

IV JORNADAS DE DOCTORADO EN INFORMÁTICA

26 DE FEBRERO DE 2021,
UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

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

IV Jornadas de Doctorado en Informática

© del texto:
los autores

Libros Electrónicos n.º 116

© de la edición:

Editorial Universidad de Almería, 2021

editorial@ual.es

www.ual.es/editorial

Telf/Fax: 950 015459

α

ISBN: 978-84-1351-081-1

Colabora:

Comisión académica de doctorado en informática

<https://sites.google.com/ual.es/jdi2021/>

@doctoradoINFUAL

doctorado.informatica@Ual

Financiado por:

Escuela Internacional de Doctorado
y Departamento de Informática



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



IV Jornadas de Doctorado en Informática

26 de febrero de 2020, Universidad de Almería

Las IV Jornadas de Doctorado en Informática de la Universidad de Almería (JDI2021@UAL) es un evento que se realiza cada año en el marco del Programa de Doctorado en Informática de la UAL cuyo objetivo principal es la realización del seguimiento de la investigación anual de los estudiantes de doctorado, y que sirve, a su vez, como punto de encuentro anual para estudiantes, tutores, directores y miembros de la comunidad universitaria con intereses en la investigación científica en el ámbito de la Informática. Así mismo, estas jornadas pretenden servir como lugar para la difusión y divulgación de los resultados de investigación de la Informática que se están desarrollando en las tesis doctorales soportadas por los actuales proyectos de I+D de los Grupos de Investigación del Departamento de Informática.

En su cuarta edición, estas jornadas ha contado con el envío de 21 trabajos de investigación en progreso de los cuales 19 han sido presentados en forma de poster. Esta jornada ha contado con la presentación de los resultados de las tesis doctorales ya finalizadas en el año 2020 tituladas “Estrategias de control jerárquico y optimización aplicadas a plantas de destilación por membranas alimentadas con energía solar” y “Computación de altas prestaciones para la resolución de problemas de optimización en bioinformática” presentadas por los estudiantes egresados Dr. Juan Diego Gil Vergel y Dr. Savíns Puertas Martín, respectivamente. Además, esta edición también ha contado 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/jdi2021/>

Índice

Trabajos presentados

1.	Control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones usando compensadores clásicos	1
2.	Federación de nodos de sensores inalámbricos basados en blockchain	11
3.	Optimización de consultas en Spatial BigData. Heurísticas, Índices y Procesamiento Distribuido en Memoria.	19
4.	Control automático y gestión de recursos en distritos agroindustriales	29
5.	Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto de Vehículo Urbano Eléctrico Ligero. Almacenamiento y Distribución de Energía.	38
6.	El paciente frente a los nuevos modelos digitales de relación médico-paciente implantados ante la situación de pandemia ocasionada por la Covid 19. Desarrollo de herramientas que facilitan la información y comunicación.	46
7.	Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones.	52
8.	Optimización dinámica y estrategias de control predictivo para sistema solares térmicos.	62
9.	Model-based predictive control of greenhouse climate for the management of disease.	73
10.	Interoperabilidad entre dispositivos IoT en el marco de la Web of Things.	83
11.	Optimización de Planes de Radioterapia en Paralelo con GENOCOP III en GPU.	91
12.	Integración de modelos como servicio (GMaaS) en iVeg, plataforma IoT para la agricultura intensiva protegida.	97
13.	Algoritmo de clasificación de cultivos utilizando imágenes multi-espectrales y software eCognition.	104
14.	Optimización de comparadores cuánticos tolerantes a fallos para la binarización de imágenes.	112
15.	Modeling and control of the microalgae biomass production process in raceway reactors.	121
16.	Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional y compensación de movimiento controlada por el cliente.	132
17.	Evaluación de computación paralela en un clúster basado en raspberry pi.	142
18.	Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática en los estudiantes universitarios caso Ecuador.	152
19.	Modelado y gestión energética de una microrred.	175

Control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones usando compensadores clásicos

Doctorando: Jose Jorge Carreño Zagarra

Universidad de Almería
jcz360@inlumine.ual.es

Abstract. Históricamente, la industria de procesos ha reconocido la importante labor del control automático en el correcto funcionamiento de los procesos de producción. Aunque la estrategia de control preferida en la mayoría de dichas aplicaciones es la implementación de lazos de control PID simples (control proporcional, integral y derivativo), existe una serie de características que algunas veces no son consideradas de manera explícita en el diseño de este tipo de controladores, tales como retardos, perturbaciones, sistemas de fase no-mínima, variables no medibles, incertidumbre en los parámetros, varianza en el tiempo, no-linealidades, restricciones e interacciones 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 y 2019/2020.

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 [11].

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

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

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

Durante las últimas décadas, se han propuesto muchos enfoques para eliminar las perturbaciones. 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 [9, 2, 3].

Una forma natural de expresar el problema de diseño de control es mediante el uso de un problema de optimización matemática. Varios métodos de diseño de control, como LQR/LQG o H_∞ , 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 [12].

2 Avances de tesis doctoral

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

2.1 Generalidades de control GPI para sistemas perturbados

Considerar el sistema dinámico n -dimensional, suave:

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

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

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

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

donde 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.

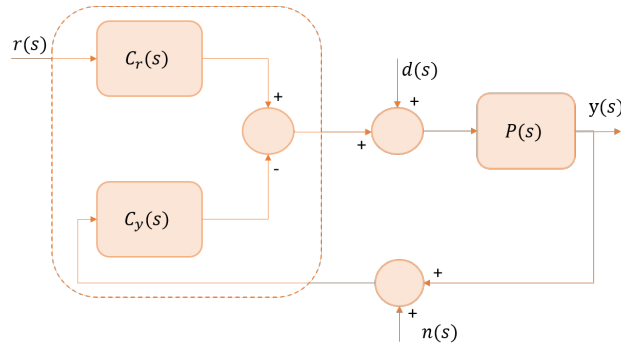


Fig. 1. Sistema de control de 2 GDL

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:

Control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones ...

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

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 Diseño óptimo de controlador basado en rechazo activo de perturbaciones usando observadores GPIs

En esta sección se presenta el problema de seguimiento robusto de referencias mediante un enfoque óptimo de control basado en rechazo activo de perturbaciones. En este caso los parámetros del controlador PID robusto son obtenidos mediante un procedimiento de optimización de una función de coste que considera el error de seguimiento y el esfuerzo de control. Con el fin de estimar las perturbaciones agrupadas (posiblemente variables en el tiempo) se diseña un observador GPI.

Si se tiene un retardo pequeño el sistema de primer orden de la ecuación (23) se puede aproximar a un segundo orden, de la siguiente manera:

Control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones ...

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-\lambda s} \approx \frac{k}{(\tau s + 1)(\lambda s + 1)} \quad (15)$$

Para dicho sistema de segundo orden se puede proponer una ley de control PID con estimación de la perturbación como la siguiente:

$$u(t) = \frac{1}{k} \left[k_1 \int e(t) dt + k_2 e(t) + k_3 \frac{de(t)}{dt} - \hat{\xi}(t) \right] \quad (16)$$

donde k_1 , k_2 y k_3 son las ganancias del controlador, $e(t) = y(t) - y_{ref}$ es la señal de error de seguimiento y $\hat{\xi}(t)$ es la estimación de la perturbación del sistema de control la cual puede ser calculada por el siguiente observador generalizado proporcional integral (GPI):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{y}}_1 &= y_2 + \lambda_3(y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{y}}_2 &= k u(t) + z_1 + \lambda_2(y - \hat{y}) \\ \dot{z}_1 &= z_2 + \lambda_1(y - \hat{y}) \\ \dot{z}_2 &= \lambda_0(y - \hat{y}) \end{aligned} \quad (17)$$

donde $z_1 = \hat{\xi}(t)$ es la estimación de la perturbación.

El controlador PID basado en un observador GPI lleva el error de seguimiento de las variables de fase, $e^{(k)}(t) = y^{(k)} - y_{ref}^{(k)}$, $k = 0, 1, 2, 3$, asintóticamente y exponencialmente a una vecindad suficientemente pequeña del origen en el espacio de estado del error de seguimiento, esto es:

$$\ddot{e}(t) + k_3 \dot{e}(t) + k_2 e(t) + k_1 e(t) \approx 0 \quad (18)$$

Con la selección de los coeficientes λ_i , es posible obtener el siguiente polinomio característico del error de estimación:

$$p_{obs}(s) = s^4 + \lambda_3 s^3 + \lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0 = 0 \quad (19)$$

La función de coste a ser optimizada es la siguiente:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{T_{cl}} \left[(\hat{y}(t+h) - \hat{y}_{ref}(t+h))^2 + \rho (u(t+h) - u_{ref}(t+h))^2 \right] dh \quad (20)$$

donde T_{cl} se define como el período predictivo, que determina el comportamiento transitorio del sistema en lazo cerrado, y ρ es el factor de ponderación de la variable manipulada, el cual es útil para penalizar el esfuerzo de control. $\hat{y}(t+h)$ es la salida predicha y $\hat{y}_{ref}(t+h)$ es la futura señal de referencia deseada.

La futura salida $\hat{y}(t+h)$ puede ser predicha por la siguiente aproximación de la expansión en series de Taylor:

$$\hat{y}(t+h) \approx \hat{y} + h\dot{\hat{y}} + \frac{h^2}{2}\ddot{\hat{y}} + \frac{h^3}{6}\dddot{\hat{y}} \quad (21)$$

Control óptimo basado en rechazo activo de perturbaciones ...

Resolviendo el problema de optimización de la ecuación (20) se obtienen los siguientes parámetros para el controlador PID:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{67.2k^2T_{cl}^3(k^2T_{cl}^6 + 12096\rho)}{k^4T_{cl}^{12} + 54144k^2\rho T_{cl}^6 + 6967296\rho^2} \\
 k_2 &= \frac{33.6k^2T_{cl}^4(k^2T_{cl}^6 + 19008\rho)}{k^4T_{cl}^{12} + 54144k^2\rho T_{cl}^6 + 6967296\rho^2} \\
 k_3 &= \frac{8k^2T_{cl}^5(k^2T_{cl}^6 + 32832\rho)}{k^4T_{cl}^{12} + 54144k^2\rho T_{cl}^6 + 6967296\rho^2}
 \end{aligned} \tag{22}$$

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:

$$pH(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-\lambda s} u(s) + \frac{k_r}{\tau_r s + 1} e^{-\lambda_r s} I(s) \tag{23}$$

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:

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

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

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 (23) se propone la siguiente ley de control:

$$u = u^* - k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) (y - y^*) \quad (24)$$

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

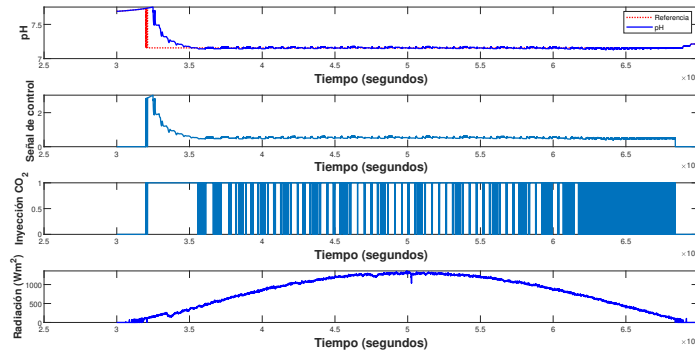


Fig. 2. Control PI robusto basado en optimización para fotobiorreactor

$$F(s) = \frac{1}{\tau_f s + 1} \quad (25)$$

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 PID óptimo con observador 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. 3 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.

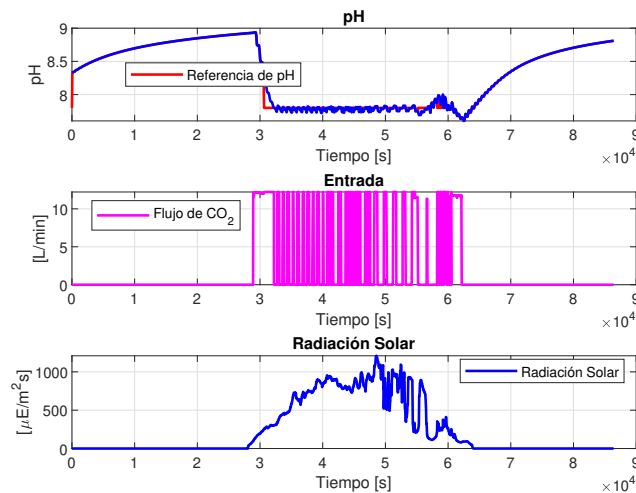


Fig. 3. Control PID óptimo con observador de perturbaciones para fotobiorreactor

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. Han, J.: From pid to active disturbance rejection control. *IEEE transactions on Industrial Electronics* **56**(3), 900–906 (2009)
7. Huang, Y., Messner, W.: A novel disturbance observer design for magnetic hard drive servo system with a rotary actuator. *IEEE Transactions on Magnetics* **34**(4), 1892–1894 (1998)
8. Komada, S., Machii, N., Hori, T.: Control of redundant manipulators considering order of disturbance observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **47**(2), 413–420 (2000)
9. Li, S., Yang, J., Chen, W.H., Chen, X.: Disturbance observer-based control: methods and applications. CRC press (2016)
10. Palumbo, P., Pepe, P., Panunzi, S., De Gaetano, A.: Observer-based closed-loop control for the glucose-insulin system: local input-to-state stability with respect to unknown meal disturbances. In: 2013 American Control Conference. pp. 1751–1756. IEEE (2013)
11. Ping, Z., Xiang, B., Tianyou, C.: Improved disturbance observer (dob) based advanced feedback control for optimal operation of a mineral grinding process. *Chinese Journal of Chemical Engineering* **20**(6), 1206–1212 (2012)
12. Sira-Ramírez, H., Luviano-Juárez, A., Ramírez-Neria, M., Zurita-Bustamante, E.W.: Active disturbance rejection control of dynamic systems: a flatness based approach. Butterworth-Heinemann (2018)

Federación de nodos de sensores inalámbricos basados en blockchain

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

Universidad de Almería.
fdo730@inlumine.ual.es

Abstract. Las redes de sensores inalámbricos (WSN), como parte integrante de la mayoría de los dispositivos de la Internet de las Cosas (IoT), están proliferando actualmente proporcionando un nuevo paradigma de tecnologías emergentes. Se estima que el número de productos conectados a nivel mundial aumentará exponencialmente en la próxima década. Por ello, no es de extrañar que se encuentren aplicaciones en diferentes ámbitos como los hogares inteligentes, las ciudades inteligentes, la industria, la sanidad electrónica, la defensa, la seguridad, las redes de vehículos, la agricultura y la logística, entre otros. Las WSN transmiten la información recogida por los sensores existentes en los dispositivos IoT a nodos de cabecera que actúan como pasarelas para llegar a nodos de computación en la nube que procesarán esta información. El procesamiento de los datos recogidos a través de los sensores ha permitido dotar de inteligencia a entornos estratégicos como el sector agroalimentario. Asegurar la forma en que se transmite esta información y asegurar que se preserva la integridad de la misma. El uso de la tecnología blockchain ha demostrado ser eficaz para asegurar la integridad de las transacciones de datos entre entidades. En este trabajo, aprovechamos esta circunstancia para diseñar un mecanismo robusto basado en contratos inteligentes y tecnología blockchain que permita el tratamiento fiable de los datos.

Keywords: Protocolo de comunicación segura · Dispositivo IoT · BaaS · Blockchain

1 Introducción

Las redes de sensores inalámbricos, como parte integrante de la mayoría de los dispositivos de el Internet de las Cosas (IoT), están proliferando actualmente proporcionando un nuevo paradigma de tecnología emergente, encontrando aplicaciones en diferentes áreas. Desde que apareció el concepto de IoT en 1999 [1], el número de productos conectados a nivel mundial ha superado los 20.000 millones y está aumentando exponencialmente [2]. Los datos recogidos a través de los sensores existentes en los dispositivos IoT han permitido aportar inteligencia de muchas maneras diferentes. En general, los datos se procesan y se transforman en información. Por ejemplo, en entornos privados como un hogar inteligente y en

ederación de nodos de sensores inalámbricos basados en blockchain

corporaciones donde estos dispositivos pueden proporcionar una ayuda considerable en el desarrollo de los procesos de producción [3]. Esta realidad nos lleva a centrarnos en los requisitos de seguridad de la información [4] que deben ser preservados, así, la confidencialidad, integridad, autenticación y disponibilidad, para que dicha comunicación se realice de forma segura. Mantener la seguridad en un sistema IoT es, por tanto, crucial y de especial relevancia [5] [6]. La mayoría de los riesgos que se asumen provienen de la propia definición de IoT [7], como un sistema interrelacionado de dispositivos con capacidad de transferir datos a través de las redes sin interacción humana. Según el informe de la empresa Zscaler [8] las comunicaciones de IoT a través de la nube de Zscaler han aumentado, detectando algunos puntos clave para la seguridad (i) los dispositivos IoT no autorizados están aumentando, la mayoría de las comunicaciones IoT no son seguras y sólo el 17% de ellas utilizan canales seguros (SSL); (ii) hay un aumento exponencial de malware IoT; y, (iii) están surgiendo nuevos exploits para atacar este tipo de dispositivos. Por ello, es necesario encontrar una forma de proteger globalmente el sistema, tanto la red de sensores como los componentes que prestan servicios en su conjunto.

En este escenario, es de especial relevancia las ventajas que aporta la tecnología blockchain en términos de seguridad y privacidad sobre la información [9]. El uso de la criptografía y de los mecanismos de consenso [10][11] para reconocer (confiar) cada transacción refuerza la idea de seguridad e integridad. La evolución experimentada por la tecnología blockchain [12] proporciona el concepto de contratos inteligentes. Los contratos inteligentes son piezas de código que se ejecutarán automáticamente cuando se cumplan las condiciones preestablecidas [13]. Así, los contratos inteligentes proporcionan una nueva funcionalidad a las transacciones controladas por la blockchain. Una vez recibida la información, ésta debe ser sometida a procesos de filtrado para determinar su validez o descartar que ningún nodo de la red de sensores esté alimentando el sistema con datos no válidos o maliciosos. En este trabajo proponemos un modelo de red federada de nodos sensores inalámbricos basado en blockchain que garantiza, por un lado, la comunicación segura dentro de la red de sensores mediante Criptografía de Curva Elíptica (ECC) [15], [16] y el intercambio de claves, por otro lado, la seguridad e integridad en los datos almacenados permanentemente. Por lo tanto, aseguramos en nuestro modelo los tres aspectos fundamentales de la seguridad de la información: la confidencialidad, la integridad y la disponibilidad características proporcionadas por la tecnología blockchain [10].

2 Avances

2.1 Arquitectura propuesta

En este apartado se expone la propuesta arquitectónica, ver Fig. 1. Se basa en una red Ethereum [17] configurada en Amazon Web Services Elastic Cloud 2 (AWS EC2) [18]. AWS EC2 permite a los desarrolladores aprovisionar recursos informáticos bajo demanda, configurarlos según sus necesidades y escalar

ederación de nodos de sensores inalámbricos basados en blockchain

los recursos hacia arriba o hacia abajo en función de los requisitos de la aplicación. AWS EC2 ha demostrado ser la opción más adecuada en comparación con OpenStack [19] o los centros privados de supercomputación HPC [20]. La configuración se ha realizado con dos, cuatro y ocho nodos (CPUs virtuales) que ejecutan Máquinas Virtuales Ethereum (EVM) [21], un nodo bastión, los balanceadores y dos nodos Go-Ethereum (Geth) [22] para monitorizar la arquitectura. Esta infraestructura sirve como un Blockchain as a Service (BaaS) [23] para recibir la información enviada por los dispositivos IoT que se recogen como se muestra en la Fig. 1. Los dispositivos IoT se organizan en grupos compuestos por dispositivos sensores y un nodo concentrador de datos o puente. Esta configuración se define como una granja de dispositivos.

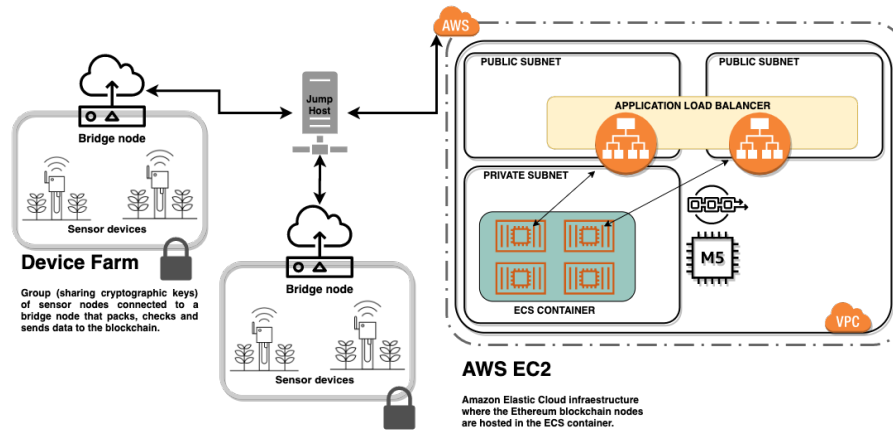


Fig. 1. Arquitectura propuesta AWS EC2.

Las granjas de dispositivos se crean asociando un conjunto de nodos sensores mediante la ejecución del protocolo de comunicación de grupo seguro. Cada nodo dentro de una granja de dispositivos comparte una clave criptográfica utilizada para firmar los mensajes enviados al nodo puente. Cada granja de dispositivos está controlada, por tanto, por un nodo puente (es decir, nodo luz) que sirve como punto de comunicación entre los dispositivos IoT y la red blockchain. Cada nodo de cabecera o nodo puente que actúa como proxy de comunicación entre un determinado grupo de nodos IoT o granja de dispositivos y la blockchain tiene la configuración necesaria para conectar el host bastión (también conocido como Jump Host) en la red privada de Ethereum a través de un proxy SOCKS [24], la conectividad de las cuentas se implementa a través de MetaMask y Web3. Permite acceder a la blockchain de Ethereum desde una conexión web.

Los nodos puente tienen como funcionalidad principal, en cada granja de dispositivos IoT, actuar como medio de conexión con los nodos de Ethereum en AWS. Los nodos puente son los que inician las transacciones para almacenar,

ederación de nodos de sensores inalámbricos basados en blockchain

en la blockchain, la información recogida por todos los sensores o las acciones requeridas a los actuadores instalados en los dispositivos IoT en cada granja de dispositivos. Según el protocolo desarrollado, el nodo puente debe probar la validez de los mensajes recibidos de cada uno de los nodos sensores. Esto se hace comprobando las firmas y la identidad del remitente. Los intentos de inyectar mensajes producidos por nodos sensores IoT no autorizados son fácilmente rechazados por el nodo puente. Por lo tanto, las transacciones creadas por los nodos puente contienen datos de nodos verificados que, además, pertenecen al grupo o granja de dispositivos. Las granjas de dispositivos son también una forma de organizar los nodos según criterios de localidad que más adelante, ayudarán a decidir sobre la coherencia de los datos enviados a la blockchain. Cada nodo puente es, por tanto, el encargado de mantener todos los dispositivos IoT dentro de una determinada granja de dispositivos dentro de un grupo seguro de nodos autorizados, de manera que cada nodo que pertenece a la granja de dispositivos está correctamente autenticado y bajo el completo control de su nodo puente. Cada comunicación entre los nodos IoT y la red Ethereum está controlada por el puente de la granja de dispositivos. Así, se incluye una capa de seguridad adicional en cada dispositivo de la granja de dispositivos, evitando que la información que llega al puente sea maliciosa o manipulada por terceros. La capa de seguridad se implementa utilizando criptografía de curvas elípticas (ECC) [15], [16]. La curva y toda la información pública relacionada con ella se incluye en el primer bloque de la cadena de bloques, por lo que todos los nodos tienen acceso a los detalles de la curva.

2.2 Comunicación de grupo segura

En cuanto a las comunicaciones de grupo, el método preferido es la comunicación multicast para un conjunto de nodos participantes. Por lo tanto, se necesitan procedimientos para gestionar de forma segura las claves debido a las características de las comunicaciones, principalmente en los entornos de IoT, donde terceros pueden acceder fácilmente a los nodos sensores e intentar interceptar y reproducir las conversaciones. Cada nodo utiliza claves para encriptar y firmar los datos, de esta manera el nodo puente puede certificar la originalidad de la información recibida y puede proporcionar garantía de integridad de los datos al empaquetar todos los datos para enviarlos a la blockchain. Como los datos de la blockchain se utilizan para apoyar las capas de aplicación en las aplicaciones empresariales, la integridad y la validez de los datos son de interés. En [25], los autores desarrollaron métodos para compartir claves de forma segura en un grupo de nodos en comunicación.

En este escenario, hemos propuesto conjuntos disjuntos de dispositivos IoT denominados granjas de dispositivos IoT. Esto es útil para paralelizar los contratos inteligentes, como demostraremos más adelante. También proporciona un método interesante para asegurar los dispositivos IoT con sensores y actuadores. Por lo tanto, segregar los dispositivos y distribuirlos en granjas de dispositivos es útil desde el punto de vista de la seguridad, ya que podemos crear grupos de nodos IoT que comunican sus datos a los nodos puente, pero que también

ederación de nodos de sensores inalámbricos basados en blockchain

están sujetos a un refresco continuo de claves. Ya que el nodo puente ejecuta el protocolo de intercambio de claves para tranquilizar el entorno, para añadir un nuevo nodo o para eliminar un nodo que ha dejado de proporcionar información fiable. Los nodos que proporcionan información no fiable deben ser eliminados de la granja de dispositivos o ignorados. Para poder saber si la información proporcionada por un nodo sensor es fiable o no, tenemos que asegurarnos de si el nodo es legal o no (es decir, se está comunicando con el puente utilizando claves correctas) o si, por el contrario, sus sensores están falseando la información (porque están descalibrados o porque se están inyectando datos incorrectos a propósito). Para identificar las comunicaciones ilegales, el protocolo en [25] ha demostrado ser robusto, válido y eficaz. Por el contrario, si el nodo sensor ha sufrido una mala calibración o los datos que se envían están corruptos a propósito, podremos identificar el ataque porque cuando la información del dispositivo corrupto llegue al puente. Será empaquetada y enviada a la red privada que aloja nuestra blockchain de Ethereum. En la recepción, se activará un contrato inteligente, un *bridge smart contract*. Este contrato inteligente selecciona CPUs virtuales en la infraestructura de Ethereum e invoca un *contrato inteligente*. Este contrato inteligente tiene la responsabilidad de consultar la medición de un dispositivo y sus vecinos para comprobar si los valores son coherentes. Si el *device smart contract* no es capaz de determinar la existencia de coherencia en los datos, entonces el nodo será marcado como nodo sospechoso. El *contrato inteligente de puente* solicitará su eliminación y una etapa de actualización de claves, según el protocolo, si se confirma la tendencia. Los datos del nodo eliminado no se almacenarán en el bloque procesado.

2.3 Contratos inteligentes eficientes

Un contrato inteligente se activa por un evento predefinido. Normalmente, se activan para procesar transacciones solicitadas en la blockchain. Los contratos inteligentes pueden invocar, también, otros contratos inteligentes. Para entender mejor cómo diseñar un modelo de contrato inteligente, es necesario conocer las partes que lo componen. El contrato inteligente se apoya en un sistema de almacenamiento llamado state-database, en él se almacena lo necesario para la ejecución del contrato, desde variables hasta el mismo código que el EVM debe ejecutar para hacer cumplir el contrato. El resultado de la ejecución de un contrato afectará al contenido de la base de datos y también se almacenará en un bloque de la blockchain. Los contratos suelen ejecutarse en secuencia en los nodos EC2 - EVM de nuestra configuración dispuestos en AWS. Hasta hace poco, era imposible tener más de un hilo activo con éxito. Pero hay que saber que se pueden adoptar estrategias en las que un mismo contrato se aplique a diferentes datos de una misma transacción.

Las dependencias generadas entre el código del contrato inteligente y su ejecución hacen que los conjuntos de datos proporcionados en cada transacción deban ser elegidos muy cuidadosamente para que no haya dependencias. El modelo puede aproximarse al desenrollado de bucles. Si entre iteraciones no hay dependencias, entonces cada iteración puede ejecutarse en un nodo diferente y hacer

ederación de nodos de sensores inalámbricos basados en blockchain

que el bucle -cuya naturaleza es secuencial- se ejecute en paralelo. Se crearon dos tipos diferentes de contrato inteligente, uno para recibir la transacción de cada nodo puente que recoge todos los datos de los nodos sensores y crea paquetes de datos en los que identifica el nodo sensor, los datos, la firma, la marca de tiempo, etc. El nodo puente comprueba que está correctamente firmado, lo descifra, lo empaqueta y lo envía al nodo anfitrión del salto. Esta tarea la realiza cada nodo puente para cada conjunto de dispositivos IoT bajo su responsabilidad. A este nodo se le asocia el contrato inteligente *bridge smart contract* que tiene como finalidad almacenar en la blockchain los datos enviados por cada sensor (para que las aplicaciones de lógica de negocio, predicción climática, etc.) puedan alimentarse de los datos de la blockchain con la seguridad de que fueron validados y fiables.

3 Conclusiones

El uso de blockchain se muestra eficaz para las transacciones entre dos entidades. Aprovechar esta circunstancia para intentar disponer de un mecanismo robusto que permita, como en nuestro caso, la recogida fiable de datos validados está más que justificado. Una vez incorporada la transacción a un bloque de la blockchain, los datos permanecerán inmutables y disponibles para aplicaciones mayores (o capas de aplicación) que puedan necesitar utilizar estos datos por razones relacionadas con su lógica de negocio.

El sistema de pertenencia de un nodo a la red (privado, como es el caso) también garantiza que los nodos que participan en la recogida de información (que luego se incorporará a la blockchain) son nodos sin intención de corromper los datos voluntariamente ni de sustraerlos.

Sin embargo, la naturaleza de la blockchain no impide que, aunque quien envíe los datos sea un elemento informático válido, éstos sean incorrectos debido, por ejemplo, a una mala calibración del sensor, a la rotura de la placa por exposición a altas temperaturas, etc. Afortunadamente, existe la posibilidad de utilizar contratos inteligentes, que no son más que un mecanismo que se activa cada vez que se produce un evento entre dos partes que se relacionan a través del blockchain. Estos contratos inteligentes permiten realizar ciertos controles o actividades antes de cerrar la transacción. En este trabajo hemos querido explotar esta capacidad para que antes de incorporar los datos de los sensores a una blockchain podamos (aprovechando la ejecución del smart contract) validar la coherencia de los datos recibidos contrastándolos con el historial (almacenado en la blockchain) de cada sensor. Y una vez comprobada la coherencia dentro de un umbral de lecturas anteriores, entrar en una segunda fase donde se compararía con la coherencia de las lecturas de los nodos que recogen datos en la misma "granja" (contexto).

Sin embargo, el uso de los contratos inteligentes para esta labor tiene el inconveniente del rendimiento. Por lo tanto, se han proporcionado ciertos medios para que los contratos inteligentes operen sobre subconjuntos de datos incorporados en cada transacción. Los resultados muestran ganancias cuando se aplican.

ederación de nodos de sensores inalámbricos basados en blockchain

Además, los contratos inteligentes tienen la capacidad de recomendar la eliminación o adición de un dispositivo IoT en un determinado grupo de trabajo (o granja). Además, la capacidad de reforzar la seguridad en cada granja mediante la aplicación de un protocolo de intercambio de claves seguro, apoyado en una curva elíptica.

Se ha demostrado, por tanto, cómo proteger las comunicaciones del grupo entre los nodos sensores, los actuadores y el puente que los comunica con la blockchain. Así como la optimización de la incorporación de estos datos a la blockchain.

