

V JORNADAS DE DOCTORADO EN INFORMÁTICA

25 DE FEBRERO DE 2022,
UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

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

V Jornadas de Doctorado en Informática

texto:
los autores

Libros Electrónicos n.º 131

edición:
Editorial Universidad de Almería, 2022
editorial@ual.es
www.ual.es/editorial
Telf/Fax: 950 015459

α

ISBN: 978-84-1351-142-9



Esta obra se edita bajo una licencia Creative Commons
CC BY-NC-SA (Atribución-NoComercial-Compartirigual) 4.0 Internacional

Edita: Comisión Académica de Doctorado en Informática
Editores: Luis Iribarne, Ester Martín y Manuel Berenguel
Lugar: Universidad de Almería
<https://sites.google.com/ual.es/jdi2022/>
@doctoradoINFUAL
doctorado.informatica@ual.es

edual  editorial
UNIVERSIDAD
DE ALMERÍA



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



V Jornadas de Doctorado en Informática

25 de febrero de 2022, Universidad de Almería

Las V Jornadas de Doctorado en Informática de la Universidad de Almería (JDI2022@UAL) son 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 quinta edición, estas jornadas han contado con el envío de 19 trabajos de investigación en progreso y 17 pósteres, así como con la presentación de los resultados de las tesis doctorales ya finalizadas en el año 2021 tituladas “*Modelado y control del proceso de producción de biomasa de microalgas en reactores abiertos*”, “*Computación cuántica y técnicas HPC para resolver problemas de microrreología y de reducción de dimensionalidad*” y “*Procesamiento eficiente de consultas en sistemas de gestión de datos espaciales distribuidos*” presentadas por los estudiantes egresados Dr. Enrique Rodríguez, Dr. Francisco Orts, y Dr. Francisco García, respectivamente. Además, esta edición también ha contado, una vez más, con una charla invitada sobre “*Movilidad Internacional*” impartida por la profesora María del Mar Sánchez Pérez, directora de secretariado de Movilidad Internacional del Vicerrectorado de Internacionalización de la Universidad de Almería.

<https://sites.google.com/ual.es/jdi2022/>

Trabajos presentados

1.	MOOC para la enseñanza en tiempos de COVID-19	1
2.	Control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones para sistemas de segundo orden	13
3.	Clasificación de Uso y Cobertura del Suelo en el páramo ecuatoriano usando métodos basados en píxeles, objetos y aprendizaje profundo.	26
4.	La curación de datos en IoT: un enfoque de modelo de decisión	35
5.	Avances en el modelado y control del clima de un invernadero	42
6.	Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones	50
7.	Advanced predictive control strategies applied for controlling solar thermal systems	60
8.	Model-based methodology for the early warn detection of cucumber downy mildew in greenhouses	70
9.	Un Servicio de Descubrimiento Proactivo para la Web de las Cosas	81
10.	Optimización del entrenamiento de las redes neuronales Pix2Pix	87
11.	WoTnectivity: estableciendo un patrón de comunicación común para el manejo de dispositivos WoT	97
12.	Aceleración de planes de radioterapia de intensidad modulada basados en el método de Descenso por Gradiente	104
13.	IoT aplicado al sector agroindustrial, uso de modelos como servicio y arquitectura cloud	118
14.	Algoritmo cuántico de segmentación de doble umbral para agricultura de precisión	125
15.	Modelado y control del proceso de producción de microalgas mediante estrategias de aprendizaje automático	131
16.	Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional y compensación de movimiento controlada por el cliente	141
17.	Implantación de un sistema de videoconferencia multipunto a través de internet aplicando tecnología streaming	151
18.	Caracterización y modelado de la tecnología de destilación multi-efecto (MED) para tratamiento de aguas	161
19.	Modelado y gestión energética de una microrred	172

MOOC para la enseñanza en tiempos de COVID-19

Marlon Altamirano Di Luca¹[0000-0002-2456-3372]

¹ Especialista en Seguridad Informática, Tecnológico Universitario Argos, Guayaquil - Ecuador
marlon.altamirano.diluca@gmail.com

Abstract. La CoVID-19, enfermedad originada por el virus SARS-CoV-2, hizo que se fortalecieran los procesos de capacitación y superación profesional y en especial la integración entre los procesos industriales para los profesionales. Para el fortalecimiento de la enseñanza en tiempos de Covid-19, como solución viable lo constituye la integración de los Cursos Abiertos Masivos en Línea y su integración con la información que se almacena en las plataformas digitales educativas. El objetivo que se persigue en el presente trabajo es, fundamentar a partir de la integración de los Cursos Abiertos Masivos en Línea y las plataformas digitales, el conjunto de pasos para el fortalecimiento de la calidad de los cursos online en el proceso de enseñanza – aprendizaje. El método que se utiliza para evaluar la efectividad de la integración de los os Cursos Abiertos Masivos en Línea y las plataformas digitales para un proceso de enseñanza de calidad es el Delphi con criterio de experto. Se evidenció que el factor tiempo es la clave para fundamentar la integración entre los Cursos Abiertos Masivos en Línea y las plataformas digitales para un proceso de enseñanza. Se concluye que sin la medición de los resultados no se puede valorar el éxito de la integración de los os Cursos Abiertos Masivos en Línea y las plataformas digitales para un proceso de enseñanza de calidad.

Keywords: Aprendizaje; Cursos Abiertos Masivos en Línea; plataformas digitales

1.1 Introducción

En la sociedad actual la presencia de la CoVID-19, enfermedad originada por el virus SARS-CoV-2, que ha azotado países y continentes, ha causado un nivel inusitado de sufrimiento humano, agitación social y daño económico, que ha puesto en recesión diferentes actividades sociales como es la participación presencial en las escuelas. A raíz de esta situación muchos elementos han tenido que ser cambiado y aun así continúan cambiando a nuestro alrededor a una velocidad de vértigo.

Gracias a la transformación que ha ocasionado Internet y las nuevas tecnologías, es que muchos factores sociales y económicos, han podido continuar para aquilatar las dificultades que se han presentado en los trabajos, en las vidas cotidianas, para apalancar la crisis actual que vive el mundo. La adaptación a cambios insuperables debido a la presencia de la CoVID-19, también ha sido para las Universidades y en especial para los profesores que, han tenido que adaptarse a dejar la presencialidad del proceso docente –educativo y de enseñanza – aprendizaje para asumir estos procesos online.

Constituye un reto de innovación docente el trabajo online, lo que ha propiciado el fortalecimiento de los procesos de capacitación y superación profesional con énfasis en el uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC). En la actual crisis el fortalecimiento de los procesos de capacitación y superación profesional, se ha dado haciendo uso de las TIC, como solución viable a través de la integración de los Cursos Abiertos Masivos en Línea (MOOC, Massive Open Online Courses) para lograr competencias profesionales y usar con eficiencia la información que se almacena en las plataformas digitales educativas como lo son; los portales digitales, los repositorios y la web semántica, en aras de llevar a cabo el proceso de enseñanza – aprendizaje de forma online. [1]

Refieren los citados autores que los MOOC, llegaron para establecerse como una de las tendencias importantes dentro del e-Learnig, al aceptarse favorablemente por los estudiantes y por las diferentes Instituciones Educativas de Nivel Superior (IES). A través de los MOOC, es posible descentralizar el proceso de enseñanza - aprendizaje, lo que posibilita mayor visibilidad a nivel mundial y en el contexto actual ha repercutido de forma significativa en la educación online, al estar organizado académicamente; el proceso docente y en consecuencia el proceso de enseñanza – aprendizaje, con un significado estructurado por unidades de estudio, donde el acceso a la información para tal organización se realiza desde las plataformas digitales, almacenadoras de información, como los repositorios digitales, los portales y la web semántica.

El proceso de integración de MOOC con plataformas digitales, conlleva un aprendizaje continuo, preparación y superación profesional permanente, para gestionar con calidad la información requerida a utiliza para impartir docencia online. La información que se encuentra contenida en las plataformas digitales y que son manipuladas a través de la Web, son modelos bien definido de tratamiento de la información en internet, estas plataformas se han consolidado a través de mecanismos para su integración con el fin de establecerse como herramienta tecnológica que contribuya a la gestión del conocimiento en las actividades educativas. [1]

De acuerdo con lo citado por los referidos autores, es de destacar que, la integración de los servicios Web, como es la web semántica con los MOOC, es favorable por ambos poseer mecanismos tecnológicos factibles para integrarse y constituir una plataforma tecnológica adecuada para el proceso de enseñanza en IES. A través de la integración de la web semántica y los MOOC es posible trabajar de manera coordinada, dado que esta integración propone facilitar la localización de los recursos a través de metadatos semánticos, que describen contenido, significado y la relación de los datos, lo que conduce a la comunicación entre sistemas y programas lo que obedece a la utilización y reutilización de recursos que se encuentran disponibles en la web.

Todo el proceso relacionado con los MOOC, ha supuesto una revolución en el acceso de superación, por un lado, los MOOC permiten extender y complementar la formación a lo largo de la vida de una persona, ofreciéndole oportunidades para un reciclaje continuo de sus conocimientos y una mejora en sus perspectivas laborales. Por otro lado, los MOOC se han incorporado progresivamente en la estrategia digital de muchas IES, como una forma de visibilidad, o como complemento a los programas de estudio tradicionales. [2]

La adopción de los MOOC, a lo largo del mundo, en las diferentes regiones, ha sido muy heterogénea. Pérez-Sanagustín, Maldonado, Morales refieren que desde los inicios de los 2016, la incorporación de las IES con los MOOC, en la Región de Latinoamérica fue muy tardía, y que el ritmo de producción de MOOC era en aquel entonces de entre 4 y 5 veces menos en comparación con Europa [3]. No obstante, en el año 2020, con la presencia de la CoVID-19, los MOOC, tuvieron que ser utilizada por casi todo el mundo, para una u otras acciones.

Los MOOC, ya no era algo ajeno en el contexto educativo y propiamente en países latinoamericanos como; Ecuador, Chile, Perú, Salvador, Bolivia, Guatemala, Colombia, se consolidaron para fortalecer los procesos de capacitación y superación profesional de los profesionales que asumían el reto del proceso de enseñanza-aprendizaje online, mediado por plataformas digitales como la Web Semántica para gestionar la información necesaria a utilizar y lograr la calidad educativa requerida en tiempos de CoVID-19.

Constituye los MOOC, un medio que exige a los profesores diferentes habilidades tecnológicas, didácticas y tutoriales [3], de ahí la continua superación para afrontar con éxito el proceso de enseñanza – aprendizaje online en tiempo de CoVID-19. En este contexto, existen diversas problemáticas en el momento de accionar a través de un MOOC, lo que se puede reconocer a partir de lo aportado por McAuley, Stewart, Siemens & Cormier, como dificultades en cuestiones logísticas, tecnológicas, pedagógicas y financieras; que los educadores deben afrontar. [4]

Desde el punto de vista pedagógico, menciona Kiers & Jorge, que una de las principales diferencias reside en el número masivo de estudiantes que puede cubrir un MOOC; lo cual a simple vista es una desventaja, que para ser superada se requiere de la integración de variados recursos que promuevan mayores niveles de compromiso, motivación y aprendizaje, evitando de este modo, el abandono de curso a través de MOOC, una vez comenzado [5]. Por tal motivo los MOOC en el contexto actual y para la Universidad Estatal Península de Santa Elena Ecuador, no se utiliza para interactuar con los estudiantes, en este contexto se utiliza la plataforma Moodle, MOOC, es utilizado para orientar y preparar a un grupo reducido de personas, que son los profesores que enfrentan el reto del proceso de enseñanza – aprendizaje de forma online y para gestionar la información necesaria en el fortalecimiento de los conocimientos necesarios a utilizar para ejecutar el proceso referido a través de la plataforma Moodle.

Desarrollar las competencias necesarias en los profesores para afrontar el potencial de las nuevas tecnologías y su uso en el aprendizaje, es una tarea que requiere de esfuerzo y práctica [6]. En la Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador, se considera como un aspecto clave, hacer explícitas las lecciones que se van a enseñar durante el curso, con el objetivo de definir y delimitar el contenido que va a ser parte del proceso de enseñanza – aprendizaje que llevan a cabo de forma online a través de Moodle, el cual debe estar diseñado y aprobado en la preparación docente que se lleva a cabo a través de los MOOC.

Los profesores que se capacitan deben seleccionar el contenido de los cursos, así como recopilar todos los materiales disponibles, desde los MOOC y su integración con las plataformas digitales, como lo es la Web Semántica de la universidad, caso de estudio, para luego distribuirlos de acuerdo con los temas que se proponen en los cursos

4

para la enseñanza – aprendizaje de forma online en la plataforma Moodle. Proceso dividido por las restricciones que poseen una y otra plataforma, las cuales y como estrategia de la universidad caso de estudio, se utilizan para fines diferentes en aras de garantizar la calidad educativo y controlar la gestión pedagógica para contribuir al aprendizaje de los profesores y de los estudiantes.

El estudio realizado por Sammour y col., refiere que una de las alternativas posibles para intentar resolver la problemática de la selección del contenido de los cursos, así como de la recopilación de los materiales disponibles de un curso MOOC, es la de integrar los MOOC con los distintos tipos de desarrollos y tendencias tecnológicas, es decir, integrar la información de los MOOC con información contenida en portales digitales, en repositorios y específicamente con la Web Semántica y propiamente con las plataformas diseñadas para los procesos de enseñanza – aprendizaje y docente – educativo, dígase Moodle, e-learnig, b-learning, etc., [7]. Estas plataformas y la web semántica pueden mejorar, el descubrimiento, la accesibilidad, la visibilidad y la reutilización de contenidos y por tanto contribuye con la calidad de los MOOC.

El uso de la Web, para el tratamiento de la información en internet, es considerablemente práctica para la comunicación, el comercio, el entretenimiento, los negocios entre otros, [1]. Los servicios Web, se han consolidado como una tecnología esencial para la cooperación en Internet, hacer uso de ellos resulta favorable para abordar temáticas de interés en los cursos MOOC, como lo demandan los profesionales en formación.

A través de la integración de la Web Semántica y los MOOC, es posible trabajar de manera coordinada en base a la información requerida para un proceso de enseñanza – aprendizaje con calidad, necesario para la formación de profesionales. Esta integración propone facilitar la localización de los recursos a través de metadatos semánticos, que describen contenido, significado y la relación de los datos, lo que conduce a la comunicación entre sistemas y programas lo y obedece a la utilización y reutilización de recursos que se encuentran disponibles en la web.

Un aporte lo constituyen las ontologías, es decir hacer uso de Web semántica basada en ontologías, según Sammour y col., facilita la personalización del aprendizaje en MOOC, ya que, a través de las ontologías, en la Web semántica, se presenta un enfoque basado en la representación semántica de conocimiento del área temática que se requiera y en particular podrán los profesionales que se forman, hacer uso de ella para una mejora continua del proceso de enseñanza – aprendizaje [7]. La propuesta basada en el uso de ontologías, parte de que los profesores que se enfrentan al proceso de enseñanza – aprendizaje online, tienen diferentes niveles de educación asociadas a sus necesidades o preferencias, lo que es favorable para un proceso de enseñanza - aprendizaje de calidad.

Los MOOC son monolíticos y cerrados en el manejo de los datos según Höver y Mühlhäuser, lo que implica que el intercambio, reutilización y recuperación de materiales de aprendizaje de diferentes cursos sea complicado de hacer y en ese contexto, se proponen un cambio con respecto a los MOOC, es decir, proponen que estos Cursos Abiertos Masivos en Línea, sean conectado para conformar un LOOC (LOOC, Little Open Online Course), haciendo uso de las tecnologías de la Web Semántica en la integración a nivel de datos [8]. Lo referido, constituye una nueva visión de generación de

MOOC, apoyada en la interoperabilidad semántica formal, mediante el uso de la Web semántica y las redes sociales en línea. [9]

La nueva visión de generación de MOOC, resulta relevante, debido a que los usuarios y específicamente, los profesores que se forman para el proceso de enseñanza – aprendizaje online, pueden acceder a los diferentes cursos MOOC, que estén acorde a lo que se busca y a los perfiles educativos de interés, lo que es factible, para evitar la duplicidad de contenido. LOOC, como nueva generación de MOOC, se integra con facilidad a la Web Semántica, dado que en los cursos LOOC solo pueden participar grupos de unos cien estudiantes, lo cual hace que la masividad disminuya y de esa forma se controla mejor la preparación de los contenidos desde el punto de vista didáctico y pedagógico dada la interoperabilidad vial que surge entre profesores, lo cual es útil para la producción de materiales educativos, de manera que estos se adecúen a los objetivos planteados y que los mismos no sean repetitivos. [10]

En los MOOC y LOOC, se debe tener en cuenta el nivel de aprendizaje adquirido por los que acceden a los cursos soportados en esta modalidad, lo cual es factible para evaluar el nivel de competencias profesionales que se adquieren. Al respecto, se consideran que las secuencias de aprendizaje no deben basarse únicamente en el contenido existente en los MOOC, que proporcionan conocimientos, sino también en el desarrollo del aprendizaje de los profesores que se forman para el proceso de enseñanza – aprendizaje online que se lleva a cabo durante la actual pandemia.

Por todo lo apuntado, abordar la investigación de los MOOC desde diferentes perspectivas es fundamental, dada la necesidad de integración entre los MOOC y las plataformas digitales para un proceso de enseñanza de calidad como lo exige los contextos educativos actuales, en aras de posibilitar el aprendizaje masivo y en línea, de los profesionales que se forman para emprender el aprendizaje de los estudiantes online de forma significativa. Para tal fin, se realiza un análisis del diseño pedagógico y tecnológico a través de las expectativas de aprendizaje de los profesionales en formación.

La fundamentación de la integración entre los MOOC y las plataformas digitales, específicamente con la Web Semántica en el proceso de formación de los profesores, requiere de cambios en el paradigma de aprendizaje, el que ahora se sustenta en el uso de la TIC, lo cual conlleva a transformaciones en los esquemas educativos, transformaciones basadas en los estándares necesarios que contribuyan a las evaluaciones de la calidad pedagógica, [11]. Estudios previos refieren que la evaluación de la calidad pedagógica a partir de los MOOC, demanda de indicadores relacionados con factores pedagógicos, funcionales, tecnológicos. [12], [13], [14] y [15]

En los citados estudios previos, se destaca que, otro de los indicadores a tener en cuenta, es el factor tiempo, dado que este factor es el más crítico e incide de forma directa con la calidad pedagógica y con la formación a través de los MOOC. Por tal motivo resulta oportuno realizar el análisis del factor tiempo para conocer la importancia que reviste en el proceso de integración de los MOOC y las plataformas digitales como lo exigen los contextos educativos actuales, en aras de posibilitar el aprendizaje masivo y en línea de los profesionales que se forman para emprender el aprendizaje de los estudiantes online de forma significativa en tiempo de CoVID-19.

Método. Para el análisis de la fundamentación de la integración entre los MOOC y las plataformas digitales para el logro de una enseñanza de calidad, como lo exigen los contextos educativos actuales, de los profesores que se forman para emprender el aprendizaje de los estudiantes online de forma significativa en tiempos de CoVID-19, se realizó a través del método Delphi a doble vuelta. Para ello se selecciona un conjunto de indicadores basado en los estudios de Domingo y Marqués, Gómez-Zermeño, Franco-Casamitjana et al., Gómez-Zermeño et al. y Roig y col.

Seleccionado el conjunto de indicadores, se procede a valorarlos y validarlos a través de los expertos seleccionados de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador, que participan en el área de tecnología educativa y que son encargados de brindar oportunidades de aprendizaje a los profesores a través de la información contenida en la web semántica y en el MOOC construido para tal fin. Los indicadores se analizan a través del método Delphi con criterio experto, que consiste en seleccionar un grupo de expertos a los que se les pregunta su opinión sobre cuestiones referidas a un futuro, realizando sucesivas rondas anónimas que garantizan la autonomía de los participantes. La capacidad de predicción de este método se basa en la utilización sistemática de un juicio intuitivo emitido por todos los expertos. [16]

1.1. Instrumentos y procedimiento. Para el análisis se tomó en consideración el diseño de los programas de estudios de los profesores que se prepararon a través de los cursos MOOC, para enfrentar la enseñanza – aprendizaje online durante la actual pandemia, los cuales se analizaron a través del grupo de experto seleccionado. En el análisis se tuvo en cuenta el uso de la información alojada en la Web Semántica de la referida universidad, con el objetivo de fomentar la interacción entre los cursos y los participantes, favoreciéndose así el uso de las redes sociales de los profesores en formación.

Basado en el conjunto de indicadores seleccionados, se diseñó un cuestionario de calidad, el cual constaba de preguntas cerradas que valoraban 5 indicadores con una escala de Likert de 4 puntos. Para el análisis los indicadores se clasificaron en 20 subcategorías relacionadas con los factores pedagógicos, funcionales, tecnológicos y tiempo.

1.2. Participantes. Treinta profesores que constituyeron expertos de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador, en temas de *e-Learnig* y TIC. Se les preguntó sobre tipos de MOOC, tipos de recursos educativos, tipos de almacenamiento y uso de la información, tipos de aprendizaje, tareas y formas de evaluación, y sobre las funciones y roles de los profesores, en el instrumento aplicado.

El cuestionario diseñado estuvo dirigido a los profesores que se prepararan a través de los cursos MOOC para enfrentar la enseñanza – aprendizaje online durante la actual pandemia, el mismo estuvo compuesto por 15 preguntas, que recopilaban datos laborales, actualización docente, expectativas, opiniones sobre los cursos MOOC y su integración con la Web Semántica. Para obtener la valoración de los indicadores relacionados con la calidad pedagógica. Otro cuestionario aplicado a los mismos expertos, se diseñó para conocer la importancia que revisten los MOOC integrados con la Web Se-

mántica, en cuanto a la preparación docente, superación profesional y gestión educativa, basada en el uso de las tecnologías, como estrategia de actualización docente en el proceso de enseñanza – aprendizaje.

1.3. *Validación de los instrumentos.* Ambos instrumentos fueron validados para conocer su confiabilidad y consistencia interna, para ello se utilizó el Alpha de Cronbach. Las bases para la aplicación del Alpha de Cronbach fueron consultadas en casos de estudio publicados de Cabanach et al. [17]. La ecuación 1, es la que se utilizó para aplicar el Coeficiente Alpha de Cronbach.

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \left[1 - \frac{\sum S_i^2}{S_T^2} \right] \quad (1)$$

Donde:

K: es el número de ítems.

S_i^2 : Sumatoria de Varianzas de los elementos (ítems).

S_T^2 : Varianza de la suma de los elementos (ítems).

α : Coeficiente Alpha de Cronbach.

Resultados. Los resultados arrojados al aplicar la técnica Alpha de Cronbach, a los instrumentos diseñados fue de 0.78 y 0.76; respectivamente, lo que demuestra una alta confiabilidad en los instrumentos. Al aplicar el método Delphi los resultados obtenidos indican que la calidad del MOOC integrado a la Web Semántica en los procesos de capacitación y superación profesional y en especial la integración entre los procesos industriales para los profesionales, debe considerar los factores pedagógicos, tecnológicos y funcional. Los expertos valoran de manera significativa los indicadores relacionados con el factor tiempo, debido a que este factor es estratégico en el proceso de formación en línea y en particular a través de los MOOC integrados con la Web Semántica.

El factor tiempo requiere ser atendido por especialistas en TIC y en particular por diseñadores, debido a la incidencia directa que los MOOC y la integración de las plataformas digitales como la Web semántica poseen para la preparación adecuada de los profesionales que se forman para enfrentar el proceso de enseñanza – aprendizaje online, proceso que se exige de calidad para aquilatar la problemática educativa ante la actual pandemia que azota el mundo (ver Fig. 1).

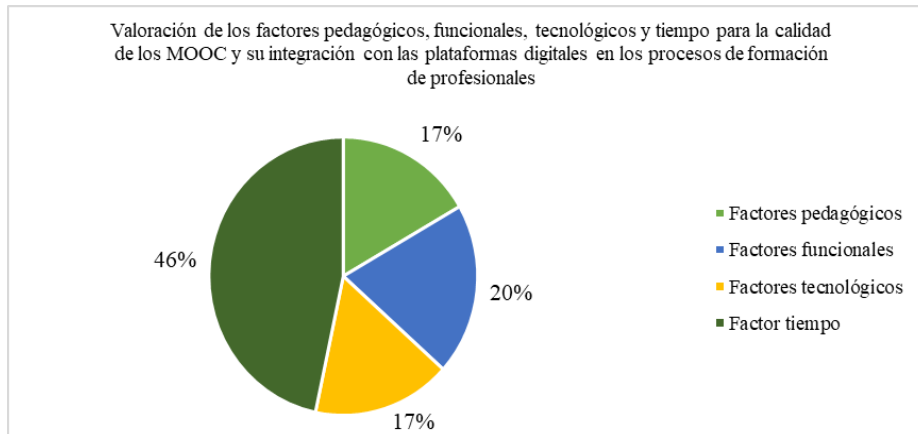


Fig. 1. Análisis de los factores pedagógicos, funcionales, tecnológicos y tiempo para la calidad de los MOOC y su integración con las plataformas digitales en los procesos de formación de profesionales.

La valoración de los indicadores relacionados con la calidad pedagógica, y la importancia que revisten los MOOC integrados con la Web Semántica, en cuanto a la preparación docente, superación profesional y gestión educativa, basada en el uso de las tecnologías, como estrategia de actualización docente en el proceso de enseñanza – aprendizaje, contrastó que para los profesionales que se forman, el factor tiempo en el aprendizaje es fundamental. Este factor incide de forma significativa en el desarrollo de las competencias profesionales, ya que las competencias de gestión relacionadas con el tiempo contribuyen a la autorregulación tanto de los profesionales en formación, como de los miembros de un grupo de profesionales en formación (Ver Fig. 2).

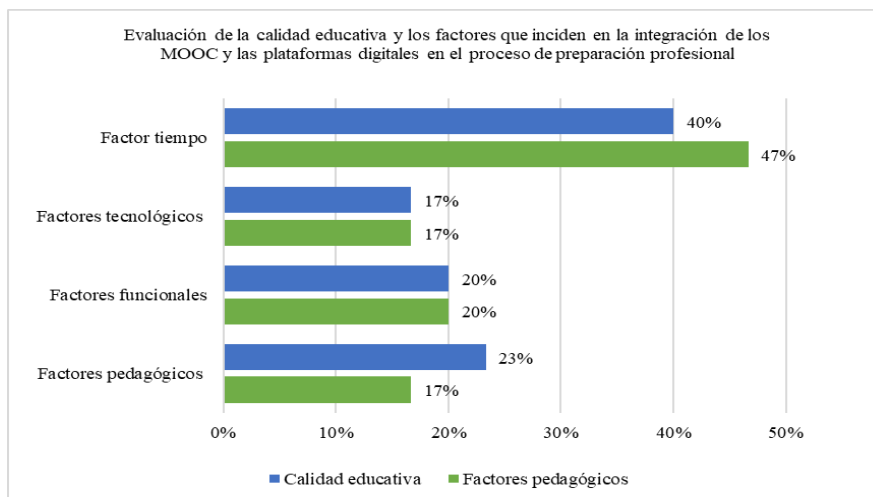


Fig. 2. Análisis de la calidad educativa y los factores que inciden en la integración de los MOOC y las plataformas digitales en el proceso de preparación profesional.

La educación a través de MOOC, *e-Learnig*, *b-learnig* y otras plataformas, poseen autonomías que se desarrollan a partir del interés y la perspicacia de los profesionales en formación que deciden ahondar en un adecuado aprendizaje para poder brindar una enseñanza de calidad y no errar entre la modalidad presencial y online. De acuerdo con los resultados obtenidos, se fundamenta a partir de la integración entre los MOOC y las plataformas digitales, el conjunto de pasos para el fortalecimiento de la calidad de los cursos online en el proceso de enseñanza – aprendizaje.

La fundamentación del conjunto de pasos para el fortalecimiento de la calidad de los cursos online en el proceso de enseñanza – aprendizaje se basa en los criterios sugeridos por Cabero y Llorente [18], donde se contemplan fundamentos pedagógicos y tecnológicos a tener en cuenta en el proceso de formación de forma online, a través de cualquier plataforma digital. Los pasos a tener en cuenta son:

1. Establecer metas
2. Establecer el contenido del curso
3. Seleccionar el material
4. Establecer el formato del curso
5. Definir actividades
6. Definir la evaluación
7. Secuenciar el aprendizaje

Conclusiones y Discusión

En el presente trabajo, se abordaron fundamentos teóricos relacionados con el uso de las Tecnología de la Información y las Comunicaciones, las cuales constituyen premisas para el logro adecuado del proceso de enseñanza durante la crisis ocasionada por la CoVID-19, enfermedad originada por el virus SARS-CoV-2, donde se analizaron los MOOC y su integración con las diversas plataformas digitales existentes en las IES, para los procesos de capacitación y superación profesional de los profesores que enfrentaron el proceso de enseñanza – aprendizaje online. Concretamente se analizó para esta investigación la integración de los MOOC con la Web Semántica como soporte de información de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador.

Se evidenció que para el fortalecimiento de la enseñanza en tiempos de CoVID-19, como solución viable lo constituye la integración de los Cursos Abiertos Masivos en Línea y su integración con la información que se almacena en las plataformas digitales educativa. Se fundamentó la integración entre los MOOC y las plataformas digitales para un proceso de enseñanza de calidad, como lo exigen los contextos educativos actuales, en aras de posibilitar el aprendizaje masivo y en línea de los profesionales que se forman para emprender el aprendizaje de los estudiantes online de forma significativa.

La fundamentación de la integración entre los MOOC y las plataformas digitales para un proceso de enseñanza de calidad, como lo exigen los contextos educativos actuales, incluyó el desarrollo que existe en cuanto a las TIC, en el proceso de aprendizaje de los profesionales que se forman, y se tuvieron en cuenta aspectos desde la pedagogía y la tecnología.

El análisis de los indicadores relativos a los fundamentos pedagógicos y tecnológicos que posibiliten el aprendizaje masivo y en línea de la formación profesional a través de los MOOC se realizó en base a 20 subcategorías relacionadas con los factores pedagógicos, funcionales, tecnológicos y tiempo. Constatándose que el factor tiempo fue el que mayor puntuación alcanzó, lo cual es un factor importante que contribuye al diseño de estrategias adecuadas para un proceso de enseñanza – aprendizaje de calidad.

Sin la medición de los resultados obtenidos, no se puede valorar el éxito de la integración de los MOOC y las plataformas digitales para un proceso de enseñanza de calidad. El conjunto de pasos que se establecen para el fortalecimiento de la calidad del MOOC integrados con Web Semántica, favorece el aprendizaje masivo y en línea de los profesionales que se forman.

En concordancia con Montes, Aguilar- Rosales [19] las TIC en el apoyo a los modelos de educación a distancia en la educación superior y concretamente los MOOC, representan una nueva modalidad educativa que se ha abierto paso en las comunidades internacionales del conocimiento, tratando de brindar oportunidades educativas mediante una opción tecnológica accesible para poder incrementar el desarrollo profesional de cualquier tipo de participantes. Estos cursos de manera masiva han impactado en el desarrollo profesional de miles de personas brindando una opción de educación a distancia que brinda las facilidades de aprendizaje y conocimiento que no se podrían tener de la misma manera en un aula presencial.

Los MOOC en la formación profesional de los profesores que enfrentan el proceso de enseñanza – aprendizaje online, en tiempo de CoVID-19, abre una puerta a la oportunidad de la mejora continúa dándole a los profesores un espacio para la construcción, mejora y reafirmación de conocimientos que incrementen sus habilidades profesionales para lograr un pleno desarrollo en su labor diaria. El uso de las plataformas digitales y los MOOC en la formación profesional de los profesores que enfrentan el proceso de enseñanza – aprendizaje online, busca abastecer los espacios que el currículo ha dejado libre para así reforzar los conocimientos, tanto de los que se estudian como de los profesores en formación, haciendo de esta herramienta tecnológica una oportunidad de crecimiento e innovación que brinde un campo de acción más amplio para una profesión cada vez más demandada de profesionalización.

Limitaciones y Prospectiva

En este estudio, desde el análisis realizado, se ofrecen resultados y conclusiones convenientes que contribuyen al conocimiento y a la formación de competencias profesionales del uso de plataformas digitales para el proceso de enseñanza – aprendizaje online, en tiempos de CoVID-19, el cual debe ser fortalecido, no solo para los tiempos

de pandemia, sino para promover el aprendizaje a distancia como una práctica de desarrollo con infraestructura tecnológica apropiada para transferir conocimiento útil a la sociedad. Así mismo se invita a continuar profundizando en esta línea de investigación.

Los propios conceptos de los MOOC, la web semántica, los repositorios digitales las plataformas educativas que se han mencionado en esta investigación, y su pertinencia de las competencias a adquirir, se encuentran en fase de delimitación tanto desde una perspectiva tecnológica como de la investigación y formación aplicada.

Continúa existiendo una brecha digital y unas carencias de oportunidades en el disfrute de estas modalidades de estudio y concretamente para adquirir conocimiento útil para el desarrollo de la sociedad. Falta solidez y reflexión en los diagnósticos sobre la utilización de estos recursos, desde los beneficios y argumentaciones que presentan, manuales de ayuda y disponibilidad de competencias para aplicar en su utilización.

Por todo ello, sugerimos analizar la fundamentación a partir de la integración entre los MOOC y las plataformas digitales y el conjunto de pasos para el fortalecimiento de la calidad de los cursos online en el proceso de enseñanza – aprendizaje.

Referencias

1. Altamirano Di Luca MA, González Benítez N. (2020). Estudio comparativo de RDF OWL Ontology Languages como soporte para la Web Semántica. En Botto – Tobar M., Zambrano Vizuet M, Torres – Carrion P., Montes León S., Pizarro Vásquez G., Durakovic B. (eds). Tecnologías Aplicadas. ICAT 2019.
2. Alario-Hoyos, C., Pérez, M., Morales, M., Delgado, C., Hernández-Rizzardini, R., Román, M., Ramírez-González, G., Luna, T., Jerez, O., Gütl, Ch., Moreira, A., Maldonado-Mahauad, J., Amado-Salvatierra, H.R, Meléndez, A., Solarte, M. (2018). MOOC-Maker: Tres Años Construyendo Capacidades de Gestión de MOOCs en Latinoamérica, Proceedings of the II International Conference MOOC-Maker (MOOC-Maker 2018), <http://CEUR-WS.org/vo-2224/1.pdf>.
3. Pérez-Sanagustín, M., Maldonado, J., Morales, N. (2016). WPD1.1: Estado del arte de adopción de MOOCs en la Educación Superior en América Latina y Europa. Informe Técnico MOOCMaker, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile. http://www.mooc-maker.org/wpcontent/files/WPD1.1_ESPAOL.pdf
4. McAuley, A., Stewart, B., Siemens, G & Cormier, D. (2010). The MOOC Model for Digital Practice. Technical Report.
5. Kiers, J., Jorge, G. (2015). Experiences from 18 DelftX MOOCs. Experiences and expectations. The Third European MOOCs Stakeholders Summit (eMOOC 2015), pp. 5-70.
6. Conole, G. (2013). Los MOOCs como tecnologías disruptivas: estrategias para mejorar la experiencia de aprendizaje y la calidad de los MOOCs. Campus Virtuales, II (2), pp. 16-28.
7. Sammour, G., Al-Zoubi, A., Gladun, A., Khala, K., & Schreurs, J. (2015). Semantic web and ontologies for personalisation of learning in MOOCs. Paper presented at the 2015 IEEE Seventh International Conference on Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS).
8. Höver, K. M., & Mühlhäuser, M. (2014). LOOCs--Linked Open Online Courses: A Vision. Paper presented at the 2014 IEEE 14th International Conference on Advanced Learning Technologies.
9. Zhuhadar, L., Kruk, S. R., & Daday, J. (2015). Semantically enriched Massive Open Online Courses (MOOCs) platform. *Computers in Human Behavior*, 51, 578-593.

10. Zapata-Ros, M. (2015). El diseño instruccional de los MOOC y el de los nuevos cursos abiertos personalizados. RED-Revista de Educación a Distancia. Num. 45, vol. 2, pp. 1-35. (2015).
11. Bernal, Y., Molina, M., y Pérez, M. (2013). La Calidad de la Educación a Distancia: El caso de los MOOC. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo, 10.
12. Domingo, M. y Marquès, P. (2011). Classroom 2.0 Experiences and Building on the Use of ICT in Teaching, Comunicar, 18(37), 169-174. Bibliotecas Digitales: recursos bibliográficos electrónicos en educación básica. Comunicar, 20(39), 119-128. Recuperado de: <http://www.revistacomunicar.com/index.php?contenido=detalles&numero=39&articulo=39-2012-14>
13. Gómez- Zermelo, M.G. (2012). Bibliotecas digitales: recursos bibliográficos electrónicos en educación básica. Comunicar, 20(39), 119-128. Recuperado de: <http://www.revistacomunicar.com/index.php?contenido=detalles&numero=39&articulo=39-2012-14>
14. Gómez-Zermelo, M. G., Rodríguez, J. A., y Márquez, S. (2013). Estudio Exploratorio-Descriptivo. Curso Híbrido: Contabilidad V. Revista de Investigación Educativa de la Escuela de Graduados en Educación, 4(7), 70-79. Recuperado de <http://riege.tecvirtual.mx/index.php/riege/article/view/126>
15. Roig, R., Flores, C., Álvarez, J., Blasco, J., Grau, S., Guarinos, I., Lledó, A., López, E., Lorenzo, G., Martínez, M., Mengual, S., Mulero, J., Perandones, J., Rodríguez-Cano, C., Segura, L., Suárez, C. y Tortosa, M. (2013). Características de los ambientes de aprendizaje on-line para una práctica docente de calidad. Indicadores de evaluación. España: Universidad de Alicante.
16. Astigarraga, E. (2008). El método Delphi. San Sebastián: Universidad de Deusto. [https://www.prospectiva.eu/curso-prospectiva/Método Delphi.doc](https://www.prospectiva.eu/curso-prospectiva/Método%20Delphi.doc)
17. Cabanach, R. G., Valle, A., Rodríguez, S., Piñeiro, I., & González, P. (2015). Las creencias motivacionales como factor protector del estrés en estudiantes universitarios. European Journal of Education and psychology, Vol. 3, no. 1.
18. Cabero Almenara, Julio; Llorente Cejudo, María Carmen; "Los MOOC: encontrando su camino". @tic. revista d'innovació educativa. Número 18. Primavera (enero-junio 2017), pp. 24-30.
19. Montes, R., Aguilar- Rosales, B. (2020). La digitalización de la educación: los MOOC como recurso educativo en la formación de docentes, VI Taller Internacional "La virtualización en la Educación Superior". Palacio de las convenciones Ciudad de la Habana, Cuba.

Control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones para sistemas de segundo orden

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 multi-variables. 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. También se propone el diseño de un controlador PI óptimo de dos grados de libertad para sistemas perturbados. Este documento presenta una revisión de los avances obtenidos en el trabajo doctoral durante los períodos 2018/2019 a 2020/2021.

1 Introducción

La presencia de perturbaciones implica la aparición de 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 por ejemplo en la industria del petróleo, 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 [12].

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 [11]. 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

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 [8, 12, 11, 9, 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 [7].

Durante las últimas décadas, se han propuesto muchos enfoques para eliminar las perturbaciones. Uno de ellos es observador de estados extendidos (ESO), el cual requiere 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 [10, 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_∞ , 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. 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 [13].

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 α 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 modelo lineal no perturbado:

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

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 que el algoritmo numérico pueda 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.

Considerar el esquema de control realimentado de dos grados de libertad (2 GDL) presentado en la Figura 1. En dicho sistema la señal de control se define 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.

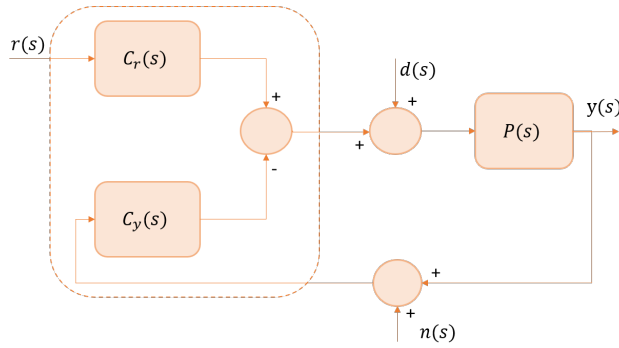


Fig. 1. Sistema de control de 2 GDL

De la Figura 1 y la ecuación (5), considerando el ruido de medición, la referencia y la perturbación, la variable controlada se puede obtener mediante la siguiente relación:

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

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, la trayectoria de referencia deseada, libre de ruido, puede describirse de la siguiente manera:

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

donde $M_{y_r}^*$ es la función de transferencia deseada desde la señal de referencia a la variable controlada (o función de transferencia deseada de lazo cerrado), $M_{y_d}^*$ es función de transferencia deseada de la variable de salida con respecto a la perturbación de carga.

En el dominio del tiempo, la expresión anterior se puede escribir de la siguiente forma:

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

Para el diseño del controlador y filtro que garanticen estabilidad y comportamiento robusto para el seguimiento de referencia ante perturbaciones e incertidumbre paramétrica, las funciones de coste 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 J_r es el funcional de coste para la optimización del seguimiento de referencia y J_d es la función de costo para el rechazo de perturbaciones a la entrada de la planta. θ_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, θ_p son los parámetros de la planta, θ_{cy} Son los parámetros de C_y , θ_{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 ADRC óptimo para sistemas de segundo orden

Problema de optimización para diseño de controlador. Considerar el siguiente modelo entrada-salida de un sistema de segundo orden:

$$T_w^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\zeta T_w \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kv(t) \quad (15)$$

donde $v(t)$ es la señal de control y $y(t)$ es la salida del sistema.

Con el fin de que el controlador diseñado sea apto para otros sistemas de la misma naturaleza se realiza el siguiente escalamiento de los parámetros del modelo:

$$\tau = t/T_w; \quad u = v/k \quad (16)$$

El sistema de segundo orden escalado en magnitud y tiempo queda representado por la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + 2\zeta \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = u(\tau) \quad (17)$$

Dicha dinámica puede ser reemplazada por un sistema de segundo orden perturbado, como aparece en la siguiente expresión:

$$\frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} = u(\tau) + f(\tau) \quad (18)$$

Se supone que la perturbación $f(\tau)$ puede ser una entrada completamente desconocida pero uniformemente absolutamente acotada. Esta perturbación (la cual es visiblemente observable en el sentido de Diop y Fliess [6]) puede estimarse en línea y de una manera suficientemente aproximada, por medio de un observador lineal del tipo GPI. Para el sistema de segundo orden descrito en (18) se propone la siguiente ley de control lineal:

$$u(\tau) = \ddot{y}_{ref} - \hat{k}_d (\dot{y} - \dot{y}_{ref}) - \hat{k}_p (y - y_{ref}) - \hat{f} \quad (19)$$

donde \hat{k}_p y \hat{k}_d son las ganancias del controlador y $\hat{f}(\tau)$ se puede estimar usando el siguiente observador GPI de tercer orden, en función de ω_{n0} , o ancho de banda del observador:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{y}}_0 &= \hat{y}_1 + 3\omega_{n0}(y - \hat{y}_0) \\ \dot{\hat{y}}_1 &= u + z_1 + 3\omega_{n0}^2(y - \hat{y}_0) \\ \dot{z}_1 &= \omega_{n0}^3(y - \hat{y}_0) \end{aligned} \quad (20)$$

En el diseño basado en rechazo activo de perturbaciones comúnmente los parámetros del controlador y del observador son obtenidos de manera subjetiva. Aunque un aumento de los parámetros de las ecuaciones (19) y (20) puede mejorar tanto la estimación como la velocidad de respuesta del sistema, de igual manera puede causar fuertes oscilaciones y un mayor esfuerzo de control.

La función de coste que va ser optimizada es la siguiente:

$$J_r = \frac{1}{2} \int_0^{T_{cl}} \left[(\hat{y}(\tau + \delta) - \hat{y}_{ref}(\tau + \delta))^2 + \rho (u(\tau + \delta) - u_{ref}(\tau + \delta))^2 \right] d\delta \quad (21)$$

donde T_{cl} , se conoce como periodo predictivo, el cual determina la rapidez del sistema de control en lazo cerrado, y ρ es un parámetro empleado para penalizar el esfuerzo de control. $\hat{y}(\tau + \delta)$ es la salida predicha y $\hat{y}_{ref}(\tau + \delta)$ es la referencia de la salida, mientras que $u(\tau + \delta)$ es la señal de entrada del sistema y $u_{ref}(\tau + \delta)$ es la señal de control deseada.

Empleando una serie de Taylor de segundo orden, la señal de salida futura puede aproximarse de la siguiente manera:

$$y(\tau + \delta) \approx y(\tau) + \delta \dot{y}(\tau) + \frac{\delta^2}{2!} \ddot{y}(\tau) \quad (22)$$

Para la entrada predicha se puede emplear una aproximación en series de Taylor de primer orden:

$$u(\tau + \delta) \approx u(\tau) + \delta \dot{u}(\tau) \quad (23)$$

$$\Delta(\delta) = \left[1, \delta, \frac{\delta^2}{2} \right], \quad \Psi(\delta) = [1, \delta] \quad (24)$$

$$Y(\tau) = [y(\tau), \dot{y}(\tau), \hat{f}(\tau)]^\top, \quad U(\tau) = [0, 0, u(\tau)]^\top \quad (25)$$

Resolviendo el problema de optimización en (21) se obtiene la siguiente ley de control óptima:

$$u^*(\tau) = \ddot{y}_{ref} - \frac{15T_{cl}^3 (\dot{y} - \dot{y}_{ref}) + 20T_{cl}^2 (y - y_{ref})}{6(T_{cl}^4 + 5\rho)} - \hat{f} \quad (26)$$

Por lo tanto, los parámetros óptimos del controlador son los siguientes:

$$\hat{k}_p = \frac{10T_{cl}^2}{3(T_{cl}^4 + 5\rho)}; \quad \hat{k}_d = \frac{5T_{cl}^3}{2(T_{cl}^4 + 5\rho)} \quad (27)$$

Se puede usar $\rho = 0$ con el fin de limitar el esfuerzo de control en el diseño del observador. De esta manera, los parámetros del controlador del sistema normalizado se determinan de la siguiente forma:

$$\hat{k}_p = \frac{10}{3T_{cl}^2}; \quad \hat{t}_d = 0.75T_{cl} \quad (28)$$

donde $\hat{k}_d = \hat{k}_p \hat{t}_d$.

Para el sistema de segundo orden presentado en (15) los parámetros del controlador PD estarían dados por las siguientes expresiones:

$$K_p = \hat{k}_p/k; \quad T_d = \hat{t}_d T_w \quad (29)$$

Problema de optimización para observador. Con el fin de obtener el ancho de banda óptimo del observador de perturbaciones, en este trabajo se propone la minimización de la siguiente función de coste, la cual incluye la integral del valor absoluto del error de seguimiento y el cuadrado de la derivada de la acción de control para una perturbación tipo escalón a la entrada de la planta:

$$J_d = \int_0^\infty \left[|y - y_{ref}| + \lambda \left(\frac{du}{d\delta} \right)^2 \right] d\delta \quad (30)$$

λ es un parámetro entre 0 y 1 que permite ponderar el esfuerzo de control. Al resolver el problema de optimización en (30) para diferentes valores de T_{cl} y τ de la ecuación (28) se obtiene el siguiente polinomio de primer orden, el cual permite determinar el valor óptimo del ancho de banda del observador en función de los parámetros T_{cl} y τ :

$$\omega_{n0}(T_{cl}, \tau) = a + bT_{cl} + c\tau \quad (31)$$

En la tabla 1 se muestran los parámetros de la ecuación (31) para diferentes valores de λ , cuando el sistema de segundo orden descrito en (18) es subamortiguado. En la tabla también aparece el coeficiente de determinación o *R-Squared* para cada ajuste realizado, el cual es una medida estadística que indica qué tan cerca están los datos de la línea de regresión ajustada lineal. Los valores de este parámetro indican que los ajustes realizados para cada valor de λ se aproximan considerablemente a los valores reales de ω_{n0} obtenidos en el proceso de optimización.

Table 1: Ajuste de parámetros de ecuación (31)

λ	a	b	c	R-Square
0.30	1.71	25.2	6.026	0.9481
0.35	1.394	21.7	5.09	0.9557
0.40	1.416	18.97	4.398	0.9596
0.45	1.487	16.67	3.926	0.9594
0.50	1.72	14.81	3.495	0.9579
0.55	1.821	13.3	3.206	0.9528
0.60	1.968	12.01	2.949	0.9504

A partir de los datos de la Tabla 1 se puede realizar un ajuste global para obtener el valor del ancho de banda del observador en función de cualquier valor de T_{cl} , τ y λ . La siguiente expresión puede ser usada para ello:

$$\omega_{n0} = 1.65 + (36.98 - 43.24\lambda)T_{cl} + (8.624 - 9.93\lambda)\tau \quad (32)$$

donde $\lambda \in [0, 1]$.

En la Figura 3 se muestra el ajuste de los datos reportados en la Tabla 2 para sistemas de segundo orden sobreamortiguados. También se presentan los valores residuales del modelo descrito en (32) con respecto a los valores de ω_{n0} obtenidos en el proceso de optimización. Con un coeficiente *R-Squared* = 0.9729 se puede evidenciar la precisión. La siguiente expresión puede ser empleada para ello:

$$\omega_{n0} = 68.41\lambda^2 - 77.8\lambda + 28.65 + (18.8 - 21.47\lambda)T_{cl} + (3.682 - 3.606\lambda)\tau \quad (33)$$

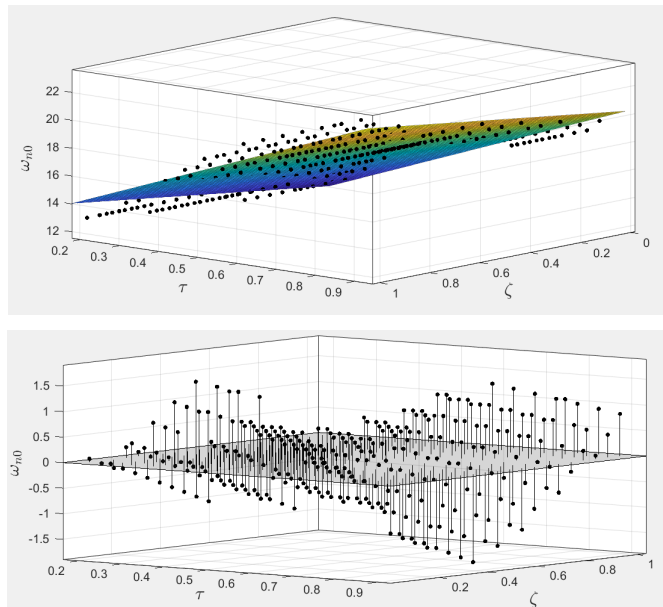
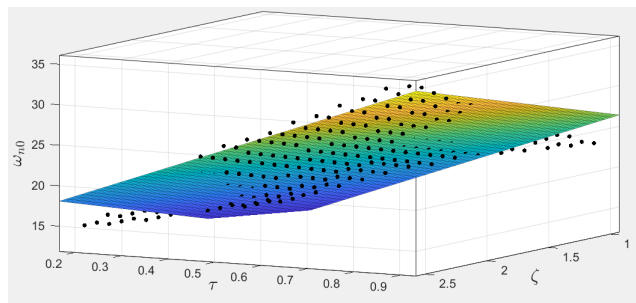


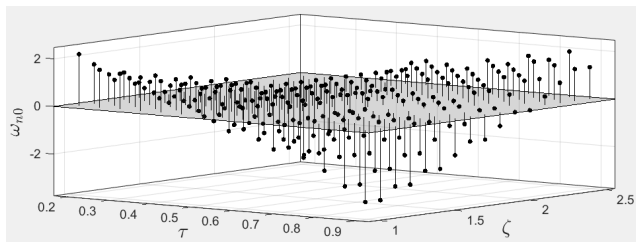
Fig. 2. Fitness subamortiguado

Table 2: Ajuste de parámetros de ecuación (32)

λ	a	b	c	R-Square
0.30	11.68	12.56	2.679	0.8787
0.35	9.536	11.37	2.398	0.9310
0.40	8.316	10.08	2.195	0.9505
0.45	7.54	8.907	2.012	0.9558
0.50	7.027	7.90	1.845	0.9559
0.55	6.689	6.948	1.726	0.9546
0.60	6.431	6.214	1.561	0.9438



(a) (a)



(b) (b)

Fig. 3. Fitness sobamortiguado

3 Aplicación al control de pH de un fotobiorreactor tipo Raceway

En un fotobiorreactor tipo Raceway 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 CO_2 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 $pH = 7.4$ está representado por la siguiente expresión:

$$pH(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-\lambda s} u(s) + \frac{k_r}{\tau_r s + 1} e^{-\lambda_r s} I(s) \quad (34)$$

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:

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

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

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.

3.1 Validación de control PI óptimo de dos grados de libertad

Para validar el desempeño del controlador PI óptimo de dos grados de libertad se empleó el simulador del fotobiorreactor tipo Raceway. Los valores de radiación solar empleados en la simulación corresponden a las mediciones tomadas en la estación experimental Las Palmerillas el día 31 de octubre (día soleado) del año 2014.

Con base en las ecuaciones (4) y (34) se propone la siguiente ley de control:

$$u = u^* - k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) (y - y^*) \quad (35)$$

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 (35) y la constante de tiempo de la función de transferencia del siguiente filtro de primer orden:

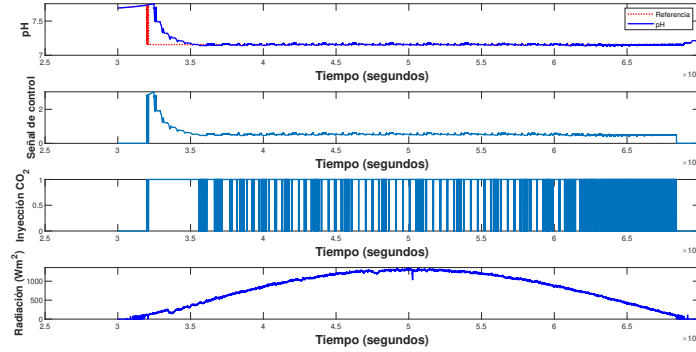


Fig. 4. Control PI robusto basado en optimización para fotobiorreactor

$$F(s) = \frac{1}{\tau_f s + 1} \quad (36)$$

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 2 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 para el día soleado.

3.2 Validación de control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones

Para validar el desempeño del controlador robusto propuesto, se diseñó un controlador para el simulador del fotobiorreactor tipo Raceway disponible en la UAL.

En la Fig. 5 se evidencia como el pH sigue fielmente la señal de referencia para un día nublado, con lo cual se concluye que el controlador es capaz de mitigar significativamente el efecto de perturbación. Esto se debe a que el observador

GPI estima la perturbación y las dinámicas no modeladas del sistema de control, y suprime su efecto complementando la ley de control con un esfuerzo de cancelación.

