo de la tabla se asocia el mensaje oculto con sus números que se atribuyeron en el alfabeto y se obtiene el mensaje decodificado.

#### 4 Criptografía No Conmutativa

Termino denominado así por los algoritmos que se utilizan para la encriptación de los mensajes. Es evolución del sistema matemático a lo informático, claves públicas, como privadas, llaves, ckipurs. En este se aplica los algoritmos, lectura netamente informática que permite que las informaciones sean re direccionadas en caso de existir un tercero que quiera descifrarlo, estos cambian constantemente, siendo más seguras. Instrumentos virtuales a raíz de codificaciones gracias a la criptografía no conmutativa.

Investigadores como Martin Hellman y Whitfield Diffe de Stanford, plantean un algoritmo, hacer intercambios para la clave oculta con seguridad brindada computacionalmente, se utiliza las funciones unidireccionales o sentido único. El desarrollo de la criptografía de igual forma creció la incertidumbre de poderlo descifrar como indica (FERNANDO, 2015).

La criptografía asimétrica o claves públicas poseen propiedades características donde cada usuario recurre dos claves a diferencia a diferencia de una sola, como se realiza en la criptografía simétrica. Las claves públicas en cada usuario conocida para cifrar mensajes que sea enviado, la otra clave privada, donde el usuario se conoce al mismo, y, le consecuentemente descifra los mensajes recibidos

Los primeros avances fue la creación de claves públicas con la definición de criptosistema, componente de funciones unidireccionales invertibles, fácil de calcular en la computarización, en sentido inverso se ve reflejado la complicación.

La clave CCP dividida en dos partes, con la condición de una clave pública y una privada se obtiene con la creación de algoritmos de encriptaciones públicas, de manera que, se obtiene el algoritmo privado de des encriptación. Algoritmo de encriptaciones con conocimiento público. Privada es el atajo de información de la función, este es difícil de realizarla debido que al momento de computar se realiza con la función inversa. Menciona (ORTEGA, 2014)

Se puede apreciar en la actualidad diversos programas en los sitios web las pruebas gratuitas para el uso compartido por un determinado tiempo, existen programas que son



tiene restricciones, en donde el uso no va a ser costado. Aunque día a día se desarrollaran programas con recientes algoritmos con seguridad de software, casi al mismo tiempo, los crackers buscan maneras de alterar los mismos.

Hellman y Diffe con el nuevo método de claves, compartiendo materiales con seguridad por medio de canales inseguros, su método radica en idealizar difícil de resolverlo como un problema de logaritmo (PLD) denominado Intercambio de clave Diffe-Hellman. Como indica: (MARRERO, 2003) “La propiedad de los documentos online es la supervisión, autenticidad confiabilidad. Referente a la necesidad que demanda el mismo. Para la inaccesibilidad para todos, a menos que se tenga un listado previo como medio autorizado”. Mediante la firma autográfica, poder realizar sus actividades de documentos certificados mediante vía electrónica se transmite la información en donde certifica al servidor enlazar de manera segura su autenticación y firma electrónica. Su objetivo lograr que los tramites o documentaciones se agilicen desde la comodidad en cualquier lugar que se encuentre el usuario. Los certificados de certificados de servicios seguros SSL en Ecuador son ofertados a los ciudadanos.

Como lo menciona (GUSTAVO, 2012), En las transacciones normales se utilizan diferentes tipos de protocolos para los ataques que se puedan presentar. Actualmente el mundo vive la era digital para ser mucho más rápido, el uso de transacciones de bienes y servicios para el manejo de sistemas con procesamiento de datos que acceda a las líneas o medias teles procesadoras.

#### 4.1 Firmas electrónicas.

Series de códigos que representan personas naturales o jurídicas, con validez de igual manera legal como los procesos en personas. Su propósito de agilizar y facilitar los trámites del usuario, evitando que tenga que trasladarse a empresas a firmar de manera manuscrita. Estos procesos se realizan en documentos PDF, Word, Excel. Correo electrónico, como entre otras maneras.

Los servicios que brinda son seguro contrato, security póliza, security factura. Cada uno con procesos diferentes que permiten al usuario procesos seguros, con ahorro de tiempo y de dinero.