Referencias

1. Li, S., Xu, L.D. & Zhao, S. The internet of things: a survey. *Inf Syst Front* 17, 243–259 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7>
2. Mähler V. & Westergren U.H. (2019). Working with IoT – A Case Study Detailing Workplace Digitalization Through IoT System Adoption. In: Strous L., Cerf V. (eds) *Internet of Things. Information Processing in an Increasingly Connected World. IFIPIoT 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 548. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15651-0_15
3. Deuker, R., Meinhardt, S. IoT Best Practices. *HMD* 56, 1091–1093 (2019). <https://doi.org/10.1365/s40702-019-00574-x>
4. Panagiotis I. Radoglou Grammatikis, Panagiotis G. Sarigiannidis & Ioannis D. Moscholios (2019). Securing the Internet of Things: Challenges, threats and solutions. *Internet of Things*, 5, 41-70, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2018.11.003>
5. Kandasamy, K., Srinivas, S. & Achuthan, K (2020). IoT cyber risk: a holistic analysis of cyber risk assessment frameworks, risk vectors, and risk ranking process. *EURASIP J. on Info. Security* 2020, 8. <https://doi.org/10.1186/s13635-020-00111-0>
6. Boeckl, K., Fagan, M., Fisher, W., Lefkovitz, N, Megas, K., Nadeau, E. O'Rourke, D.G., Piccarreta, B. & Scarfone, K (2019). Consideration for Managing Internet of Things (IoT) Cybersecurity and Privacy Risk. *National Institute of Standards and Technology*. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8228>
7. O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikumhi, C. Y. Leow & M. N. Hindia (2018). An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges, in *IEEE Internet of Things Journal*, 5, 5, 3758-3773. <http://doi:10.1109/JIOT.2018.2844296>
8. Zscaler cloud security (2020). IoT in the Enterprise 2020 report. <https://info.zscaler.com/resources-industry-iot-in-the-enterprise>. Accessed 3 August 2020.
9. Nakamoto, S (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
10. Gamage, H.T.M., Weerasinghe, H.D. & Dias, N.G.J. A Survey on Blockchain Technology Concepts, Applications, and Issues. *tSN COMPUT. SCI.* 1, 114 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00123-0>
11. Mehrdad Salimitari, Mainak Chatterjee, Yaser P. & Fallah (2020). A survey on consensus methods in blockchain for resource-constrained IoT networks. *Internet of Things*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100212>
12. Szabo, N. (2018). *Smart Contracts : Building Blocks for Digital Markets*.

ederación de nodos de sensores inalámbricos basados en blockchain

13. Reyna, A., Martín, C., Chen, J., Soler, E. & Díaz, M. (2018). On blockchain and its integration with IoT. Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 88, 173-190. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.046>
14. Davila C., & Tarnow J. (2019). The Blockchain in IoT. In: *Internet of Things From Hype to Reality*. Springer, Cham, 269-296. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99516-8_10
15. Caelli, W.J., Dawson E. P., Rea S. A., "PKI, elliptic curve cryptography, and digital signatures", *Computers and Security*, Volume 18, Issue 1, 1999, Pages 47-66, ISSN 0167-4048, [https://doi.org/10.1016/S0167-4048\(99\)80008-X](https://doi.org/10.1016/S0167-4048(99)80008-X).
16. Marzouqi H., Al-Qutayri M., Salah K., "Review of Elliptic Curve Cryptography processor designs", *Microprocessors and Microsystems*, Volume 39, Issue 2, 2015, Pages 97-112, ISSN 0141-9331, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2015.02.003>.
17. Buterin, V. (2014). A next-generation smart contract and decentralized application platform. white paper, 3(37).
18. Marozzo, F. *Infrastructures for High-Performance Computing: Cloud Infrastructures*. Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology, Academic Press, 2019, pp. 240-246, ISBN 9780128114322, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20374-9>.
19. [online] Available: <https://www.openstack.org/assets/survey/April-2016-User-Survey-Report.pdf>
20. A. Marathe, R. Harris, D. K. Lowenthal, B. R. de Supinski, B. Rountree, M. Schulz, et al., A Comparative Study of High performance Computing on the Cloud, *Proceedings of the 22Nd International Symposium on High-performance Parallel and Distributed Computing*, pp. 239-250, 2013.
21. G. Wood, *Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger*, 2014, [online] Available: <http://yellowpaper.io/>.
22. [online] Available: <https://github.com/ethereumigo-etheremi>.
23. Singh, J., Michels, J.D. *Blockchain as a Service (BaaS): Providers and Trust*. IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops, London, 2018, pp.67-74.
24. Fung K. P. and Chang R. K. C., "A transport-level proxy for secure multimedia streams," in *IEEE Internet Computing*, vol. 4, no. 6, pp. 57-67, Nov.-Dec. 2000, doi: 10.1109/4236.895017.
25. Álvarez-Bermejo, J. A., Lodroman, A., and López-Ramos, J. A. Distributed key agreement for group communications based on elliptic curves. An application to sensor networks.(2016). *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, vol 39: pp. 4797– 4809 <https://doi.org/10.1002/mma.3802>

Optimización de consultas en Spatial Big Data

Heurísticas, Índices y Procesamiento Distribuido en Memoria

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

Universidad de Almería

Abstract. El gran volumen y velocidad en la creación de datos espaciales ha incrementado la atención hacia el tratamiento del Spatial Big Data. La dificultad de su almacenamiento y procesado en entornos centralizados tradicionales ha motivado la aparición de los denominados Sistemas de Gestión de Datos Espaciales Distribuidos (SGDED). Por un lado, SpatialHadoop es un SGDED basado en disco que utiliza el framework MapReduce sobre Apache Hadoop. Por otro lado, Sedona (anteriormente GeoSpark) es un SGDED basado en memoria que extiende el núcleo de Apache Spark. Ambos sistemas aportan el soporte de diferentes tipos de datos espaciales, técnicas de particionado, índices y consultas espaciales. En este trabajo, se presentan los resultados de aplicar diversas técnicas y heurísticas para el procesado de la consulta Group K-Nearest Neighbor ($GkNN$) en su adaptación de Hadoop a SpatialHadoop. Además, se muestra el desarrollo e implementación de un índice local basado en Quadtree para SpatialHadoop y su comparación con otros índices ya existentes. Por último, se presenta un trabajo en curso sobre la incorporación en Sedona de una de las consultas de join basadas en distancia más estudiada, la k Nearest Neighbours Join Query ($kNNJQ$).

Keywords: Big Data · MapReduce · Spark · Spatial Data Processing · Spatial Query Evaluation · SpatialHadoop · GeoSpark · Distance Joins · GNNQ · Quadtree · Indexing · KNNJQ

1 Introducción

El análisis y procesamiento de datos a gran escala es actualmente una parte muy importante de muchos grupos de investigación científica y empresas. Hoy en día, con el auge del desarrollo y uso de aplicaciones móviles, se ha producido un aumento enorme del volumen de datos espaciales disponible en todo el mundo. Los desarrollos recientes de grandes sistemas de datos espaciales han motivado la aparición de nuevas tecnologías para procesar datos espaciales a gran escala en clústeres de computadoras en un entorno distribuido. Los Sistemas de Gestión de Datos Espaciales Distribuidos (SGDED) surgen para paliar las debilidades en cuanto a eficiencia que presentan estos entornos distribuidos cuando se trata de

manipular datos espaciales. La mayor deficiencia es la falta de mecanismos de indexado que permitan acceder solo a los datos espaciales de regiones específicas, lo que en definitiva permitirá construir algoritmos de consulta espaciales más eficientes.

Los SGDED se clasifican en basados en disco [9] o basados en memoria principal [17]. Los más representativos basados en disco son SpatialHadoop [3] y Hadoop-GIS [1] y se caracterizan por extender Hadoop con características espaciales. Por otro lado, los SGDED basados en memoria más importantes son Apache Sedona (anteriormente GeoSpark) [16] y LocationSpark [14] y se caracterizan por estar basados en Spark. Estos sistemas abstraen a los usuarios de los problemas y complejidades de la computación distribuida al trabajar con datos espaciales.

Ante el desafío que supone el procesamiento eficiente de consultas espaciales para grandes volúmenes de datos espaciales, se están proponiendo distintos algoritmos [3] que intentan dar respuesta a diferentes consultas, como rango, k NN, spatial joins y skyline queries, en este tipo de entornos distribuidos. Por lo tanto, el principal objetivo de esta tesis doctoral es, estudiar diferentes entornos paralelos y distribuidos, que permitan desarrollar nuevos algoritmos eficientes que aprovechen las características que proporcionan dichos entornos. La ejecución de un extenso conjunto de experimentos sobre conjuntos de datos, tanto sintéticos como reales, permitirá demostrar la eficiencia y escalabilidad de nuestras propuestas.

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

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

2 Avances

2.1 Algorithms for Processing the Group k Nearest-Neighbor Query on Distributed Frameworks

Anteriormente, en [10] se realizó una colaboración internacional con la Universidad de Thessaly (Grecia) en el diseño, implementación y experimentación de diferentes algoritmos MapReduce para la consulta de los (k) vecinos más cercanos de un grupo (k) Group Nearest Neighbor Query (GNNQ)). En [11], se recogen diversas mejoras del algoritmo, su adaptación para el entorno de SpatialHadoop y un extenso estudio comparativo.

GNNQ [13] es una extensión de la consulta de los k vecinos más cercanos (k NN) que es importante para diferentes aplicaciones. Por un lado, dado un conjunto de puntos (\mathbb{P}), la consulta k NN encuentra los k puntos más cercanos a un punto de consulta q . Por otro lado, dados dos conjuntos de puntos, Gk NNQ obtiene los k puntos de un conjunto de datos (Entrenamiento (\mathbb{T})) con la menor

suma de distancias a cada uno de los puntos del otro conjunto de datos (Consulta (\mathbb{Q})). El conjunto de Entrenamiento se considera estático y es consultado por múltiples conjuntos de datos de Consulta. Un ejemplo de su utilidad puede ser cuando tenemos un conjunto de lugares de encuentro (Entrenamiento) y un conjunto de localizaciones de usuarios (Consulta), y queremos encontrar un lugar (o k) de encuentro(s) que minimicen la distancia que tengan que recorrer los usuarios para llegar.

Una descripción general del algoritmo propuesto para SpatialHadoop es la siguiente:

1. **Paso preliminar.** Cálculo local de la lista ordenada de los puntos de consulta, el *Minimum Bounding Rectangle* (MBR) de \mathbb{Q} , las coordenadas del centroide, y la suma de las distancias desde el centroide a \mathbb{Q} . Estos datos son necesarios para la mayoría de las heurísticas de poda.
2. **Particionado.** El conjunto \mathbb{T} se particiona mediante cualquiera de las técnicas de particionado disponibles en SpatialHadoop: Grid, STR, Quadtree, Hilbert, etc.
3. **Fase 1.** Reparticionado distribuido utilizando un Grid con un tamaño fijo de celda y cálculo del número de puntos de Entrenamiento por celda. Datos necesarios para la Fase 1.5.
4. **Fase 1.5.** Descubrimiento local de un grupo de celdas que contienen al menos k puntos de entrenamiento en total. Utilizando MBR o métodos de círculo centroide.
5. **Fase 2.** Cálculo distribuido de listas $GkNN$, una por celda que interseccione con el MBR o centroide. Se utilizan heurísticas de poda.
6. **Fase 2.5.** Fusión local de las listas $GkNN$ en una que contiene los mejores puntos encontrados hasta ahora.
7. **Fase 3.** Cálculo distribuido de listas $GkNN$ en las celdas no interseccionadas. Se aplican heurísticas para podar celdas lejanas y evitar cálculos innecesarios. Todos los nuevos vecinos candidatos se comprueban con los candidatos de la Fase 2.5.
8. **Fase 3.5.** Fase local (final) que unifica la lista de la Fase 2.5 con las obtenidas en la Fase 3 en el resultado final.

En general, el algoritmo de consulta $GkNN$ en SpatialHadoop aprovecha las características espaciales que éste añade a Hadoop, e incorpora algunas modificaciones sobre el algoritmo original:

1. **Particionado (distribuido).** Para trabajar con grandes conjuntos de datos espaciales en SpatialHadoop, es obligatorio dividirlos mediante alguna técnica de particionado (Grid, STR, Quadtree). Por ejemplo, este proceso dividirá el entrenamiento en varios archivos, uno para cada partición, en función del tamaño de bloque del sistema de ficheros Hadoop (HDFS) predeterminado y luego los distribuirá y replicará en diferentes nodos. Además, se crea un índice maestro con el MBR y la cantidad de puntos de entrenamiento dentro de cada partición / archivo que se puede usar para acceder fácilmente solo a ciertos elementos basados en una consulta determinada, ej. “Dame la partición donde se encuentra un punto”.

2. **Fase 1 (distribuida)**. Mediante el uso de técnicas de reparticionado, cada partición de nivel superior creada por SpatialHadoop se divide en celdas con un número menor de elementos, lo que permite una mejor distribución de la carga de trabajo de los mappers a los reducers. Además, este nuevo proceso de particionado se puede ajustar a los parámetros de la consulta, sin modificar las particiones originales que funcionan bien con otras consultas integradas de SpatialHadoop. Finalmente, esta técnica nos permite aplicar heurísticas de una forma más fina, es decir, el filtrado global se realiza podando las particiones de nivel superior y posteriormente, el filtrado local se aplica en las celdas de las particiones no podadas.
3. **Fase 1.5 (local)**. De la misma manera que para Hadoop, en esta fase local, intentamos encontrar un pequeño grupo de celdas que nos dé una primera estimación de la lista final de $GkNN$. Estas celdas deben contener al menos k puntos de entrenamiento en total, por lo que necesitamos el resultado de la Fase 1 que contiene el número de elementos y el índice. Por tanto, la principal diferencia con la versión Hadoop es precisamente la disponibilidad de este índice que permite llevar a cabo ambos enfoques de forma más eficiente. La primera aproximación basada en la intersección de las celdas con el MBR de \mathbb{Q} , se realiza en dos pasos: primero se realiza un filtrado global seleccionando las particiones con las que se intersecciona y luego se refina obteniendo finalmente aquellas celdas que interseccionan con el MBR. En cuanto al segundo enfoque basado en el centroide, este funciona de manera similar, primero buscando la partición en la que se encuentra éste, para luego ubicar la celda específica en la que se encuentra. Si el número de puntos de entrenamiento en la celda no fuera k , se agregarían celdas contiguas.
4. **Fase 2 (distribuida)**. El algoritmo para la consulta de $GkNN$ en SpatialHadoop utiliza los índices para podar particiones que no pueden contribuir a las diferentes listas $GkNN$ de la Fase 2. Antes de que comience la fase map, una función de filtro seleccionará las particiones que se solapan (Salida de la Fase 1.5) y no son podadas por heurísticas, para así reducir el número de puntos a procesar. Además, los archivos asociados a las particiones podadas no se leen, es decir, no es necesario leer todos los archivos distribuidos del conjunto de Entrenamiento.
5. **Fase 3 (distribuida)**. Esta fase utiliza las mismas características de SpatialHadoop para reducir la lectura y el procesamiento de archivos distribuidos que forman parte del conjunto \mathbb{T} . En este caso, una función de filtro poda aquellas particiones que no forman parte de la solución final aplicando las heurísticas 1, 2 y 3 [11]. En SpatialHadoop no hace falta leer los datos de la partición en un fichero aparte en la tarea *map* de la Fase 3. Por lo tanto, podemos eliminar directamente aquellas celdas dentro de una partición que ya han sido procesadas (salida de Fase 1.5) y aquellas que no cumplen con las heurísticas 1 y 2. Hay que tener en cuenta que esto no se podía hacer en Hadoop porque los puntos de la misma partición no se procesan la misma tarea *map*, y además las heurísticas se calculaban más de una vez. La aplicación de la heurística 3 se ha descartado utilizar en la tarea *map*, ya que su procesamiento es muy exigente y el número de tareas no

facilita su paralelización. Sin embargo, tenemos un mayor número de tareas en la fase *reduce*, es decir, podemos calcular la heurística 3 al comienzo de la tarea *reduce* y podar la celda correspondiente. Además, podemos aplicar las heurísticas 1,2 y 3 con un umbral actualizado a medida que se actualiza la lista de $GkNN$ del Reducer actual, es decir, podemos podar celdas que no habían sido eliminadas previamente si solo se utilizaba la distancia al k -ésimo vecino más cercano obtenida en la Fase 2.

Por último, utilizando conjuntos de datos reales y sintéticos, se presenta un extenso estudio experimental de las versiones del algoritmo en Hadoop y SpatialHadoop, utilizando métricas que detallan su funcionamiento interno. Las principales conclusiones de esta comparativa fueron: (1) La versión de SpatialHadoop es más rápida que la versión en Hadoop, especialmente con los conjuntos de mayor tamaño (2 veces más rápido), (2) La técnica de particionado de dos niveles de SpatialHadoop es más efectiva a la hora de aplicar heurísticas que la de Hadoop, y (3) La fase de pre-particionado que distribuye efectivamente los datos a los nodos, así como el preprocesamiento de puntos antes de las fase map con sus filtros dedicados juega el papel más importante en el mayor rendimiento de SpatiaHadoop.

2.2 Including the Quadtree index in SpatialHadoop

En [5] se recoge la implementación de Quadtree como índice local en SpatialHadoop, su uso en diferentes algoritmos ($kNNQ$ y $kCPQ$), y un estudio experimental con conjuntos de datos reales que compara su rendimiento con el índice local basado en el árbol-R.

El uso de un índice espacial es una de las técnicas empleadas más comunes para acelerar el procesamiento de consultas espaciales. Se han propuesto muchos índices espaciales diferentes en la literatura [4], pero los más influyentes han sido los árboles R y los Quadtrees. Una de las principales características de los SGDED es incluir índices espaciales que permitan el acceso selectivo a regiones específicas de los datos espaciales, lo que a su vez produce algoritmos de procesamiento de consultas distribuidos más eficientes. En general, los SGDED emplean índices espaciales para dos propósitos principales: (1) distribuir datos entre nodos esclavos y reducir el número de particiones visitadas durante una consulta espacial (particionado espacial); y (2) procesar consultas espaciales en nodos esclavos (indexado espacial). Debido a estas ventajas, los índices espaciales son una característica principal de los SGDED, y además el árbol-R se utiliza para ambos propósitos [12]. El Quadtree solo es utilizado por Sedona y LocationSpark, que son SGDED basados en Spark. En SpatialHadoop, Quadtree se usa como una técnica de particionado espacial para dividir grandes conjuntos de datos en unidades más pequeñas, pero no se usa para indexar los datos de cada partición. Por este motivo, a continuación veremos cómo incluir el Quadtree como índice local en SpatialHadoop.

Tras dividir el conjunto de entrada en diferentes particiones, la fase de *indexación local* carga los datos de cada una de ellas de forma masiva (*bulk loading*)

en un Quadtree usando el algoritmo PR [8]. La creación del árbol es similar a la utilizada en el proceso de particionado mediante Quadtree. Primero, los registros de cada partición se ordenan usando una curva- Z para que los que se encuentran en un nodo hoja aparezcan consecutivamente. Luego, el algoritmo considera que todos los registros pertenecen al nodo raíz y comprueba si quedan nodos por dividir. Un nodo se divide en sus cuatro hijos si el número actual de registros supera la capacidad establecida por nodo. Finalmente, el Quadtree de cada partición se vuelca a un archivo junto con los registros de la partición. El encabezado del índice contiene información sobre su longitud, el MBR de su contenido y los offsets de los datos y su tamaño para cada nodo hoja. Como es habitual en SpatialHadoop, la fase de *indexación global* concatena todos los archivos de índice local y crea el índice global usando sus MBR como clave.

El esquema general del algoritmo k NNQ en SpatialHadoop es el siguiente [3]: (1) una función de *filtrado* selecciona la partición en la que se encuentra el punto de consulta q . (2) A continuación, la tarea *map* es responsable de obtener una *respuesta inicial* mediante el uso de un algoritmo k NNQ local en la partición seleccionada, mientras que en la tarea *reduce* se obtienen los k vecinos más cercanos globales de q . (3) La fase de *verificación de corrección* evalúa si el resultado obtenido es menor que k , o si hay particiones dentro de la consulta de rango circular, centradas en q con un radio igual a la distancia del k -ésimo vecino obtenido hasta ahora. (4) En este caso, la fase de *respuesta refinada* comienza volviendo a ejecutar el trabajo anterior de MapReduce desde el primer paso, pero en con las particiones obtenidas en la consulta de rango y que, por lo tanto, son seleccionadas por la función de *filtrado*. De lo contrario, ya se ha obtenido el resultado final. Si el conjunto de datos de entrada contiene un índice local basado en Quadtree, el algoritmo local k NNQ lo utiliza mediante una búsqueda en anchura del árbol utilizando una cola. Cada paso verifica si el nodo actual se solapa con el rango circular y, de ser así, sus cuatro hijos se agregan al final de la cola para realizar más pruebas. En el caso de los nodos hoja, cada uno de los objetos espaciales que contienen se prueba para ver si forman parte de la consulta de rango.

La consulta de los k pares más cercanos (k CPQ) descubre los k pares de puntos de dos conjuntos de datos (\mathbb{P} y \mathbb{Q}) que tienen las k distancias más pequeñas entre ellos. En general, el algoritmo MapReduce para k CPQ [6] en SpatialHadoop consta de los siguientes pasos: (1) El paso del *cálculo del límite superior* encuentra un límite superior del valor de distancia del k -ésimo par más cercano de los conjuntos de datos de entrada, llamado β , (2) que el paso de *filtrado* usa para podar combinaciones de pares de particiones. (3) El paso de *k CPQ local* consiste en una función *map* que usa un algoritmo de barrido del plano para obtener el k CPQ entre cada par local de particiones. (4) Finalmente, el cálculo del *k CPQ global* es una función *reduce* que fusiona los conjuntos locales en el conjunto final de los k pares más cercanos. Cuando ambos conjuntos de datos se indexan a través de un índice Quadtree local, en lugar de utilizar un barrido del plano en todos sus registros, ambos árboles se recorren utilizando una búsqueda en profundidad. Para ello, una pila almacena los hijos de los pares de nodos cuya

distancia es menor que el k -ésimo par más cercano actual. Cuando se trata de un par de nodos hoja, se aplica el algoritmo general de barrido del para k CPQ en los objetos espaciales almacenados en ellos.

Por último, se ha realizado una serie de experimentos que demuestran que nuestro índice local basado en Quadtree es el ganador en su comparativa con el índice de árbol-R. Esto se debe a la subdivisión regular del espacio que reduce el número de cálculos de distancias y por lo tanto, obtiene una mejor *eficiencia* en los algoritmos MapReduce para k NNQ y k CPQ. También se ha demostrado su *escalabilidad* en términos de valores de k , tamaño de los conjuntos y número de nodos de computación (η) en SpatialHadoop.

2.3 Enhancing Sedona (formerly GeoSpark) with Efficient k Nearest Neighbor Join Processing

Sedona (anteriormente GeoSpark) es un SGDED en memoria principal para el procesado distribuido de datos espaciales a gran escala, el cual, extiende el núcleo de Apache Spark para soportar tipos de datos espaciales, técnicas de particionado, índices, y operaciones espaciales. k Nearest Neighbor Join Query (k NNJQ) encuentra para cada objeto de un conjunto de datos \mathbb{P} , los k vecinos más cercanos a este objeto en otro conjunto \mathbb{Q} . Se trata de una operación comúnmente usada en numerosas aplicaciones espaciales (GISs, sistemas basados en localización, monitorización continua, etc.). Además, k NNJQ es una operación espacial muy costosa, debido a que se puede considerar un híbrido de un join espacial y la búsqueda de vecinos cercanos. Dado que *Sedona* mejora en rendimiento a otros SGDED basados en Spark en la mayoría de los casos y, este no soporta k NN joins, incluir k NNJQ es un desafío que vale la pena. A continuación, se muestra el enfoque que se está llevando para diseñar e implementar un algoritmo k NNJQ eficiente en *Sedona*, utilizando el método de particionado espacial más adecuado y otras mejoras. Además, se presenta una propuesta de conjunto de experimentos que permita demostrar que el algoritmo propuesto es eficiente, escalable y robusto en *Sedona*.

Para el diseño e implementación de k NNJQ hay que tener en cuenta las características que proporciona Sedona:

- Al tratarse de un SGDED basado en memoria principal debemos utilizar eficientemente los diferentes métodos que nos permiten persistir y cachear los resultados intermedios de las fases del algoritmo. Por lo tanto, el objetivo principal del algoritmo será conseguir un rendimiento óptimo sin agotar los recursos del clúster.
- Sedona proporciona diferentes métodos de particionado para la distribución de los datos espaciales en los diferentes nodos del clúster. Estos métodos se pueden dividir en disjuntos (Grid, R-tree, Quadtree y k DB-tree) y en aquellos que presentan solapes en sus particiones (Voronoi y Hilbert) los cuales necesitan aplicar técnicas de deduplicación para evitar resultados con duplicados.

Optimización de consultas en Spatial Big Data Heurísticas...

- Otra característica que proporciona Sedona es el uso de índices locales a nivel de cada partición. Estos índices están basados en la librería Java Topology Suite (JTS)¹ y proporcionan métodos de acceso rápido a los datos y diferentes consultas optimizadas. El índice basado en árbol-R de Sedona es el único que proporciona la operación k NNQ local. Por lo tanto, se contemplarán dos versiones del algoritmo: una que utilice el árbol-R y otra que utilice un algoritmo basado en el barrido del plano para datos no indexados.
- Con el fin de obtener algoritmos que presenten un rendimiento óptimo en SGDED basados en Spark, es fundamental reducir el tamaño de los datos distribuidos entre nodos (*Shuffle Data*). Para ello, hay que reducir el uso de operaciones de transformación de Spark que produzcan *wide dependencies*, como *groupByKey*, que además incrementan las fases (*stages*) del algoritmo. Por lo tanto, hay que fomentar el uso de operaciones que generen *narrow dependencies*, como *zipPartitions*, *aggregate* o *union*, que no requieren la distribución de datos.

En cuanto a los experimentos se han diseñado con las siguientes características

- Se utilizarán conjuntos de datos reales de OpenStreetMap²: *LAKES* (L) que contiene 8.4M de registros (8.6 GB) de límites de áreas de agua (polígonos), *PARKS* (P) que contiene 10M de registros (9.3 GB) de límites de parques o áreas verdes (polígonos), *ROADS* (R) que contiene 72M de registros (24 GB) de carreteras y calles alrededor del mundo (segmentos de línea), y *BUILDINGS* (B) que contiene 115M de registros (26 GB) de límites de edificios (polígonos).
- Las principales medidas de rendimiento que hemos utilizado en nuestros experimentos han sido: (1) el *Tiempo de ejecución total*, que representa el tiempo de ejecución total que el sistema tarda en ejecutar una tarea o etapa determinada, (2) el *Total Shuffled Data*, que representa la cantidad de información que se redistribuye entre las particiones y que puede o no causar el movimiento de datos a través de procesos, ejecutores o nodos, y (3) el *Peak Execution Memory*, que agrega la memoria de ejecución más alta de todas las tareas de un trabajo específico.
- El primer experimento tiene como objetivo probar el algoritmo distribuido k NNJQ propuesto, considerando diferentes técnicas de partición espacial (es decir, *Grid*, *R-tree*, *Quadtree* y *kDB-tree*), utilizando diferentes combinaciones de conjuntos de datos y variando k .
- Nuestro segundo experimento estudiará el uso de índices con el algoritmo k NNJQ propuesto, utilizando el mejor método de partición espacial del experimento anterior para la combinación $LAKES \times PARKS$ y fijando $k = 25$.
- El tercer experimento analiza el *Peak Execution Memory* del algoritmo k NNJQ, para la combinación $LAKES \times BUILDINGS$, utilizando índices y sin ellos, y variando k .

¹ Disponible en <https://github.com/locationtech/jts>

² Disponibles en <http://spatialhadoop.cs.umn.edu/datasets.html>

- El cuarto y último experimento tiene como objetivo estudiar la aceleración del algoritmo k NNJQ variando el número de ejecutores η .

3 Conclusiones y Trabajos Futuros

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

- Hemos colaborado en el diseño, implementación y experimentación de diferentes algoritmos MapReduce para la consulta GNNQ [11] y su extensión a SpatialHadoop.
- Hemos realizado la implementación de Quadtree como índice local en SpatialHadoop [5] y lo hemos aplicado para la mejora de los algoritmos k NNQ y k CPQ en MapReduce.
- Hemos propuesto el diseño e implementación de un nuevo algoritmo para k NNJQ en Sedona, para el procesado paralelo y distribuido de grandes conjuntos de datos espaciales en SGDED basados en memoria principal.

Trabajos futuros podrían incluir las siguiente tareas:

- Estudiar el uso del Quadtree como índice local en SpatialHadoop para otras consultas basadas en distancia como ε Distance Range Query (ε DRQ), ε Distance Join Query (ε DJQ) y k NNJQ [7].
- Implementar otras consultas espaciales en SGDED, como multi-way distance joins queries [2] o basadas en la consulta Bichromatic Rk NNQ [15].
- Implementar la técnica de particionado basado en Diagramas de Voronoi para la consulta k NNJQ en Sedona.

Referencias

1. Aji, A., Wang, F., Vo, H., Lee, R., Liu, Q., Zhang, X., Saltz, J.: Hadoop gis: a high performance spatial data warehousing system over mapreduce. Proceedings of the VLDB Endowment **6**(11), 1009–1020 (2013)
2. Corral, A., Manolopoulos, Y., Theodoridis, Y., Vassilakopoulos, M.: Algorithms for processing k-closest-pair queries in spatial databases. Data Knowl. Eng. **49**(1), 67–104 (2004)
3. Eldawy, A., Mokbel, M.F.: Spatialhadoop: A mapreduce framework for spatial data. In: ICDE Conference. pp. 1352–1363 (April 2015)

4. Gaede, V., Günther, O.: Multidimensional access methods. *ACM Comput. Surv.* **30**(2), 170–231 (1998)
5. García-García, F., Corral, A., Iribarne, L.: Including the quadtree index in spatial-hadoop. In: 24th Pan-Hellenic Conference on Informatics (PCI 2020), November 20–22, 2020, Athens, Greece. ACM (2020)
6. García-García, F., Corral, A., Iribarne, L., Vassilakopoulos, M., Manolopoulos, Y.: Efficient large-scale distance-based join queries in spatialhadoop. *GeoInformatica* **22**(2), 171–209 (2018)
7. García-García, F., Corral, A., Iribarne, L., Vassilakopoulos, M., Manolopoulos, Y.: Efficient distance join query processing in distributed spatial data management systems. *Information Sciences* **512**, 985–1008 (2020)
8. Hjaltason, G.R., Samet, H.: Improved bulk-loading algorithms for quadtrees. In: ACM-GIS Conference. pp. 110–115 (1999)
9. Li, F., Ooi, B.C., Özsu, M.T., Wu, S.: Distributed data management using mapreduce. *ACM Comput. Surv.* **46**(3), 31:1–31:42 (2014)
10. Moutafis, P., García-García, F., Mavrommatis, G., Vassilakopoulos, M., Corral, A., Iribarne, L.: Mapreduce algorithms for the k group nearest-neighbor query. In: Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing. pp. 448–455 (2019)
11. Moutafis, P., García-García, F., Mavrommatis, G., Vassilakopoulos, M., Corral, A., Iribarne, L.: Algorithms for processing the group k nearest-neighbor query on distributed frameworks. *Distributed and Parallel Databases* pp. 1–52 (2020)
12. Pandey, V., Kipf, A., Neumann, T., Kemper, A.: How good are modern spatial analytics systems? *Proc. VLDB Endow.* **11**(11), 1661–1673 (2018)
13. Papadias, D., Shen, Q., Tao, Y., Mouratidis, K.: Group nearest neighbor queries. In: *Data Engineering, 2004. Proceedings. 20th International Conference on*. pp. 301–312. IEEE (2004)
14. Tang, M., Yu, Y., Malluhi, Q.M., Ouzzani, M., Aref, W.G.: Locationspark: a distributed in-memory data management system for big spatial data. *Proceedings of the VLDB Endowment* **9**(13), 1565–1568 (2016)
15. Yang, S., Cheema, M.A., Lin, X., Zhang, Y.: SLICE: reviving regions-based pruning for reverse k nearest neighbors queries. In: *ICDE Conference*. pp. 760–771 (March 2014)
16. Yu, J., Wu, J., Sarwat, M.: Geospark: a cluster computing framework for processing large-scale spatial data. In: *SIGSPATIAL Conference*. pp. 70:1–70:4 (November 2015)
17. Zhang, H., Chen, G., Ooi, B.C., Tan, K.L., Zhang, M.: In-memory big data management and processing: A survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* **27**(7), 1920–1948 (2015)

Control automático y gestión de recursos en distritos agroindustriales

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 artículo se exponen la temática de tesis doctoral del autor y los avances conseguidos durante el primer año de investigación, correspondiente al curso académico 2019/2020. La tesis doctoral del autor tiene como objetivo aplicar técnicas de control automático y desarrollar estrategias que permitan incrementar la eficiencia en el uso de energía y de recursos en distritos agroindustriales. De esta forma, se pretende contribuir a la mejora en la gestión de procesos relacionados con la agricultura intensiva bajo plástico. Los principales avances realizados hasta el momento se han centrado en el modelado y control aplicado a invernaderos. Por un lado, se ha desarrollado un mecanismo para obtener una predicción del crecimiento del cultivo de tomate en invernaderos a partir de pronósticos meteorológicos. Por otro lado, se han aplicado técnicas de control por prealimentación para rechazar perturbaciones que influyen en el problema de regulación de la temperatura del aire en el interior de un invernadero.

1. Introducción

La agricultura intensiva bajo plástico es uno de los principales sectores económicos de la provincia de Almería. En este territorio, las explotaciones agrícolas, las empresas de suministro de insumos y las empresas de transformación constituyen distritos agroindustriales. Estos distritos se caracterizan por un conjunto de sistemas que poseen distintas necesidades energéticas y de recursos, como electricidad, agua y dióxido de carbono, por ejemplo. Para lograr un uso eficiente de estos recursos, es necesaria la implantación de estrategias de gestión que además permitan alcanzar una mayor sostenibilidad medioambiental.

En la literatura, la gestión de recursos energéticos en distritos compuestos por sistemas de producción, consumo y almacenamiento se ha abordado con distintos enfoques, destacando mayoritariamente la multi-generación distribuida (DMG) [1], los sistemas multi-energía (MES) [8] y los *Energy Hubs* [12]. Dado que la tendencia actual consiste en implementar sistemas con mayor capacidad de interconexión e intercomunicación, en los últimos años han emergido nuevos paradigmas como el Internet de las cosas (IoT), la Industria 4.0, y los sistemas ciber-físicos (CPS), con aplicaciones directas al sector agroindustrial [7,10,15,16].

Control automático y gestión de recursos en distritos agroindustriales

No obstante, para aprovechar todo el potencial que se espera que ofrezcan estos paradigmas, será necesario incorporar técnicas de control automático que permitan optimizar la coordinación entre sistemas. En este sentido, en [11] se identifica como un reto la aplicación de estructuras de control jerárquico para sistemas con distintas escalas de tiempo, y en [17] se describen algunas de las técnicas de control que pueden ayudar a resolver la problemática expuesta: control en red, control basado en eventos, control distribuido, y control basado en pasividad, entre otros. También existen otros enfoques, como el caso de la teoría de juegos [14], que es aplicable a redes inteligentes de energía (*smart grids*).

La tesis doctoral del autor del presente trabajo está enfocada a ofrecer soluciones de control automático para los retos que plantean la coordinación de los sistemas que componen un distrito agroindustrial. En las siguientes subsecciones se expone el contexto en el que se desarrolla dicha tesis y los objetivos que se pretenden conseguir.

1.1. Contexto

La temática de tesis doctoral que se explica en este artículo está estrechamente relacionada con el proyecto de investigación CHROMAE, “Control y gestión óptima de recursos heterogéneos en distritos productivos agroindustriales integrando energías renovables”, DPI2017-85007-R, coordinado por el grupo Automática, Robótica y Mecatrónica (TEP-197) de la Universidad de Almería. El objetivo principal del proyecto CHROMAE consiste en desarrollar estrategias de control para coordinar de forma óptima el intercambio de recursos entre las distintas plantas que componen el distrito presentado en la Figura 1.