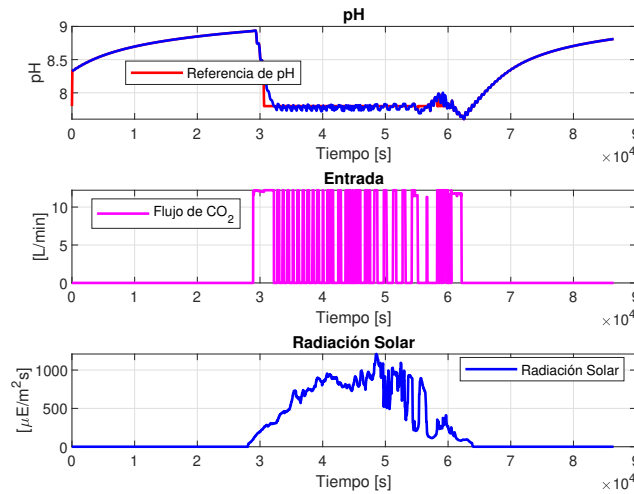


Fig. 5. Control PID óptimo con observador de perturbaciones para fotobiorreactor

4 Conclusiones

En el contexto de esta tesis doctoral, durante los últimos años se ha desarrollado un esquema de control óptimo por rechazo activo de perturbaciones 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 la ponderación del esfuerzo de control.

Por otro lado, también se ha propuesto el uso de controladores PI óptimos de dos grados de libertad para el seguimiento de la referencia y el rechazo de perturbaciones. Ambos esquemas de control propuestos han logrado implementarse en un simulador de un fotobiorreactor a pequeña escala, disponible en la Universidad de Almería. Los resultados de simulación demuestran que los controladores obtenidos logran un seguimiento 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 dichos esquemas 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. Carreño-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. Diop, S., Fliess, M.: Nonlinear observability, identifiability, and persistent trajectories. In: [1991] *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control*. pp. 714–719. IEEE (1991)
7. Han, J.: From pid to active disturbance rejection control. *IEEE transactions on Industrial Electronics* **56**(3), 900–906 (2009)
8. 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)
9. 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)
10. Li, S., Yang, J., Chen, W.H., Chen, X.: *Disturbance observer-based control: methods and applications*. CRC press (2016)
11. 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)
12. 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)
13. 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)

Clasificación de Uso y Cobertura del Suelo en el páramo ecuatoriano usando métodos basados en píxeles, objetos y aprendizaje profundo.

Marco Jcvier Castelo Cabay¹[0000-0003-2400-3049]

Universidad de Almería,
mcc563@inlumine.ual.es

Abstract. En esta tesis el trabajo de investigación se centra en realizar la Clasificación de la Cobertura del Uso del Suelo (CCUS) en el páramo ecuatoriano. Concretamente en se han propuesto varios métodos de clasificación que fueron los siguientes: Clasificación Basada en Píxeles(CBP), Clasificación Basada en Objetos(CBO), y una Red Neuronal Profunda (RNP), se utilizó la plataforma *Google Earth Engine* (GEE) que permite procesar grandes cantidades de imágenes satelitales en la nube, se usaron diferentes parámetros como *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Bare Soil Index* (BSI), también se añadieron otros predictores como la textura, altitud y pendiente. El páramo cumple un rol importante dentro de los ecosistemas a nivel mundial, regulan los recursos hídricos, retiene grandes cantidades de agua que después es liberada para el regadío o el consumo humano. En el Ecuador la pérdida de los páramos es cada vez más intensa debido a las actividades que el hombre realiza en estas zonas, por lo que es necesario un mecanismo que permita determinar los lugares en donde exista degradación de estos ecosistemas. En la evaluación de los modelos propuestos el mejor clasificador fue la que se obtuvo por medio de la RNP.

Keywords: Clasificación · Uso del suelo y cobertura del suelo · análisis de imágenes basado en píxeles · análisis de imágenes basado en objetos geográficos · red neuronal profunda

1 Introducción

En el Ecuador los páramos están sujetos a un proceso de degradación incontrolable principalmente por la actividad humana que se dedica al pastoreo de ganado ovino y bovino, también quemar el páramo para prepararlo para el cultivo [1]. El páramo cumple funciones ecológicas importantes para el planeta como: ser un suministro permanente de agua [2, 3], almacenar grandes cantidades de carbono que ayuda a atenuar el calentamiento global [4-6]. En Ecuador se han realizado pocas Clasificaciones de la Cobertura del Uso del Suelo, en los ecosistemas páramo, principalmente debido a que el acceso a estas zonas es bastante complicado por la altura y relieve de los mismos, además de que la mayor parte del tiempo permaneces cubiertos por las nubes [7-9]. La CCUS utilizando

imágenes satelitales es un método bastante económico, es importante para realizar un seguimiento continuo de las alteraciones que se puedan producir debido a las invasiones que son ocasionadas por parte de los agricultores o actividades de pastoreo, con esta información se pueden elaborar planes de gestión ambiental para tomar acciones positivas en la conservación y la regeneración del páramo. El propósito del presente estudio fue realizar CCUS en el páramo de Quero en la provincia de Tungurahua y su entorno mediante tres enfoques distintos: basado en píxeles, basado en objetos, utilizando índices espectrales como NDVI, BSI, y también información adicional como textura altura y pendiente.

2 Avances en la Investigación

Se han realizado varias actividades como la recolección de información acerca de estudios realizados en el páramo, se utilizó la plataforma GEE, que almacena varios repositorios de imágenes satelitales y permite su procesamiento a grandes velocidades [10]. Se emplearon imágenes *Sentinel-2* nivel 2A, estas se filtraron en base a la zona de interés, se tomo como período desde el 01-01-2020 hasta el 31-12-2020, y un porcentaje de nubes menor al 20%, después se generó una imagen de píxel medio resultante, a la que se le añadió el NDVI y BSI, para tener como base para las CBO y CBP. Se realizaron cinco modelos de CCUS en los páramos ecuatorianos clasificando las siguientes coberturas: páramo, pastizal, vegetación herbácea, poblado, vegetación arbustiva y plantaciones forestales, específicamente en la provincia de Tungurahua Cantón Quero en el Ecuador.

2.1 Clasificaciones Realizadas

Las clasificaciones realizadas fueron cinco utilizando diferentes variantes las mismas que se detalla a continuación:

- CBP incluyendo índices NDVI y BSI.
- CBP incluyendo índices NDVI y BSI e información de altura y pendiente.
- CBO incluyendo índices NDVI y BSI e información de textura
- CBO incluyendo índices NDVI y BSI e información de textura, altura y pendiente.
- RNP que incluye bandas espectrales e índices NDVI, y BSI.

CBP incluyendo índices NDVI y BSI. Lo primero es etiquetar la imagen base obtenida con las siete tipos de cobertura a clasificar, utilizando como predictores las bandas espectrales y los índices NDVI y BSI, que están incluidas en la imagen base creada anteriormente, después se aplica el algoritmo de clasificación *Random Forest* con cincuenta árboles desde GEE y así obtenemos la primera clasificación.

CBP incluyendo índices NDVI y BSI e información de altura y pendiente. De igual manera se etiqueta las clases a clasificar en la imagen creada anteriormente, pero esta vez le añadimos datos adicionales de altura y pendiente que se obtienen de la colección de imágenes de elevación digital USGS/SRTMGL1_003 proporcionados por la NASA. Se utilizó el algoritmo *Random Forest* con cincuenta árboles para realizar esta clasificación.

CBO incluyendo índices NDVI y BSI e información de textura. Esta clasificación se la realizó en la plataforma GEE mediante combinación del algoritmo *Simple Non-Iterative Clustering* (SNIC), que utiliza un agrupamiento espacial de píxeles similares y mejora la eficiencia computacional y el consumo de memoria [11], también se utilizó la Matriz de Co-ocurrencia de Nivel de Gris (GLCM) que es utilizada en teledetección para obtener características adicionales [12]. De igual manera se utilizó una imagen compuesta base con los índices NDVI y BSI y un algoritmo RF para obtener el resultado de esta clasificación.

CBO incluyendo índices NDVI y BSI e información de textura, altura y pendiente. Se realiza un procedimiento similar al anterior con la imagen compuesta de información de textura. Además de esto se lea añade características de altura y pendiente para mejorar la clasificación. Se debe destacar que los páramos se encuentran a más de 3500 msnm. La metodología para la clasificación basada en objetos y en píxeles se muestra en la figura 1.

CCUS utilizando una RNP. La siguiente clasificación se realizó en un entorno completamente en la nube mediante una combinación de GEE con *Tensor Flow*, *Google Colaboratory*, *Google Cloud Storage* (GCS) como se muestra en la figura 2. Se utilizó como características de entrada las bandas espectrales propias de Sentinel 2, desde la banda B2 hasta la B12 conjuntamente con los índices NDVI, que permite reconocer áreas con vegetación dentro de un mapa y BSI, que sirve para diferenciar tierras agrícolas de las que no lo son como suelos desnudos y barbecho, se construyó la red neuronal siguiendo un esquema como el que se muestra en la figura 3, con una capa de entrada con 64 neuronas dos capas ocultas de 32 y 16 neuronas con una función de activación *Rectified Lineal Unit* (ReLU), que mejora problemas de gradiente de fuga en diferentes capas, se incluyó un *dropout* o capa de abandono de 0.2 lo que implica durante cada época del entrenamiento el 20% de las neuronas se descartan aleatoriamente para evitar el sobre ajuste, finalmente una capa de salida con una función de salida *softmax* para discriminar los siete tipos de coberturas. El modelo óptimo se obtuvo con un entrenamiento de 1232 épocas, y se obtuvo una exactitud de la red neuronal del 76%.

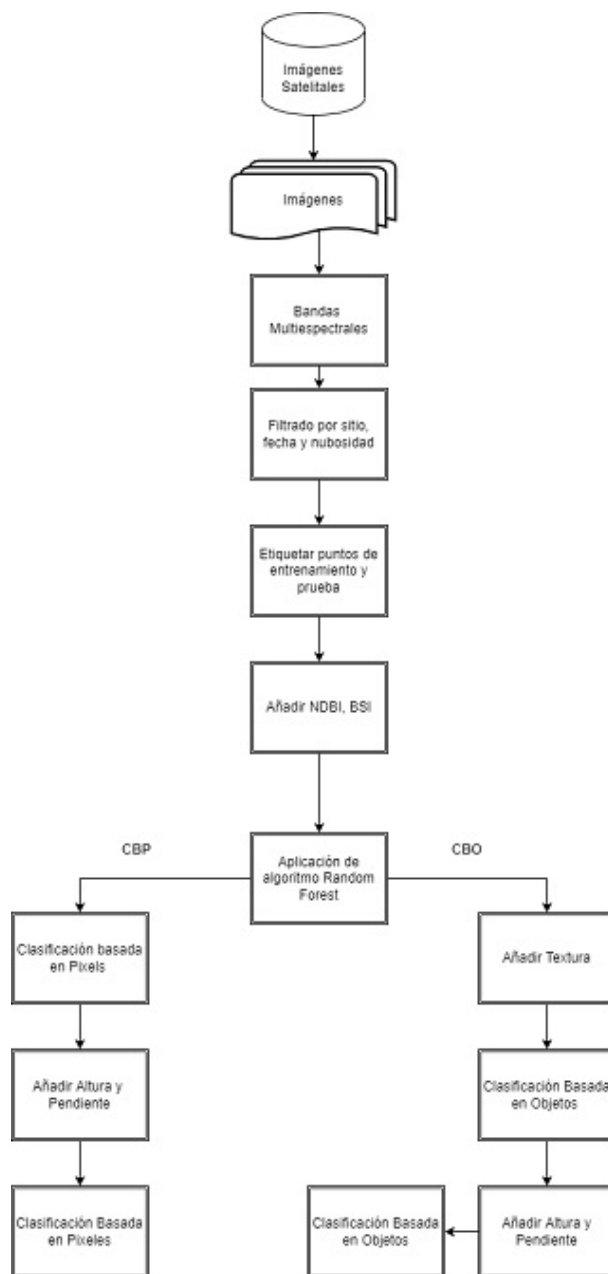


Fig. 1. Metodología para la clasificación basada en píxeles y objetos usando GEE.

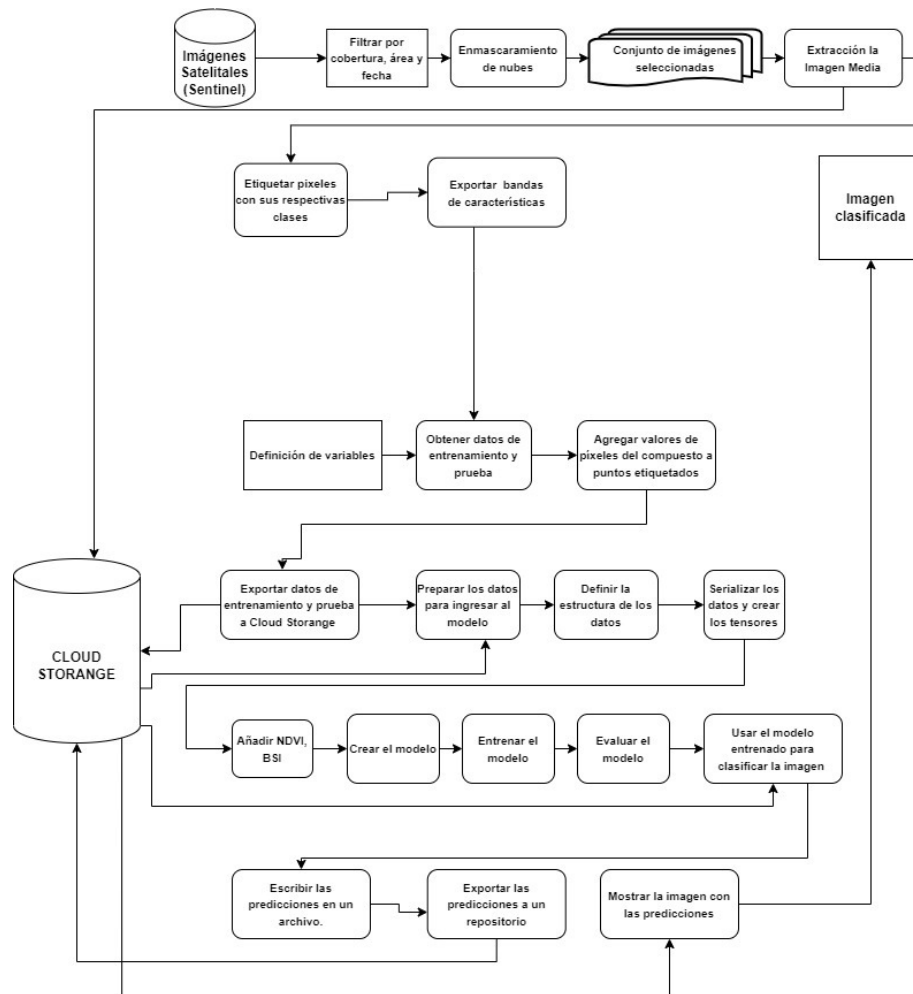


Fig. 2. Metodología utilizada para la CCUS utilizando una RNP.

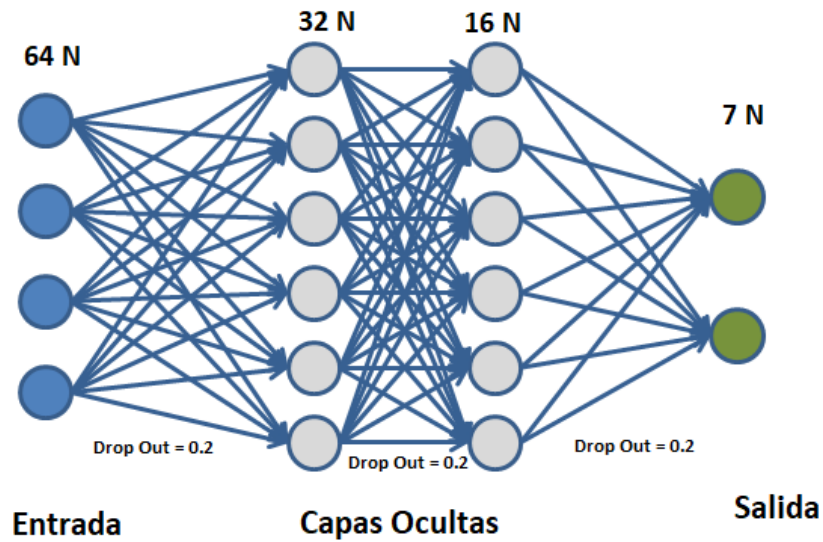


Fig. 3. Arquitectura de la RNP para realizar la CCUS en los páramos.

2.2 Resultados

Para medir la precisión de cada uno de los clasificadores se utilizaron matrices de confusión con setecientos puntos, cien por cada clase para medir exactitud, errores de omisión, errores de comisión, la precisión general y el índice kappa, obteniéndose como resultado que la Red Neuronal Profunda produce mejores resultados, seguida de la CBO con textura, altura y pendiente como se muestra en la Tabla 1.

Table 1. Índices de precisión general y kappa de los enfoques BP, BO y RNP

	Basada en píxeles	Basada en Objetos	Basado en Píxeles + Altura + Pendiente	Basado en Objetos + Textura + Altura + pendiente	Red Neuronal Profunda
Precisión General	77.29%	78.43%	83.29%	85.29%	87.43%
Índice Kappa	76.44%	77.63%	82.67%	84.74%	86.96%

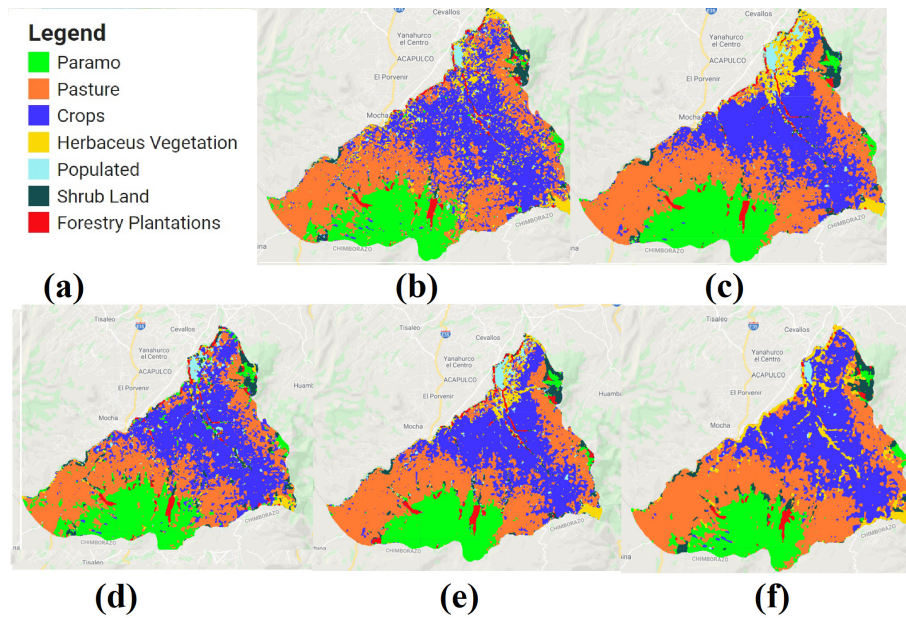


Fig. 4. (a) Leyenda de la CCUS, (b) Clasificación Basada en Píxeles + NDVI + BSI, (c) Clasificación Basada en Píxeles + NDVI + BSI + Altura + Pendiente. (d) Clasificación Basada en Objetos + NDVI + BSI + Textura. Clasificación Basada en Objetos + NDBI + BSI + Textura + Altura + Pendiente. (f) Clasificación mediante RNP.

3 Conclusiones

Se han desarrollado varios algoritmos para la clasificación de la cobertura del suelo en las zonas donde existe páramo en el Ecuador, utilizando métodos basados en objetos, en píxeles, con varios predictores como índices NDVI, BSI, altura, pendiente e información de textura. Tanto la CBP, como la CBO mejoran su clasificación cuando a parte de los índices espectrales se incluyen predictores como la, altura y pendiente, debido a que los páramos se encuentran sobre los 3500 msnm. El mejor clasificador fue mediante la RNP con una precisión a nivel general del 87.43 %, con un índice kappa del 86.96% .

En futuros trabajos se pretende realizar un estudio de series temporales con el objetivo de predecir cambios a corto y mediano plazo mediante métodos de aprendizaje profundo, que serán determinantes para la conservación de los páramos y la protección del ecosistema.

References

1. Hofstede, R.: El Impacto de las Actividades Humanas Sobre el Páramo. Abya Yala, Quito (2001)
2. Céleri, R., and Feyen, J, The hydrology of Tropical Andean ecosystems: Importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development* **29**(4), 350–355 (2009)
3. Buytaert, W., De Briève, B., Celleri, R., and Felipe, C. ,Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. *Facultad Nacional De Agronomía Medellín* (2), 8–27 (2012)
4. Hofstede, R., and Mena, P. ,Los beneficios escondidos del páramo: Servicios ecológicos e impacto humano. *Facultad Nacional De Agronomía Medellín* (2), 8–27 (2012)
5. Minaya, V., Corzo, G., Romero-Saltos, H., van der Kwast, J., Lantinga, E., Galárraga-Sánchez, R., and Mynett, A. Altitudinal analysis of carbon stocks in the Antisanapáramo, Ecuadorian Andes. *Journal of Plant Ecology* **9**(5), 553–563 (2015)
6. Farley, K. A., Bremer, L., Harden, C. P., and Hartsig, J. Changes in carbon storage under alternative land uses in biodiverse Andean grasslands: Implications for payment for Ecosystem Services. *Conservation Letters* **6**(1), 21–27 (2012)
7. Colby, J. D., and Keating, P. L. , Land cover classification using Landsat TM imagery in the Tropical Highlands: The influence of anisotropic reflectance. *International Journal of Remote Sensing* **19**(8), 1479–1500 (1998)
8. Martinuzzi, S., Gould, W. A., and Ramos Gonzalez, O. M. ,Creating cloud-free landsat ETM+ data sets in tropical landscapes: Cloud and cloud-shadow removal. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, International Institute of Tropical (2007)
9. Curatola Fernández, G., Obermeier, W., Gerique, A., López Sandoval, M., Lehnert, L., Thies, B., and Bendix, J. ,Land cover change in the Andes of southern Ecuador—patterns and drivers, *Remote Sensing* **7**(3), 2509–2542 (2007)
10. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R. ,Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment* (202), 18–27 (2007)

11. Achanta, R., and Susstrunk, S. ,Superpixels and polygons using simple non-iterative clustering, 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) ,(2017).
12. Ozdemir, I., Norton, D., Ozkan, U., Mert, A., and Senturk, O. ,Estimation of tree size diversity using object oriented texture analysis and Aster imagery, *Sensors* **8**(8), 4709–4724 (2008)

La curación de datos en IoT: un enfoque de modelo de decisión

Francisco José de Haro Olmo^[0000–0003–3130–0877]

Universidad de Almería.
fdo730@inlumine.ual.es

Abstract. Los escenarios actuales del Internet de las Cosas (IoT) tienen que hacer frente a muchos desafíos, especialmente cuando se integra una gran cantidad de fuentes de datos heterogéneas, es decir, la curación de datos. En este sentido, el uso de datos de mala calidad puede producir terribles consecuencias, desde la toma de decisiones incorrectas hasta perjudicar el rendimiento en las operaciones. Por lo tanto, utilizar datos con un nivel aceptable de usabilidad se ha convertido en algo esencial para lograr el éxito. Proponemos una arquitectura de pipeline de IoT-big data que permite la adquisición y curación de datos en cualquier contexto de IoT. Hemos personalizado el pipeline incluyendo el enfoque DMN4DQ para poder medir y evaluar la calidad de los datos producidos por los sensores IoT. Además, hemos elegido un conjunto de datos reales procedentes de sensores en un contexto de IoT agrícola y hemos definido un modelo de decisión que nos permite medir y evaluar automáticamente la calidad de los datos con respecto a la usabilidad de los datos en el contexto.

Keywords: big data · curación de datos · calidad del dato · IoT · sensores

1 Introducción

El Internet de las Cosas (IoT) es más real que nunca. Es habitual encontrar cientos y miles de dispositivos conectados a Internet y entre sí en diferentes contextos. Hoy en día, la IoT se utiliza como un servicio [1] en las canalizaciones de grandes datos [2] como un mecanismo para integrar grandes cantidades de servicios centrados en los datos. Como consecuencia, los datos generados por los sensores en contextos de IoT [3] pueden alcanzar fácilmente las tres dimensiones de los big data. En este sentido, la IoT debe afrontar múltiples retos en una canalización de bigdata en lo que respecta a las actividades relacionadas con la adquisición de datos o la curación de los mismos. Sin embargo, el uso de datos de mala calidad (es decir, datos con problemas) puede producir terribles consecuencias [4–6], por ejemplo, una toma de decisiones incorrecta, perjudicando el rendimiento de las operaciones y aumentando los costes. Por lo tanto, utilizar y alcanzar datos con un nivel de usabilidad esperado/deseado se ha convertido en algo crucial para lograr el éxito [7].

La curación de datos en IoT: un enfoque de modelo de decisión

En general, la integración de IoT con big data se lleva a cabo en la actividad de adquisición de datos en el contexto de un bigdata pipeline. [8] Así, el IoT requiere la integración de numerosos dispositivos a través de redes. En este contexto, los protocolos de comunicación son esenciales [9]. Sin embargo, no sólo las comunicaciones son importantes, ya que existe una enorme variedad de sensores [10] que pueden producir datos en múltiples formatos y almacenarse con diferentes esquemas y tipologías de almacenamiento de datos. Un ejemplo es la aplicación del IoT en el contexto del sector agroalimentario transformando las granjas en granjas inteligentes [11] como se muestra en la Figura 1. Por lo tanto, por un lado, necesitamos agregar los datos heterogéneos proporcionados por los sensores (es decir, la curación de datos), pero garantizando la calidad de los datos. Y, por otro lado, los sensores pueden verse afectados por problemas externos o internos comprometiendo la calidad de los datos producidos [12] , por ejemplo, los valores que faltan debido a las interrupciones de energía. Por lo tanto, es necesario evaluar la calidad de los datos en el proceso de curación de datos para evitar que los datos sean de mala calidad en las tareas posteriores.

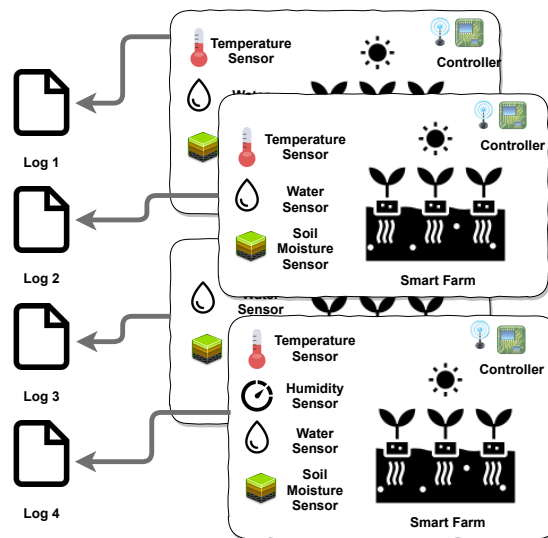


Fig. 1. Ejemplo de contexto IoT en una granja inteligente.

En este sentido, existen dos retos principales: la curación de datos de IoT integrada en contextos de Big Data y la evaluación de la calidad de los datos en el proceso de curación. Por lo tanto, los propósitos del artículo se engloban en los siguientes objetivos:

1. Definir una arquitectura de IoT-Big Data Pipeline que permita la adquisición y curación de datos en contextos de conexión de dispositivos.

2. Incluir en el pipeline un enfoque para medir y evaluar la calidad de los datos producidos por los sensores.
3. Localizar un caso de estudio real para aplicar nuestra propuesta.

2 Avances

Nuestro marco de trabajo cubre las principales actividades de un Big Data Pipeline típico, pero considerando las actividades de curación de datos y de ampliación de la calidad de los datos después de la adquisición de los mismos:

- **Adquisición de Datos.** Su objetivo es recoger la información de diferentes fuentes de datos e ingerir los datos para transportarlos a la siguiente actividad del pipeline. Se puede aplicar un filtro de calidad previo antes de la ingesta.
- **Preparación de Datos.** El objetivo de esta actividad es preparar los datos para su tratamiento en las siguientes actividades, formateándolos, limpiándolos o arreglándolos. Hay seis tareas que implementan técnicas que permiten la preparación de los datos: integración de datos, fusión de datos, transformación de datos, tratamiento y limpieza de datos. Sin embargo, en [13] estas tareas se incluyen en las actividades de curación y análisis de datos.
- **Análisis de Datos.** El análisis de datos pretende extraer valor de los datos mediante su extracción. Para lograrlo, se pueden aplicar tanto la Inteligencia de Negocios como la Ciencia de Datos.
- **Interpretación y visualización.** Está destinado a ser la actividad final de un Big Data Pipeline. Su objetivo es informar del valor extraído de los datos a través del pipeline para beneficiar a las actividades empresariales que lo requieran.
- **Almacenamiento de Datos.** Esta es también una actividad transversal. Su objetivo es persistir y proporcionar acceso a los datos cuando se requiera.
- **Extensiones.** Comprende un conjunto de actividades que pueden realizarse en paralelo o integrarse con las demás actividades de la cadena de producción. Las extensiones incluidas aquí deben garantizar la calidad, la seguridad y los requisitos legales en todo el proceso. Aunque se pueden incluir múltiples actividades como extensiones, como la seguridad de los datos, la procedencia, etc. Nosotros hemos incluido sólo dos actividades para cumplir con nuestros objetivos:
 - **Curación de Datos.** En [14] definen esta actividad como "el acto de descubrir una fuente de datos de interés, limpiar y transformar los nuevos datos, integrarlos semánticamente con otras fuentes de datos locales y deduplicar el compuesto resultante". Se preocupa por la calidad de los datos, su utilidad en el futuro y la conservación de su valor.
 - **Calidad del Dato** [15] es una condición de los datos que se evalúa utilizando un conjunto de variables denominadas *dimensiones de la calidad de los datos*. La tarea de calidad de los datos tiene por objeto supervisar y medir dicho estado.

Como se puede ver en la figura 2 para incluir la curación de datos y las extensiones de calidad, se propone una aproximación sistemática sobre la metodología DMN4DQ [16] y la suite de herramientas DMN4Spark ¹.

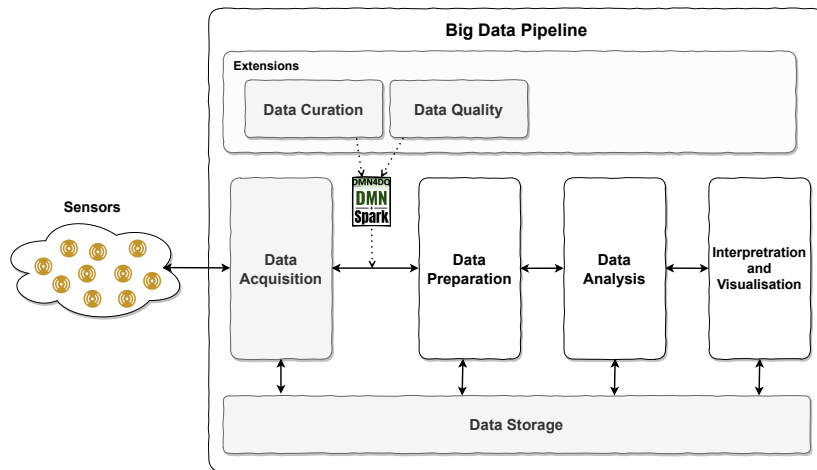


Fig. 2. IoT-Big Data framework overview.

2.1 DMN4DQ en pocas palabras

DMN4DQ [16] es una metodología que permite generar automáticamente recomendaciones sobre la potencial usabilidad de los datos en función de su nivel de calidad. Como se muestra en la figura 3, DMN4DQ se basa en el establecimiento de una jerarquía de Reglas de Negocio para la Calidad de los Datos que permite la validación de los atributos de los datos, la medición de las dimensiones de calidad de los datos y la evaluación del nivel de calidad de los mismos. Esta jerarquía de Reglas de Negocio se apoya en el paradigma del Modelo de Decisión y Notación (DMN) [17].

DMN es el lenguaje de modelado y la notación estándar definidos por OMG para describir las reglas de decisión. Estas reglas adoptan la forma de la estructura "si-entonces" de los lenguajes de programación tradicionales. A partir de la definición de un modelo de datos que se apoya en un conjunto de motores, por ejemplo, Camunda - DMN Engine, vemos en esta combinación una posibilidad para el desarrollo del estudio y la evaluación de la calidad de los datos.

En la jerarquía del modelo de decisión (DMN), presentamos cuatro niveles en la jerarquía de reglas de negocio, distribuidos de la siguiente manera

¹ DMN4DQ: <http://www.idea.us.es/dmn4dq/>

La curación de datos en IoT: un enfoque de modelo de decisión

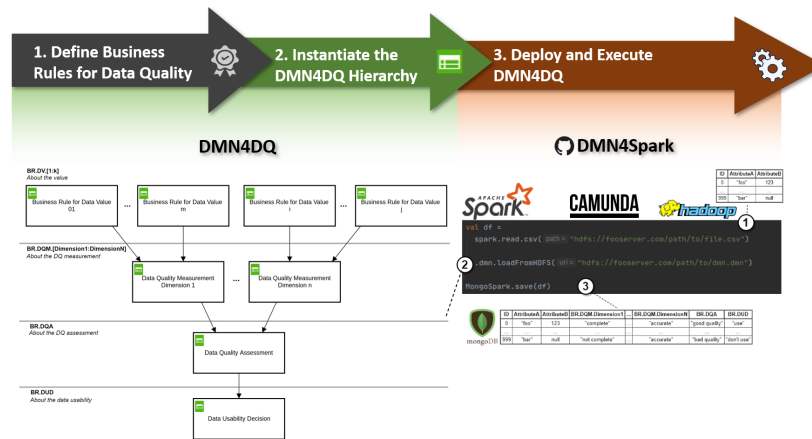


Fig. 3. DMN4DQ methodology.

1. instanciar las reglas de negocio para los valores de los datos (BR.DV) nivel de jerarquía;
2. instanciar el nivel de jerarquía de las reglas de negocio para la medición de la calidad de los datos (BR.DQM);
3. instanciar el nivel de jerarquía de las reglas de negocio para la evaluación de la calidad de los datos (BR.DQA), y;
4. instanciar el nivel de jerarquía de las reglas de negocio para la decisión de usabilidad de datos (BR.DUD).

DMN4Spark se ofrece como una suite de herramientas que permite la ejecución de la metodología de DMN4DQ en cualquier escenario. DMN4Spark se presenta en forma de librería para el lenguaje de programación Scala que permite a los desarrolladores utilizar el motor de Camunda DMN en entornos de Big Data mediante Apache Spark.

1. El conjunto de datos se carga en Apache Spark como un DataFrame.
2. Se carga el archivo DMN (modelo de decisión) con la jerarquía de tablas.
3. Por último, el DataFrame se mantiene en una base de datos o se emplea para otros procedimientos.

El código fuente de DMN4Spark se puede descargar desde <https://github.com/IDEA-Research-Group/dmn4spark>.

3 Conclusiones

Los escenarios actuales del IoT tienen que enfrentarse a muchos retos, especialmente cuando se integra una gran cantidad de fuentes de datos heterogéneas. En este sentido, el uso de datos de baja calidad (es decir, datos con problemas)

La curación de datos en IoT: un enfoque de modelo de decisión

puede producir terribles consecuencias, desde la toma de decisiones incorrectas hasta perjudicar el rendimiento en las operaciones. Por lo tanto, utilizar y alcanzar datos con un nivel aceptable de usabilidad se ha convertido en algo esencial para lograr el éxito.

Para superar esta necesidad, en este artículo hemos propuesto una arquitectura de canalización de Big Data de IoT que permite la adquisición y la curación de datos en cualquier contexto de IoT. Hemos personalizado el pipeline incluyendo el enfoque DMN4DQ para permitirnos medir y evaluar la calidad de los datos producidos por los sensores. Además, hemos elegido un conjunto de datos reales con datos de sensores en un contexto de IoT agrícola y hemos definido los modelos de decisión (DMN) para permitirnos la medición y evaluación automática de la calidad de los datos con respecto a la usabilidad de los datos en el contexto.

Como trabajo futuro, este es el primer paso hacia lo que en los próximos pasos, proponemos evaluar en profundidad la curación de datos mediante la ejecución del modelo de decisión utilizando la herramienta DMN4Spark. Esto nos permitirá hacer un análisis estadístico del conjunto de datos en términos de calidad de los mismos.

Referencias

1. Taherkordi A, Eliassen F, Horn G. From IoT big data to IoT big services. In: Proceedings of the Symposium on Applied Computing - SAC'17 New York, New York, USA:ACM Press; 2017.p.485–491. <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3019612.3019700>.
2. Ceravolo P, Azzini A, Angelini M, Catarci T, Cudré-Mauroux P, Damiani E, et al. Big Data Semantics. Journal on Data Semantics 2018 jun;7(2):65–85. <http://link.springer.com/10.1007/s13740-018-0086-2>.
3. Marjani M, Nasaruddin F, Gani A, Karim A, Hashem IAT, SiddiqA, et al. Big IoT Data Analytics: Architecture, Opportunities, and Open Research Challenges. IEEE Access 2017;5:5247–5261. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7888916/>
4. Rahm E,Do HH. Data cleaning: Problems and current approaches. IEEE Data Eng Bull 2000;23(4):3–13
5. Redman TC. The Impact of Poor Data Quality on the Typical Enterprise. Commun ACM 1998 Feb;41(2):79–82. <https://doi.org/10.1145/269012.269025>.
6. Hernández MA,StolfoSJ. Real-world data is dirty: Data cleansing and the merge/purge problem. Datamining and knowledge discovery 1998;2(1):9–37
7. Pérez-Álvarez JM, Maté A, Gómez-López MT, Trujillo J. Tactical Business-Process-Decision Support based on KPIs Monitoring and Validation. Computers in Industry2018;102:23–39.
8. Valencia-ParraA,Analysis of Big Data Architectures and Pipelines:Challenges and Opportunities;2019
9. Strohbach M, Ziekow H, Gazis V, Akiva N. Towards a Big Data Analytics Framework for IoT and Smart City Applications. Springer, Cham; 2015.p.257–282. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-09177-8_11.
10. Varela-VacaÁJ,RosadoDG,SánchezLE,Gómez-LópezMT,GascaRM,Fernández-MedinaE.Definition and Verification of Security Configurations of Cyber-Physical

La curación de datos en IoT: un enfoque de modelo de decisión

- Systems. In:Katsikas S, Cuppens F,Cuppens N,Lambrinouidakis C,Kalloniatis C, Mylopoulos J, et al., editors. Computer Security Cham: Springer International Publishing; 2020.p. 135–155.
11. Kosior K. Digital transformation in the agri-food sector—opportunities and challenges. *Roczniki (Annals)* 2018; 2018(1230-2019-3703)
 12. IlyasIF,ChuX. Datacleaning. *ACM*;2019.
 13. Curry E. The big data value chain: definitions, concepts, and theoretical approaches. *Proceedings of the New Horizons for a Data-Driven Economy: A Roadmap for Usage and Exploitation of Big Data in Europe*; Springer International Publishing; 2016:29-37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21569-3_3
 14. Stonebraker M, Beskales G, Pagan A, et al. Data curation at scale: the data tamer system. *CIDR' 2013*; 2013. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.302.8817>
 15. Batini C, Scannapieco M. *Data and information quality: dimensions, principles and techniques*; 2016
 16. Valencia-Parra Á, Parody L, Varela-Vaca ÁJ, Caballero I, López MTG. DMN4DQ: when data quality meets DMN. *Decis Support Syst.* 2021;141:113450. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2020.113450>
 17. MG Decision Model and Notation (DMN), Version 1.2; 2019. <https://www.omg.org/spec/DMN>

Avances en el modelado y control del clima de un invernadero

Francisco García Mañas

Departamento de Informática, Área de Ingeniería de Sistemas y Automática,
Universidad de Almería, CIESOL, ceiA3, 04120, Almería, España
`francisco.gm@ual.es`

Resumen En este trabajo se presentan los avances conseguidos durante el segundo año de desarrollo de la tesis doctoral del autor, correspondiente al curso académico 2020/2021. Por un lado, se ha implementado un estimador de parámetros que permite adaptar en tiempo real y en línea un modelo dinámico de temperatura de un invernadero. Mediante ensayos experimentales, se ha demostrado que el estimador determina correctamente los parámetros del modelo, consiguiendo un error medio de $0,22^{\circ}\text{C}$ frente a la temperatura medida. Por otro lado, se ha realizado un estudio de comparación de cinco reglas de ajuste para control por prealimentación, que se pueden aplicar cuando la inversión de retardos no es realizable a la hora de calcular un compensador. Dos de estas cinco reglas se han probado con éxito en un invernadero real para rechazar perturbaciones que afectan al problema de control de temperatura mediante ventilación natural.

1. Introducción

La temática de la tesis doctoral del autor de este trabajo está centrada en la aplicación de estrategias de control automático para gestionar de forma óptima la producción de cultivos en invernadero. Entre las tareas que se están efectuando, se encuentra el desarrollo de modelos en distintos niveles de abstracción y el diseño de estrategias de control, tanto de bajo nivel (p. ej., control PID) como de alto nivel (más enfocadas al cálculo de consignas óptimas).

Uno de los avances conseguidos en el segundo año de desarrollo de la tesis se relaciona con las tareas de modelado. El modelado del clima de un invernadero tiene por objetivo caracterizar de forma matemática los distintos fenómenos que provocan dicho clima y que afectan al crecimiento del cultivo. La mayoría de estos fenómenos se suelen modelar mediante balances de energía y de masas, en forma de ecuaciones diferenciales [12]. Este tipo de modelos pueden reproducir la evolución en el tiempo de variables de interés como la temperatura, la humedad y la radiación solar dentro de un invernadero. No obstante, son modelos no lineales que, además, presentan algunos parámetros cuyos valores varían en el tiempo, en función de las condiciones climáticas y/o del estado del cultivo. Por ejemplo, los parámetros pueden estar asociados a procesos de transferencia de calor, es decir, convección, conducción y radiación. Ante la dificultad (en algunos casos,

imposibilidad) de conocer el valor de estos parámetros de forma directa, se suelen realizar calibraciones *offline* (fuera de línea) de los modelos, utilizando para ello grandes conjuntos de datos que hayan sido medidos previamente en el invernadero objeto de estudio. Estas calibraciones permiten encontrar unos valores para los parámetros, de forma que se minimice el error entre las variables reproducidas por el modelo y la evolución real de las mismas según los datos medidos. Sin embargo, a lo largo de un ciclo de cultivo, son necesarias varias calibraciones de estos modelos para asegurar que siguen reproduciendo de forma precisa el clima del invernadero. Para evitar este procedimiento periódico y tedioso, se puede emplear un estimador de parámetros en línea.

La estimación de parámetros en línea consiste en determinar los valores de los parámetros de un modelo en paralelo con el funcionamiento del sistema que representa, utilizando los datos que se miden sobre el sistema real para ir adaptando (o calibrando) el modelo. La estimación de parámetros aplicada a invernaderos se ha estudiado en algunos trabajos en los que se utilizan la optimización por enjambre de partículas y algoritmos de evolución diferencial [9], o el filtro de Kalman extendido [13]. A pesar de que estos estudios ofrecen resultados destacables, también ponen de manifiesto algunas limitaciones, como el número de parámetros que se pueden adaptar a la vez. Como se explica en la Sección 2.1 del presente documento, el trabajo publicado en [3] expone el desarrollo de un mecanismo de estimación de parámetros basado en un algoritmo de optimización inspirado en la naturaleza, el *Random Scaling-based Bat Algorithm* [5]. Se ha demostrado que con este mecanismo se consigue estimar en tiempo real un conjunto de diez parámetros de un modelo de temperatura de un invernadero.

Otro de los avances realizado en el último año ha consistido en analizar, comparar y ensayar técnicas de control para rechazo de perturbaciones que pueden ser aplicadas en invernaderos. El control del clima de un invernadero es fundamental para garantizar unas condiciones óptimas que favorezcan el crecimiento del cultivo. Uno de los principales problemas de control durante el periodo diurno en invernaderos mediterráneos consiste en la regulación de la temperatura haciendo uso de la ventilación natural [2]. Como la temperatura del aire en el interior de un invernadero es normalmente más alta que la temperatura del aire en el exterior, cuando se abren las ventanas del invernadero, el aire caliente del interior sale a través de las ventanas cenitales de la cubierta, mientras que el aire frío exterior entra por las ventanas laterales. Sin embargo, esta forma de regular la temperatura depende de las condiciones climáticas del exterior del invernadero, que actúan como perturbaciones (medibles mediante sensores). Principalmente, los cambios en la radiación solar, la temperatura y la velocidad del viento en el exterior pueden afectar a la temperatura en el interior del invernadero, y provocar una desviación en su valor respecto al deseado como consigna de control. Se ha demostrado en trabajos previos que el control por prealimentación (también llamado por adelantado o anticipativo) permite tener en cuenta este tipo de perturbaciones y compensar su efecto en el bucle de control de temperatura del invernadero [8]. Como se resume en la Sección 2.2, con la publicación de un nuevo trabajo [1] se ha contribuido a evaluar el rendimiento

de cinco reglas de ajuste para control por prealimentación. Las reglas de ajuste evaluadas permiten obtener la expresión de un compensador en los casos en los que no sería realizable la inversión de retardos, algo que ocurre en su aplicación en invernaderos, por la dinámica que relaciona la temperatura con la ventilación natural y con el clima exterior.

2. Avances

En esta sección, se exponen de forma resumida los principales avances mencionados en la introducción del documento.

2.1. Adaptación en tiempo real de un modelo del clima de un invernadero utilizando un estimador de parámetros en línea

El estimador de parámetros publicado en [3] se basa en el esquema de funcionamiento que se muestra en la Figura 1. Como se puede apreciar, el estimador permite adaptar un modelo de temperatura de un invernadero mediante el ajuste de sus parámetros variantes en el tiempo, de tal forma que el error entre la temperatura medida y la simulada por el modelo sea el menor posible en cada instante de tiempo. Además, este esquema muestra que la estimación se produce en línea con el sistema, es decir, que se efectúa en paralelo a los procesos que ocurren en el invernadero, y también en tiempo real, pues, cada vez que se mide la temperatura en el invernadero, se realiza la adaptación del modelo.

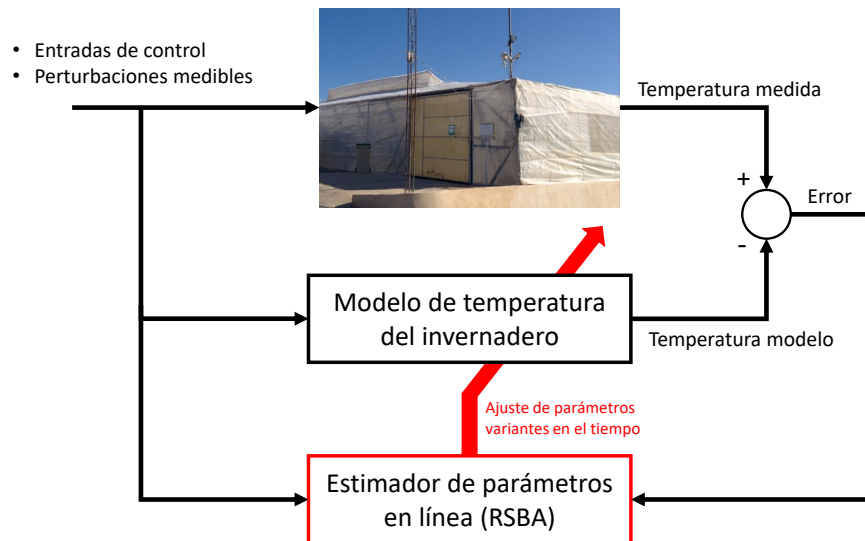


Figura 1. Esquema de funcionamiento del estimador de parámetros en línea.

Para reproducir la evolución de la temperatura del aire en el interior del invernadero, se ha empleado un modelo pseudo-físico basado en balances de energía [12], según la siguiente ecuación diferencial:

$$c_{esp,a} c_{den,a} \frac{c_{vol,a}}{c_{area,ss}} \frac{dx_{T,a}}{dt} = Q_{sol,a} + Q_{cnv,ss-a} + Q_{calef-a} - Q_{cnv_cnd,a-e} - Q_{ven,a-e} - Q_{tra,cu} \quad (1)$$

donde $x_{T,a}$ (K) es la temperatura del aire en el interior y Q (W/m²) son los distintos flujos de calor que ocurren en el invernadero (p. ej., por la radiación solar, por diferencias de temperatura entre elementos, por la calefacción, por ventilación natural, por la transpiración del cultivo, etc.). Cada uno de estos flujos tiene asociados una serie de parámetros cuyos valores, en algunos casos, se pueden considerar constantes, pero en otros varían en el tiempo. Por ejemplo, la transferencia de calor por convección y conducción en la cubierta entre el aire exterior y el aire interior se expresa de forma simplificada como:

$$Q_{cnv_cnd,a-e} = c_{cnv_cnd,a-e} (x_{T,a} - p_{T,e}) \quad (2)$$

donde $c_{cnv_cnd,a-e}$ es un parámetro que representa la pérdida de calor a través de la cubierta del invernadero debido a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, $p_{T,e}$. Este tipo de parámetros son los que el estimador desarrollado se encarga de ajustar.

Como mecanismo de estimación, se utiliza un algoritmo de optimización inspirado en la naturaleza, concretamente en el comportamiento de los murciélagos y en su capacidad de ecolocalización [15]. Este algoritmo es el RSBA, *Random Scaling-based Bat Algorithm*, cuya formulación matemática se encuentra descrita en [5,3]. Se decidió aplicar este algoritmo por su simplicidad para programarlo y su capacidad para incrementar la posibilidad de encontrar soluciones globales. No obstante, el estimador tiene en cuenta unas restricciones en forma de rangos de valores que pueden adquirir los parámetros. Estas restricciones se imponen para respetar el significado físico de cada parámetro, que evolucionará entre un valor mínimo y un valor máximo.

La implementación del estimador se ha realizado en las siguientes etapas:

1. Calibración *offline* y validación del modelo de temperatura del invernadero.
2. Análisis de sensibilidad del modelo para determinar los parámetros variantes en el tiempo que deben ser estimados.
3. Estudio en simulación de la estimación de parámetros en línea para encontrar los mejores ajustes posibles para el algoritmo RSBA.
4. Ensayo experimental del estimador para adaptar el modelo en tiempo real, recibiendo datos cada minuto procedentes de los sensores del invernadero.

El ensayo experimental en condiciones operacionales reales se efectuó entre el 7 y el 22 de enero de 2021. Durante este período, se obtuvieron resultados relevantes, pudiendo evaluar la capacidad del estimador para adaptar los parámetros del modelo no solamente en días soleados, sino también en días con viento y lluvia. Para los 15 días de duración del ensayo, el error medio entre el modelo y la temperatura medida fue de 0,22 °C, lo que confirma su buen desempeño.

2.2. Evaluación de reglas de ajuste y diseño para control por prealimentación

El trabajo publicado en [1] presenta una comparación práctica de reglas para ajustar y diseñar compensadores para control por prealimentación. En concreto, se centra en las cinco reglas que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Reglas seleccionadas para su comparación práctica

Reglas	Esquema control	Referencia
Reglas de ajuste simples	Clásico	[6]
Reglas de ajuste generalizadas	No interactivo	[10]
Compensadores de bajo orden	No interactivo	[7]
Reglas de ajuste de bucle cerrado	Clásico	[14]
Reglas de ajuste IMC	Clásico	[11]

Según la Figura 2, la forma clásica de calcular un compensador para control por prealimentación es la siguiente:

$$G_c(s) = \frac{G_p(s)}{G_u(s)} \quad (3)$$

donde $G_c(s)$ es el compensador, $G_u(s)$ es la relación entre la variable de salida, y , y la señal de control, u , y $G_p(s)$ es la relación entre una perturbación medible, p , y la salida a controlar. Sin embargo, si el tiempo de retardo de $G_u(s)$ es mayor que el tiempo de retardo de $G_p(s)$, entonces el compensador ideal no es realizable. Es en estos casos cuando se pueden utilizar las reglas de la Tabla 1.

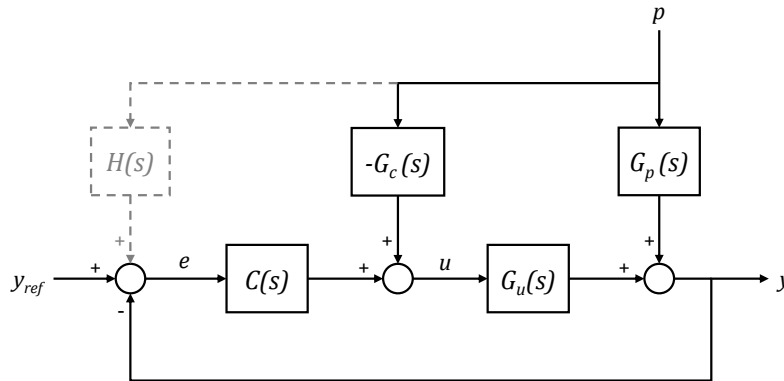


Figura 2. Esquemas de control por prealimentación (adaptado de [1]). El esquema no interactivo se obtiene a partir del clásico, añadiendo el filtro $H(s) = G_p(s) - G_u(s) G_c(s)$.

Normalmente, cuando este problema con la inversión de retardos ocurre, se suele calcular el compensador eliminando el término del tiempo de retardo. No obstante, con esta simplificación no se podría alcanzar una compensación perfecta de la perturbación. Las reglas estudiadas ofrecen una solución de compromiso, es decir, a pesar de que el compensador ideal no es realizable, cada regla permite obtener un compensador que ayudaría a minimizar el deterioro de la acción de control.

En trabajos previos, se ha demostrado que esta casuística de inversión de retardos no realizable ocurre con la dinámica de la temperatura en un invernadero, pues, al identificar modelos de bajo orden (en forma de función de transferencia), se observa que los compensadores ideales no pueden calcularse. En concreto, en [8] se aplicaron las reglas de ajuste simples de [6], y se obtuvieron resultados muy buenos para el control de temperatura con ventilación natural, rechazando perturbaciones causadas por variaciones en la radiación solar, temperatura y velocidad de viento en el exterior. Por este motivo, se decidió probar en el mismo invernadero las reglas de ajuste de bucle cerrado [14] y las reglas de ajuste IMC [11], que fueron las que mejor rendimiento ofrecieron durante el estudio en simulación explicado en [1]. Cada una de estas reglas se ensayaron en distintos días, tanto soleados como nublados. El resultado final fue que las reglas de ajuste IMC mostraron un rendimiento superior a las reglas de ajuste de bucle cerrado. En la Tabla 2, se muestran los errores de control obtenidos como la diferencia entre la consigna establecida y la temperatura controlada según cada regla ensayada. A modo comparativo, se incluyen los resultados de un ensayo realizado con un controlador PI pero sin compensadores para rechazo de perturbaciones.

Tabla 2. Rangos del error de control según las reglas usadas

Reglas	Error día soleado	Error día nublado
Reglas de ajuste IMC	$\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$
Reglas de ajuste de bucle cerrado	$\pm 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Control PI sin compensadores	$\pm 0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$

3. Conclusiones

En lo que respecta a avances en modelado, el estimador desarrollado es una herramienta útil para conocer la evolución en el tiempo de los parámetros que caracterizan la dinámica de la temperatura de un invernadero. Al utilizar un modelo basado en primeros principios, el estimador permite conocer también la evolución de los flujos de calor que ocurren en el invernadero. En este sentido, se están estudiando otras posibles aplicaciones de este estimador, por ejemplo, para diseñar un sensor virtual que determine de forma indirecta el flujo de ventilación de un invernadero. Algunos resultados preliminares se han publicado en [4].

En cuanto a los avances de control, tras la comparación experimental de cinco reglas para ajuste de compensadores para control por prealimentación, se

concluye que las reglas de ajuste IMC junto con el esquema de control clásico son una muy buena opción a aplicar en invernaderos, debido a su simplicidad y al reducido error de control que consiguen (incluso en días nublados y con viento).