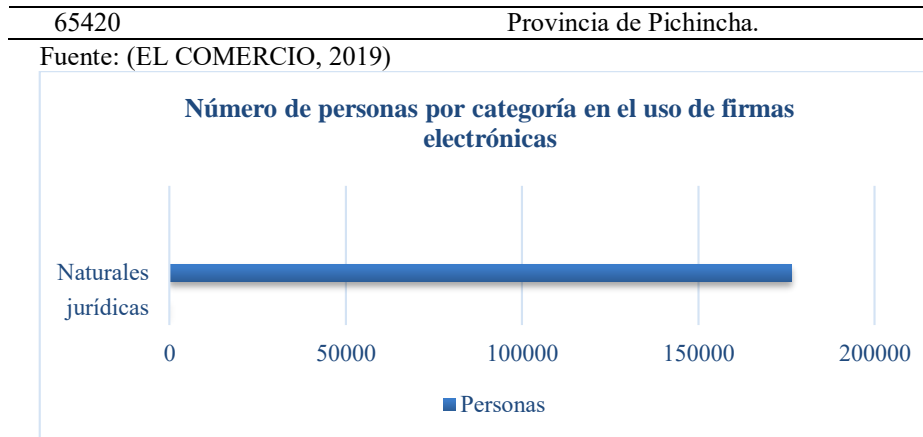
Según (EL COMERCIO, 2019): “En el Ecuador 176420 personas utilizan las firmas electrónicas en trámites de importaciones, exportaciones y compras públicas en función a la comodidad del cliente.”

Las personas que asumen esta facilidad permiten que sus archivos sean guardados en CD y USB se considera que trabajos en community manager independiente los más propensos a utilizar debido a la necesidad de agilizar los procesos.

Cifras de certificados mediante la utilización de firmas electrónicas emitidas en Ecuador según (EL COMERCIO, 2019) se estima:

**Tabla 6- Cifras de certificados-firmas electrónicas emitidas en Ecuador.**

NÚMERO DE PERSONAS	PROVINCIAS
6518	Provincia del Oro.
8314	Provincia de Manabí.
9761	Provincia del Azuay.
51422	Provincia del Guayas.



**Fig. 2.** La figura muestra según los datos de la fuente sobre el uso de las firmas electrónicas por parte de los ecuatorianos.  
Fuente: (EL COMERCIO, 2019)

#### 4.2 Experimentación:

El artículo ha presentado la evolución de la criptografía, consiguientemente, se realizó una experimentación a la comunidad universitaria: UG "Universidad de Guayaquil". Basado en una encuesta cuantitativa de conocimientos criptográficos inversos en la vida cotidiana. Preguntas correlacionadas para entablar el conocimiento que se maneja sobre las encriptaciones.

Como lo menciona (WILSON, 2003) "Conglomeraciones organizadas jurídica como política del ser humano integrada por el Estado como elemento constitutivo", siendo un conjunto de seres humanos que habitan en un determinado lugar.

La muestra se define según (CARLOS, 2009): "Investigaciones cuantitativas con requisitos necesarios considerada de manera representativa. Planteado de manera probabilístico y no probabilístico, toma de estudios o experimentaciones con la finalidad de estudiarlo o definir sus características", la fórmula empleada para la encuesta se denomina "fórmula muestra" (GLADYS, 2011).

Para determinar la muestra pertinente el cual se debe medir a la población escogida para el muestreo ejecutado en campo donde se aplicarán las conclusiones de los objetos o individuos.

Nivel de confianza (GLADYS, 2011): Intervalos aleatorios usados para dar valores a una determinada probabilidad de la población el cual puede presentarse alta.

NIVEL DE CONFIANZA	$Z_{\alpha}$
99.7%	3
99%	2.58
98%	2.33

Aplicación de la matemática en la criptografía conmutativa y no conmutativa

96%	2.05
95%	1.96
90%	1.64
80%	1.28
50%	0.674

Fuente: Elaborado por autores

**Formulación muestra**

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{Ne^2 + z^2 \cdot p \cdot q}$$

- n = Tamaño de la muestra
- z = nivel de confianza
- p = Probabilidad a favor
- q = Probabilidad en contra
- N = Población-censo
- e = Error de Estimación

**Datos**

- Z = 95% = 1,96
- p = 50% = 0,5
- q = 50% = 0,5
- N = 2200
- e = 5% = 0,05

$$n = \frac{2^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{NE^2 + 2^2 \cdot p \cdot q}$$

$$n = \frac{(1,96)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 2200}{(2200)(0,05)^2 + (1,96)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5} = 327,05$$

La aplicación de la formulación de encuestas a 327 personas. Cinco preguntas formuladas y correlacionadas para evaluar el conocimiento criptográfico a la comunidad universitaria.

Posteriormente las tabulaciones con sus respectivas cuantificaciones.

¿Conoce usted sobre algún sistema de seguridad informática basado en las matemáticas?

**Tabla 8- Distribución de respuestas del conocimiento sobre algún sistema de seguridad informática basado en las matemáticas**

OPCIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Mucho	13	4%
Algo	68	21%
Poco	47	15%
Nada	197	60%
<b>TOTAL</b>	325	100%

Fuente: elaborado por autor

## Aplicación de la matemática en la criptografía conmutativa y no conmutativa

Los resultados de la muestra sobresalen la falta de desconocimiento sobre algún sistema informático por parte de los encuestados.