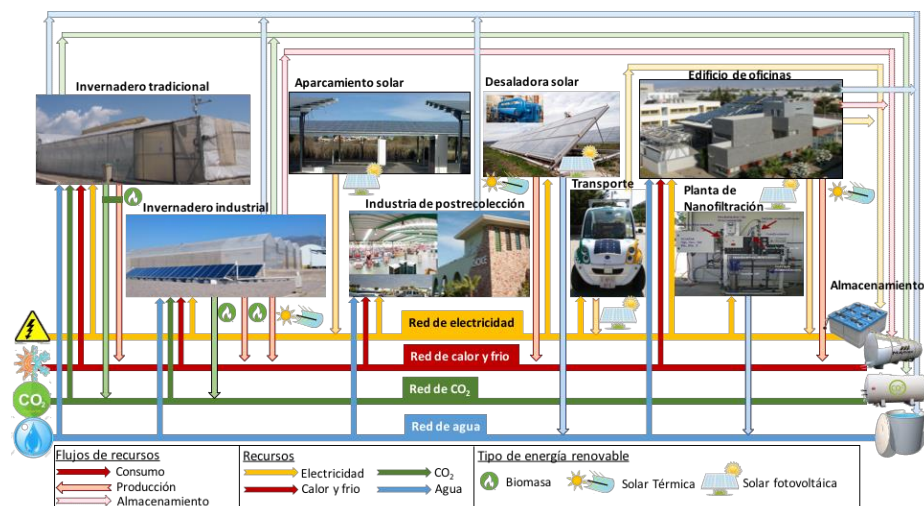


Figura 1. Distrito agroindustrial del proyecto CHROMAE.

Control automático y gestión de recursos en distritos agroindustriales

A continuación, se describen brevemente las plantas de ensayos disponibles en el marco del proyecto CHROMAE:

- Invernadero tradicional en la Estación Experimental “Las Palmerillas”, de la Fundación Cajamar. Situado en El Ejido, Almería, posee una superficie de 877 m² y una serie de actuadores para el control del clima en su interior.
- Invernadero industrial del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), situado en el Centro La Mojonera, Almería. El invernadero, de 1000 m², está equipado con una instalación de generación de calor híbrida mediante energía solar y biomasa.
- Industria de post-recolección y comercialización hortofrutícola.
- Edificio bioclimático CIESOL, en la Universidad de Almería. Este edificio posee una amplia red de sensores y actuadores que permiten realizar ensayos en sus distintas estancias. Además, cuenta con un sistema de refrigeración y calefacción solar, y con una instalación fotovoltaica.
- Vehículo eCARM de la Universidad de Almería. Es un vehículo eléctrico con una autonomía de 90 km.
- Aparcamiento solar de la Universidad de Almería, con una instalación fotovoltaica de 1.176,48 kW_p.
- Planta de desalación solar de la Plataforma Solar de Almería. Está compuesta por un conjunto de módulos de destilación por membranas, un campo solar de captadores planos y un sistema de almacenamiento térmico.
- Planta de nanofiltración de la Plataforma Solar de Almería. Se trata de un sistema de tres membranas para tratamiento de agua residual.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de la tesis doctoral que se presenta en este trabajo consiste en aplicar y desarrollar técnicas de control automático y estrategias de gestión para optimizar el reparto de recursos en distritos agroindustriales. Se pretende que dichas estrategias ayuden a la toma de decisiones en base a criterios económicos (de mínimo coste) y medioambientales. Debido a la naturaleza heterogénea de los recursos que se intercambian en un distrito, y a las dinámicas de los procesos que ocurren en el mismo, será necesario implementar arquitecturas de control jerárquico, abordando el problema en distintas escalas o niveles. Por ello, se plantean los siguientes objetivos:

- Desarrollar modelos para los sistemas del distrito según distintos niveles de abstracción.
- Implementar predictores y/o estimadores para la demanda y producción de recursos, considerando las perturbaciones que puedan afectar.
- Validar los predictores y/o estimadores con datos reales de las plantas del distrito.
- Diseñar estrategias de control que permitan la gestión óptima de procesos.
- Validar experimentalmente las estrategias en las instalaciones del distrito.

2. Avances

En esta sección, se exponen de forma resumida los principales avances realizados durante el primer año de desarrollo de la tesis doctoral.

2.1. Mecanismo para la predicción del crecimiento del cultivo de tomate en invernaderos

La demanda de recursos por parte de un invernadero depende fundamentalmente de las necesidades del cultivo. Para lograr un crecimiento óptimo del cultivo, se deben alcanzar unas condiciones idóneas en el microclima que existe bajo la cubierta de un invernadero. Estas condiciones óptimas requieren el control de la radiación, temperatura, humedad relativa y concentración de CO_2 en el interior del invernadero, para lo cual se precisa de actuadores que consumen energía eléctrica y térmica [13]. Asimismo, debido a los procesos fisiológicos de las plantas, es necesario suministrarles una cantidad concreta de agua y nutrientes según la variedad del cultivo, el tamaño de las plantas y según la época del año. Por tanto, para poder planificar con antelación la demanda de energía y de recursos de un invernadero, resulta de especial interés poder predecir el crecimiento del cultivo.

El crecimiento de un cultivo se suele determinar en base al índice de área foliar (IAF), que expresa la superficie de hojas por unidad de superficie de suelo. Aunque existen instrumentos que pueden medir el IAF, para monitorizarlo con precisión y fiabilidad se tienen que realizar ensayos destructivos de la plantación. Debido a la dificultad que entraña la realización de estos laboriosos ensayos, el IAF se suele medir de forma muy esporádica a lo largo de una campaña. Dado que es una variable de alto interés, en la literatura han ido surgiendo distintos modelos dinámicos capaces de ofrecer una estimación del crecimiento de los cultivos en función del clima registrado en el interior del invernadero [5,6].

Dado que el índice de área foliar influye en el microclima del invernadero por el efecto de evapotranspiración de las plantas, los modelos de crecimiento de cultivo se pueden combinar con modelos de clima de un invernadero para simular las condiciones climáticas bajo la cubierta de plástico. Los modelos de clima más avanzados están basados en ecuaciones diferenciales que expresan balances de energía y de masas para para simular el clima interior del invernadero a partir del clima exterior [13]. Tomando como base los modelos citados, en [2], el doctorando expuso en un congreso nacional los resultados preliminares del diseño de un mecanismo para predecir el crecimiento del cultivo de tomate en invernaderos a partir de predicciones meteorológicas del clima exterior.

En [3], el mecanismo de predicción se mejoró y fue presentado en un congreso internacional. En la Figura 2 se muestra el esquema que describe a dicho mecanismo. Como se puede observar, el mecanismo de predicción se ejecuta cuando recibe un pronóstico meteorológico proporcionado por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), lo que ocurre cuatro veces al día. Por tanto, el mecanismo se ejecuta de forma recursiva cada 6 horas, ofreciendo en cada ejecución un horizonte de predicción de 48 horas.

Control automático y gestión de recursos en distritos agroindustriales

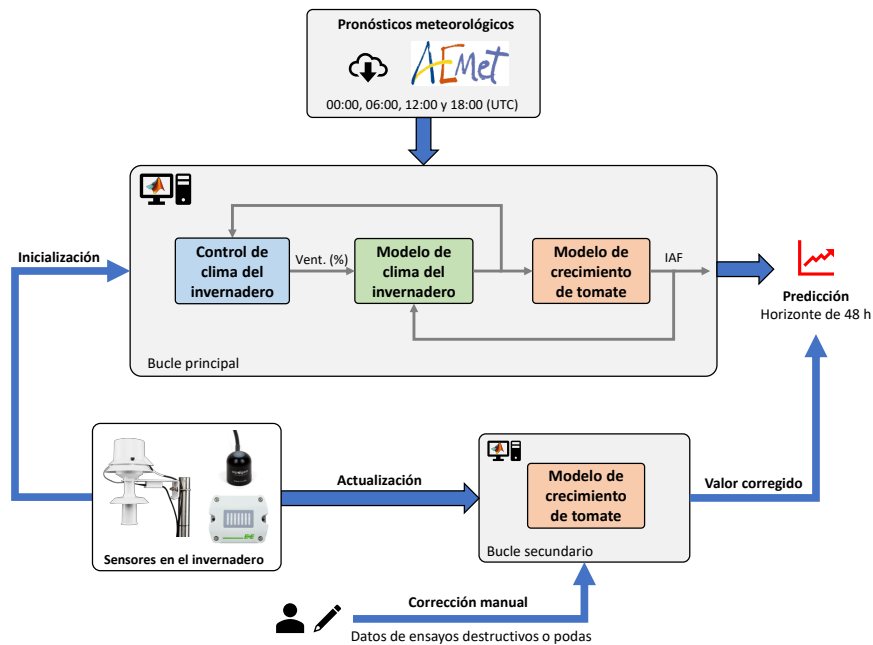


Figura 2. Esquema del mecanismo desarrollado para la predicción del crecimiento del cultivo de tomate en invernaderos. Adaptado de [3].

Cuando se recibe un pronóstico meteorológico, en primer lugar, se ejecuta el bucle principal, simulando el clima en el interior del invernadero, influenciado por el crecimiento del cultivo y también por el control de clima. El control de clima simula el controlador que se encuentre activo en el invernadero real, por ejemplo, para regular la apertura de la ventilación. Como resultado de la ejecución del bucle principal se obtiene una predicción del IAF para las próximas 48 horas. Antes de recibir el siguiente pronóstico meteorológico, se ejecuta el bucle secundario, considerado como una acción de corrección. Este bucle secundario simula el crecimiento del cultivo a partir de los datos reales de temperatura del aire, radiación PAR y concentración de CO₂ en el interior del invernadero en las últimas 6 horas. Al emplear valores reales, se elimina la incertidumbre procedente del modelo de clima y se obtiene un valor corregido para el índice de área foliar. Este valor corregido se realimenta al bucle principal cuando se va a realizar la siguiente predicción. Además, el bucle principal se inicializa con los valores reales medidos para el clima interior justo en el instante en el que se recibe el siguiente pronóstico de la AEMET.

El bucle secundario también está diseñado para incluir correcciones manuales, ya que, a lo largo de una campaña, el cultivo se somete a tareas de mantenimiento que suelen consistir en podas para retirar el exceso de hojas de las plantas. De igual forma, si se realiza algún ensayo destructivo se puede corregir el IAF usando el valor calculado en dicho ensayo.

2.2. Control por prealimentación para regular la temperatura diurna de un invernadero

Este avance, publicado en la revista *Agronomy* [9], tiene como principal contribución la aplicación de reglas simples para diseñar controladores por prealimentación para controlar la temperatura diurna en el interior de un invernadero mediante ventilación natural. En este caso, el control por prealimentación se emplea para eliminar el efecto de las perturbaciones causadas por el clima exterior sobre la temperatura interior del invernadero. De esta forma, se pretende mantener una temperatura óptima para el cultivo, regulada en un valor fijo, sin variaciones no deseadas.

La estrategia de control desarrollada se muestra en la Figura 3. Se puede observar que la radiación solar exterior, la temperatura del aire exterior y la velocidad del viento exterior se consideran perturbaciones medibles que afectan a la dinámica de la temperatura en el interior del invernadero. Por tanto, para regular la temperatura en una referencia deseada y eliminar el efecto de dichas perturbaciones, se incluye un controlador PI (Proporcional-Integral), representado como $C(s)$, y tres controladores por prealimentación (*feedforward*), representados por $G_{ff_i}(s)$. El controlador PI incluye un mecanismo para la desaturación del término integral (*anti-windup*). De esta forma, la estrategia de control tiene en cuenta la limitación existente para la señal de control que se envía a los motores encargados de abrir y cerrar las ventanas del invernadero, que poseen un rango de apertura comprendido entre el 0% y el 100%.

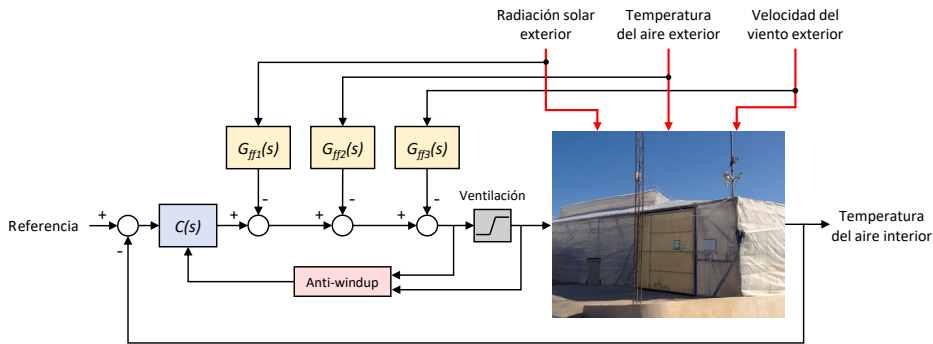


Figura 3. Esquema de control por prealimentación ensayado en el invernadero de la Estación Experimental “Las Palmerillas”.

Para evitar la realización de cálculos analíticos con la dinámica no lineal que describe la evolución de la temperatura en el interior del invernadero, en el citado trabajo se propone una metodología para obtener modelos de bajo orden, facilitando el posterior diseño de los controladores. Esta metodología consiste en obtener, primeramente, modelos de caja negra basados en datos reales, en

Control automático y gestión de recursos en distritos agroindustriales

concreto, un modelo ARX (Auto-Regresivo con entradas eXógenas) que permite relacionar las tres perturbaciones exteriores y el efecto de la ventilación natural con la temperatura del aire en el interior del invernadero. Posteriormente, evaluando las respuestas a escalón del modelo ARX, se obtienen una serie de funciones de transferencia de primer orden con retardo, expresadas en el dominio de Laplace. Al examinar las funciones de transferencia obtenidas, la realización ideal de los compensadores por prealimentación no era posible, por lo que se optó por emplear las reglas de diseño propuestas en [4], siendo la primera vez que estas reglas se aplicaban a un proceso real.

Los ensayos de control con el esquema mostrado en la Figura 3 se realizaron con éxito durante tres días distintos en el invernadero de “Las Palmerillas”, en la primavera de 2020, bajo condiciones reales de cultivo de tomate. La temperatura del aire interior se controló eficazmente en distintas referencias, y los errores de control estaban contenidos en un intervalo menor que ± 1 °C.

3. Conclusiones

Los principales avances realizados hasta el momento se han centrado en el modelado y control aplicado a invernaderos, como instalación de mayor relevancia dentro de un distrito agroindustrial. Por un lado, en [3] se ha diseñado un mecanismo de predicción del crecimiento del cultivo, que puede servir como instrumento para predecir la demanda y producción de recursos del invernadero. Además, este mecanismo permite ofrecer a los agricultores información relevante del cultivo como herramienta de apoyo para la toma de decisiones. El mecanismo de predicción fue validado con pronósticos meteorológicos de la AEMET y con datos reales registrados en el invernadero tradicional de la Estación Experimental “Las Palmerillas”. Por otro lado, en [9] se aplicaron una serie de reglas simples para diseñar controladores por prealimentación con el objetivo de controlar la temperatura diurna en el interior de un invernadero mediante ventilación natural. La principal contribución de dicho trabajo es la propuesta de un esquema de control simple junto con una metodología de diseño que puede ser empleada en cualquier tipo de invernadero. Los buenos resultados obtenidos en las pruebas de control realizadas en el invernadero de “Las Palmerillas” confirman la eficacia de la estrategia propuesta para el rechazo de perturbaciones.

Actualmente, el doctorando se encuentra trabajando en la aplicación y comparación de otras técnicas de control por prealimentación. Asimismo, el doctorando está colaborando en la implementación de un estimador de parámetros para un modelo de clima de un invernadero. Se espera que en los próximos meses se puedan publicar los resultados de estos trabajos en desarrollo.

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. Chicco, G., Mancarella, P.: Distributed multi-generation: A comprehensive view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**(3), 535–551 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.014>
2. García-Mañas, F., Rodríguez, F., Berenguel, M.: Gestión de recursos heterogéneos bajo el paradigma de los sistemas ciber-físicos. In: XVIII Simposio CEA de Ingeniería de Control y VI Seminario de Innovación Docente en Automática. Murcia, España (2020)
3. García-Mañas, F., Rodríguez, F., Berenguel, M.: Leaf area index soft sensor for tomato crops in greenhouses. In: 21st IFAC World Congress (Virtual). Berlín, Alemania (2020)
4. Guzmán, J.L., Häggglund, 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>
5. Jones, J.W., Dayan, E., Allen, L., Van Keulen, H., Challa, H.: A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Transactions of the ASAE* **34**(2), 663–6672 (1991). <https://doi.org/10.13031/2013.31715>
6. Kuijpers, W.J.P., van de Molengraft, M.J.G., van Mourik, S., van't Ooster, A., Hemming, S., van Henten, E.J.: Model selection with a common structure: Tomato crop growth models. *Biosystems Engineering* **187**, 247–257 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.09.010>
7. Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G.P., Abu-Mahfouz, A.M.: From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* (2020). <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>
8. Mancarella, P.: MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy* **65**, 1–17 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>
9. 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>
10. Muñoz, M., Guzmán, J.L., Sánchez, J.A., Rodríguez, F., Torres, M., Berenguel, M.: A new IoT-based platform for greenhouse crop production. *IEEE Internet of Things Journal* (2020). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2996081>
11. Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., Stankovic, J.: Cyber-physical systems: the next computing revolution. In: Design Automation Conference. pp. 731–736 (2010). <https://doi.org/10.1145/1837274.1837461>
12. Ramos-Teodoro, J., Rodríguez, F., Berenguel, M., Torres, J.L.: Heterogeneous resource management in energy hubs with self-consumption: Contributions and application example. *Applied Energy* **229**, 537–550 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.007>
13. 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>
14. Saad, W., Han, Z., Poor, H.V., Basar, T.: Game-theoretic methods for the smart grid: An overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications. *IEEE Signal Processing Magazine* **29**(5), 86–105 (2012). <https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2186410>

Control automático y gestión de recursos en distritos agroindustriales

15. Sharma, R., Parhi, S., Shishodia, A.: Industry 4.0 applications in agriculture: cyber-physical agricultural systems (CPASs). In: *Advances in Mechanical Engineering*, pp. 807–813. Springer (2021)
16. Trivelli, L., Apicella, A., Chiarello, F., Rana, R., Fantoni, G., Tarabella, A.: From precision agriculture to Industry 4.0: Unveiling technological connections in the agrifood sector. *British Food Journal* (2019). <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2018-0747>
17. Villalonga Jaén, A., Castaño Romero, F., Haber, R., Beruvides, G., Arenas, J.: El control de sistemas ciberfísicos industriales: revisión y primera aproximación. In: *XXXIX Jornadas de Automática*. pp. 916–923 (2018). <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497565.0916>

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

Francisco José Gómez Navarro

Universidad de Almería
Carretera Sacramento s/n
04120 La Cañada de San Urbano
Almería - España - 2021
<https://www.ual.es/>

Resumen El presente trabajo tiene por objeto, dar a conocer el avance del proyecto de investigación sobre un nuevo concepto de vehículo eléctrico urbano ligero, que aprovecha las diversas fuentes de energía renovable disponibles, optimizando su uso, al objeto de maximizar la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero ligados al transporte urbano de personas y bienes. Durante este periodo, con la ayuda del lenguaje de modelado Modelica[®] [1] y la herramienta de modelado Dymola[®] [2], se han desarrollado los modelos correspondientes al almacenamiento y distribución de energía del vehículo. Se ha desarrollado, validado y publicado [3] un modelo dinámico que simula adecuadamente el comportamiento de baterías del tipo Litio-Ferrosulfato ($LiFePO_4$) y que supone una aportación significativa respecto a los modelos de baterías Ion-Litio ($Li - Ion$) encontrados en la bibliografía y que son de uso común en los vehículos eléctricos. Igualmente se ha desarrollado, validado y publicado [4] un modelo dinámico lineal para convertidor CC-CC bidireccional del tipo NHBBC (Non-isolated Half-Bridge Bidirectional DC-DC Converter), que permite la simulación del comportamiento de los variadores unidireccionales y bidireccionales que conectan los distintos elementos generadores y consumidores de energía del vehículo al bus de energía, con la precisión requerida y en unos tiempos muy reducidos.

Keywords: Vehículo Eléctrico, Movilidad Urbana, Energías Renovables, Reducción CO₂, Modelado Orientado a Objetos, Modelica, Batería, Convertidor DC/DC

1. Introducción

La sociedad moderna ha basado su desarrollo en gran medida en la posibilidad de desplazar cantidades suficientes de bienes y personas entre distintas localizaciones de forma eficaz. El transporte consume el 19 % de la energía a nivel mundial y emite el 23 % del dióxido de carbono (CO₂) debido al consumo

energético [5]. Con la tendencia actual, el uso de energía para el transporte aumentará un 50 % para 2030 y más de un 80 % para 2050.

El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) advierte que para evitar las desastrosas consecuencias del cambio climático, las emisiones globales de CO₂ deben disminuir, al menos, un 50 % de aquí al año 2050 [6]. El transporte juega un papel decisivo en la consecución de este objetivo, resulta indispensable por tanto incidir en la necesaria adaptación de los modos actuales de desplazamiento. En Europa, se han establecido las bases para una política de transportes competitiva y sostenible[7], entre las que cabe destacar:

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

El transporte ligero, fundamentalmente orientado a personas, consumió en 2006 el 47 % de la energía dedicada al transporte [5]. El parque mundial de vehículos ligeros (Ligh Duty Vehicle - LDV) es previsible que se triplique para el año 2050, principalmente debido al incremento en países en vías de desarrollo[8]. De lo expuesto anteriormente, se puede concluir que uno de los focos de actuación preferentes para la consecución del objetivo de reducción de la emisión de gases de efecto invernadero está en el **transporte urbano ligero** y en el uso de **fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles**. Estas fuentes deben:

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

1.1. Motivación

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

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

Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto...

de alimentación y propulsión, en la mayoría de los casos se basan en la simple adaptación de la concepción tradicional del vehículo a esta nueva realidad.

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

1.2. Hipótesis

La hipótesis principal que se pretende demostrar, es la viabilidad de un nuevo concepto de movilidad urbana basado en el uso intensivo de fuentes de energía renovable, al que podremos llamar Very Light Urban Vehicle (VLUV). Como hipótesis secundaria, se pretende demostrar cómo este concepto consigue una reducción importante en la emisión de CO₂ a la atmósfera y disminuye el consumo de combustibles fósiles y otras fuentes de energía no renovable [9].

2. Avances

El primer paso del trabajo de investigación, tras la revisión bibliográfica, ha consistido en la determinación de un concepto genérico de vehículo ligero para desplazamiento urbano que permita la investigación y desarrollo de los modelos correspondientes a cada uno de los componentes, sus interfaces y la simulación del conjunto completo bajo distintas configuraciones y condiciones de contorno. Para el desarrollo de los distintos modelos se ha optado por el Modelado Orientado a Objetos con ayuda del lenguaje de modelado Modelica[®]. Este estándar abierto tiene las siguientes ventajas desde el punto de vista del modelado y la simulación de sistemas multi-físicos [10][11]:

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

Se utiliza la herramienta de desarrollo Dymola[®] [12], basada en el lenguaje de modelado de código abierto Modelica[®] para el desarrollo, simulación y optimización de los modelos. Para la definición de las clases base, los interfaces de conexionado y la estructuración general del modelo se ha tomado como referencia la librería VehicleInterfaces de Modelica [13]. Esta librería proporciona una serie de definiciones de interface normalizadas para uso en subsistemas de automoción y modelos de vehículos. Su objetivo es el de promover la compatibilidad entre las distintas librerías de componentes de automoción y proporcionar una estructura flexible y potente para el modelado de vehículos.

La estructura final de los modelos componentes del vehículo se pueden apreciar en la figura 1. Con los diferentes modelos desarrollados de cada uno de los

Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto...

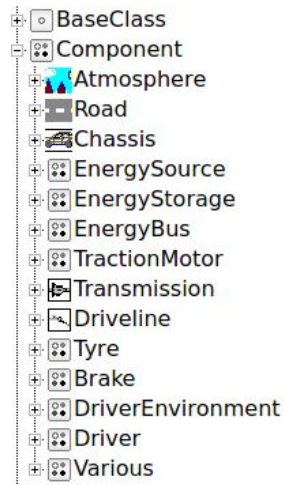


Figura 1. Estructura básica de la librería de componentes

distintos componentes, se pueden conseguir las distintas configuraciones deseadas de vehículos que nos ayudarán en la simulación dinámica, análisis y evaluación de resultados.

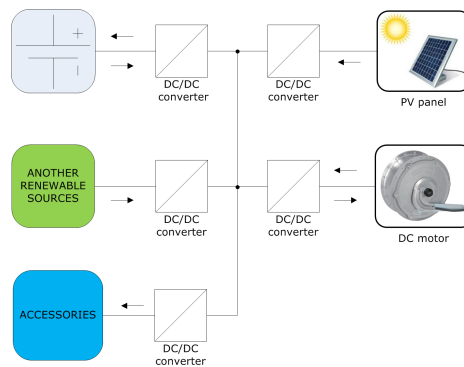


Figura 2. Esquema general del clúster inteligente

2.1. Modelado del vehículo

Al objeto de la simulación dinámica del vehículo completo, de su control y del análisis del balance energético de su actuación, se ha desarrollado un modelo de clúster de energía inteligente, que agrupa los diferentes elementos componentes del vehículo que aportan o consumen energía y al que se denomina SEH

Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto...

(Smart Energy Hub)[14]. Tal como se aprecia en la figura 2, está compuesto principalmente por el panel fotovoltaico (PV), la batería, los convertidores de tensión DC/DC, el motor de accionamiento del vehículo (que puede funcionar como freno regenerativo), los accesorios del vehículo y otras posibles fuentes de energía renovable. También se aprecian en la figura, los sentidos del flujo de energía posibles en cada uno de los componentes. Los componentes que aportan energía son: la batería (en modo descarga), el panel PV, el motor (en modo freno regenerativo) y las otras fuentes de energía renovable instaladas. Los componentes que consumen energía son: la batería (en modo carga), el motor de accionamiento del vehículo y los accesorios. Todos los componentes se interconectan mediante un bus DC a través de los convertidores DC/DC funcionando en modo uni ó bidireccional.

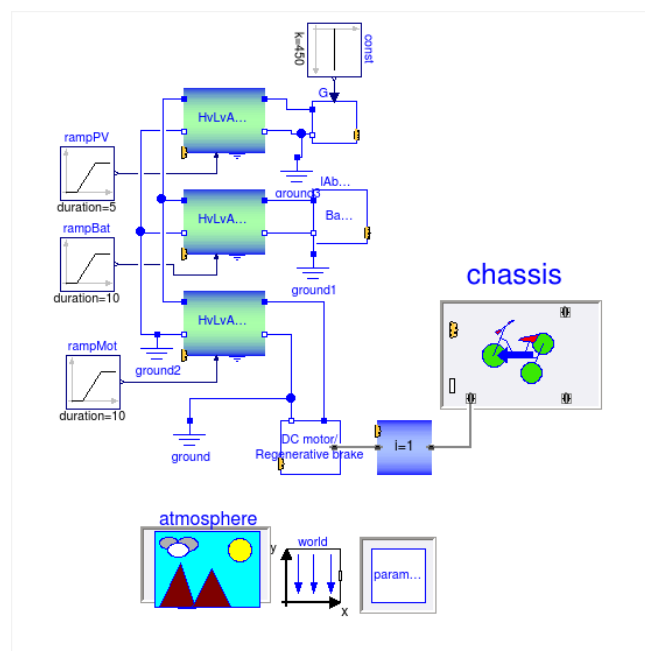


Figura 3. Modelo completo del vehículo en Modelica

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

2.2. Modelado de la batería

De entre los distintos elementos componentes del vehículo eléctrico, la batería es el que juega un papel más destacado, puesto que de su capacidad y comportamiento dependerán en gran parte las prestaciones finales del vehículo, fundamentalmente en lo relativo a la autonomía, fiabilidad y coste de operación.

Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto...

Resulta fundamental por tanto, disponer de unos modelos de batería suficientemente fiables, que permitan su uso en simulaciones de tiempo real y que se adapten a las distintas tecnologías disponibles en el mercado, de uso habitual en vehículos eléctricos.

Se ha desarrollado, validado y publicado un nuevo modelo dinámico de batería [3], que simula adecuadamente el comportamiento de baterías del tipo LiFePO_4 y que supone una aportación significativa respecto a los modelos de baterías

Li-ion encontrados en la bibliografía [15]. Este modelo es de aplicación directa a baterías *Li-ion* y con pequeñas modificaciones a otras tecnologías habituales como las de plomo-ácido (LA), níquel-hidruro metálico (Ni-MH) o níquel-cadmio (Ni-Cd).

2.3. Modelado del convertidor

Tal como podemos ver en la figura 2, cada componente del vehículo que consume o aporta energía al sistema, está unido al mismo mediante un convertidor DC/DC. La función del convertidor es la de adaptar la tensión del bus de continua del vehículo a la tensión necesaria para el accionamiento de cada componente, en el caso de consumidores, o de adaptar la tensión generada por el componente a la del bus en el caso de generadores. Se ha desarrollado, validado y publicado un modelo dinámico lineal de convertidor DC/DC bidireccional del tipo NHBBC (Non-isolated Half-Bridge Bidirectional DC-DC Converter) [4], que permite la conexión de los distintos elementos generadores y consumidores de energía del vehículo al bus de energía común. Puesto que hay una instancia múltiple del mismo en el SEH, es muy importante disponer de un modelo suficientemente preciso y que permita la simulación en tiempo real del vehículo completo. Sobre este modelo linealizado se implementarán los algoritmos de control.

3. Publicaciones

La siguiente contribución ha sido presentada a congreso internacional:

”Modelling a Smart-Grid for a Solar Powered Electric Vehicle”

Francisco J. Gomez, Luis J. Yebra, Antonio Gimenez

Type of submission: Discussion Contribution

9th International Conference on Mathematical Modelling

Vienna, Feb 21-23, 2018

ISBN 978-3-901608-91-9

DOI 10.11128/arep.55.a55113

El siguiente artículo ha sido publicado:

”Modelado de Baterías para Aplicación en Vehículos Urbanos Eléctricos Ligeros”

Francisco J. Gómez, Luis J. Yebra, Antonio Giménez, José L. Torres

Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto...

Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial
Comité Español de Automática
ISSN 1697-7920
DOI 10.4995/riai.2019.10609

El siguiente artículo ha sido publicado:

”DC-DC Linearized Converter Model for Faster Simulation of Light-weight Urban Electric Vehicles”
Francisco J. Gómez N., Luis J. Yebra M., Francisco J. Gómez M. y Antonio Giménez F.
IEEE Access ISSN 2169-3536
DOI 10.1109/ACCESS.2020.2992558

4. Conclusiones

Se ha realizado la introducción y descripción del proyecto de investigación en curso. Se han revisado las motivaciones y justificaciones del mismo, así como del estado de avance. Los trabajos en curso, una vez definidas las clases base e interfaces a utilizar, están orientados a conseguir el modelo dinámico completo de un clúster de energía inteligente para ser usado en un vehículo animado por energía solar y otras fuentes de energía renovable, con el propósito del diseño y optimización del control del mismo. El modelo será utilizado para realizar las simulaciones en tiempo real que permitan la optimización de los algoritmos de control de los distintos componentes. Se han presentado los principales componentes, su esquema de interconexión, así como los flujos de energía. Se ha presentado un ejemplo del modelo completo del vehículo en Modelica. Se han presentado un nuevo modelo de batería que permite simular adecuadamente el comportamiento específico de la tecnología LiFePO_4 y que es válido para los otros tipos de batería de uso corriente en vehículos eléctricos (LA, Li-ion, Ni-Cd, Ni-MH). Se ha presentado un nuevo modelo linealizado de convertidor bidireccional DC/DC, que permite la interconexión de los distintos componentes con el bus de energía y la simulación en unos valores de tiempo muy bajos.

Referencias

1. P. Fritzson, *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: A Cyber-Physical Approach*, 2nd ed. Linköping - Sweden: John Wiley & Sons - IEEE Press, 2015. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=wgIaBgAAQBAJ>
2. Dassault Systèmes AB, “Dymola - Dynamic Modeling Laboratory - User Manual,” Lund - Sweden, p. 847, 2018. [Online]. Available: <http://www.dymola.com>
3. F. Gómez, L. Yebra, A. Giménez, and J. Torres-Moreno, “Modelado de baterías para aplicación en vehículos urbanos eléctricos ligeros,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 16, no. 4, p. 459, sep 2019. [Online]. Available: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/10609>

Avances en el Modelado y Simulación de un Nuevo Concepto...

4. F. J. Gómez Navarro, L. J. Yebra, F. J. Gómez Medina, and A. Giménez-Fernandez, "DC-DC Linearized Converter Model for Faster Simulation of Lightweight Urban Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol. 8, no. 1, pp. 85 380–85 394, 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp={\&}arnumber=9086614>
5. International Energy Agency, "IEA Response System for Oil Supply Emergencies 2012," International Energy Agency, Paris, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EPPD_Brochure_English_2012.02.pdf
6. J. M. Ogden and L. Anderson, "Sustainable Transportation Energy Pathways: A Research Summary for Decision Makers," Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, Tech. Rep., 2011. [Online]. Available: http://www.its.ucdavis.edu/?page_id=10063&pub_id=1499
7. European Commission, *A sustainable future for transport - Towards an integrated, technology-led and user-friendly system*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2009.
8. United Nations Environment Programme, "Hybrid Electric Vehicles: And overview of current technology and its application in developing and transitional countries," United Nations Environment Programme, Nairobi, Tech. Rep., 2009. [Online]. Available: <https://www.globalfueleconomy.org/transport/gfei/autotool/approaches/technology/Hybrid%20Electric%20Vehicles%20final%20cs2.pdf>
9. G. Pasaoglu, M. Honselaar, and C. Thiel, "Potential vehicle fleet co2 reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in europe," *Energy Policy*, vol. 40, no. C, pp. 404–421, 2012. [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:enepol:v:40:y:2012:i:c:p:404-421>
10. Fritzson P., *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*. Wiley-IEEE Press, 2004. [Online]. Available: <http://www.wileyurope.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471471631.html>
11. M. Association, "Modelica ® - A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling Language Specification," *Interface*, vol. 5, no. 6, p. 250, 2010. [Online]. Available: www.modelica.org
12. Dassault Systèmes AB, Ed., *Dymola - Dynamic Modeling Laboratory - User Manual*. Lund - Sweden: Dassault Systèmes AB, 2012, vol. 1, no. May. [Online]. Available: <http://www.dymola.com>
13. Modelica Association, "VehicleInterfaces Library (Version 1.2.4) Reference Guide," 2016. [Online]. Available: <https://build.openmodelica.org/Documentation/VehicleInterfaces.html>
14. F. Gomez, L. Yebra, and A. Giménez, "Modelling a Smart-Grid for a Solar Powered Electric Vehicle," in *9th Vienna Conference on Mathematical Modelling*, Technische Universität Wien, Ed., vol. 55. Vienna, Austria: ARGESIM Publisher, Vienna, 2018, pp. 5–6. [Online]. Available: https://www.asim-gi.org/fileadmin/user_upload_argesim/ARGESIM_Publications_OA/MATHMOD_Publications_OA/MATHMOD_2018_AR55/articles/a55113.arep.55.pdf
15. O. Tremblay and L. Dessaint, "Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications," *World Electr. Veh. J.*, vol. 3, pp. 1–10, 2009.