En la actualidad, el doctorando se encuentra trabajando en la implementación de una técnica de control y optimización para calcular consignas de temperatura. La publicación de los resultados de esta investigación está prevista para los próximos meses.

Agradecimientos Al proyecto I+D+i del Plan Nacional DPI2017-85007-R del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y Fondos FEDER. Francisco García Mañas es beneficiario de una ayuda FPU del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. El autor quiere agradecer la colaboración del personal de la Estación Experimental “Las Palmerillas”, de la Fundación Cajamar.

Referencias

1. García-Mañas, F., Guzmán, J.L., Rodríguez, F., Berenguel, M., Hägglund, T.: Experimental evaluation of feedforward tuning rules. *Control Engineering Practice* **114**, 104877 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104877>
2. García-Mañas, F., Rodríguez, F., Guzmán, J.L., Berenguel, M.: Control automático de la temperatura diurna en invernaderos mediante ventilación natural. *Horticultura* **353**, 64–68 (2021)
3. Guesbaya, M., García-Mañas, F., Megherbi, H., Rodríguez, F.: Real-time adaptation of a greenhouse microclimate model using an online parameter estimator based on a bat algorithm variant. *Computers and Electronics in Agriculture* **192**, 106627 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106627>
4. Guesbaya, M., García-Mañas, F., Rodríguez, F., Megherbi, H., Ouamane, M.R.: Virtual sensor for ventilation flux estimation in greenhouses. In: XI Congreso Ibérico de Agroingeniería (2021)
5. Guesbaya, M., Megherbi, H., Megherbi, A.C.: Random scaling-based bat algorithm for greenhouse thermal model identification and experimental validation. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications*. pp. 47–62. Springer Singapore (2021). https://doi.org/10.1007/978-981-15-6403-1_4
6. Guzmán, J.L., Hägglund, T.: Simple tuning rules for feedforward compensators. *Journal of Process Control* **21**(1), 92–102 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2010.10.007>
7. Hast, M., Hägglund, T.: Low-order feedforward controllers: Optimal performance and practical considerations. *Journal of Process Control* **24**(9), 1462–1471 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.06.016>
8. Montoya-Ríos, A.P., García-Mañas, F., Guzmán, J.L., Rodríguez, F.: Simple tuning rules for feedforward compensators applied to greenhouse daytime temperature control using natural ventilation. *Agronomy* **10**(9), 1327 (2020). <https://doi.org/10.3390/agronomy10091327>
9. Pérez-González, A., Begovich-Mendoza, O., Ruiz-León, J.: Modeling of a greenhouse prototype using PSO and differential evolution algorithms based on a real-time LabView™ application. *Applied Soft Computing* **62**, 86–100 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.10.023>

Avances en el modelado y control del clima de un invernadero

10. Rodríguez, C., Guzmán, J.L., Berenguel, M., Häggglund, T.: Generalized feedforward tuning rules for non-realizable delay inversion. *Journal of Process Control* **23**(9), 1241–1250 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.08.001>
11. Rodríguez, C., Aranda-Escolástico, E., Guzmán, J.L., Berenguel, M., Häggglund, T.: Revisiting the simplified internal model control tuning rules for low-order controllers: feedforward controller. *IET Control Theory & Applications* **14**(12), 1612–1618 (2020). <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2019.0823>
12. Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J.L., Ramírez-Arias, A.: Modeling and control of greenhouse crop growth. Springer (2015). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11134-6>
13. Speetjens, S., Stigter, J., van Straten, G.: Towards an adaptive model for greenhouse control. *Computers and Electronics in Agriculture* **67**(1), 1–8 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.01.012>
14. Veronesi, M., Guzmán, J.L., Visioli, A., Häggglund, T.: Closed-loop tuning rules for feedforward compensator gains. *IFAC-PapersOnLine* **50**(1), 7523–7528 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1186>
15. Yang, X.S.: Nature-inspired optimization algorithms. Elsevier (2014). <https://doi.org/10.1016/C2013-0-01368-0>

Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones

Ángeles Hoyo

Universidad de Almería, angeles.hoyo@ual.es

Abstract. Desde un punto de vista general en ingeniería de control, 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. Sin embargo, siempre hay fuentes de error que no hacen posible que al aplicarlo se obtenga el rendimiento deseado. Por ello se requiere, en todas estas estrategias, una modificación específica para darle el 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 los cursos 2018/2019, 2019/2020 y 2020/2021 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 representa 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 [10]. 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^∞ , 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^∞ , tienen en cuenta los errores de modelado como incertidumbres no estructuradas, donde la incertidumbre se suele representar como una perturbación (incremento) fija ΔP sobre la planta P en todas las frecuencias, obteniéndose resultados bastante conservadores.

Por otro lado, existen otras técnicas de control robusto, como por ejemplo 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 del modelo de la planta, de tal manera que su representación gráfica no corresponde a un incremento tipo norma en cada frecuencia, sino a incrementos irregulares que permiten obtener resultados mucho menos conservadores que para el tipo de representación tipo norma. 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 [9].

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 que dicho controlador tiene que ser sintonizado para rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia al mismo tiempo. El control por adelanto proporciona

Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones

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) [11] es, sin lugar a dudas, el compensador de tiempo muerto más utilizado en el control de plantas con retardo [8]. 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 [8]. No obstante, esta estructura de control 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 [12]; 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 estos años.

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.

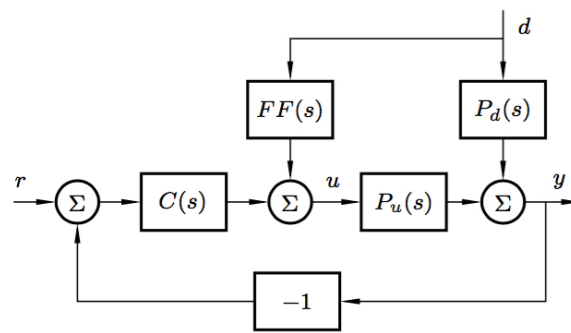


Fig. 1. Esquema clásico de control feedforward

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, siendo 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.

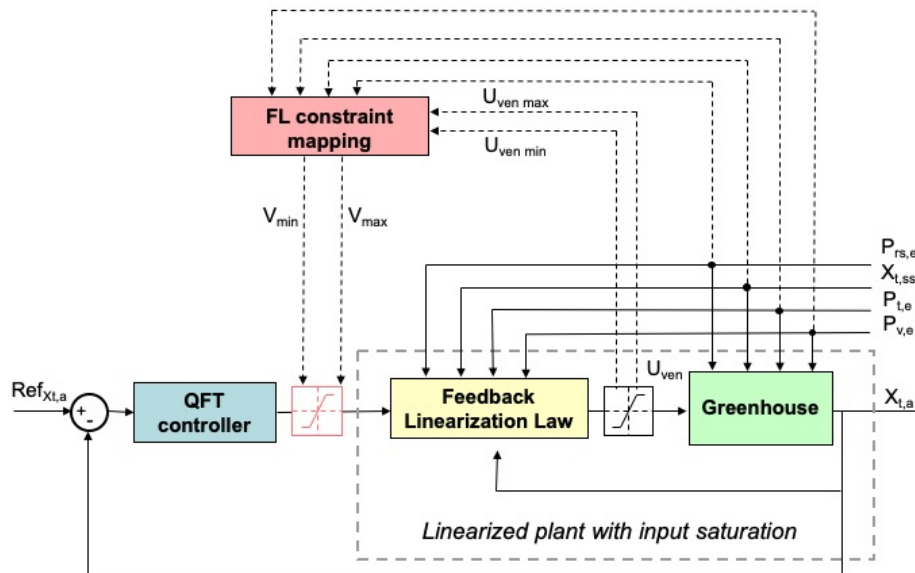


Fig. 2. Esquema de control

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] y en [6].

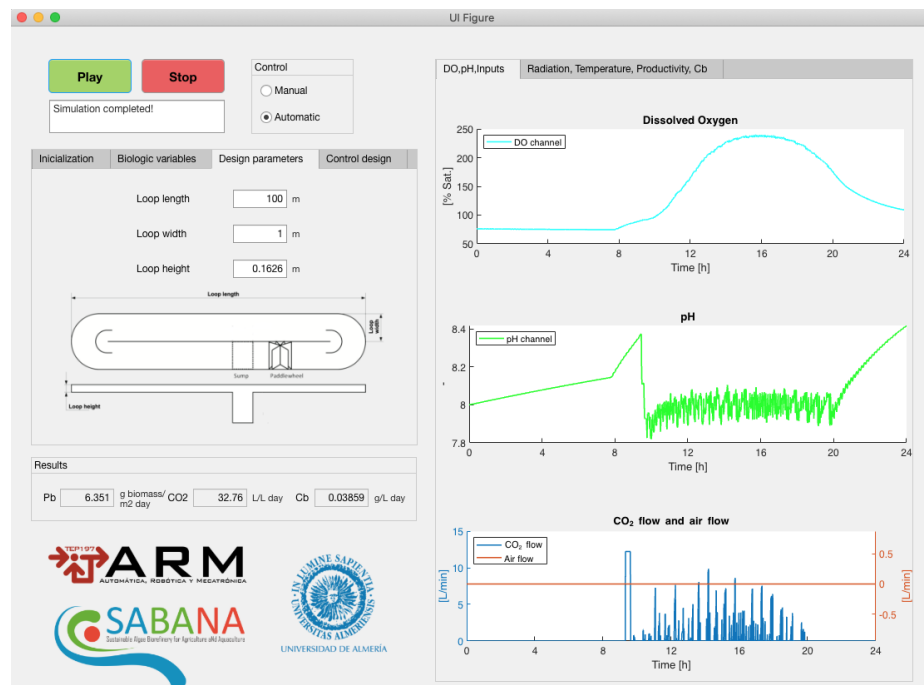


Fig. 3. Interfaz gráfica

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 CO_2 al medio de cultivo, el exceso de 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 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 CO_2 al mismo tiempo. El resultado obtenido es satisfactorio y se puede consultar el trabajo completo en [3].

2.5 Control en cascada con saturación

Este artículo presenta una solución al problema de saturación en los esquemas de control en cascada.

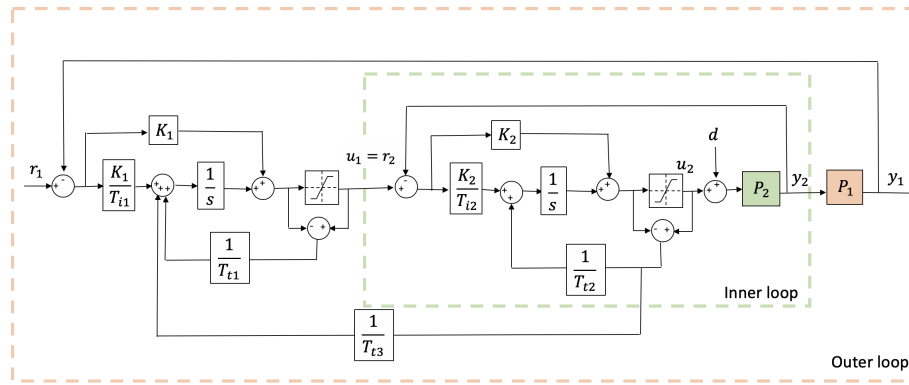


Fig. 4. Esquema de control en cascada con la nueva propuesta del back-calculation

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 analiza esta situación e introduce una solución muy simple para resolver este problema y reducir el impacto del efecto de saturación, como se observa en la figura 4. El trabajo se encuentra en [7].

2.6 Control robusto con QFT del pH en un fotobiorreactor raceway

En este trabajo se ha presentado el control robusto con QFT del pH de un reactor tipo raceway [2]. En primer lugar, la dinámica no lineal del proceso ha sido capturada en forma de modelo de bajo orden con incertidumbre paramétrica. Posteriormente, se procedió al diseño de un controlador robusto que fue evaluado en simulación para diferentes puntos de operación y bajo diversas condiciones climatológicas, obteniendo resultados satisfactorios.

Se ha enviado el trabajo recientemente a la revista RIAI con ensayos del controlador en fotobiorreactores raceway reales. No se muestran los resultados porque el artículo ha sido aceptado recientemente y aún no se ha publicado.

3 Trabajos en desarrollo

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

- **Diseño de reglas de sintonía.**

Se profundizará en la búsqueda de reglas de sintonía para el nuevo esquema propuesto en [7].

- **Implementación de control robusto para esquemas clásicos de control.**

Se estudiará la incertidumbre e implementación de controladores robustos en esquemas clásicos de control (Feedforward, Predictor de Smith, sistemas con retardo, Cascada,...).

4 Conclusiones

El artículo ha presentado las principales conclusiones de los avances realizados durante estos años. Relacionado con el objetivo de la tesis de análisis de la robustez en esquemas clásicos de control, 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

Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones

como incertidumbre paramétrica. Luego, se diseñó un controlador PI usando QFT y 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. También se hizo un estudio de la incertidumbre en el modelo de un reactor raceway, diseñando un control robusto para el control de pH mediante QFT, obteniendo resultados satisfactorios tanto en simulación como en los ensayos reales.

Por otro lado, debido a la gran complejidad de los modelos de microalgas, se ha desarrollado una herramienta interactiva que simula el comportamiento del cultivo en fotobiorreactores de raceway. Además, permite evaluar estos sistemas tan complejos de una forma sencilla, permitiendo estudiar, por ejemplo, la viabilidad de su implementación a escala industrial. Del mismo modo, permite implementar y analizar diferentes controladores permitiendo ver comportamiento antes de hacerlo en el sistema real. Una estrategia de control implementada en los reactores, en simulación, ha sido 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.

Por último, analizando los esquemas clásicos de control, se ha estudiado el problema de saturación para un control en cascada tanto para seguimiento de referencias como para rechazo a perturbaciones, observando que la respuesta del sistema se deterioraba considerablemente cuando se producía saturación en el lazo interno. En primer lugar se implementó el esquema clásico back-calculation para reducir el efecto de la saturación, observando que el resultado es limitado. A continuación se implementó la solución industrial observando de nuevo que no se podía obtener la respuesta deseada. Por todo esto, se desarrolló un nuevo esquema con un nuevo parámetro que puede sintonizarse para buscar un equilibrio entre el tiempo de saturación y el rendimiento en la salida del proceso.

References

1. A. Hoyo, J. L. Guzmán, F. Ación, M. Berenguel, and J. C. Moreno. A graphical tool to simulate raceway photoreactors. In *2nd IWA Conference on Algal Technologies for Wastewater Treatment and Resource Recovery*, Valladolid, España, July 2019.
2. A. Hoyo, J. L. Guzmán, J. C. Moreno, and M. Berenguel. Control robusto con QFT del ph en un fotobiorreactor raceway. In *XXXVIII Jornadas de Automática*, pages 414–420, Gijón, España, Septiembre 2017.
3. A. Hoyo, J. L. Guzmán, J. C. Moreno, and M. Berenguel. Control predictivo lineal del ph en un fotobiorreactor raceway. In *XL Jornadas de Automática*, pages 414–420, Ferrol, España, Septiembre 2019.
4. A. Hoyo, J. C. Moreno, J. L. Guzmán, and T. Häggglund. Robust QFT-based PI controller for a feedforward control scheme. In *3rd IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control PID*, Ghent, Belgium, May 2018.
5. A. Hoyo, J. C. Moreno, J. L. Guzmán, and F. Rodríguez. Robust QFT-based feedback linearization controller of the greenhouse diurnal temperature using natural ventilation. *IEEE Access*, 7:64148–64161, 2019.
6. A. Hoyo, E. Rodríguez-Miranda, J. L. Guzmán, F. G. Ación, M. Berenguel, and J. C. Moreno. A computer-based tool to simulate raceway photobioreactors for design, operation and control purposes. *Computers Chemical Engineering*, 156:107572, 2022.
7. M. Leal, A. Hoyo, J. L. Guzmán, and T. Häggglund. Double back-calculation approach to deal with input saturation in cascade control problems. In *CONTROLLO 2020*, Bragança, Portugal, July 2020.
8. J. E. Normey-Rico and E. F. Camacho. Dead-time compensators: A survey. *Control Engineering Practice*, 16(4):407 – 428, 2008.
9. L. Roca. *Contribuciones al modelado y control de una planta de desalación solar. PhD Thesis*. Universidad de Almería, 2009.
10. F. Rodríguez-Rubio and M. López. *Control Adaptativo y Robusto*. Universidad de Sevilla, 1993.
11. O. Smith. Closer control of loops with dead time. *Chemical Engineering Progress*, 1957.
12. M.-H. Tsai and P.-C. Tung. A robust disturbance reduction scheme for linear small delay systems with disturbances of unknown frequencies. *ISA Transactions*, 51(3):362 – 372, 2012.

Advanced predictive control strategies applied for controlling solar thermal systems*

Igor Mendes Lima Pataro^{1[0000-0003-0007-0992]}

Doctorate in Informatics, University of Almería, Ctra. Sacramento s/n 04120,
Almería, Spain.
ilp428@inlumine.ual.es

Resumen. The need to optimize and expand the production capacity of solar thermal power plants is still a challenge from the control engineering point of view. In this way, this work proposes new solutions based on predictive control strategies in order to improve the performance of solar thermal energy generation systems, focusing not only on the control of the solar collector fields but also on better performance of the entire connected subsystems. Thus, this paper summarizes the following results: i) developing a nonlinear hybrid controller, and ii), the preliminary studies of a guaranteed nominal stable controller with feedforward compensation. The results are demonstrated by applying such strategies in a simulated environment for case studies of the CIESOL solar plant located at the University of Almería. As a result, the hybrid nonlinear control strategy reduces the reference tracking error compared to a non-hybrid strategy. On the other hand, a nominally stable controller proposal has an essential contribution with attractive features for controlling solar collector field systems.

Palabras clave: Solar plant · Predictive control · Hybrid control · Stable MPC · Feedforward

1 Introduction

Solar energy has emerged as one of the most important and promising choices to replace energy sources derived from fossil fuels, both for the production of electricity and the supply of thermal energy. Although solar thermal energy implementation has grown in recent years, there are still concerns about making it economically attractive [4,8,5]. Based on that, control engineering arises as a reliable and relevant field to enhance solar thermal plants performance. Advanced control strategies can lead solar plants to operate with reduced costs and increased operating hours, mainly regarding nonlinear control and disturbance rejection approaches [1,3].

The improvement in the operation of solar thermal plants is generally linked to the accurate control of the heat transfer fluid (HTF) outlet temperature of

* Supported by National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) - 201143/2019-4

the solar collector field. Regardless, it is crucial to consider the association of auxiliary subsystems, such as storage tanks and gas heaters, in solar thermal plants' control. These subsystems are installed to improve general plant efficiency by filtering undesirable disturbances that can reduce the HTF outlet temperature or increase the HTF temperature if there is insufficient solar irradiance. Therefore, as can be noted, the employment of advanced control strategies must consider either different disturbance interference or various subsystems coupled with the solar collector field.

Based on those mentioned above solar thermal power plant control issues, this paper summarizes the achieved outcomes regarding the development of advanced predictive control strategies. First, a new control algorithm is presented based on an extended version of a Practical Nonlinear Model Predictive Control (PNMPC), wherein a novel hybrid formulation is employed to guarantee optimal control movements regarding the continuous and binary conditions of the thermal solar plant system [7]. In the sequence, a nominal stable infinite horizon predictive controller (IHMPC) with implicit feedforward compensation (FF) is developed for controlling the solar collector field for rejecting disturbance variable effects such as irradiance, input, and ambient temperature [6].

For the sake of objectivity, this paper is divided as follows: Section 2 summarizes the formulation of the Hybrid PNMPC (HPNMPC). Section 3 depicts the IHMPC-FF algorithm and its stability properties. In Section 4, the main results of both proposed controllers are presented. Finally, in Section 5 the conclusion and final considerations are examined.

2 A hybrid nonlinear control approach for solar thermal collector systems

The Hybrid PNMPC is formulated as an extension of the original control strategy presented in the work of Plucênio et al. (2007) [9]. This strategy computes the nonlinear system outputs, along a prediction horizon N_p , as an approximated linear function of the future control increments $\Delta \mathbf{u}$. The predicted outputs vector $\hat{\mathbf{Y}}$ is an approximated linear function considering a free-response vector \mathbf{F} and a forced-response matrix \mathbf{G} , in which \mathbf{G} is calculated as the gradient of the free-response vector for the input increments $\Delta \mathbf{u}$, $\mathbf{G} = \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}}{\partial \Delta \mathbf{u}}$. As presented in the work of Pataro et al. (2022) [7], the HPNMPC control optimization problem takes into account the operational plant modes as process constraints, producing a Mixed Logic-Dynamic (MDL) problem that includes binary and continuous variables. Thus, the thermal solar plant system is represented by each nonlinear subsystem equation and the correspondent plant configuration, defined by binary variables.

Figure 1 illustrates the primary circuit of the CIESOL facility and its controlled and manipulated variables (see [7] for detailed model and variable descriptions). The system goal is to provide the necessary thermal energy required for the secondary circuit, herein represented as the heater exchanger. As can be

noted, depending on the system configuration mode, the HTF can pass for different subsystem equipment, which alters the dynamic variables' evolution and hence the prediction of each temperature variable. Therefore, in order to account for operation mode changes of the CIESOL plant, the following HPNMPC prediction equation is proposed:

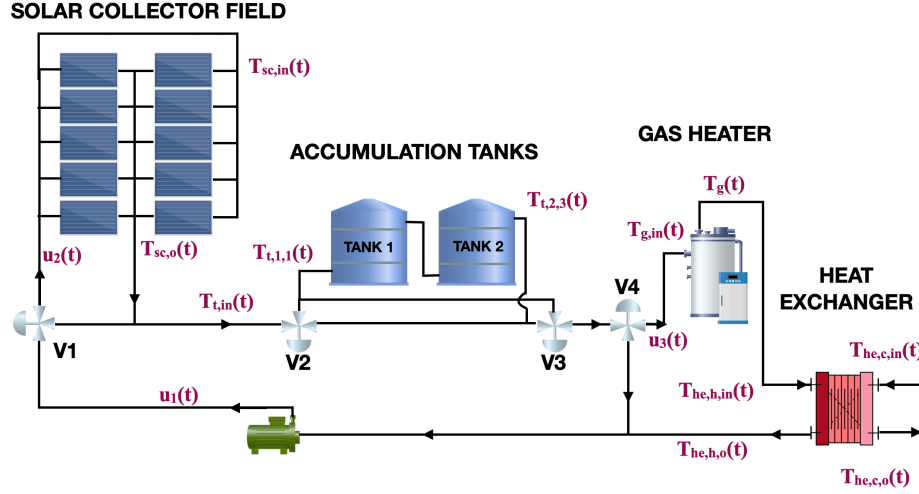


Fig. 1: CIESOL thermal solar plant facility [7]

$$\hat{Y} = F_{m_{k-1}} + G_M \cdot \Delta z \quad (1)$$

assuming that

$$G_M = [G_1, G_2, \dots, G_{n_m}]_{[N_p \cdot n_y \times N_c \cdot n_u \cdot n_m]},$$

$$\Delta z = [\Delta z_1, \Delta z_2, \dots, \Delta z_{n_m}]_{[N_c \cdot n_u \cdot n_m \times 1]}^T$$

in which the notation m_{k-1} represents the plant mode in the instant $k-1$, m is related with the number of operating modes, that is $m = 1, \dots, n_m$, N_c is the control horizon, n_y is the number of outputs and n_u is the number of inputs. Moreover, an auxiliary variable Δz_m is introduced, which relates the system manipulated variables and the operating mode as $\Delta z_m = \delta_m \cdot \Delta u$. In this expression, δ_m is the variable in charge of defining the operating mode, whereas Δu represents the system manipulated variables, that is $\Delta u = [\Delta u_1, \dots, \Delta u_{n_u}]$. The HPNMPC outputs and inputs are defined as:

$$\hat{Y} = [\hat{T}_{sc,o}, \hat{T}_{p1}, \hat{T}_{t,1,1}, \hat{T}_{t,1,2}, \hat{T}_{t,1,3}, \hat{T}_{t,2,1}, \hat{T}_{t,2,2}, \hat{T}_{t,2,3}, \hat{T}_g, \hat{T}_{he,h,o}, \hat{T}_{he,c,o}, \hat{T}_{p2}]^T$$

$$\Delta u = [\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3]^T$$

Advanced predictive control strategies applied for controlling solar thermal systems

The operating modes are defined as a combination of different process conditions. First, consider four auxiliary binary variables: δ_{T1} , δ_{T2} , δ_{GH} and δ_{mode} . These variables represent the conditions in which each subsystem can be activated/deactivated. To operate the tanks in the unload mode, $\delta_{T1} = 1$. On the other hand, to operate the tanks in load mode $\delta_{T2} = 1$. In addition, when both variables $\delta_{T1} = \delta_{T2} = 0$, the tanks are out of the plant configuration. Moreover, to activate the gas heater, $\delta_{GH} = 1$. Finally, δ_{mode} is the auxiliary variable that keeps the system in the operating mode for a certain time. Therefore, the CIESOL operation modes is translated in binary variables as defined in Table 1. For each operating mode change a designed operational condition can be defined. In the work of Pataro et al. (2022) [7], the CIESOL operation conditions are described and formulated as mixed-integer inequalities (see [2,11] for further information).

Table 1: Truth table for the auxiliary variables and operating modes. *The notation X represents the logical irrelevance of the variable to the binary mode output, which can be 1 or 0. The operator \wedge represents the logical operation “AND” and the notation $\widetilde{\delta}$ the logical operation “NOT”.

Binary mode	δ_{T1}	δ_{T2}	δ_{GH}	δ_{mode}	Output
δ_1	0	0	0	1	$= \widetilde{\delta_{T1}} \wedge \widetilde{\delta_{T2}} \wedge \widetilde{\delta_{GH}} \wedge \delta_{mode}$
δ_2	1	0	0	1	$= \delta_{T1} \wedge \widetilde{\delta_{T2}} \wedge \widetilde{\delta_{GH}} \wedge \delta_{mode}$
δ_3	0	1	0	1	$= \widetilde{\delta_{T1}} \wedge \delta_{T2} \wedge \widetilde{\delta_{GH}} \wedge \delta_{mode}$
δ_4	1	1	0	1	$= \delta_{T1} \wedge \delta_{T2} \wedge \widetilde{\delta_{GH}} \wedge \delta_{mode}$
δ_5	0	0	1	1	$= \widetilde{\delta_{T1}} \wedge \widetilde{\delta_{T2}} \wedge \delta_{GH} \wedge \delta_{mode}$
δ_6	1	0	1	1	$= \delta_{T1} \wedge \widetilde{\delta_{T2}} \wedge \delta_{GH} \wedge \delta_{mode}$
δ_7	0	1	1	1	$= \widetilde{\delta_{T1}} \wedge \delta_{T2} \wedge \delta_{GH} \wedge \delta_{mode}$
δ_8	1	1	1	1	$= \delta_{T1} \wedge \delta_{T2} \wedge \delta_{GH} \wedge \delta_{mode}$
$\delta_{m_{k-1}}$	X	X	X	0	$= \widetilde{\delta_{mode}}$

Therefore, based on systems modeling, output predictions and the formulation of the process constraints, the optimization problem of the HPNMPC is given as follows [7]:

Problem 1:

$$\begin{aligned}
& \min_{\Delta z(t), \delta_p(t), T_{ref}(t)} J_{HPNMPC}, \\
J_{HPNMPC} &= \sum_{i=1}^{i=N_p} \left| \widehat{T}_g(t+i|t) - T_{ref}(t+i|t) \right|_R^2 + \sum_{m=1}^{m=n_m} \sum_{j=0}^{j=N_c-1} |\Delta \mathbf{z}_m(t+j|t)|_{\mathbf{Q}_z}^2
\end{aligned} \tag{2}$$

subjected to, $\forall i = 1, \dots, N_p$ and $\forall j = 0, \dots, N_c - 1$

Advanced predictive control strategies applied for controlling solar thermal systems

$$\delta_p(t) \quad \forall p = \{m \in [1, \dots, n_m], T_1, T_2, GH_1, GH_2, GH, mode\} \quad (3a)$$

$$u(t) = \Delta u(t|t) + u(t-1) \quad (3b)$$

$$\Delta u_{i_{min}} \leq \Delta u_i(t+j|t) \leq \Delta u_{i_{max}}, \quad \forall i = 1, \dots, 3 \quad (3c)$$

$$u_{i_{min}} \leq u_i(t+j|t) \leq u_{i_{max}}, \quad \forall i = 1, \dots, 3 \quad (3d)$$

$$T_{sc,o_{min}} \leq \hat{T}_{sc,o}(t+i|t) \leq T_{sc,o_{max}} \quad (3e)$$

$$T_{ref_{min}} \leq T_{ref}(t+i|t) \leq T_{ref_{max}} \quad (3f)$$

$$(3g)$$

wherein \mathbf{Q}_z and R are the weighting factors for the inputs and outputs, respectively. Notice that \mathbf{Q}_z is a square weighting matrix of dimension $[n_u \cdot n_m \times n_u \cdot n_m]$, for n_m the number of operational modes.

3 A stabilizing IHMPC with FF compensation

Consider a parametrized state-space model with disturbance variables [10,6]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k+1) \\ \mathbf{x}^s(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ny} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k) \\ \mathbf{x}^s(k) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{B}^i \\ \mathbf{B}^s \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \Delta \mathbf{u}(k) + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{D}^i \\ \mathbf{D}^s \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}} \Delta \mathbf{d}(k), \quad (4)$$

$$\mathbf{y}(k) = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ny} & \mathbf{\Psi} \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k) \\ \mathbf{x}^s(k) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

wherein the model states \mathbf{x}^s and \mathbf{x}^i are, respectively, the artificial integrator states, achieved by the incremental formulation of the model inputs, and the stable states, originating from the stable poles of the system. Matrices \mathbf{F} and $\mathbf{\Psi}$ are associated with the system free-response and sample time, and the system outputs, respectively. The coefficient matrices \mathbf{B}^i and \mathbf{B}^s are originated from the partial fractions expansion of the system transfer function for the result of the incremental manipulated variables $\Delta \mathbf{u}$ and \mathbf{D}^i and \mathbf{D}^s for the result of measured disturbances $\Delta \mathbf{d}$. For further detailed explanation about the model representation, see [6].

Considering the presented model described in Eqs. 4 and 5, and the formulation of IHMPC with slack variables [10], the infinite horizon predictive control is formulated as follows:

Problem 2:

$$\min_{\Delta \mathbf{u}_k, \delta_{y,k}} J_{k,2},$$

in which:

$$J_{k,2} = \sum_{j=1}^{\infty} \|\mathbf{y}(k+j|k) - \mathbf{y}_{sp} - \delta_{y,k}\|_{\mathbf{Q}_y}^2 + \sum_{j=0}^{m-1} \|\Delta \mathbf{u}(k+j|k)\|_{\mathbf{R}}^2 + \|\delta_{y,k}\|_{\mathbf{S}_y}^2 \quad (6)$$

subject to:

$$U = \begin{cases} \Delta \mathbf{u}_{\min} \leq \Delta \mathbf{u}(k+j|k) \leq \Delta \mathbf{u}_{\max}, \\ \Delta \mathbf{u}(k+j|k) = 0, j > m, \\ \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(k+j|k) \leq \mathbf{u}_{\max}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\mathbf{x}^i(k|k) + \mathbf{B}_m^i \Delta \mathbf{u}_k - \mathbf{y}_{sp} - \boldsymbol{\delta}_{y,k} = 0 \quad (8)$$

wherein

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{u}_k &= [\Delta \mathbf{u}(k|k)^\top \ \Delta \mathbf{u}(k+1|k)^\top \ \cdots \ \Delta \mathbf{u}(k+m-1|k)^\top]^\top, \\ \Delta \mathbf{d}_k &= [\Delta \mathbf{d}(k|k)^\top \ \Delta \mathbf{d}(k+1|k)^\top \ \cdots \ \Delta \mathbf{d}(k+m-1|k)^\top]^\top, \end{aligned}$$

\mathbf{y}_{sp} is the output reference vector and m is the control horizon. Notice that the slack variable $\boldsymbol{\delta}_{y,k}$ is introduced to smooth the terminal constraint in Eq. 8, increasing the domain of attraction and making the solution of the optimization problem always feasible. Matrices \mathbf{Q}_y , \mathbf{R} , and \mathbf{S}_y are the weighting matrices used as controller tuning parameters, in which \mathbf{S}_y is chosen with high values to force the use of slack variables only when necessary.

The guaranteed nominal stability is achieved by following the recursive solution and the asymptotically decreasing of the cost function concepts [10] and is comprehensively described in [6]. Based on this formulation, it is exhibited that the IHMPC with FF strategy can improve the control performance by accurately rejecting the disturbances and keeping the nominal stability features, leading to the convergence of the closed-loop system both for the reference tracking and measured disturbances scenarios. This approach brings compelling results concerning solar collector field control, which is mainly characterized for a multi-disturbed system.

4 Achieved results

Following the developed control approaches and using the CIESOL facility the exemplify the implementation of the HPNMPC and the IHMPC+FF, the achieved results of both predictive controllers are described as follows.

4.1 HPNMPC main results

The HPNMPC is implemented in a simulated ambient, considering a clear day (Scenario 1) and a cloudy day (Scenario 2) case. In addition, the proposed strategy is compared to the classical PNMPC strategy, wherein an external process structure is used to define the operating mode based on the same operational conditions formulated in the HPNMPC algorithm. Both the classic PNMPC and the HPNMPC control tuning and the process conditions are detailed in [7].

The results depicted in Figs. 2 and 3 demonstrate that the HPNMPC can eliminate the decision-maker from its function and provide the proper operating

Advanced predictive control strategies applied for controlling solar thermal systems

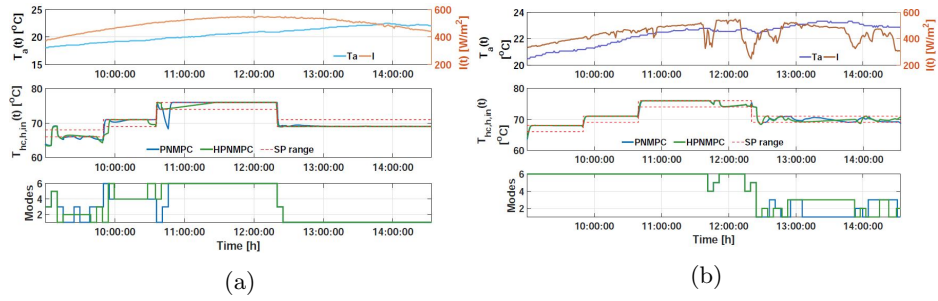


Fig. 2: (a) Scenario 1 disturbances and outputs, (b) Scenario 2 disturbances and outputs for the HPNMPC and classical PNMPC.

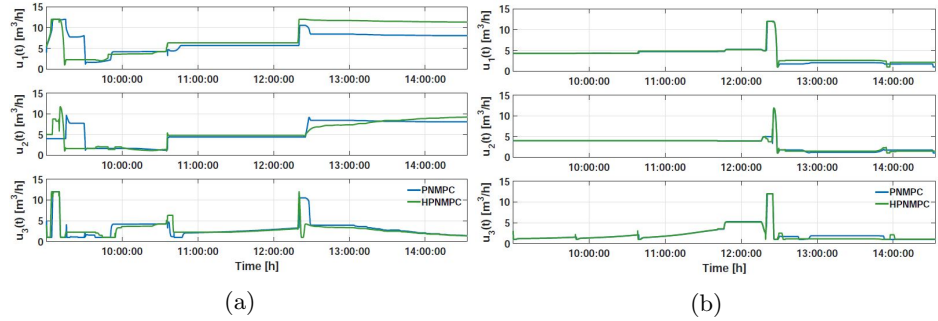


Fig. 3: (a) Scenario 1 inputs, (b) Scenario 2 inputs for the HPNMPC and classical PNMPC.

modes for the system configuration. Furthermore, since the HPNMPC includes the calculation of the plant modes along the prediction horizon, this approach is in advance compared to a controller with an external framework. This slight difference can change the entire plant operation throughout the day since the system combinations can significantly alter the temperature profiles. Nevertheless, comparing both strategy performances, the HPNMPC has a better control performance regarding the reference tracking error [7]. The HPNMPC presents an exciting approach to minimize computational costs regarding computational performance. Since it converts logical statements into mixed-logical inequalities, the controller can use simpler solvers that are already well established and provide a short processing time.

4.2 IHMPC+FF main results

The IHMPC+FF is simulated for controlling the solar collector field system, aiming to demonstrate the proposed stabilizing controller. The controller's formulation is designed accordingly to the optimization problem proposed in **Problem 2**. Hence, aiming for performance comparison, the IHMPC+FF is tested with

Advanced predictive control strategies applied for controlling solar thermal systems

the IHMPC without disturbance compensations. Figure 4 depicts the IHMPC and the IHMPC+FF outputs with the respective input movements.

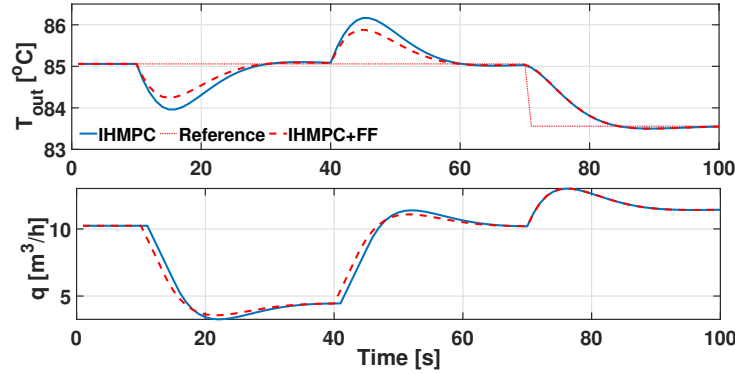


Fig. 4: Solar collector field outlet temperature ($T_{out}(t)$) and input flow ($q(t)$) for both IHMPC+FF and IHMPC controllers.

Furthermore, Figs. 5a and 5b depict the slacks variables and the cost function values for both IHMPC+FF and IHMPC. Notice that the control tuning parameter S_y guarantees that the slacks are used only when necessary, being zeroed at a steady-state regime. In addition, the cost function decreases asymptotically, respecting the closed-loop stability properties.

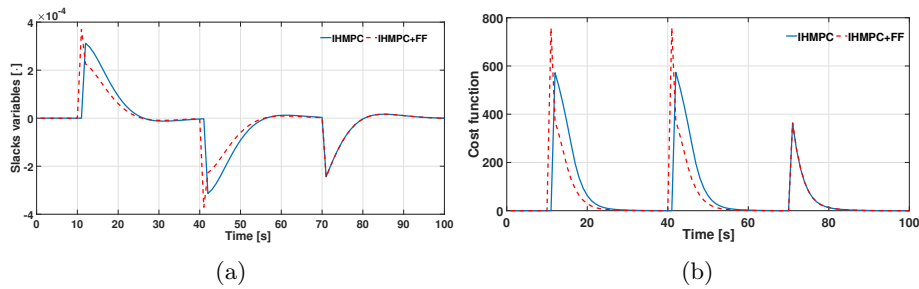


Fig. 5: (a) Slack variables of the IHMPC+FF and IHMPC controllers. and (b) cost function values of the IHMPC+FF and IHMPC controllers.

5 Final Considerations

This work has presented the achieved results on developing advanced predictive control strategies for controlling solar thermal systems. The primary outcomes

are investigated regarding the HPNMPC and IHMPC+FF for controlling the CIESOL facility and its subsystems in a validated simulated environment.

First, it is noteworthy that both strategies have a great potential to be implemented in the real scenario since their formulation demonstrated a good compromise between computational effort and control performance. Regarding the HPNMPC, the hybrid models and process operation conditions are formulated in a single-layer optimization problem, which gives, as a result, the optimal control movements and can account for future operating modes prediction over the control horizon. This assumption offers attractive opportunities for developing optimization layers considering maximizing the overall solar thermal energy generation.

In what concerns the IHMPC+FF, the control formulation presents a nominal closed-loop stability guarantee for processes with stable poles and measured disturbance. In addition, comparing the IHMPC+FF with the IHMPC, the proposed strategy with implicit FF action can improve the control performance by rejecting the process disturbances at the same time that hold the closed-loop stability properties.

Future works are intended in order to enhance these results. Both strategies must be evaluated under disturbance estimations scenarios, which can help improve the output prediction, mainly considering the solar irradiance and ambient temperature variables. In addition, real implementation motivates the ongoing investigation for evaluating the performance of the proposed strategies considering diverse uncertainties interference.

References

1. de Araújo Elias, T., Mendes, P.R.C., Normey-Rico, J.E.: Mixed logical dynamical nonlinear model predictive controller for large-scale solar fields. *Asian Journal of Control* **21**(4), 1881–1891 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/asjc.1967>
2. Bemporad, A., Morari, M.: Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints. *Automatica* **35**(3), 407–427 (1999). [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(98\)00178-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0005-1098(98)00178-2)
3. Bordons, C., Garcia-Torres, F., Ridao Carlini, M.Á.: Model predictive control of interconnected microgrids and electric vehicles. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* **17**(3), 239–253 (2020). <https://doi.org/10.4995/riai.2020.13304>
4. Buchmayr, A., Verhofstadt, E., Van Ootegem, L., Sanjuan Delmás, D., Thomassen, G., Dewulf, J.: The path to sustainable energy supply systems: Proposal of an integrative sustainability assessment framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **138**, 110666 (2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110666>
5. Camacho, E.F., Berenguel, M., Rubio, F.R.: *Advanced Control of Solar Plants*. Springer, London, England (1997)
6. Pataro, I.M.L., Gil, J.D., Americano da Costa, M.V., Guzmán, J.L., Berenguel, M.: Development of a predictive controller with advance compensation and stability guarantee: preliminary results (in Spanish), chap. 1,

Advanced predictive control strategies applied for controlling solar thermal systems

- pp. 294–300. XLII Conference on Automatic: minutes book (09 2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498043.294>
7. Pataro, I.M.L., Gil, J.D., Americano da Costa, M.V., Guzmán, J.L., Berenguel, M.: A nonlinear control approach for hybrid solar thermal plants based on operational conditions. *Renewable Energy* **183**, 114–129 (2022). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.057>
 8. Petela, K., Szlek, A.: Control algorithm for an advanced hybrid heating and cooling node – analysis of its potential. *Energy Conversion and Management* **201**, 112087 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112087>
 9. Plucenio, A., Pagano, D., Bruciapaglia, A., Normey-Rico, J.E.: A practical approach to predictive control for nonlinear processes. *IFAC Proceedings Volumes* **40**(12), 210–215 (2007). <https://doi.org/https://doi.org/10.3182/20070822-3-ZA-2920.00035>, 7th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems
 10. Rodrigues, M.A., Odloak, D.: MPC for stable linear systems with model uncertainty. *Automatica* **39**(4), 569–583 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(02\)00176-0](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(02)00176-0)
 11. Williams, H.P.: *Model Building in Mathematical Programming*. Wiley, New York, U.S. (2013)

Model-based methodology for the early warn detection of cucumber downy mildew in greenhouses

Liu Ran

Universidad de Almería, Almería, Spain

rl509@inlumine.ual.es

Resumen:

Durante el año pasado, implementamos y validamos principalmente un nuevo enfoque que combina un modelo climático de invernadero mecanicista y un modelo de enfermedad para el pronóstico de la aparición de enfermedades en los invernaderos. El método se evaluó en NPADB (Base Nacional de Demostración de Agricultura de Precisión), Beijing, China, utilizando datos recopilados desde el trasplante hasta la infección primaria ocurrida en el invernadero, en la temporada de primavera de 2021. Primero, el modelo dinámico se usa para predecir el interior del invernadero. clima 72 horas por delante. Luego, esta predicción se usa como entrada al modelo de enfermedad para detectar la ocurrencia de la enfermedad por adelantado. Las predicciones para el mildiú vellosa del invernadero se compararon utilizando datos medidos en tiempo real durante dos meses. Después de varios informes de falsos positivos, un informe positivo por ambos métodos se ajustó a la primera observación en el invernadero el 24 de abril de 2021. Por lo tanto, la principal contribución de este trabajo es la alerta temprana de mildiú vellosa del pepino a través de modelos de clima y enfermedad acoplados, donde solo transitorio Se requieren entradas del pronóstico del tiempo.

Palabra clave: modelo climático de invernadero; modelo mecanicista; mildiú vellosa; modelo de enfermedad; pronóstico del tiempo

1 Introducción

El aumento continuo de la población mundial es paralelo a un aumento en el área de utilización de tierras baldías para la agricultura. La agricultura protegida es de gran importancia debido a su alta eficiencia, controlable y las ventajas de la utilización de la tierra desnuda. Según las últimas estadísticas, el área de invernaderos en todo el mundo se estimó en 3,64 millones de hectáreas (Guo et al., 2021). El aire cálido y el suministro suficiente de agua son obviamente ventajas del cultivo protegido, pero también es ideal para plagas y enfermedades fúngicas (Cañadas et al., 2017). Por ejemplo, el mildiú vellosa (*Peronospora sparsa*), la botrítica (*Botrytis cinerea*) y el mildiú polvoroso (*Sphaerotheca pannosa*), que son tres enfermedades fúngicas comunes de las plantas en invernaderos, siempre provocan daños en el follaje y frutos, trayendo grandes pérdidas económicas (Mashonjowa et al. al., 2013).

Las epidemias fúngicas en los invernaderos comienzan con la introducción de material vegetal infectado o por conidias sopladas desde el exterior (Linde y Shishkoff, 2003). Las microconidias también pueden sobrevivir en el suelo durante un período prolongado o esparcirse en las manos y

la ropa de los trabajadores del invernadero (Linde y Shishkoff, 2003; Perez-Nadales et al., 2014). Incluso en un invernadero limpio, la aparición de esporas es inevitable. Sin una intervención artificial, la enfermedad se propagará rápidamente desde la infección primaria en una sola hoja a todo el invernadero.

Bajo la premisa de minimizar al máximo los patógenos, lo óptimo para prevenir la aparición de la enfermedad es evitar colocar a su huésped en un ambiente adecuado para la inoculación. Esta idea fue ampliamente utilizada en el manejo de enfermedades fúngicas, ya que tiene la característica de una rápida propagación y un brote extremo cuando se encuentra en condiciones de temperatura media y alta humedad (Ojiambo et al., 2015; Yang et al., 2007). Una vez completada la infección, el período de incubación, que es el intervalo entre la inoculación y la aparición de los síntomas de la enfermedad, está determinado por la temperatura del aire circundante (Agrios, 2005; Yang et al., 2007). Tenga en cuenta que el control de la temperatura ambiental no puede evitar la aparición de síntomas después de la infección (Zhao et al., 2011). En consecuencia, la mayoría de los modelos de riesgo de enfermedad anteriores prestan atención a la predicción del período de infección.

La mayoría de los estudios previos consideran que la LWD (Duración de la humedad de la hoja) suficiente en horas y el umbral de temperatura ideal (temperatura media o alta) son condiciones requeridas para varias infecciones comunes de conidios fúngicos (Zhao et al., 2011; Mashonjowa et al., 2013; Wang et al., 2019). En general, LWD puede resultar del rocío, la niebla, la lluvia y el riego por aspersión (Hornero et al., 2017). En el invernadero, LWD proviene principalmente del rocío en la superficie de las hojas y del rocío que gotea del techo. Desde este punto de vista, uno de los principales problemas meteorológicos en los invernaderos es la mojadura del cultivo provocada por la interacción de la alta humedad y la baja temperatura.

El monitoreo y la simulación de LWD son dos métodos comúnmente utilizados en la investigación actual (Hornero et al., 2017; Mashonjowa et al., 2013). La señal del sensor LWD cambia según la resistencia eléctrica en la superficie de la hoja, que puede verse perturbada por el entorno circundante. Los modelos de estimación de LWD se pueden establecer mediante varios métodos, como modelos de umbral de humedad relativa (Zito et al., 2020; Zhao et al., 2011), modelos de depresión del punto de rocío (DPD) (Sentelhas et al., 2008; Mashonjowa et al., 2013) y modelos de aprendizaje automático (Wang et al., 2019). Tanto las formas de monitoreo como las de estimación se transmiten a sensores que envían señales de corriente para identificar si la hoja está mojada o no y tienen capacidades limitadas para enviar mensajes de advertencia para futuros LWD. La infección puede haber ocurrido cuando apareció LWD por monitoreo o simulación.

Por esas razones, los modelos de alerta de enfermedades basados en datos meteorológicos se desarrollaron y aplicaron ampliamente en las últimas décadas, incluida la roya lineal del trigo (Jarroudi, et al., 2017), el añublo del arroz (Wang et al., 2021), el tizón del tomate y la patata (Chelal et al., 2015; Andrade-piedra et al., 2005), etc. Algunos de estos métodos se han aplicado bien en condiciones de campo abierto mediante el uso de pronósticos meteorológicos (Kim et al., 2020). Sin embargo, en los invernaderos, la predicción carece del vínculo entre el pronóstico del tiempo y el modelo de infección, que viene dado por el clima interior del invernadero y, por lo tanto, se requiere un modelo climático de invernadero. La mayoría de los modelos climáticos de invernadero actuales requieren muchas entradas y parámetros, como la temperatura de la pared en tiempo real o el flujo de calor (Sánchez-Molina et al., 2017), lo que hace que sea imposible predecir la futura etapa de infección utilizando solo el pronóstico del tiempo. Con base en modelos previos de enfermedades fúngicas que correlacionan el riesgo de infección o el desarrollo de enfermedades con

Model-based methodology for the early warn detection of cucumber downy mildew in greenhouses

el microclima del invernadero y la práctica de los agricultores, Katsoulas et al. (2021) introdujeron un sistema de soporte de decisiones basado en la web (DSS) que estima el riesgo de desarrollo de la enfermedad *Botrytis* en un invernadero. El DSS validó los resultados de la simulación que hace uso del pronóstico del clima exterior para predecir las condiciones del microclima del invernadero durante un conjunto de días, pero no fue validado en relación con la predicción de la incidencia de enfermedades (Katsoulas et al., 2021).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es completar la validación de la precisión del pronóstico del tiempo al aire libre, la predicción del microclima del invernadero y la alerta temprana de la fecha de la infección primaria. En un estudio anterior, se propuso un modelo de invernadero unidimensional, rápido y práctico, que incluye un método de estimación de temperatura de pared novedoso y fácil de usar basado en el balance de energía (Liu et al., 2021). Con la ayuda del grupo incorporado de ecuaciones de conservación, las temperaturas límite del invernadero se pueden simular en lugar de tener que medir la temperatura límite en cada paso de tiempo. Por lo tanto, la cantidad de entradas del modelo se reduce y el modelo puede estimar el clima futuro del invernadero utilizando solo las variables climáticas exteriores actuales o pronosticadas. En este trabajo, tomando como ejemplo el mildiu vellosa del pepino, ese modelo climático de invernadero se combina con un modelo de enfermedad, de tal manera que el clima interior futuro puede predecirse mediante el pronóstico del tiempo para proporcionar los parámetros necesarios (por ejemplo, LWD, temperatura) para el período de infección e incubación. Como resultado, las ocurrencias de enfermedades se pueden detectar con 72 horas de anticipación en comparación con el caso en el que se usó el modelo de enfermedad solo. Se presentan resultados experimentales para un invernadero ubicado en Beijing (China), donde se comparó el enfoque propuesto con el uso de sensores LWD. Los resultados muestran que la metodología propuesta proporciona predicciones prometedoras y puede ser utilizada como herramienta para la detección temprana de enfermedades en invernaderos.

2 Avances

2.1 Trabajo de campo

El invernadero experimental es un invernadero solar chino típico. Se instaló una pequeña estación meteorológica integrada en el centro del invernadero. Los datos del clima exterior fueron monitoreados por una estación meteorológica ubicada frente al invernadero.



Fig. 1 Invernadero experimental y estación meteorológica exterior; Sensor de humedad de la hoja; Estación meteorológica interior.

2.2 Modelo de mildiú veloso

El modelo de enfermedad utilizado en este trabajo incluye dos partes: periodos de infección y de incubación. Se activó a las dos semanas después del trasplante. En este modelo, para los periodos de infección, la predicción es positiva cuando el producto de la duración de la humedad de la hoja (LWD, hora) y la temperatura horaria correspondiente cuando las hojas están mojadas (TLWD, °C), es superior a 40 horas*°C (Ecuación 1), con un rango de TLWD [5,30 °C] y condiciones de LWD superiores a 2 horas (Zhao et al., 2011). El LWD proviene del monitoreo de una hoja artificial con resistencia eléctrica (Fig. 1 (b)), o las horas continuas en que la humedad relativa del aire es superior a su umbral. Una vez realizada la infección, comienza el período de incubación. generalmente necesita un par de días cuando finaliza el período de incubación. Es una integración de la tasa de contribución por hora (y , Ecuación 2), que se calcula mediante una ecuación de temperatura promedio por hora (T_h , °C). La fecha límite del período de incubación es la hora cuando la integración de $y \geq 1$, cuando las hojas son pred icted para ser sintomático. Por ejemplo, si T_h es un valor constante como 20 °C, la tasa de contribución y es 0.015 en cada hora. El y toma 67 horas para progresar a 1.

$$LWD \times TLWD \geq 40h^{\circ}C \quad (LWD \geq 2h, 5^{\circ}C \leq TLWD \leq 30^{\circ}C) \quad (1)$$

$$y = \frac{0.0165}{1 + 10389.2 \times \exp(-0.5743 \times T_h)} \quad (2)$$

El modelo de la enfermedad se usó con dos enfoques diferentes (Fig. 2): el enfoque tradicional (Fig. 2a) consistía en estimar el riesgo de infección utilizando como datos de entrada los datos medidos en tiempo real de los sensores interiores (por ejemplo, sensor artificial de humedad de hojas, humedad y temperatura). sensores) (Zhao et al., 2011; Wang et al., 2019). Una de las desventajas de este método es que la falla del sensor interrumpe el informe. Otra desventaja es que el monitoreo en tiempo real no puede evitar la etapa de infección cuando la hoja se detecta humedad. En este método, LWD y TLWD se midieron desde dos semanas después del trasplante para evaluar el riesgo de infección actual.

El segundo enfoque fue seguir la metodología propuesta en este trabajo, donde el LWD y el TLWD se simulan utilizando los datos climáticos del interior del invernadero proporcionados por el modelo de invernadero que considera los datos del pronóstico del tiempo para los próximos tres días (Fig. 2b). (por ejemplo, la temperatura y la humedad del aire) se pronosticó con tres días de anticipación. El LWD se estimó en función de un umbral fijo de humedad relativa prevista (Li, 2010). La calibración es necesaria para mejorar el rendimiento del modelo considerando las diferentes condiciones causadas por el clima local, los cultivos, estructuras e instalaciones de invernadero (Wang et al, 2019). En este estudio, LWD se estimó mediante dos umbrales. Uno de los umbrales se optimizó mediante el método del árbol de aprendizaje de decisiones (DLT) (Loh, 2008), utilizando datos de marzo a abril 2021. Además, otro umbral de humedad relativa del 90% utilizado para el invernadero chino fue documentado por Zhao et al (2011), por lo que estos dos umbrales se evaluarán en este estudio.