¿Con qué frecuencia usted cambia las claves de seguridad?

**Tabla 9- Distribución de respuestas de la frecuencia usted cambia las claves de seguridad**

OPCIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Siempre	194	36%
A veces	116	5%
Nunca	15	59%
<b>TOTAL</b>	<b>325</b>	<b>100%</b>

Los resultados de la muestra sobresalen que las frecuencias de cambios de clave de seguridad acontecen periódicamente por parte de los encuestados.

¿Ha tenido la oportunidad de utilizar algún sistema donde solicite cambio de contraseña?

**Tabla 10-Distribución de respuestas**

OPCIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Siempre	218	67%
A veces	86	27%
Nunca	21	6%
<b>TOTAL</b>	<b>325</b>	<b>100%</b>

Fuente: elaborado por autor

Los resultados de la muestra sobresalen que los encuestados utilizan frecuentemente algún sistema donde solicite cambio de contraseña.

¿Conoce usted algún método numérico o algorítmico de seguridad informática?

**Tabla 11-Distribución de respuestas de conocimiento a métodos numéricos o algorítmico de seguridad informática**

OPCIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Mucho	204	63%
Algo	54	16%
Poco	55	17%
Nada	11	3%
Nunca	1	1%
<b>TOTAL</b>	<b>324</b>	<b>100%</b>

Fuente: elaborado por autores

Los resultados de la muestra que los encuestados algún método numérico o algorítmico de seguridad informática

¿Ha escuchado para que sirve o cómo funciona la criptografía?

**Tabla 12-Distribución de respuestas del conocimiento de cómo funciona la criptografía**

OPCIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE
SI	47	15%
NO	275	85%
<b>TOTAL</b>	<b>322</b>	<b>100%</b>

Fuente: elaborado por autor

En el resultado final, pregunta objetiva, demuestran que existen mayor desconocimientos criptográficos en la población universitaria.

## 5 Agradecimientos

A los grupos de estudiantes y personal docente de la Universidad de Guayaquil que colaboraron con las respuestas responsables sobre sus conocimientos en referencia a su conocimiento sobre la criptografía.



**Fig. 3.** La figura muestra al autor realizando la encuesta a diferentes estudiantes utilizando google form para el desarrollo de la investigación.

**Fuente:** Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química-Laboratorio de computación.

## 6 Conclusiones

Para este artículo de tipo documental en base a los datos recogidos en campo en la Universidad de Guayaquil, podemos inferir que un alto número de los encuestados desconocen el término de criptografía o su incidencia de la matemáticas en la seguridad informática, sin embargo, en las preguntas anteriores correlacionadas a la criptografía de manera implícita la mayor frecuencia de respuestas aceptaban haber participado en alguna de las actividades presentadas, de allí se da a relucir que la criptografía no está difundida, por lo tanto, las acciones relacionadas a la criptografía se los realiza sin saber la metodología que se aplica, incluso, en la encuesta se suscitaron casos de no indicar respuesta por evitar su desconocimiento del tema.

Factores a incidir como la falta de autoeducación a temas existentes o nuevos sobre la tecnología, a pesar de estar inversos en el día a día, la base del porque se ejecuta no se está fundamentado, lo que produce estos resultados presentados.