El paciente frente a los nuevos modelos digitales de relación médico-paciente implantados ante la situación de pandemia ocasionada por la Covid 19. Desarrollo de herramientas que facilitan la información y comunicación.

González Revuelta, María Esther¹

¹ Tecnologías de la Información y Comunicación. C.H.Torrecárdenas.Almería

Abstract.

La situación de crisis que estamos viviendo en el último año ocasionada por la pandemia en la que nos

hemos visto inmersos toda la población ha acelerado algunos de los planteamientos que nos realizábamos en nuestro estudio de investigación.

Si bien nos planteábamos conocer la opinión de los pacientes en cuanto a la sustitución de los métodos tradicionales de comunicación y atención por parte del profesional, sustituyendo una atención personal insitu por otra en remoto y virtual, esta situación ha acelerado de forma forzada el cambio del enfoque de tratamiento tradicional por uno basado en el uso de la tecnología para la asistencia a los pacientes, donde la telemedicina y la videoconferencia han sido dos elementos básicos de interacción médico-paciente y habiendo tenido que rediseñarse de forma vertiginosa nuevos procesos que fueran capaces de dar respuesta a las necesidades planteadas, donde las tecnologías han sido un factor clave y diferenciador de éxito. Expongo la evolución y actuaciones realizadas en este sentido en el ámbito de la Salud.

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

Keywords: mHealth, Aplicaciones móviles, telemedicina

El paciente frente a los nuevos modelos digitales de relación médico-paciente...

1 Introducción

La práctica de la medicina no presencial basada en el uso de medios virtuales ha tomado especial importancia a raíz de la pandemia, ya que la obligatoriedad de la toma de medidas de distanciamiento y de confinamiento ha obligado a poner en marcha de forma acelerada nuevas formas de interacción entre los profesionales sanitarios en su conjunto y los pacientes.

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

Algunos de los retos actuales en el sector salud han sido la adaptación de los procesos asistenciales al modelo virtual, fomentando el desarrollo de consultas no presenciales en las que el médico o enfermera utiliza como principal canal de comunicación el teléfono, el ordenador y en definitiva los medios digitales al alcance.

Esta situación a la que nos estamos enfrentando ha puesto de manifiesto la capacidad de adaptación y de reinención que existen en todos los ámbitos, y en el sanitario donde ha quedado claramente reflejado. Los pacientes cada vez están mejor formados y más informados, lo cual supone un incremento de las expectativas.

- La relación médico-paciente y en general profesional sanitario con paciente ha cambiado y los medios y las formas por tanto también.

Para hacer frente y ser capaz de abordar estos retos es imprescindible incorporar las nuevas tecnologías y nuevos modelos de trabajo que se apoyen sobre ellas. El análisis de estos medios y de los avances incorporados es parte del análisis de este estudio. Habilitar sistemas de información de apoyo para los ciudadanos como APP, Chatbot, Videoconferencia, CallCenter, plataformas de formación e información, mensajería instantánea para la comunicación inmediata de resultados en las pruebas de laboratorio y otras, han sido algunas de las líneas de trabajo desarrolladas.

Se han tomado una serie de medidas basadas en la Tecnologías de la Información y Comunicación orientadas a facilitar la asistencia, a la disponibilidad en tiempo de la información clínica para el paciente, al seguimiento del proceso asistencial mediante herramientas adecuadas y adaptadas.

La inmediatez con la que ha habido que dar respuesta a la situación ha provocado que se han tenido que poner en marcha de forma acelerada planes de contingencia que si bien han dado respuesta de forma inmediata, ahora es el momento de consolidar en base a las demandas reales.

El paciente frente a los nuevos modelos digitales de relación médico-paciente...

Reforzar las actuaciones encaminadas al acceso por parte del paciente a su Historia Clínica Electrónica han sido igualmente objeto de investigación y trabajo durante este período.

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

Otra línea de actuación ha sido la implantación de herramientas de Big Data para el análisis de la información generada durante la pandemia, orientadas a la investigación de casos afectados. Esto lógicamente repercute en un apoyo a la asistencia al paciente con información útil para la toma de decisiones.

Todas las actuaciones realizadas ponen de manifiesto que la utilización de las TIC en el sector salud ofrecen una mejora significativa en los procesos de modernización, de innovación y gracias a ello se ha podido hacer frente a la crítica situación, manteniendo la disponibilidad de la asistencia y de muchos de los procesos que intervienen en el sistema sanitario, modificando el modelo de servicio pero manteniendo la disponibilidad del mismo.

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

Nos planteamos en este momento los siguientes objetivos:

- Determinar el grado de interés de los pacientes en conocer información propia de su proceso asistencial a través de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) Participando de forma más activa en el desarrollo de su proceso.
- Evaluar el grado de satisfacción de los pacientes inmersos en un Proceso Asistencial determinado, ante el nuevo modelo de asistencia impuesto por la pandemia.
- Nivel de uso de Internet y conocimiento de herramientas informáticas para el acceso a la información y el seguimiento de su historia clínica electrónica, así como de las nuevas herramientas puestas a disposición en este último período.
- Análisis de datos con herramienta de Big Data

El paciente frente a los nuevos modelos digitales de relación médico-paciente...

2 Avances

Realizamos un análisis de aquellas actuaciones realizadas en el ámbito de las tecnologías de la Información y Comunicación en la reordenación de circuitos, procesos y modelos de trabajo tanto en el ámbito de Atención Primaria como de Atención Hospitalaria, para la asistencia al paciente, ocasionado por la pandemia y orientados a mantener la asistencia al paciente y disponibilidad de la información de la historia clínica electrónica.

Actuaciones desarrolladas:

Implantación de VPNs para los profesionales para el acceso a la Historia Clínica Electrónica, facilitando la asistencia remota y la disponibilidad de la información.

Desarrollo de un Sistema de acceso remoto a aplicaciones corporativas para la disponibilidad de otras aplicaciones de ámbito administrativo y asistencial

Fomento y difusión de sistemas de videoconferencia de forma segura.

Desarrollo de app orientadas a facilitar al paciente datos de su Historia Clínica.

Envío de mensajería instantánea para informar sobre el resultado de pruebas relacionadas con el resultado de PCRs y otras pruebas de seguimiento, así como recordatorio de citas.

Creación de encuestas para el registro de información de seguimiento de contactos y otros datos de interés.

Implantación de la Teleconsulta entre Atención Primaria y el especialista en hospital, evitando desplazamientos innecesarios y mejorando los tiempos de respuesta.

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

3 Conclusiones

La expectativa del paciente crece demandando mejor servicio en tiempo y forma y su implicación en el proceso es mayor. Comparten la visión de la necesidad de disponer herramientas informáticas para el acceso a los datos a través de internet, a la vez que plantea reticencias, si bien, las reticencias que planteaban hace un año han cambiado notoriamente.

El paciente frente a los nuevos modelos digitales de relación médico-paciente...

Aunque la adaptación a la llamada nueva normalidad ha puesto encima de la mesa y ha obligado a poner en marcha nuevos modelos de atención, todavía los pacientes presentan dificultades en el uso de la tecnología, aunque presentan mayor interés en adecuarse a estos cambios.

Aún existen claras reticencias a la sustitución de la atención presencial por la atención virtual o incluso la eliminación de consultas avaladas por información transmitida a través herramientas digitales.

Importante el papel del profesional sanitario que también ha tenido que adaptarse a nuevos modelos de trabajo. Debemos analizar si el nivel de confianza en el uso de App ha mejorado respecto a la opinión inicial, así como el porcentaje de profesionales sanitarios que recomendarían páginas Web y Apps. Aun siendo todavía reacios al uso de los nuevos canales de comunicación, en un futuro próximo la prescripción de app podría ser algo bastante más habitual y reconocido en el entorno profesional. La telemedicina, la teleconsulta y la atención virtual ha llegado para quedarse.

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

Como parte de las actividades realizadas en el seno de esta labor de investigación y desarrollo he asistido a diferentes foros especializados donde se tratan los temas sobre los que se está trabajando y se plantean diferentes formas de abordar el futuro a un corto plazo.

Para concluir, incidir en que el registro, uso y disponibilidad de las nuevas tecnologías nos abren un amplio abanico para avanzar en las diferentes áreas de la Salud. Ante este cambio tan drástico debemos plantearnos realizar un análisis de la opinión de los profesionales y de los pacientes con estos nuevos modelos de trabajo, donde en cualquier caso la tecnología representa un papel fundamental.

4 Bibliografía

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

El paciente frente a los nuevos modelos digitales de relación médico-paciente...

2. Hyun Jung Song, Sarah Dennis, Jean-Frederic Levesque y Mark Harris. Cómo implementar encuestas de experiencia del paciente y utilizar sus hallazgos para mejorar el servicio. *Integrate Healthcare*: 2020
3. Mira JJ. Tecnologías móviles e inalámbricas para cuidar nuestra salud. *Journal of Healthcare Quality Research*. 2018;33(4):183-6.
4. Baldwin JL, Singh H, Sittig DF, Giardina TD, editors. *Patient portals and health apps: Pitfalls, promises, and what one might learn from the other*. Healthcare; 2017: Elsevier.
5. Dehling T, Gao F, Schneider S, Sunyaev A. Exploring the far side of mobile health: information security and privacy of mobile health apps on iOS and Android. *JMIR mHealth and uHealth*. 2015;3(1):e8

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 y 2019/2020 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 [9]. 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

Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones

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 [8].

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) [10] es, sin lugar a dudas, el compensador de tiempo muerto más utilizado en el control de plantas con retardo [7]. 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 [7]. 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 [11]; 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.

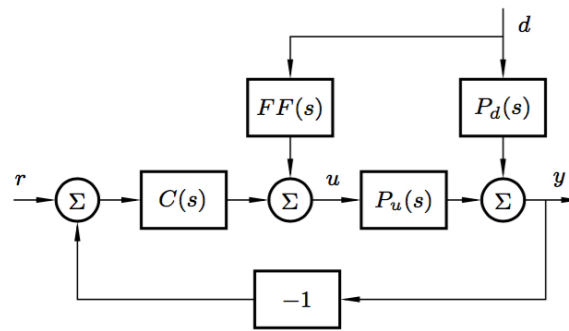


Fig. 1. Esquema clásico de control feedforward

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.

Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones

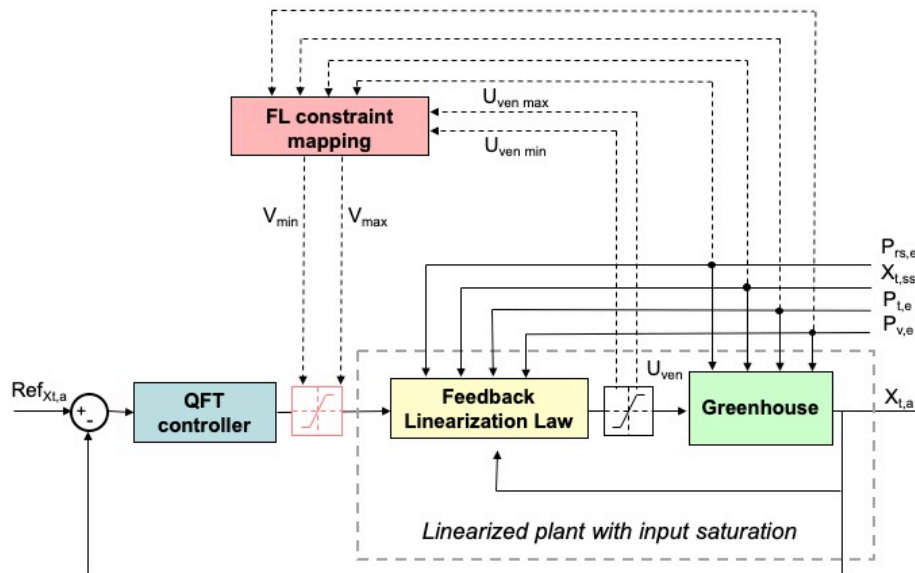


Fig. 2. Esquema de control

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.

Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones

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

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

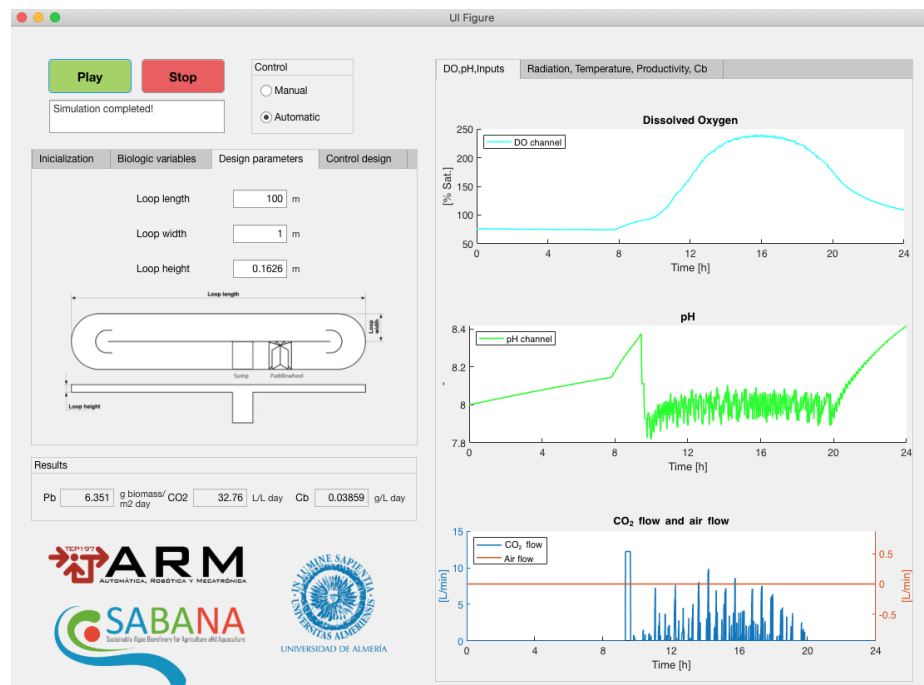


Fig. 3. Interfaz gráfica

2.4 Control predictivo lineal del pH de un fotobiorreactor raceway

Este trabajo presenta la implementación de un controlador predictivo generalizado (GPC) para el control del pH en un fotobiorreactor raceway para el cultivo de microalgas. La variable más crítica en los procesos de crecimiento de microalgas es el pH, teniendo relación directa con la productividad del sistema. La

Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones

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.

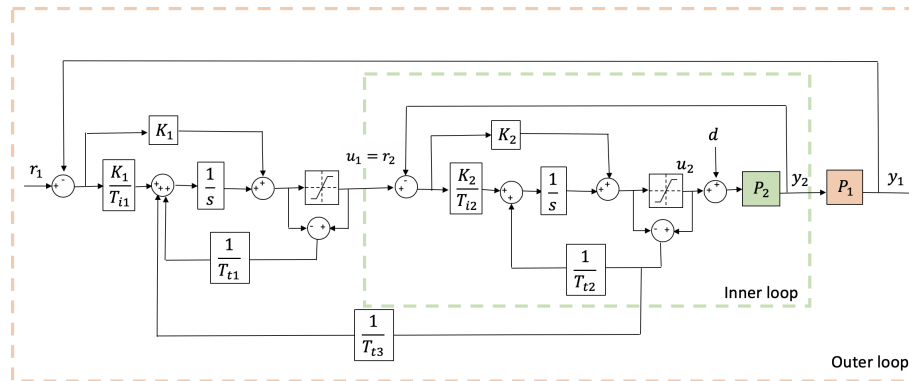


Fig. 4. Esquema de control en cascada con la nueva propuesta del back-calculation

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 [6].

3 Trabajos en desarrollo

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

- **Control robusto en reactores reales.**
Se ampliarán los resultados obtenidos en [2] con ensayos en fotobiorreactores raceway reales.
- **Mejora herramienta gráfica para la simulación de reactores raceway.**
Se mejorará el funcionamiento de la herramienta gráfica para la simulación de reactores raceway creada en [1] y se realizará un registro de propiedad intelectual del software creado.
- **Diseño de reglas de sintonía.**
Se profundizará en la búsqueda de reglas de sintonía para el nuevo esquema propuesto en [6].
- **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

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

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

Contribuciones de control robusto para sistemas sometidos a perturbaciones

del sistema real se podían capturar 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.

La herramienta interactiva desarrollada simula el comportamiento del cultivo de microalgas 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.

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

Por último, 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, G. 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 feed-back linearization controller of the greenhouse diurnal temperature using natural ventilation. *IEEE Access*, 7:64148–64161, 2019.
6. 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.
7. J. E. Normey-Rico and E. F. Camacho. Dead-time compensators: A survey. *Control Engineering Practice*, 16(4):407 – 428, 2008.
8. L. Roca. *Contribuciones al modelado y control de una planta de desalación solar. PhD Thesis*. Universidad de Almería, 2009.
9. F. Rodríguez-Rubio and M. López. *Control Adaptativo y Robusto*. Universidad de Sevilla, 1993.
10. O. Smith. Closer control of loops with dead time. *Chemical Engineering Progress*, 1957.
11. 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.

Optimización dinámica y estrategias de control predictivo para sistemas solares térmicos*

Igor Mendes Lima Pataro¹[0000-0003-0007-0992]

Departamento de Informática, Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n 04120,
Almería, España.
ilp428@inlumine.ual.es

Resumen Los sistemas que hacen uso de la energía solar han recibido especial atención en el ámbito de las energías renovables como alternativa para reducir la dependencia de las fuentes convencionales de energía contaminante. Sin embargo, estos sistemas son procesos dinámicos complejos, caracterizados principalmente por la existencia de no linealidades, múltiples fuentes de perturbación, presencia de retardos de transporte y la disponibilidad estacional de la fuente de energía primaria. Por todas estas razones, supone un reto en la actualidad el desarrollo de técnicas de control avanzado y métodos innovadores para mejorar la eficiencia de la operación, aumentar el tiempo de funcionamiento del proceso y reducir los costes asociados. Este proyecto tiene como objetivo realizar el estudio, diseño e implementación de sistemas de control avanzado para plantas de generación de energía solar. Se propone un sofisticado sistema de control, basado en estrategias de control predictivo, capaz de mantener especificaciones más estrictas sobre las condiciones óptimas durante la operación del sistema. Además, el proyecto comprende la implementación de una estructura de control multicapa basada en un marco de optimización dinámica en tiempo real, capaz de evaluar continuamente las condiciones de operación del proceso para maximizar la producción económica de la planta.

Keywords: Planta solar · Control predictivo · Capa de optimización · Modelado híbrido

1. Introducción

Uno de los objetivos energéticos para el desarrollo sostenible es la diversificación de la matriz energética mundial mediante tecnologías avanzadas, más limpias y eficientes. La generación, la transmisión y el uso de la energía son algunas de las actividades humanas con mayor impacto negativo sobre el medioambiente. Ante el actual escenario mundial, el principal reto del equilibrio económico-ambiental es mantener el desarrollo sostenible de la sociedad haciendo uso de energías renovables.

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

Es un hecho que el escenario global está cambiando lentamente. Motivado principalmente por el esfuerzo de los expertos científicos que afirman que el creciente consumo de combustibles fósiles llevará a la sociedad moderna a una crisis energética en los próximos años, se han promovido fuentes de energía alternativas para sustituir la energía de origen fósil [16,3]. Las energías renovables más comunes son la mareomotriz [14], eólica [1], biomasa [2] y solar [8]. Aunque en 2019, más del 80 % del consumo de energía primaria procedía de los combustibles fósiles, se está experimentando un notable crecimiento en el uso de energías renovables desde 1970, fundamentalmente tras la primera crisis energética global. En 2010, las fuentes de energía renovable recibieron en torno a 243 billones de dólares en inversiones [4]. Es aún más prometedor que, para el año 2040, la expectativa de producción de energía alternativa alcance el 48 % de la demanda total de energía del mundo [16].

En los próximos años, se espera que la demanda energética alcance aproximadamente los 32 *TW*, y una de las más conocidas, abundantes y sostenibles fuentes para proporcionar esa energía es el Sol. Este astro proporciona alrededor de 7500 *TW* de energía a la superficie de la Tierra, y esto sólo se refiere al uso directo de la irradiancia solar, sin mencionar que la mayoría de las otras fuentes de energía renovable derivan del sol [4]. Por ello, en las últimas décadas, la generación energética basada en plantas solares ha recibido especial atención por parte de grupos de investigación de diferentes áreas para contribuir a la mejora y desarrollo de esta tecnología.

Aunque la aplicación de la energía solar térmica ha crecido en los últimos años, todavía existe un camino por recorrer para que sea económicamente atractiva. Esta cuestión puede abordarse reduciendo los costes generales de funcionamiento o mejorando la eficiencia de la producción de energía [13,4]. Estos aspectos hacen que la ingeniería de control automático sea fundamental en el desarrollo de estrategias innovadoras que reduzcan los costes de operación y optimicen el rendimiento de las plantas solares.

Desde el punto de vista de las estrategias de control, a lo largo de las dos últimas décadas, varios estudios han demostrado que el uso de algoritmos de control avanzados puede aumentar la eficiencia de generación de energía de las plantas solares [10,22,5,11,9]. Por otra parte, los algoritmos de optimización multicapa son también una alternativa atractiva para su implementación en el campo de la optimización de la operación de captadores solares. Una capa de optimización se encarga de calcular los puntos óptimos de operación en función de la dinámica del proceso, los límites de operación de las instalaciones, el consumo energético, el beneficio y las perturbaciones. Las industrias química y petroquímica aplican con éxito las capas de optimización en sus procesos complejos, lo que plantea un terreno fértil para extenderlo a los sistemas solares con el fin de mejorar la eficiencia de la planta. Estos resultados aportan una perspectiva interesante y atractiva para seguir invirtiendo en este campo, ya que la gran variedad de plantas de captadores solares y su sistema de potencia asociado hacen difícil que una única estrategia de control sea adecuada para todos los sistemas [6].

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto de investigación es mejorar la automatización de los sistemas termosolares a partir de algoritmos de control y optimización de procesos para promover una mayor eficiencia energética en los sistemas de generación de energía renovable y minimizar el uso de sistemas auxiliares que usan combustibles fósiles. El alcance incluye las siguientes etapas para lograr este objetivo:

- En primer lugar, el proyecto implica el desarrollo y la aplicación de estrategias avanzadas de control predictivo para el circuito primario, conocido como circuito caliente o de generación, que contiene el campo de captadores solares, la fuente de energía primaria. Las estrategias de control deben tener en cuenta las no linealidades, las perturbaciones y las técnicas adecuadas para todo el proceso, incluyendo el campo de captadores solares térmicos principal y sus subsistemas auxiliares, tanques, fuentes de calor auxiliares e intercambiadores de calor.
- En segundo lugar, la investigación promueve examinar el comportamiento dinámico y el acoplamiento con el circuito secundario, conocido como circuito frío, que contiene la carga que consume la energía del circuito primario asociado a él.
- En tercer lugar, el proyecto incluye un marco de optimización dinámica que tiene en cuenta todo el sistema, los circuitos primario y secundario, y que culmina en una estrategia de control óptimo dinámico global. La capa de optimización dinámica en tiempo real (D-RTO) realiza cálculos en línea para determinar las condiciones óptimas de funcionamiento de los sistemas globales, proporcionando objetivos de control al controlador predictivo.

En conclusión, en base a lo anterior, este proyecto de investigación se enfoca en áreas esenciales relacionadas con el desarrollo de tecnologías renovables para sistemas de generación de energía solar, particularmente con la mejora en el desempeño, eficiencia y optimización de plantas de captadores solares y sus sistemas asociados. Así, esta investigación aportará importantes beneficios de alcance local y global, al ser un tema de relevante importancia dentro de la cadena productiva en energías renovables. También se puede añadir la contribución científica y tecnológica que promueve el estudio de soluciones en el campo del control avanzado de dichos sistemas, generando oportunidades de negocio innovadoras.

2. Revisión bibliográfica

Los edificios, la industria y las instalaciones se están convirtiendo en consumidores destacados de la demanda mundial de energía, impulsados principalmente por la gran necesidad de sistemas de refrigeración y calefacción, iluminación, suministro eléctrico y aparatos de seguridad. Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) más comunes utilizan máquinas eléctricas convencionales que pueden afectar negativamente a la red eléctrica y al medio

ambiente debido a los picos de demanda de la red durante las horas de trabajo y a los gases refrigerantes utilizados por el compresor. Por ello, el uso de un sistema solar térmico puede ayudar a reducir el consumo de las fuentes de energía convencionales y hacer frente al impacto negativo causado por la utilización de máquinas eléctricas.

Los sistemas solares térmicos se encargan de reflejar la irradiancia solar y concentrarla en el punto focal mediante un conjunto de espejos. A continuación, la energía solar concentrada calienta los tubos situados en el punto focal del espejo, por donde pasa el fluido calefactor en su interior. Este fluido absorbe el calor de la tubería y fluye por los tubos, impulsado por la energía cinética de la bomba, hasta llegar al sistema secundario. Este concepto básico puede mejorarse en algunas condiciones. Cuando la temperatura de salida del captador solar no es suficiente para el circuito secundario, se puede introducir en el circuito primario una fuente de calor secundaria (la más utilizada es el calentador de gas) para aumentar la temperatura del fluido. Por otro lado, si el campo de captadores solares proporciona altas temperaturas, el exceso puede acumularse en tanques de almacenamiento para su uso futuro o para calentar el circuito primario. En los últimos años, varios estudios han propuesto optimizar el uso de estas plantas solares térmicas aplicando estrategias de control, capas de optimización y desarrollando enfoques avanzados para mejorar la conexión de los subsistemas auxiliares. A continuación, se investigan los trabajos recientes para formular la base de este proyecto de investigación.

Recientemente, en [15] los autores ofrecen una revisión exhaustiva de diversas estrategias de gestión para aumentar la eficiencia energética en las instalaciones de edificios. Los autores investigan las estrategias de gestión dividiendo el estudio en diferentes edificios, sistemas y tipos de gestión. Este trabajo incluye el examen de la aplicación actual del control predictivo basado en modelo (MPC) y de las estrategias de optimización, aplicadas sobre todo en los sistemas de climatización. La conclusión del estudio afirma que las nuevas tecnologías que intervienen en los sistemas de gestión pueden ser aplicadas en diferentes campos, como la predicción del consumo de energía de diferentes subsistemas, la consideración de nuevas cargas en la gestión de la demanda, y el comportamiento del usuario dentro del edificio. No obstante, los fundamentos de la revisión muestran que la aplicación de diversas estrategias de control predictivo y algoritmos de optimización mejora el rendimiento de los sistemas solares térmicos en edificios y otras instalaciones diferentes, lo que corrobora la mejora e implementación de las herramientas de control avanzado propuestas en este proyecto de investigación.

En [19], los autores investigan las ventajas de las estrategias de MPC utilizadas en los sistemas de frío solar con tanques de almacenamiento térmico. Los autores mejoran el sistema de control utilizando información de previsión de carga y un modelo dinámico basado en la física para el sistema de climatización. Como resultado, los autores han encontrado que la estrategia MPC puede desbloquear nuevas características operativas debido a su capacidad para explotar el almacenamiento de energía térmica de forma más eficiente utilizando la predicción del modelo. Además, en comparación con un controlador clásico, el MPC

también puede ayudar a reducir el consumo de fuentes de energía auxiliares y el consumo de combustibles fósiles. Estos resultados apoyan el tema principal propuesto en el presente trabajo de investigación, ya que engloba enfoques de control multicapa, incluyendo estrategias predictivas asociadas a algoritmos que pueden tener en cuenta la configuración del sistema operativo.

Como se ha visto, los sistemas solares térmicos se asocian a diversos tipos de equipos para mejorar su rendimiento, como depósitos de acumulación, calentadores de gas, tuberías, actuadores y válvulas. Debido a la naturaleza de la fuente de energía inconstante y no manipulable, los sistemas de energía renovable suelen asociarse con diferentes fuentes de energía, lo que da lugar a sistemas híbridos. Las diferentes disposiciones de los equipos dan lugar a un sistema global complejo, con interdependencias y sometido a múltiples perturbaciones que configura una dinámica controlable compleja. Además, la configuración de cada válvula puede dar lugar a una dinámica de planta diferente formada por los subsistemas específicos. Este tipo de procesos compuestos por dinámicas continuas (por el comportamiento fenomenológico del sistema) y discretas (por el conjunto y organización de los subsistemas) son los llamados sistemas híbridos. Este tema ha sido investigado en profundidad y sigue siendo objeto de investigación en el campo de las energías renovables [20,7,12].

En cuanto a los modelos híbridos, este trabajo propone ampliar el modelo híbrido dinámico no lineal parametrizable para sistemas de energía solar de baja temperatura propuesto por [17]. Los autores trabajan con los subsistemas más comunes en las plantas solares térmicas, incluyendo los colectores solares, los tanques de acumulación y un calentador de gas. El modelo de planta propuesto es adecuado y puede ser fácilmente implementado en algoritmos de control predictivo basado en modelo, incluso durante el cambio de modo de operación. Además, el modelo puede identificar los parámetros fenomenológicos y geométricos, lo que ayuda a identificar las dimensiones mínimas de la planta y las restricciones operativas necesarias. Estas aportaciones sirven de base al presente trabajo. No obstante, ahora se propone añadir a la configuración del modelo nuevos tipos de equipos del circuito de carga (secundario), que incluyen un intercambiador de calor y una enfriadora de absorción. Esta novedosa aportación permite el consumo de la fuente de energía primaria por parte de la carga, contribuyendo al desarrollo de nuevas estrategias de optimización del uso de la planta termosolar.

A partir de la formulación de modelos de plantas de subprocessos interconectados, cabe destacar la aplicación de estrategias de control híbrido y plantas termosolares. Destaca el trabajo en [23], donde se propone un enfoque práctico de control predictivo basado en modelo híbrido no lineales para controlar el sistema del circuito primario de una planta termosolar. Los autores propusieron mezclar todas las posibles respuestas de la configuración del modelo del sistema a lo largo del horizonte de predicción del controlador. La formulación del problema de optimización del MPC da lugar a un problema de programación cuadrática (QP) con matrices de gran tamaño que puede resolverse fácilmente pero que requiere una gran carga computacional. Sin embargo, los resultados muestran que este enfoque MPC puede hacer frente a los cambios en los modos

de funcionamiento de las plantas manteniendo los beneficios de las estrategias de control predictivo.

Los resultados obtenidos en [23] pueden ser mejorados siguiendo nuevos enfoques. Tal y como se propone en [10], una estrategia de control híbrida puede alcanzar las condiciones óptimas de operación de una planta solar utilizando el esquema de Dinámica Lógica Mixta (MLD) asociado a un MPC Práctico No Lineal (PNMPC). Estos resultados son prometedores ya que el esquema MLD y el PNMPC pueden formular un problema de optimización que se resuelve sin necesidad de ampliar las matrices de predicción del modelo, simplemente estableciendo restricciones lineales apropiadas de las variables lógicas discretas del modelo con el continuo.

Teniendo en cuenta el análisis del estado del arte, se requieren aún estrategias híbridas avanzadas que tengan en cuenta todas las posibles condiciones de operación del modelo de las plantas termosolares asociadas a las estrategias de control predictivo. Las aportaciones de este proyecto de investigación van más allá y proponen incorporar el modelo del subsistema de carga (secundario) al algoritmo de control y la capa superior adicional de una estrategia de optimización en tiempo real.

3. Descripción del sistema solar térmico - Planta CIESOL

Como caso de estudio, este proyecto de investigación utiliza la planta solar térmica del Centro Mixto CIESOL (Centro de Investigación en Energía Solar) ubicado en la Universidad de Almería. El circuito primario se muestra en la Figura 1.

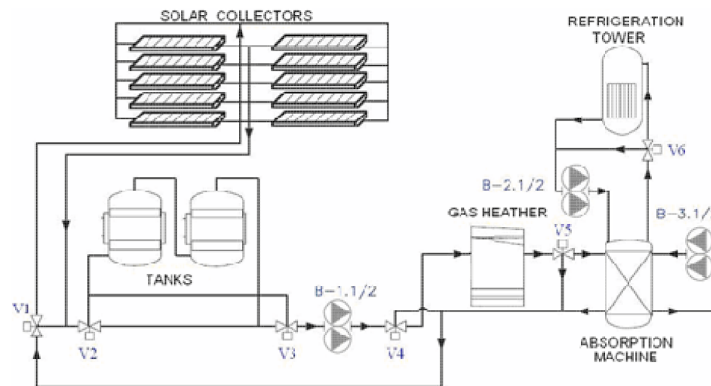


Figura 1. Instalaciones del centro CIESOL

El sistema está proyectado para utilizar el campo de captadores solares como fuente de energía primaria para producir agua caliente para cubrir la demanda. El sistema global tiene dos configuraciones básicas: modo frío, que utiliza una enfriadora de absorción para obtener agua fría para refrigeración, o modo caliente, en el que se utiliza un intercambiador de calor para producir agua caliente. Obsérvese que, en la Figura 1, se representa sólo la enfriadora de absorción, pero una combinación de maniobras de válvulas puede redirigir el agua caliente al intercambiador de calor. En esta planta solar, si la temperatura de salida del captador solar no es suficiente para cubrir la demanda (absorción o intercambiador de calor), se enciende el calentador de gas para aumentar la temperatura del fluido. Además, si la demanda es baja, el agua caliente de los captadores solares puede almacenarse en los depósitos para su uso futuro, calentar el circuito primario o enviarse a la enfriadora de absorción.