Model-based methodology for the early warn detection of cucumber downy mildew in greenhouses

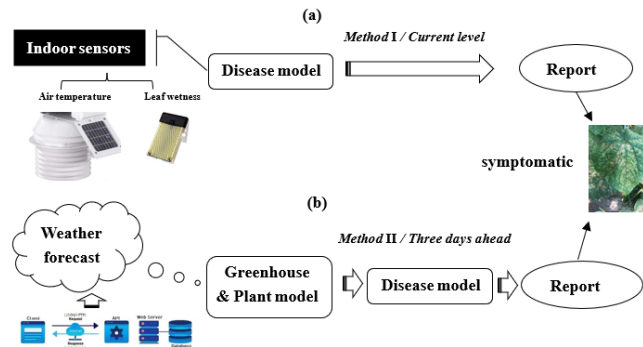


Fig. 2. Dos métodos para dar una alerta temprana del tiempo de ocurrencia del mildiú veloso del pepino.

2.3 Metodología de estimación de enfermedades

En el informe de 2020, presentamos un modelo de predicción de la temperatura y la humedad, que puede combinar el pronóstico del tiempo para predecir la temperatura y la humedad futuras en el invernadero. Este año combinamos el modelo climático de invernadero y el modelo de enfermedad (Fig. 3). La ubicación es la latitud y la longitud del invernadero, y la hora local del pronóstico del tiempo se actualiza cada hora. Los resultados del modelo fueron la fecha y hora de la infección y la fecha límite para el período de incubación. El criterio de evaluación fue la comparación entre la fecha límite prevista del período de incubación y la aparición del síntoma de infección primaria real. Tenga en cuenta que los cálculos con este enfoque basado en modelos se repiten con un período de muestreo de una hora utilizando un enfoque de horizonte descendente. Significa que cada hora se obtienen predicciones de infección e incubación para las próximas 72 horas. Luego, a la hora siguiente se vuelve a obtener el pronóstico del tiempo y se repiten las predicciones de infección e incubación para tener en cuenta las incertidumbres del pronóstico del tiempo y los errores de modelado.

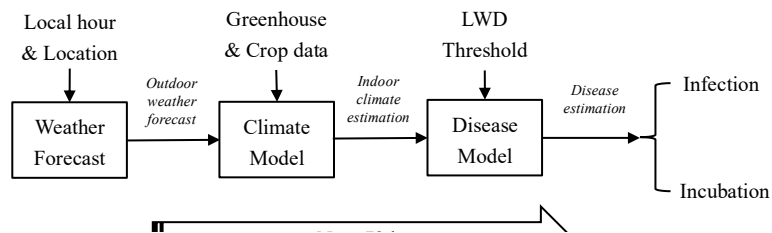


Fig. 3. Metodología de estimación de enfermedades.

2.4 Validación del modelo

El LWD se detectó a lo largo de abril (Fig. 4). Los números de fechas repetidos en el eje x de la figura indican que hubo múltiples LWD discontinuos en el mismo día. Los períodos marcados en rojo eran condiciones ideales de infección. Las dos primeras condiciones ideales de infección se

Model-based methodology for the early warn detection of cucumber downy mildew in greenhouses

identificaron el 15 y 16 de abril. Sin embargo, se demostró que eran predicciones falsas positivas, porque no se observaron síntomas después de la fecha límite de los períodos de incubación previstos. El tercer informe positivo comenzó con una condición de infección ideal el 20 de abril a las 20:15, de las cuales, el período de inoculación finalizó el 24 de abril a las 11:15 durante la tasa de contribución (y, sin unidad, Ecuación 2) llegó a 1. Esto cumplió con el primera observación manual del síntoma de mildiú vellosa en el invernadero el 24 de abril. Después de dos informes falsos positivos, el tercer informe positivo fue verdadero, lo que demuestra que el modelo de la enfermedad se desempeñó de manera efectiva al ingresar la LWD medida en tiempo real y la temperatura del aire.

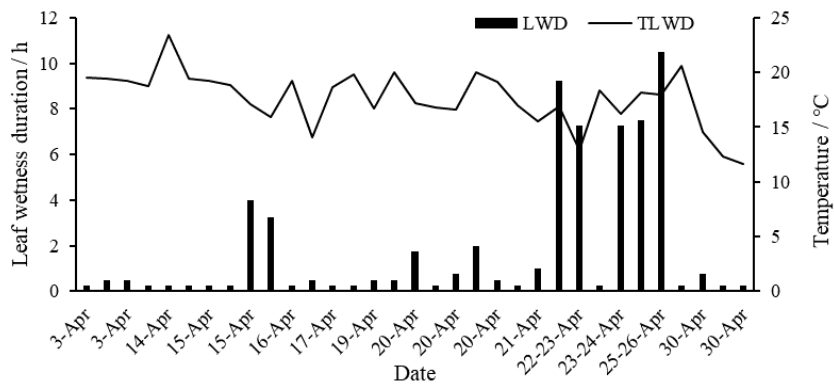
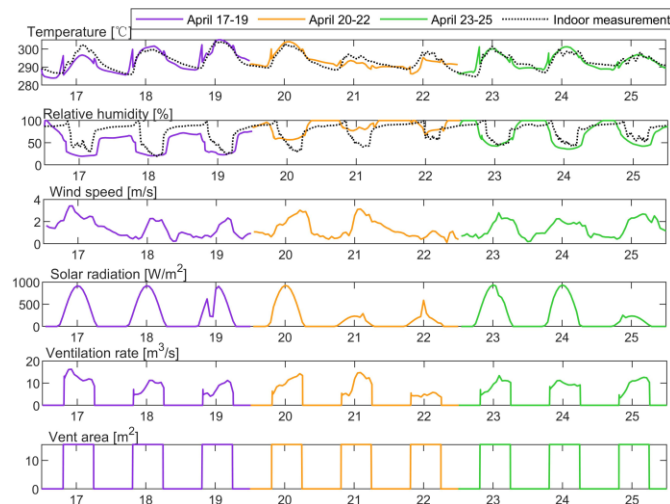


Fig. 4. Mediciones de LWD y TLWD en el invernadero del 18 de marzo al 30 de abril de 2021. Los períodos marcados en rojo fueron condiciones ideales de infección.

La Fig. 5 muestra la temperatura y la humedad del invernadero pronosticadas utilizadas para evaluar el riesgo de infección en este trabajo (consulte la Fig. 4 para ver la relación con las fechas) y que son las entradas para el modelo de enfermedad. La precisión ideal asegura la viabilidad de la evaluación de la enfermedad. La humedad relativa interior pronosticada se utilizó para estimar la LWD en función de un modelo de umbral de humedad relativa. Uno de los umbrales de HR adoptados para estimar LWD en este estudio fue del 90 % (Zhao et al., 2011) como se comentó anteriormente, y el otro fue del 92,85 %, que se calibró mediante el método DLT utilizando datos de marzo y abril de 2021.



Model-based methodology for the early warn detection of cucumber downy mildew in greenhouses

Fig. 5. Simulación de la temperatura y humedad del invernadero ingresando el pronóstico del tiempo en los próximos 3 días del 17 al 25 de abril de 2021.

La Fig. 6 muestra la comparación entre las predicciones del pronóstico del tiempo (enfoque propuesto, Fig. 2b) y las mediciones de LWD y TLWD (enfoque tradicional, Fig. 2a) durante el 17 al 30 de abril. Tenga en cuenta que varios LWD discontinuos aparecieron en un día y las muestras se organizaron en el eje x según el orden de aparición. La etiqueta día-día-Abr representa humectación de hojas cruzadas 00:00. Las medidas a menudo se distribuyeron discretamente en un período de humedad de la hoja previsto. La marca roja (a) en la Fig. 6 contiene la LWD prevista de 11,5 horas durante las 19:18-06:50 del 20 al 21 de abril (90 % TR), la LWD prevista de 11 horas durante las 19:35-06:38 del 20-21 de abril (92,85% TR), y cuatro periodos discontinuos por medidas (20:15-22:15, 22:30-23:00 el 20 de abril y 01:15-01:30, 05:00-06:00 del 21 de abril). Su tiempo de inicio y total no se ajustan exactamente pero son muy similares. La marca roja (b) en la Fig. 6 muestra dos predicciones y una medición: 7,3 h, 6,4 h y 7,5 h, de las cuales, el inicio fue respectivamente a las 23:04, 23:44 y 23:30 del 24 de abril. En general, Las predicciones LWD y TLWD muestran resultados prometedores según el pronóstico del tiempo para los próximos tres días.

Usando el pronóstico del tiempo, el primer informe positivo para la infección fue en la mañana del 20 de abril (Fig. 6 (90% TR)), y la fecha límite prevista de incubación fue a las 18:00 el 23 de abril. Fue un día antes que el observación. Al usar 92,85% TR, el rendimiento fue mejor. El primer informe positivo fue en la noche del 20 de abril, y la fecha límite prevista de incubación fue a las 11:00 del 24 de abril, que se ajusta a la primera hora de observación y está muy cerca de la predicción utilizando datos medidos en tiempo real (11:00). 15, 24 de abril). Los resultados muestran que la predicción al ingresar datos de pronóstico del tiempo en el modelo de invernadero y al usar 92.85% TR tiene una predicción prometedora para la infección primaria del mildiú vellosa del pepino.

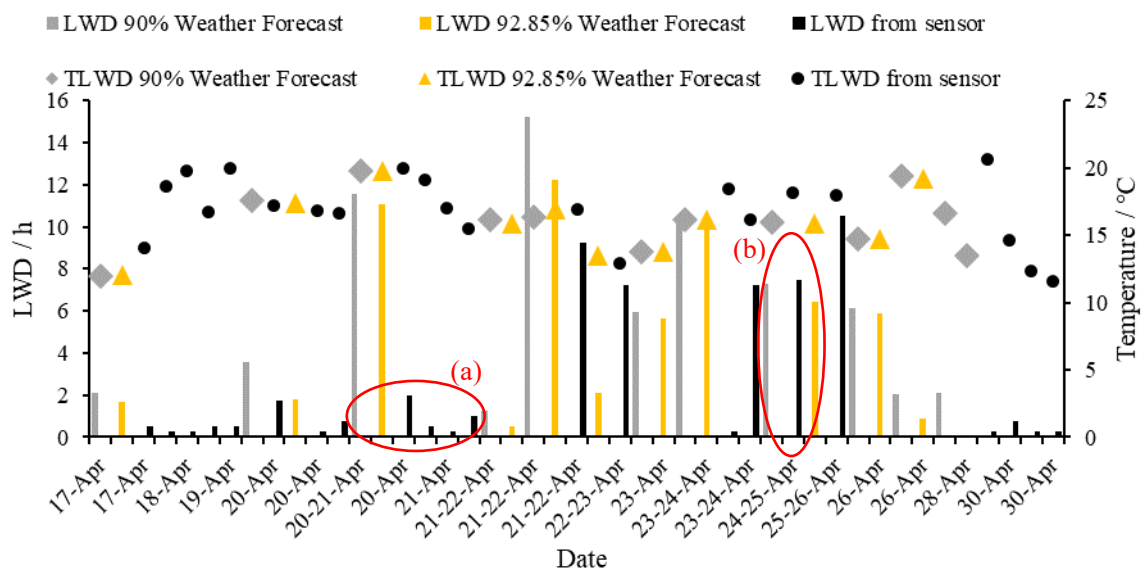


Fig. 6. Mediciones y predicciones de LWD y TLWD en el invernadero durante el 17-30 de abril de

2021.

3 Conclusiones

Este año, propusimos una nueva metodología para advertir con anticipación sobre el mildiú vellosa del pepino. En especial, la predicción de los datos del clima interior utilizando los datos del pronóstico del tiempo para los próximos tres días se utilizan como datos de entrada para el modelo de alerta temprana con el fin de realizar las estimaciones de ocurrencia de enfermedades. A diferencia de los estudios de modelos de enfermedades de plantas tradicionales, aunque este estudio evaluó el método en una temporada de producción corta, el modelo dio una advertencia temprana a los administradores de invernaderos. Un período de dos o tres días es suficiente para tomar decisiones con el fin de enfrentar las enfermedades y reducir la posibilidad de brote de enfermedades. Por ejemplo, la metodología propuesta se puede combinar con un enfoque de control jerárquico, donde los algoritmos de control climático pueden modificar el clima interior automáticamente para reducir el riesgo de aparición de enfermedades.

Referencias

Andrade-piedra, J.L., Hijmans, R.J., Forbes, G.A., 2005. Simulation of Potato Late Blight in the Andes. I: Modification and Parameterization of the LATEBLIGHT Model. *Phytopathology*, 95 (10), 1191-1199. <https://doi.org/10.1094/PHTO-95-1191>.

Agrios, G.N., 2005. *Plant Pathology*, fifth ed. Elsevier Academic Press, USA. P. 89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047378-9.50008-7>.

Cañadas, J., Sánchez-Molina, J.A., Rodríguez, F., María del Águila, I., 2017. Improving automatic climate control with decision support techniques to minimize disease effects in greenhouse tomatoes. *Information Processing in Agriculture*. 4 (1), 50-63. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.12.002>.

Cohen. Y., 1977. The combined effects of temperature, leaf wetness, and inoculum concentration on infection of cucumbers with *Pseudoperonospora cubensis*. *Can. J. Bot.* 55, 1478-1487. <https://doi.org/10.1139/b77-174>.

Chelal, J., Al Masri, A., Hau, B., 2015. Modelling the interaction between early blight epidemics and host dynamics of tomato. *Tropical Plant Pathology*. 40, 77-87. <https://doi.org/10.1007/s40858-015-0021-0>.

El Jarroudi, M., Kouadio, L., Bock, C.H., El Jarroudi, M., Junk, J., Pasquali, M., Maraite, H., Delfosse, P., 2017. A threshold-based weather model for predicting stripe rust infection in winter wheat. *Plant Disease*. 101 (5), 693-703. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-16-1766-RE>.

Guo, Y., Zhao, H., Zhang, S., Wang, Y., Chow, D., 2021. Modeling and optimization of environment in agricultural greenhouses for improving cleaner and sustainable crop production. *Journal of Cleaner Production*. 285, 124843. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124843>.

He, F., Ma, C., 2010. Modeling greenhouse air humidity by means of artificial neural network and principal component analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 71, S19-S23.

Model-based methodology for the early warn detection of cucumber downy mildew in greenhouses

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.07.011>.

Hornero, G., Gaitán-Pitre, J.E., Serrano-Finetti, E., Casas, O., Pallas-Areny, R., 2017. A novel low-cost smart leaf wetness sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*. 143, 286-292. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.001>.

Jung, D.-H., Kim, H.S., Jhin, C., Kim, H.J., Park, S.H., 2020. Time-serial analysis of deep neural network models for prediction of climatic conditions inside a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*. 173, 105402. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105402>.

Katsoulas, N., Antoniadis, D., Nikitas, A., 2021. A web-based system for fungus disease risk assessment in greenhouses: System development. *Computers and Electronics in Agriculture*. 188, 106326. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106326>.

Kim, H-S., Do, K.S., Park, J.H., Kang, W.S., Lee, Y.H., Park, E.W., 2020. Application of numerical weather prediction data to estimate infection risk of bacterial grain rot of rice in Korea. *The Plant Pathology Journal*. 36 (1), 54-66. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.11.2019.0281>.

Linde, M., Shishkoff, N., 2003. DISEASE | Powdery Mildew, Editor(s): Andrew V. Roberts. *Encyclopedia of Rose Science*, Elsevier. 158-165. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227620-5/00068-9>.

Liu, R., Li, M., Guzmán, J.L., Rodríguez, F., 2021. A fast and practical one-dimensional transient model for greenhouse temperature and humidity. *Computers and Electronics in Agriculture*. 186, 106186. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106186>.

Li, M., Zhao, C., Qiao, S., Qian, J., Yang, X., 2010. Estimation model of leaf wetness duration based on canopy relative humidity for cucumbers in solar greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 26 (9), 286-291. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2010.09.047>.

Loh, W.-Y., 2008. Classification and Regression Tree Methods. In *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*, Ruggeri, Kenett and Faltin (eds.). 315–323, Wiley.

Mashonjowa, E., Ronsse, F., Mubvuma, M., Milford, J.R., Pieters, J.G., 2013. Estimation of leaf wetness duration for greenhouse roses using a dynamic greenhouse climate model in Zimbabwe. *Computers and Electronics in Agriculture*. 95, 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.04.007>.

Neufeld, K.N., Keinath, A.P., Ojiambo, P.S., 2017. A model to predict the risk of infection of cucumber by *Pseudoperonospora cubensis*. *Microbial Risk Analysis*. 6, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.mran.2017.05.001>.

Neufeld, K.N., Ojiambo, P.S., 2012. Interactive effects of temperature and leaf wetness duration on sporangia germination and infection of cucurbit hosts by *Pseudoperonospora cubensis*. *Plant Dis*. 96, 345-353. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-11-0560>.

Ojiambo, P.S., Gent, D.H., Quesada-Ocampo, L.M., Hausbeck, M.K., Holmes, G.J., 2015. *Epidemiology and*

Model-based methodology for the early warn detection of cucumber downy mildew in greenhouses

Population Biology of *Pseudoperonospora cubensis*: A Model System for Management of Downy Mildews. Annual Review of Phytopathology. 53(1), 223-246. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080614-120048>.

Perez-Nadales, E., Almeida Nogueira, M.F., Baldin, C., Castanheira, S., El Ghalid, M., Grund, E., Lengeler, K., Marchegiani, E., Mehrotra, P.V., Moretti, M., Naik, V., Osés-Ruiz, M., Oskarsson, T., Schäfer, K., Wasserstrom, L., Brakhage, A.A., Gow, N.A.R., Kahmann, R., Lebrun, M.-H., Perez-Martin, J., Pietro, A.D., Talbot, N.J., Toquin, V., Walther, A., Wendland, J., 2014. Fungal model systems and the elucidation of pathogenicity determinants. Fungal Genetics and Biology. 70, 42-67. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2014.06.011>.

Sentelhas, P. C., Dalla Marta, A., Orlandini, S., Santos, E.A., Gillespie, T.J., Gleason, M.L., 2008. Suitability of relative humidity as an estimator of leaf wetness duration. Agricultural and Forest Meteorology. 148 (3), 392-400. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.011>.

Sánchez-Molina, J., Li, M., Rodríguez, F., Guzmán, J., Wang, H., Yang, X., 2017. Development and test verification of an air temperature model for Chinese solar and Spanish Almeria-type greenhouse. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 10, 66–76. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171004.2398>.

Sánchez-Molina, J., Li, M., Rodríguez, F., Guzmán, J., Wang, H., Yang, X., 2017. Development and test verification of an air temperature model for Chinese solar and Spanish Almeria-type greenhouse. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 10, 66–76. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171004.2398>.

Wang, H., Sanchez-Molina J.A., Li M., Rodríguez Díaz F., 2019. Improving the Performance of Vegetable Leaf Wetness Duration Models in Greenhouses Using Decision Tree Learning. Water. 11(1), 158. <https://doi.org/10.3390/w11010158>.

Wang H, Mongiano G, Fanchini D, Titone, P., Bregaglio, S., 2021. Varietal susceptibility overcomes climate change effects on the future trends of rice blast disease in Northern Italy. Agricultural Systems. 193(1), 103223. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103223>.

Yang, X.T., Li, M., Zhao, C.J., Zhang, Z., Hou, Y.L., 2007. Early warning model for cucumber downy mildew in unheated greenhouses. New Zealand Journal of Agricultural Research. 50 (5), 1261-1268. <https://doi.org/10.1080/00288230709510411>.

Zhao, C.J., Li, M., Yang, X.T., Sun, C.H., Qian, J.P., Ji, Z.T., 2011. A data-driven model simulating primary infection probabilities of cucumber downy mildew for use in early warning systems in solar greenhouses. Computers and Electronics in Agriculture. 76 (2), 306-315. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.02.009>.

Zito, S., Castel, T., Richard, Y., Rega, M., Bois, B., 2020. Optimization of a leaf wetness duration model. Agricultural and Forest Meteorology. 291, 108087. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108087>.

Zou, W., Yao, F., Zhang, B., He, C., Guan, Z., 2017. Verification and predicting temperature and humidity in a solar greenhouse based on convex bidirectional extreme learning machine algorithm. Neurocomputing. 249, 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.03.023>.

Model-based methodology for the early warn detection of cucumber downy mildew in greenhouses

Como trabajo futuro, se incluirán políticas de seguridad de acceso a la API. Además, se estudiarán soluciones a problemas existentes como el descubrimiento de dispositivos durmientes o inactivos, o el descubrimiento de dispositivos que no tengan pública su dirección IP. Por último, se adaptará la construcción de TDs para la adaptación de dispositivos a la WoT a otros protocolos, como el HTTP.

Referencias

1. Hillar, G.C.: MQTT Essentials-A lightweight IoT protocol. Packt Publishing Ltd (2017)
2. Kaebisch, S., Kamiya, T., McCool, M., Charpenay, V., Kovatsch, M.: Web of Things (WoT) Thing Description, W3C Recommendation (Oct 2020), <https://www.w3.org/TR/2020/REC-wot-thing-description-20200409/>
3. Kovatsch, M., Matsukura, R., Lagally, M., Kawaguchi, T., Toumura, K., Kajimoto, K.: Web of Things (WoT) Architecture, W3C Recommendation (Oct 2020), <https://www.w3.org/TR/2020/REC-wot-architecture-20200409/>

Un Servicio de Descubrimiento Proactivo para la Web de las Cosas

Juan Alberto Llopis¹

Grupo de Informática Aplicada, TIC-211, Universidad de Almería, Almería, España
jalbertollopis@ual.es

Resumen. Un problema actual en el Internet de las Cosas (IoT) es la heterogeneidad de los dispositivos. Dispositivos que realizan la misma tarea funcionan y se comunican de distinta forma. Para evitar este problema, la Web de las Cosas (WoT) fue creada, una iniciativa apoyada por la World Wide Web Consortium (W3C) a través de una serie de recomendaciones. Sin embargo, para adaptar los dispositivos IoT a la WoT es necesario que cada dispositivo esté definido por un documento llamado Thing Description (TD). Para que cada dispositivo tenga una TD asociada se tiene que personalizar cada uno de los dispositivos. Además, una vez adaptados los dispositivos a la WoT, es necesaria una manera de buscarlos y registrarlos. Tanto la adaptación de IoT a WoT como la búsqueda y registro de dispositivos requiere de un proceso manual, un proceso que en entornos con un gran volumen de dispositivos requiere de una gran cantidad de recursos. Por lo tanto, se hace necesaria una manera automática de buscar, registrar y adaptar los dispositivos IoT a WoT. En este trabajo, presentamos un servicio de descubrimiento proactivo, capaz de localizar los dispositivos desplegados en la misma red y de adaptar los dispositivos IoT a WoT.

Keywords: Web of Things · Internet of Things · Discovery Service · Proactive · Thing Description.

1. Introducción

La Web de las Cosas (WoT) es una capa de abstracción basada en tecnologías web que resuelve el problema de heterogeneidad en la comunicación entre dispositivos de Internet de las Cosas (IoT). La World Wide Web Consortium (W3C) gestiona esta iniciativa con una serie de recomendaciones [3]. Esta iniciativa es aplicada sobre los dispositivos IoT a través de la Thing Description (TD) [2], un documento que describe, siguiendo siempre el mismo esquema, las funcionalidades de los dispositivos, permitiendo la interacción entre dispositivos de distintos proveedores. Sin embargo, las recomendaciones de la W3C aún están en desarrollo, la primera recomendación fue publicada en 2020, y el resto de las recomendaciones sigue estando en versión draft. Por lo tanto, debido al que las recomendaciones de la WoT son modernas, no todos los dispositivos IoT están preparados para hacer uso de la tecnología WoT, provocando una baja cantidad de dispositivos WoT disponibles.

Un Servicio de Descubrimiento Proactivo para la Web de las Cosas

Haciendo uso de la TD, un dispositivo IoT puede ser adaptado a la WoT de cuatro formas: (a) haciendo uso de una TD externa que describa la funcionalidad del dispositivo, (b) desplegando un Servient sobre el dispositivo que gestione toda la comunicación que se realice, adaptando el dispositivo a la WoT; (c) adaptando el dispositivo IoT para que incluya internamente la TD; o (d) modificando el dispositivo IoT para poder hacer uso de tecnologías web. Cada una de estas soluciones requiere de un proceso manual para adaptar cada dispositivo a la WoT. En escenarios pequeños, esta transformación de IoT a WoT no supone un problema, pero en grandes escenarios, la carga de trabajo puede no ser viable para el número de desarrolladores disponibles. Además, una vez se adapta el dispositivo a la WoT, es necesaria una manera de encontrar los dispositivos desplegados para permitir su uso por parte de entidades externas. Esta búsqueda puede realizarse utilizando un servicio de descubrimiento, permitiendo el registro, la búsqueda y el acceso a los dispositivos desplegados. Sin embargo, además de la necesidad de encontrar los dispositivos, el descubrimiento de los dispositivos IoT requiere de un proceso manual que puede ser realizado de dos maneras: modificando el dispositivo para hacer que sea el propio dispositivo el que se registre en el servicio de descubrimiento; o usando un agente externo para registrar el dispositivo manualmente en el servicio de descubrimiento.

En este trabajo, presentamos un servicio de descubrimiento, basado en la recomendación de W3C, capaz de buscar y registrar dispositivos IoT y WoT desplegados en la subred de manera reactiva (modelo *push*) y proactiva (modelo *pull*). Mediante el modelo *textitpull*, el servicio de descubrimiento escanea la subred para encontrar dispositivos desplegados, mientras que mediante el modelo *push*, entidades externas pueden registrar manualmente dispositivos mediante su TD. Además, el servicio de descubrimiento es capaz de construir automáticamente la TD de los dispositivos IoT encontrados, adaptándolos a la WoT. Esta adaptación es sobre los dispositivos IoT que hacen uso del protocolo MQTT. La información publicada en el bróker MQTT [1] es analizada, y a partir de la información de contexto obtenida del análisis se crea una TD asociada al dispositivo. Nuestra propuesta, además de la automatización del descubrimiento de dispositivos y del proceso de transformación de los dispositivos IoT, soluciona el problema de la baja cantidad de dispositivos WoT disponibles. Además de escenarios WoT, nuestra propuesta permite el uso de escenarios IoT para la experimentación con tecnología WoT.

2. Avances

La Figura 1 muestra la arquitectura del modelo propuesto, que está formada por un directorio donde se almacenan las TD de los dispositivos que se descubren, el núcleo o Core del modelo donde se ejecutan todas las funcionalidades, y una API RESTful que funciona de intermediaria entre las entidades externas, el Core y el directorio. Además, la API trabaja en conjunto con un sistema GraphQL para permitir la construcción de consultas complejas sobre el directorio de dispositivos. Siguiendo esta arquitectura, tanto el directorio como el núcleo

Un Servicio de Descubrimiento Proactivo para la Web de las Cosas

del sistema se encuentran tras una capa, la API, que funciona como sistema de seguridad o de control de acceso, obligando a entidades externas a hacer uso de las funciones disponibles en la API para poder llamar a las funciones del Core o para poder realizar operaciones sobre el directorio.

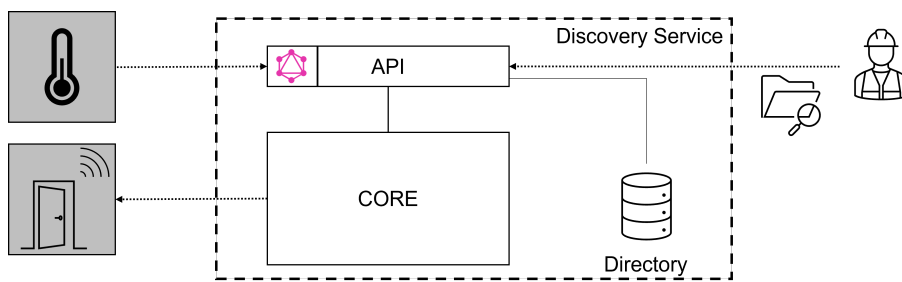


Figura 1. Arquitectura del modelo de descubrimiento.

El descubrimiento de los dispositivos a través del servicio propuesto se realiza siguiendo un modelo *push* y un modelo *pull*. Usando el modelo *push* entidades externas registran los dispositivos a través de la API del sistema. Mediante el modelo *pull* dispositivos desplegados en la misma subred pueden ser descubiertos sin intervención humana. La configuración del modelo *pull* puede ser: (a) automática, el Core ejecuta la operación de descubrimiento a partir de la activación de un evento, como puede ser la hora; o (b) manual, la operación de descubrimiento se ejecuta a partir de la llamada de un *endpoint* disponible en la API. En ambos casos el servicio de descubrimiento es el que realiza la tarea de buscar los dispositivos existentes en la subred y de registrar o actualizar esos dispositivos en el directorio. El descubrimiento proactivo funciona bajo los protocolos HTTP y MQTT, dispositivos que utilicen uno de estos protocolos pueden ser descubiertos por el servicio de descubrimiento. En el caso de HTTP se comprueba la ruta raíz de los dispositivos desplegados en el puerto 80 o 443. Si hay una TD disponible en la ruta raíz, el servicio de descubrimiento registra el dispositivo en el directorio. Para los dispositivos que utilizan MQTT, se buscan servicios que hagan uso de los puertos 1883 o 8883. Estos puertos corresponden a los puertos utilizados por los brókers MQTT. Una vez que se termina el proceso de descubrimiento proactivo, si ha sido realizado de manera manual, las TDs son devueltas al usuario clasificadas en (a) nuevas TDs, corresponde a las TDs que no se encuentran registradas en el directorio; (b) TDs actualizadas, corresponde a las TDs que se encontraban en el directorio, pero que contienen información distinta a la obtenida; y (c) TDs existentes, corresponde a las TDs encontradas en el directorio con la misma información que la obtenida. En el caso de que el descubrimiento se ejecute de manera automática, las TDs son registradas directamente en el directorio.

Además de descubrir proactivamente, el servicio de descubrimiento tiene la capacidad de adaptar dispositivos IoT a la tecnología WoT. La adaptación de dispositivos IoT a WoT se realiza mediante la construcción automática de TD asociadas a los dispositivos IoT. Para poder construir una TD asociada a un dispositivo IoT es necesario que el dispositivo funcione bajo el protocolo MQTT y que su información esté publicada en un bróker MQTT. La construcción de la TD se realiza una vez que el bróker ha sido encontrado por el servicio de descubrimiento y sus *topics* han sido extraídos. Cada *topic* es analizado para construir una *InteractionAffordance* utilizando la información asociada al *topic*. Si la información analizada corresponde con un dispositivo WoT y tiene una TD asociada, se registra en el directorio, si no es un dispositivo WoT o no tiene una TD asociada, se construye una TD asociada al dispositivo y se registra la TD en el directorio. En el caso de los dispositivos IoT, solo el campo propiedades de las *InteractionAffordance* de la TD es construido; esta decisión es debido a que clasificar la información en propiedades, acciones y eventos necesita de un análisis exhaustivo de la información de contexto, mientras que clasificar toda la información en propiedades es un proceso sencillo que permite obtener una TD válida y útil. Una vez que la *InteractionAffordance* se construye, el resto de la TD es completada con la información adicional, *i.e.*, el título y la descripción del dispositivo. La Figura 2 muestra un diagrama BPMN que describe el proceso de construcción de una TD a partir de la información obtenida en el bróker MQTT.

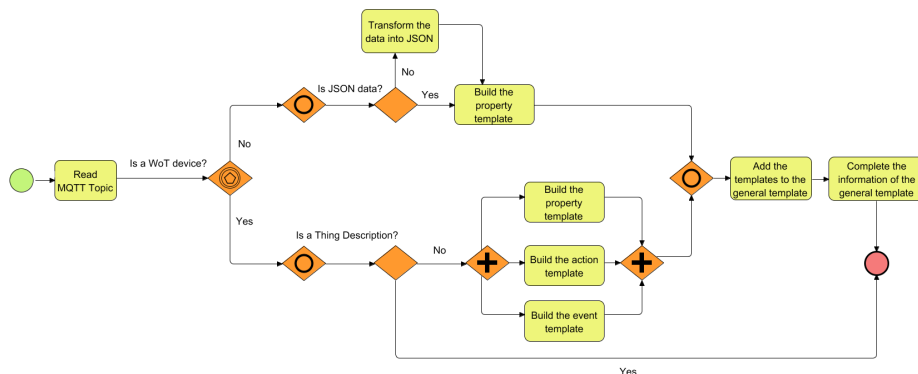


Figura 2. Diagrama BPMN que describe el proceso de construcción de una Thing Description.

La Figura 3 muestra un ejemplo de construcción de una TD a partir de la información extraída del bróker MQTT. La construcción de la TD sigue una aproximación bottom-up, utilizando cuatro plantillas disponibles: una plantilla para la información general (*General Template*) de la TD, y una plantilla por cada una de las *InteractionAffordance* (propiedades, acciones y eventos). Una vez que cada *topic* es analizado, la plantilla de la *InteractionAffordance* es completa-

da y añadida a la plantilla de la información general. En este ejemplo, la plantilla de propiedades es completada utilizando las variables `status` y `brightness` de la luz. Finalmente, después de que la plantilla de `InteractionAffordance` sea añadida a la plantilla de información general, la plantilla de información general es completada con la información básica del dispositivo. En el caso de la luz, la información utilizada es la localización del dispositivo (`home:room:kitchen`) y el nombre de la luz (`light1`). Una vez que todas las plantillas son completadas, la TD final es construida.

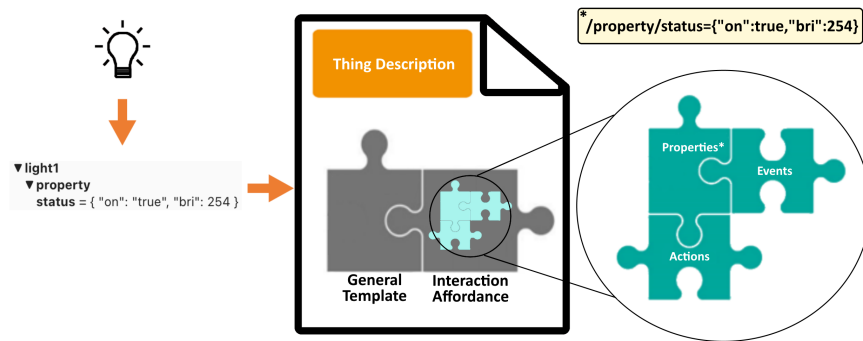


Figura 3. Construcción de la Thing Description de *Light1*.

La razón de crear Thing Descriptions en lugar de modificar los dispositivos IoT para adaptarlos a la WoT es porque al crear una capa de abstracción sobre el dispositivo se reduce la complejidad de la solución a la vez que se incrementa la compatibilidad con dispositivos de distintos proveedores. Además, con el uso de una capa de abstracción, las mejoras se pueden desarrollar con facilidad. Por ejemplo, se puede desplegar un Servient para permitir el uso de otros protocolos en los dispositivos MQTT, los dispositivos MQTT se pueden adaptar a la WoT y también adaptar al protocolo HTTP.

3. Conclusiones

En este trabajo, se ha presentado un servicio de descubrimiento capaz de descubrir siguiendo un modelo *pull* los dispositivos IoT y WoT desplegados en la misma subred. El descubrimiento proactivo puede ser manual utilizando un *endpoint* o automático, siendo ejecutado por un evento. Además, el servicio de descubrimiento es capaz de adaptar los dispositivos IoT a la WoT, permitiendo el uso de soluciones WoT sobre los dispositivos IoT desplegados. De esta manera, el proceso manual de descubrir dispositivos y de adaptar dispositivos IoT a la WoT se ha automatizado, reduciendo la carga de trabajo y aumentando el número de dispositivos WoT desplegados.

Un Servicio de Descubrimiento Proactivo para la Web de las Cosas

Como trabajo futuro, se incluirán políticas de seguridad de acceso a la API. Además, se estudiarán soluciones a problemas existentes como el descubrimiento de dispositivos durmientes o inactivos, o el descubrimiento de dispositivos que no tengan pública su dirección IP. Por último, se adaptará la construcción de TDs para la adaptación de dispositivos a la WoT a otros protocolos, como el HTTP.

Referencias

1. Hillar, G.C.: MQTT Essentials-A lightweight IoT protocol. Packt Publishing Ltd (2017)
2. Kaebisch, S., Kamiya, T., McCool, M., Charpenay, V., Kovatsch, M.: Web of Things (WoT) Thing Description, W3C Recommendation (Oct 2020), <https://www.w3.org/TR/2020/REC-wot-thing-description-20200409/>
3. Kovatsch, M., Matsukura, R., Lagally, M., Kawaguchi, T., Toumura, K., Kajimoto, K.: Web of Things (WoT) Architecture, W3C Recommendation (Oct 2020), <https://www.w3.org/TR/2020/REC-wot-architecture-20200409/>

Optimización del entrenamiento de las redes neuronales Pix2Pix

M. Lupión¹[0000-0001-7697-8062]

Supercomputación y algoritmos, Departamento de Informática, ceiA3, Universidad de Almería, Carr. Sacramento, s/n, La Cañada, Almería, 04120, Andalucía, España
marcoslupion@ual.es

Abstract. Las redes generativas adversariales están ganando importancia en problemas como la conversión de imágenes, la traducción entre dominios y la estilización rápida. Sin embargo, el entrenamiento de estas redes sigue siendo poco claro porque a menudo da lugar a un comportamiento inesperado causado por la no convergencia, el colapso del modelo o un entrenamiento demasiado largo, lo que hace que la tarea de entrenamiento tenga que ser supervisada por el usuario y varíe con cada conjunto de datos. Para aumentar la velocidad de entrenamiento de las redes Pix2Pix (transformación de imagen de un dominio a otro), este trabajo incorpora el entrenamiento multi-GPU utilizando precisión mixta, junto con optimizaciones en el proceso de entrada de imágenes en la GPU. Además, para que el entrenamiento no sea supervisado y termine cuando se realicen las mejores transformaciones, se propone un método de parada temprana que utiliza la métrica de la Proporción Máxima de Señal a Ruido (PSNR).

Keywords: Redes Generativas Adversariales · Pix2Pix · Multi-GPU · Precisión Mixta · Parada temprana

1 Introducción

Actualmente, las casas inteligentes están ganando popularidad sobre todo por los beneficios que aportan a las personas mayores, dependientes o con algún tipo de enfermedad [11]. El objetivo es crear un entorno inteligente en el que se pueda monitorizar al usuario para que pueda vivir de forma independiente o lo más segura posible [16]. Para ello, incorporan cámaras en el espectro visible, que gracias a algoritmos y técnicas de machine y deep learning [9], permiten delimitar con suficiente certeza la actividad que está realizando el usuario y por tanto detectar situaciones de emergencia como caídas [15]. El uso de este tipo de cámaras puede verse comprometido en términos de privacidad, por lo que se ha propuesto como alternativa el uso de cámaras térmicas [2]. Estas cámaras térmicas permiten obtener imágenes térmicas tanto nocturnas como diurnas, por lo que mediante el uso de técnicas de deep learning se pueden desarrollar aplicaciones como el reconocimiento e identificación de personas, la detección de caídas y el reconocimiento de actividades.

Las Redes Adversariales Generativas (GANs) [3] son un tipo de redes neuronales en las que se entrenan conjuntamente dos modelos en un problema de suma cero. En ellas, una red (generadora) genera imágenes a partir de ruido para engañar al discriminador (otra red), que debe determinar si la imagen recibida es real o producida por el generador. Dentro de estas redes neuronales se encuentran las Redes Adversariales Generativas Condicionales (cGANs) [10], cuya diferencia es que el usuario proporciona una entrada al sistema y el resultado de éste depende de esa entrada. Una aplicación dentro de este tipo de redes neuronales es la traducción dominio a dominio [13]. En concreto, en Pix2Pix [7], partiendo de imágenes emparejadas, se permite traducir una imagen de un dominio a otro.

Así, Pix2Pix se ha utilizado en otras tareas como [17] para transformar imágenes del dominio térmico proporcionadas por cámaras térmicas embebidas en viviendas inteligentes, al dominio visible, con el objetivo de obtener imágenes visibles y que dichas imágenes puedan ser procesadas en entornos inteligentes para reconocer actividades, caídas o identificar personas. Sin embargo, el entrenamiento de dichas redes neuronales en la solución Pix2Pix es bastante costoso computacionalmente [14] ya que implica el entrenamiento en paralelo de dos redes neuronales. Además, el usuario debe decidir, en base a su experiencia, cuándo dejar de entrenar, por lo que dicho entrenamiento es supervisado y está sujeto a errores de percepción por parte del usuario. En este trabajo se realizan las siguientes aportaciones:

- Se desarrolla un nuevo método de parada temprana que calcula la Proporción Máxima de Señal a Ruido (PSNR) en las imágenes de validación, dejando que el entrenamiento sea no supervisado, diferente del artículo original.
- Se estudia el impacto del tamaño del lote en el entrenamiento, ya que un tamaño de lote mayor permite acelerar el entrenamiento de las redes neuronales.
- Incorporar la precisión mixta en el entrenamiento, aprovechando los Tensor Cores de las arquitecturas NVIDIA Volta. Se calcula la velocidad al utilizar la precisión mixta para comprobar las mejoras que aporta este tipo de cálculo.
- Se parametrizan las diferentes funciones de pérdida para poder entrenar en un sistema multi-GPU utilizando TensorFlow.

2 Avances

2.1 Transformación de imágenes térmicas en visibles

En el trabajo original donde se introdujo Pix2Pix [7], se obtiene una solución para los problemas de traducción de imágenes de un dominio a otro. En este trabajo, además de transformar la imagen de un dominio a otro, se pretende realizar una identificación de la persona, por lo que se añade una nueva red neuronal al sistema. Dicho sistema se muestra en la Figura 1.

En este, el par de imágenes que se proporciona como entrada al sistema consiste en una imagen térmica (x) y su correspondencia con una imagen en el

Optimización del entrenamiento de las redes neuronales Pix2Pix

espectro visible de la cara de una persona (y). Además, una red neuronal llamada generadora, toma como entrada la imagen térmica y genera una imagen visible a partir de ella (x'). Posteriormente, otra red neuronal discriminadora recibe la imagen visible creada por el generador y la imagen visible de entrada, teniendo que decidir si cada una de estas imágenes es verdadera o falsa. Por lo tanto, para entrenar estas redes neuronales, se definen varias funciones de pérdida. La primera es la pérdida adversarial, es decir, el grado en que la red discriminadora se equivoca o no. La segunda es la pérdida L1, que compara el error entre la imagen realizada por el generador y la imagen visible de entrada, para que la red generadora genere transformaciones lo más parecidas posibles a la imagen visible inicial.

Sin embargo, en este trabajo, para mejorar el nivel de reconocimiento facial de las imágenes producidas por el generador, se añaden nuevos elementos a la solución Pix2Pix. La persona incluida en la imagen se añade a la entrada del sistema (z). Posteriormente, cuando la red generadora produce la imagen visible, esta imagen se convierte en la entrada de una nueva red denominada red de reconocimiento facial. Esta red es una red preentrenada sobre las imágenes visibles del conjunto de datos cuyo objetivo es reconocer a la persona de la imagen (z'). Por tanto, se incluye finalmente la función de pérdida de reconocimiento de caras (función número 3 de la Figura 1) que calcula las imágenes en las que se ha reconocido correctamente a la persona. Esta pérdida se incorpora por tanto a la red generadora, generando a medida que se entrena el sistema imágenes con las caras de las personas mejor definidas.

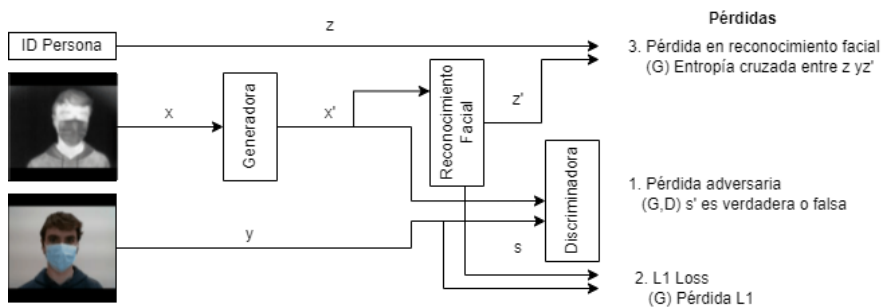


Fig. 1. Modelo del sistema

En general, esta solución hace uso del algoritmo de optimización del gradiente de Adam con una tasa de aprendizaje de 0,0002 y con los parámetros de impulso $\beta_1 = 0,5$, $\beta_2 = 0,999$. Además, el tamaño del lote de datos con el que se realiza el entrenamiento es 1, siguiendo las directrices del documento original.

2.2 Método de parada temprana

Uno de los problemas de las redes generativas adversariales es el del final del entrenamiento. Normalmente, el entrenamiento se realiza hasta que las imágenes resultantes, a simple vista, no se distinguen de las imágenes del conjunto de datos. Si el entrenamiento se prolonga durante un gran número de épocas, el entrenamiento se desvía del objetivo y empieza a dar lugar a imágenes no deseadas, por lo que hay que prestar atención a esto. Sin embargo, para comparar diferentes configuraciones del sistema (diferentes tamaños de lote, tasas de aprendizaje, número de capas de las redes neuronales) es necesario saber cuándo se ha entrenado completamente cada uno de los modelos para poder compararlos entre sí.

Por lo tanto, para detectar cuándo debe terminar el entrenamiento, en las redes neuronales normales, se analiza la evolución de la pérdida en las imágenes de entrenamiento y en las de validación. Sin embargo, en Pix2Pix, la pérdida del generador no mide la calidad de las imágenes generadas, por lo que esta métrica no puede utilizarse para detenerse cuando las imágenes generadas parecen ser reales.

En este trabajo, con el fin de comparar las imágenes creadas por el modelo con respecto a las imágenes de la verdad terrestre, se propone hacer uso de la métrica Proporción Máxima de Señal a Ruido (PSNR) [4].

En la Figura 2 se puede ver la evolución de la métrica PSNR suavizada en una ejecución de 3000 épocas. El valor más alto se alcanza en la época 405 y, aunque pueden existir valores de PSNR similares para épocas posteriores, las imágenes correspondientes no mejoran las de épocas anteriores. Por lo tanto, el criterio de detención del entrenamiento es parar cuando se obtiene el valor más alto y no se encuentra ninguna mejora durante las 50 épocas siguientes.

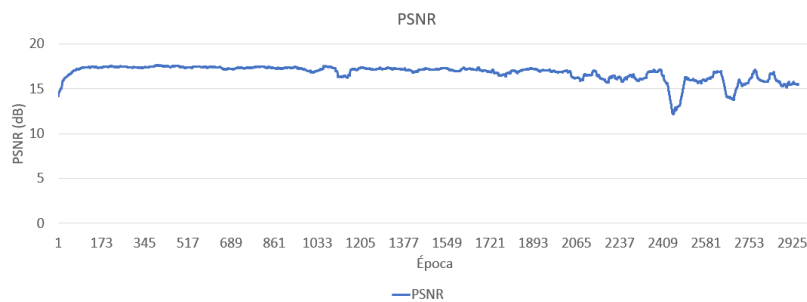


Fig. 2. Evolución de la métrica PSNR en una ejecución de 3.000 épocas

Una vez definido el método de parada temprana del entrenamiento, este se convierte en no supervisado y sólo se realizan 50 épocas de entrenamiento más en este caso desde el punto en que el sistema está completamente entrenado, ahorrando tiempo de entrenamiento.

2.3 Optimizaciones

Partiendo de la solución original de Pix2Pix y del método de parada anticipada definido en la sección anterior, esta sección incluye diferentes optimizaciones de la solución original para reducir el tiempo de entrenamiento del sistema. En este caso, sólo se utiliza 1 GPU para el entrenamiento.

Cambio del tamaño del lote En las Redes Generativas Adversariales (GANs), la selección de los hiperparámetros es una tarea que requiere conocimiento del dominio y en la mayoría de los casos, es un proceso de prueba y error [1]. Por ello, no existen referencias donde se haya estudiado el impacto de los hiperparámetros más importantes como el tamaño del lote y la tasa de aprendizaje [6] en este tipo de redes neuronales.

En este trabajo, definimos 9 configuraciones en las cuales se varía el tamaño del lote, con tamaños de lote que son potencias de 2 [12] (incluyendo la configuración por defecto con lote de 1) y con un valor constante de la tasa de aprendizaje.

Tras analizar los resultados con las diferentes configuraciones, se obtienen valores de PSNR entre 17 y 18 en las configuraciones con tamaños de lote que oscilan entre 4 y 256, lo que permite acelerar el entrenamiento respecto a la versión con lote de 1, que proporcionan un valor 10,71. La mejor configuración es la que tiene un tamaño de lote de 64, alcanzando este valor en la época 385.

Además, en algunos trabajos se indica que junto con el aumento del tamaño del lote para mejorar la velocidad de entrenamiento, es necesario aumentar también el tamaño de la tasa de aprendizaje [5]. Sin embargo, tras realizar experimentos cambiando dicha tasa, se observa que no se mejora el entrenamiento.

Flujo de entrada En la solución original, la CPU se encarga de obtener todas las imágenes a entrenar y realizar sus transformaciones (normalización, redimensionamiento) antes de cargarlas en la GPU. Estas tareas se repiten en cada época, desperdiciando recursos de la CPU. Por ello, se incorpora la **caché** para que, una vez procesadas las imágenes, se almacenen y estén disponibles en la siguiente época.

Además, una vez que el sistema está listo para procesar un lote, la CPU debe procesar las imágenes y cargarlas en la GPU, por lo que durante este tiempo, la GPU está sin utilizar y desperdiciando sus servicios. Por ello, se ha incorporado al sistema una **precarga** de las imágenes a la GPU, de forma que ésta no tenga que esperar a recibir las imágenes de la CPU para empezar a procesarlas.

Precisión mixta Actualmente, algunas arquitecturas como NVIDIA Volta y Turing incorporan Tensor Cores. Se trata de multiprocesadores que optimizan el procesamiento de datos en la GPU. Además, los Tensor Cores permiten realizar cálculos con precisión mixta en lugar de con precisión única, lo que aumenta la velocidad de procesamiento hasta 8 veces.

Por tanto, para aprovechar el potencial de los Tensor Cores, se ha incluido en nuestro sistema la precisión mixta, soportada por TensorFlow. En esta precisión, las operaciones se realizan de forma semiprecisa (16 bits) mientras que los modelos se almacenan en precisión completa (32 bits). Al hacer uso de la precisión mixta, el cálculo de los gradientes de actualización de los pesos de la red neuronal se realiza con valores en 16 bits. Dado que en ocasiones dichos valores son muy pequeños, puede darse el caso de que no puedan ser representados utilizando sólo 16 bits, por lo que se convierten en 0. Por tanto, es necesario incorporar una función de escalado que obtenga un valor a partir del cual se calculen los gradientes.

2.4 Entrenamiento Multi-GPU

En la sección anterior desarrollamos las mejoras que se implementaron sobre la configuración original de Pix2Pix. Estas mejoras se centran en la optimización del proceso de aprendizaje utilizando una GPU. En esta sección, el objetivo es adaptar el sistema para que el procesamiento se realice en varias GPU en paralelo.

En este sistema, el modelo se copia en cada GPU y el lote se divide en mini lotes de igual tamaño que se distribuyen entre las diferentes GPUs. De esta forma, cada GPU procesa un lote diferente, y antes de la backpropagation de los datos, se realiza una reducción de los valores de cada GPU para que sólo haya un modelo que se duplique en todas las GPUs.

Para entrenar las redes neuronales, existen diferentes funciones de pérdida. Estas se usan para cuantificar el error de las redes neuronales al clasificar un conjunto de datos de entrada. Así, para adaptar el sistema a varias GPUs, su método de cálculo varía ya que hay que tener en cuenta que el conjunto de datos de entrada está dividido en varias GPUs.

Adversarial Loss En las GAN, la salida de la red discriminadora se utiliza para entrenar tanto al generador como al discriminador. La función de pérdida utilizada es la entropía cruzada binaria. Esta función proporciona el error entre cada valor de salida de la red discriminadora y su valor deseado. En este caso, la red discriminadora tiene unas dimensiones de salida de $30 * 30$, ya que es un [8] PatchGAN.

Por lo tanto, en este caso, que hay que sumar los valores y dividirlos por el tamaño global del lote teniendo en cuenta que la salida es $30*30$. Por lo tanto, para obtener el valor medio de la pérdida, se debe dividir por el tamaño global del lote además de por el número de dimensiones.

L1 Loss En el caso del generador, la pérdida de la red GAN se obtiene mediante la función descrita anteriormente, como en el caso del discriminador. Sin embargo, se incluye otra función de pérdida que tiene en cuenta el MSE. En este caso, se produce una agregación de los errores cuadráticos medios de cada uno de los píxeles y se divide por el número de GPUs que se están utilizando. Una vez procesado el lote, los valores L1 se suman en la CPU.

Face Recognition Loss En nuestro sistema se incorpora una red neuronal auxiliar para realizar un reconocimiento de personas en las imágenes generadas por el generador. De esta forma, se pretende guiar al generador para que las imágenes que genera se asocien a la persona correcta en cada caso. Para ello, se incorpora una función de pérdida que se aplica sobre la red auxiliar de reconocimiento de personas. En este caso, en lugar de hacer uso de la entropía cruzada binaria, se utiliza la entropía cruzada categórica dispersa. La diferencia entre ambas es que la entropía cruzada categórica dispersa calcula la pérdida cuando el número de elementos de salida es mayor que 1. En este caso, el número total de personas a reconocer es de 12.

Así, al igual que con la entropía cruzada binaria, en la multi-GPU la agregación y el cálculo de la pérdida no pueden realizarse automáticamente. Por lo tanto, esta función proporciona un valor de pérdida para cada imagen, por lo que en cada GPU se suma la suma de los errores de cada imagen y se divide por el tamaño del lote.

3 Resultados

En primer lugar, en la Figura 3 se muestra el factor de mejora de las diferentes optimizaciones. Estas optimizaciones son: *Entrada* (optimización del flujo de entrada), *PrecisiónMixta* (optimización de precisión mixta) y *Ambas* (optimización de entrada y precisión mixta). Así, cada una de las optimizaciones ha sido probada en un sistema de una y varias GPU. Así, el factor de mejora se define en la ecuación 1. En esta ecuación, T_1 es el tiempo de ejecución sin optimizaciones y T_{opt} es el tiempo de ejecución con optimizaciones

$$Factor\ de\ mejora = T_1 / T_{opt} \tag{1}$$

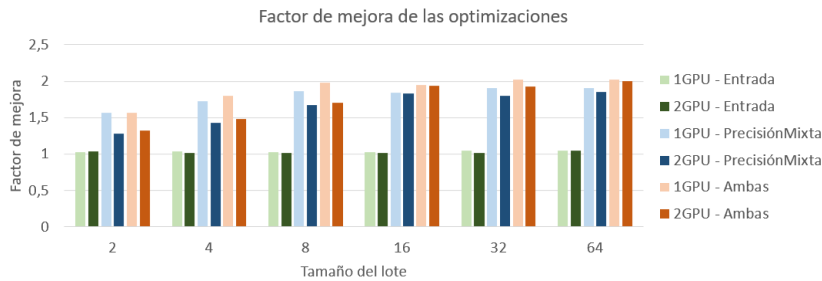


Fig. 3. Factor de mejora de las diferentes optimizaciones

En cuanto a la optimización del flujo de entrada, su aumento de velocidad es casi insignificante independientemente del tamaño del lote. Sin embargo, la optimización de precisión mixta implica un aumento de la velocidad cuando

Optimización del entrenamiento de las redes neuronales Pix2Pix

el tamaño del lote es mayor. Así, al ejecutar el sistema con la optimización de precisión de entrada y mixta, se observa que tanto en 1 GPU como en 2 GPUs se obtiene un valor de 2 cuando se tiene un tamaño de lote de 64, lo que significa que estas optimizaciones reducen el tiempo de ejecución a la mitad en ese tamaño de lote. En general, las optimizaciones son más notables cuanto mayor es el tamaño del lote.