## References

1. Author, F.: Article title. Journal 2(5), 99–110 (2016).
2. BRENDA. (25 de Enero de 2012). miarroba. Obtenido de escritura hierática egipcia: <https://fotolog.miarroba.com/monimon1/escritura-hieratica-egipcia-152/>
3. CARLOS, A. J. (2009). MUESTRA EN INVESTIGACION CUANTITATIVA. Redalyc org, 13-17.
4. CHALER. (21 de Mayo de 2007). Agencia CyTA noticias de ciencia y tecnología . Obtenido de LA CIENCIA MADRE: <https://www.agenciacyta.org.ar/2007/05/la-ciencia-madre/>
5. CORTÉS, S. P. (2005). EL ESCRIBA EGIPCIO. En S. P. CORTÉZ, ESCRIBAS (págs. 1-10). México: Departamento Editorial de la Coordinación General de Difusión Cultural de la Universidad Autónoma Metropolitana .
6. Cortés, S. P. (2005). EL ESCRIBA EGIPCIO. En S. P. Cortés, ESCRIBAS (págs. 1-10). México: Departamento Editorial de la Coordinación General de Difusión Cultural de la Universidad Autónoma Metropolitana.
7. ecwiki. (1 de Diciembre de 2019). Jeremías. Obtenido de Jeremías: <https://ec.aciprensa.com/wiki/Jerem%C3%ADas>
8. EL COMERCIO. (11 de Septiembre de 2019). EL COMERCIO. Obtenido de Actualidad negocios: <https://www.elcomercio.com/actualidad/firma-electronica-ecuador-autorizacion-banco.html>
9. FERNÁNDEZ. (2004). Criptografía clásica. academia.edu, 141.
10. Fernández, S. (2004). La criptografía clásica. academia.edu, 141.
11. FERNANDO, A. N. (2015). Implementación de seguridad mediante criptografía para servidores basados en software libre, para el laboratorio de redes de la carrera de ingeniería en informática y sistemas computacionales, durante período 2013. tesis.unap, 10-25.
12. Gladys, B. (2011). Aproximación al muestreo estadístico en investigaciones científicas. Revista bolivianas-scielo, 3-6.
13. GLADYS, B. (2011). Aproximación al muestreo estadístico en investigaciones científicas. revistasbolivianas-scielo, 3-6.
14. GUSTAVO, M. A. (18 de octubre de 2012). PRINCIPIOS PARA EL ANÁLISIS DE CRIPTOGRAFÍA DIGITAL. Obtenido de biblioteca.usac.edu: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0316\\_EO.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0316_EO.pdf)
15. HALL, S. (2004). Codificación y decodificación en el discurso televisivo . CIC cuadernos de información en el discurso televisivo, 215-225.
16. JULIA, Y. (05 de Junio de 2017). LANZA . Obtenido de Las matemáticas, la madre de casi todas las ciencias: <https://www.lanzadigital.com/provincia/ciudad-real/las-matematicas-la-madre-de-casi-todas-las-ciencias/>
17. LUIS, C. (20 de diciembre de 2013). Vavel. Obtenido de Criptografía a través de la historia: <https://www.vavel.com/es/masvavel/2013/12/20/historia/310875.html>
18. MANUEL, H. J. (s.f.). INTRODUCCION A LA PROTECCIÓN DE LA INFORMACIÓN. academia.edu, 20.
19. MARRERO, T. (2003). La Criptografía como elemento de la seguridad informática. Scielo, 3-12.
20. Matiella, B. (27 de mayo de 2016). QORE. Obtenido de Cosas que no sabías de los jeroglíficos egipcios : <https://www.qore.com/noticias/49792/Cosas-que-no-sabias-de-los-jeroglificos-egipcios>
21. MATIELLA, B. (27 de mayo de 2016). QORE. Obtenido de Cosas que no sabías de los jeroglíficos egipcios: <https://www.qore.com/noticias/49792/Cosas-que-no-sabias-de-los-jeroglificos-egipcios>

Aplicación de la matemática en la criptografía conmutativa y no conmutativa

22. NEOCHANGE. ( 5 de 07 de 2009). Neochange. Obtenido de La escitala espartana: <http://neochange.blogspot.com/2009/05/la-escitala-espartana.html>
23. NEOCHANGE BLOG. (5 de 07 de 2009). Neochange blog. Obtenido de La escitala espartana: <http://neochange.blogspot.com/2009/05/la-escitala-espartana.html>
24. ORTEGA, C. (2014). Sistema de Seguridad de Software Aplicando Criptografía Con Ac. scribd, 5-12.
25. PABLO, B. (06 de Febrero de 2014). eldiario.es. Obtenido de Código Enigma, descifrado: el papel de Turing en la Segunda Guerra Mundial: [https://www.eldiario.es/turing/criptografia/alan-turing-enigma-codigo\\_0\\_226078042.html](https://www.eldiario.es/turing/criptografia/alan-turing-enigma-codigo_0_226078042.html)
26. PAZ, M. (23 de Mayo de 2006). LAS MATEMÁTICAS EN LA CRIPTOLOGÍA. Encuentros Multidisciplinarios , 1-7. Obtenido de LAS MATEMÁTICAS EN LA CRIPTOLOGÍA.
27. sinfocol. (10 de OCTUBRE de 2008). Cifras hebraicas: Atbash, Albam y Atbah. Obtenido de Atbash: <http://www.sinfocol.org/2008/10/cifras-hebraicas-atbash-albam-y-atbah/>
28. SINFOCOL. (10 de octubre de 2008). Cifras hebraicas: Atbash, Albam y Atbah. Obtenido de Atbash: <http://www.sinfocol.org/2008/10/cifras-hebraicas-atbash-albam-y-atbah/>
29. Velasco, J. J. (20 de 05 de 2014). eldiario.es. Obtenido de Breve historia de la criptografía: [https://www.eldiario.es/turing/criptografia/Breve-historia-criptografia\\_0\\_261773822.html](https://www.eldiario.es/turing/criptografia/Breve-historia-criptografia_0_261773822.html)
30. WILSON, L. H. (2003). LA POBLACION . dialnet-unirioja, 225-229.
31. YEISON, M. (2016). Enigmática. Calaméo, 2-10.