El modo de operación de la planta se puede definir en base a la combinación de los siguientes subsistemas:

- **Campo solar:** Es la principal fuente de energía para el sistema de demanda y usa la irradiancia solar para aumentar la temperatura del agua que circula a través de los captadores. Cuenta con una cantidad de 80 captadores con una área de captación total de 160.2 m². El campo está orientado al sur y tiene una temperatura de operación de entre -20 °C a 120 °C.
- **Tanques:** El sistema de almacenamiento está compuesto por dos tanques de 5000 L conectados en serie. Estos dispositivos se pueden usar de 4 formas: 1- Para calentar el circuito primario antes de que la operación comience (modo de calentamiento). 2- Para alimentar al enfriador de absorción (modo fuente). 3- Para almacenar agua caliente para su futuro uso (modo carga). 4- Para mantener baja la temperatura del circuito primario. Cuando la radiación es demasiado alta, y los captadores solares funcionan por separado, el fluido puede llegar a alcanzar hasta 120 °C. En este caso, se puede combinar el campo solar y los tanques para reducir estas variaciones repentinas y fuertes de temperatura previniendo así daños en los dispositivos que actúan como carga (modo seguridad).
- **Caldera de gas:** La caldera de gas es un sistema indeseable en este tipo de instalaciones (debido a su naturaleza no renovable) pero necesario. Este dispositivo se activa solo cuando los otros sistemas que actúan como fuente no pueden satisfacer la demanda. Nótese que el uso de este dispositivo produce contaminación y, además, representa un sobrecoste en la operación de la planta debido al precio del combustible. Por tanto, la idea fundamental es disminuir su uso.
- **Enfriador de absorción:** Este dispositivo (YAZAKI WFC-SC10 - water-water BrLi) produce agua fría entre 6 °C y 12 °C, disipando el calor mediante la torre de refrigeración. Su rango de operación oscila entre 65 °C y 98 °C, y el COP (métrica de rendimiento) tiene un valor de entorno a 0.7. El enfriador de absorción es el subsistema encargado de obtener el agua fría a partir del agua caliente a través del ciclo de refrigeración entre el absorbedor y las soluciones refrigerantes.

- **Intercambiador de calor:** Es usado para calentar el circuito secundario, proporcionando agua caliente a los *fan coils*. En este circuito, un intercambiador de calor de placas permite el contacto de ambos fluidos, lo que proporciona una mayor área de contacto y facilita la transferencia de calor.

4. D-RTO del campo solar - resultados preliminares

Como resultados preliminares, se ha propuesto una estrategia de optimización económica dinámica en tiempo real (D-RTO) para controlar el campo solar tratando de maximizar la cantidad de energía térmica suministrada a una planta de destilación de agua de mar de efectos múltiples. Los resultados ya se publicaron en [18]. A continuación se describe y discuten brevemente los resultados obtenidos.

Se utiliza como caso de estudio un modelo validado del campo de captadores solares de la planta AQUASOL, disponible en la Plataforma Solar de Almería (España). El algoritmo de optimización se basa en un problema de optimización de una capa basada en la estrategia de horizonte deslizante. La función de coste del problema considera la energía total de la planta solar y los costos de consumo de electricidad de la bomba de agua. El algoritmo también tiene en cuenta las perturbaciones (temperatura ambiente, irradiancia y temperatura de entrada del campo solar) y actualiza el caudal volumétrico de entrada óptimo de acuerdo con la función de coste y las restricciones operativas que también incluyen los objetivos de control. El funcionamiento de la estrategia D-RTO se comparó con la estrategia de control FBL para diferentes puntos de ajuste de temperatura de salida tratando de encontrar el mejor punto de operación. Esta estrategia de control se ha aplicado en casos reales y ha logrado un rendimiento de control bastante bueno para la planta de colectores parabólicos compuestos (CPC) [21].

El algoritmo D-RTO propuesto puede llevar el funcionamiento de la planta CPC más cerca del límite máximo en relación con las restricciones, trabajando a bajos flujos de fluido, ya que las altas temperaturas mejoran la producción de energía útil. El D-RTO asegura una curva de flujo de entrada óptima y una respuesta rápida desde el comienzo de la operación para alcanzar la temperatura mínima para producir agua caliente. Es fundamental destacar la ventaja de la característica predictiva en función de la producción de energía del problema de optimización. Los beneficios totales se establecen a través de la cantidad de agua fresca producida por la unidad de destilación multiefecto (MED) utilizando el agua caliente de la planta CPC. Como resultado, la estrategia D-RTO ha obtenido los mayores beneficios con los menores costes de funcionamiento. En otras palabras, produce la mayor cantidad de energía, aunque la cantidad de agua al final de la simulación sea la más baja.

Los resultados han demostrado que el D-RTO es capaz de maximizar la cantidad de energía producida por el CPC, o lo que es lo mismo, la potencia térmica suministrada, incluso con fuertes perturbaciones. Además, los resultados preliminares muestran que el problema de optimización D-RTO puede maximizar las condiciones económicas sin necesidad de definir una referencia específica para

las variables controladas, sólo diseñando correctamente los límites del proceso como restricciones del problema. Este resultado aporta perspectivas útiles ya que facilita la operación de la planta CPC en potencia máxima, lo que representa una operación MED lo más estable y rentable posible y un uso más eficiente de la energía solar.

5. Conclusiones

Este proyecto de investigación de doctorado propone el estudio, desarrollo, implementación y análisis de estrategias de control predictivo avanzado asociadas a la capa de optimización dinámica para optimizar el funcionamiento de la planta termosolar. En concreto, se proponen estrategias MPC no lineales híbridas que tienen en cuenta los diferentes modos de operación del sistema global, incluyendo la máquina de carga/demanda.

En el trabajo presentado se describen las principales aportaciones y el estado del arte que fundamenta el desarrollo de la tesis. Además, se presenta la descripción del caso de estudio, el sistema solar del Centro Mixto CIESOL, ubicado en la Universidad de Almería. Además, como contribución final, el trabajo presenta un estudio preliminar de la implementación de D-RTO en campos CPC. Los resultados iniciales refuerzan las ideas aquí desarrolladas para seguir investigando en la mejora de la operación de las plantas solares.

Por último, las aportaciones de este trabajo están motivadas en base a la necesidad de que el desarrollo de las tecnologías renovables, especialmente en lo que respecta a los sistemas de generación de energía solar, cambie, aunque sea lentamente, las perspectivas de una nueva sociedad sostenible y equilibrada.

Referencias

1. Alhmoud, L., Wang, B.: A review of the state-of-the-art in wind-energy reliability analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **81**, 1643 – 1651 (2018). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.252>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117308985>
2. Barnes, D.I.: Understanding pulverised coal, biomass and waste combustion – a brief overview. *Applied Thermal Engineering* **74**, 89 – 95 (2015). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.057>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431114000635>, 6th International Conference on Clean Coal Technologies CCT2013
3. 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>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120309503>
4. Camacho, E.F., Berenguel, M., Rubio, F.R.: *Advanced Control of Solar Plants*. Springer, London, England (1997)

Dynamic Optimization for Thermal Solar plants

5. Camacho, E., Gallego, A.: 14 - Advanced control strategies to maximize ROI and the value of the concentrating solar thermal (CST) plant to the grid. In: Blanco, M.J., Santigosa, L.R. (eds.) *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*, pp. 311–336. Woodhead Publishing Series in Energy, Woodhead Publishing (2017). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100516-3.00014-9>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005163000149>
6. Camacho, E., Rubio, F., Berenguel, M., Valenzuela, L.: A survey on control schemes for distributed solar collector fields. part ii: Advanced control approaches. *Solar Energy* **81**(10), 1252 – 1272 (2007)
7. Carmeli, M.S., Castelli-Dezza, F., Mauri, M., Marchegiani, G., Rosati, D.: Control strategies and configurations of hybrid distributed generation systems. *Renewable Energy* **41**, 294–305 (2012). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.010>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111006124>
8. Elsheikh, A.H., Sharshir, S.W., Abd Elaziz, M., Kabeel, A., Guilan, W., Haiou, Z.: Modeling of solar energy systems using artificial neural network: A comprehensive review. *Solar Energy* **180**, 622 – 639 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.037>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19300465>
9. Gallego, A., Fele, F., Camacho, E., Yebra, L.: Observer-based model predictive control of a parabolic-trough field. *Solar Energy* **97**, 426–435 (2013). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.002>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13003599>
10. Gil, J.D., Álvarez, J., Roca, L., Sánchez-Molina, J., Berenguel, M., Rodríguez, F.: Optimal thermal energy management of a distributed energy system comprising a solar membrane distillation plant and a greenhouse. *Energy Conversion and Management* **198**, 111791 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111791>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419307733>
11. González, R., Roca, L., Rodríguez, F.: Economic optimal control applied to a solar seawater desalination plant. *Computers & Chemical Engineering* **71**, 554–562 (2014). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.10.005>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135414003007>
12. Jun, Z., Junfeng, L., Jie, W., Ngan, H.: A multi-agent solution to energy management in hybrid renewable energy generation system. *Renewable Energy* **36**(5), 1352–1363 (2011). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.032>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110005458>
13. Kumar, A., Prakash, O., Dube, A.: A review on technology and promotional initiatives for concentrated solar power in world. *International Journal of Ambient Energy* **39**(3), 297–316 (2018). <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1298058>, <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1298058>
14. Loisel, R., Sanchez-Angulo, M., Schoefs, F., Gaillard, A.: Integration of tidal range energy with undersea pumped storage. *Renewable Energy* **126**, 38 – 48 (2018). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.037>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118303483>
15. Mariano-Hernández, D., Hernández-Callejo, L., Zorita-Lamadrid, A., Duque-Pérez, O., Santos García, F.: A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis. *Journal of Building Engineering*

Dynamic Optimization for Thermal Solar plants

- 33**, 101692 (2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101692>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220310627>
16. Panwar, N., Kaushik, S., Kothari, S.: Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **15**(3), 1513 – 1524 (2011). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110004065>
 17. Pasamontes, M., Álvarez, J., Guzmán, J., Berenguel, M., Camacho, E.: Hybrid modeling of a solar-thermal heating facility. *Solar Energy* **97**, 577–590 (2013). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.024>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13003861>
 18. Pataro, I., Americano da Costa, M., Roca, L., Guzmán, J., Berenguel, M.: An economic D-RTO for thermal solar plant: analysis and simulations based on a feedback linearization control case. *Congrasso Brasileiro de Automática - SBAI (07 2020)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23086.74565>
 19. Pintaldi, S., Li, J., Sethuvenkatraman, S., White, S., Rosengarten, G.: Model predictive control of a high efficiency solar thermal cooling system with thermal storage. *Energy and Buildings* **196**, 214–226 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.008>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818332018>
 20. Powell, K.M., Edgar, T.F.: Modeling and control of a solar thermal power plant with thermal energy storage. *Chemical Engineering Science* **71**, 138–145 (2012). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.12.009>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250911008657>
 21. Roca, L., Berenguel, M., Yebra, L., Alarcón-Padilla, D.C.: Solar field control for desalination plants. *Solar Energy* **82**(9), 772 – 786 (2008). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.03.002>
 22. Tosi, A., Roca, L., Gil, J.D., Visioli, A., Berenguel, M.: Multivariable controller for stationary flat plate solar collectors*. In: 2018 7th International Conference on Systems and Control (ICSC). pp. 7–12 (2018). <https://doi.org/10.1109/ICoSC.2018.8587808>
 23. Álvarez, J.D., Pasamontes, M., Guzmán, J.L., Camacho, E.F.: A practical hybrid predictive control algorithm for a low-temperature thermosolar plant. *Optimal Control Applications and Methods* **37**(3), 508–520 (2016). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/oca.2139>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/oca.2139>

Model-based predictive control of greenhouse climate for the management of disease

Liu Ran

Universidad de Almería, Almería, Spain

rl509@inlumine.ual.es

Abstract. This work presents the progress made in this year during the development of the PhD. Two greenhouse models were developed: a new transient greenhouse one-dimensional model by the mechanism method to estimate the temperature and humidity and a three-dimensional CFD (Computational Fluid Dynamics) model for the typical Chinese solar greenhouses. For the 1D model, promising results are obtained and the model performed well under different management mode including completely closing the vents, opening the vents, and completely closing the vents with thermal insulation blanket covered in cold season. For the 3D model, a computational fluid dynamics model was studied for the spatial and temporal distribution of the indoor microclimate and leaf condensation. Condensation always appeared first on the roof rather than on the leaves. The leaf condensation results were manually observed for comparison with the simulated results. Leaf condensation always occurred first in the area near the semi-transparent roof, both in the observations and the simulation. The LWD (Leaf Wetness Duration) was simulated by considering the duration of the simulated leaf condensation at each point. The evaluation was conducted on 216 pairs of samples. The true negative rate, true positive rate, and accuracy were 1, 0.66, and 0.89, respectively.

Keywords: transient model; temperature; humidity; CFD; greenhouse; cucumber; condensation

1 Introduction

In this work, the objective for the 1D simulation is to develop a model which is fast to be computed, portable and can be used as a tool for temperature and humidity prediction and control, which are two crucial processes for plant disease in practical production for typical single slope solar greenhouse in China [1]. Currently, the single slope solar greenhouse is the main type of greenhouse for vegetable production in the cold season of Northern China, its total area has been reported as 1.96 million ha [2]. However, these greenhouses are lack of standardized in size, structure and materials, of which, two thirds are made of rammed soil wall, the length of the greenhouse various from 50 to 100 meters and the span (width) various from 7 to 12 meters. The above situation makes the model difficult to be applied to the real greenhouse, which is for the following reasons: Wall heat flux should be simulated based on each case rather than by imposing experience value; solar radiation gain changes with the structure, size and materials of the roof; air leakage (infiltration) has been proved to be closely related to the tightness of the cover [3, 4]. In this 1D model, several previous equations are integrated as the mechanisms and middle links, which exist in the actual scene, into this model. The final choice of the model was mainly based on the rigorousness of the designer and the similarity of the scenarios. Although there are still imperfections, it provides a method and example for the modelling.

Model-based predictive control of greenhouse climate for the management of disease

The leaf wetness duration (LWD) plays an important role in the disease warning system for crops [1]. However, existing models use the environmental and LWD data of a single location in the greenhouse as the input to represent the conditions of the entire greenhouse [5, 6]. On the one hand, there are remarkable non-uniformities in leaf microclimate within the canopy in a greenhouse, with implications for variable heat and mass exchange, and the heterogeneity distribution of greenhouse climate [7]. On the other hand, it may be costly to install many sensors in the greenhouse. A practical solution is to develop an LWD distribution model based on the greenhouse climate and computational fluid dynamics (CFD). The goal of the 3D modelling is to establish the precise temporal and spatial distributions of condensation around a cucumber canopy in a greenhouse at night to provide a decision-making basis for disease control.

2 One-dimensional model

The 1D model system was implemented using Simulink (Figure 1). The final model blocks are divided in subsystems for temperature, humidity, plant and boundary conditions.

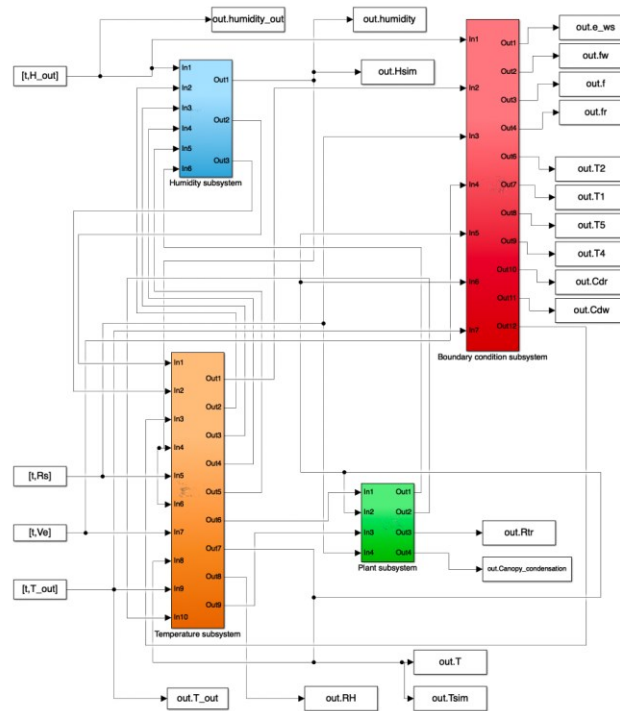


Figure 1. Simulink blocks for implementation of different subsystems

The model works with only 4 inputs and 3 initial condition values (Figure 2). The model runs by given the inputs, which can be provided by the weather station or weather forecast data. All the middle links are simulated by adopting proper equations which were developed under similar condition in the first and the second layer. Besides, before the simulation, the size and the physical property of the building materials should be given.

Model-based predictive control of greenhouse climate for the management of disease

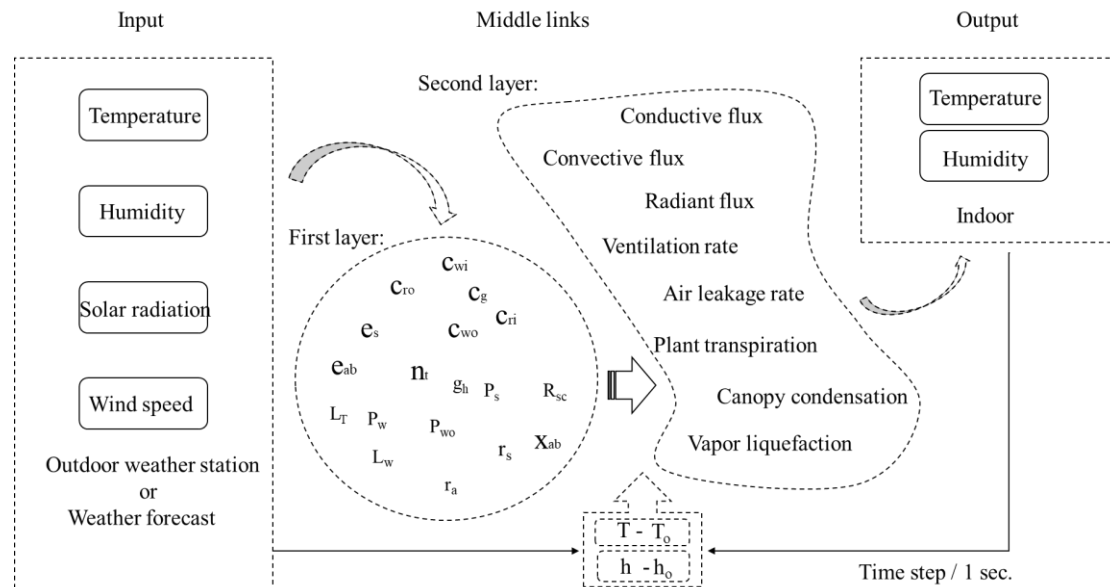


Figure 2. Input, middle links and the output of the model.

2.1 Model performance on a single day

For greenhouse A, the RMSE of the temperature is 2.6 K, the RMSE of the absolute humidity and the relative are 0.0031 kg kg⁻¹ and 14.6 % (Figure 3). The simulation under the closed vents condition is of great significance to illustrate the performance of the model. The curve fluctuation and peak value of absolute humidity are consistent with the actual situation, even though, the error of the relative humidity is great due to the temperature difference.

The thermal performance is also good in applying to the greenhouse B (Figure 4), the RMSE of the temperature is 2.4 K. Notice that the error is obtained under the temperature increase over 30 K, which proves that this model is accurate with the energy budget. This model also provides leaf wetness risk base on the simulation of the crop canopy condensation with the combined consideration of temperature (Figure 3), which can be a useful tool for plant disease warning system.

Considering the computational load and the consistency between the simulated and measured indoor solar radiation the constant transmittance is feasible (Figure 5). The air leakage rate varies from 0.2 h⁻¹ to 0.6 h⁻¹ and reaches the peak at noon. The convective transfer coefficient of the external wall, internal wall and the external roof are close to 0 during the night when the wind speed is low. The transpiration rate began to rise after 6:00 a.m. and reached the peak at noon, then the transpiration rate gradually approached 0 after 18:00. Accurate simulation of transpiration rate is an important middle link of humidity modeling.

Model-based predictive control of greenhouse climate for the management of disease

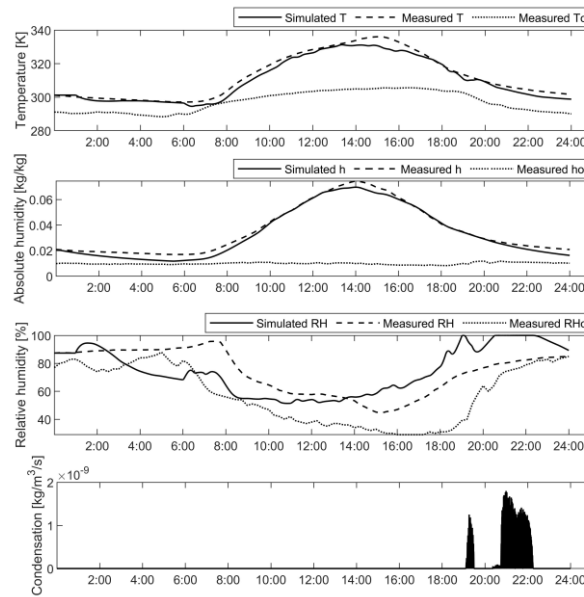


Figure 3. Data set of the temperature, humidity and crop canopy condensation under closed vents condition on 17 August, 2019 in the greenhouse A.

Figure 6 shows how the temperature increases and decrease from the energy budget. The air is heated by convective heat transfer with the wall and soil surface that absorb the solar radiation in the daytime, of which 34% is from the wall and 66% is from the ground. Not all the solar radiation absorbed by the wall will be converted into air heating, the process is simulated by solving the embedded conservative equations group for each second. Transparent roof is the main medium of greenhouse energy loss, which accounts for 86% in the daytime and 65% in the nighttime. Followed by the air leakage, which accounts for 14% in the daytime and 23% in the nighttime. The ground is the main medium to provide energy in the nighttime, but it is insufficient to offset the loss, and the net energy during the nighttime is -19.5MJ.

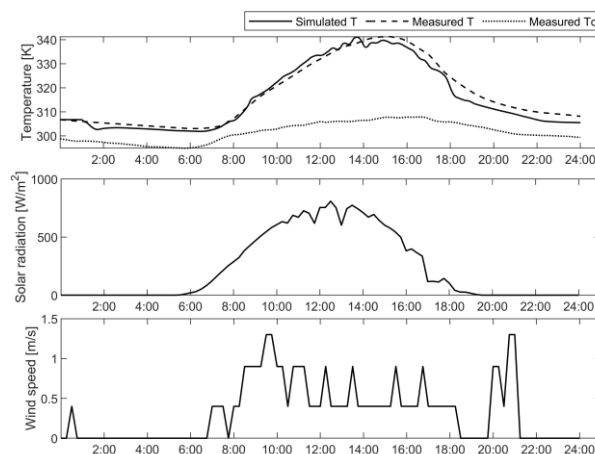


Figure 4. Data set of the temperature, solar radiation and wind speed under closed vents condition on 11 August, 2020 of the greenhouse B.

Model-based predictive control of greenhouse climate for the management of disease

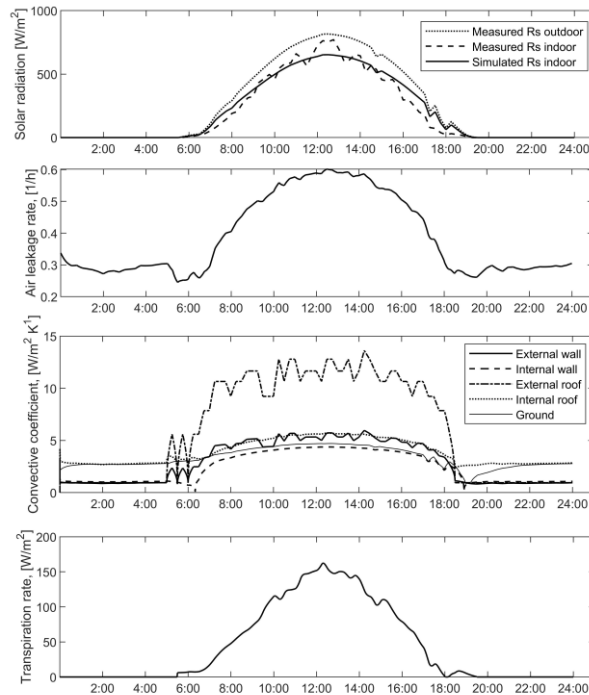


Figure 5. Data set of the simulated solar radiation, air leakage rate, convective transfer coefficient and crop transpiration rate on 17 August, 2019 in the greenhouse A.

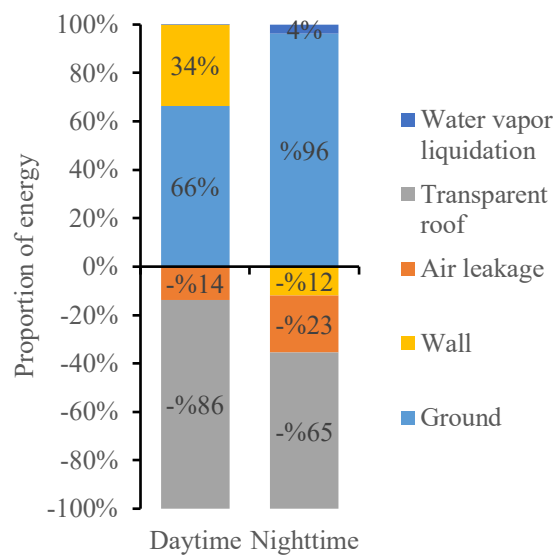


Figure 6. The proportion of income and loss of each link to the greenhouse energy under closed vents condition on 17 August, 2019 of the greenhouse A.

2.2 Model performance on consecutive days

The model is validated on consecutive days in different seasons in the year of 2016, 2017 and 2019. The simulated temperature fits the real measured data in the spring and the autumn season, with the RMSE from 2.0 to 2.9 K. The humidity simulations were good, the RMSE ranges from 8.8 % to 12.7 % in different seasons and different greenhouses (Figure 7).

Model-based predictive control of greenhouse climate for the management of disease

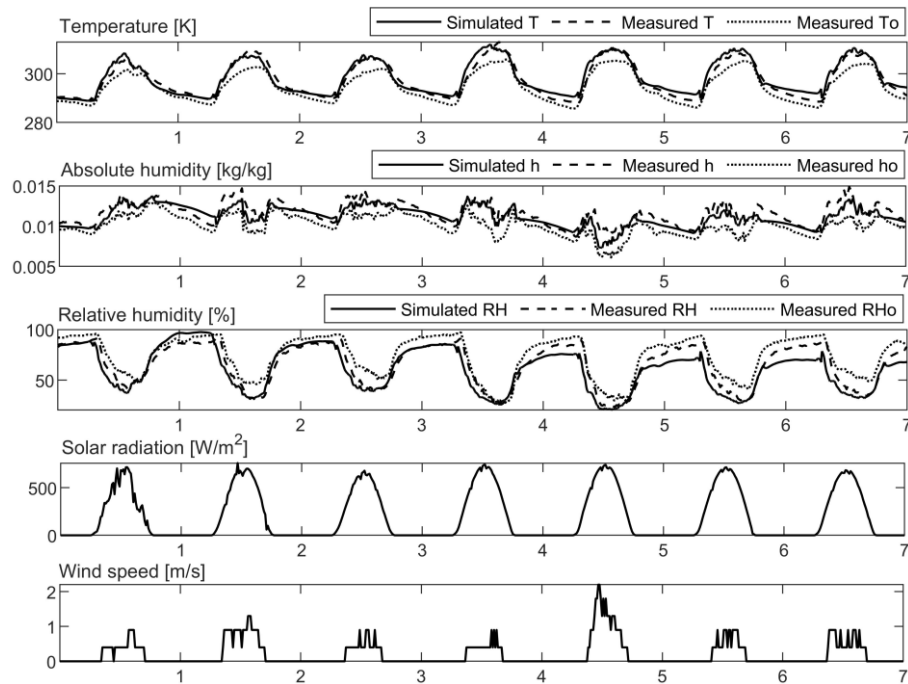


Figure 7. Data set used for the model validation with the temperature and humidity in 20-26 Sept., 2019 in the greenhouse B.

3 Three-dimensional model

The transient simulation was conducted after loading the initial conditions file (Figure 8). All sub-models were integrated into the greenhouse system to formulate a crop canopy condensation model according to the energy balance, mass balance, and momentum balance. The model system takes real-time data on temperature, RH, wind speed, solar position, and radiation intensity collected by outdoor sensors as input.

3.1 Model validation

Figure 9 compares the simulations and measurements from 18:30 to 5:30. The results show that the maximum error (MAE) of the T, RH, and T_c during the two nights were 2.7 °C, 7.5%, and 2 °C, respectively.

In the actual production process, the RH is often a reference parameter with guiding significance, and is closely related to condensation and frost damage. The ME of the RH was 2.7% and 2.8%, respectively, during the two nights. The RMSE values of RH were 3.22% and 3.40%, respectively. Considering the crop–air interaction, the RMSE of the RH simulated by another CFD model was 6.4% in 6 h [8]. Compared with this experiment, the ventilation boundary condition was considered, which increased the difficulty of quantifying the water vapour concentration. Both models simulated roof condensation, while the leaf condensation model was embedded in this experiment.

Model-based predictive control of greenhouse climate for the management of disease

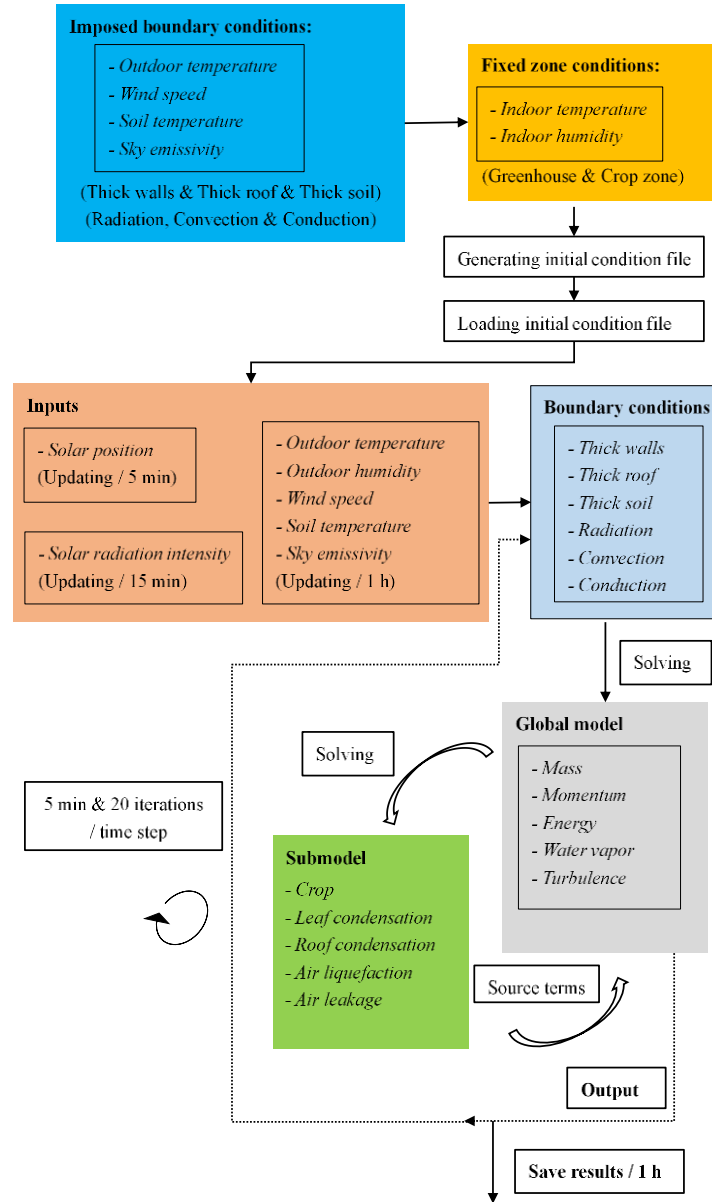
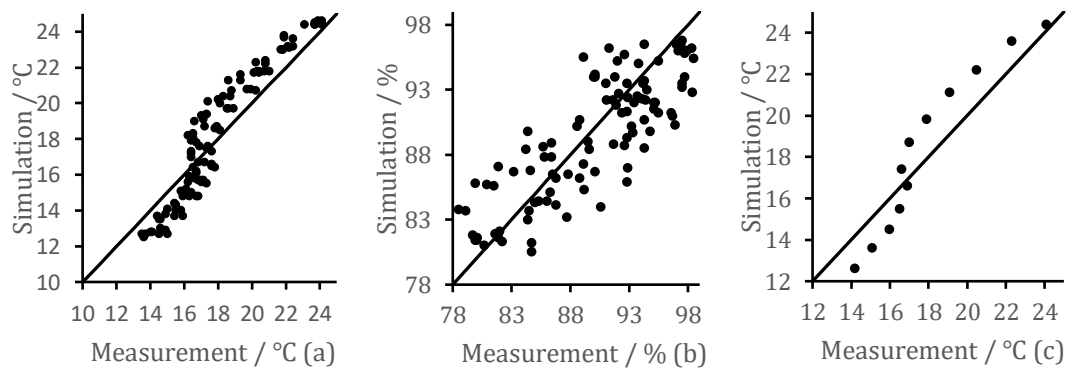


Figure 8. Flowchart of the 3D simulation.