Para comparar las ejecuciones en secuencial y paralelo y ver la aceleración de cada una de las optimizaciones introducidas, se utiliza el speed up, que se define en la Ecuación 2. En esta Ecuación, T_I es el tiempo de ejecución de la versión secuencial y T_p el tiempo de ejecución del algoritmo paralelo.

$$S_p = T_I/T_p \quad (2)$$

Por último, la Figura 4 muestra el speed up entre las ejecuciones optimizadas de 1 y 2 GPUs. Como se puede apreciar, se alcanza un máximo de 1,92 en el tamaño de lote 64, llegando casi a 2 que es el speed up ideal (reducir a la mitad el tiempo de ejecución duplicando el número de GPUs). En este caso, el aumento de velocidad ideal no se alcanza porque parte del tiempo se dedica a la comunicación entre las GPUs y la CPU anfitriona.



Fig. 4. Aceleración de la versión paralelizada sobre la versión secuencial

Finalmente, comparando la configuración por defecto con 1 GPU, con el tamaño de lote de 1 definido en [7] y la versión optimizada con tamaño de lote de 64 en 2 GPUs, se obtiene un aumento de velocidad de 7,08, por lo que se puede decir que las optimizaciones incorporadas junto con la adaptación a multi-GPU permite optimizar con éxito el problema en cuestión.

4 Conclusiones

En la actualidad, las Redes Generativas Adversariales (GAN) se utilizan en multitud de aplicaciones. En concreto, uno de los usos se refiere a la transformación de imágenes de un dominio a otro. Una solución es Pix2Pix, que realiza esta transformación a partir de pares de imágenes. Dicho sistema realiza la transformación de imágenes de dos dominios de forma satisfactoria, pero el entrenamiento de dicho sistema es complicado ya que es bastante caro en términos de complejidad computacional y es eminentemente supervisado.

Optimización del entrenamiento de las redes neuronales Pix2Pix

En nuestro trabajo, en primer lugar, se ha propuesto un sistema de parada temprana en el que el conjunto de datos se divide en un conjunto de entrenamiento y otro de evaluación. Al final de cada época, se calcula el valor PSNR de cada una de las imágenes de validación y se realiza la media móvil de estos valores, guardando el modelo cuando el valor de PSNR es mayor. Si dicho valor no mejora en 50 épocas, se concluye que dicho modelo está completamente entrenado.

A diferencia del trabajo original, en nuestro trabajo, el tamaño del lote que genera el mejor valor de PSNR es 64, utilizando la tasa de aprendizaje original, concluyendo que el tamaño del lote depende del tamaño del conjunto de datos y del tipo de problema. Por otro lado, incluimos el uso de la caché para almacenar las imágenes de entrada procesadas antes de enviarlas a la GPU, así como una precarga de estas imágenes en la GPU. Esta optimización proporciona una ligera mejora en la velocidad (el aumento de velocidad se acerca a 1,05).

Además, se ha incorporado la precisión mixta para aprovechar los Tensor Cores presentes en la arquitectura NVIDIA Volta. Al incorporar dicha precisión, ha sido necesario actualizar los modelos e implementar el escalado de pérdidas de los mismos para evitar el desbordamiento. Tras realizar varios experimentos, se obtiene un aumento de velocidad cercano a 2.

Por otro lado, se ha incorporado el procesamiento multi-GPU siguiendo el enfoque de paralelismo de datos. Para ello, ha sido necesario adaptar las funciones de pérdida del sistema. Al incorporar 2 GPUs, el aumento de velocidad alcanza un valor de 1,92 al tener un tamaño de lote de 64.

Por tanto, aplicando las optimizaciones del proceso de entrada, la precisión mixta y la multi-GPU, se obtiene un aumento de velocidad de 7,08 respecto a la configuración original del papel. Así, todas las optimizaciones realizadas permiten convertir el entrenamiento del sistema en un entrenamiento no supervisado, asegurando que se detiene en la mejor época.

Bibliografía

1. Ghosh, B., Dutta, I.K., Carlson, A., Totaro, M., Bayoumi, M.: An empirical analysis of generative adversarial network training times with varying batch sizes. In: 2020 11th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON). pp. 0643–0648 (2020). <https://doi.org/10.1109/UEMCON51285.2020.9298092>
2. Gochoo, M., Tan, T.H., Alnajjar, F., Hsieh, J.W., Chen, P.Y.: Lownet: Privacy preserved ultra-low resolution posture image classification. In: 2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). pp. 663–667 (2020). <https://doi.org/10.1109/ICIP40778.2020.9190922>
3. Goodfellow, I.J., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., Bengio, Y.: Generative adversarial nets. In: Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 2. p. 2672–2680. NIPS'14, MIT Press, Cambridge, MA, USA (2014)
4. Horé, A., Ziou, D.: Image quality metrics: Psnr vs. ssim. In: 2010 20th International Conference on Pattern Recognition. pp. 2366–2369 (2010). <https://doi.org/10.1109/ICPR.2010.579>

Optimización del entrenamiento de las redes neuronales Pix2Pix

5. Hu, Z., Xiao, J., Tian, Z., Zhang, X., Zhu, H., Yao, C., Sun, N., Tan, G.: A variable batch size strategy for large scale distributed dnn training. In: 2019 IEEE Intl Conf on Parallel Distributed Processing with Applications, Big Data Cloud Computing, Sustainable Computing Communications, Social Computing Networking (ISPA/BDCLOUD/SocialCom/SustainCom). pp. 476–485 (2019). <https://doi.org/10.1109/ISPA-BDCLOUD-SustainCom-SocialCom48970.2019.00074>
6. Ioffe, S., Szegedy, C.: Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. In: Bach, F., Blei, D. (eds.) Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning. Proceedings of Machine Learning Research, vol. 37, pp. 448–456. PMLR, Lille, France (07–09 Jul 2015)
7. Isola, P., Zhu, J.Y., Zhou, T., Efros, A.: Image-to-image translation with conditional adversarial networks. pp. 5967–5976 (07 2017). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.632>
8. Li, C., Wand, M.: Precomputed Real-Time Texture Synthesis with Markovian Generative Adversarial Networks. In: Leibe, B., Matas, J., Sebe, N., Welling, M. (eds.) Computer Vision – ECCV 2016. pp. 702–716. Springer International Publishing, Cham (2016)
9. Mehr, H.D., Polat, H.: Human activity recognition in smart home with deep learning approach. In: 2019 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG). pp. 149–153 (2019). <https://doi.org/10.1109/SGCF.2019.8782290>
10. Mirza, M., Osindero, S.: Conditional generative adversarial nets. arXiv (2014), <http://arxiv.org/abs/1411.1784>
11. Mtshali, P., Khubisa, F.: A smart home appliance control system for physically disabled people. In: 2019 Conference on Information Communications Technology and Society (ICTAS). pp. 1–5 (2019). <https://doi.org/10.1109/ICTAS.2019.8703637>
12. Radiuk, P.: Impact of training set batch size on the performance of convolutional neural networks for diverse datasets. Information Technology and Management Science **20**, 20–24 (12 2017). <https://doi.org/10.1515/itms-2017-0003>
13. Regmi, K., Borji, A.: Cross-view image synthesis using conditional gans. In: 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). pp. 3501–3510. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA (jun 2018). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00369>
14. Salimans, T., Goodfellow, I., Zaremba, W., Cheung, V., Radford, A., Chen, X.: Improved techniques for training gans. In: Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems. p. 2234–2242. NIPS'16, Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA (2016)
15. Shojaei-Hashemi, A., Nasiopoulos, P., Little, J.J., Pourazad, M.T.: Video-based human fall detection in smart homes using deep learning. In: 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). pp. 1–5 (2018). <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2018.8351648>
16. Stefanov, D., Bien, Z., Bang, W.C.: The smart house for older persons and persons with physical disabilities: structure, technology arrangements, and perspectives. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering **12**(2), 228–250 (2004). <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2004.828423>
17. Zhang, T., Wiliem, A., Yang, S., Lovell, B.: Tv-gan: Generative adversarial network based thermal to visible face recognition. In: 2018 International Conference on Biometrics (ICB). pp. 174–181 (2018). <https://doi.org/10.1109/ICB2018.2018.00035>

WoTnectivity: estableciendo un patrón de comunicación común para el manejo de dispositivos WoT*

Manel Mena¹[0000-0003-1084-8489]

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

Abstract. La Web of Things propone un estándar para la definición de dispositivos IoT, la Thing Description. Conceptualmente, esta definición cubre una amplia gama de dispositivos, protocolos y tipos de datos. Por otro lado, la proliferación de dispositivos IoT y los rasgos que estos suelen exhibir, como el número limitado de recursos, lleva a la aparición de puntos de embudo que provocan la ralentización e incluso el mal funcionamiento de este tipo de dispositivos. Para resolver estos problemas, creamos el concepto de Digital Dice. Un Digital Dice es una representación digital de un dispositivo IoT basado en microservicios que hace uso del marco establecido por la Web of Things. En este artículo hablamos de la estrategia seguida por los Digital Dices para gestionar el problema de tener que conectarse a los múltiples protocolos utilizados por los dispositivos IoT. Para ello, en el artículo introducimos WoTnectivity, una librería que establece un patrón de comunicación común para el manejo de tipos de dispositivos y protocolos IoT de la manera más sencilla posible.

Keywords: Microservicios · Internet of Things · Web of Things · Protocolos de comunicación · Digital Dice

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 diferentes artefactos software para cada dispositivo debido a las múltiples tecnologías subyacentes. En el caso de los desarrolladores, tener que aprender diferentes tecnologías solo para establecer comunicación con cada dispositivo supone una sobrecarga de trabajo. Aparte del problema de la usabilidad de los diferentes sistemas ciberfísicos o dispositivos IoT [1], muchas veces estos dispositivos tienen restricciones a nivel computacional.

* Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General de Investigación y Transferencia del Conocimiento del Gobierno Regional de la Junta de Andalucía bajo el proyecto P20_00809. Manel Mena esta financiado por el Gobierno de España mediante la beca de formación FPU17/02010.

WoTnectivity: estableciendo un patrón de comunicación común para el manejo de dispositivos WoT

Los Digital Dices (DD) son representaciones digitales de sistemas ciberfísicos o dispositivos IoT [2]. El concepto es similar al de Digital Twins [3], pero mientras que en el Digital Twin la virtualización del dispositivo es el factor clave, en el caso de los DD el foco está en la gestión y el uso de los mismos.

La Web of Things (WoT) [4] propone un modelo, la Thing Description (TD) [5], para definir diferentes *things*, sin importar los protocolos que cada uno de ellas utilice. Además de esto, la Web of Things ofrece una serie de patrones comunes utilizados para administrar diferentes dispositivos. El concepto de Digital Dice propone una implementación de la Thing Description basada en microservicios [6]. Este concepto tiene en cuenta diferentes aspectos del dispositivo IoT para crear los microservicios necesarios para gestionarlo. Cada DD ofrece una Thing Description para que sea compatible con plataformas y sistemas que hacen uso de ese modelo, como por ejemplo Mozilla IoT [7] o Eclipse IoT [8].

El uso del WoT tiene la ventaja de estandarizar nuestra solución. Como resultado de eso, nuestros DD se convierten en lo que la WoT denomina un *servient software* [9]: "Un *servient software* de la WoT es una pila de software que implementa parte de sus recomendaciones. Un *servient* puede alojar y exponer *things* y/o alojar consumidores que consumen *things*. Los *servients* pueden admitir múltiples protocolos de comunicación que permiten la interacción con diferentes plataformas de IoT".

Este artículo presenta WoTnectivity, una librería que ofrece un marco para permitir la conexión con los diferentes protocolos de comunicación que se encuentran en los dispositivos compatibles con la WoT. Digital Dices usa WoTnectivity para poderse conectar con los distintos dispositivos IoT que maneja [2]. Esta librería ya es capaz de trabajar con diferentes tipos de protocolos como HTTP [10], MQTT [11], WebSocket [12] o KNX [13]. Además de esos protocolos, los usuarios pueden establecer compatibilidad con otros simplemente declarando WoTnectivity como una dependencia e implementando la interfaz proporcionada. El proyecto generado se puede compartir con la comunidad en un esfuerzo por mejorar el número de protocolos gestionados por el ecosistema WoTnectivity.

2 Avances

El principal problema al que nos enfrentamos a la hora de crear un *servient software* de la Web of Things es intentar hacerlo compatible con las diferentes tecnologías que engloba este framework. Esta limitación particular se hizo evidente al tratar de trabajar con diferentes librerías para establecer conexión con los dispositivos a nuestra disposición. Cada librería utiliza diferentes patrones de comunicación, diferentes modelos de datos y diferentes paradigmas de conexión.

Además, en el desarrollo de la transformación parcial de modelo a texto entre Thing Descriptions y Digital Dices [2], tener que utilizar diferentes librerías para cada protocolo de conexión utilizado en los dispositivos, genera una complejidad innecesaria y hace que el proceso sea menos fiable. De esa manera descubrimos la necesidad de desarrollar un artefacto que nos permitiera establecer un patrón de comunicación común para resolver estos problemas.

WoTnectivity: estableciendo un patrón de comunicación común para el manejo de dispositivos WoT

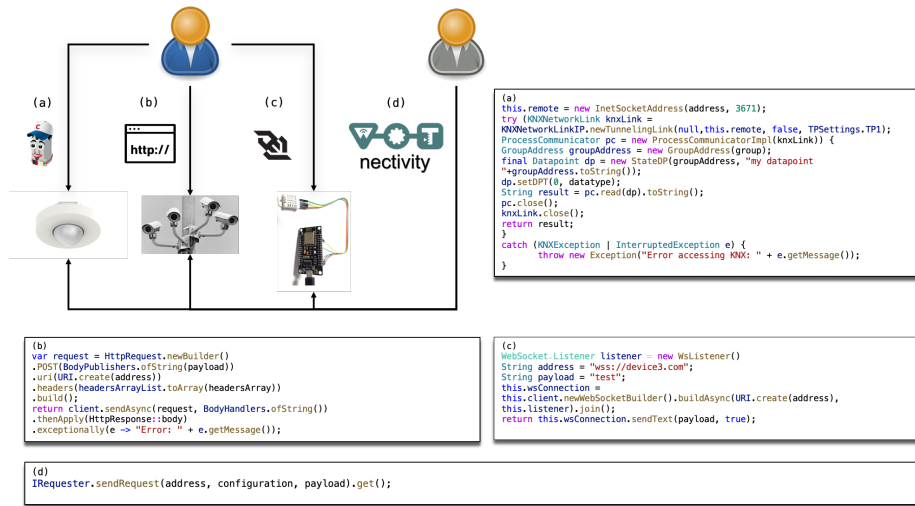


Fig. 1: WoTnectivity vs otras librerías.

La figura 1 representa el enfoque WoTnectivity para establecer un patrón común frente al utilizando por diferentes librerías para conectarse con diferentes dispositivos. WoTnectivity es una librería multiprotocolo capaz de trabajar con diferentes tecnologías como MQTT, Web Sockets¹, KNX² y HTTP³.

Este enfoque proporciona una estructura comprensible con un formato homogéneo de implementación para todas las tecnologías que se pueden utilizar en el proceso de comunicación.

Además de implementar algunos protocolos de conexión en la librería, necesitamos ser capaces de agregar más tecnologías en versiones sucesivas. Para ello, se estudiaron dos enfoques diferentes al tratar de desarrollar la librería multiprotocolo. El primero fue crear un proyecto donde residirían todos los diferentes protocolos de conexión. Sin embargo, esta perspectiva agrega cierta complejidad a la librería y aumenta su tamaño. El segundo enfoque fue crear un conjunto de proyectos para cada protocolo de conexión a implementar. Esta perspectiva requiere que WoTnectivity tenga que ser declarada dependencia en la creación del nuevo proyecto. Esta dependencia contiene la interfaz necesaria para implementar, haciéndola compatible con el ecosistema WoTnectivity. Este último enfoque tiene la ventaja de ser más fácil de mantener, así como más eficiente (en términos de uso de memoria).

La interfaz definida debe ser lo suficientemente abierta, ya que no todas las tecnologías funcionan con los mismos protocolos de transferencia de datos y pueden tener diferentes patrones de conexión. Después de estudiar las difer-

¹ WoTnectivity WS - <https://github.com/acgtic211/wotnectivity-ws>

² WoTnectivity KNX - <https://github.com/acgtic211/wotnectivity-knx>

³ WoTnectivity HTTP - <https://github.com/acgtic211/wotnectivity-http>

WoTnectivity: estableciendo un patrón de comunicación común para el manejo de dispositivos WoT

entes tecnologías soportadas por nuestra librería, decidimos clasificarlas, en dos categorías diferentes que se definen por el tipo de conexión:

- a) Efímero o no persistente. Este tipo de conexión se establece cuando el usuario de la biblioteca simplemente quiere interactuar con un dispositivo para obtener una respuesta.
- b) Persistente. El usuario quiere dejar una conexión abierta con el dispositivo, no solo para recibir una respuesta aislada, sino con el objetivo de recibir los siguientes mensajes vinculados. Esto requiere una implementación de un listener en particular para controlar el flujo de datos de esa conexión.

Estos diferentes casos de uso hay que tenerlos en cuenta a la hora de pensar en cómo añadir nuevos protocolos de comunicación a la biblioteca, ya que la solución tiene que ser compatible con ambos.

2.1 Extendiendo los protocolos (IRequester)

Para crear una forma común de implementar diferentes protocolos y ofrecer manera de ampliarlos, necesitamos establecer un patrón de comunicación que admita diferentes protocolos siguiendo un paradigma de programación reactiva [14]. Para ello, declaramos la interfaz que se muestra en Listing 1.1.

```

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

```

Listing 1.1: IRequester.java.

Cada protocolo agregado a la librería debe implementar esta interfaz simple. La interfaz solo tiene un método, **sendRequest**. Este método requiere la definición de tres parámetros:

- a) **String address**. Este parámetro define la dirección a la que se debe enviar la solicitud.
- b) **HashMap<String, Object> configuration**. Este parámetro permite la definición de diferentes parámetros de configuración de la solicitud. El tipo de parámetro es muy abierto, siendo un Mapa donde el valor puede ser cualquier cosa. El parámetro de configuración debe ser lo más genérico posible, ya que los diferentes protocolos requieren diferentes propiedades de configuración que pueden no estar relacionadas.
- c) **Object payload**. El payload de la solicitud debe ser lo más genérico posible porque diferentes protocolos pueden administrar diferentes tipos de datos en las solicitudes.

WoTnectivity: estableciendo un patrón de comunicación común para el manejo de dispositivos WoT

```

1 public class HttpReq implements IRequester {
2     private HttpClient client;
3     public HttpReq() {
4         this.client = HttpClient.newHttpClient();
5     }
6     private CompletableFuture<String> sendPostRequest(String address, HashMap<String, Object> headers
7         ↪, String payload){
8         List<String> headersArrayList = new ArrayList<>();
9         headers.forEach((k,v)-> {headersArrayList.add(k);
10            headersArrayList.add(v.toString());});
11         String[] headersArray = new String[headersArrayList.size()];
12         var request = HttpRequest.newBuilder().POST(BodyPublishers.ofString(payload)).uri(URI.create(
13            ↪ address)).headers(headersArrayList.toArray(headersArray)).build();
14         return client.sendAsync(request, BodyHandlers.ofString()).thenApply(HttpResponse::body).
15            ↪ exceptionally(e -> "Error:␣" + e.getMessage());
16     }
17     ...
18     @Override
19     public CompletableFuture<?> sendRequest(String address, HashMap<String, Object> configuration,
20        ↪ Object payload) {
21         String methodType = configuration.get("MethodType").toString();
22         CompletableFuture<String> output;
23         if (methodType.equals("POST")){
24             output = this.sendPostRequest(address, configuration.get("headers"), payload.toString());
25         }else if (methodType.equals("GET")){
26             ...
27         }
28         return output;
29     }
30 }

```

Listing 1.2: HttpReq.java

2.2 Implementing a protocol in WoTnectivity

Al principio de la sección 2 definimos los diferentes protocolos en dos categorías separadas, *no persistentes* y *persistentes*. La diferencia entre ellos se hace evidente en los diferentes métodos constructores de la clase que implementa nuestro `IRequester` (ver Listing 1.1). En el caso de los protocolos *persistentes*, se debe declarar un *listener* específico para ese protocolo en el constructor con el comportamiento que el usuario desea ejecutar cuando la librería escucha nuevas llamadas. La librería define un listener predeterminado si no se pasa ningún listener en el constructor. El comportamiento del listener predeterminado es simplemente la salida de los mensajes recibidos en la consola.

El protocolo utilizado como ejemplo es HTTP. El Listing 1.2 muestra una representación parcial de la implementación `HttpReq`. La *línea 1* declara que esta clase implementa la interfaz `IRequester`, que se muestra en Listing 1.1. El constructor predeterminado de *líneas 2-5* inicializa el `HttpClient`. En este caso solo hay un constructor porque la conexión HTTP no requiere una conexión permanente, solo realiza una solicitud y, a continuación, espera una respuesta con el recurso necesario, por lo que no se necesita ningún listener para administrar este tipo de conexión. Entre las *líneas 6-13* se define un método (`sendPostRequest`) que crea una solicitud POST al **address** dado con un **payload** particular y el **headers** esperado que viene como un mapa clave-valor en el parámetro. *Líneas 16-25* definen la función requerida por la interfaz que se muestra en el listing 1.1 (`sendRequest`). Esta función recuperará del parámetro de configuración el *MethodType* de la petición HTTP. A posteriori, enviará esa petición a la función particular de ese *MethodType* con el **address**, el **headers** (recuperado del parámetro **configuration**) y el **payload**, si son necesarios para esa función.

WoTnectivity: estableciendo un patrón de comunicación común para el manejo de dispositivos WoT

La librería, así como la documentación de la misma se encuentra en Github⁴.

Por último, también hemos desarrollado una nueva vertiente de la librería basada en el lenguaje de programación `node.js`, la cual ya ha recibido más de mil descargas tan solo el protocolo KNX⁵.

3 Conclusiones

En este artículo, presentamos WoTnectivity, una librería de comunicación para permitir la gestión de dispositivos IoT heterogéneos. Esta librería se basa en el concepto de Digital Dices y en las tecnologías del marco Web of Things. Digital Dices trae consigo el uso de microservicios para la representación de Things. Gracias a los microservicios, podemos lograr flexibilidad y robustez para nuestro sistema. Al mismo tiempo, el uso de una arquitectura de microservicios hace que el sistema sea mucho más mantenible y fácil de desarrollar.

En el artículo definimos como conectarnos con diferentes dispositivos sin necesidad de ser un gran experto en el manejo de los cientos de protocolos diferentes que se encuentran en ellos. WoTnectivity nos ayuda a lograr este objetivo mediante el uso de un patrón de comunicación común para todas las tecnologías compatibles. La publicación de la librería como un proyecto de código abierto asegura que la comunidad pueda usar WoTnectivity y ayudar a expandirla misma tanto como sea posible agregando más protocolos a los ya soportados.

Actualmente, estamos experimentando con la escalabilidad de digital dices, así como trabajando con los múltiples protocolos que se encuentran en los dispositivos IoT. Como parte de nuestro progreso con Digital Dices, estamos enfocando nuestros esfuerzos en la minimización de los recursos utilizados por nuestro sistema y en cómo establecer una comunicación de máquina a máquina.

References

1. Kölmel, B., Bulander, R., Dittmann, U., Schätter, A., Würtz, G.: Usability requirements for complex cyber-physical systems in a totally networked world. *Conference on Virtual Enterprises*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 253–258, (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. *International Conference on Model and Data Engineering*. Springer, Cham., pp. 195–205, (2019).
3. Batty, M.: Digital Twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, vol. 45, no. 5, pp. 817–820, (2018).
4. W3C, *Web of Things*, <https://www.w3.org/WoT/>, Last accessed 21 Feb 2022
5. Kaebisch, S., Kamiya, T., McCool, M., Charpenay, V., Kovatsch M.: *Web of Things (WoT) Thing Description*. W3C Recommendation, (2022).
6. Lewis, J., Fowler, M.: *Microservices*, <https://martinfowler.com/>, Last accessed 21 Feb 2022.

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

⁵ WoTnectivity-KNX (node.js) - <https://www.npmjs.com/package/wotnectivity-knx/v/1.0.2>

WoTnectivity: estableciendo un patrón de comunicación común para el manejo de dispositivos WoT

7. Mozilla Foundation, *Mozilla IoT Web Things*, <https://iot.mozilla.org/>, Last accessed 21 Feb 2022
8. Ammar, M., Russello, G., Crispo B.: Internet of Things: A survey on the security of IoT frameworks. *Journal of Information Security and Applications*, vol. 38, pp. 08–27, (2018).
9. Kovatsch, M., Matsukura, R., Lagally, M., Kawaguchi, T., Toumura, K., Kajimoto, K.: *Web of Things (WoT) Architecture*, W3C Rec., (2022).
10. Balachander, K.: *Web protocols and practice: HTTP/1.1, networking protocols, caching, and traffic measurement*, Addison-Wesley, (2001).
11. Hunkeler, U., Truong H. L., Stanford-Clark, A.: MQTT-S—A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks *3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops*, pp. 791–798, IEEE, (2008).
12. Wang, V., Salim, F., Moskovits, P.: *The definitive guide to HTML5 WebSocket*. New York: Apress, (2013).
13. KNX Association.: KNX System Specifications. *KNX Standard*, v2.0, vol. 9, (2009).
14. Malhotra, R.: *Java Reactive Development, Rapid Java Persistence and Microservices*, Apress, Berkeley, CA, pp. 251–265, (2019).

Aceleración de planes de radioterapia de intensidad modulada basados en el método de Descenso por Gradiente

Juan José Moreno Riado

TIC-146 Supercomputación – Algoritmos, Departamento de Informática,
Universidad de Almería juanjomoreno@ual.es

Resumen Los tratamientos de radioterapia aplican altas dosis de radiación a las células tumorales para romper la estructura de su ADN, intentando al mismo tiempo minimizar la dosis de radiación absorbida por las células sanas. El diseño personalizado y eficiente de los planes de radioterapia ha sido un gran reto desde el inicio de la aplicación de estas terapias. En este trabajo se implementa un planificador de radioterapia de intensidad modulada. El problema de optimización se formula en base al modelo EUD (Equivalent Uniform Dose) y se resuelve con el método del descenso por gradiente. Se desarrollan dos implementaciones paralelas del planificador, una para arquitecturas multicore y otra para GPU. Se evalúa el planificador en términos de precisión y eficiencia computacional de ambas implementaciones con un caso clínico. Esta evaluación se ha completado con procesadores multinúcleo y GPUs de última generación. Con el modelo desarrollado, se obtienen planes automáticos cercanos a las prescripciones clínicas en un tiempo muy reducido, ya que las implementaciones explotan muy eficientemente las arquitecturas modernas y alcanzan unos elevados índices de aceleración.

Keywords: IMRT · GPGPU · Modelo EUD · Descenso por Gradiente

1. Introducción

La radioterapia externa tiene como objetivo la destrucción de las células cancerígenas con radiación emitida por una fuente externa al cuerpo. Para lograr este objetivo es necesario diseñar planes de radioterapia (RTP) personalizados con una distribución de dosis de radiación tridimensional específica, que destruya eficazmente las células enfermas y a la vez produzca efectos secundarios mínimos en las células sanas. Por tanto, estas terapias necesitan un diseño cuidadoso que tenga en cuenta ambos objetivos contrapuestos.

Se han desarrollado varias terapias de radiación externa relacionadas con diferentes tipos de equipos de radiación. En este trabajo nos centramos en la radioterapia de intensidad modulada (IMRT). Los dispositivos IMRT administran haces de radiación de intensidad variable desde diferentes ángulos. Normalmente, los ángulos son fijados por el planificador. Para controlar la deposición de la dosis de radiación, cada haz se descompone en una cuadrícula regular de miles

Aceleración de planes de IMRT basado en Descenso por Gradiente

de rayos, cuya intensidad de radiación puede controlarse individualmente. Cada RTP está definido por las intensidades específicas de todos los rayos, lo que compone un mapa de fluencia. De este modo, el objetivo es obtener planes que suministren dosis cercanas a las prescritas en los tumores, reduciendo la dosis en los tejidos sanos. Las dosis prescritas se definen mediante la segmentación de las imágenes tomográficas de los pacientes. Tales imágenes están compuestas por millones de vóxeles. Por tanto, la definición de RTPs eficaces ha sido un reto computacional desde el inicio del desarrollo de este tipo de terapia, debido a los objetivos contrapuestos y a las altas dimensiones de los datos implicados [5]. Por ello, se han desarrollado intensos esfuerzos para obtener herramientas informáticas que ayuden a los físicos médicos a encontrar las RTPs más eficaces. Dichas herramientas se basan en la definición de modelos de optimización, cuyas soluciones deben ser aceleradas aplicando técnicas de computación de alto rendimiento.

En el contexto de los primeros dispositivos de radioterapia, el diseño de las RTPs se basaba principalmente en enfoques de ensayo y error que permitían encontrar RTPs aceptables en un tiempo asequible, debido a las reducidas dimensiones de los problemas en aquella época. Esta metodología se denominaba "planificación anticipada". Desde hace varias décadas, las altas dimensiones de los datos involucrados en el diseño de RTPs hacen obligatorio el uso de la optimización matemática para encontrar eficientemente una RTP aceptable, dicha metodología se denomina 'planificación inversa'. Se ha desarrollado una amplia variedad de enfoques de planificación inversa en el contexto de la IMRT, que se basan en diferentes criterios resueltos con diversos métodos de optimización. Actualmente, dos tipos de criterios, físicos y biológicos, se han consolidado en la práctica clínica para diseñar RTPs con sistemas de planificación inversa [5,7,33].

Los criterios físicos definen las restricciones en la distribución de dosis según las prescripciones para cada estructura del plan de tratamiento. Comúnmente, los objetivos son la suma de los valores absolutos, o al cuadrado, de la diferencia entre las dosis administradas y las prescritas en las regiones objetivo (principalmente tejidos enfermos o tumores), sujetas a restricciones mínimas, máximas o de dosis-volumen para los órganos no objetivo (principalmente tejidos sanos) [3,22]. Estos criterios dan lugar a modelos de optimización no convexos cuyas soluciones complejas son el centro de muchos trabajos. Se han propuesto formulaciones de programación lineal [30,28] y se han desarrollado muchos trabajos para resolver esos problemas. Por ejemplo, en [6] se calculan RTPs óptimos mediante la adaptación de métodos de punto interior para manejar las restricciones no convexas de la radioterapia. En [19] se combinan heurísticas con programación lineal para obtener RTPs óptimos. Además, también se han aplicado métodos estocásticos para manejar la no-convexidad [1]. Otros enfoques incluyen modelos convexos para las restricciones de volumen de dosis [4] utilizando la formulación general de [29] para las restricciones de dosis-volumen. Varios autores han demostrado que las restricciones dosis-volumen permiten la existencia de múltiples mínimos locales para los criterios físicos con una gran desviación de los mínimos globales [37,11]. En las últimas décadas se ha realizado un intenso esfuerzo en el diseño

óptimo de RTPs basado en criterios físicos con restricciones dosis-volumen y actualmente sigue siendo una línea abierta.

Los criterios biológicos se basan en modelos de estimación del efecto biológico de la radiación y son de gran interés en la práctica clínica [27]. Por ejemplo, la probabilidad de control tumoral (TCP), la probabilidad de complicaciones en el tejido normal (NTCP) [2], la dosis biológicamente efectiva (BED) [31] y la dosis uniforme equivalente (EUD) [21,38]. Esta última es la más relevante en la práctica clínica y es en la que se centra este trabajo. La EUD se define como una función de la dosis de radiación en cada región (objetivo u órgano de riesgo) y la convexidad de dichas funciones ha sido analizada por varios autores. Cabe destacar el análisis teórico desarrollado en [8] donde se estudia la convexidad de la EUD en función de los valores de uno de sus parámetros de definición, habitualmente denotado como a . Así, se demuestra que para cualquier $a \geq 1$, EUD es una función convexa considerando como variables los mapas de fluencia (x). Además, en [38] se definen funciones objetivo basadas en EUD para las regiones objetivo y de riesgo. Con una selección adecuada de los parámetros correspondientes, ambos tipos de objetivos pueden ser cóncavos y convexos, respectivamente, según el análisis de [8]. Por lo tanto, el problema de optimización de IMRT basado en el modelo EUD puede ser resuelto eficientemente por métodos de gradiente, como se propone en [8].

Más allá de la precisión de los RTPs para obtener la dosis más cercana a la prescrita, el tiempo de diseño de los RTPs es crucial en la planificación de la radioterapia. En las prácticas clínicas, cada plan personalizado se crea en el curso de una serie de interacciones entre un planificador (físico médico) y un oncólogo (médico oncólogo). Para acelerar el flujo de trabajo clínico, una opción ha sido sacrificar la precisión de las planificaciones. Por ejemplo, en [17] el RTP óptimo se calcula con un algoritmo de descenso más pronunciado, pero en lugar de calcular la dosis para todos los órganos en cada paso, la dosis sólo se calcula para algunos vóxeles seleccionados al azar. De esta forma se acelera el diseño de la RTP a cambio de una pérdida de precisión. En la actualidad, la radioterapia adaptativa en tiempo real es una tecnología novedosa que podría realizarse con la combinación de los avances en el seguimiento del movimiento del paciente en tiempo real y los procesos computacionales rápidos [9,15,36,12]. Así, podemos decir que el desarrollo de herramientas rápidas para computar RTPs es de gran interés para mejorar la eficiencia de las prácticas clínicas actuales y futuras de la radioterapia.

Por el contrario, todos los principales procesos relacionados con el diseño personalizado de planificación IMRT tienen enormes demandas computacionales. En consecuencia, además del diseño de algoritmos eficientes, es necesario aplicar las modernas técnicas de computación de alto rendimiento (HPC) para acelerar y ampliar la aplicación de dichos algoritmos. Hay muchos trabajos centrados en la explotación del paralelismo del diseño de RTP en varias plataformas, por ejemplo, en unidades multinúcleo y vectoriales de la CPU [26], o en arquitecturas hardware reconfigurables (FPGAs) [12].

Aceleración de planes de IMRT basado en Descenso por Gradiente

Las Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU) merecen una mención especial como plataformas HPC que pueden acelerar las tareas computacionales intensivas en el diseño de RTPs, tales como la reconstrucción tomográfica, el procesamiento de imágenes de alta resolución espacial/temporal, las simulaciones de dosis de radiación Monte Carlo y la planificación de la radioterapia [14,32,20]. Estos cálculos presentan un paralelismo masivo que puede explotar eficientemente la arquitectura de las GPUs. Además, actualmente las GPUs son recursos consolidados que pueden integrarse en las plataformas en la nube o en los servidores aplicados en las prácticas clínicas. Aunque el diseño de RTPs puede ser fuertemente acelerado en plataformas GPU, es necesario reprogramar los algoritmos o incluso proponer nuevos métodos para explotar mejor el paralelismo de estas plataformas. Un enfoque para facilitar la programación en la GPU se basa en el uso de rutinas o librerías básicas que computan las operaciones más utilizadas en las aplicaciones y son aceleradas de forma óptima por la GPU. De este modo, el programador se centra en expresar los algoritmos en términos de las operaciones más eficientes en la GPU. Además, es importante destacar el fuerte impacto de las comunicaciones CPU-GPU en el rendimiento. Es bien sabido que la GPU es una plataforma aceleradora bajo el control de la CPU. Así, las estructuras de datos de entrada/salida en el procesamiento de la GPU necesitan procesos de comunicación CPU-GPU que pueden penalizar fuertemente el rendimiento de la GPU. Por lo tanto, el software eficiente de la GPU tiene que minimizar dichas comunicaciones.

La computación de planes óptimos está dominada por los productos de matrices dispersas y las operaciones de vectores densos. La EUD se calcula en función de las dosis de radiación depositadas en los vóxeles de cada órgano del paciente. Estas dosis se calculan como productos de las matrices de deposición y de los vectores definidos por los mapas de fluencia. En el contexto de Descenso por Gradiente, la función objetivo, las derivadas y las penalizaciones se calculan sobre las dosis de radiación. Las matrices de deposición son grandes y dispersas, por lo tanto, los cálculos de las dosis consumen la mayor parte de los recursos computacionales del planificador IMRT que pueden ser acelerados eficientemente en las modernas GPUs [35,25]. En esta línea, NVIDIA suministra un amplio conjunto de rutinas relacionadas con las subrutinas de álgebra lineal básica definidas en [10], como cuBLAS [23] y cuSPARSE [25] cuyo rendimiento está optimizado en las modernas GPUs de NVIDIA.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un planificador rápido basado en EUD, el principal criterio biológico utilizado en prácticas clínicas. Las propiedades de convexidad de las funciones objetivo correspondientes permiten aplicar métodos de gradiente para encontrar RTPs cercanos al óptimo, tal y como se sugirió a partir de la definición de EUD [38]. Por lo tanto, hemos seleccionado el método de Descenso por Gradiente (GD) ya que es un método de optimización bien conocido [16,34] y que ya ha sido utilizado para resolver otro modelo de optimización para la planificación de IMRT en GPU [18]. Nuestro trabajo se centra en adaptar y acelerar el método GD en GPU para construir un planificador IMRT eficiente. EL método GD se expresa en términos de operaciones matricia-

les que son aceleradas eficientemente en GPU y además tratando de reducir la sobrecarga de comunicaciones. Según nuestro conocimiento, dicho planificador rápido no se encuentra referenciado en la literatura, a pesar de su gran interés como se ha motivado anteriormente.

El esquema del trabajo es el siguiente: En la Sección 2 se presenta el modelo de optimización basado en EUD para la planificación IMRT. Además, se describe la solución del modelo con GD así como las implementaciones paralelas para multicore y GPU que se han desarrollado. En la Sección 3 se describen los detalles del caso clínico y el conjunto de plataformas computacionales utilizados en la evaluación. En la sección 4 se evalúa ambas implementaciones del planificador basado en EUD y GD con un caso clínico en términos de rendimiento computacional y precisión. En la Sección 5 se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

Notación	Significado
M	Número de vóxeles del tomograma
N	Número de rayos totales
x	Array de un mapa de fluencia
D	Matriz de dosis
$d(x) = Dx$	Array de dosis como función x
S	Conj. de todos los ROIs
$s \in S$	Índice de un ROI específico
S_s	Índices de los vóxeles de s
EUD_s^0	Dosis prescrita para la región s
T	Conjunto de todos los PTVs
$t \in T$	Índice de un PTV específico
R_a	Conj. todos los OARs
R_m	Conj. PTVs virt. con dosis máx.
$r \in R_a \cup R_m$	Índice de un OAR específico

Tabla 1: Notación para la formulación de los modelos IMRT basados en EUD

2. Modelo de optimización basado en EUD para planificación IMRT

La planificación de la radioterapia oncológica es necesaria cuando hay que irradiar un número de localizaciones de células tumorales (Volúmenes Objetivo

Aceleración de planes de IMRT basado en Descenso por Gradiente

de la Planificación - PTVs) para eliminar el tejido maligno, preservando en la medida de lo posible un número de órganos sanos (Órganos en Riesgo - OARs). También hay que preservar el tejido normal (NT). Los PTVs, OARs y NT forman un conjunto predefinido de Regiones de Interés (ROIs). En el caso general, esto requiere una configuración de optimización multiobjetivo, en la que las dosis de radiación sobre las células de los PTVs deben estar dentro de un cierto rango cerca de las dosis prescritas y la radiación sobre los OARs debe ser minimizada. La Tabla 1 introduce la notación utilizada en para la definición de los modelos.

Un enfoque para definir el modelo de optimización de la planificación IMRT define una función objetivo basada en la dosis uniforme equivalente (EUD) utilizando un modelo de supervivencia celular lineal-cuadrático [21]. Es muy interesante en el contexto clínico porque no sólo considera las restricciones de planificación de la dosis en cada órgano mediante funciones de penalización, sino que también expresa la uniformidad de la dosis a través de la dosis uniforme equivalente (EUD) integrada en dichas funciones objetivo. Este enfoque fue introducido por [38] y el modelo de optimización se define como sigue:

$$\text{máx } F(x) \tag{1}$$

con

$$F(x) = \prod_{s \in S} f_s(x) = \prod_{r \in R_a \cup R_m \cup T} f_r(x) \prod_{t \in T} f_t(x) \tag{2}$$

donde

$$f_r(x) \equiv \frac{1}{1 + \left(\frac{EUD_r(x)}{EUD_r^0} \right)^{n_r}} \tag{3}$$

$$f_t(x) \equiv \frac{1}{1 + \left(\frac{EUD_t^0}{EUD_t(x)} \right)^{n_t}} \tag{4}$$

donde EUD_s^0 es la dosis prescrita en la estructura s ; el parámetro n_s indica la importancia de la estructura específica en el modelo de optimización y su papel es similar a un peso o penalización de dicha estructura. Las funciones $EUD_r(x)$ y $EUD_t(x)$ están relacionadas con una métrica biológica que define la dosis uniforme equivalente que obtiene el mismo efecto que la distribución de dosis no uniforme real en las regiones de interés. Las funciones EUD se definen mediante las mismas relaciones para expresar el límite superior o inferior en la dosis de la estructura:

$$EUD_s(x) = \left(\frac{1}{|S_s|} \sum_{j \in S_s} d_j(x)^{a_i} \right)^{\frac{1}{a_i}} \tag{5}$$

donde $|S_s|$ es el número de vóxeles de la región s , $d_j(x)$ es el elemento j del vector de dosis relacionado con el vóxel j en la región s para el mapa de fluencia x . Estos elementos son calculados con la operación $d(x) = Dx$; y a_i es un parámetro relacionado con el efecto de la radiación en la región específica i

(PTV u OAR). Este parámetro puede ajustarse empíricamente mediante procesos de calibración. En general, podemos decir que a_t (a_r) obtiene grandes valores negativos (o positivos).

Es relevante destacar que en este modelo cada PTV está relacionado con dos factores (f_r , f_t) porque se considera como OAR y PTV al mismo tiempo para expresar los dos límites para la dosis prescrita en el tumor. Puesto que el objetivo de la terapia es distribuir en el PTV de índice t la dosis prescrita, EUD_t^0 , pero sin superar el umbral correspondiente, EUD_r^0 , para evitar puntos calientes no deseados en el PTV.

2.1. Método del Descenso por Gradiente.

La función objetivo $F(x)$ es convexa y diferenciable si $a_i > 1 \forall i$, por lo que se puede utilizar un método de descenso de gradiente para explorar posibles planes que maximicen $F(x)$. Para facilitar el cálculo de las derivadas, la optimización puede basarse en $\ln F(x) = \sum_{i \in I} \ln f_i(x)$ ya que ambas funciones comparten sus puntos óptimos porque $0 < F(x) \leq 1 \ln \forall x$. La función gradiente para buscar los máximos de $F(x)$ se puede descomponer por los gradientes de $\ln f_i(x)$ que se pueden expresar en términos de productos de la matriz de dosis D por vectores que consumen la mayor parte de los requerimientos computacionales del planificador.

El Algoritmo 1 describe el proceso iterativo correspondiente al método del descenso por gradiente. Cada iteración comienza por la evaluación de la dosis para el mapa de fluencia, x , que representa el punto de exploración en cada iteración del método del descenso por gradiente. Esta dosis es calculada con la operación $d = Dx$, un producto matriz dispersa por vector denso de grandes dimensiones y que consume un porcentaje muy elevado del tiempo de cómputo del planificador.

Luego se evalúan las funciones $Grad_1$, $Grad_2$ y el vector V para terminar evaluando el gradiente de $F(x)$ después de efectuar otro producto matricial de grandes dimensiones, $\nabla x \leftarrow D^T \cdot V$. Para acelerar el procesamiento del descenso por gradiente se han desarrollado dos implementaciones paralelas una para procesadores multi-núcleo y otra para GPU. Para ello se ha tenido en cuenta la descripción del método en términos de operaciones matriciales y vectoriales y se han utilizado las librerías MKL [13] (CUDA [24]) correspondientes para explotar la potencia computacional de los procesadores multicore (GPU).

3. Plan de estudio y plataformas para la experimentación

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

Algoritmo 1 *descend*

Require:

- 1: **while** *running* **do**
 - 2: $d \leftarrow D \cdot x$
 - 3: $Grad_1()$
 - 4: $Grad_2()$
 - 5: **for** $i \in M$ **do**
 - 6: $V_i \leftarrow \sum_{s \in S} V_i^s$
 - 7: $\nabla x \leftarrow D^T \cdot V$
 - 8: $x \leftarrow \nabla x \cdot step$
-

Algoritmo 2 *Grad₁*

Require: S T R d a n $EU D_0$

- 1: **for** $s \in S$ **do**
 - 2: $EU D_s \leftarrow \left(\frac{1}{|S_s|} \cdot \sum_{j \in S_s} d_j^{a_s} \right)^{\frac{1}{a_s}}$
 - 3: **for** $t \in T$ **do**
 - 4: $f_t \leftarrow \frac{1}{1 + \left(\frac{EU D_t^0}{EU D_t} \right)^{n_t}}$
 - 5: $\frac{\partial \ln F}{\partial EU D_t} \leftarrow \frac{n_t f_t}{EU D_t} \cdot \left(\frac{EU D_t^0}{EU D_t} \right)^{n_t}$
 - 6: **for** $r \in R$ **do**
 - 7: $f_r \leftarrow \frac{1}{1 + \left(\frac{EU D_r}{EU D_r^0} \right)^{n_r}}$
 - 8: $\frac{\partial \ln F}{\partial EU D_r} \leftarrow \frac{-n_r f_r}{EU D_r} \cdot \left(\frac{EU D_r}{EU D_r^0} \right)^{n_r}$
-

Algoritmo 3 *Grad₂*

Require: S M $EU D$ $\frac{\partial \ln F}{\partial EU D}$ d a

- 1: **for** $s \in S$ **do**
 - 2: **for** $i \in M$ **do**
 - 3: **if** $i \in S_s$ **then**
 - 4: $\frac{\partial EU D_s}{\partial d_i} \leftarrow EU D_s \cdot \frac{d_i^{a_s-1}}{\sum_{j \in S_s} d_j^{a_s}}$
 - 5: $V_i^s \leftarrow \frac{\partial \ln F}{\partial EU D_s} \cdot \frac{\partial EU D_s}{\partial d_i}$
 - 6: **else**
 - 7: $V_i^s \leftarrow 0$
-

- **Glándula salival izquierda:** La dosis media no debe superar 26 Gy.
- **Glándula salival derecha:** La dosis media no debe superar 26 Gy.
- **Tronco encefálico:** La dosis máxima no debe superar 60 Gy.
- **Médula espinal:** La dosis máxima no debe superar 50 Gy.
- **Mandíbula:** La dosis máxima no debe superar 70 Gy.
- **Tejido normal:** La dosis máxima no debe superar 74.25 Gy.
- **PTV 54:** Dosis prescrita de 54 Gy.
- **PTV 60:** Dosis prescrita de 60 Gy.

Aceleración de planes de IMRT basado en Descenso por Gradiente

- **PTV 66:** Dosis prescrita de 66 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.

Actualmente se disponen tres implementaciones del método. Las versiones CPU utilizan las librerías Intel MKL, mientras que la versión GPU utiliza cuSPARSE. Para realizar la experimentación se han utilizado tres nodos del clúster del grupo Supercomputación-Algoritmos (TIC-146) de la Universidad de Almería. Los nodos tienen las siguientes especificaciones:

- **Nodo: CPU Ivy Bridge**
 - **CPU:** 2 x Intel Xeon E5-2650 v2 (16 núcleos)
 - **RAM:** 128 GB DDR3 1866 MHz
 - **Sistema operativo:** CentOS 8.2 (OpenHPC 2)
 - **Versión MKL:** 2020.0.166
- **Nodo: CPU Zen 2**
 - **CPU:** 2 x AMD EPYC 7642 (96 núcleos)
 - **RAM:** 512 GB DDR4 3200 MHz
 - **Sistema operativo:** CentOS 8.2 (OpenHPC 2)
 - **Versión MKL:** 2020.0.166
- **Nodo: GPU Volta**
 - **CPU:** 2 x AMD EPYC 7302 (32 núcleos)
 - **GPU:** NVIDIA Tesla V100 (32 GB)
 - **RAM:** 512 GB DDR4 3200 MHz
 - **Sistema operativo:** CentOS 8.2 (OpenHPC 2)
 - **Versión CUDA:** 11.1

4. Resultados experimentales

En esta sección se describen los resultados obtenidos por el método presentado en la Sección 2 utilizando el caso de estudio y las plataformas de prueba descritas en la Sección 3.

En primer lugar, estudiaremos la calidad de los planes generados por el modelo. La Tabla 2 muestra las estadísticas del plan resultante tras 60 segundos de optimización con la implementación GPU. En esta tabla podemos comprobar que se cumplen todas las restricciones descritas anteriormente para todos los órganos en riesgo. Por otra parte, para estudiar la dosis irradiada en los volúmenes tumorales (PTVs) podemos utilizar la Figura 1, que representa el histograma dosis-volumen del mismo plan. Este histograma muestra una adecuada homogeneidad en la dosis depositada en cada una de las tres zonas tumorales.

Aceleración de planes de IMRT basado en Descenso por Gradiente

Otro factor muy importante en la generación de planes es la suavidad del mapa de fluencia. Debido a las limitaciones técnicas de los colimadores multihoja utilizados en IMRT, puede darse el caso de un plan perfecto pero imposible de implementar. Las Figura 2 muestra los *Beam's eye views* (BEV) de dos de los nueve rayos que se utilizan en este plan. Gracias a nuestros colaboradores, hemos introducido estos mapas de fluencias en aceleradores comerciales y hemos podido comprobar que son implementables con mínimos cambios.

Región	Mín	Avg	Máx
Glándula salival I	0.18	15.08	47.81
Glándula salival D	1.43	17.33	52.29
Tr. encefálico +3mm	0.09	5.70	26.85
Médula espinal +3mm	0.38	29.08	39.77
Mandíbula	0.01	40.68	66.04
Tejido normal	0.00	21.09	66.08
PTV 54	53.28	54.49	55.32
PTV 60	58.79	60.48	61.59
PTV 66	65.52	66.34	66.85

Tabla 2: Dosis máxima, media y mínima para las diferentes regiones de interés. En negrita el parámetro que se restringe durante la planificación.

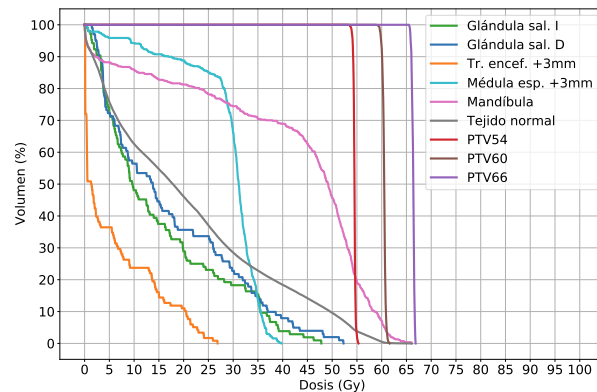
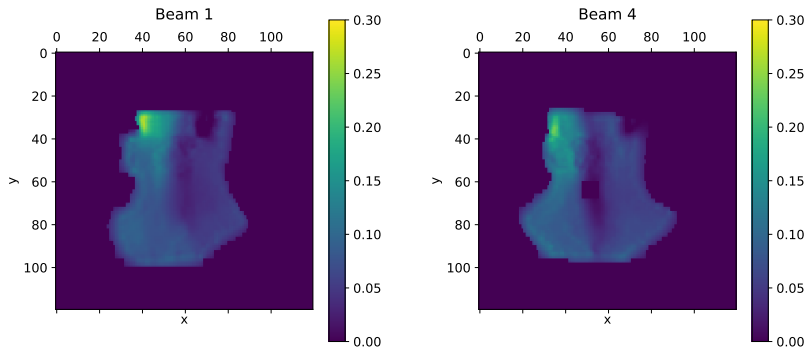


Figura 1: Histograma Dosis-Volumen del plan estudiado en la Tabla 2. Podemos observar la adecuada cobertura dosimétrica de los PTVs y la reducida dosis recibida por los órganos de riesgo.

Aceleración de planes de IMRT basado en Descenso por GradienteFigura 2: *Beam's eye view* de los rayos 1 y 4 del mapa de fluencia.

En segundo lugar, estudiaremos el rendimiento de nuestros programas. La Tabla 3 muestra el 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 $11.9 \times$. En los casos en los que no se dispone de GPU, la versión multicore da una aceleración aceptable, alcanzando alrededor de $6 \times$.

Nodo	Implementación	T (ms)	Acel.
IvyBr	MKL Sec	125.85	1.0 \times
	MKL OMP	19.33	6.5 \times
Zen2	MKL Secuencial	86.40	1.0 \times
	MKL OMP	15.04	5.7 \times
Volta	MKL Sec	87.79	1.0 \times
	MKL OMP	13.59	6.5 \times
	cuSPARSE	7.35	11.9 \times

Tabla 3: Tiempo por iteración (en milisegundos) y aceleración de las implementaciones secuencial, multicore y GPU en las tres plataformas de prueba. Para los resultados multicore se han utilizado 16 hilos en todas las plataformas.

5. Conclusiones

En la práctica clínica es muy importante contar con herramientas que ayuden a los físicos especialistas a generar eficientemente planes precisos, que se acerquen, en la medida de lo posible, a las prescripciones de los oncólogos. Tales prescripciones se establecen de forma personalizada para cada paciente. En este trabajo se ha descrito y evaluado la implementación de un planificador IMRT basado en el modelo EUD para la formulación del problema de optimización y el método del gradiente por descenso para su solución. Se han desarrollado dos implementaciones paralelas del mismo, para arquitectura multicore y para GPU y se ha comprobado la eficiencia computacional de las implementaciones paralelas. Finalmente, la precisión de los resultados es adecuada, pues se satisfacen las prescripciones clínicas. Por lo tanto, con el planificador que se describe se pueden obtener planes automáticos de precisión en solo un minuto si utilizamos una GPU V100 o en dos minutos en un procesador AMD EPYC de microarquitectura Zen 2. Aunque la herramienta necesita ser evaluada con más casos de estudio, estos resultados nos indican que el planificador puede ser competitivo con las herramientas que se están utilizando actualmente en la práctica hospitalaria.