Model-based predictive control of greenhouse climate for the management of disease

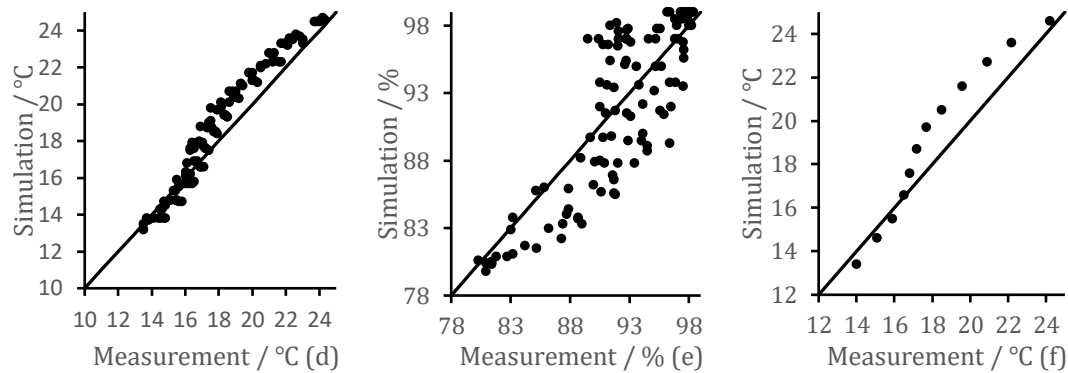


Figure 9. Model evaluation of (a) T, (b) RH, and (c) T_c on April 15–16; and (d) T, (e) RH, and (f) T_c on April 16–17.

3.2 Roof and leaf condensation

The simulated roof condensation first appeared from 19:30 on April 15 while the simulated leaf condensation first appeared from 01:30 on April 16 (Figure 10). On the second night, the simulated roof condensation first appeared from 20:30 on April 16, while the simulated leaf condensation first appeared from 00:30 on April 17 (Figure 11). Condensation always appeared first on the roof rather than on the leaves.

The condensation on leaves appeared earlier on April 17 than on April 16 because the outdoor and indoor humidity on the night of April 17 were higher than on April 16. Leaf condensation always occurred first in the area near the semi-transparent roof, both in the observation and simulation. Because the leaves near the roof are exposed to lower air temperatures, they absorb less wall radiation and emit more radiation to the sky. Leaf temperatures are lower and the RH is higher in these areas, which lead to leaf condensation.

4 Conclusion

The 1D model allows to estimate the temperature and humidity of typical solar Chinese greenhouse by using only solar radiation, outdoor temperature, outdoor humidity, wind direction and speed, as model inputs. The model also includes a variety of management modes, such as opening angle and duration of the vents and the time of covering the thermal insulation blanket.

The air temperature, RH, and leaf temperature in 24 h were evaluated by 3-D CFD modelling. The distributions of roof condensation and leaf condensation were simulated. Condensation always appeared first on the roof rather than on the leaves. Leaf condensation always appeared first in the area near the semi-transparent roof, as shown by both the observations and simulation.

Model-based predictive control of greenhouse climate for the management of disease

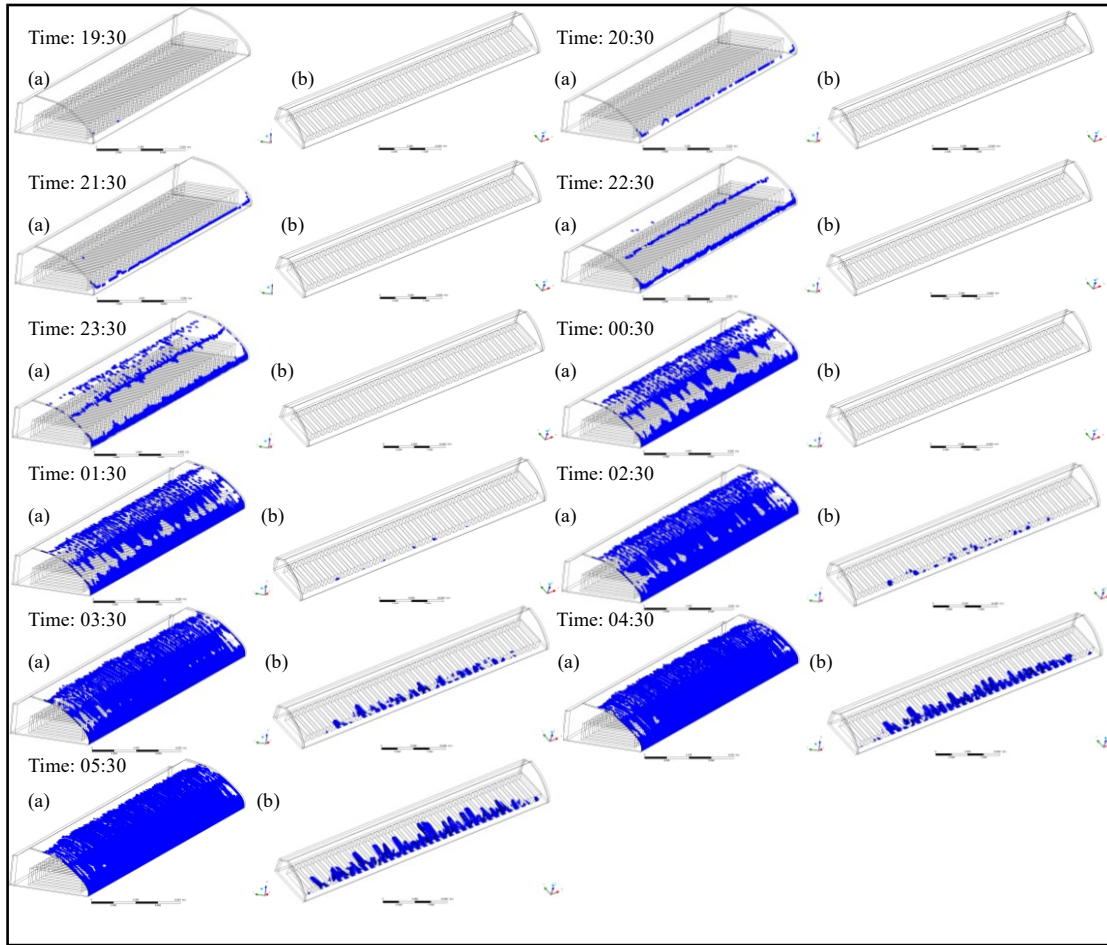


Figure 10. Comparison of simulated condensation on the (a) roof and (b) crop canopy on April 15–16. Y represents the north; X represents the east; and ■ represents the condensation that appeared based on simulation.

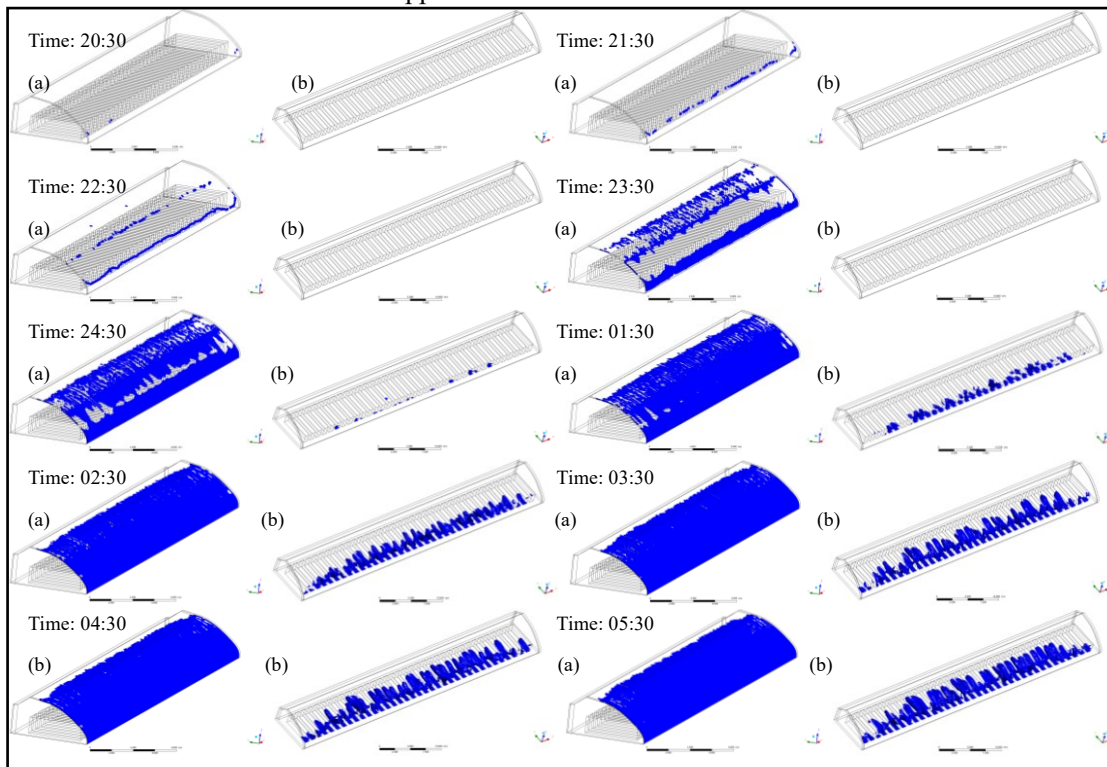


Figure 11. Comparison of simulated condensation on the (a) roof and (b) crop canopy on April 16–17. Y represents the north; X represents the east; and ■ represents the condensation that appeared based on simulation.

Bibliography

- [1] C.J. Zhao, M. Li, X.T. Yang, C.H. Sun, J.P. Qian, and Z.T. Ji. 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, 2011 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.02.009>.
- [2] H.J. Liu, C.Y. Yin, Z.Z. Gao and L.Z. Hou. Evaluation of cucumber yield, economic benefit and water productivity under different soil matric potentials in solar greenhouses in North China. *Agricultural Water Management*. 243, 106442, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106442>.
- [3] O. Jolliet, L. Danloy, J.B. Gay, G.L. Munday and A. Reist. HORTICERN: an improved static model for predicting the energy consumption of a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*. 55 (3–4), 265-294, 1991. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90066-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(91)90066-Y).
- [4] M.S. Ahamed, H.Q. Guo, and K. Tanino. Development of a thermal model for simulation of supplemental heating requirements in Chinese-style solar greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*. 150, 235-244, 2018 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.025>.
- [5] H. Wang, J. Sánchez-Molina, M. Li, and F. Rodriguez. Improving the Performance of Vegetable Leaf Wetness Duration Models in Greenhouses Using Decision Tree Learning. *Water*. 11 (1), 158, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11010158>.
- [6], M. Frans, R. Moerkens, S. Van Gool, C. Sauviller, S. Van Laethem, S. Luca, R. Aerts and J Ceusters. Modelling greenhouse climate factors to constrain internal fruit rot (*fusarium* spp.) in bell pepper. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 125, 425-432, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41348-018-0159-3>.
- [7] K. Kimura, D. Yasutake, A. Yamanami and M. Kitano. Spatial examination of leaf-boundary-layer conductance using artificial leaves for assessment of light airflow within a plant canopy under different controlled greenhouse conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280, 107773, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107773>.
- [8] H. Bouhoun Ali, P.-E. Bournet, V. Danjou, B. Morille and C. Migeon. CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: Sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties. *Biosystems Engineering*, 127, 159–175, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.08.017>.

Interoperabilidad entre dispositivos IoT en el marco de la Web of Things*

Manel Mena

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

Resumen La comunicación entre los diferentes sistemas de IoT presenta una serie de desafíos en el procesamiento y análisis de la información heterogénea que están gestionando dichos sistemas. El estándar W3C Web of Things (WoT) ofrece un modelo común para definir esos dispositivos siguiendo las directrices establecidas por la Thing Description. Cuando definimos dispositivos mediante el uso de la Thing Description no estamos definiendo el comportamiento, simplemente definimos la funcionalidad de estos, por lo que no hay manera de saber si una interacción es consecuencia de otra. En este artículo, proponemos un mecanismo para mejorar la interoperabilidad entre dispositivos de la WoT que sientan las bases sobre cómo establecer una relación que los vincule. Esta relación está formada por dos entidades diferentes: las causas y los "efectos". Estas dos entidades son al mismo tiempo interacciones proporcionadas por el esquema de la Thing Description de cada dispositivo implicado. Las relaciones causa-efecto ayudan a definir cómo funcionan los dispositivos entre sí siguiendo una estrategia de comunicación de eventos.

Keywords: Internet of Things · Web of Things · Microservicios · Sistemas ciberfísicos · Interoperabilidad · M2M.

1. Introducción

Una de las principales ramas de estudio en el desarrollo de sistemas de IoT es cómo resolver el problema de la interoperabilidad y la integración [1]. Hay variedad de mecanismos de comunicación que deben tenerse en cuenta al trabajar con dispositivos IoT. Los patrones de comunicación como el editor-suscriptor [2], las interfaces ofertadas-requeridas [3] para IoT o la comunicación basada en eventos [4] son los más significativos. Estos mecanismos son enfoques arquitectónicos para permitir la interacción con dispositivos IoT o sistemas ciberfísicos.

La naturaleza heterogénea de los protocolos y tecnologías utilizados en IoT representa un desafío para los desarrolladores y usuarios de este dominio. Las recomendaciones de W3C de la Web de las Cosas (WoT) [5] nos ayudan a superar

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

Interoperabilidad entre dispositivos IoT en el marco de la Wb of Things

este desafío proporcionando una capa abstracta que ofrece una manera uniforme de establecer comunicación y la descripción de *cosas* utilizando estándares y tecnologías web.

Uno de los mayores problemas de la WoT es que no tiene en cuenta la posibilidad de comunicación entre las cosas sin intervención humana. En este artículo, nos centramos en cómo establecer un sistema de interoperabilidad entre dispositivos IoT. Con este fin, proponemos un DSL basado en los conceptos de **causas** y **efectos** que hace uso de la funcionalidad proporcionada por la Thing Description de la WoT [6]. La Thing Description ofrece una capa de abstracción en la que podemos declarar interacciones entre dispositivos o software que representa esos dispositivos.

El intento de establecer comunicación entre dispositivos IoT surge de nuestro trabajo previo sobre Digital Dices [7]. Un Digital Dice es una representación digital de una cosa utilizando microservicios y Thing Description como los componentes principales. El concepto es similar al de Digital Twins, pero mientras que los Digital Twins se utilizan principalmente para la virtualización de cosas nuestros datos digitales son los más adecuados para la gestión y el uso de estas. Una vez que comenzamos a desarrollar Digital Dice, nos dimos cuenta de que la Web of Things no nos ayuda a describir cómo diferentes dispositivos se comunican entre sí.

El uso del procesamiento de eventos complejos para permitir la interacción entre las cosas se consideró como una manera de mitigar este problema, pero esta idea chocaba con los principios principales de los Digital Dice, como el principio de responsabilidad única, o la descentralización como idea principal. Esos principios parten de la base del uso microservicios, ya que estos nos ayudan a evitar errores del sistema y hacen que el impacto de un error en un microservicio no afecte a todo el sistema. Teniendo en cuenta estos principios, nos propusimos definir lo que llamamos relaciones de causalidad.

La Figura 1 muestra nuestra propuesta de comunicación entre dispositivos. El sistema establece una relación de entre diferentes componentes o servicios de la WoT, haciendo que cada uno de ellos pueda escuchar las diferentes propiedades, acciones o eventos (causas) de los diferentes componentes que tendrán un impacto en las interacciones de otros componentes (efectos). El sistema tiene una restricción particular, los efectos sólo pueden actuar sobre las interacciones mostradas en la Thing Description relacionada con la causalidad declarada. Esta restricción se justifica por problemas de seguridad, tratando de evitar la posibilidad de una cosa que afecta negativamente a otras cosas con la inyección de código malicioso. El aislamiento del comportamiento de los efectos de una cosa es de suma importancia. Nuestra idea de relación de causalidad propone el establecimiento de comportamiento entre dispositivos mediante un DSL evitando en todo momento la intervención humana.

En la Thing Description propuesta por el W3C, si una acción de una cosa B es utilizada para cambiar el valor de una propiedad de una cosa A, esa relación se oculta en la implementación de la cosa A como una caja negra (véase la parte superior de la figura 1). Desde nuestro punto de vista, consideramos

Interoperabilidad entre dispositivos IoT en el marco de la Wb of Things

que una representación explícita de tal relación podría ser útil. Con este fin, nuestra propuesta es crear un metamodelo que pueda manejar las relaciones entre dispositivos donde las interacciones de la cosa B (causas) pueden tener un impacto directo en las interacciones de la cosa A (efectos). Para la misma situación anterior, el vínculo entre la acción cosa B que se ejecuta debido al cambio en el valor de una propiedad de la cosa A, el cual estaría representado por un vínculo causal como parte del modelo de relación de causalidad que controla la cosa A.

Nuestra solución nos permite establecer lo que podría considerarse como un sistema descentralizado de procesamiento de eventos complejos (CEP), donde cada dispositivo maneja los eventos que tienen impacto en sí mismo. [8,9,10,11]. Una de las principales ventajas de un sistema de eventos descentralizado es la mejora en el rendimiento del sistema, así como evitar posibles puntos de falla. En un sistema de eventos centralizado, la inactividad del servicio de eventos afecta a todos los eventos complejos controlados por él, mientras que en un sistema descentralizado un error en uno de los dispositivos sólo afecta a las interacciones donde este sistema es necesario. Sin embargo, la idea de un sistema de eventos descentralizado tiene el problema de que todos los componentes (servientes WoT) que hacen uso de este lenguaje deben saber cómo manejarlo. Así que para hacer nuestra solución más universal proponemos un sistema que al mismo tiempo pueda funcionar como un sistema descentralizado, con aquellos componentes o dispositivos que saben manejar las relaciones de causalidad, y de manera centralizada para aquellos componentes que utilizan otro tipo de implementaciones de la WoT.

Este artículo se estructura en dos secciones principales. La Sección 2 en la cual explicamos los avances realizados en la definición del concepto de relación de causalidad, así como los avances realizados en pos del tema principal de mi investigación, los microservicios al servicio de la WoT. La Sección 3 donde establecemos una discusión sobre los objetivos cumplidos en este particular tema de investigación, así como posible trabajo futuro en relación con la temática de mi investigación.

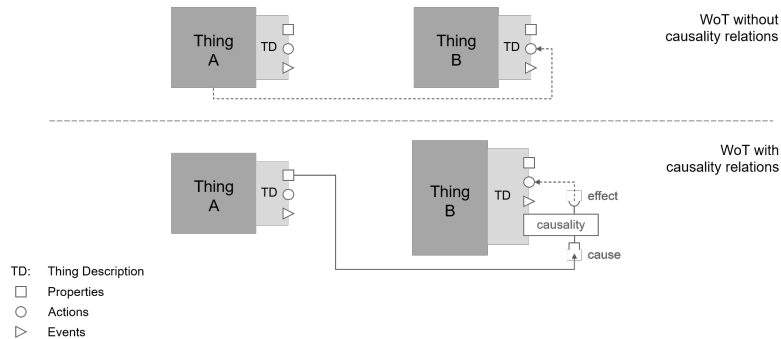


Figura 1. Relación de causalidad.

2. Avances

En esta sección vamos a realizar un pequeño resumen de los avances realizados en la consecución de mi proyecto de investigación, además vamos a definir como la relación de causalidad ayuda a establecer comunicación entre dispositivos de la WoT sin la intervención humana.

En artículos anteriores hemos definido cómo usando la WoT, desarrollamos una abstracción software capaz de implementar las ventajas de las arquitecturas de microservicios, Digital Dices [7,12]. Para soportar este concepto también desarrollamos una librería de comunicación capaz de establecer un patrón de comunicación común y siendo capaz de trabajar con distintos protocolos (KNX, WebSocket, PubSub, Http, etc.) llamada WoTnectivity [13]. Por último, en [14] establecemos una propuesta de servicio federado de descubrimiento de componentes WoT. Una vez establecidos los distintos avances principales en la consecución de la tesis, pasamos a hablar del concepto de relación de causalidad.

2.1. Relación de causalidad

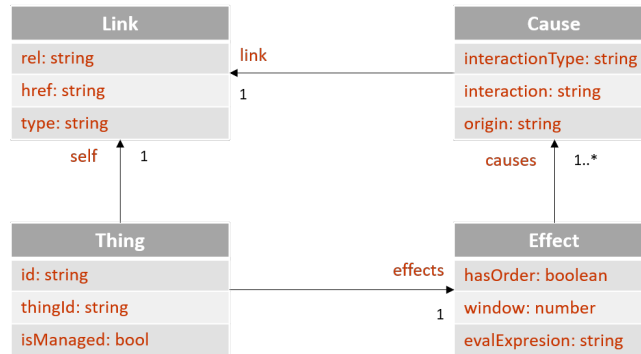
En el marco de la WoT, las cosas se definen mediante las interacciones que son capaces de ejecutar (acciones, causas y eventos). Es importante entender el concepto de interacciones de la wot, dado que tanto causas como efectos en nuestra relación de causalidad no dejan de ser interacciones de de Thing Descriptions de la WoT. Las causas y efectos los definimos como:

- **Causas.** Una *causa* es una interacción de una cosa que causa la ejecución de un efecto (e.g., la propiedad temperatura de un sensor).
- **Efecto.** Un *efecto* es una interacción que se ejecutara si una o más causas relacionadas cumplen una serie de requerimientos relacionados con esas causas (e.g., encender sistema anti-incendios si la temperatura excede 90°C).

Mientras que en la relación de causalidad, las causas pueden provenir de cosas diferentes, los efectos sólo serán capaces de ejecutar interacciones de la cosa que la relación de causalidad está controlando, introduciendo una capa adicional de seguridad, ya que los efectos sólo pueden tener repercusiones en la cosa con la que están relacionadas. En nuestra propuesta, una cosa debe tener una única relación de causalidad que represente todos los efectos que necesitan ser manejados por ella. A su vez esto evita la necesidad de consultas más complejas para recuperar los efectos controlados por una cosa particular en el subsistema de gestión de relaciones de causalidad.

La Figura 2 muestra nuestra propuesta de esquema de relación de causalidad en forma de metamodelo. Para intentar entender la propuesta lo mejor es que vayamos explicando clase a clase su funcionalidad. La primera clase en la que nos vamos a enfocar es la clase **Thing**, esta clase define las propiedades de la cosa que una relación particular de causalidad está controlando. Esta clase cuenta con dos propiedades principales la `thingID`, que debe ser la misma que la `id` de la Thing Description de la cosa que controla, con ello establecemos donde se van

Interoperabilidad entre dispositivos IoT en el marco de la Wb of Things

**Figura 2.** Relación de causalidad.

a ejecutar los efectos definidos en el modelo. La segunda propiedad importante de esta clase es `isManaged` que indica si la relación de causalidad se tiene que manejar en el subsistema de causalidades o la maneja el servidor al que la relación de causalidad hace referencia. Otra propiedad importante es el `link` que hace referencia a la definición de la Thing Description que la relación de causalidad maneja. Esta propiedad hace referencia a la clase `Link`.

En la clase `Link` declaramos un enlace a las cosas que forman parte tanto de causas como de efectos. Esta última clase tiene tres propiedades diferentes `rel`, `href` y `content-type`. La primera propiedad establece un nombre de relación, la segunda la dirección donde se puede encontrar esa cosa y la tercera el tipo de contenido que nos vamos a encontrar en el `Link`. En la primera interacción de las relaciones de causalidad esta relación debe ser siempre del tipo `aplicación/td+json` que forma parte de los tipos oficiales de IANA Media Type [15] que hace referencia a la W3C Thing Description representada en JavaScript Object Notation (json).

La siguiente clase a definir en el metamodelo es la clase `Effect` esta clase es la que nos permite definir un efecto, a su vez la clase `Thing` cómo se puede apreciar en la Figura 2 cuenta con la propiedad `effects` el la que se listan todos los efectos de una cosa. La clase `Effect` denota una serie de propiedades derivadas de los controladores de efectos complejos. Estas propiedades son las siguientes:

- `hasOrder`. Esta propiedad indica si las causas del efecto vienen en orden.
- `window`. Determina si las causas se tienen que ejecutar en una ventana de tiempo particular para que se ejecute el efecto.
- `evalExpresion`. Esta propiedad es la que en eventos complejos establece la lógica de selección e indica si el efecto particular en el que deriva debe de ser ejecutado. El lenguaje utilizado en la `evalExpresion` es JavaScript. La ventaja de utilizar un lenguaje tan generalista es que podemos utilizar en las expresiones de evaluación toda la potencia del mismo, lo cual no sería posible en un lenguaje simple de consultas (e.g., bucles, condicionales, expresiones matemáticas, multi-acciones en una regla simple, etc.). La principal desventaja de utilizar este tipo de lenguaje es que necesitamos contar con un

Interoperabilidad entre dispositivos IoT en el marco de la Wb of Things

evaluador de `evalExpression` en nuestra cosa, lo cual añade complejidad a la misma.

- `causes`. Relacionado con la clase `Cause`.

La última clase a definir en el metamodelo es la que denota el concepto de `Cause`. Esta clase define las causas de un efecto particular, y las propiedades que la representan son las siguientes:

- `interactionType`. Esta propiedad determina el tipo de interacción de la causa. En la primera versión de las relaciones de causalidad solo tendremos en cuenta cuatro tipos distintos de valores (`property`, `action`, `event` y `effect`).
- `interaction`. Aquí declaramos el nombre de la interacción del que proviene esta causa.
- `origin`. En esta propiedad declaramos el origen de la causa. Si proviene de el dispositivo físico, si es debida a interacción humana o si es consecuencia de otro efecto.
- `link`. Esta propiedad indica el dispositivo de donde viene la causa, apuntando a la Thing Description de dicho dispositivo.

Como se puede ver, la relación de causalidad tiene un patrón de trabajo similar en concepto a un sistema CEP clásico, pero funciona de una manera diferente. Mientras que los CEP clásicos son sistemas centralizados con reglas que deben evaluarse cada vez que se produce un evento, las relaciones de causalidad ofrecen dos enfoques diferentes, ya que nuestro sistema puede seguir un patrón descentralizado (método de trabajo preferido) donde cada cosa maneja su propia lógica requerida, disminuyendo la posibilidad de un error total en este enfoque. Por otra parte, nuestro sistema puede también funcionar de manera centralizada, como los CEP clásicos, en el caso de que el componente WoT en particular no sea capaz de manejar las relaciones de causalidad.

De forma similar a los CEP típicos, la relación de causalidad tiene una fase de selección, incrustada en las causas que gestionan un efecto determinado, así como las fases de coincidencia y derivación que se producirán cuando ejecutemos la `evalExpression`.

Gracias a las relaciones de causalidad, podemos establecer un flujo de comunicación entre diferentes cosas, controlándolo mediante causas y efectos. Esto nos permite formalizar patrones de interacción entre cosas sin intervención humana.

3. Conclusiones

Derivado de la necesidad de establecer un sistema automático de interacción de nuestros componentes WoT, ya definidos anteriormente en las III Jornadas del Doctorado de Informática [16], hemos presentado un método para establecer interoperabilidad y la comunicación entre *cosas*. Para ello utilizamos las relaciones de causalidad como la capa abstracta donde declaramos las interacciones automáticas entre ellas. Para ello hemos propuesto el metamodelo de relaciones de causalidad.

Interoperabilidad entre dispositivos IoT en el marco de la Wb of Things

Las relaciones de causalidad establecen un patrón que automatiza la interacción entre las cosas, utilizando dos figuras diferentes: *causas* y *efectos*. Internamente, este sistema es similar a un procesador de eventos complejo, pero tiene la ventaja de establecer dos patrones de funcionamiento. El primero, patrón centralizado, al igual que la mayoría de los sistemas CEP. Este patrón lo usarán aquellos componentes WoT no compatibles con las relaciones de causalidad. Además, para los dispositivos que conocen las relaciones de causalidad, el sistema CEP adopta una naturaleza descentralizada. Este último modo cada *cosa* tiene que manejar los eventos que pertenecen a sus propios dispositivos (o servidores), convirtiéndose en lo que se puede considerar un procesador de eventos complejo distribuido.

Entre las ventajas de ser un sistema distribuido se encuentran, el hecho de que cada *cosa* es responsable de su propio comportamiento, o el hecho de que, en caso de un fallo catastrófico en nuestro sistema, los dispositivos afectados serán los que verán alterado su comportamiento, y no todo el sistema. Pero el sistema cuenta con ciertas desventajas, como por ejemplo el hecho de que las *cosas* necesitan mantener comunicación punto a punto con los dispositivos que son *causas* de algunos de sus *efectos*. Eso puede agregar una sobrecarga en las redes que gestionan nuestras cosas. Aun así, esto se puede mitigar, por ejemplo, con el uso de patrones reactivos entre las cosas [17,18]. El uso de JavaScript como lenguaje principal de las expresiones de evaluación de *efectos*, tiene la ventaja de ofrecer una amplia gama de posibilidades con el tipo de operaciones que podemos realizar. Aunque el hecho de ser un lenguaje tan abierto puede conducir a una variabilidad que a veces es indeseable.

Para la consecución de la temática de tesis, el próximo año nos vamos a centrar en analizar el rendimiento tanto de nuestros Digital Dices como de la arquitectura que los sustenta, realizando estudios empíricos de ambos. Por otro lado, estudiaremos el establecimiento de las relaciones causa-efecto entre Digital Dices y dispositivos genericos de la WoT.

Referencias

1. Gravina, R., Palau, C., Manso, M., Liotta, A., Fortino, G.: Integration, Interconnection, and Interoperability of IoT Systems. Springer Int. Publishing, (2018)
2. Kashyap, M., Sharma, V., Gupta, N.: Taking MQTT and NodeMcu to IOT: Communication in internet of things. Procedia CS **132**, 1611–1618 (2018)
3. De, S., Barnaghi, P., Bauer, M., Meissner, S.: Service modelling for the internet of things. In: 2011 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), pp. 949–955. IEEE (2011)
4. Zhang, Y., Duan, L., Chen, J.L.: Event-driven soa for iot services. In: IEEE international conference on services computing, pp. 629–636. IEEE (2014)
5. W3C: Web of things. <https://www.w3.org/WoT>
6. Kaebisch, S., Kamiya, T., McCool, M., Charpenay, V., Kovatsch, M.: Web of Things - Thing Description. <https://www.w3.org/TR/wot-thing-description/>
7. Mena, M., Criado, J., Iribarne, L., Corral, A.: Digital dices: Towards the integration of cyber-physical systems merging the web of things and microservices.

Interoperabilidad entre dispositivos IoT en el marco de la Wb of Things

- In: Schewe, K.D., Singh, N.K. (eds.) *Model and Data Engineering*, pp. 195–205, Springer International Publishing, Cham (2019)
8. Boubeta-Puig, J., Díaz, G., Macià, H., Valero, V., Ortiz, G.: MEdit4CEP-CPN: An approach for complex event processing modeling by prioritized colored petri nets. *Information Systems* **81**, 267–289 (2019)
 9. Sun, A.Y., Zhong, Z., Jeong, H., Yang, Q.: Building complex event processing capability for intelligent environmental monitoring. *Environmental Modelling & Software* **116**, 1–6 (2019)
 10. Grez, A., Riveros, C., Ugarte, M.: A Formal Framework for Complex Event Processing. In: *22nd International Conference on Database Theory (ICDT 2019)*. Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), vol. 127, pp. 5:1–5:18. Dagstuhl, Germany (2019)
 11. Mdhaffar, A., Rodriguez, I.B., Charfi, K., Abid, L., Freisleben, B.: CEP4HFP: Complex event processing for heart failure prediction. *IEEE transactions on nanobioscience*, **16**(8), 708–717 (2017)
 12. Mena, M., Criado, J., Iribarne, L., Corral, A.: Una arquitectura de microservicios para componentes digitales en la Web de las Cosas. In: *XXIV Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos (JISBD'2019)*, SISTEDES. Cáceres, España (2019).
 13. Mena, M., Criado, J., Iribarne, L., Corral, A.: WoTnectivity: A communication pattern for different Web Of Things connection protocols. In: *IEEE 44th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC 2020)*, IEEE, pp. 1059–1064, Madrid, Spain (2020).
 14. Criado, J., Boubeta-Puig, J., Mena, M., Llopis, J.A., Ortiz, G., Iribarne, L.: Towards the Integration of Web of Things Applications based on Service Discovery. In: *1st International Workshop on Web of Things for Humans (WOT4H)*, LNCS 12451, pp. 24–29, Helsinki, Finland (2020).
 15. Iana org.: Iana media types. <https://www.iana.org/assignments/media-types/media-types.xhtml>
 16. Mena, M.: Digital Dices: Microservicios en el marco de la Web of Things. In: *III Jornadas del Doctorado de Informática UAL (JDI2020)*. Almería, Spain (2020).
 17. de Santana, C.J.L., de Mello Alencar, B., Prazeres, C.V.S.: Reactive microservices for the internet of things: a case study in fog computing. In: *Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, pp. 1243–1251 (2019)
 18. Núñez, P.M.T.: A reactive microservice architectural model with asynchronous programming and observable streams as an approach to developing iot middleware. Ph.D. thesis, Colorado Technical University (2017)

Optimización de Planes de Radioterapia en Paralelo con GENOCOP III en GPU

Juan José Moreno Riado

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

Resumen El rendimiento de los algoritmos es uno de los factores claves en la obtención de buenos planes de radioterapia. Un plan de radioterapia actual genera un espacio de búsqueda tan grande que es imposible explorarlo en su totalidad en un tiempo aceptable. Para obtener planes que satisfagan a los profesionales médicos, necesitamos algoritmos con gran conocimiento del problema y excelente rendimiento. En este trabajo experimentamos con el algoritmo evolutivo GENOCOP III acelerado utilizando técnicas HPC en GPU y aplicado a un modelo lineal para la obtención de planes de Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT).

1. Introducción

La investigación de este año sigue la línea de optimización de planes de Radioterapia de Intensidad Modulada iniciada el año anterior.