Referencias

1. Ahmad, S.U., Bergen, S.W.: A genetic algorithm approach to the inverse problem of treatment planning for intensity-modulated radiotherapy. *Biomedical Signal Processing and Control* **5**(3), 189–195 (2010)
2. Alber, M., Nussli, F.: An objective function for radiation treatment optimization based on local biological measure. *Physics in Medicine and Biology* **44**(2), 479–493 (1999)
3. Bortfeld, T.: Optimized planning using physical objectives and constraints. *Seminars in Radiation Oncology* **9**(1), 20–34 (1999). [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1053-4296\(99\)80052-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1053-4296(99)80052-6), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053429699800526>, radiation Therapy Treatment Optimization
4. Boyd, A.F.B.U.L.X.S.: A convex optimization approach to radiation treatment planning with dose constraints. *Optimization and Engineering* **20**, 277–300 (2019)
5. Breedveld, S., Craft, D., van Haveren, R., Heijmen, B.: Multi-criteria optimization and decision-making in radiotherapy. *European Journal of Operational Research* **277**(1), 1 – 19 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.019>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221718307148>
6. Breedveld, S., Heijmen, B.: Data for trots – the radiotherapy optimisation test set. *Data in Brief* **12**, 143 – 149 (2017). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.03.037>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340917301130>
7. Cho, B.: Intensity-modulated radiation therapy: a review with a physics perspective. *Radiation Oncology Journal* **36**(1), 1–10 (2018)
8. Choi, B., Deasy, J.O.: The generalized equivalent uniform dose function as a basis for intensity-modulated treatment planning. *Physics in Medicine and Biology*

Aceleración de planes de IMRT basado en Descenso por Gradiente

- 47(20), 3579–3589 (oct 2002). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/47/20/302>, <https://doi.org/10.1088/0031-9155/47/20/302>
9. Colvill, E.e.a.: A dosimetric comparison of real-time adaptive and non-adaptive radiotherapy: A multi-institutional study encompassing robotic, gimbaled, multi-leaf collimator and couch tracking. *Radiotherapy and Oncology* **119**(1), 159 – 165 (2016)
 10. Dongarra, J.: *Numerical Linear Algebra for High-performance Computers*. SIAM (1998)
 11. Ehrgott, M., Güler, Ç., Hamacher, H.W., Shao, L.: Mathematical optimization in intensity modulated radiation therapy. *Annals of Operations Research* **175**(1), 309–365 (Mar 2010). <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0659-4>, <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0659-4>
 12. Gaydadjiev, P.Z.L.V.J.H.O.M.U.O.W.L.G.: Towards real time radiotherapy simulation. *Journal of Signal Processing Systems* **92**(9), 949 – 963 (2020)
 13. INTEL: oneapi math kernel library. <https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/tools/oneapi/components/onemkl.html#gs.27wv5t> (2021), last Accessed on 31-05-2021
 14. 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>, <https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/4/r151>
 15. Keall, P., Poulsen, P., Booth, J.T.: See, think, and act: Real-time adaptive radiotherapy. *Seminars in Radiation Oncology* **29**(3), 228–235 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.semradonc.2019.02.005>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053429619300141>, adaptive Radiotherapy and Automation
 16. Lemaréchal, C.: Cauchy and the gradient method. *Doc Math Extra* pp. 251–254 (2012)
 17. Martin, B.C., Bortfeld, T., Castañón, D.A.: Accelerating imrt optimization by voxel sampling. *Physics in medicine and biology* **52** **24**, 7211–28 (2007)
 18. 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 (oct 2009). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/21/008>, <https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/21/008>
 19. Min, Y.Y.L.C.L.H.R.Y.Z.Z.: Fluence map optimization (fmo) with dose–volume constraints in imrt using the geometric distance sorting method. *Physics in Medicine and Biology* **57**(20), 201–231 (2006)
 20. Neph, R., Ouyang, C., Neylon, J., Yang, Y., Sheng, K.: Parallel beamlet dose calculation via beamlet contexts in a distributed multi-gpu framework. *Medical Physics* **46**(8), 3719–3733 (2019)
 21. Niemierko, A.: Reporting and analyzing dose distributions: a concept of equivalent uniform dose. *Medical physics* **24**(1), 103–110 (1996)
 22. Nill, C.T.T.B.A.N.S.: From physical dose constraints to equivalent uniform dose constraints in inverse radiotherapy planning. *Medical Physics* **30**(9), 2332–2339 (2003)
 23. NVIDIA: cuBLAS library. <https://docs.nvidia.com/cuda/cublas/index.html> (2021), last Accessed on 09-03-2021
 24. NVIDIA: Cuda toolkit documentation v11.2.1. <https://docs.nvidia.com/cuda/index.html> (2021), last Accessed on 9-03-2021
 25. NVIDIA: cuSPARSE library. <https://docs.nvidia.com/cuda/cusparselib/index.html> (2021), last Accessed on 09-03-2021

Aceleración de planes de IMRT basado en Descenso por Gradiente

26. Oelfke, P.Z.C.K.M.F.F.U.: Real-time energy/mass transfer mapping for online 4d dose reconstruction. *Scientific Reports* **8**(1) (2018)
27. Ólafsson, A., Jeraj, R., Wright, S.J.: Optimization of intensity-modulated radiation therapy with biological objectives. *Physics in Medicine and Biology* **50**(22), 5357–5379 (2005)
28. Olafsson, A., Wright, S.J.: Linear programming formulations and algorithms for radiotherapy treatment planning. *Optimization Methods and Software* **21**(2), 201–231 (2006)
29. Romeijn, H., Dempsey, J., Li, J.: A unifying framework for multi-criteria fluence map optimization models. *Physics in medicine and biology* **49** **10**, 1991–2013 (2004)
30. Romeijn, H.E., Ahuja, R.K., Dempsey, J.F., Kumar, A.: A new linear programming approach to radiation therapy treatment planning problems. *Operations Research* **54**(2), 201–216 (2006)
31. Saberian, F., Ghate, A., Kim, M.: Optimal fractionation in radiotherapy with multiple normal tissues. *Mathematical Medicine and Biology: A Journal of the IMA* **33**(2), 211–252 (2015)
32. SB, T.Z.P.F.F.M.T.J.J.X.J.: Multi-gpu implementation of a vmat treatment plan optimization algorithm. *Medical physics* **42**(6) (2015)
33. Shao, M.E.C.G.H.H.L.: Mathematical optimization in intensity modulated radiation therapy. *Annals of Operations Research* **175**(1), 309–365 (2010)
34. Snyman, J., Wilke, D.: *Practical Mathematical Optimization - Basic Optimization Theory and Gradient-Based Algorithms*. Springer (2018)
35. Vazquez, F., Fernandez, J., Garzon, E.: Automatic tuning of the sparse matrix vector product on gpus based on the ellr-t approach. *Parallel Computing* **38**(8), 408–420 (2012)
36. Wiersma, R.D., Liu, X.: A conceptual study on real-time adaptive radiation therapy optimization through ultra-fast beamlet control. *Biomedical Physics & Engineering Express* **5**(5), 055016 (aug 2019). <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ab3ba9>, <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ab3ba9>
37. Wu, C., Jeraj, R., Mackie, T.R.: The method of intercepts in parameter space for the analysis of local minima caused by dose–volume constraints. *Physics in Medicine and Biology* **48**(11), N149–N157 (may 2003)
38. Wu, Q., Mohan, R., Niemierko, A., Schmidt-Ullrich, R.: Optimization of intensity-modulated radiotherapy plans based on the equivalent uniform dose. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* **52**(1), 224–235 (2002)

IoT aplicado al sector agroindustrial, uso de modelos como servicio y arquitectura cloud

Manuel Muñoz Rodríguez

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

Resumen El siguiente artículo describen los avances obtenidos durante el año 2021/2022 relacionados con la temática de la tesis. Esta se centra en el uso y desarrollo de una arquitectura IoT aplicada al sector agroindustrial. Desde el inicio de la tesis se han centrado todos los esfuerzos en desarrollar una arquitectura cloud IoT para la integración de diferentes fuentes de datos comerciales o de investigación en una misma arquitectura. Además, se ha conseguido obtener un valor añadido a estos datos generando sistemas para la ayuda a la toma de decisiones (DSS) en forma de servicio por medio de peticiones HTTP. Este tipo de servicios recibe el nombre Greenhouse Models as a Service (GMaaS) termino desarrollado dentro de la tesis. Se han realizado contribuciones de alto impacto en este sector y publicaciones en revistas divulgativas. En la actualidad se está realizando una nueva propuesta de arquitectura cloud IoT enfocada al sector industrial especialmente en el cultivo de las microalgas dentro del proyecto Sabana. Esta arquitectura trata de aportar un modelo de datos estándar, servicios para la integración de datos, dashboard para la visualización y explotación de los datos con el objetivo de obtener un mejor control y supervisión de la planta.

Keywords: IoT · cloud · DSS · HTTP · GMaaS.

1. Introducción

El Internet de las Cosas es la comunicación entre dispositivos físicos con una conexión de red que permite recopilar e intercambiar datos entre ellos. El uso de esta tecnología es una gran oportunidad para que los agricultores controlen sus cultivos y aumenten sus rendimientos. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, el mundo tendrá que aumentar la producción en un 70 % en un período de 30 años [1].

Esta tesis se enmarca en el proyecto europeo Internet of Food and Farms 2020, que tiene como objetivo desarrollar soluciones IoT inteligentes para el sector agroindustrial y agrario. Además se está ampliando al sector industrial gracias al proyecto Sabana.

Uno de los principales objetivos de la tesis es la propuesta de una arquitectura IoT que ayude a solucionar los problemas de interoperabilidad que existe actualmente en el sector agrario e industrial. Cada empresa encargada de la venta de sensores y actuadores dispone de su propia plataforma cerrada e inaccesible

Title Suppressed Due to Excessive Length

para la consulta de los datos, lo que plantea un problema a la hora de controlar una planta ya que es necesario consultar diferentes plataformas para obtener la información, lo que dificulta la comunicación entre sistemas.

Hoy en día, el sector industrial está sufriendo una gran cantidad de cambios y debe de adaptarse a esta nueva revolución industrial basada en el uso de nuevas tecnologías. Nuevos conceptos como IoT, Cloud Computing [2], 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) [4] 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 [5].

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 [6] [7], el procesamiento de datos en Big Data [8], la computación en nube [9], y la inteligencia artificial o Deep Learning [10]. 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 [11].

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 [12]. 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 arquitectura cloud IoT basada en servicios en línea sin ninguna dependencia de software/dispositivos. La arquitectura propuesta se denomina Greenhouse Models as a Service (GMaaS) [13], donde se puede acceder a los modelos de clima, crecimiento de cultivos y riego a través de un servicio REST API. Además, se está ampliando dicha arquitectura IOT al sector industrial especializado en el cultivo de las microalgas para ayudar en la

Title Suppressed Due to Excessive Length

gestión de la planta. Esta nueva arquitectura se encuentra dentro del proyecto Sabana en el IFAPA de la universidad de Almería. Tratando de ayudar en la integración de los diferentes sensores en cada fotobiotector de la planta y exponer estos datos a empresas y centros de investigación asociados.

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. Realización de ensayos experimentales para validar la tecnología desarrollada.

3. Avances

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

- Este año se está realizando el proceso de patente de la aplicación iVeg [15] (ver Fig. 1) diseñada dentro de esta tesis, la cual permite a los agricultores y técnicos de campo poder realizar una monitorización completa en tiempo real del estado del invernadero. Además, esta aplicación dispone de datos históricos y de la integración de GMaaS [13] sistema desarrollado anteriormente en la tesis, lo que permite en formato gráfico hacer uso de los modelos

Title Suppressed Due to Excessive Length

como servicio entre los que destacan predicciones climatológicas futuras en el interior del invernadero, crecimiento del cultivo y necesidades de riego futuras.



Figura 1. GMaaS iVeg

- Actualmente se está desarrollando una nueva arquitectura IoT orientada al sector industrial en especial al cultivo de las microalgas (ver Fig. 1). Esta arquitectura ya se encuentra en funcionamiento e integra datos de diferentes sensores y fotobioreactores a través del protocolo Modbus tcp y usando un servidor OPC UA para la comunicación entre dispositivos como sistemas SCADA. Además, esta información es enviada a Fiware con el modelo de datos estar OMA NGSIV2 para la integración de datos. Los datos de la planta son suministrados a los centros de investigación y empresas por medio de servicios HTTP o por medio de una interfaz gráfica que permite extraer los datos de forma sencilla. Esta nueva arquitectura se encuentra actualmente en redacción en un nuevo paper que será enviado a finales de este mes a una revista.
- Dado el alto impacto en la creación de GMaaS desde la prestigiosa empresa estadounidense MathWorks se ha premiado con un caso de éxito la creación de estos modelos como servicio. Se realizó una entrevista personal y posteriormente fue publicada en su sitio web y redes sociales dentro de la categoría casos prácticos de éxito [16].
- *A New IoT-based Platform for Greenhouse Crop Production* este trabajo propone una solución en la nube para construir una plataforma de Internet de las Cosas (IoT) aplicada en un contexto de producción de cultivos de invernadero. Se puede acceder a los datos históricos y en tiempo real, así como a los modelos de predicción, mediante servicios web RESTful (Representational State Transfer) (ver Fig. 2) desarrollados para tal fin. IVEG (ver Fig. 1) es la aplicación desarrollada para la gestión e integración de estos

Title Suppressed Due to Excessive Length

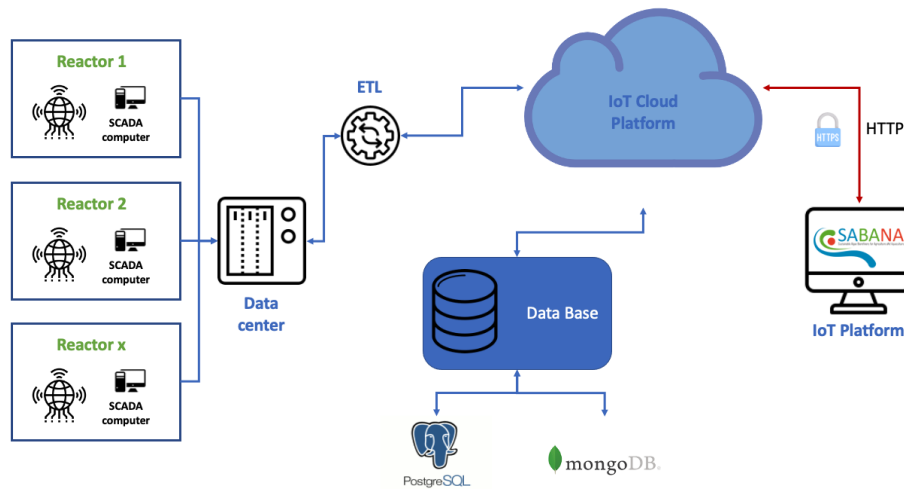


Figura 2. Arquitectura del sistema Sabana

servicios. Este artículo fue publicado en una de las revistas más prestigiosas de IEEE IoT [15], con un índice de impacto de 9.9 (Q1).

- A raíz del artículo *An IoT Architecture for Water Resource Management in Agroindustrial Environments: A Case Study in Almería (Spain)* Este artículo aporta una arquitectura de gestión del agua basada en IoT que se aplica en áreas agroindustriales, incluidas plantas desalinizadoras, conexiones a redes de servicios públicos y varios agentes consumidores. Fue publicado en 2020 en la revista Sensors [14]. Además, en 2021 se recibió una certificación por parte del editor jefe de la revista como uno de los artículos recomendados para los lectores.
- Como caso de éxito del artículo *Experiencias en el uso de Internet de las Cosas en las tareas de producción en invernaderos mediterráneos* publicado en el año 2020 se obtuvo como recompensa la selección de dicho artículo para ser publicado en una revista de divulgación portuguesa titulada APH A revista da Associação Portuguesa de Horticultura. En este trabajo se presentó un caso de estudio real de aplicación de IoT en agricultura protegida en el sureste del mediterráneo.

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.

Dado el correcto funcionamiento y repercusión de la arquitectura IoT propuesta en el 2021 aplicada al sector agroindustrial [15] este año se han centrado

Title Suppressed Due to Excessive Length

los esfuerzos en tratar de ampliar dicha arquitectura y que sea escalable a cualquier sistema industrial. Por este motivo se ha diseñado una nueva arquitectura que permite recoger datos de nuevas fuentes de datos por medio de OPC UA y traducirla al estándar OMA NGSI de FIWARE núcleo de dicha arquitectura. Actualmente, se está terminando de redactar el artículo para ser enviado a una revista. Además, se está realizando la patente de Iveg aplicación desarrollada dentro del marco de la tesis para la monitorización y asesoramiento del cultivo a los agricultores y técnicos. Actualmente se encuentra en producción con 8 agricultores en funcionamiento. Durante la tesis se han recibido premios en relación a artículos enviados a revista de alto impacto [15] [14] y revistas de divulgación.

Referencias

1. Miranda, J. et al. (2019) 'Sensing, smart and sustainable technologies for Agri-Food 4.0', *Computers in Industry*. Elsevier B.V., 108, pp. 21–36. doi: 10.1016/j.compind.2019.02.002.
2. Goap, A. et al. (2018) 'An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies', *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, pp. 41–49. doi: 10.1016/j.compag.2018.09.040.
3. 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.
4. Goap, A. et al. (2018) 'An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies', *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, pp. 41–49. doi: 10.1016/j.compag.2018.09.040.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.

Title Suppressed Due to Excessive Length

12. Rodríguez, F. et al. (2014) Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth. doi: 10.1007/978-3-319-11134-6.
13. 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.
14. 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.
15. Munoz, M.; Guzman, J.L.; Sanchez, J.A.; Rodriguez, F.; Torres, M.; Berenguel, M. A New IoT-based Platform for Greenhouse Crop Production. IEEE Internet Things J. 2020, 1–1, doi:10.1109/jiot.2020.2996081.
16. Mathworks (2021) Universidad de Almería Develops and Deploys Greenhouse Models as a Service to Maximize Crop Production - MATLAB Simulink. Available at: <https://es.mathworks.com/company/user-stories/universidad-de-almeria-develops-and-deploys-greenhouse-models-as-a-service-to-maximize-crop-production.html>.

Algoritmo cuántico de segmentación de doble umbral para agricultura de precisión

Luis O. López¹

Departamento de Informática, Universidad de Almería, ceiA3
lol1766@inlumine.ual.es

Abstract. Las técnicas de procesado de imágenes han dotado a la agricultura de precisión de varias herramientas de análisis, seguimiento y/o diagnóstico. La captura de información de los campos y cultivos, así como su posterior procesamiento de manera eficiente es un campo de interés. Una vez que la información es captada utilizando una gran variedad de cámaras y/o sensores, normalmente se realiza un procesamiento de estos datos para que su posterior análisis sea más fiable. El diseño de algoritmos cuánticos de procesamiento de imágenes ha alcanzado un gran interés en los últimos años debido a las características intrínsecas de la computación cuántica: un alto nivel de paralelismo y una baja complejidad temporal. Una de las líneas abordadas en esta tesis ha sido el desarrollo de un algoritmo tolerante a fallos para la segmentación de umbral dual. Esta segmentación podría ser muy interesante para su aplicación sobre imágenes test que muestren el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Las imágenes NDVI se utilizan para fines tan importantes como: la distinción entre materia vegetal y suelo, el control de la salud de las plantas, la densidad de materia vegetal, etc. El algoritmo cuántico desarrollado tiene un alto nivel de paralelismo, una complejidad temporal polinómica y se basa en la optimización de un circuito cuántico comparador. Dicho circuito cuántico ha sido evaluado en base a unas métricas consolidadas, demostrando superar a otros presentes en el estado del arte.

Keywords: Procesamiento de imágenes cuánticas · Segmentación de doble umbral · Agricultura de precisión.

1 Introducción

El procesamiento cuántico de imágenes (QIMP) es un campo interdisciplinar que se dedica principalmente a utilizar computación cuántica y procesamiento de información cuántica para diseñar y trabajar con imágenes cuánticas [1, 2]. En los últimos, debido al auge de la computación cuántica, el procesamiento cuántico de imágenes está tomando una gran relevancia. Concretamente, en [3], se muestra una revisión de representaciones cuánticas de imágenes, siendo las más representativas: la representación de Qbit Lattice [4], la representación flexible de imagen cuántica (FRQI) [5], y la Nueva Representación Cuántica Mejorada

Algoritmo cuántico de segmentación de doble umbral

(NEQR) [3]. En la representación Qbit Lattice, la información de color se codifica en las amplitudes de probabilidad de un estado de qubit, pero la información de posición no se codifica específicamente por qubits; por lo tanto, es difícil controlar la información de posición en la tarea de procesamiento de imágenes. El objetivo de la Representación FRQI es proporcionar una representación cuántica de imágenes que permita una codificación eficiente de los datos clásicos en un estado cuántico y el posterior uso de operadores para las operaciones de procesamiento de imágenes. En este caso, la codificación de la imagen clásica en un estado cuántico requiere un número polinómico de puertas simples [7]. La limitación del FRQI es que utiliza un qubit para almacenar la información de la escala de grises del píxel, lo que impide realizar transformaciones complejas de la imagen. El NEQR fue creado para mejorar el FRQI aprovechando el estado base de una secuencia de qubits para almacenar el valor de la escala de grises de la imagen [6]. NEQR ofrece las siguientes ventajas sobre FRQI [6]: aceleración cuadrática de la complejidad temporal para preparar la imagen cuántica NEQR, óptima relación de compresión de la imagen, recuperación precisa de la imagen después de la medición (a diferencia de la probabilística de FRQI), y capacidad de que se puedan realizar operaciones más complejas sobre la imagen.

Dentro del campo del procesamiento de imágenes, la segmentación es una operación clave. La segmentación consiste en dividir una imagen en varias regiones (grupos de píxeles) y asignarle una categoría a cada píxel de la imagen analizada. En los últimos años se han propuesto varios algoritmos de segmentación cuántica de imágenes, la mayoría de ellos basados en la representación NEQR. Uno de los principales algoritmos cuánticos de segmentación basado en el histograma fue propuesto por Caraiman et al. [8]. Dicho algoritmo, aunque no incluía el oráculo necesario para poder diseñarlo sobre ordenadores cuánticos, de forma teórica permitía conseguir un aumento significativo de la velocidad con respecto a algoritmos clásicos, explotando el rendimiento de la transformada cuántica de Fourier y de la amplificación cuántica. Más tarde, el mismo autor propuso otro algoritmo de segmentación de imágenes cuánticas basado en el umbral, en este caso proporcionando el oráculo, pero su alto requerimiento de número de qubits (del orden de 50) dificultó su uso en plataformas reales [9]. El algoritmo cuántico de segmentación de imágenes basado en el algoritmo de búsqueda cuántica fue propuesto por Li et al. en [10]. Sin embargo, el oráculo tampoco fue especificado. De hecho, todos los algoritmos mencionados anteriormente no fueron simulados ni en ordenadores cuánticos ni sobre plataformas reales. La referencia más reciente de algoritmo cuántico para segmentación es el algoritmo de segmentación de imágenes cuánticas de doble umbral, diseñado en [11]. Este algoritmo se sustenta en optimizar la operación de comparación necesaria en el algoritmo de segmentación de doble umbral, proporcionando un algoritmo de segmentación que reduce en tiempo computacional a los anteriormente mencionados. Además, los autores proporcionan y prueban su oráculo sobre un simulador y una plataforma real.

La segmentación de imágenes es especialmente relevante en el campo de la agricultura de precisión. De hecho, el uso de algoritmos cuánticos de seg-

Algoritmo cuántico de segmentación de doble umbral

mentación aplicados a la agricultura de precisión es un campo emergente sobre el que aún quedan muchos estudios por realizar. Concretamente, la computación cuántica aplicada a la segmentación sobre terrenos podría servir tanto para analizar la evolución de terrenos que han sufrido desastres naturales o incendios, como para alertar de situaciones con un impacto negativo en la productividad (detección temprana de plagas y enfermedades, estado nutricional de las plantas o estrés hídrico o salino).

El objetivo de este trabajo es mejorar el comparador propuesto en [11] para conseguir un algoritmo de segmentación que mejorará a los actuales que hay en el estado del arte y, además, aplicarlo a un ejemplo concreto de agricultura de precisión sobre una imagen NDVI. Las imágenes NDVI representan el índice de vegetación más utilizado para conocer el estado de la vegetación en general y de los cultivos en particular, por lo que la segmentación cuántica de imágenes NDVI es de interés para tareas como, por ejemplo, la discriminación entre materia vegetal y suelo o el estudio del nivel de salud de las plantas de una región.

2 Avances

En el artículo presentado en las anteriores jornadas de informática, describimos en detalle una metodología para cuantificar automáticamente el impacto de un posible herbicida sobre la evolución de un cultivo de girasol y el crecimiento de las malas hierbas mediante imágenes multispectrales. En dicho estudio, realizamos un preprocesamiento para corregir las imágenes procedentes de la cámara multi-espectral y luego realizamos una segmentación clásica utilizando tanto las bandas multi-espectrales NIR, GRE, RED y REG, como algunos parámetros calculados a partir de éstas para lograr la clasificación de los píxeles de la imagen en tres clases (suelo, maleza y girasol). Uno de los parámetros calculados fue el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) [12], que es un índice de gran aplicación para determinar la vegetación, ya que es eficiente para el análisis y monitoreo de la materia vegetal en general. El índice NDVI se puede formular como:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Según este índice, las plantas tienen valores positivos entre 0,2 y 1, siendo los valores mayores que 1 el suelo.

En este trabajo hemos querido ir un paso más allá y, tomando como base la segmentación de imágenes en base al parámetro NDVI, hemos estudiado algoritmos cuánticos de segmentación de imágenes, centrándonos en el algoritmo de segmentación de imágenes cuánticas de doble umbral, propuesto en [11] y que mejora a otros del estado del arte en términos de complejidad temporal.

Nuestro interés se ha centrado en el uso de la computación cuántica porque a pesar de que es un paradigma disruptivo y muy innovador, aún quedan muchos retos para que la computación cuántica sea práctica. Una de sus principales limitaciones es que los ordenadores cuánticos son difíciles de programar porque sus modelos computacionales son muy distintos de los clásicos y todos los algoritmos

Algoritmo cuántico de segmentación de doble umbral

necesitan ser rediseñados. El modelo de programación más conocido se basa en los circuitos cuánticos, donde cada procedimiento específico implica el diseño de circuitos cuánticos particulares. Debido a la escasez de recursos cuánticos y la fuerte sensibilidad de los ordenadores cuánticos al ruido, el diseño de los circuitos cuánticos debe optimizarse en número de recursos y debe considerar la tolerancia a los fallos.

El problema a resolver consiste en segmentar una imagen en escala de grises utilizando dos umbrales de referencia en escala de grises. Para facilitar la introducción de la información, la escala de grises se limita a los valores $[0, 7]$, que se codifican utilizando tres qubits. Supongamos que la imagen original es $f(x, y)$, T_1 es el umbral inferior, T_2 es el umbral superior y $g(x, y)$ es la imagen de salida. El algoritmo de segmentación de doble umbral puede describirse como muestra la siguiente ecuación:

$$g(x, y) = f(x, y), \quad T_1 \leq f(x, y) \leq T_2$$

$$g(x, y) = 0. \quad \text{En cualquier otro caso.}$$

De tal ecuación se desprende que se necesita un comparador cuántico para realizar la segmentación. La función de este comparador es comparar los valores de la escala de grises de la imagen con los dos umbrales, y por tanto, la operación de comparación tiene lugar entre dos números de 3 qubits. Las figuras 1 y 2 muestran los dos circuitos cuánticos comparadores que hemos propuesto. Dichos circuitos realizan la comparación entre dos números $|a\rangle = |a_2\rangle |a_1\rangle |a_0\rangle$ y $|b\rangle = |b_2\rangle |b_1\rangle |b_0\rangle$. En tales figuras, los tres qubits superiores codifican el número a y los siguientes codifican el número b . El resultado de la comparación se refleja en dos qubits auxiliares de salida, que se denominan $|x\rangle$ e $|y\rangle$. Podemos obtener tres posibles resultados: (1) $x = 0$ e $y = 0$, entonces $a = b$; (2) $x = 1$ e $y = 0$, entonces $a > b$; y (3) $x = 0$ e $y = 1$, entonces $a < b$.

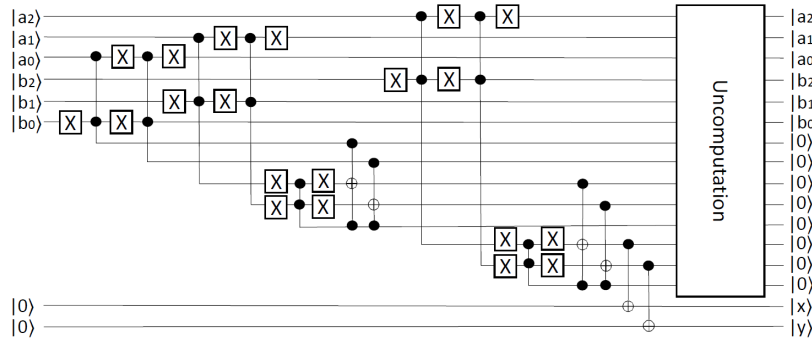


Fig. 1. Primera propuesta de circuito cuántico comparador.

Algoritmo cuántico de segmentación de doble umbral

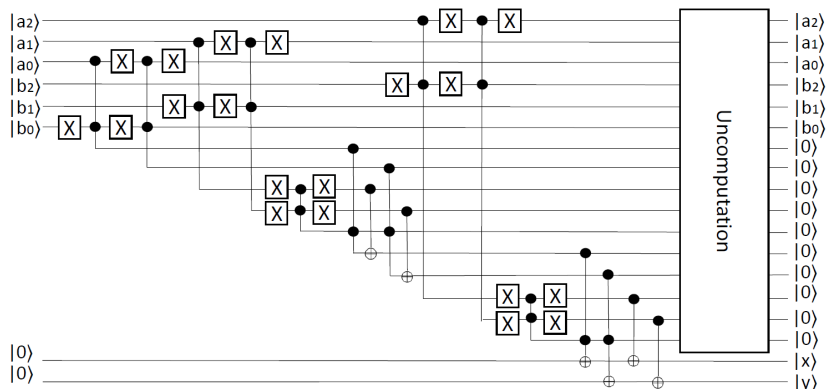


Fig. 2. Segunda propuesta de circuito cuántico comparador.

3 Conclusiones

El algoritmo de segmentación cuántico implementado ha sido validado en términos del coste cuántico del circuito comparador que hemos optimizado. El coste cuántico del comparador de partida (propuesta de [11]) era de 168; mientras que los dos circuitos que se han diseñado tienen un coste cuántico de 88 y 48 para la primera y segunda propuesta, respectivamente. Los dos circuitos propuestos mejoran a los del estado del arte y supondrían una mejora relevante en el algoritmo cuántico de segmentación de doble umbral. El trabajo que se está desarrollando actualmente es la utilización de imágenes de agricultura de precisión como test para este algoritmo cuántico. El uso de la computación cuántica sobre el campo de la agricultura de precisión está ocurriendo de forma emergente y, actualmente, existen muy pocos estudios que utilicen la computación cuántica para tareas relacionadas dicha área. Por tanto, estamos intentando utilizar como imágenes de test imágenes que contienen índices que son de interés en la agricultura, como es el parámetro NDVI, o el índice Normalized Burn Ratio (NBR), que es un parámetro basado en el espectro NIR que nos permite cuantificar daños forestales o analizar la evolución de la regeneración de la cubierta vegetal tras un incendio.

Agradecimientos Este trabajo ha sido apoyado por los proyectos: RTI2018-095993-B-I00 (financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ FEDER "Una forma de hacer Europa"); P20_00748, UAL2020-TIC-A2101, y UAL18-TIC-A020-B (financiados por la Junta de Andalucía y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FEDER).

References

1. Iliyasa, A.M. : Hacia la realización de aplicaciones de procesamiento de imágenes y video seguras y eficientes en computadoras cuánticas. *Entropía*. **15**(8): 2874-2974. (2013)
2. Venegas-Andraca, Salvador E. : Paseos cuánticos discretos y procesamiento de imágenes cuánticas. Universidad de Oxford, Oxford (2005)
3. Yan, F., Iliyasa, M.A., Venegas-Andraca, E.S.: A survey of quantum image representations. *Quantum Inf. Process* **15**(1), 1–35 (2016)
4. Salvador, E., Venegas, A., Sougato, B.: Storing, processing, and retrieving an image using quantum mechanics. *Quantum Information and Computation*. International Society for Optics and Photonics, **5105**, 137–148 (2003)
5. Le, Q.P., Dong, F., Hirota, K.: A flexible representation of quantum images for polynomial preparation, image compression, and processing operations. *Quantum Inf. Process.* **10**(1), 63–84 (2011)
6. Zhang, Y., Kai, L., Gao, Y., Wang, M.: NEQR: a novel enhanced quantum representation of digital images. *Quantum Inf. Process.* **12**(8), 2833–2860 (2013)
7. Le, Q.P., Dong, F., Hirota, K.: Flexible Representation of Quantum Images and Its Computational Complexity Analysis. *Fuzzy Systems Symposium*, Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics **25**, 185-185 (2009)
8. Caraiman, S., Manta, I.V.: Histogram-based segmentation of quantum images. *Theor. Comput. Sci.* **529**, 46–60 (2014)
9. Caraiman, S., Manta, I.V.: Image segmentation on a quantum computer. *Quantum Inf. Process.* **14**(5), 1693–1715 (2015)
10. Li, H.S., Qingxin, Z., Lan, S., Shen, C.Y., Zhou, R., Mo, J.: Image storage, retrieval, compression and segmentation in a quantum system. *Quantum Inf. Process.* **12**(6), 2269-2290 (2013)
11. Suzhen Yuan, Chao Wen, Bo Hang, Yu Gong: The dual-threshold quantum image segmentation algorithm and its simulation. *Quantum Information Processing*. **19**(425), 1–21(2020)
12. Weier, J., Herring, D.: *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)* . NASA Earth Observatory, Washington DC. (2000)

Modelado y control del proceso de producción de microalgas mediante estrategias de aprendizaje automático

Pablo Otálora Berenguel

Universidad de Almería, p.otalora@ual.es

Abstract. La producción de microalgas a nivel industrial es un proceso atractivo debido a sus múltiples aplicaciones, entre las que destaca el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, su marcado carácter biológico genera grandes dificultades a la hora de lograr su optimización. Esto implica la necesidad de grandes esfuerzos, tanto a la hora de obtener modelos descriptivos de diferentes aspectos del sistema, como para desarrollar estrategias de control que logren maximizar la productividad. Ante esta casuística, las técnicas de aprendizaje automático basadas en datos se presentan como una alternativa atractiva para atajar estos problemas. Este tipo de técnicas, cuando se encuentran respaldadas por un volumen suficiente de datos, son capaces de adaptarse muy bien a circunstancias diversas en problemas de elevada complejidad. Esta tesis tiene como objetivo el uso de técnicas basadas en datos para abordar el problema de optimización, modelado y control de la producción de microalgas, validando los resultados obtenidos tanto en simulación como en sistemas de producción reales. Este trabajo presenta los avances logrados en dicha tesis en los cursos 2020/21 y 2021/22.

1 Introducción

La sociedad contemporánea se encuentra en constante crecimiento y desarrollo. Este crecimiento lleva consigo un aumento en la demanda de recursos, tales como la energía o el agua limpia. Asimismo, implica un incremento en las emisiones de CO_2 que conlleva el aumento del efecto invernadero, con consecuencias nefastas para el planeta. Por estas cuestiones, la sociedad se enfrenta a un importante problema de sostenibilidad de recursos y ambiental, y se vuelve prioritario encontrar soluciones a estos problemas, o alternativas a los métodos con los que tradicionalmente han sido afrontados.

En este contexto, la producción industrial de microalgas se presenta como una excelente opción. Las microalgas son microorganismos fotosintéticos con capacidad para crecer y reproducirse en una gran variedad de entornos, sin necesidad de suelo fértil o agua limpia [3]. Poseen una gran capacidad de producción de biomasa, por lo que son una potencial fuente de biocombustible [13]. Asimismo, su composición es muy interesante, por lo que permiten la obtención de productos de alto valor, tales como bioestimulantes, cosméticos o suplementos alimenticios [23]. Esto, unido a su capacidad de absorber nutrientes como el fósforo, el

Modelado y control de producción de microalgas con aprendizaje automático

nitrógeno o el carbono del medio en el que se encuentran, las convierten en una tecnología idónea para afrontar los problemas de tratamiento de aguas residuales (cuyos principales contaminantes son estos) y absorción de emisiones de CO_2 [2, 25].

La producción de microalgas es tradicionalmente llevada a cabo de dos formas distintas. La primera de estas es en fotobiorreactores tubulares, que consisten en tuberías forzadas a través de las cuales circula el medio en que se encuentran las microalgas [9]. En este tipo de reactores, la luz que incide sobre las microalgas y su temperatura pueden ser fácilmente controladas. Los nutrientes son aportados externamente, de forma que se consigue que el cultivo se encuentre en condiciones óptimas y se evita la entrada de contaminantes externos [29]. Sin embargo, este tipo de producción involucra desventajas como un mayor coste y consumo de energía, y sobre todo, una mayor dificultad para ser llevada a cabo a gran escala. La alternativa a los fotobiorreactores tubulares son los reactores abiertos o *raceway*, en los cuales se lleva a cabo la mayor parte de la producción mundial de biomasa de microalgas [5]. Se trata de grandes piscinas por las cuales circula el medio con las microalgas, recibiendo la radiación necesaria directamente del sol. Este tipo de producción presenta las desventajas de que es más fácilmente contaminable, debido a que el cultivo se encuentra abierto, así como la dificultad de optimizar las condiciones a las que se encuentra [4]. No obstante, su escalabilidad, sus bajos costes y su bajo consumo de energía, convierten este tipo de producción en la opción más implantada [30].

Sin embargo, la sostenibilidad de esta tecnología no es suficiente para justificar su uso en lugar de las alternativas tradicionales. Para que sea realmente competitiva, la productividad debe ser maximizada, optimizando el proceso tanto en las fases de diseño como en operación [7]. Esta optimización implica un conocimiento exhaustivo del sistema, tanto a nivel biológico como dinámico. Sin embargo, la naturaleza biológica del sistema siempre ha dificultado su caracterización [10]. El proceso es altamente complejo y no lineal, además de presentar una gran variabilidad a lo largo del tiempo. Por estos mismos motivos, el control de las variables de interés del proceso también resulta un reto [14].

Estos problemas han sido enfrentados haciendo uso comúnmente de modelos clásicos, bien sean basados en primeros principios o funciones de transferencia en torno a un punto de operación obtenidas experimentalmente [8, 11]. En base a estos, se han establecidos estrategias de control clásicas, tales como control PID, todo-nada o MPC [27, 22]. Otros problemas relacionados con la caracterización de otros aspectos del sistema, como la composición del cultivo, son a menudo afrontados mediante métodos tradicionales como el análisis en microscopio por parte de un experto [6]. Estas soluciones, aunque efectivas, son a menudo laboriosas, requieren de un reajuste constante, o a menudo no son absolutamente eficientes [15].

Ante este tipo de problemas, resulta interesante el enfoque de las estrategias de aprendizaje automático basadas en datos. En la actualidad, la gran cantidad de datos del que se dispone, unido al incremento de la capacidad computacional, está fomentando el uso de este tipo de técnicas en una gran variedad de

Modelado y control de producción de microalgas con aprendizaje automático

entornos, con gran éxito a la hora de adaptarse a distintos problemas de elevada complejidad [18, 16]. Estas técnicas tienen la capacidad de resolver problemas sin estar explícitamente programadas para ellos, extrayendo relaciones entre los datos proporcionados, aprendiendo de estos y adaptándose a otras circunstancias [28]. Son empleadas para aplicaciones tan variadas y complejas como reconocimiento o clasificación de imágenes, recomendaciones de productos o música, procesamiento y generación de textos, conducción autónoma, ...

A pesar de su gran potencial, las estrategias de aprendizaje automático aún no han visto mucho uso en el ámbito de la producción de microalgas [32]. A priori se presentan como una excelente opción, debido a su capacidad de adaptarse a una amplia variedad de circunstancias, y a la elevada complejidad del problema [26]. Disponiendo de una capacidad computacional suficiente, así como de un volumen de datos adecuado, estas técnicas resultan atractivas para afrontar este tipo de problemas [17].

Partiendo de esta premisa, el objetivo de esta tesis es el estudio y la aplicación de distintas técnicas de aprendizaje automático basadas en datos, al modelado y control de distintos aspectos del proceso de producción de microalgas, siendo respaldado por las instalaciones disponibles en el centro IFAPA de la Universidad de Almería y un volumen considerable de datos históricos del proceso de producción. Los modelos y estrategias de control desarrollados serán validados en simulación y en el sistema real, con el objetivo de demostrar el potencial de este tipo de técnicas en procesos tan complejos como el estudiado.

2 Avances

En esta sección se presentan los avances logrados durante el desarrollo de esta tesis.

2.1 Modelo dinámico basado en red neuronal

En este trabajo, el objetivo es obtener un modelo de red neuronal para predecir variables de interés en un fotobiorreactor *raceway* a lo largo del tiempo. Estas variables son el pH y el oxígeno disuelto en un punto determinado del reactor, pues son las variables con más influencia en la productividad y aquellas que se suelen controlar [24]. El propósito es desarrollar el modelo de forma gradual, comenzando con la predicción única del pH, y posteriormente incorporando otras variables a ese mismo modelo, o desarrollando modelos paralelos. Hasta el momento, el único modelo completamente desarrollado es el de pH.

Este modelo emplea como entradas variables ambientales y de operación del reactor, como son la radiación, la temperatura, el oxígeno disuelto, la altura del cultivo y los distintos caudales inyectados al sistema, muestreados cada minuto a lo largo de un día. También se emplea como entrada el valor de pH en el instante anterior. Con cada muestra de entradas, el modelo es capaz de predecir el valor de pH en el instante siguiente, esto es, un minuto en el futuro. Este valor puede ser realimentado como entrada para el instante siguiente para lograr la

Modelado y control de producción de microalgas con aprendizaje automático

predicción multipaso. Conociendo el valor de estas variables a lo largo de un día (que se suponen predecibles o controlables), el modelo es capaz de predecir el perfil completo de pH en el punto modelado a lo largo de un día. Este modelo es útil para múltiples aplicaciones, como control predictivo basado en modelo, sensor virtual para detección de fallos, o simulador con fines de diseño.

El modelo fue entrenado haciendo uso de datos históricos de un fotobiorreactor *raceway* localizado en el Centro de Investigación "Las Palmerillas" (Almería, España), correspondientes a distintos meses del año 2016. Se emplearon un total de 78 días, divididos para el entrenamiento y la validación del modelo. El modelo entrenado fue una red neuronal con una capa LSTM, encargada de captar el carácter dinámico del sistema. Fue puesto a prueba tanto para predicción a un paso (empleando el valor de pH real para predecir el siguiente), como multipaso (empleando el valor de pH predicho con el mismo fin), y los resultados son los observados en la Figura 1. Este trabajo se encuentra en [20].

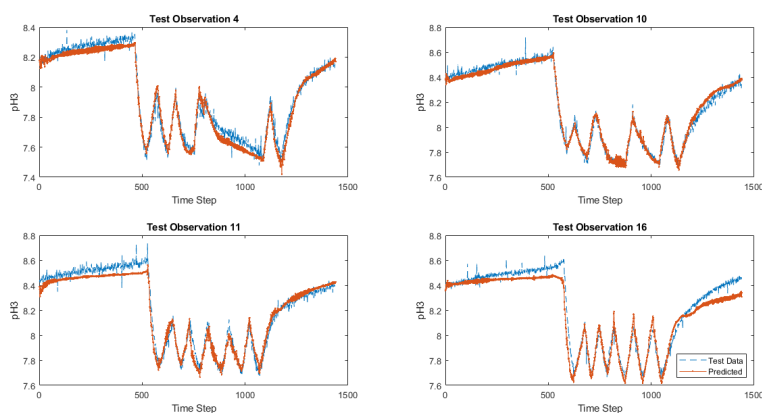


Fig. 1: Resultados de predicción de pH multipaso.

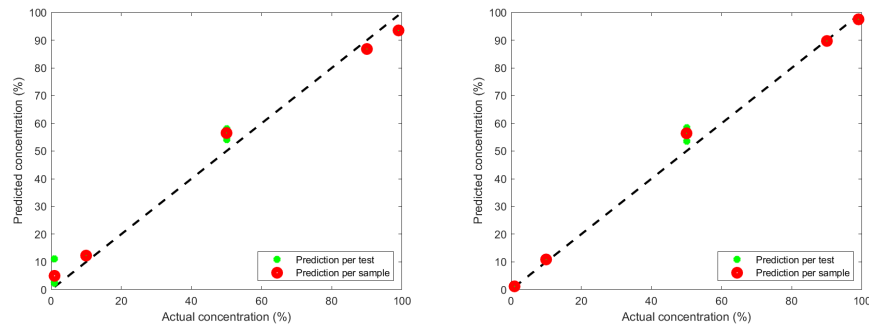
El siguiente trabajo en esta línea está dirigido a incorporar el oxígeno disuelto a este modelo. Se trata de una de las variables más influyentes en la productividad del proceso y su predicción resulta muy interesante. El enfoque para lograr esto es el mismo que el adoptado en el trabajo anterior, haciendo uso de conjuntos de datos similares, aunque se está estudiando el uso de otro tipo de capas, como las convolucionales, así como otras estructuras de red neuronal capaces de extraer información a distintas escalas de tiempo y frecuencias. De este modo, la predicción de pH y oxígeno disuelto sería mucho más autónoma, al únicamente depender de condiciones atmosféricas predecibles, caudales controlables, y sus propios valores ya predichos con el modelo. La predicción de concentración de biomasa con este tipo de modelos también se desea lograr en un futuro, aunque la

ausencia de datos en tiempo real de dicha variable implicará plantear el problema de otra forma.

2.2 Caracterización de cultivos de microalgas

En este trabajo, el objetivo es determinar la composición en especies de un cultivo a partir de una muestra de este. Para ello, se desarrolló un modelo de red neuronal capaz de distinguir la especie de una célula de microalga entre dos distintas: *Chlorella Vulgaris* y *Scenedesmus Almeriensis*. De este modo, una muestra de cultivo puede ser analizada mediante el dispositivo *FlowCAM* [1], el cual proporciona imágenes individuales o rasgos descriptivos de cada una de las células detectadas, y a partir de estos datos, se puede calificar cada elemento individual y determinar la composición del cultivo. Se desarrollaron dos modelos, uno que emplea imágenes de las células como entrada y otro que usa los rasgos descriptivos. Ambos modelos fueron complementados con umbrales de clasificación.

Los modelos fueron desarrollados con datos de aproximadamente 150000 células de cada especie. Se usó una red neuronal de clasificación simple para el modelo que usaba rasgos como entrada, y una red profunda convolucional para el que empleaba imágenes, siendo necesaria también cierta segmentación y tratamiento. Ambos modelos demostraron gran precisión a la hora de realizar la clasificación, siendo validados tanto con muestras puras como con mezclas. La Figura 2 muestra los resultados de clasificación de muestras mixtas para cada modelo. Este trabajo se encuentra en [19].



(a) Modelo basado en rasgos.

(b) Modelo basado en imágenes.

Fig. 2: Resultados de caracterización de cultivos.

A partir de los modelos obtenidos, se desarrolló una interfaz gráfica que funcionase como herramienta simple e intuitiva para caracterización de cultivos. La herramienta permite, a partir de cualquiera de los datos proporcionados por

Modelado y control de producción de microalgas con aprendizaje automático

FlowCAM (hoja de datos con rasgos descriptivos o archivo *.tif* con imágenes de las células), proporcionar al usuario la composición de la mezcla simplemente seleccionando el fichero con los datos. La herramienta se encarga de automáticamente tratar los datos según corresponda y realizar la clasificación, mostrando los resultados de forma gráfica y numérica. La Figura 3 presenta la interfaz de la herramienta. Este trabajo se encuentra en [21].

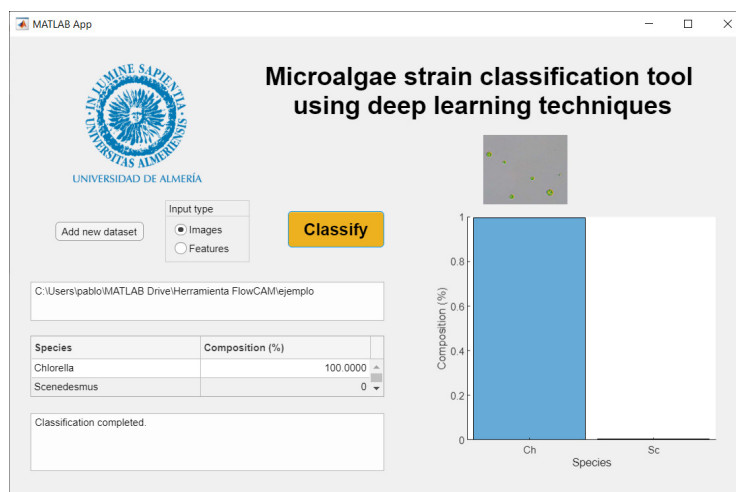


Fig. 3: Interfaz gráfica de herramienta para caracterización de cultivos.

Se pretende extender los modelos ya desarrollados a una mayor variedad de especies y géneros de microalgas. Una herramienta con la capacidad de caracterizar cualquier cultivo, no únicamente aquellos compuestos por las dos especies modeladas, puede ser de gran utilidad. Por otro lado, se pretende desarrollar nuevos modelos haciendo uso de otros dispositivos de adquisición, o incluso otros tipos de datos, con el fin de que sean más flexibles y accesibles.

2.3 Extremum Seeking Control aplicado a control de pH

En este trabajo, el objetivo es desarrollar una metodología libre de modelo y basada en datos para el control de pH en un fotobiorreactor *raceway*, basada en la técnica de *Extremum Seeking Control* (ESC) [31]. El objetivo es que dicha metodología permita de forma sencilla realizar un control en ausencia de modelo, pues la etapa de modelado de este sistema, como se detalló anteriormente, es a menudo compleja, siendo el propio modelo muy variante en el tiempo. Se trata de un trabajo aún en desarrollo, aunque se está obteniendo resultados a nivel de simulación, y está comenzando una campaña de ensayos en las instalaciones del centro IFAPA de la Universidad de Almería.

Modelado y control de producción de microalgas con aprendizaje automático

El ESC es una técnica de control basada en la optimización del gradiente de la función de coste del sistema. Para un sistema con una función de coste medible dependiente de su señal de control y sus perturbaciones, el algoritmo busca estimar una relación lineal entre dicha función de coste y las señales mencionadas, para, a partir de estas, ejecutar un control integral que minimice la función de coste (ver Figura 4) [12]. Puesto que la referencia de pH para la especie cultivada es fija, la función de coste seleccionada será el error cuadrático entre el pH y su referencia, siendo la señal de control el caudal de CO_2 , y no empleando perturbación alguna. Asimismo, será necesaria cierto caudal de excitación para hacer converger la estimación del gradiente y evitar fallos cuando la señal de control o la función de coste sean constantes. La dinámica del pH en un *raceway* es relativamente lenta, y el ESC es una técnica apropiada para sistemas que se encuentren en estado estacionario, situación que nunca se llega a alcanzar en este caso. Por ello, es fundamental que el periodo de muestreo del sistema sea suficientemente largo como para permitir una evolución suficiente del pH.

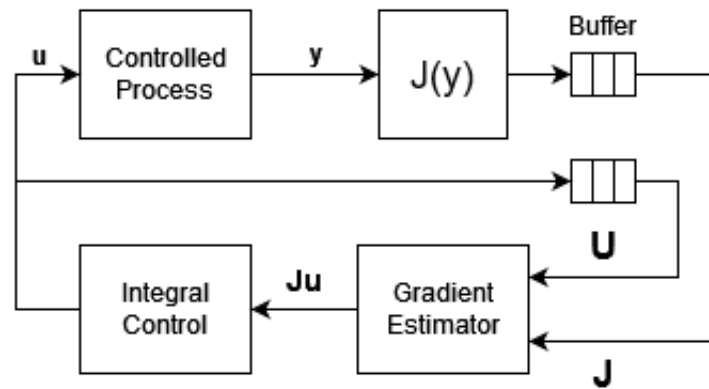


Fig. 4: Esquema fundamental de Extremum Seeking Control [31]

De cara a un futuro, se pretende concluir este primer trabajo con ESC, y en función de su éxito combinarlo con otras estrategias, como el “*Self-Optimizing Control*” para implantar un control jerárquico, o con aprendizaje reforzado para optimizar la señal de excitación del sistema.

3 Conclusiones

En esta sección se presentan las principales conclusiones de los avances realizados durante estos años.

En primer lugar, las redes neuronales demostraron ser una buena herramienta para modelar las dinámicas del pH en fotobiorreactores. Como era de esperar, se adaptan muy bien a un problema significativamente complejo y cambiante,

Modelado y control de producción de microalgas con aprendizaje automático

demostrando excelente desempeño en días con condiciones marcadamente distintas, con la capacidad de realizar predicciones entre un único minuto y un día completo. Este proceso de modelado requiere un volumen de datos considerable y un minucioso trabajo de filtrado y tratamiento de datos, pero permite obtener modelos precisos, de rápida ejecución y sencillamente adaptables a nuevos datos. Si bien es cierto que este tipo de modelos no aportan conocimiento o comprensión del modo que lo hacen los modelos de primeros principios, resultan muy útiles para probar nuevas estrategias de control en simulación o implementar otras que requieren de un buen modelo. La futura incorporación de la predicción del oxígeno disuelto proporcionará un modelo mucho más completo. La predicción de la concentración de biomasa es también un reto interesante de cara al futuro, aunque requerirá un replanteamiento del problema.

Por otro lado, los modelos de clasificación de especies basados en redes neuronales han proporcionado muy buenos resultados. Demostraron ser minuciosamente precisos a la hora de clasificar las células individuales, así como para caracterizar muestras completas, ya sean puras o mezcladas. Si bien la adquisición de los datos requiere de equipamiento específico, uno de los trabajos futuros que se plantean involucra realizar dicha clasificación con datos obtenibles con dispositivos más accesibles. También se pretende extender dicha clasificación a una mayor variedad de especies, con el fin de desarrollar una herramienta completa, general, y de uso sencillo. En relación a esto último, la interfaz desarrollada permite el uso de estos modelos de red neuronal, comúnmente empleados en código, a usuarios menos familiarizados con la programación, de forma intuitiva.

En la línea del control de pH en fotobiorreactores, la técnica de *Extremum Seeking Control* está demostrando resultados prometedores en simulación. La posibilidad de ejecutar un control óptimo en ausencia de modelo resulta verdaderamente atractiva, más aún para sistemas tan complejos como los tratados. Del mismo modo, dicha técnica tiene potencial para ser aplicada en escalones más altos de la pirámide de control, como puede ser la optimización de referencias de pH para maximizar la productividad del reactor. La futura implementación de dicha estrategia en las instalaciones reales es también un paso importante para justificar el uso de este tipo de técnicas en el proceso de producción. En esta misma línea, se plantea desarrollar otras estrategias de control en un futuro basadas en aprendizaje reforzado, ya sea para el control directo del pH basado en una función de coste, o para la sintonización de los parámetros de un controlador con otra forma.

En conclusión, las estrategias de aprendizaje automático están presentando resultados verdaderamente prometedores en el modelado y control de la producción de microalgas. Los trabajos desarrollados demuestran que estas técnicas se adaptan muy bien a problemas significativamente complejos. La disponibilidad de instalaciones reales a partir de las cuales se puede obtener datos o poner a prueba los modelos y estrategias desarrollados, es sin duda un punto a favor de la implementación de estas técnicas, y ayuda a validar y justificar su uso.