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

En el planteamiento estándar de optimización, los haces de radiación (*beams*) se discretizan y dividen en *beamlets* bidimensionales, cuya intensidad puede ser controlada independientemente. Nuestros algoritmos de optimización dan como resultado el vector que define las intensidades de cada beamlet, denominado el *mapa de fluencia* [1,5,4].

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

2. Avances

2.1. El algoritmo GENOCOP III

GENOCOP III [7] es un algoritmo evolutivo para la resolución de problemas de optimización no lineales con restricciones. El algoritmo mantiene un conjunto

Optimización de Planes de Radioterapia en Paralelo con GENOCOP III en GPU

de operadores genéticos predefinidos. Manteniendo estadísticas de esos operadores es capaz de controlar adaptativamente la selección de los mismos durante el proceso de optimización.

GENOCOP III utiliza un mecanismo de co-evolución manteniendo dos poblaciones separadas P_s y P_r . La población P_s está compuesta por los llamados “puntos de búsqueda”, los cuales satisfacen únicamente las restricciones lineales. La población P_r está compuesta por los “puntos de referencia”, los cuales satisfacen todas las restricciones, lineales y no lineales. Los cambios en una de las poblaciones tienen impacto en las evaluaciones de los individuos de la otra.

Se puede encontrar una descripción detallada del algoritmo en [6].

2.2. El problema de optimización

En el caso de Cabeza y Cuello que estamos utilizando para nuestras pruebas, el objetivo es minimizar la dosis media recibida por la glándula salival izquierda – ls y derecha – rs. El caso contiene tres zonas tumorales, con dosis prescritas $D^{\text{tumor}^1} = 67,5$ Gy, $D^{\text{tumor}^2} = 60$ Gy, $D^{\text{tumor}^3} = 54$ Gy y tres órganos de riesgo: médula espinal (`spinal_cord`), cerebelo (`brainstem`) y mandíbula (`jaw`).

Para este caso el problema de optimización tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \text{mín } f(\mathbf{d}) &:= \frac{1}{|I_{ls}|+|I_{rs}|} \sum_{i \in I_{ls} \cup I_{rs}} d_i \\
 \mathbf{s.t.} \\
 D\mathbf{x} &= \mathbf{d}, \\
 A,1 \quad &\frac{1}{|I_{\text{tumor}^1}|} |\{i \in I_{\text{tumor}^1} : d_i \geq 0,8D^{\text{tumor}^1}\}| \geq 0,98, \\
 A,2 \quad &\frac{1}{|I_{\text{tumor}^2}|} |\{i \in I_{\text{tumor}^2} : d_i \geq 0,8D^{\text{tumor}^2}\}| \geq 0,98, \\
 A,3 \quad &\frac{1}{|I_{\text{tumor}^3}|} |\{i \in I_{\text{tumor}^3} : d_i \geq 0,8D^{\text{tumor}^3}\}| \geq 0,98, \\
 B,1 \quad &\frac{1}{|I_{\text{tumor}^1}|} |\{i \in I_{\text{tumor}^1} : d_i \geq 1,2D^{\text{tumor}^1}\}| \leq 0,02, \\
 B,2 \quad &\frac{1}{|I_{\text{tumor}^2}|} |\{i \in I_{\text{tumor}^2} : d_i \geq 1,2D^{\text{tumor}^2}\}| \leq 0,02, \\
 B,3 \quad &\frac{1}{|I_{\text{tumor}^3}|} |\{i \in I_{\text{tumor}^3} : d_i \geq 1,2D^{\text{tumor}^3}\}| \leq 0,02, \\
 C,1 \quad &d_i \leq 50\text{Gy}, \forall i : i \in I_{\text{spinal_cord}}, \\
 C,2 \quad &d_i \leq 60\text{Gy}, \forall i : i \in I_{\text{brainstem}}, \\
 C,3 \quad &d_i \leq 70\text{Gy}, \forall i : i \in I_{\text{jaw}}, \\
 E. \quad &0 \leq x_j \leq 1, j = 1, 2, \dots, N.
 \end{aligned} \tag{1}$$

La restricción (A.1) declara que la fracción de los vóxeles en la primera zona tumoral con dosis mayor o igual al 80 % de la dosis prescrita debe ser mayor o igual a 0.98. La restricción (B.1) declara que la fracción de los vóxeles en la primera zona tumoral con dosis mayor o igual al 120 % de la dosis prescrita debe ser menor o igual a 0.02. Las restricciones (A.2), (B.2) y (A.3), (B.3) describen lo mismo para las otras zonas tumorales. Las restricciones (C.1)-(C.3) describen la dosis máxima para los vóxeles de los órganos de riesgo. N es el número de beamlets que podemos controlar.

2.3. Aceleración de las multiplicaciones matriz dispersa vector en GPU

En IMRT, se suelen utilizar p , $p > 1$ haces de radiación, llamados *beams*. En el modelo de deposición de dosis que utilizamos, por cada *beam* j , $j = 1, \dots, p$, se obtiene una matriz de deposición de dosis D^j , por lo tanto $D = D^1 \dots D^p$.

Para calcular $d = Dx$ hemos considerado tres esquemas:

- Esquema 1: Descomposición por subconjuntos de columnas, es decir, se calcula independientemente $D^j x^j$ (dosis depositada por el *beam* j) y se suman todos los vectores resultantes, donde x^j es el vector de *beamlets* del *beam* j y $x = (x^1, \dots, x^p)$.
- Esquema 2: Descomposición por subconjuntos de vóxeles, calculando independientemente $\bar{D}^j x$, donde \bar{D}^j es un subconjunto de filas de D . Este esquema requiere menos accesos de memoria que el Esquema 1, por lo que se espera que sea más rápido.
- Esquema 3: Es bien conocido que las operaciones matriz \times vector (nivel 2 de BLAS) tienen peor rendimiento que las operaciones matriz \times matriz (nivel 3 de BLAS) [3]. Si nos encontramos en un caso en el que se requiera calcular diferentes vectores x para diferentes dosis d podemos usar este esquema, en el que realizamos operaciones matriz \times matriz (SpMM).

La Figura 1 da una ilustración gráfica de los cálculos realizados por los tres esquemas descritos.

2.4. Resultados

Para verificar el grado en el que los esquemas considerados pueden acelerar el algoritmo de optimización (en este caso, un algoritmo evolutivo) hemos implementado cuatro versiones de GENOCOP III. En todas ellas, hemos utilizado el modelo descrito en la Sección 2.2, únicamente modificando la forma en la que realizamos los cálculos de Dx .

La primera implementación es una versión CPU con la librería CSparse [1] y el Esquema 1.

Las otras tres implementaciones son versiones GPU con FastSparse [2], una librería desarrollada en la Universidad de Almería que trabaja con matrices dispersas en formato ELLR-T [8,9]. En estas implementaciones probamos los tres esquemas descritos.

En todos los casos, la matriz de deposición de dosis D tiene 25298 columnas y 145973 filas. Las matrices D^j que la forman tienen, respectivamente, 3589, 2928, 3874, 3888, 2996, 3623, 4400 columnas.

Las cuatro implementaciones han sido probadas en dos plataformas de cómputo, descritas en la Tabla 1. La Tabla 2 contiene las especificaciones de las GPUs utilizadas.

¹ <http://faculty.cse.tamu.edu/davis/suitesparse.html>

² <https://sites.google.com/site/mcfastsparse/>

Optimización de Planes de Radioterapia en Paralelo con GENOCOP III en GPU

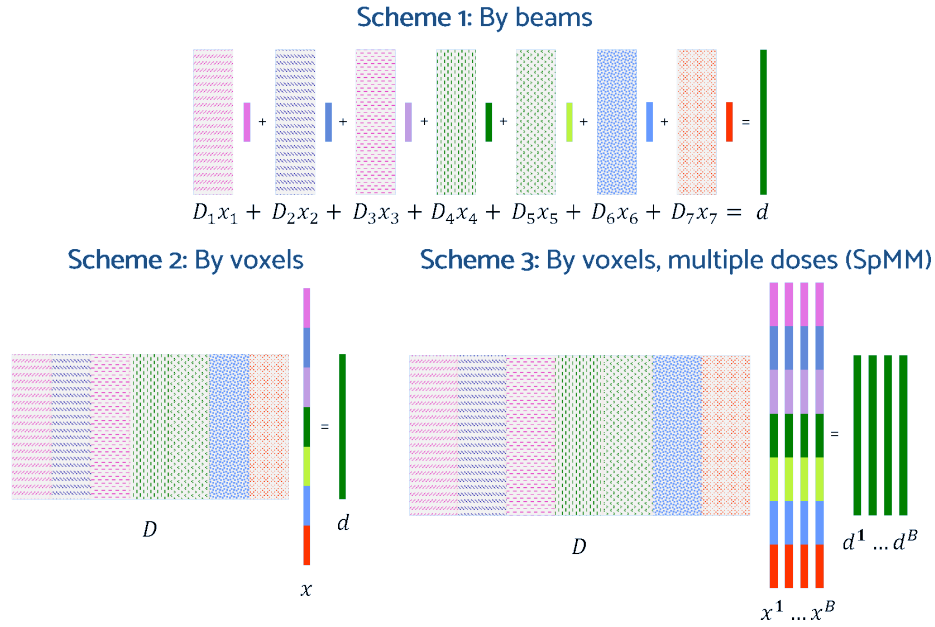

Figura 1. Los tres esquemas descritos para el cálculo de dosis en IMRT.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las dos plataformas de prueba.

	Plataforma \mathcal{F}_1	Plataforma \mathcal{F}_2
Modelo	Bullx R424-E3	Bullx R421-E4
CPU	2 x Intel Xeon E5-2650 (8c)	2 x Intel Xeon E5-2620 v3 (6c)
GPU	2 x NVIDIA Tesla M2090	2 x NVIDIA Tesla K80
RAM	64 GB DDR3 @ 1600 MHz	64 GB DDR4 @ 2133 MHz

Tabla 2. Especificaciones técnicas de las GPUs de las plataformas de prueba.

	K80	M2075
Microarquitectura	Kepler	Fermi
Rendimiento Máx. D.P. (TFLOPS)	2.91	0.50
Rendimiento Máx. S.P. (TFLOPS)	8.74	1.03
Memoria del dispositivo (GB)	2 × 12	5
Ancho de banda de la memoria (GB/s)	2 × 240	144
Multiprocesadores	2 × 13	14
Núcleos CUDA	2 × 2496	448
<i>Compute Capability</i>	3.7	2.0

Optimización de Planes de Radioterapia en Paralelo con GENOCOP III en GPU

La Tabla 3 muestra el tiempo de ejecución de las cuatro implementaciones del algoritmo GENOCOP III. En cada prueba se han utilizado 50 individuos por población y 2000 generaciones. Los resultados presentados en esta tabla muestran que el uso de GPUs acelera hasta en 15 veces la ejecución del algoritmo, en comparación con la versión secuencial. Entre las implementaciones GPU, observamos que el Esquema 3 es casi cuatro veces más rápido que el Esquema 1 en ambas plataformas. Atribuimos este resultado a la reducción de accesos de memoria, incremento de paralelismo y uso más eficiente de las GPUs que realiza el Esquema 3.

Tabla 3. Tiempo de ejecución (minutos) y Factor de Aceleración del algoritmo GENOCOP III completo utilizando las cuatro estrategias descritas para las dos plataformas de prueba.

	Tiempo (minutos)		Aceleración	
	\mathcal{F}_1	\mathcal{F}_2	\mathcal{F}_1	\mathcal{F}_2
Esquema 1 Secuencial	101.1	59.0	1.0×	1.0×
Esquema GPU 1	25.7	14.5	3.9×	4.1×
Esquema GPU 2	15.1	8.9	6.7×	6.6×
Esquema GPU 3	7.0	3.8	14.4×	15.5×

3. Conclusiones

En este trabajo mostramos que el uso de GPUs para la realización de multiplicaciones matriz dispersa \times vector en aplicaciones de planificación de radioterapia proporciona considerables mejoras de rendimiento.

Aunque en este trabajo hemos utilizado un algoritmo genético, los alentadores resultados obtenidos dan expectativas de mejoras similares en otro tipo de algoritmos que puedan garantizar la optimalidad de las planificaciones. Este es el tema en el que nos estamos centrando en este momento.

Por último, cabe destacar que las cuatro implementaciones estudiadas proporcionaron, tras 2000 generaciones, soluciones dentro del rango clínicamente aceptable para el modelo de planificación descrito.

Optimización de Planes de Radioterapia en Paralelo con GENOCOP III en GPU

Referencias

1. Breedveld, S., van den Berg, B., Heijmen, B.: An interior-point implementation developed and tuned for radiation therapy treatment planning. *Computational Optimization and Applications* **68**(2), 209–242 (nov 2017). <https://doi.org/10.1007/s10589-017-9919-4>
2. Breedveld, S., Craft, D., van Haveren, R., Heijmen, B.: Multi-criteria optimization and decision-making in radiotherapy (aug 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.019>
3. Dongarra, J.: *Numerical Linear Algebra for High-performance Computers*. SIAM (1998)
4. Fu, A., Ungun, B., Xing, L., Boyd, S.: A convex optimization approach to radiation treatment planning with dose constraints. *Optimization and Engineering* **20**(1), 277–300 (mar 2019). <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9409-2>, <http://link.springer.com/10.1007/s11081-018-9409-2>
5. Lan, Y., Li, C., Ren, H., Zhang, Y., Min, Z.: Fluence map optimization (FMO) with dose-volume constraints in IMRT using the geometric distance sorting method. *Physics in Medicine and Biology* **57**(20), 6407–6428 (2012). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/57/20/6407>
6. Michalewicz, Z., Fogel, D.B.: *How to solve it: modern heuristics*. Springer Science & Business Media (2005)
7. Michalewicz, Z., Nazhiyath, G.: Genocop iii: A co-evolutionary algorithm for numerical optimization problems with nonlinear constraints. *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation* **2**, 647–651 (1995)
8. Ortega, G., Vazquez, F., Garcia, I., Garzon, E.M.: Fastspmm: An efficient library for sparse matrix matrix product on gpus. *The Computer Journal* **57**(7), 968–979 (2014)
9. 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)

Integración de modelos como servicio (GMaaS) en iVeg, plataforma IoT para la agricultura intensiva protegida

Manuel Muñoz Rodríguez

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

Resumen El siguiente artículo describen los avances obtenidos durante el año 2020/2021 relacionados con la temática de la tesis. Hasta ahora se han desarrollado un conjunto de servicios y herramientas para la ayuda e integración de sistemas IoT aplicados a la agricultura de forma independiente. Este último año se centró en realizar la integración de estos servicios en una única plataforma web, la cual permite al usuario poder gestionar un conjunto de invernaderos desde una única herramienta. Una de las grandes novedades de la herramienta es la inclusión de los modelos como servicios (GMaaS) nuevo término desarrollado durante la tesis. Este servicio permite al usuario por medio de una interfaz web poder realizar uso de los Modelos DSS los cuales aportan un valor a los datos recogidos por los sensores. Entre las variables disponibles de GMaaS se encuentra el crecimiento del cultivo, variables climáticas interiores futuras y requisitos de nitrógeno. Además, se han realizado contribuciones de gran impacto para el desarrollo de la tesis en revistas de alto impacto y de divulgación.

Keywords: IoT · DSS · GMaaS.

1. Introducción

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

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

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

Title Suppressed Due to Excessive length

obtener la información de un único invernadero y además evitando la interconexión entre servicios, lo cual sería un punto fuerte a la hora de complementar las carencias de un sistema con otro.

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

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

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

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

Title Suppressed Due to Excessive length

2. Objetivos

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

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

3. Avances

Este apartado resume los avances en el desarrollo de la tesis en el año 2020/2021. Se han realizado aportes y contribuciones en algunos de los objetivos mencionados anteriormente, los cuales serán descritos a continuación.

- *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. 1) desarrollados para tal fin. IVEG (ver Fig. 2) es la aplicación desarrollada para la gestión e integración de estos servicios. Este artículo fue publicado en una de las revistas más prestigiosas de IEEE IoT [12], con un índice de impacto de 9.9 (Q1).

Title Suppressed Due to Excessive length

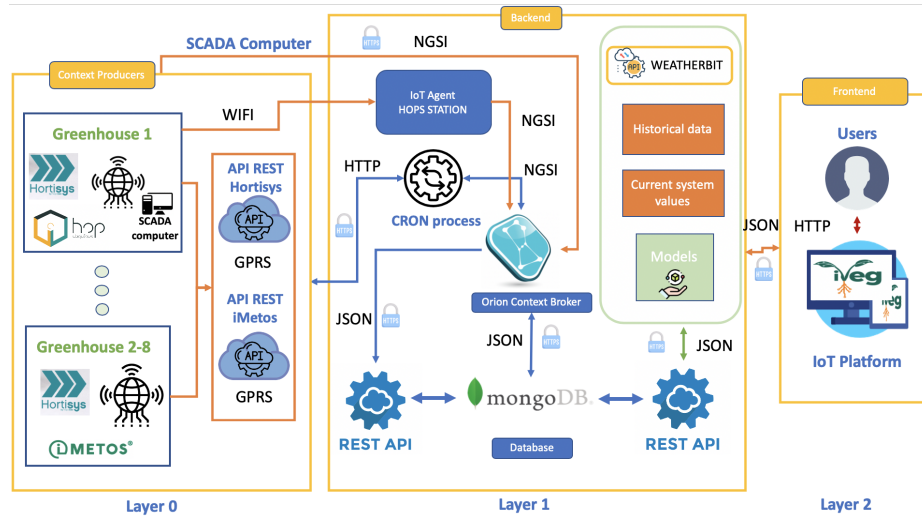


Figura 1. Arquitectura del sistema GaaS

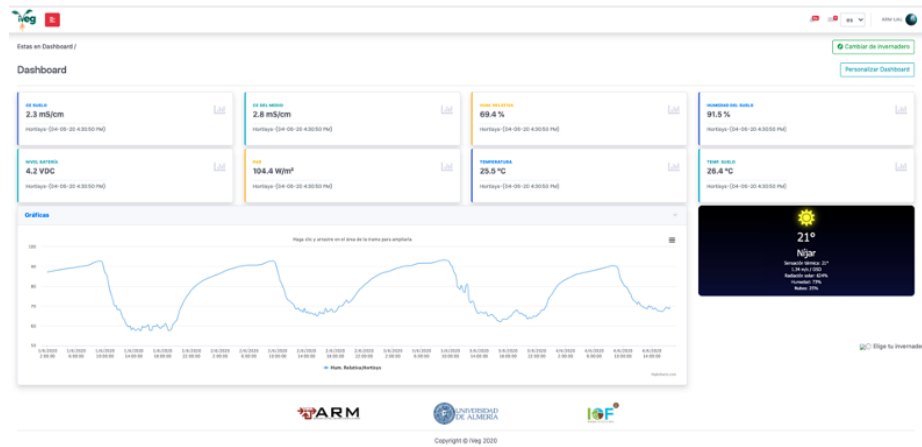


Figura 2. Dashboard iVeg

Title Suppressed Due to Excessive length

- A raíz del artículo *An IoT Architecture for Water Resource Management in Agroindustrial Environments: A Case Study in Almería (Spain)* publicado en 2020 en la revista *Sensors* [11] hemos recibido una certificación (ver Fig. 3) como uno de los artículo seleccionados por los editores jefes de la misma como recomendado para los lectores, que destacan algunas de las mejores investigaciones actuales publicadas en *Sensors*.



Figura 3. Certificado de artículo seleccionado por los editores

- 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 (ver Fig. 4). 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.

Title Suppressed Due to Excessive length



Por: **Manuel Muñoz-Rodríguez¹**, **Jorge A. Sánchez-Molina¹**, **Manuel Torres¹**, **Manuel Berenguel¹**, **Cynthia Giagnocavo²**
¹CIESOL-ceiA3, Departamento de Informática, Universidad de Almería, Ctra. Sacramento, s/n, La Cañada de San Urbano, 04120, Almería, España, mmr411@ual.es, jorgesanchez@ual.es, mtorres@ual.es, beren@ual.es
²Cátedra Coexphal-UAL de Horticultura, Estudios Cooperativos y Desarrollo Sostenible, Universidad de Almería, España, cgiagnocavo@ual.es

Com a introdução da IoT (Internet das coisas) as explorações agrícolas sofreram inúmeras mudanças, gerando um grande volume de dados. A PA (agricultura de precisão) evoluiu, transitando da comunicação M2M (máquina a máquina) para uma integração total baseada na IoT entre o mundo físico e o digital. Neste trabalho apresenta-se um sistema IoT baseado em arquitetura de cloud, visando gerir e transformar os dados para o standard de Fiware NGSI, computação na nuvem e criação de uma plataforma IoT para monitorização e apoio à tomada de decisões. Por outro lado, apresentam-se as vantagens e inconvenientes do uso de estações comerciais em estufas na região do Mediterrâneo.

Na atualidade a agricultura deve preparar-se para enfrentar uma série de desafios que alteram o seu posicionamento face ao conceito tradicional (Shamshiri et al. 2018). A digitalização da agricultura pode ajudar nesta tarefa, apresentando um conjunto de ferramentas que permitem, através de sensores, otimizar a gestão dos recursos, aumentar a produção e melhorar a sustentabilidade do sistema (Zamora-Izquierdo et al. 2019). Por outro lado, destacam-se os benefícios económicos deste tipo de agricultura, graças à poupança que é esperada pela redução no consumo dos recursos, como a água ou a energia, e um aumento do rendimento devido ao aumento da produção, graças a um maior controlo das variáveis que mais influenciam o desenvolvimento da cultura (temperatura, humi-

dade, radiação, CO₂ e fertirrigação). A digitalização baseia-se em tecnologias TIC de comunicação, dados obtidos por sistemas de navegação por satélite, sensores e imagens aéreas das culturas, sistemas de Informação Geográfica (SIG), sensores sem fios (WSN), dados do caderno de campo, amostras de solo e análises laboratoriais, controlo de produtos fitofarmacêuticos, entre outros (Adamchuk et al. 2004). Apesar de todo este desenvolvimento e potencialidades, as explorações agrícolas estão, no entanto, pouco tecnificadas e as que incorporam esta evolução, usando as tecnologias digitais no processo produtivo, têm que enfrentar diversos problemas inerentes à maioria das soluções do mercado: sistemas de aquisição de dados fechados, bases de da-

Figura 4. Revista de divulgação Portuguesa

Title Suppressed Due to Excessive length

Este año se ha realizado la contribución más importante para la tesis en una de las revistas más prestigiosas de IEEE IoT [12] con un índice de impacto de 9.9 (Q1) integrando los diferentes servicios desarrollados durante la tesis es una herramienta web llamada iVeg. Dicha herramienta se encuentra desplegada en producción y en uso por 8 agricultores de la provincia de Almería. Además, se han recibido dos premios por contribuciones relevantes en el año 2020, un certificado como artículo relevante seleccionado por los editores de la revista *Sensors* [11] y una publicación en una revista de divulgación Portuguesa.

Referencias

1. J. Liu and J. P. Tao, “Research and application of agricultural greenhouse intelligence platform based on IoT (Internet of Things) and cloud computing,” *Int. J. Simul. - Syst., Science and Tech.*, vol. 17, no. 5, p. 8.1-8.5, 2016.
2. Duan, Y. et al. (2015) ‘Everything as a Service (XaaS) on the Cloud: Origins, Current and Future Trends’, in 2015 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing. IEEE, pp. 621–628. doi: 10.1109/CLOUD.2015.88.
3. Liu, J. and Tao, J. P. (2016) ‘Research and application of agricultural greenhouse intelligence platform based on IoT (Internet of Things) and cloud computing’, *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*. UK Simulation Society, 17(5). doi: 10.2013/IJSSST.A.17.05.08.
4. Gubbi, J. et al. (2013) ‘Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions’, *Future Generation Computer Systems*, 29, pp. 1645–1660. doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
5. Kamilaris, A., Kartakoullis, A. and Prenafeta-Boldú, F. X. (2017) ‘A review on the practice of big data analysis in agriculture’, *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier, 143, pp. 23–37. doi: 10.1016/J.COMPAG.2017.09.037.
6. Shamshiri, R. et al. (2018) ‘Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture’, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), pp. 1–22. doi: 10.25165/IJABE.V11I1.3210.
7. Kamilaris, A. and Prenafeta-Boldú, F. X. (2018) ‘Deep learning in agriculture: A survey’, *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier, 147, pp. 70–90. doi: 10.1016/J.COMPAG.2018.02.016.
8. Rupnik, R. et al. (2019) ‘AgroDSS: A decision support system for agriculture and farming’, *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier B.V., 161, pp. 260–271. doi: 10.1016/j.compag.2018.04.001.
9. Rodríguez, F. et al. (2014) Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth. doi: 10.1007/978-3-319-11134-6.
10. Muñoz, M. et al. (2019) ‘Greenhouse Models as a Service (GMaaS) for Simulation and Control’, *IFAC-PapersOnLine*, 52(30), pp. 190–195. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.520.
11. Muñoz, M. et al. (2020) ‘An IoT Architecture for Water Resource Management in Agroindustrial Environments: A Case Study in Almería (Spain)’, *Sensors*. MDPI AG, 20(3), p. 596. doi: 10.3390/s20030596.
12. 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.

Algoritmo de clasificación de cultivos utilizando imágenes multi-espectrales y software eCognition

Luis Ortega López¹

¹Universidad de Almería,
Departamento de Informática, Almería,
España.
lol.teleco@gmail.com

Resumen. La línea de investigación se basa en el desarrollo de un algoritmo multi-espectral de clasificación de cultivos utilizando el software eCognition. Este algoritmo es alimentado por imágenes preprocesadas obtenidas a través de una cámara multi-espectral (Parrot Sequoia). El objetivo de este año ha sido el poder discriminar el cultivo de interés (plantas de girasol), la maleza, y el suelo en una imagen real de campo, en vista a poder calcular diversos parámetros que puedan ser de interés para la toma de decisiones en cultivos, como pueden ser: la efectividad de herbicidas o el grado de crecimiento de los cultivos o de la maleza.

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

1 Introducción

El uso de la teledetección ha proporcionado a la agricultura de precisión varias herramientas de diagnóstico que pueden alertar a la comunidad agrícola de posibles problemas antes de que se extiendan y tengan un impacto negativo en la productividad de los cultivos [1]. En los últimos años se han producido varios avances en el desarrollo de cámaras multiespectrales, gestión y análisis de datos relacionados con la agricultura de precisión. Sin embargo, en lo que respecta a la eficacia de los herbicidas en un cultivo, los métodos cualitativos, también llamados de evaluación visual, siguen siendo los más utilizados a pesar de su larga lista de limitaciones [2]. Una de las líneas de esta tesis era la de proporcionar un método cuantitativo capaz de medir el porcentaje de plantas de interés, así como de malas hierbas en un cultivo y, de este modo, probar la eficacia de los herbicidas.

Para ello, se planteó el utilizar la cámara multiespectral Parrot Sequoia [3] como herramienta para la toma de imágenes. Debido a que las imágenes de los distintos sensores presentaban una serie de aberraciones, en etapas anteriores de la tesis, fue necesaria la corrección de la imagen con la intención de co-registrar una imagen multiespectral que sería utilizada para la segmentación y clasificación de la planta de interés y de la maleza.

Con respecto al proceso de calibración, de las lentes, corrección de las imágenes y creación de imágenes multiespectrales, aunque fueron realizados en fases previas de la tesis, nos gustaría resaltar que se utilizó el Toolbox de calibración de Matlab para la calibración de cada una de las lentes. Se llevó a cabo un proceso de calibración y corrección utilizando un conjunto de imágenes de dameros y un proceso iterativo. Dicho proceso obtuvo buenos resultados ya que se pudo corregir el error de la distorsión en todos los espectros de interés con un error¹⁰⁴ medio inferior a 0.3 píxeles. De este modo,

Algoritmo de clasificación de cultivos utilizando imágenes multi-espectrales y software eCognition

se pudo crear una imagen multiespectral co-registrada para cada una de las fotos tomadas con la cámara Sequoia.

En relación con la segmentación y clasificación de las imágenes multiespectrales co-registradas, puesto que los algoritmos de segmentación más utilizados no han obtenido buenos resultados a la hora de segmentar las imágenes multiespectrales (por ejemplo, Threshold [4]), durante el pasado año se diseñó un algoritmo a medida utilizando el software eCognition [5], para el que el grupo de investigación de la Universidad de Almería con el que colaboramos (Tecnología de la Producción Agraria en Zonas Semiáridas (AGR199)), tiene licencia. Dicho algoritmo se ha basado en un método de segmentación basado en el crecimiento de regiones [6,7] que tiene en cuenta la información que nos arrojan las distintas bandas de la imagen multiespectral (por ejemplo, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)), y que va realizando la clasificación de los clústeres de píxeles obtenidos en las clases “suelo”, “maleza” y “girasol”. Con ello, se ha podido segmentar de una forma bastante precisa, qué porcentaje de la imagen se corresponde con la planta de girasol (que era la planta objeto de estudio) y qué porcentaje con malas hierbas.

2 Trabajo desarrollado

El trabajo desarrollado se ha realizado utilizando el entorno eCognition, donde se ha estudiado la viabilidad del algoritmo y la aportación de los diferentes filtros y procesados de la imagen multi-espectral.

Partimos de una imagen multi-espectral generada previamente (ver Fig. 1). Esta imagen consiste en 4 bandas diferenciadas de los espectros RED, NIR, GRE y REG. Para una visualización más intuitiva, se representan tres de las bandas en un formato RBG, con las bandas RED, NIR y GRE respectivamente.

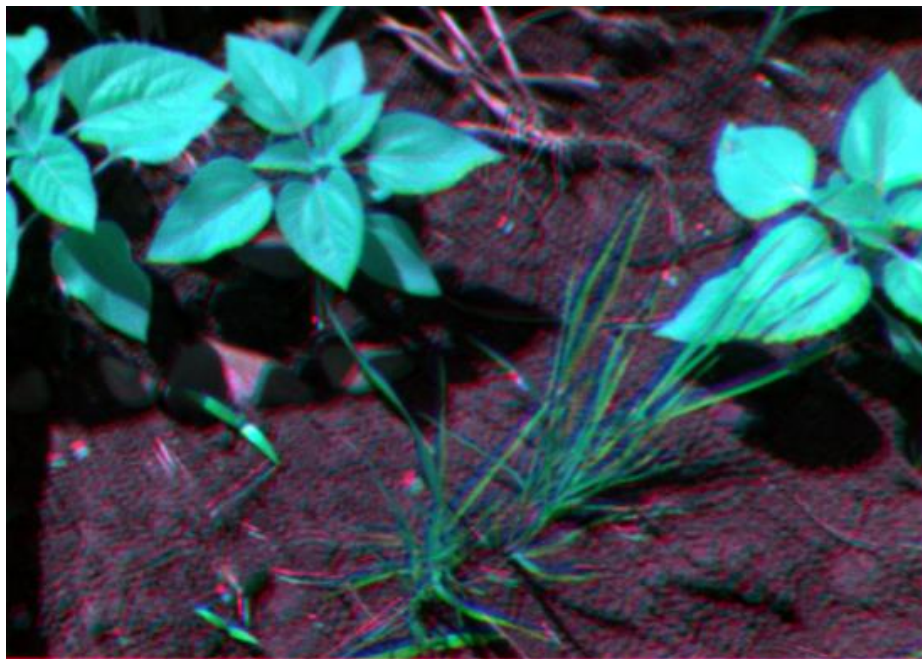


Fig. 1. Imagen representativa de las bandas espectrales estudiadas en un formato RGB.

El algoritmo realizado se detalla a continuación:

1. En primer lugar, se utiliza el parámetro NDVI y cada una de las bandas para discriminar la firma espectral característica de la materia vegetal. Esta segmentación

Algoritmo de clasificación de cultivos utilizando imágenes multi-espectrales y software eCognition

se realiza en clústeres pequeños de unos 10 píxeles para maximizar la fiabilidad de los contornos de la materia vegetal (ver Fig. 2).

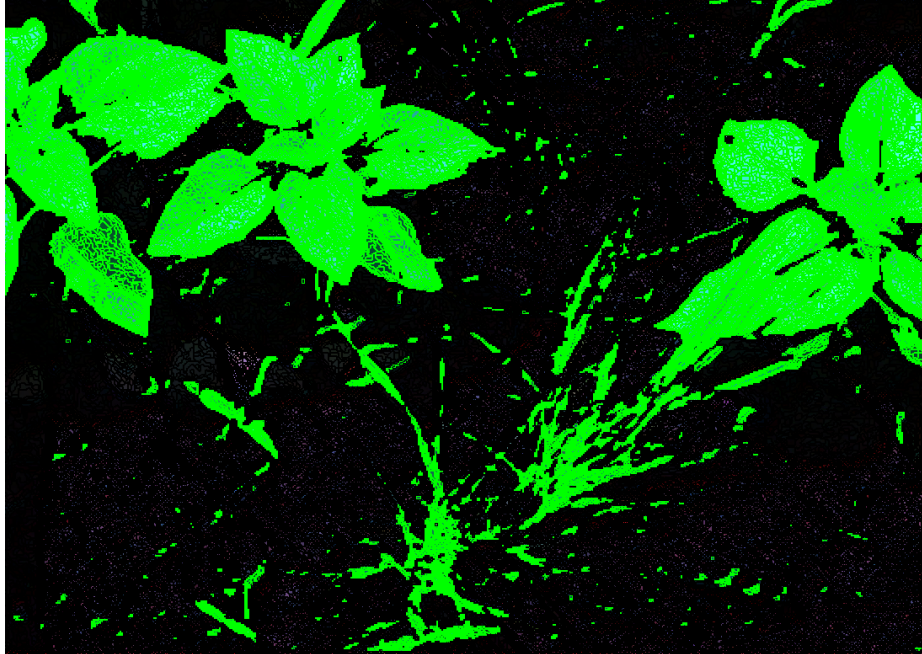


Fig. 2. Resultado del primer paso del algoritmo, discriminación de la materia vegetal en pequeños clusters.

2. La materia vegetal se agrupa en nodos adyacentes, de tal manera que toda la materia vegetal adyacente forme parte del mismo nodo (ver Fig. 3).