References

1. FlowCAM [®] Manual, 2011.
2. N. Abdel-Raouf, A. A. Al-Homaidan, and I. B. Ibraheem. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3):257–275, jul 2012.
3. F. G. Acien, J. M. Fernández Sevilla, and E. Molina Grima. Microalgae: The basis of mankind sustainability. In *Case Study of Innovative Projects - Successful Real Cases*, chapter 7, pages 123–140. 2017.
4. M. Barceló-Villalobos, C. G. Serrano, A. S. Zurano, L. A. García, S. E. Maldonado, J. Peña, and F. G. Fernández. Variations of culture parameters in a pilot-scale thin-layer reactor and their influence on the performance of *Scenedesmus almeriensis* culture. *Bioresource Technology Reports*, 6(March):190–197, 2019.
5. D. Chiaramonti, M. Prussi, D. Casini, M. R. Tredici, L. Rodolfi, N. Bassi, G. C. Zittelli, and P. Bondioli. Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible. *APPLIED ENERGY*, 102(SI):101–111, feb 2013.
6. I. Correa, P. Drews, S. Botelho, M. S. De Souza, and V. M. Tavano. Deep learning for microalgae classification. In *Proceedings - 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA 2017*, volume 2017-Decem, pages 20–25. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017.
7. E. A. del Rio-Chanona, J. L. Wagner, H. Ali, F. Fiorelli, D. Zhang, and K. Hellgardt. Deep learning-based surrogate modeling and optimization for microalgal biofuel production and photobioreactor design. *AIChE Journal*, 65(3):915–923, 2019.
8. I. Fernández, F. G. Acien, M. Berenguel, and J. L. Guzmán. First principles model of a tubular photobioreactor for microalgal production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(27):11121–11136, 2014.
9. I. Fernández, F. G. Acien, M. Berenguel, J. L. Guzmán, G. A. Andrade, and D. J. Pagano. A lumped parameter chemical-physical model for tubular photobioreactors. *Chemical Engineering Science*, 112:116–129, 2014.
10. B. M. Franco, L. M. Navas, C. Gómez, C. Sepúlveda, and F. G. Acien. Monoalgal and mixed algal cultures discrimination by using an artificial neural network. *Algal Research*, 38(January):1–7, 2019.
11. F. García-Mañas, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and F. G. Acien. Biomass estimation of an industrial raceway photobioreactor using an extended Kalman filter and a dynamic model for microalgae production. *Algal Research*, 37(June 2018):103–114, 2019.
12. J. D. Gil, L. Roca, G. Zaragoza, M. Pérez, and M. Berenguel. Improving the performance of solar membrane distillation processes for treating high salinity feeds: A process control approach for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 338:130446, mar 2022.
13. C. V. González-López, F. García-Cuadra, N. Jawiarczyk, J. M. Fernández-Sevilla, and F. G. Acien-Fernández. Valorization of microalgae and energy resources. In B. Llamas, M. F. O. Romero, and E. Sillero, editors, *Sustainable Mobility*, chapter 4. IntechOpen, Rijeka, 2020.
14. J. L. Guzmán, F. G. Acien Fernández, and M. Berenguel. Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors (in Spanish). *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 00(November):1–15, 2020.
15. K. Heimann and R. Huerlimann. Microalgal classification: Major classes and genera of commercial microalgal species. *Handbook of Marine Microalgae: Biotechnology Advances*, pages 25–41, 2015.

Modelado y control de producción de microalgas con aprendizaje automático

16. M. I. Jordan and T. M. Mitchell. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245):255–260, jul 2015.
17. S. Lucia and B. Karg. A deep learning-based approach to robust nonlinear model predictive control. *IFAC-PapersOnLine*, 51(20):511–516, 2018.
18. F. Núñez, S. Langarica, P. Díaz, M. Torres, and J. C. Salas. Neural Network-Based Model Predictive Control of a Paste Thickener over an Industrial Internet Platform. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(4):2859–2867, 2020.
19. P. Otálora, J. L. Guzmán, F. G. Acién, M. Berenguel, and A. Reul. Microalgae classification based on machine learning techniques. *Algal Research*, 55:102256, 2021.
20. P. Otálora, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and F. G. Acién. Dynamic model for the pH in a raceway reactor using deep learning techniques. In *14th APCA International Conference on Automatic Control and Soft Computing*, Bragança, Portugal, 2020.
21. P. Otálora Berenguel, J. L. Guzmán, F. G. Acién Fernández, and M. Berenguel. Herramienta gráfica para la caracterización de cultivos de microalgas basada en redes neuronales artificiales. In *XLII JORNADAS DE AUTOMÁTICA : LIBRO DE ACTAS*. 2021.
22. A. Pawlowski, I. Frenández, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F. G. Acién, and S. Dormido. Event-based selective control strategy for raceway reactor: A simulation study. *IFAC-PapersOnLine*, 49(7):478–483, jan 2016.
23. A. Pawlowski, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and F. G. Acién. Control system for pH in raceway photobioreactors based on wiener models. *IFAC-PapersOnLine*, 52(1):928–933, 2019.
24. A. Pawlowski, J. L. Mendoza, J. L. Guzman, M. Berenguel, F. G. Acien, and S. Dormido. Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based pH control for microalgae culture. *BIORESOURSE TECHNOLOGY*, 170:1–9, oct 2014.
25. J. K. Pittman, A. P. Dean, and O. Osundeko. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource Technology*, 102(1):17–25, jan 2011.
26. P. Rajendra and V. Brahmajirao. Modeling of dynamical systems through deep learning. *Biophysical Reviews*, 12(6):1311–1320, dec 2020.
27. E. Rodríguez-Miranda, M. Beschi, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and A. Visioli. Daytime/nighttime event-based pi control for the PH of a microalgae raceway reactor. *Processes*, 7(5):1–16, 2019.
28. J. Schmidhuber. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61:85–117, jan 2015.
29. S. P. Singh and P. Singh. Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50:431–444, 2015.
30. K. Sompech, Y. Chisti, and T. Srinophakun. Design of raceway ponds for producing microalgae. *BIOFUELS-UK*, 3(4):387–397, 2012.
31. J. Straus, D. Krishnamoorthy, and S. Skogestad. On combining self-optimizing control and extremum-seeking control – Applied to an ammonia reactor case study. *Journal of Process Control*, 78:78–87, jun 2019.
32. Supriyanto, R. Noguchi, T. Ahamed, D. S. Rani, K. Sakurai, M. A. Nasution, D. S. Wibawa, M. Demura, and M. M. Watanabe. Artificial neural networks model for estimating growth of polyculture microalgae in an open raceway pond. *Biosystems Engineering*, 177:122–129, jan 2019.

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional y compensación de movimiento controlada por el cliente

José Juan Sánchez Hernández¹

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 Avances

2.1 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.

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 .

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.

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.

2.2 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. 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 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.

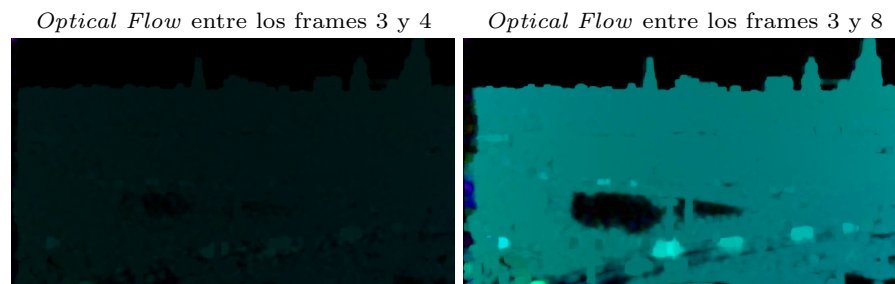


Fig. 1. Ejemplo del cálculo del flujo óptico utilizando el método Farneback entre imágenes de la secuencia Stockholm

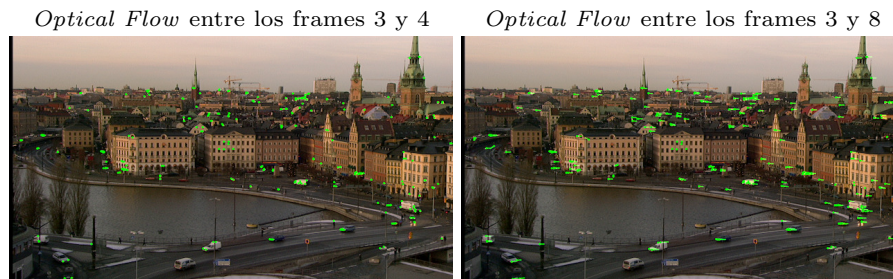


Fig. 2. Ejemplo del cálculo del flujo óptico utilizando el método Lucas-Kanade entre imágenes de la secuencia Stockholm

2.3 Transmisión de secuencias de video 360° utilizando MCCR

Otra de las líneas de investigación que hemos estado explorando, 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 video 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 video 360° y utilizar el ancho de banda disponible entre cliente y servidor de manera eficiente.

2.4 Resultados experimentales

2.5 Stockholm

Stockholm es una secuencia de imágenes a color de 1280×720 , 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 3 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 32×32 coeficientes. Los precintos en el máximo nivel de resolución tienen unas dimensiones de 128×128 , y para la estimación de movimiento se han utilizado los siguientes valores $A = 2$ y $S = 4$.

La Figura 4 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:

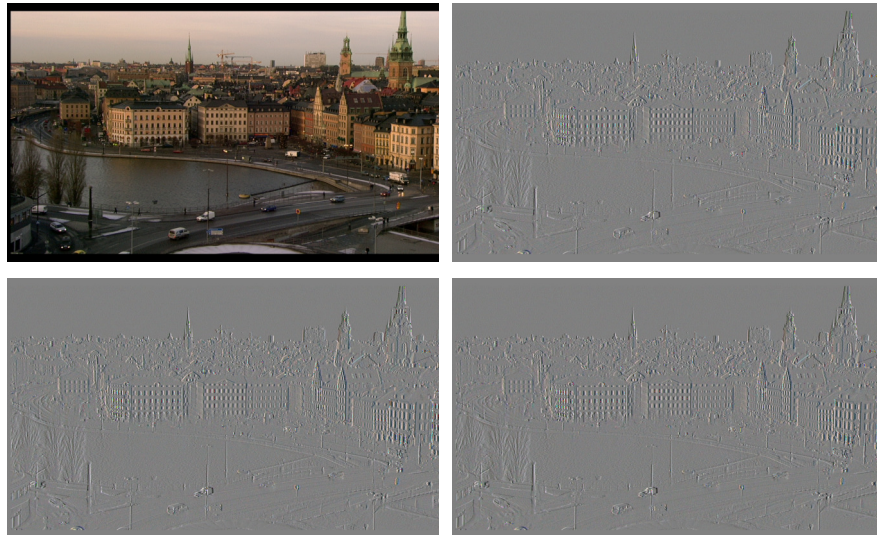


Fig. 3. Frames 3, 4, 5 y 6 de la secuencia Stockholm. Se muestra la imagen 3 y las diferencias que existen en las imágenes 4, 5 y 6, respecto a la imagen 3 de la secuencia. Las diferencias muestran que en esta secuencia existe un movimiento mayor que el de la secuencia Speedway.

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 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 5 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.

3 Conclusiones

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

Modelado y control de producción de microalgas con aprendizaje automático

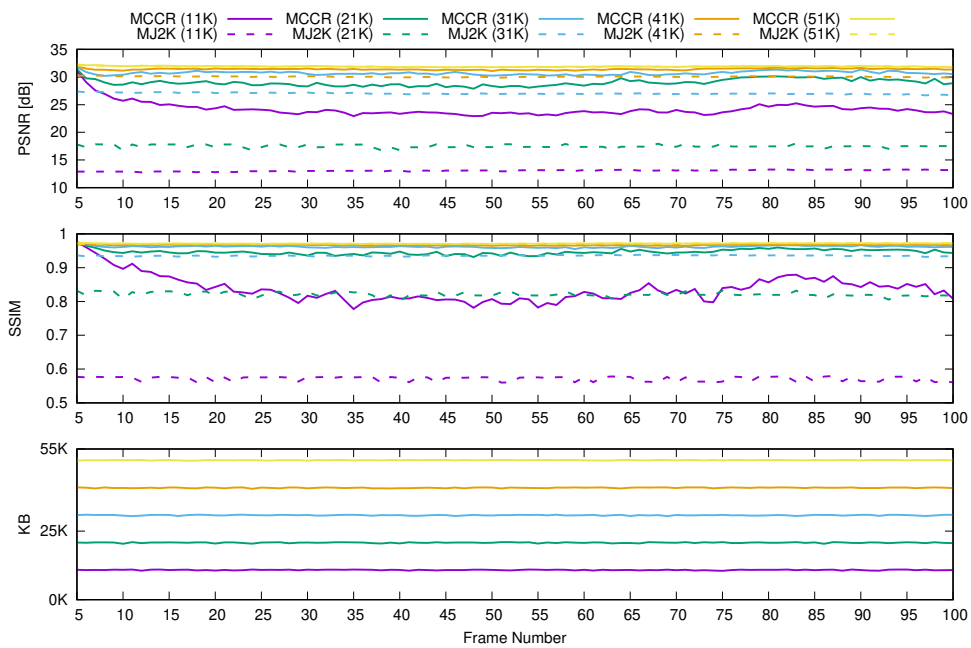


Fig. 4. Calidad de las reconstrucciones de las primeras 100 imágenes de la secuencia Stockholm utilizando MCCR y Motion JPEG2000 (MJ2K). Se han simulado varios escenarios con diferente ancho de banda donde la cantidad de bytes transmitidos por imagen en cada uno de ellos varía desde los 11000 hasta los 51000 bytes. Se han utilizado dos métricas para evaluar la distorsión de las reconstrucciones: PSNR y SSIM.

Modelado y control de producción de microalgas con aprendizaje automático

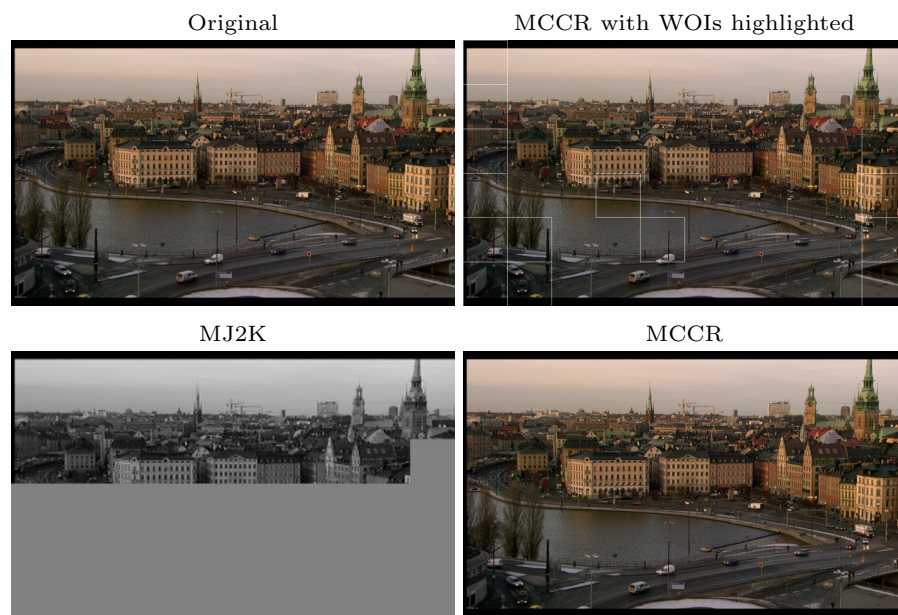


Fig. 5. Reconstrucción de la tercera imagen de la secuencia Stockholm utilizando MCCR y Motion JPEG2000 cuando se transmiten 16000 bytes por imagen. En la esquina superior izquierda se muestra la imagen original, en la esquina superior derecha está la reconstrucción obtenida con MCCR, se han resaltado 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.

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)
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>

Modelado y control de producción de microalgas con aprendizaje automático

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)

Implantación de un sistema de videoconferencia multipunto a través de internet aplicando tecnología streaming

Teresa Santamaría-López

Universidad de Almería, Sacramento S/N, Almería, España
tsantamaria710@gmail.com

RESUMEN:

El uso de la tecnología Streaming para la transmisión de multimedia y de internet como medio de comunicación, puede llevarse a cabo por parte de todas las personas que tengan acceso a internet desde dispositivos inteligentes, se conoce como Streaming a la tecnología multimedia que puede enviar contenidos de audio y video al dispositivo que se encuentre conectado a internet. Usualmente para realizar el ancho de banda, se puede calcular la cantidad total de tráfico recibido y enviado para un periodo de tiempo determinado. Cuyos resultados son expresados de una cifra por segundo, el método para realizar la medición para el ancho de banda se refiere al tiempo que se tarda en poder transferir uno o varios archivos. El resultado se obtiene al hacer la conversión de bps al hacer la división de los archivos por la cantidad de tiempo necesario para llevar a cabo la transferencia, los sistemas de videoconferencia requieren de una arquitectura distribuida de cliente servidor al usar la tecnología Streaming, la mayoría de pruebas de velocidad de internet se utilizan para hacer el cálculo de la velocidad de conexión del equipo de un usuario a internet, sin embargo, no existe una manera de poder realizar la medición del ancho de banda total, el uso de herramientas de videoconferencia y plataformas dentro del mercado, han tenido un crecimiento notorio debido al incremento del trabajo remoto.

PALABRAS CLAVE: Implantación, sistema de videoconferencia, multipunto, tecnología streaming.

1. Introduction

Dentro de la sociedad actual, con el proceso de globalización de la humanidad que existe surge la necesidad de poder estar permanente conectado sin que importe la distancia que exista entre las personas. Esto se ha visto en crecimiento constante debido a la aparición de la pandemia coronavirus a nivel global y esto ha traído como consecuencia que las personas no puedan salir de sus casas por este motivo. Por esta razón podemos observar que la tecnología permite la comunicación de las personas localizadas en los diversos lugares geográficos, un ejemplo de ello, de estas herramientas se cuenta con: Una comunicación telefónica y escrita, estas han sido explotadas, por ello hoy en día se busca una mejor interacción de los participantes. Por esta razón sean han incrementado la realización de video conferencias, como consecuencia que se deben llevar a cabo de manera virtual las actividades cotidianas, como las clases para los estudiantes, teletrabajo para los trabajadores, otras actividades (movimientos bancarios, pago de servicios, contacto entre familia y amigos, entre

otros). Aplicaciones como Whatsapp, Google Meets, Zoom, entre otros han visto que ha incrementado la cantidad de usuarios que se encuentran registrados en estas plataformas.

1 Avances

1.1 Proceso de producción y transmisión de contenido:

En este punto es importante señalar que el proceso que incluye desde la adquisición del contenido y material multimedia hasta la transmisión de su contenido y visualización incluyendo el sistema y herramientas utilizados, formato del streaming utilizado por el cliente.

1.2 Infraestructura Tecnológica

Los sistemas de videoconferencia requieren de una arquitectura distribuida de cliente servidor al usar la tecnología Streaming se encuentra funcionando de la siguiente forma:

- ✓ Al momento que el cliente se conecta al servidor y este servidor empieza a realizar el envío de los paquetes comprimidos en este caso los archivos conocidos como ficheros.
- ✓ Se recibe la información por parte del cliente y se construye un buffer donde se almacena la información.
- ✓ Al momento que se llena el buffer el cliente lo empieza a mostrar y se continúa con una descarga sincronizada de forma que se puede observar el archivo mientras este realiza su descarga de manera que se termine su descarga al mismo tiempo que se termina de visualizar el archivo [2].

1.3 Importancia del Ancho de Banda:

Al momento de llevar a cabo una transmisión de videoconferencia su calidad depende de aspectos principales como el ancho de banda para la transmisión de video/audio la persona encargada de llevar a cabo la selección entre: IP, RDSI o 5g.

Estará a cargo de la persona responsable de obtener una resolución de imagen de acuerdo a sus principales necesidades dentro de ella tenemos las siguientes:

- Requerimientos de ancho de banda:

Se dice que el ancho banda se refiere a la capacidad de la transmisión de una conexión y es un factor importante al determinar la calidad y la velocidad de una red.

Implantación de un sistema de videoconferencia multipunto a través de internet ...

Actualmente el ancho de banda se mide por bits por segundo y es expresado como bps. Sin embargo, se suelen tener un ancho de banda mayor del que puede expresarse utilizando cantidades pequeñas.

Es importante señalar que luego del terabit otras medidas que existen son el petabit, exabit, zettabit y yottabit estos representan una potencia adicional de 10.

De igual de manera el ancho de banda puede expresarse por segundo, lo que usualmente viene dado por una B mayúscula.

- Medición del ancho de banda:

Es realizado por el uso normalmente de un software o firmware por medio de una interfaz red.

Dentro de las herramientas que son usadas para medición del ancho de banda se tienen Test TCP (TTCP) y PRTG Network.

Un ejemplo de ello se refiere:

- TTCP:

Realiza la medición de una red IP correspondiente a dos hosts. Un host receptor y uno remitente. Cada lado demuestra cual es el número de bytes son transmitidos y el tiempo que se demora los paquetes en contemplar el trayecto de ida.

- PRTG:

Proporciona un tipo de interfaz visual y los gráficos para poder medir las tendencias de un ancho de banda durante largos periodos de tiempo y puede realizar el cálculo acerca de tráfico en varias interfaces.

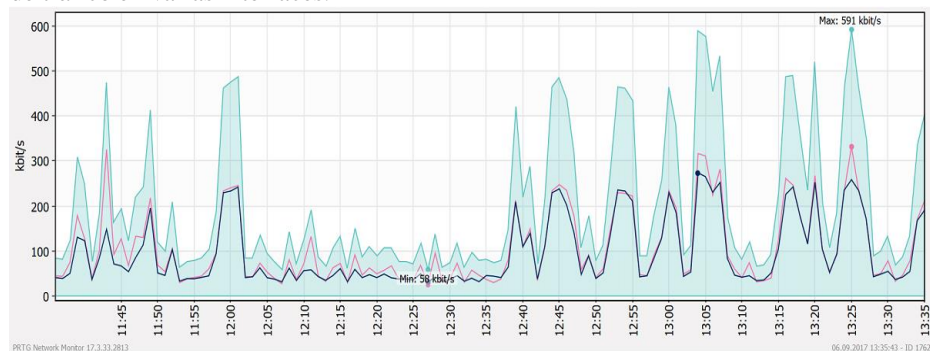


Figura 1: Ancho de banda

Usualmente para realizar el ancho de banda, se puede calcular la cantidad total de tráfico recibido y enviado para un periodo de tiempo determinado. Cuyos resultados son expresados de manera de una cifra por segundo. Existe otro método para realizar la medición para el ancho de banda consiste en referirse al tiempo que se tarda en poder transferir uno o varios archivos. El resultado se obtiene al hacer la conversión de bps al hacer la división de los archivos por la cantidad de tiempo necesario para llevar a cabo la transferencia. La mayoría de pruebas de velocidad de internet se utilizan de este

Implantación de un sistema de videoconferencia multipunto a través de internet ...

método para hacer el cálculo de la velocidad de conexión del equipo de un usuario a internet. Sin embargo, no existe una manera de poder realizar la medición del ancho de banda total disponible, se pueden definir el ancho de banda tomando en cuenta, según sean las necesidades.

1.4 Gestión de ancho de banda

Los diversos anchos de banda que son usados dentro de los terminales de video encuentran su limitación de acuerdo a la zona red de su localización, de acuerdo al tipo de llamado que se lleve a cabo este puede ser corporativo desde la empresa, desde el hogar, entre otros. Al contar con control de accesos esto permite que los equipos de los distintos usuarios puedan establecer sub zonas de acuerdo sea su localización y al generarse múltiples enlaces en las sub zonas esto trae como consecuencia que se haga el llamado de datos.

Un ejemplo al momento de usar la conexión para realizar el teletrabajo se usan los siguientes valores:

- Gestión de ancho de banda:
- 6Mbit/s internet least line
- 100 Mbit/s internamente 59
- 512Kbit/s teletrabajo internet DSL link

Un ejemplo de ancho de banda es el siguiente

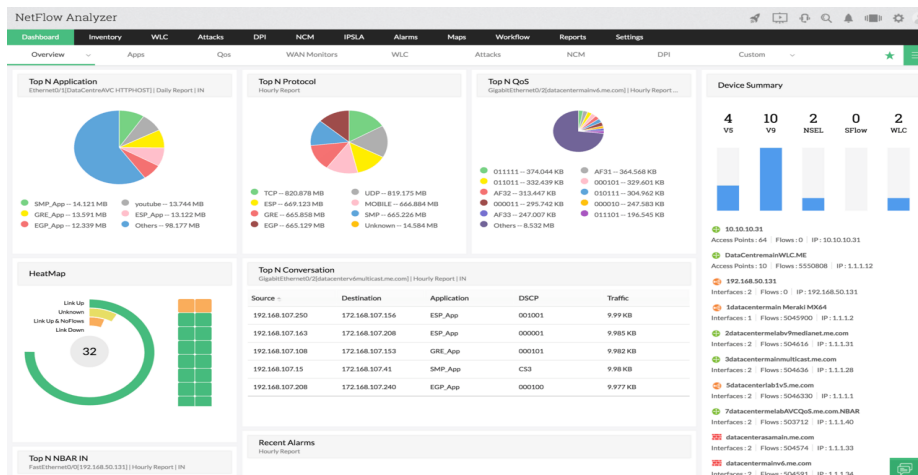


Figura 2: Diferencias entre el papel de la tecnología Streaming y las emisiones :
Se dice que el Streaming se refiere a una fuente de contenido digital utilizando una única conexión digital (internet). Esta información puede ser enviada a otros destinos.

Inclusive si su petición o solicitud se lleva a cabo en otro momento, se dice que los destinatarios pueden acceder en su propio horario. El proceso de etiquetado para que su dispositivo pueda colocar en el orden correcto.

Esto se debe a que los buffering es un término diferente a descarga progresiva. Al utilizar este término se hace referencia a descargas que permiten el poder comenzar a reproducir el contenido antes de que este se guarde por completo en el archivo [5].

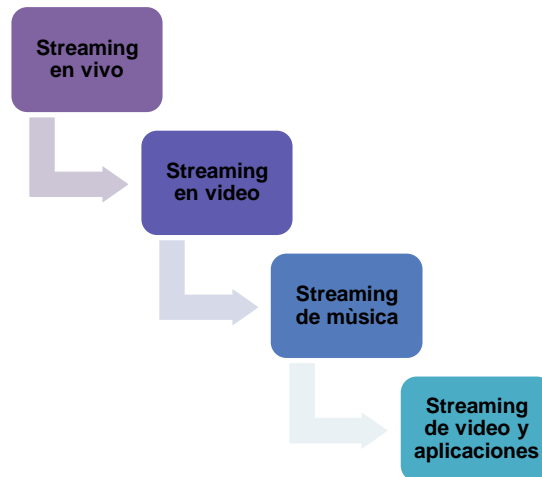


Figura 3: Tipos de streaming en internet

Al momento de realizar el stream de aplicaciones o juegos, el dispositivo es usado como la terminal del programa quiere decir que además de recibir datos, entre ellos sonidos e imágenes, también los puede enviar al servidor.

El financiamiento de estas aplicaciones y juegos en ocasiones está financiado por la publicidad mientras que otros si requieren de la suscripción mediante el uso de la publicidad. Realiza un aumento del tamaño de la palabra del procesador. Con este aumento del tamaño de la palabra se reduce el número de procesos que se deben ejecutar para realizar una operación determinada.

1.5 Aspectos a considerar al momento de programar

Se puede organizar una reunión proporcionando un link a todos los que estén presentes y creando un espacio en común donde se puedan reunir más de dos personas [4].

1.6 Beneficios de la Tecnología Streaming : Beneficios Tangibles

Dentro de los beneficios tangibles que ofrece este tipo de tecnología encontramos que permiten la reducción de los costos al momento de llevar a cabo la comunicación esto como consecuencia de hacer uso de Internet como medio de comunicación utilizado para llevar a cabo conferencias. Lo que permite llevar a cabo negociaciones de manera rápida y charlas grupales lo que deja que se puedan llevar a cabo la interacción de una manera inmediata con la realidad.

1.7 Beneficios de la Tecnología Streaming : Beneficios Intangibles

Se puede mencionar como el beneficio más importante de los que ofrece este tipo de tecnología se encuentra el que mejora la comunicación entre las personas que usan el Streaming logrando así que posean una mejor sociabilización de manera amena que realizarlo con las otras tecnologías que en muchos casos solo trasmite audio y en otras no en todas las transmisiones de video [6].

1.8 Principales programas para llevar a cabo videoconferencias usando la tecnología Streaming:

De acuerdo a un estudio llevado a cabo por David Torres, después de la llegada de la emergencia sanitaria como es el Coronavirus, existe un top de 19 programas que permiten que la conexión de los individuos sea mucho más a mena y sencilla en ello encontramos los siguientes programas [9].

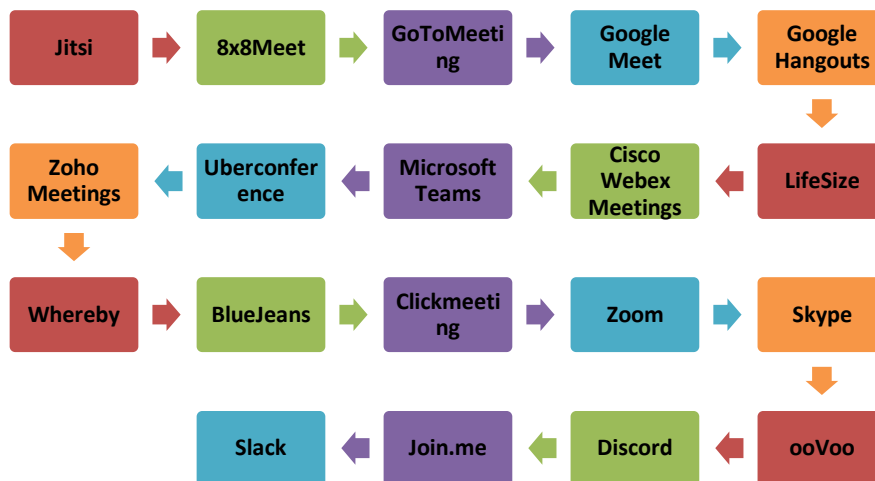


Figura 4: Principales programas para llevar a cabo videoconferencias Streaming en el 2021

Implantación de un sistema de videoconferencia multipunto a través de internet ...

Estos programas poseen una curva de aprendizaje de manera veloz a un precio que es accesible las que incluyen herramientas que se necesiten para poder llevar a cabo interacciones más productivas. Tomando en cuenta aspectos como el precio, participantes por reunión y usuario.

Aspectos éticos

Dentro del artículo fueron tomados datos de dominio público que pueden ser encontrados en internet en relación al uso de la tecnología Streaming y como ha sido el crecimiento de esta durante los últimos años.

Camino metodológico

El uso de la tecnología Streaming para la transmisión de multimedia y de internet como medio de comunicación, puede llevarse a cabo por parte de todas las personas que tengan acceso a internet desde sus dispositivos inteligentes. Se conoce como Streaming es un tipo tecnología multimedia que puede enviar contenidos de audio y video al dispositivo que se encuentre conectado a internet [1].

Esto permite poder acceder a los contenidos (Podcast, Películas, Música, TV) en el momento que lo desee, a través de un móvil PC, sin importar los horarios del proveedor.

El Streaming representa un gran cambio dentro de la manera en la que accedemos a los contenidos multimedia. Hasta hace pocos años atrás se dependía de las emisoras como televisores y radios al momento de acceder a los contenidos que queríamos escuchar y ver en los horarios que estos determinaban.

Sin embargo, hoy en día con la aparición de internet, actualmente podemos tener acceso al contenido (música, videos, programas de TV, etc) cuando queremos y este acceso puede ser mediante el uso de PC, Ordenadores comunes y portátiles, Televisión, Móviles, entre otros. Gracias al uso de las tecnologías Streaming, la manera de compartir contenido representa un papel importante, esto se debe a que facilita poder disfrutar del contenido cuando se desee y de una manera fácil y sencilla solo con pulsar un botón.

1.9 Papel de la Videoconferencia con la llegada del Coronavirus:

En lo que va desde el año 2021 desde la presencia del coronavirus que tuvo su origen del año 2019 el uso de las tecnologías Streaming.

Se ha visto en crecimiento constante de acuerdo a estudios económicos realizados por la Red Telefónica.

Implantación de un sistema de videoconferencia multipunto a través de internet ...

Se determina que el tráfico de las llamadas de han disparado un 17% y de un 40% los datos ya que las clases online, el teletrabajo, plataforma de series han tenido un alto impacto en la vida de las personas

Dentro de las estadísticas del 2020 acerca del crecimiento del uso de telecomunicaciones:

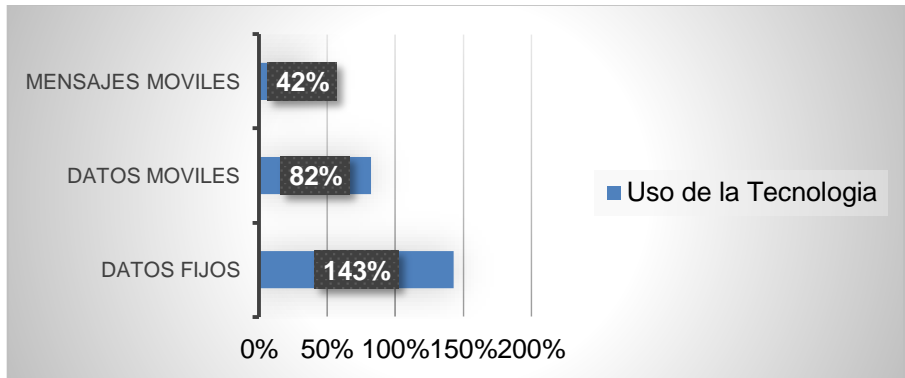


Figura 5: Incremento de las videoconferencias de Abril en los años 2020 y 2021: [3].

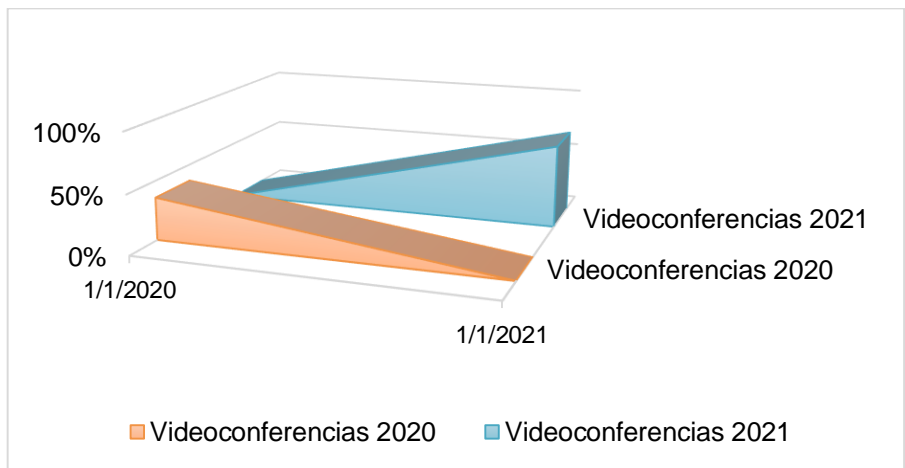


Figura 6: Videoconferencias [7].

En referencia a la relación de los contenidos Streaming en España se tiene un estudio que señala su crecimiento en el 2020 en relación a las plataformas digitales.



Figura 7: Videoconferencias [10].

Una vez analizados estos estudios acerca de las videoconferencias, para el año 2020, se puede determinar que fue el año de reuniones virtuales, conferencias y eventos de manera remota.

El uso de herramientas de videoconferencia y plataformas dentro del mercado, han tenido un crecimiento notorio debido al incremento del trabajo remoto, se identifica que desde que inicio el brote de Covid-19.

Estos programas han tenido un incremento del 500% por esta razón, las principales empresas en un 67% han aumentado su gasto en esto.

2 Conclusiones

El uso de la tecnología en las comunicaciones ha innovado al mundo, la forma de comunicarnos, más fácil, más rápida en todos los niveles, podemos tener una comunicación directa inmediata durante las 24 horas de cada día.

La tecnología ha permitido incrementar las comunicaciones y la información en el siglo XXI tanto por su poder de penetración como por su alto alcance. Las aplicaciones que se realizan para transmisiones Streaming han dado origen a una nueva manera de comunicación.

Referencias

1. AVAST. (2021). Obtenido de ¿Que es la tecnología streaming?: <https://www.avast.com/es-es/c-what-is-streaming>.
2. E, H., & R, V. (s.f.). Implantación de un Sistema de Videoconferencia por Tecnología Streaming. Quito.
3. es, E. d. (s.f.). Obtenido de Tecnología COVID-19 impulsa servicios digitales.: https://www.eldiario.es/tecnologia/covid-19-impulsa-servicios-digitales-hiperconectada_1_1028948.html
4. gitlab, S. (s.f.). Obtenido de Como programar un evento en streaming: <https://soka.gitlab.io/blog/post/2020-09-17-taller-streaming-zoom-youtube>
5. Gonzalez, R. (s.f.). Obtenido de Slideshare: <https://es.slideshare.net/Rusia/diferencias-entre-streaming-y-download>
6. Natinova. (26 de Marzo de 2021). Obtenido de Los increíbles beneficios del Streaming: <https://www.natinnova.com/los-increibles-beneficios-del-streaming-para-tu-empresa-o-evento/#gs.517dc1>
7. Pais, E. (2021). Obtenido de El papel de las videoconferencias: <https://el-pais.com/noticias/videoconferencia/>
8. Statista. (2020). Incremento del consumo de plataformas de streaming en España durante el estado de alarma . Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/1108869/covid-19-aumento-del-uso-de-plataformas-de-streaming-por-franja-horaria-espana/>
9. Torres, D. (s.f.). Obtenido de Los mejores 19 programas para las videoconferencias: <https://blog.hubspot.es/sales/programas-videoconferencias>

Caracterización y modelado de la tecnología de destilación multi-efecto (MED) para tratamiento de aguas

Juan Miguel Serrano Rodríguez^[0000–0001–8908–0323]

CIEMAT-Plataforma Solar de Almería (PSA), Ctra. de Senés km 4.5, 04200 Tabernas, Spain
jmserrano@psa.es

Resumen. La destilación multi-efecto (MED) combinada con energía solar es una alternativa sostenible al problema de escasez de agua tanto por su aplicación en desalación de agua de mar como en minería del agua (*water mining*) [6]. La combinación de esta tecnología con solar, además contribuye a la descarbonización de la industria de desalación [9]. El objetivo general de esta tesis es contribuir en el desarrollo de nuevos componentes y sistemas de dicha tecnología con el fin de convertirla en una alternativa más competitiva. En concreto, la tesis tiene los siguientes objetivos específicos:

- O1.** Desarrollo e implementación de una metodología estándar para la evaluación del rendimiento en la operación de una planta MED [3].
- O2.** Evaluación de innovaciones tecnológicas.
- O3.** Desarrollo e implementación de una arquitectura de control jerárquica que permita la operación eficiente con una fuente de energía variable (solar).

En este primer año de tesis, el trabajo se ha centrado en construir las bases necesarias para el cumplimiento de los objetivos específicos. En concreto, el trabajo se ha enfocado en la implementación de un modelo de ajuste para la obtención de parámetros de funcionamiento de la planta en estado estacionario y en el análisis y tratamiento de datos históricos de operación de una instalación experimental MED piloto situada en la Plataforma Solar de Almería, para extraer información de interés que, posteriormente, será aprovechada para evaluar y caracterizar la pérdida de rendimiento por acumulación de sales en la superficie de los intercambiadores de calor de los efectos de dicha planta MED. Además, se ha contribuido en el acondicionamiento de la instalación experimental con modificaciones y ampliación en la instrumentación.

1 Introducción

Dos tercios de la población mundial viven en condiciones severas de escasez de agua al menos un mes al año. Esta escasez se prolonga durante todo el año para 500 millones personas [14]. La gravedad de este problema se puede intentar mitigar con la aplicación de políticas para la reducción del consumo de agua o la mejora de la eficiencia en su uso, pero la realidad es que factores como la expansión de la agricultura de regadío, el aumento de la población mundial y la mejora de los estándares de vida contribuyen a aumentar la necesidad de agua, agravando así el problema de escasez de agua [10].

La desalación de aguas se presenta como una alternativa para solventar dicho problema. Dentro de las tecnologías para desalación de aguas se distinguen tres grupos en base a su principio de funcionamiento: destilación térmica mediante evaporación y condensación, sistemas alimentados por presión para hacer pasar el fluido a través de unas membranas y sistemas propulsados mediante procesos químicos [19]. A escala industrial la tecnología más adoptada es la ósmosis inversa (en inglés Reverse Osmosis, RO), perteneciente al segundo grupo mencionado. Le siguen las tecnologías térmicas, entre las cuales se distinguen la destilación flash multi-etapa (en inglés multi-stage flash, MSF) y destilación multi-efecto (en inglés multi-effect distillation, MED), más eficiente que la anterior y en la que se centra esta tesis [12], [13].

Caracterización y modelado de una planta MED

Para la consecución de los objetivos principales de esta tesis mencionados anteriormente, es fundamental el desarrollo de ciertas tareas. En la figura 1 se muestra un diagrama con las tareas principales: un modelo en estado estacionario (i) que permita evaluar el rendimiento de la planta para distintos puntos de operación y, una base de datos (ii) con información suficiente acerca de la operación histórica de la planta que se actualice con los nuevos datos de operación (O3). Además, para poder establecer el punto de operación de la planta así como para garantizar la operación en estado estacionario, es necesaria, por un lado, la automatización de la operación de la planta a bajo nivel (iii) (O1), y por otro, la aplicación de técnicas de mantenimiento predictivo (O2). Además, con el objetivo de mejorar el rendimiento de la tecnología MED, es necesario, por un lado, estudiar la aplicación de técnicas de pre-tratamiento del agua de alimentación a la MED para eliminación de iones divalentes con tecnologías como la nano-filtración que permitan(iv) (O2) y, por otro, el desarrollo de los elementos componentes (v) de la arquitectura de control jerárquico (O3). Los desarrollos se han implementado en MATLAB.

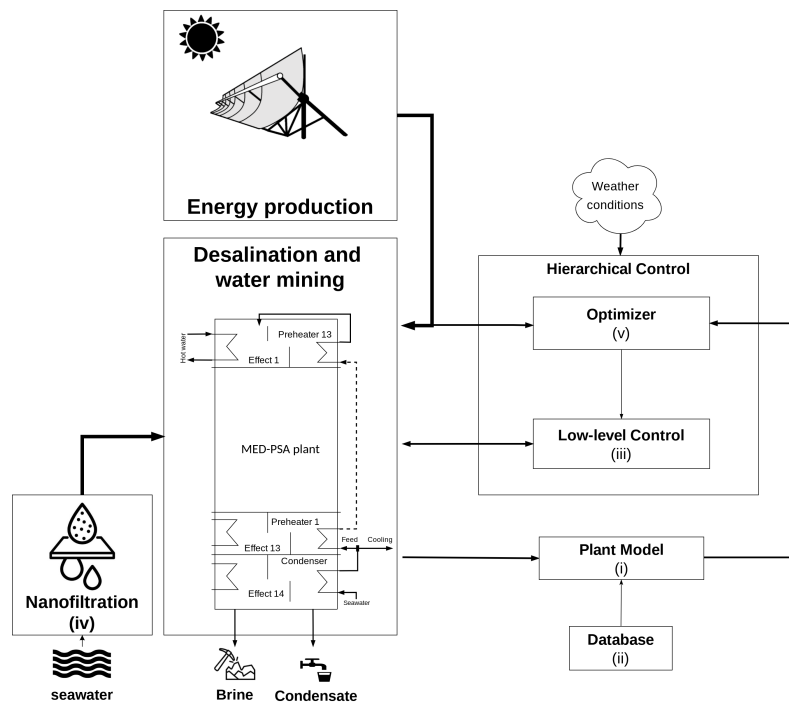


Fig. 1: Diagrama general de los objetivos principales de esta tesis

1.1 Instalación MED en la Plataforma Solar de Almería (PSA)

La Plataforma Solar de Almería (PSA), perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), es el mayor centro de investigación, desarrollo y ensayos de Europa dedicado a las tecnologías solares de concentración [2]. Dentro de la unidad dedicada a las aplicaciones solares térmicas se dispone de una planta MED piloto de alimentación hacia delante, con valores nominales de producción de destilado de 3 [m³/h] para una alimentación de 8 [m³/h] y un PR (Performance Ratio) superior a 9. En la figura 2a se muestra una imagen de la instalación.

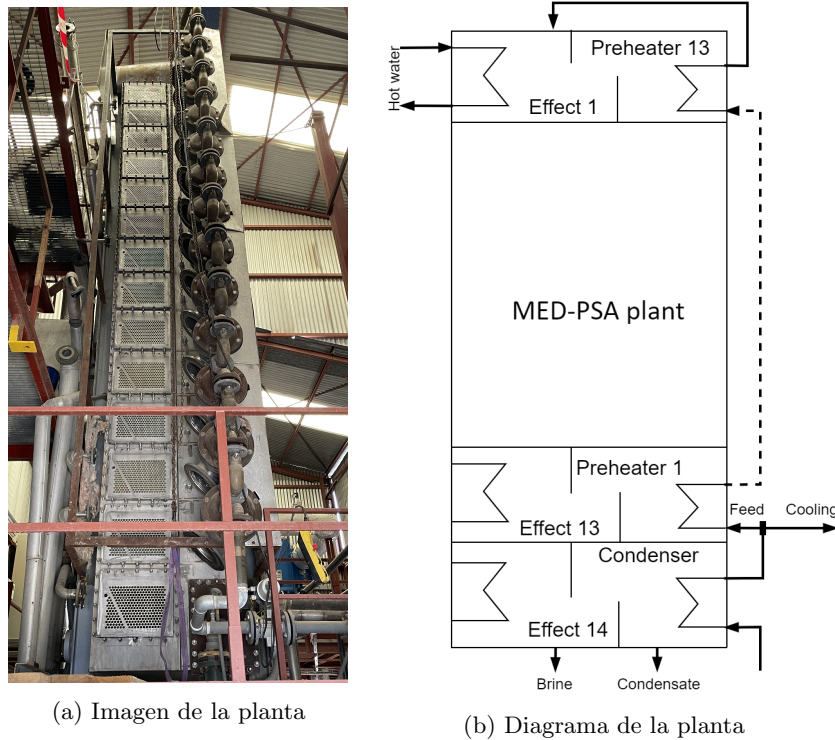


Fig. 2: Instalación MED en la Plataforma Solar de Almería

1.2 Funcionamiento del proceso

En la figura 2b se presenta un diagrama general de la planta MED. Dicha planta se compone de un total de 14 celdas o efectos casi idénticas entre sí. La fuente de energía externa solo es necesaria en el primer efecto, y puede ser agua caliente o vapor, siendo agua caliente en el caso de la planta MED de la PSA. Cada celda se compone de un evaporador/condensador, donde se genera vapor de agua libre de sales, separando así las sales del agua de alimentación, y un precalentador, cuya función es la de precalentar el agua de alimentación desde la temperatura de la fuente (por ejemplo agua de mar) hasta una temperatura próxima a la existente en el primer efecto. La existencia de precalentadores es una medida de eficiencia energética, pues permite reducir, de manera distribuida y eficiente, el suministro energético externo necesario para alcanzar condiciones de saturación en el primer efecto de la planta.

2 Avances

2.1 Acondicionamiento de la planta

La validación del modelo de simulación (**O3**) cuyo desarrollo se muestra en la Sección 2.2, requiere de una instrumentación exhaustiva en la planta MED, que permita no tener que recurrir a estimaciones para las temperaturas en precalentadores y efectos. También es importante, entre otras medidas llevadas a cabo, disponer de información acerca del flujo másico en ciertos puntos de la planta, permitiendo así mejorar la calidad de los resultados. Para ello, se ha instalado nueva instrumentación y renovado/modificado alguna de la existente. En concreto, se han añadido, entre otras modificaciones:

- Sensor de flujo másico a salida del efecto 4.
- Sensores de temperatura en todos los precalentadores.
- Sensores de presión en los efectos impares (hasta ahora solo se disponía de sensores en los efectos pares).
- Sensores de nivel para destilado y salmuera en el último efecto y condensador.
- Válvulas automáticas en descarga de salmuera y destilado.

Además, para continuar con el proceso de automatización de la operación a bajo nivel de la planta (**O1**), ya se dispone de un lazo de control para el flujo de agua caliente, se está trabajando en la implementación de un bucle de control en cascada que permita, mediante el control del caudal de agua de refrigeración circulando a través del condensador, mantener, o bien constante la presión de vapor en el interior del mismo, o garantizar una temperatura de salida del fluido de refrigeración a la salida del condensador final. Asimismo, se está también trabajando en el control del nivel de salmuera y destilado en el último efecto y condensador, manipulando la apertura de una válvula automática en las respectivas descargas.

2.2 Modelado

Definición de un modelo de datos para el sistema La planta MED y todos los desarrollos que se pretenden realizar generan una cantidad considerable de información: los valores de cada una de la magnitudes físicas que definen un punto de operación, sus unidades, parámetros físicos de la planta, etc. Para organizar toda esta información de manera clara y eficiente es necesario diseñar una arquitectura flexible de la forma mostrada en la figura 3.

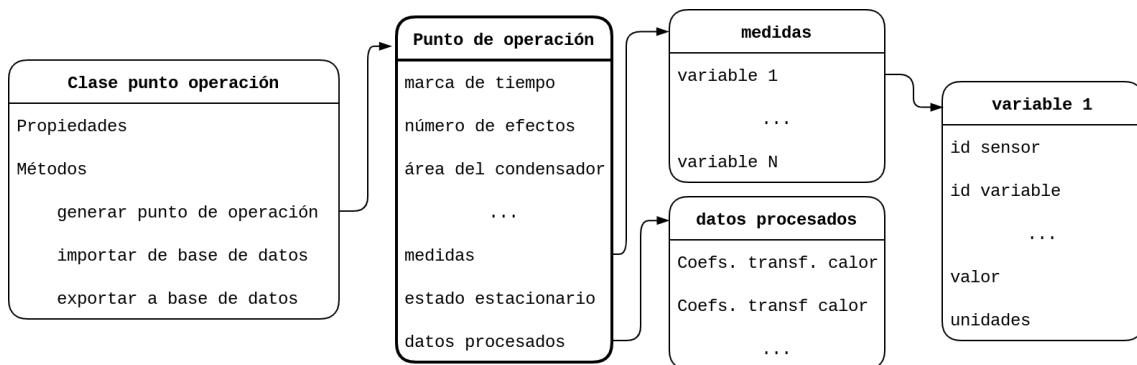


Fig. 3: Diagrama conceptual del modelo de datos

Se trata de una estructura modular, en la que cada uno de los procesos genera un campo nuevo en la estructura que alberga los datos de interés para ese proceso. Cada proceso por tanto amplía el modelo de datos.

Metodología para la estimación índices característicos de una planta MED Para evaluar el rendimiento de la planta en distintos puntos de operación, se ha desarrollado un modelo de simulación en estado estacionario. Dicho modelo permite calcular los coeficientes de rendimiento característicos de una planta MED, como son el Performance Ratio (PR), el consumo de energía térmica específico (STEC) y el Ratio de Recuperación (RR), así como variables del sistema como el perfil de temperaturas en los efectos, producción de destilado en cada uno de ellos, etc. A partir de este modelo y mediante el uso de un optimizador, será posible obtener el punto de operación óptimo dadas unas determinadas condiciones de entrada (**O3**).

Caracterización y modelado de una planta MED

El modelo de simulación se ha implementado en base al modelo publicado en [16], permitiendo obtener las salidas del sistema a partir de las variables de entrada principales (caudales y temperaturas) y ciertos parámetros de operación de la planta (principalmente los coeficientes de transferencia de calor). Dado que estos coeficientes de transferencia de calor varían con el punto de operación y el tiempo operado (debido al efecto del *scaling* (precipitaciones salinas) y *fouling* (ensuciamiento) en los intercambiadores), se ha propuesto una metodología para obtener las salidas del modelo de manera más precisa actualizando dichos parámetros a partir de datos históricos. La metodología propuesta se muestra en la figura 4. La estimación de estos coeficientes de transferencia de calor se realiza mediante una función (ii) que emplea como entrada una base de datos (iii). Esta base de datos contiene información acerca de la operación histórica de la planta y es actualizada constantemente con la operación normal de la planta mediante la monitorización y evaluación del funcionamiento en estado estacionario de manera periódica (iv). Esto se logra aplicando una media de ventana móvil y comprobando la desviación de cada señal de interés respecto a esta (ver Sección 2.3). En el caso de que todas cumplan los márgenes de variación, se ejecuta un modelo de calibración (v), obteniéndose los parámetros calibrados de la planta. El modelo de calibración permite a partir de la información de los sensores de un ensayo, obtener información del sistema similar al modelo de simulación, usa las mismas ecuaciones de [16], pero recibe directamente las variables del sistema sin necesidad de realizar una estimación.

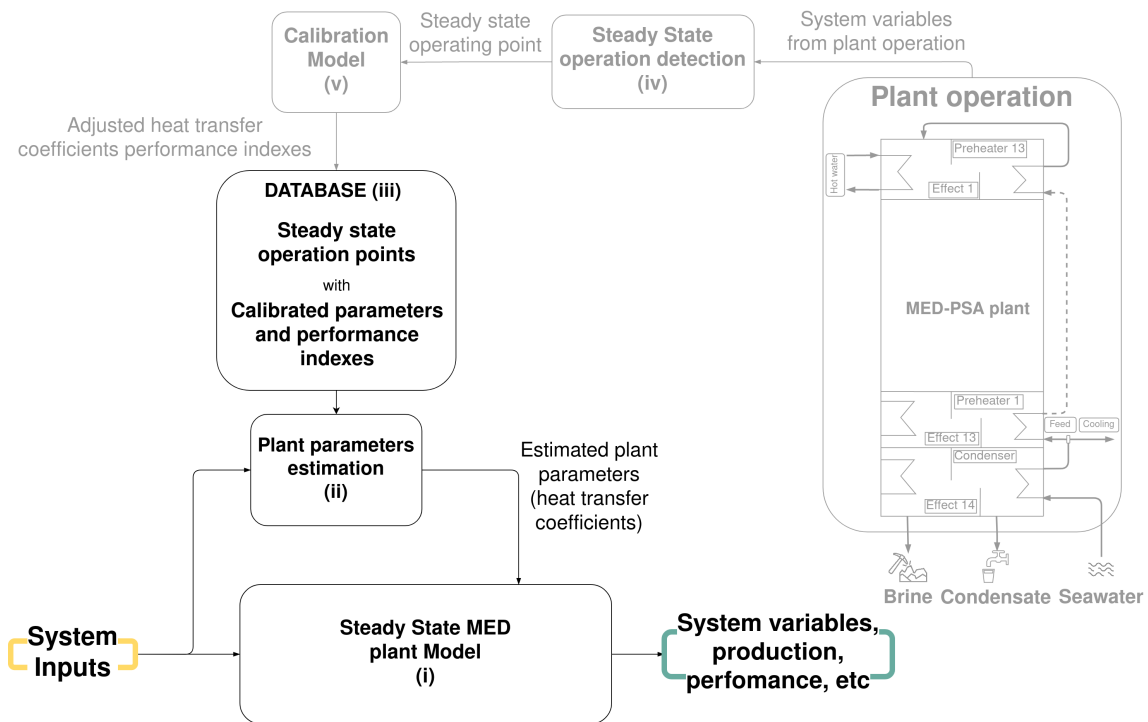


Fig. 4: Diagrama de la metodología propuesta (negro). Estrategia de actualización de base de datos con parámetros calibrados de la planta (gris)

El modelo de simulación está compuesto principalmente por dos funciones implementadas en MATLAB: la función `efecto` y `precalentador`, ambas forman un sistema con las ecuaciones definidas en [16]. Estos sistemas se resuelven haciendo uso de la función `fmincon` de MATLAB [1] dada una referencia de temperatura.

La ejecución del modelo de calibración genera un nuevo campo en el modelo de datos (ap. 2.2) con información relevante del desempeño de la planta como los coeficientes de transferencia de calor en efectos y precalentadores así como índices de rendimiento (PR, STEC, RR, etc).

En la actualidad todos los elementos de esta metodología se encuentran desarrollados, o con un alto nivel de avance. Para obtener información de operación histórica del sistema, que es necesaria para el estimador de parámetros de la planta (ii), se han procesado los experimentos de dos campañas experimentales, una que tuvo lugar entre los años 2009 y 2012 [15], y otra que abarcó desde 2015 hasta 2016 [11]. El soporte de MATLAB para la interacción con bases de datos MongoDB existe pero no es completo. Era importante poder trabajar con una base de datos de tipo serie temporal [5]. Por lo que, aprovechando la capacidad de MATLAB para ejecutar código de JAVA, se ha implementado esta característica y hecho disponible en *GitHub* [18]. Por otro lado, se ha usado el *Toolbox* de programación paralela así como tomado ventaja de las funciones *callback* para mejorar sustancialmente el procesamiento de los datos históricos (ap. 2.4). Resta por tanto el desarrollo de la función para la estimación de los parámetros característicos de la planta (ii) a partir de la información contenida en la base de datos, y una vez completado esto, la validación del modelo.

2.3 Detección de estado estacionario

El modelo explicado en el apartado anterior se sustenta de una base de datos con información histórica del rendimiento y parámetros de operación de la planta ((iii) en el diagrama de la figura 4). Esta base de datos se alimenta de puntos de operación procesados cuando la planta se mantiene en estado estacionario (iv).

Una planta MED es un sistema dinámico, es decir, sus salidas cambian con el tiempo en base al cambio en sus entradas. Si las entradas permanecen estables durante el tiempo suficiente, se trata de un sistema estable en un punto de operación determinado y funciona por tanto en condiciones de estado estacionario. Este tiempo depende de diferentes factores:

- Características de la planta. Una planta de mayor capacidad requeriría más tiempo para alcanzar la estabilidad en sus salidas debido a inercias térmicas.
- Momento en el que se produce el cambio. La planta se comporta de manera distinta cuando se cambia una entrada dependiendo del tiempo transcurrido desde la puesta en marcha (nivel de vacío, uniformidad de temperatura en celdas, etc). Si el tiempo transcurrido es suficiente este factor deja de tener relevancia.
- Tipo de entrada. El efecto del cambio en una entrada es distinto si se trata de un flujo másico, o una temperatura, así como si por ejemplo el cambio se produce sobre el agua caliente que entra en el primer efecto o en el agua de refrigeración.
- Magnitud del cambio. Cuanto mayor es la variación en una entrada, mayor es el tiempo a transcurrir hasta alcanzar el nuevo punto de operación.

De manera heurística se ha determinado en la MED de la PSA que un intervalo de 10 minutos en el que las variables de interés permanezcan estables es suficiente para considerar que se está trabajando en condiciones de estado estacionario. Una mejora a desarrollar es establecer el tiempo requerido para un punto de operación en función de los factores mencionados anteriormente, lo que permitiría alcanzar puntos de operación de manera más eficiente, así como generalizar el algoritmo para su uso en otros sistemas distintos al de estudio (**O1**).

Además del tiempo requerido para alcanzar el estado estacionario, es necesario establecer qué variables deben permanecer estables así como su rango de variación admisible. Se intenta minimizar la variación permitida lo máximo posible, pero teniendo en cuenta variaciones en la medida que puedan ser introducidas tanto por el sensor como por la propia operación de la planta (automatización de la operación a bajo nivel, **O1**).

Caracterización y modelado de una planta MED

En concreto, las variables de interés son las del flujo y temperatura de agua caliente y refrigeración, la presión en el condensador final y el caudal de destilado producido.

A continuación, se explica la estrategia seguida para identificar los puntos de operación en estado estacionario (ver diagrama en la figura 5):

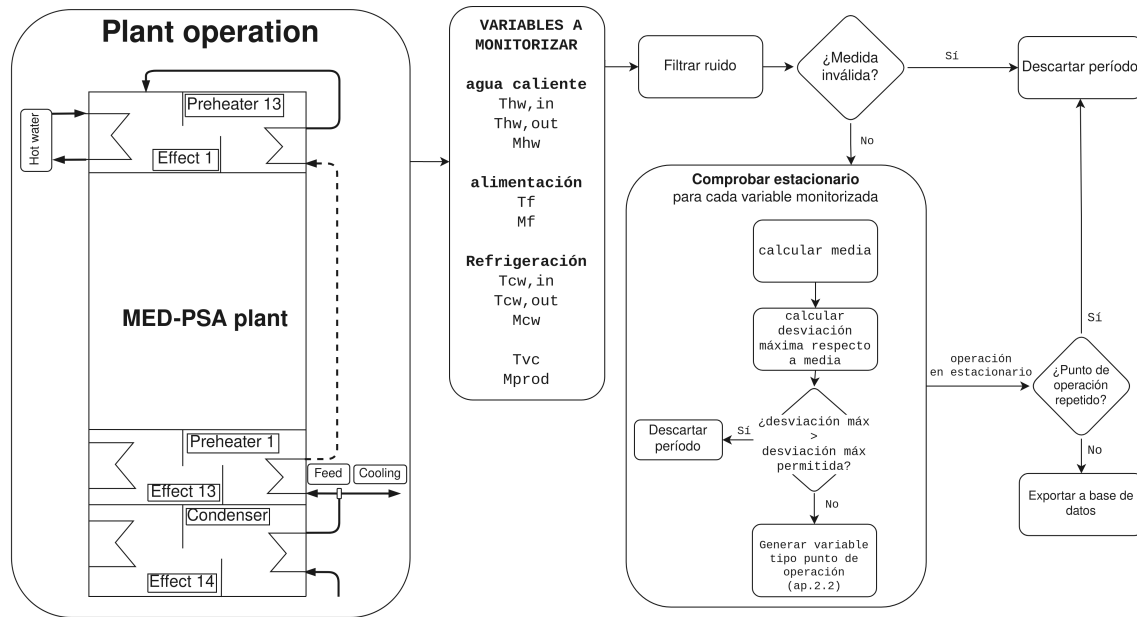


Fig. 5: Diagrama de flujo para la detección de operación en estacionario

1. En primer lugar, se calcula el valor medio de cada una de las señales cada 60 segundos para filtrar ruido en la señal. En el caso que alguna de las señales presente demasiadas medidas inválidas (sin lectura o lectura errónea) se descarta ese período.
2. Tras el cálculo de diez medias consecutivas exitosas (sin medidas inválidas), lo que equivale a los 10 minutos de período en los que se deben encontrar en condiciones estables, se comprueba la variación máxima de las variables monitorizadas con respecto a la media.
3. Cuando un estacionario es identificado, se genera una nueva variable del tipo mencionado en el apartado 2.2, añadiendo dos nuevos campos, el que recoge los valores medios de todas las variables del sistema para ese período y otro con información de los parámetros y resultados del algoritmo de detección de estado estacionario.
4. Una vez que se ha completado el recorrido de todo el ensayo, se comprueba el listado de puntos de operación para descartar los puntos que sean redundantes (mismo punto de operación detectado consecutivamente).
5. Los puntos de operación que son únicos (no redundantes) se exportan a la base de datos.

En la figura 6) se representa la evolución de las distintas señales. Cada comprobación realizada es resaltada con un recuadro rojo con longitud igual al período de comprobación y como límites superior e inferior la desviación máxima permitida. Cuando no se detecta operación en estacionario, se muestra una línea roja en la variable responsable, mientras que cuando se detecta un estacionario aparece una línea verde. La última gráfica representa el tiempo operado desde la última limpieza, el cual es explicado en la Sección 2.4.

Caracterización y modelado de una planta MED

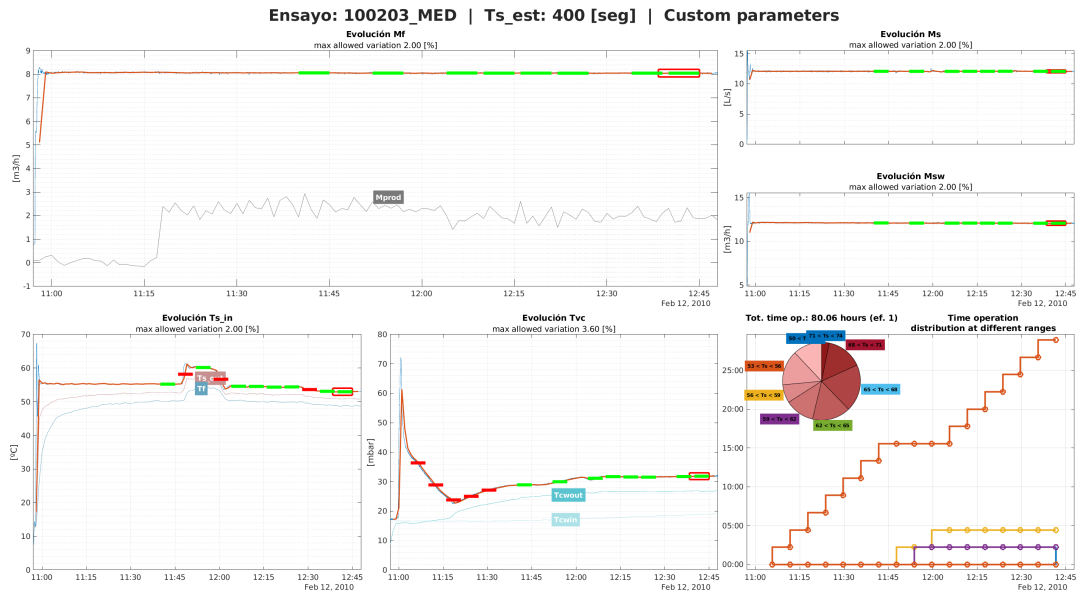


Fig. 6: Resultado de detección de operación en estado estacionario

2.4 Caracterización del perfil de ensuciamiento de la planta

En la superficie de los intercambiadores de calor de los efectos de una planta MED se acumulan sales y otras sustancias provenientes del agua de alimentación. Esta acumulación depende de las condiciones de operación (temperatura máxima de operación principalmente [8], también llamada TBT del inglés *Top Brine Temperature*) y del tiempo operado, y es la causante de reducir el rendimiento de la planta. Esta acumulación no es homogénea en todos los efectos, sino que sigue un perfil (tiende a ser menor a menor temperatura) que es similar al perfil de temperaturas de los efectos.

En el marco del objetivo **O2** se plantea la aplicación de técnicas de mantenimiento predictivo para seguir una estrategia de limpieza de una planta MED, que tiene potencial para:

- Poder realizar limpiezas en celdas localizadas en lugar de toda la planta.
- Combinar distintas estrategias de limpieza de manera eficiente [17]. Esto permitiría reducir la necesidad de limpiezas con tiempos muertos elevados.
- Realizar programas de limpieza [7] de manera automática en base a criterios como rendimiento térmico o económico.

Actualmente, se está llevando a cabo el estudio y caracterización del perfil de ensuciamiento en función de las condiciones de operación y el tiempo operado. Para ello, se parte de la base de datos de puntos de operación históricos de la planta, para los cuales se ha contabilizado el tiempo de operación, como se puede apreciar en la última gráfica de la figura 6, donde se muestra información del tiempo transcurrido desde la última limpieza y una distribución del tiempo operado a distintas temperaturas para el primer efecto (aunque se monitoriza para todos los efectos, de manera que se puedan tener en cuenta factores como limpiezas parciales). El siguiente paso es la repetición de nuevos ensayos de los grupos más interesantes para poder ampliar el número de puntos operación en el mismo. Además, la adición del contador de tiempo operado mencionado anteriormente se ha producido recientemente, y ahora es necesario volver a realizar el procesamiento de los datos históricos. Una vez completado todo esto, será necesario realizar un análisis estadístico y establecer correlaciones entre variables relevantes (como la temperatura de agua caliente) y el tiempo operado

Caracterización y modelado de una planta MED

respecto a la pérdida de rendimiento en la transferencia de calor, así como realizar análisis de sensibilidad y redactar un artículo con los resultados obtenidos.

Para la realización del estudio, el primer paso es la identificación de los puntos de operación similares a lo largo de los años que difieran en el tiempo de operación transcurrido desde una limpieza. Para ello se han identificado las variables que determinan si dos puntos de operación se pueden considerar similares y su variación máxima (similar a la detección de operación en estacionario). Estas variables son: caudal y temperatura de entrada del agua caliente, alimentación y, caudal y temperatura de salida de agua de refrigeración. El proceso de identificación parte de una lista de puntos de operación, se compara el primer punto con el resto y todos los puntos que cumplan los márgenes de variación para las variables mencionadas se consideran similares y pasan a formar parte de un grupo. El proceso se repite con el resto de puntos sin agrupar. Una vez se completa el recorrido, se obtiene un listado de grupos de puntos similares y se realiza la ejecución del modelo de calibración (Sección 2.2) para obtener el coeficiente de transferencia de calor en los distintos efectos.

Una vez procesado cada punto de operación para cada uno de los grupos, se realiza un informe de resultados como el mostrado en la figura 7. En la primera gráfica se representa un mapa (temperaturas en eje de ordenadas y flujos en eje de abscisas), el cual se divide en diferentes zonas de operación de la planta MED (agua caliente, alimentación y refrigeración) que contienen cada uno de los puntos similares. Debajo de esta gráfica se muestra la situación de cada uno de los puntos en una línea temporal representada mediante líneas verticales para cada una de las limpiezas. En la parte inferior de esta gráfica se muestra una tabla con los valores numéricos de las distintas variables para cada uno de los puntos del grupo. En la parte superior derecha se encuentra la gráfica de mayor interés, ya que contiene la información de la evolución de los coeficientes de transferencia de calor para cada uno de los efectos de la planta. Estos coeficientes varían a lo largo del tiempo (considerando puntos similares de operación) debido a factores como el ensuciamiento.

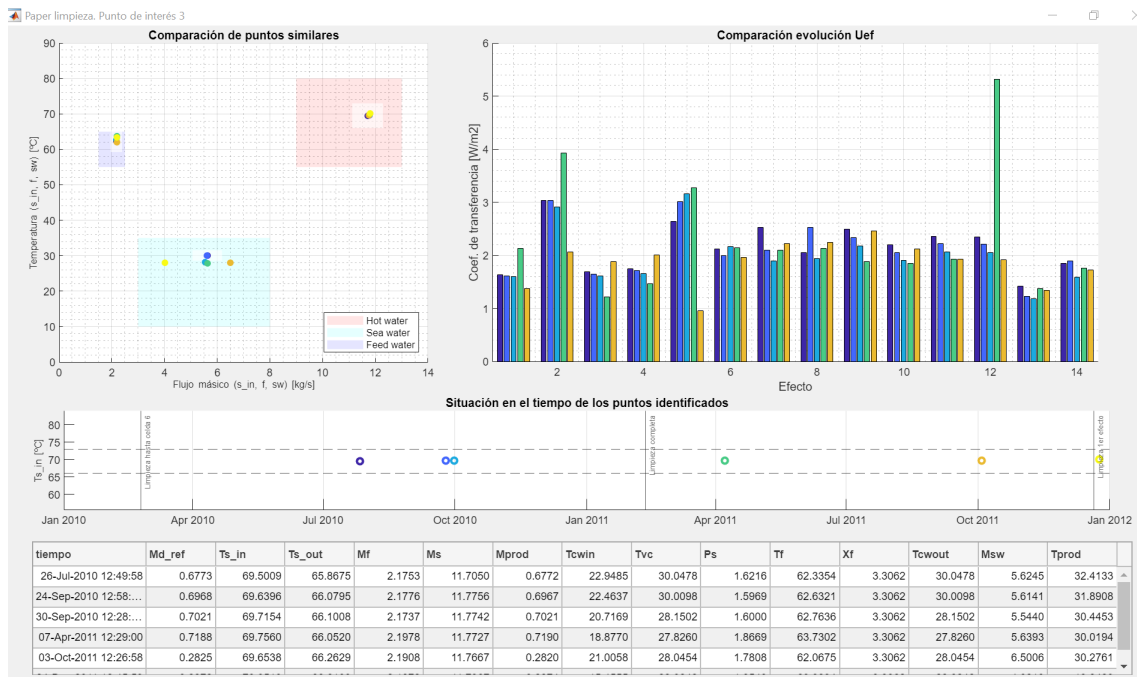


Fig. 7: Visualización del resultado de la evolución de los coeficientes de transferencia para uno de los grupos de puntos similares

3 Conclusiones

Durante el primer año de doctorado el trabajo se ha centrado en el asentamiento de las bases sobre las que se apoyarán todos los desarrollos propuestos para la consecución de los objetivos de este trabajo de investigación. Principalmente, se han implementado en MATLAB una serie de funciones y utilidades que permiten automatizar de manera importante el flujo de trabajo. Todo el desarrollo posee un carácter modular y flexible de manera que se puedan implementar de manera sencilla nuevas características cuando sea necesario, o aprovechar/reutilizar el código en desarrollos futuros.

Los próximas actividades de este trabajo de investigación se centrarán en el acondicionamiento de la planta MED de la PSA tras las últimas modificaciones realizadas, con el objetivo que esté operativa para la realización de ensayos, tanto para la sintonización de los lazos de control (**O1**) como para la repetición de aquellos que sean necesarios para evaluar el perfil de ensuciamiento de la planta (**O2**). Los resultados obtenidos se plasmarán en dos artículos, el primero sobre el trabajo mencionado en la Sección 2.4 y otro dentro de uno de los paquetes de trabajo del proyecto europeo SFERA-III [4] sobre la estandarización en la evaluación del rendimiento de una planta MED. Ambos serán enviados a revistas internacionales con alto factor de impacto. La metodología propuesta en 2.2 será presentada en el congreso internacional de desalación *Desalination for the Environment: Clean Water and Energy* en el mes de Junio. Asimismo, se llevará a cabo la validación del modelo de simulación y de la metodología planteados en 2.2 mediante una campaña experimental.

References

1. Find minimum of constrained nonlinear multivariable function - MATLAB fmincon, [bluehttps://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html](https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html)
2. Plataforma Solar de Almería, [bluehttp://www.psa.es/es/index.php](http://www.psa.es/es/index.php)
3. SFERA III. Guidelines for reporting the performance of DWT systems (WP7.1), [bluehttps://sfera3.sollab.eu/deliverables/](https://sfera3.sollab.eu/deliverables/)
4. SFERA III. Guidelines for reporting the performance of DWT systems (WP7.1), [bluehttps://sfera3.sollab.eu/deliverables/](https://sfera3.sollab.eu/deliverables/)
5. Time Series Collections — MongoDB Manual, [bluehttps://docs.mongodb.com/manual/core/timeseries-collections/](https://docs.mongodb.com/manual/core/timeseries-collections/)
6. Water Mining, European Research Project, [bluehttps://watermining.eu/](https://watermining.eu/)
7. Al Ismaili, R., Lee, M.W., Wilson, D.I., Vassiliadis, V.S.: Heat exchanger network cleaning scheduling: From optimal control to mixed-Integer decision making. *Computers & Chemical Engineering* **111**, 1–15 (Mar 2018). <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.12.004>, [bluehttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135417304349](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135417304349)
8. Al-Rawajfeh, A.E., Ihm, S., Varshney, H., Mabrouk, A.N.: Scale formation model for high top brine temperature multi-stage flash (msf) desalination plants. *Desalination* **350**, 53–60 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.07.016>
9. Alrobaei, H.: Novel integrated gas turbine solar cogeneration power plant. *Desalination* **220**(1-3), 574–587 (Mar 2008). <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2007.01.058>, publisher: Elsevier
10. Boretti, A., Rosa, L.: Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water* **2**(1), 1–6 (Jul 2019). <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>, [bluehttps://www.nature.com/articles/s41545-019-0039-9](https://www.nature.com/articles/s41545-019-0039-9), number: 1 Publisher: Nature Publishing Group
11. Chorak, A., Palenzuela, P., Alarcón-Padilla, D.C., Abdellah, A.B.: Experimental characterization of a multi-effect distillation system coupled to a flat plate solar collector field: Empirical correlations. *Applied Thermal Engineering* **120**, 298–313 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.115>, publisher: Elsevier Ltd
12. Darwish, M.A., Alsairafi, A.: Technical comparison between TVC/MEB and MSF. *Desalination* **170**(3), 223–239 (Nov 2004). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.01.006>, [bluehttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916404800274](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916404800274)
13. Darwish, M., Awadhi, F., Raheem, M.: The MSF: Enough is enough. *Desalination and Water Treatment - DESALIN WATER TREAT* **22**, 193–203 (Oct 2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1737>

Caracterización y modelado de una planta MED

14. Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y.: Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances* **2**(2), e1500323 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>, [bluehttps://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.1500323](https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.1500323)
15. Palenzuela, P., Alarcón-Padilla, D.C., Zaragoza, G.: Concentrating Solar Power and Desalination Plants: Engineering and Economics of Coupling Multi-Effect Distillation and Solar Plants. New York, NY (Oct 2015)
16. Palenzuela, P., Hassan, A.S., Zaragoza, G., Alarcón-padilla, D.c.: Steady state model for multi-effect distillation case study : Plataforma Solar de Almería MED pilot plant. *Desalination* **337**, 31–42 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.029>, [bluehttp://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.029](https://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.029), publisher: Elsevier B.V.
17. Pogiatis, T., Wilson, I., Vassiliadis, V.: Scheduling the cleaning actions for a fouled heat exchanger subject to ageing: MINLP formulation. *Computers & Chemical Engineering* **39**, 179–185 (Apr 2012). <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.12.012>
18. Rodríguez, J.M.S.: MATLAB-MongoDB (Oct 2021), [bluehttps://github.com/Juasmis/MATLAB-MongoDB](https://github.com/Juasmis/MATLAB-MongoDB), original-date: 2021-10-26T12:17:40Z
19. Youssef, P.G., AL-Dadah, R.K., Mahmoud, S.M.: Comparative Analysis of Desalination Technologies. *Energy Procedia* **61**, 2604–2607 (2014). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.258>, [bluehttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214032871](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214032871)

Modelado y gestión energética de una microrred

Alex Omar Topa Gavilema

Universidad de Almería, Dpt. of Informática - CIESOL - ceiA3, Ctra. Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano 04120, Almería, Spain. atg511@inlumine.ual.es

Resumen Este trabajo consiste en el modelado y gestión energética de una microrred (MR), mediante la utilización de modelos de caja blanca o caja negra para el control óptimo de la MR, a través de estos modelos y por medio de una o varias técnicas de optimización que se han probado durante los últimos años en la gestión energética de MRs. La fase inicial para la gestión energética de la MR empezó adoptando uno de los algoritmos de control más utilizados en la gestión energética de MRs, el control predictivo basado en modelo o “*Model Predictive Control (MPC)*”, con el objetivo de cubrir la demanda de carga de una oficina ubicada en el edificio CIESOL. Finalmente, los resultados de esta investigación se mostrarán, mediante la elaboración y publicación de artículos científicos en revistas de alto impacto, congresos nacionales e internacionales para validar la investigación realizada en esta línea de investigación.

Keywords: microrred · gestión energética · modelado · MPC.

1. Introducción

El uso y suministro de la energía como se concibe hoy en día es insostenible desde un punto de vista social, económico y ambiental. Sin acciones decididas frente a los gases de efecto invernadero (GEI) se calcula que estos serán duplicados para el año 2050, agravando aún más el problema del calentamiento global. Además, el incremento de la demanda de petróleo crecerá y con esto aumentará la preocupación por la obtención de este suministro limitado. Es por esto, la necesidad de realizar acciones para que el suministro eléctrico sea más sostenible, siendo una de ellas la inclusión de energía renovable a los sistemas eléctricos, pero algunos de estos recursos energéticos poseen una gran fluctuación en su producción (sol, viento, corrientes marinas, etc.) y pueden desencadenar múltiples problemas técnicos, si su integración no es adecuada [1,2].

Los sistemas de energía eléctrica han evolucionado hace varias décadas en grandes redes interconectadas, que están reguladas y controladas mediante sofisticados equipos para el control de flujos de carga. Estas redes son más robustas frente a perturbaciones externas, pero son más vulnerables frente a incidentes de falla [3]. El concepto MR también llamado en inglés (*MicroGrid*) se puede entender como una agrupación de generadores y cargas, operando como un sistema único controlable, suministrando energía eléctrica en el lugar donde se ubica, este concepto es considerado como el nuevo paradigma de los sistemas eléctricos,

ya que define la operación de la generación distribuida (GD) (también llamado en inglés *Distributed Generation*), que busca generar energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovable, por otra parte, las MRs han ganado popularidad en el sector industrial, ya que sus procesos y estructura tecnológica les permitirían participar en el negocio de la GD [1,4]. Esta tendencia también ha llegado a la producción de energía eléctrica en edificios residenciales y comerciales, generalmente a través de la energía fotovoltaica en las MRs. La instalación de placas fotovoltaicas en el techo de una determinada edificación permite producir energía eléctrica que se consume y se vende en caso de exceso de generación de energía [5]. El concepto MR se ha propuesto para la utilización eficiente y flexible de los recursos energéticos además de integrar diferentes tipos de recursos de energía distribuida y generadores, como energías renovables, sistema de almacenamiento y microturbinas que permite mejorar la sostenibilidad y la eficiencia del sistema en general. Además, las MRs permiten ubicar la generación cerca de los centros de carga con un mejor mecanismo de gestión y control para permitir una distribución activa con una mayor confiabilidad [6,7].

El desarrollo de estrategias de gestión energética óptima de acuerdo con las nuevas políticas reguladoras es un campo emergente de investigación. Estas estrategias pueden ser evaluadas a través del uso de indicadores como autoconsumo o autosuficiencia, que muestran el consumo de energía en un edificio incorporando un sistema fotovoltaico conectado a la red [8]. Para maximizar el autoconsumo energético en edificios residenciales, es de gran importancia la gestión de la carga y el almacenamiento de energía que son las principales estrategias para incrementar el autoconsumo [5].

Un Sistema de Gestión Energética (SGE) tiene como objetivo principal conseguir el equilibrio entre la generación y la demanda de energía de forma eficaz, garantizando un suministro de energía eléctrica estable a la carga. Existen varios objetivos que el SGE puede gestionar, estos van desde únicamente gestionar el exceso/déficit de energía hasta considerar otras opciones con criterios económicos u operativos. Cuando es posible, la energía eléctrica de las fuentes renovables se entrega directamente a las cargas, además el excedente de energía se desvía a los sistemas de almacenamiento o a la red pública, por otra parte, si existe un déficit de energía renovable, la diferencia de energía debe ser suministrada por los sistemas de almacenamiento o la red pública [9]. Por esta razón, la MR tiene la necesidad de un algoritmo de control que permita gestionar la energía, uno de los algoritmos de control ampliamente utilizados en SGE es el MPC. De forma muy resumida, la idea principal de MPC es obtener una señal de control resolviendo en cada tiempo de muestreo un problema de optimización, en un horizonte de predicción y control finitos basado en el modelo del sistema. A partir de este algoritmo de control se pretende dar un enfoque, aplicando múltiples opciones de esta técnica para lograr una eficiencia energética, económica y amigable con el medio ambiente en el SGE de una MR [10].

El estudio de esta tesis doctoral tiene como marco de trabajo la MR ensamblada e instalada en Centro de Investigaciones de la Energía Solar (CIESOL). Esta MR incorpora un sistema fotovoltaico acoplado a una batería con dos posi-

bilidades de configuración: la configuración *DC-link*, donde la batería está conectada antes del convertor DC/AC (del inglés *Direct Current/Alternating Current*) y la configuración *AC-link*, donde la batería se conecta a través de un inversor bidireccional AC/DC de forma directa a la red doméstica AC [11]. Para la MR instalada en el edificio CIESOL se utilizó la configuración *DC-link* tal como se observa en la fig. 1, donde suministra energía eléctrica a un banco de ensayos para motores de vehículos eléctricos.

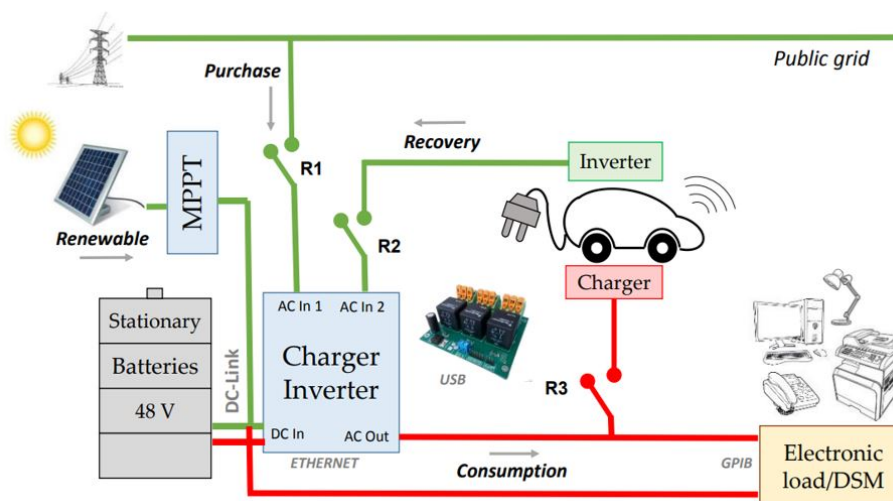


Figura 1. La MR como objeto de estudio, integra un sistema fotovoltaico con almacenamiento, un vehículo eléctrico y un sistema de gestión de la demanda energética (DSM del inglés Demand System Management) reproducido por un sistema electrónico programable de carga. En el medio, una placa de relé que controla R1, R2 y R3 [5].

Se puede apreciar con líneas de color verde la potencia de entrada que pertenece a la energía procedente de la red pública, los paneles solares, el vehículo eléctrico, y las baterías. Por otro lado, las líneas de color rojo representan la potencia de salida, que pertenece a la potencia que el cargador / inversor utiliza en el equilibrio de la demanda y la carga de las baterías [5]. Uno de los subsistemas que forma parte de esta MR, es un banco de ensayos de motores, para la realización de ensayos sobre un motor de un vehículo eléctrico con presencia de energía fotovoltaica y almacenamiento, como se puede observar en la fig. 2.

El banco de ensayos permite realizar experimentos en las mismas condiciones de operación real del vehículo, debido a esto los resultados del rendimiento del motor y consumo energético pudieron ser validados para la implementación de estrategias de control [12]. Además, otros artículos relacionados con la gestión energética de MRs en edificios se muestran en [5,13,14,15,16,17,18,19], donde se aplican diferentes tipos de técnicas de optimización, para el control óptimo de

Modelado y gestión energética de una microrred

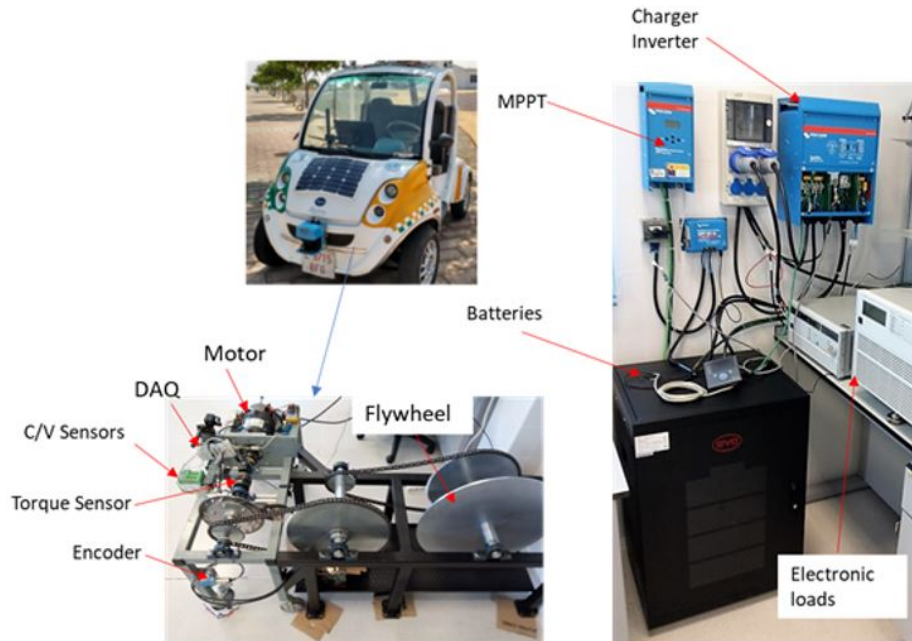


Figura 2. Vehículo eléctrico (arriba izquierda), MR instalada en CIESOL (derecha) e instrumentación del banco experimental construido (abajo izquierda) [8].

MRs. Esta tesis doctoral clasificará las técnicas de optimización existentes, para seleccionar la o las más adecuadas para el control óptimo de la MR.

2. Avances

Los avances de esta tesis doctoral están directamente relacionados con el cumplimiento de varios objetivos. La planificación aprobada fue variada ligeramente, debido al suceso de una pandemia que trastocó el cumplimiento de nuestros objetivos aprobados inicialmente.

Este segundo año de doctorado (2020-2021) está estrictamente relacionado con el año (2019-2020), ya que la revisión bibliográfica efectuada en el primer año de doctorado, tuvo como resultado la elaboración de un artículo científico titulado *“Towards optimal management in microgrids: an overview”* y la posterior publicación en la revista *“Energies”*. El artículo [20] describe, los elementos de una MR como: fuentes de energía renovable y energía fósil, sistemas de almacenamiento y dispositivos electrónicos de potencia. Además, se propone una clasificación en las técnicas de optimización más importantes en la gestión energética de MRs. Por otra parte, un segundo artículo científico titulado *“A review from design to control of solar systems for supplying heat in industrial process applications”* fue enviado a la revista *“Renewable and Sustainable Energy Reviews”*, la

respuesta del editor fue una “*Major revision*”, las correcciones fueron realizadas y estamos atentos a la respuesta de los revisores. Este review, describe el diseño y control de sistemas solares térmicos para suministrar calor a procesos industriales de baja demanda, para conocer las diferentes técnicas aplicadas, utilidad, limitaciones y los distintos sectores industriales donde se aplicaron.

El modelado de los elementos de la MR ubicada en el edificio CIESOL, a través de ecuaciones físicas es otro de los objetivos cumplidos. La MR que ha sido modelada, está compuesta por paneles solares (modelo REC260 PE), un seguidor de punto de máxima potencia (MPPT) (modelo 85/150, Victron Energy), la salida del controlador MPPT va un bus de CC que conecta un paquete de baterías, una carga electrónica y el cargador/inversor. La fig. 3 muestra el diagrama de bloques simplificado de la MR.

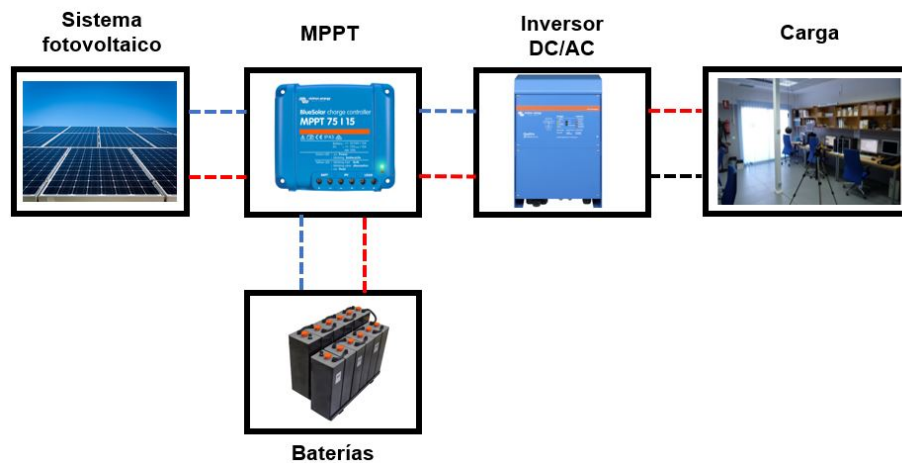


Figura 3. Diagrama de bloques simplificado de la MR.

2.1. Modelo del panel solar

La fig. 4 representa el circuito equivalente que se utiliza para modelar el sistema fotovoltaico [21]. Para facilitar la resolución del problema se trabajó a partir de parámetros establecidos por los fabricantes en condiciones estándar ($G_{st} = 1000W/m^2, T_{c,st} = 25^\circ C$). La e. (1) y e. (2) relaciona la intensidad y el voltaje de salida del módulo a temperatura y radiación constantes.

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

$$I = I_L - I_o \left[e^{\left(\frac{V+IR_s}{a}\right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

La MR está integrada por equipos de seguimiento del punto de máxima potencia, por esta razón se asume el punto de operación, la intensidad I_{mp} y voltaje V_{mp} de cada panel solar, estas pueden determinarse a partir de e. (3) y e. (4) mediante métodos numéricos [22], para nuestro caso hemos utilizado el método de Newton Raphson.

$$I_{mp} = I_L - I_o \left[e^{\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$\frac{I_{mp}}{V_{mp}} = \frac{\frac{I_o}{a} e^{\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a} \right)} + \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}} + \frac{I_o R_s}{a} + e^{\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a} \right)}} \quad (4)$$

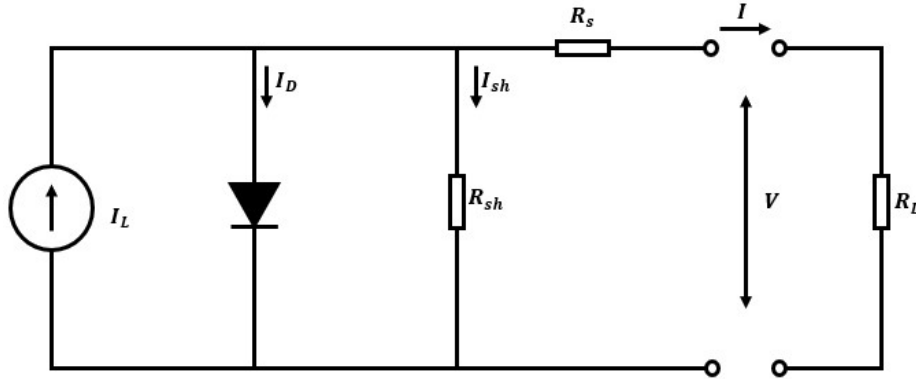


Figura 4. Modelo eléctrico para un panel fotovoltaico [22].

2.2. Modelo de la batería

El nivel de energía viene dado por el estado de carga de la batería (SOC) definido por la e. (5), definido como la relación entre la capacidad actual $P_{bat}(t)$ y la capacidad máxima de la batería C_{max} expresada en unidades de energía (Wh), para cada instante de muestreo T_s .

$$SOC(t+1) = SOC(t) - \frac{n_{bat} T_s}{C_{max}} (P_{bat}(t)) \quad (5)$$

Para gestionar los diferentes comportamientos en la carga y descarga se consideró el rendimiento de la batería n_{bat} igual tanto para la carga como para la descarga, evitando considerar variables binarias $\delta(t)$, que toma valor 1 para carga y 0 para descarga. El análisis de sistemas con presencia de no linealidades será objeto de estudio en el presente año, por otra parte, hemos considerado la ausencia de no linealidades en el sistema, para facilitar la resolución del problema de optimización.

2.3. Diseño del MPC

El MPC tiene pretende cubrir la demanda de carga de una oficina ubicada en el edificio bioclimático CIESOL, donde las e. (6-11), representan el modelo de la MR, donde las entradas del sistema están definidas por: $P_{bat}(t)$, que es la potencia de la batería, $P_{grid}(t)$, es la potencia de la red pública, la potencia renovable destinada a cubrir la demanda está definida a través de $P_{rnv,dem}(t)$, la potencia renovable inyectada a las baterías es $P_{rnv,iny}(t)$, por otro lado, como estados tenemos: el nivel de energía de la batería, que está designado por $SOC(t)$, la potencia renovable total disponible, que es $P_{rnv}(t)$, y $P_{gen}(t)$, es la potencia total generada disponible para cubrir a demanda de carga. Finalmente, consideramos como una constante la expresión $K_{bat} = \frac{n_{bat}}{C_{max}}$.

$$SOC(t+1) = SOC(t) - K_{bat}T_s(P_{bat}(t)) \quad (6)$$

$$P_{rnv}(t+1) = P_{rnv,dem}(t) + P_{rnv,iny}(t) \quad (7)$$

$$P_{gen}(t+1) = P_{bat}(t) + P_{grid}(t) + P_{rnv,dem}(t) \quad (8)$$

$$y_1(t) = SOC(t) \quad (9)$$

$$y_2(t) = P_{rnv}(t) \quad (10)$$

$$y_3(t) = P_{gen}(t) \quad (11)$$

El diseño del MPC, inicia a través de la correcta representación del modelo, para resolver SGE es recomendable representar el modelo del sistema en una representación de espacio de estados [9]. Las e. (12) y e. (13) componen el modelo de la MR, donde $x_m(t)$, $y_m(t)$ y $u(t)$ representan los vectores de estados, salidas y entradas del sistema, respectivamente.

$$x_m(t) = [SOC(t) \ P_{rnv}(t) \ P_{gen}(t)]^T$$

$$u(t) = [P_{bat}(t) \ P_{grid}(t) \ P_{rnv,dem}(t) \ P_{rnv,iny}(t)]^T$$

$$\begin{bmatrix} SOC(t+1) \\ P_{rnv}(t+1) \\ P_{gen}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC(t) \\ P_{rnv}(t) \\ P_{gen}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_{bat}T_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{bat}(t) \\ P_{grid}(t) \\ P_{rnv,dem}(t) \\ P_{rnv,iny}(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC(t) \\ P_{rnv}(t) \\ P_{gen}(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Las matrices A_m , B_m y C_m son las matrices del modelo aumentado de la MR, por otra parte, las e.(14) y e.(15), expresa el modelo aumentado de la MR, en la representación característica de espacio de estados.

$$A_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_m = \begin{bmatrix} -K_{bat}T_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad C_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Modelado y gestión energética de una microrred

$$x_m(t+1) = A_m x_m(t) + B_m u(t) \quad (14)$$

$$y_m(t) = C_m x_m(t) \quad (15)$$

El modelo aumentado se representa en función de incrementos a través de las e.(16-18).

$$\Delta x_m(t+1) = A_m \Delta x_m(t) + B_m \Delta u(t) \quad (16)$$

$$y_m(t+1) = C_m \Delta x_m(t+1) + y_m(t) \quad (17)$$

$$y_m(t+1) = C_m A_m \Delta x_m(t) + C_m B_m \Delta u(t) + y_m(t) \quad (18)$$

El modelo expresado anteriormente en función de incrementos, tiene como resultado un nuevo modelo aumentado a través de las e.(19-22) muestran el modelo en espacio de estados compacto. Las matrices A , B y C son las matrices del modelo aumentado en función de incrementos.

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m(t+1) \\ y_m(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & O_m \\ C_m A_m & I_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(t) \\ y_m(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(t) \quad (19)$$

$$[y_m(t)] = [O_m \ I_m] \begin{bmatrix} \Delta x_m(t) \\ y_m(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$x(t+1) = Ax(t) + B\Delta u(t) \quad (21)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (22)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_m & O_m \\ A_m C_m & I_m \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_m \\ B_m C_m \end{bmatrix} \quad C = [O_m \ I_m]$$

El vector de estados del modelo aumentado, está definido por $x(t)$ y la salida a través de $y(t)$

$$x(t) = [\Delta x_m(t) \ y_m(t)]^T$$

Las ecuaciones de predicción están definidas por:

$$y(t+1 | t) = Cx(t+1) \quad (23)$$

$$y(t+1 | t) = CAx(t) + CB\Delta u(t)$$

$$y(t+2 | t) = CA^2x(t) + CAB\Delta u(t) + CB\Delta u(t+1)$$

$$y(t+3 | t) = CA^3x(t) + CA^2B\Delta u(t) + CAB\Delta u(t+1) + CB\Delta u(t+2)$$

⋮

$$y(t+N_p | t) = CA^{N_p}x(t) + CA^{N_p-1}B\Delta u(t) + CA^{N_p-2}B\Delta u(t+1) + \dots \\ + CA^{N_p-N_u}B\Delta u(t+N_u-1)$$

Los vectores de salida Y e incremento de control ΔU , se muestran a través de las siguientes expresiones:

$$Y = [y(t+1|t) \ y(t+2|t) \ y(t+3|t) \ \cdots \ y(t+N_p|t)]^T$$

$$\Delta U = [u(t) \ u(t+1) \ u(t+2) \ \cdots \ u(t+N_u-1)]^T$$

Finalmente, obtenemos la respuesta libre (F) y forzada (G) del sistema, a través de las e.(24) y e.(25) para un horizonte de predicción N_p y un horizonte de control N_u .

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$G = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \cdots & 0 \\ CA^2B & CAB & CAB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \cdots & CA^{N_p-N_u}B \end{bmatrix} \quad (25)$$

La ecuación de salida del sistema en su forma compacta se expresa a través de la e.(26).

$$Y = Fx(t) + G\Delta U \quad (26)$$

La función de costo tiene como objetivo cubrir la demanda de carga de la oficina ubicada en el edificio CIESOL, minimizando el ΔU .

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} Q_\delta (Y - R)^2 + \sum_{i=1}^{N_u} Q_\lambda \Delta u(t+i-1)^2 \quad (27)$$

$$J = (Y - P_{dem}(t))^T Q_\delta (Y - P_{dem}(t)) + \Delta u^T Q_\lambda \Delta u$$

$$J = (Fx(t) - P_{dem}(t))^T Q_\delta (Fx(t) - P_{dem}(t)) + \Delta u^T (G^T Q_\delta G + Q_\lambda) \Delta u$$

$$+ 2(Fx(t) - P_{dem}(t))^T Q_\delta G \Delta u$$

$$J = \frac{1}{2} \Delta u^T (G^T Q_\delta G + Q_\lambda) \Delta u + (Fx(t) - P_{dem}(t))^T Q_\delta G \Delta u$$

$$+ (Fx(t) - P_{dem}(t))^T Q_\delta (Fx(t) - P_{dem}(t))$$

$$J = \frac{1}{2} x^T H x + F_o x + b \quad (28)$$

$$H = G^T Q_\delta G + Q_\lambda$$

$$F_o = (Fx(t) - P_{dem}(t))^T Q_\delta G$$

$$b = (Fx(t) - P_{dem}(t))^T Q_\delta (Fx(t) - P_{dem}(t))$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (29)$$

$$P_{bat,min} \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat,max} \quad (30)$$

$$P_{grid,min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid,max} \quad (31)$$

$$P_{gen,min} \leq P_{gen}(t) \leq P_{gen,max} \quad (32)$$

$$P_{rnv,min} \leq P_{rnv}(t) \leq P_{rnv,max} \quad (33)$$

$$P_{rnv,dem,min} \leq P_{rnv,dem}(t) \leq P_{rnv,dem,max} \quad (34)$$

$$P_{rnv,iny,min} \leq P_{rnv,iny}(t) \leq P_{rnv,iny,max} \quad (35)$$

2.4. Resultados

En el periodo (2020-2021) y lo que va del presente año hemos finalizado una parte del objetivo “Desarrollo de un sistema de gestión integral de los elementos de la MR que permita la intercomunicación entre modelos para implementar la estrategia de gestión y control óptimo. Dicho sistema se probará primero en simulación con los modelos desarrollados y luego se implementará y probará en la microrred del edificio CIESOL”, a través de los modelos físicos del sistema, se desarrolló un SGE, mediante la implementación de un MPC que tiene como objetivo mantener el balance de energía entre: la energía generada y demandada los resultados se pueden apreciar en la fig. 5. El estado de carga de la batería se muestra en la fig. 6.

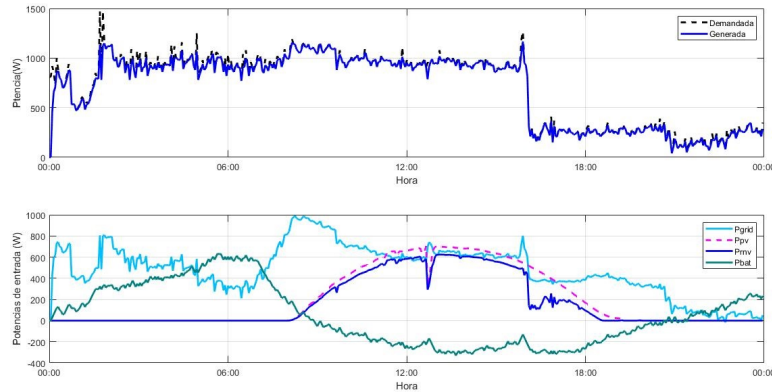


Figura 5. Respuesta a la demanda de la MR.

Se espera añadir variables discretas al problema de optimización, con el objetivo de no solo encontrar el equilibrio energético entre la demanda y generación,

sino además minimizar los costos de operación, convirtiéndolo en un problema de optimización multiobjetivo.

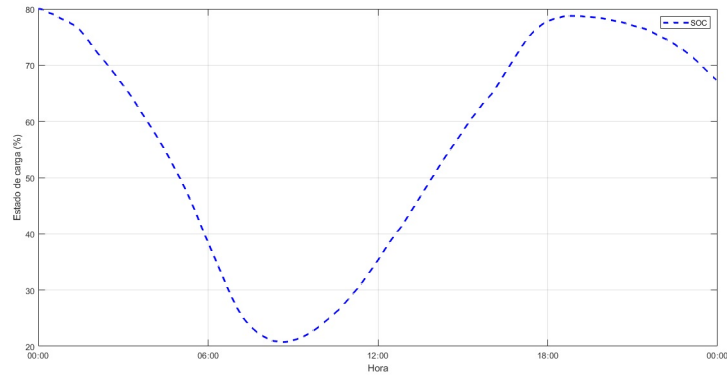


Figura 6. Estado de carga de la batería.

3. Conclusiones

En este segundo año de doctorado, se ha finalizado uno de los objetivos planteados, donde se publicó una review sobre la línea de investigación a desarrollar en la tesis y, además, se envió otra review, el cual describe las estrategias de control que se utilizan en aplicaciones con fuentes de energía solar térmica en sectores industriales.

La obtención del modelo físico del sistema, permitió implementar un SGE de la MR, a través de un MPC que tiene como objetivo el equilibrio entre la demanda y energía producida, permitiendo simular ambientes con perfiles de carga reales, este ambiente de simulación pretende probar diferentes funciones objetivo para minimizar o maximizar diferentes parámetros como la producción de energía de la MR, minimizar las emisiones de CO_2 , minimizar los costos operativos etc.

Bibliografía

1. Bustos, Cristian, David Watts y Hui Ren: *MicroGrid Operation and Design Optimization With Synthetic Wins and Solar Resources*. IEEE Latin America Transactions, 10(2):1550–1562, 2012.
2. Llanos, Jacqueline, Daniel E. Olivares, John W. Simpson-Porco, Mehrdad Kazemirani y Doris Saez: *A Novel Distributed Control Strategy for Optimal Dispatch of Isolated Microgrids Considering Congestion*. IEEE Transactions on Smart Grid, 10(6):6595–6606, 2019, ISSN 19493061.

3. Velasco De La Fuente, David, Cesar Leonardo Trujillo Rodriguez y Eider Alexander Narvaez: *Review of Anti-Islanding Methods: Analysis by Figures of Merit Tools for Controllers Reconfiguration in Microgrids*. IEEE Latin America Transactions, 13(3):679–686, 2015, ISSN 15480992.
4. Núñez, O., F. Valencia, P. Mendoza-Araya, R. Palma-Behnke, G. Jiménez y J. Cotos: *Microgrids protection schemes*. En *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, páginas 597–602, 2015.
5. Torres-Moreno, Jose Luis, Antonio Gimenez-Fernandez, Manuel Perez-Garcia y Francisco Rodriguez: *Energy management strategy for micro-grids with PV-battery systems and electric vehicles*. Energies, 11(3), 2018, ISSN 19961073.
6. Ahamed, M. H.F., U. D.S.D. Dissanayake, H. M.P. De Silva, H. R.C.G.P. Pradeep y N. W.A. Lidula: *Modelling and simulation of a solar PV and battery based DC microgrid system*. International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016, (i):1706–1711, 2016.
7. Meng, Lexuan, Mehdi Savaghebi, Fabio Andrade, Juan C. Vasquez, Josep M. Guerrero y Moisès Graells: *Microgrid central controller development and hierarchical control implementation in the intelligent microgrid lab of Aalborg University*. Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2015-May(May):2585–2592, 2015.
8. Luthander, Rasmus, Joakim Widén, Daniel Nilsson y Jenny Palm: *Photovoltaic self-consumption in buildings: A review*. Applied Energy, 142:80–94, 2015, ISSN 03062619. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.
9. Bordons, Carlos, Félix Garcia-Torres y Miguel A Ridao: *Basic Energy Management Systems in Microgrids*. In: *Model Predictive Control of Microgrids*, volumen 358. Springer, 2020, ISBN 3030245691.
10. Velarde, P., L. Valverde, J.M. Maestre, C. Ocampo-Martinez y C. Bordons: *On the comparison of stochastic model predictive control strategies applied to a hydrogen-based microgrid*. Journal of Power Sources, 343:161–173, 2017, ISSN 0378-7753. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775317300150>.
11. Riesen, Yannick, Christophe Ballif y Nicolas Wyrsh: *Control algorithm for a residential photovoltaic system with storage*. Applied Energy, 202:78–87, 2017, ISSN 03062619. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.016>.
12. Torres-Moreno, José Luis, Galo Heredia, Antonio Giménez-Fernández y Antonio Visioli: *Banco de ensayo para motores de vehículos eléctricos*. En *XL Jornadas de Automática*, páginas 450–457. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións, 2019.
13. Moya, Francisco David, José Luis Torres-Moreno y José Domingo Álvarez: *Optimal model for energy management strategy in smart building with energy storage systems and electric vehicles*. Energies, 13(14), 2020, ISSN 19961073.
14. Umeozor, Eva C. y Milana Trifkovic: *Energy management of a microgrid via parametric programming*. IFAC-PapersOnLine, 49(7):272–277, 2016, ISSN 2405-8963. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316304852>, 11th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems Including Biosystems DYCOPS-CAB 2016.
15. Liu, Derong, Yancai Xu, Qinglai Wei y Xinliang Liu: *Residential energy scheduling for variable weather solar energy based on adaptive dynamic programming*. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 5(1):36–46, 2018, ISSN 23299274.
16. Petrollese, Mario, Luis Valverde, Daniele Cocco, Giorgio Cau y José Guerra: *Real-time integration of optimal generation scheduling with MPC for the energy ma-*

Modelado y gestión energética de una microrred

- agement of a renewable hydrogen-based microgrid.* Applied Energy, 166:96–106, 2016, ISSN 03062619. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.014>.
17. Li, Cunbin, Xuefeng Jia, Ying Zhou y Xiaopeng Li: *A microgrids energy management model based on multi-agent system using adaptive weight and chaotic search particle swarm optimization considering demand response.* Journal of Cleaner Production, 262:121247, 2020, ISSN 09596526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121247>.
 18. Leonori, Stefano, Maurizio Paschero, Fabio Massimo Frattale Mascioli y Antonello Rizzi: *Optimization strategies for Microgrid energy management systems by Genetic Algorithms.* Applied Soft Computing Journal, 86:105903, 2020, ISSN 15684946. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105903>.
 19. Leonori, Stefano, Alessio Martino, Fabio Massimo Frattale Mascioli y Antonello Rizzi: *Microgrid Energy Management Systems Design by Computational Intelligence Techniques.* Applied Energy, 277(February):115524, 2020, ISSN 03062619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115524>.
 20. Topa Gavilema, Álex Omar, José Domingo Álvarez, José Luis Torres Moreno y Manuel Pérez García: *Towards Optimal Management in Microgrids: An Overview.* Energies, 14(16), 2021, ISSN 1996-1073. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/16/5202>.
 21. Duffie, John A y William A Beckman: *Solar engineering of thermal processes.* John Wiley & Sons, 2013.
 22. Ramos-Teodoro, Jeronimo, Francisco Rodriguez-Diaz, Manuel Berenguel y cols.: *Modelado de instalaciones fotovoltaicas para la gestión de un energy hub con recursos heterogéneos.* 2018.