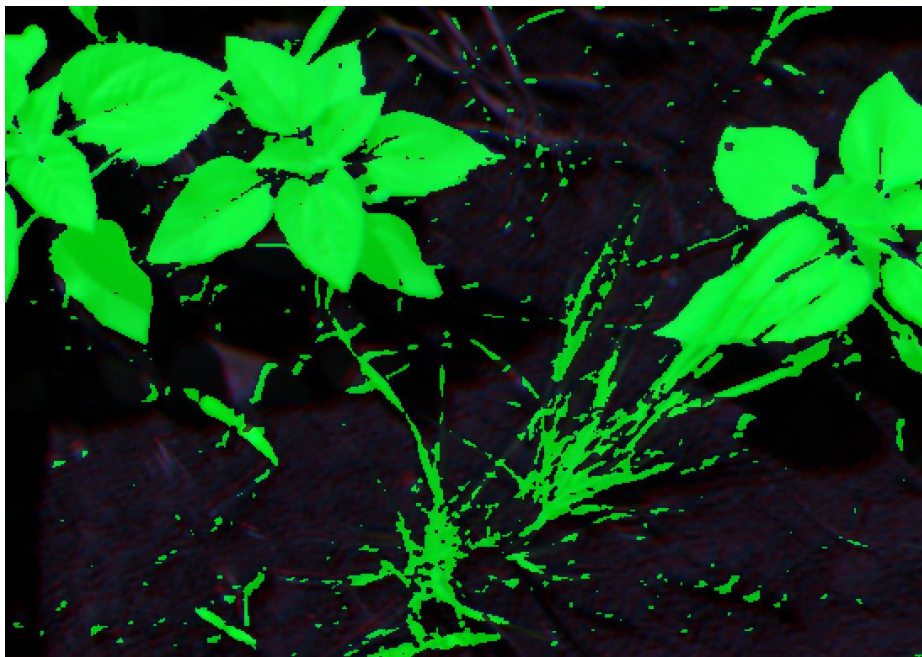


Fig. 3. Agrupación de la materia vegetal en nodos adyacentes.

3. Los nodos de un tamaño diminuto (menor a 30 píxeles) se descartan como suelo, ya que se trata de falsos positivos (ver Fig. 4). Este tipo de falsos positivos es frecuente debido a un preprocesado de la imagen deficiente, o al propio ruido de las cámaras.

Algoritmo de clasificación de cultivos utilizando imágenes multi-espectrales y software eCognition

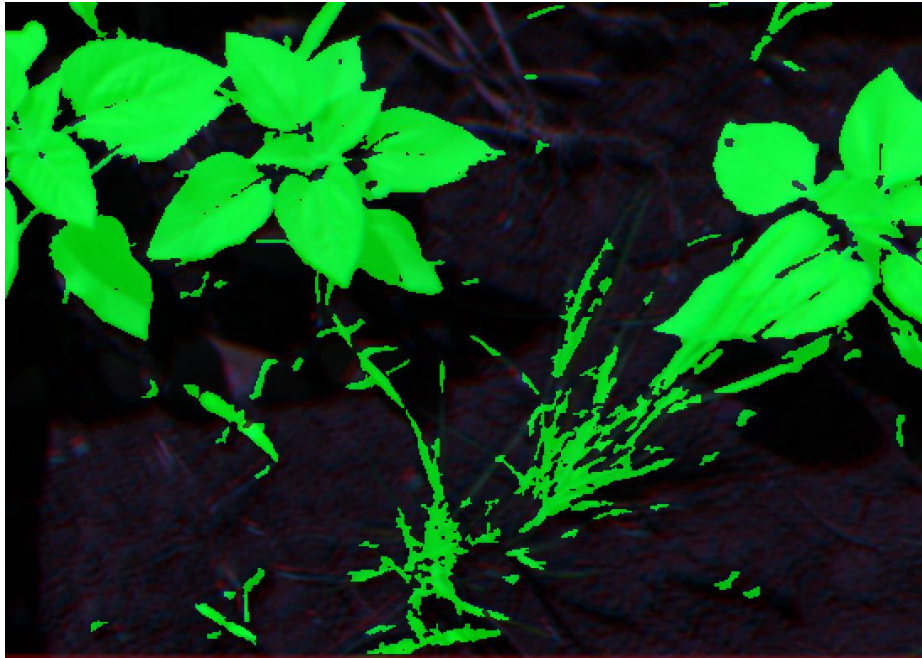


Fig. 4. Filtrado de nodos diminutos como falsos positivos.

4. La materia vegetal se segmenta mediante un algoritmo quadtree multi-espectral, buscando zonas cuadradas grandes que pertenezcan a la misma hoja (ver Fig. 5).

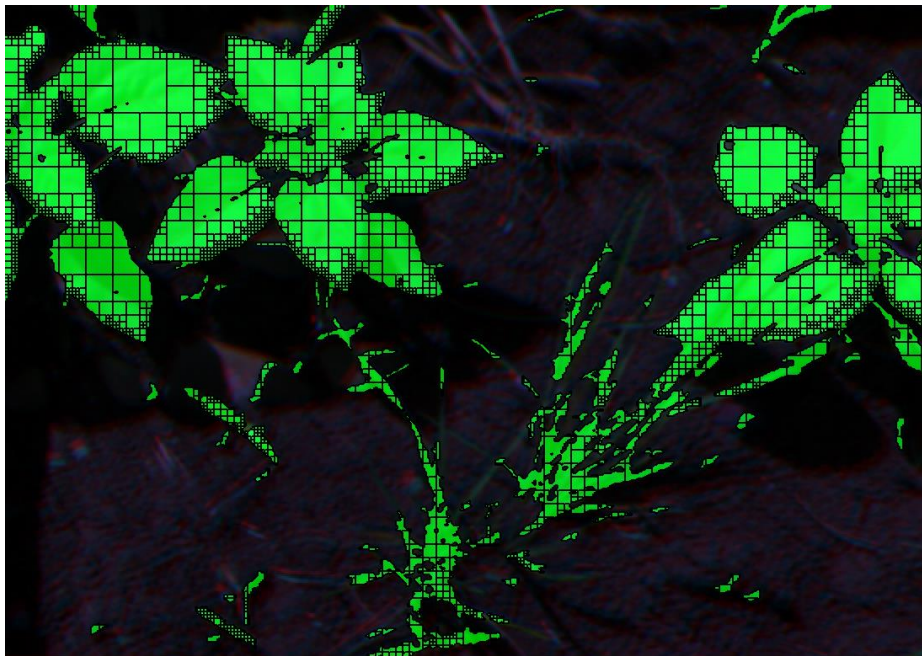


Fig. 5. Resultado del algoritmo multi-hiperespectral.

5. El siguiente paso consiste en señalar los clústeres obtenidos como girasol a aquellos que, por su tamaño, forma y nivel de luminosidad, son buenos candidatos de ser girasol. Se buscan cuadrados grandes, de forma casi perfecta y con un gran nivel de luminosidad en el espectro NIR. Estos clústeres en forma de cuadrado serán las semillas a partir de las cuales se hará un crecimiento en posteriores fases del algoritmo (ver Fig. 6).

Algoritmo de clasificación de cultivos utilizando imágenes multi-espectrales y software eCognition

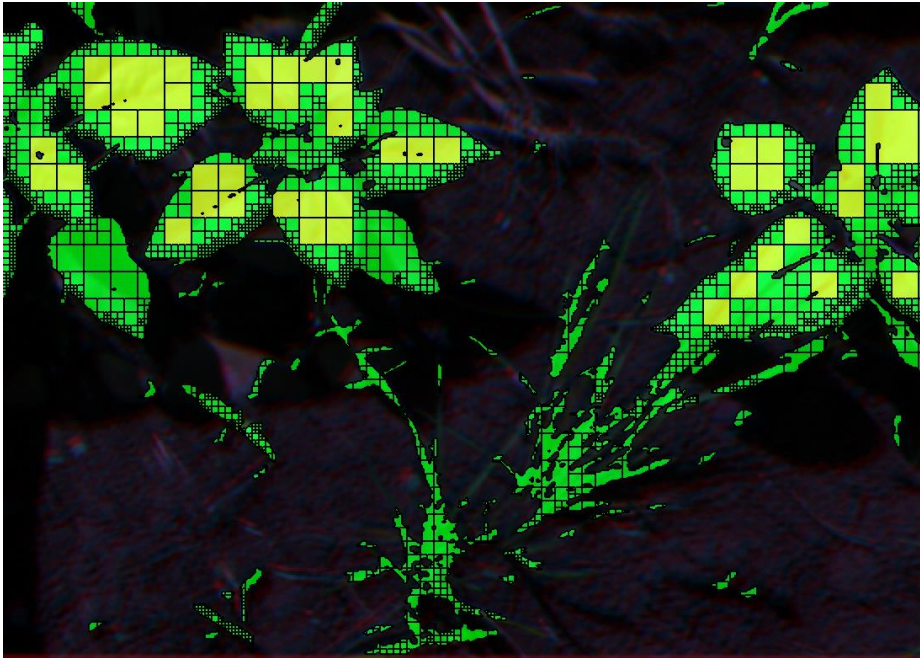


Fig. 6. Identificación de clústeres potencialmente girasol.

6. A continuación, procede una fase iterativa de tres iteraciones, donde los clústeres de girasol crecen a partir de los clústeres vecinos de materia vegetal en función de su proximidad, forma y valor NVDI (ver Fig. 7).

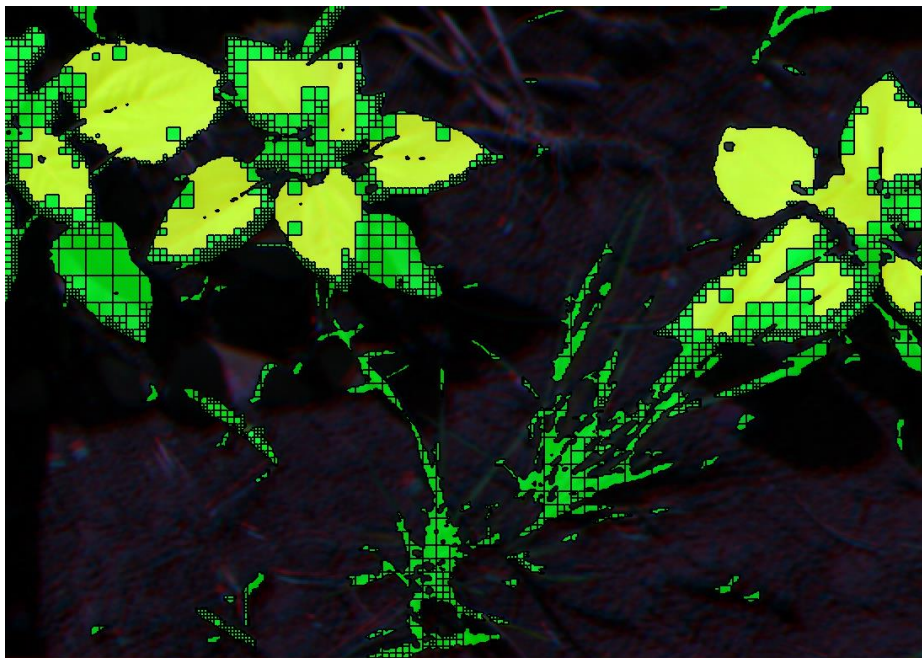


Fig. 7. Crecimiento de los clústeres de girasol, fase 1, primera iteración.

7. La iteración continúa absorbiendo los clústeres de materia vegetal encerrados y con perímetro común en más de un 30% al girasol. El resto de la materia vegetal se clasifica como maleza y se agrupa (ver Fig. 8).

Algoritmo de clasificación de cultivos utilizando imágenes multi-espectrales y software eCognition

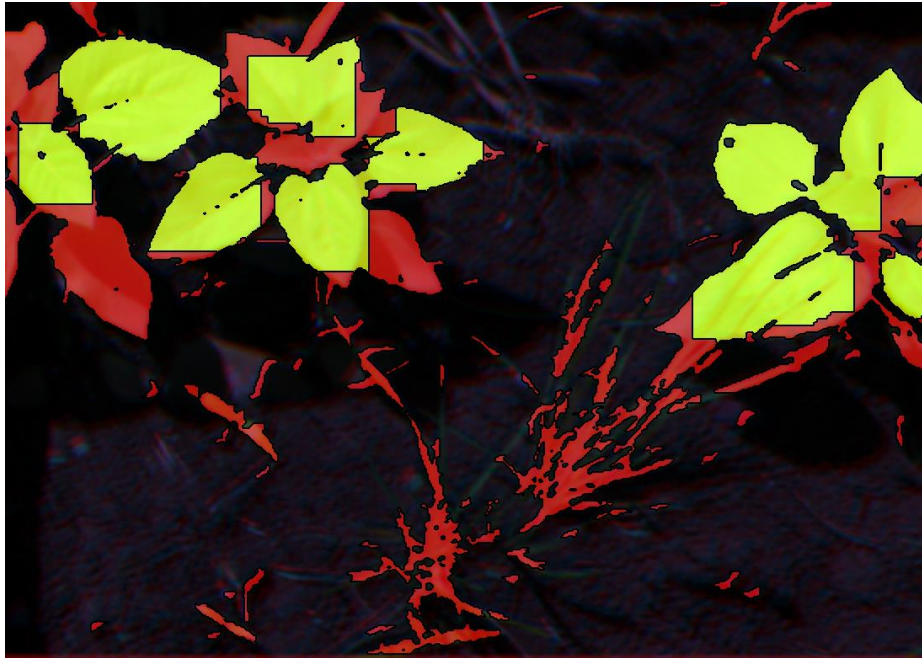


Fig. 8. Crecimiento de los clústeres de girasol, fase 2, primera iteración.

8. La fase final de la iteración consiste en volver a aplicar el algoritmo quadtree multi-espectral a la maleza restante, para obtener mejores candidatos a integrar en los nodos de girasol (ver Fig. 9).

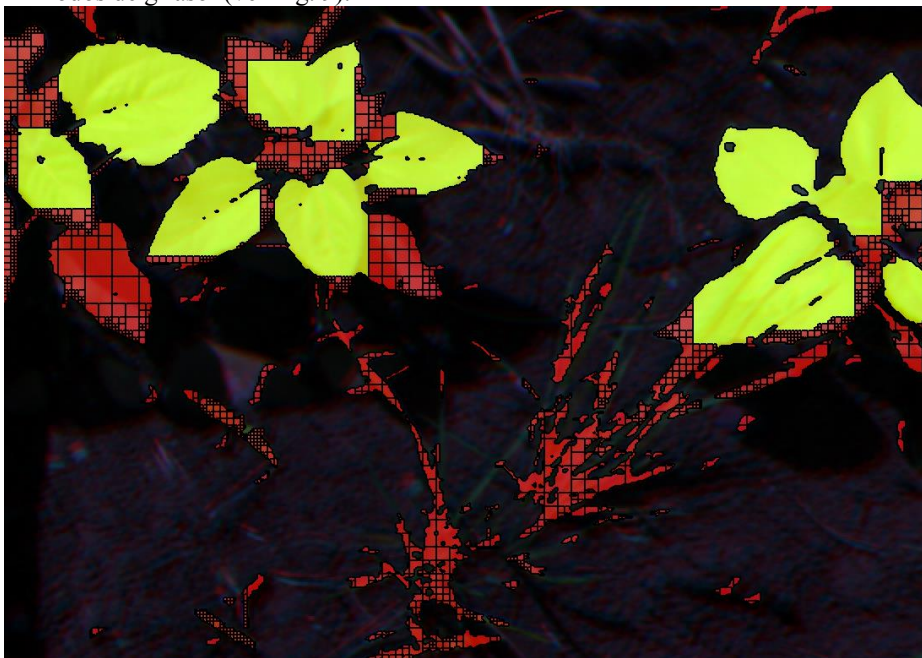


Fig. 9. Crecimiento de los clústeres de girasol, fase 3, fin de la primera iteración.

9. La fase iterativa continua dos veces más, en la que los nodos de girasol siguen creciendo. Finalmente, la maleza resultante se agrupa (ver Fig. 10).

Algoritmo de clasificación de cultivos utilizando imágenes multi-espectrales y software eCognition

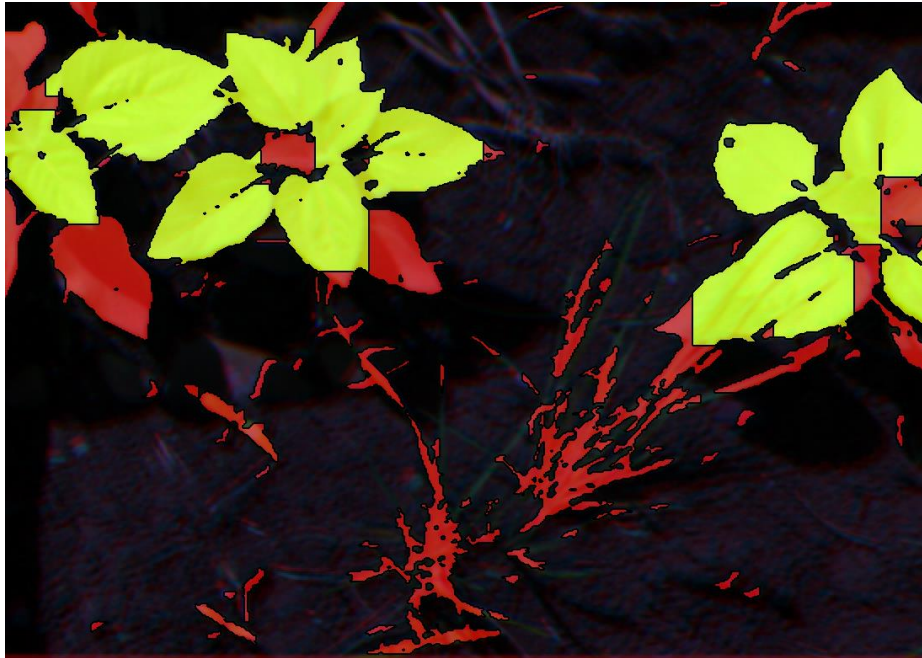


Fig. 10. Crecimiento de los clústeres de girasol, fase 3, fin de la tercera iteración.

10. La parte final del algoritmo realiza un crecimiento de un único clúster con requisitos de perímetro común muy bajos (del orden del 5%), para tratar de obtener los últimos segmentos de girasol que el algoritmo no es capaz de obtener hasta este punto (ver Figura 11).

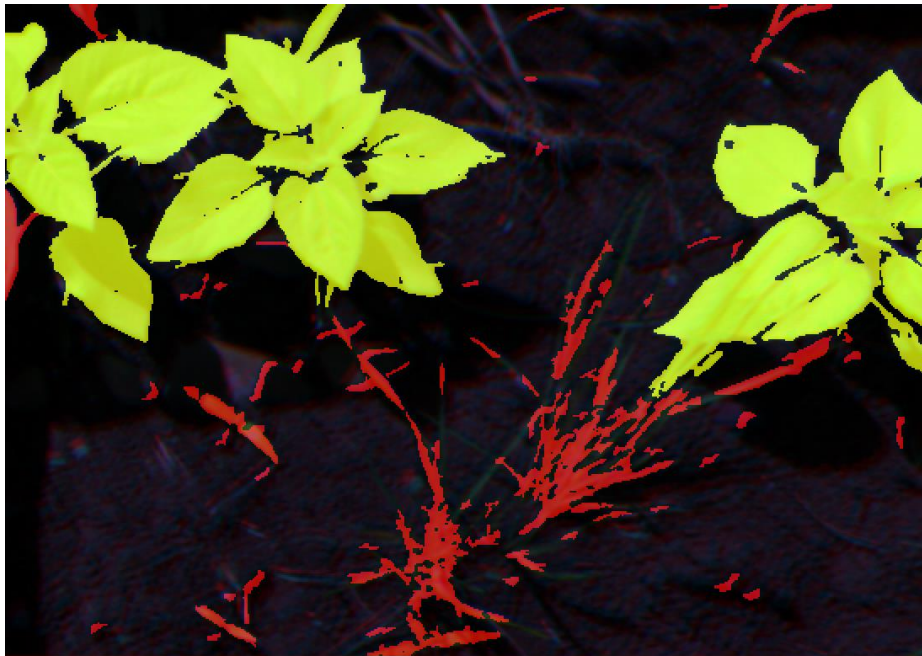


Fig. 11. Resultado de la ejecución completa del algoritmo para la imagen multiespectral tomada de muestra.

La imagen resultante del algoritmo se compara con su verdad terreno (que ha sido realizada manualmente), con la intención de ver el grado de similitud tanto en los píxeles de maleza como en los de planta principal.

Algoritmo de clasificación de cultivos utilizando imágenes multi-espectrales y software eCognition

2 Conclusiones y líneas futuras de investigación

Actualmente estamos trabajando en obtener todos los mapas de verdad de las imágenes multispectrales de entrada del algoritmo. Debido a que este proceso debe manualmente sin soporte automático y, por tanto, es un proceso bastante tedioso. Esto nos permitirá medir con fiabilidad el porcentaje de acierto que tenemos en el algoritmo, que estimamos superior al 85%.

Sin embargo, este tipo de algoritmos clásicos de segmentación presentan requisitos de personalización muy determinados para cada especie de planta de interés y maleza asociada, ya que sus características espectrales y geométricas pueden variar considerablemente.

Este trabajo nos ha resultado útil para valorar la herramienta eCognition y realizar un algoritmo de procesamiento de imágenes multi-espectrales basada en clústeres de píxeles, y no en píxeles aislados como suele ser habitual en los algoritmos de procesado de imagen.

Referencias

1. Khanal, S.; KC, K.; Fulton, J.P.; Shearer, S.; Ozkan, E. Remote Sensing in Agriculture—Accomplishments, Limitations, and Opportunities. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 3783. <https://doi.org/10.3390/rs12223783>.
2. Tasistro, A. Métodos para evaluar efectividad en el control de malezas, Rev. 444 Mex. La Cienc. La Maleza. Especial (2000) 25–35.
3. Descripción del producto Parrot Sequoia en la web del fabricante (Parrot): <https://www.parrot.com/es/shop/recambios-accesorios/otros-drones/sequoia>
4. Fix, E.; Hodges, J.L. (1989). (1951): An Important Contribution to Nonparametric Discriminant Analysis and Density Estimation: Commentary on Fix and Hodges. *International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique* **57** (3): 233-238. [doi:10.2307/1403796](https://doi.org/10.2307/1403796).
5. Descripción del producto eCognition en la web del fabricante (Trimble): <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/ecognition>
6. Pal, N. R. and Pal, S. K. "A Review on Image Segmentation Techniques", *Pattern Recognition*, vol. 26, no. 9, pp. 1277-1294, 1993.
7. Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. *Digital Image Processing*, 2nd Edition, Ed. Prentice Hall, 2002.

Optimización de comparadores cuánticos tolerantes a fallos para la binarización de imágenes

Francisco José Orts Gómez

Dpto. Informática, Universidad de Almería, ceiA3
Carretera Sacramento s/n, Almería, España
francisco.orts@ual.es

Abstract. El procesamiento cuántico de imágenes se centra en el uso de la computación cuántica en el campo del procesamiento digital de imágenes. En los últimos años, este tipo de procesamiento es del interés de la comunidad científica ya que las propiedades de la mecánica cuántica proporcionarían la potencia de cálculo necesaria para resolver operaciones con imágenes mucho más rápido que los ordenadores clásicos. La binarización es considerada como uno de los pasos más importantes en el procesamiento de imágenes. Esta operación consiste en convertir una imagen digital en una imagen en blanco y negro, de forma que se conserven las propiedades de la imagen. En este trabajo se propone un circuito cuántico para la binarización de imágenes basado en dos novedosos comparadores. Estos comparadores se centran en optimizar el número de puertas T necesarias para construirlos. El uso de puertas T es esencial para que los circuitos cuánticos contrarresten los efectos del ruido interno y externo. Sin embargo, estas puertas tienen un alto coste, y su lentitud también representa un cuello de botella en los circuitos. Los comparadores propuestos, en contraste con los actualmente disponibles, son la mejor opción cuando el ruido es un problema y su reducción es obligatoria.

Keywords: Computación cuántica · Binarización de imágenes · Comparador cuántico

1 Introducción

La computación cuántica ha surgido como una ciencia nueva y prometedora. Sin embargo, tiene el problema de resultarnos contraintuitiva, ya que su funcionamiento se basa en características de la mecánica cuántica tan poco comunes como el entrelazamiento y el paralelismo cuántico [10]. Hasta hace poco, el interés de los investigadores por la computación cuántica se centraba en los campos matemático y físico debido a la falta de computadores cuánticos reales y de simuladores cuánticos eficientes. Recientemente, empresas tales como IBM, D-Wave, y Google han construido computadores cuánticos reales y funcionales [15], haciéndolos accesibles a un público más amplio.

Hay diferentes paradigmas en computación cuántica. Por ejemplo, los llamados computadores cuánticos adiabáticos, como la máquina D-Wave, se centran en resolver problemas que pueden expresarse como minimización de energía [15]. Por otro lado, los ordenadores cuánticos topológicos trabajan con cuasipartículas bidimensionales para procesar información cuántica, lo que permite una mayor resiliencia frente a las perturbaciones [14]. Además, recientemente se han desarrollado varios simuladores cuánticos avanzados, por ejemplo, QuEST, ProjectQ y myQLM [3,5,16].

A pesar de que la tecnología cuántica es innovadora y avanza a un gran ritmo, existen aún muchos retos que deben resolverse antes de que la computación cuántica sea práctica. Una de sus principales limitaciones es que los computadores cuánticos son difíciles de programar porque sus modelos computacionales son muy diferentes de los clásicos. El modelo más conocido se basa en circuitos cuánticos, donde cada operación específica implica el diseño de circuitos cuánticos particulares. Debido a la escasez de recursos y a la fuerte sensibilidad de los computadores cuánticos al ruido, el diseño de los circuitos cuánticos debe optimizarse en términos de número de recursos y tolerancia a los fallos. Por lo tanto, una línea de investigación activa es el diseño óptimo de las operaciones cuánticas básicas involucradas en algoritmos complejos [11,12,13,17].

El procesamiento cuántico de imágenes (QIMP) es un tema interdisciplinario entre la computación cuántica y el procesamiento de imágenes. La combinación de la mecánica cuántica con el procesamiento de imágenes es un enfoque eficaz para mejorar la velocidad de procesamiento de imágenes [19]. Su principal funcionalidad es capturar, manipular y recuperar imágenes cuánticas mediante la computación cuántica [23]. Según la literatura, las técnicas QIMP podrían mejorar los algoritmos de procesamiento clásicos en términos de rendimiento, seguridad, y requisitos mínimos de almacenamiento [4,23]. Las ventajas de estas técnicas se han demostrado en un amplio número de aplicaciones como la clasificación de imágenes, segmentación, y filtrado [24].

Este trabajo se centra en la binarización cuántica de imágenes. La binarización es un paso crucial en muchas técnicas de procesamiento de imágenes. La binarización es un proceso sencillo de umbralización de la imagen en el que los píxeles con niveles de gris inferiores a un umbral determinado se clasifican en una clase, y todos los píxeles restantes en otra. Es bien sabido que la clave de un proceso de binarización es la comparación entre cada píxel y el valor del umbral. Por ello, este trabajo se centra en diseñar un circuito eficiente para comparar dos estados cuánticos e identificar si son iguales o, en caso contrario, cuál de ellos es el mayor [18].

Ya hay muchos métodos clásicos propuestos para la binarización de imágenes [8]. Sin embargo, el procesamiento cuántico de imágenes proporciona una oportunidad para un procesamiento de imágenes más rápido; por lo tanto, recientemente ha recibido cierta atención en la comunidad de investigación cuántica. Probablemente, el primer comparador cuántico propuesto para la binarización de imágenes se presenta en [1]. Se propuso un nuevo comparador de 8 bits en el contexto de la binarización en [21], y en [22] se optimizó reorganizando ciertas operaciones.

En [7] se diseñó una versión cuántica del método de selección de umbrales de Otsu.

En este trabajo, proponemos dos comparadores tolerantes a fallos centrados en la optimización del número de puertas T. Los circuitos cuánticos son muy sensibles al ruido externo e interno, por lo que la reducción del ruido y la tolerancia a fallos son dos de los objetivos más importantes en la computación cuántica. Las puertas T se utilizan para hacer posible el uso de códigos de corrección de errores para garantizar la tolerancia a fallos en circuitos cuánticos. Sin embargo, estas puertas son más caras que otras puertas en términos de coste y tiempo debido a , precisamente, su mayor tolerancia a los errores de ruido [9,25].

En el diseño de circuitos cuánticos, es muy relevante especificar las métricas utilizadas para evaluar la eficiencia de dichos circuitos. Para evaluar nuestros circuitos cuánticos propuestos y los del estado del arte, hemos considerado el número de puertas T que tiene un circuito (T-count), el número de puertas , es decir, el número de puertas T que deben ser computadas secuencialmente (T-depth), y el número de qubits auxiliares.

2 Diseño de un circuito cuántico de binarización de imágenes

Este trabajo se basa en el algoritmo de binarización descrito por Xia et al [21]. Dicho algoritmo supone que la imagen a binarizar está codificada en representación NEQR (Novel Enhanced Quantum Representation) [26]. En la representación NEQR, una imagen se representa según la siguiente ecuación:

$$|C_{YX}\rangle = \frac{1}{2^n} \sum_{Y=0}^{2^n-1} \sum_{X=0}^{2^n-1} |C_{YX}^{q-1} C_{YX}^{q-2} \dots C_{YX}^1 C_{YX}^0\rangle \otimes |YX\rangle \quad (1)$$

Donde $|C_{YX}^{q-1} C_{YX}^{q-2} \dots C_{YX}^1 C_{YX}^0\rangle$ codifica el valor del píxel (Y,X), n está relacionado con el tamaño de la imagen, y q define la gama de colores como 2^q . YX codifica la ubicación espacial del píxel.

El mencionado algoritmo de Xia et al. necesita dos valores externos para cada píxel de la imagen a binarizar: la codificación $I = C_{YX}^{q-1} C_{YX}^{q-2} \dots C_{YX}^1 C_{YX}^0$ del píxel, y un valor de umbral que se utiliza para decidir si el píxel debe ser blanco o negro. El algoritmo consta de dos pasos:

- La primera parte compara C_{YX} con el valor umbral b . No es necesario realizar una comparación completa, ya que sólo es necesario calcular si $C_{YX} < b$ o $C_{YX} \geq b$. Por lo tanto, se puede utilizar un medio comparador. Debe devolver $c = 1$ si $C_{YX} < b$, y 0 en caso contrario.
- La segunda parte cambia $C_{YX}^{q-1} C_{YX}^{q-2} \dots C_{YX}^1 C_{YX}^0$ a 0 si $c = 1$, o a 1 si $c = 0$. Es decir, el algoritmo establece el píxel como negro si su valor original es menor que el valor umbral, o lo establece como blanco si su valor original es mayor o igual que el valor umbral.

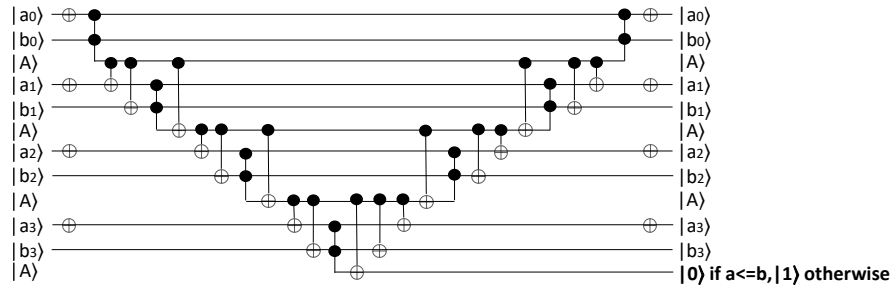


Fig. 1: Ejemplo del primer comparador propuesto, para el caso $n = 4$. Este comparador se centra en reducir el T-count.

Por un lado, la implementación de la segunda parte de este circuito implica varias puertas de intercambio de valores entre qubits. Dichas puertas ponen los qubits del píxel a 0 o 1 dependiendo del resultado de la comparación. La operación puede parecer sencilla, pero implica n entradas en estado $|0\rangle$ y n en estado $|1\rangle$. Estos estados se intercambian con el valor original del píxel en las condiciones descritas en el párrafo anterior. Además, y dado que no sabemos de antemano con qué grupo de entradas ($|0\rangle$ o $|1\rangle$) se intercambiarán los valores originales de los píxeles, podemos considerar por tanto que tenemos $2n$ salidas basura. Por otro lado, la implementación del medio comparador no es nada trivial [6,20,21]. Esta implementación se discute en la siguiente sección.

3 Comparadores cuánticos propuestos

Se han desarrollado dos comparadores como parte de este trabajo. El primero se centra en reducir el número de puertas (T-count), y el segundo comparador se centra en reducir el número secuencial de puertas T (T-depth). Utilizan la puerta lógica-AND temporal [2] para reducir el número de puertas T implicadas. Esta puerta realiza una operación AND de dos entradas (qubits), guardando el resultado en un qubit auxiliar. Es similar a la puerta de Toffoli, pero el T-count de la lógica-AND temporal es 4, y su T-depth es 2 (para la puerta Toffoli, estos valores son 7 y 3, respectivamente). Además, descomputar de la lógica-AND temporal no implica puertas T, mientras que la descomputación de la puerta Toffoli implica otra puerta Toffoli.

El primer comparador propuesto se muestra en la Fig. 1. Se basa en la metodología del sumador desarrollado por Gidney en 2018 [2], que es el mejor sumador en términos de T-count actualmente disponible [11]. La comparación entre dos cadenas de bits a y b se lleva a cabo realizando la operación $a - b$. Esta operación se puede realizar mediante un sumador, calculando $\bar{a} + b$. En realidad, sólo nos interesa el signo de la operación, de forma que podamos determinar que a es menor que b si el signo de $a - b$ es negativo, o que a es mayor (o igual) que b si el resultado es positivo. Por lo tanto, se pueden hacer varias simplificaciones para

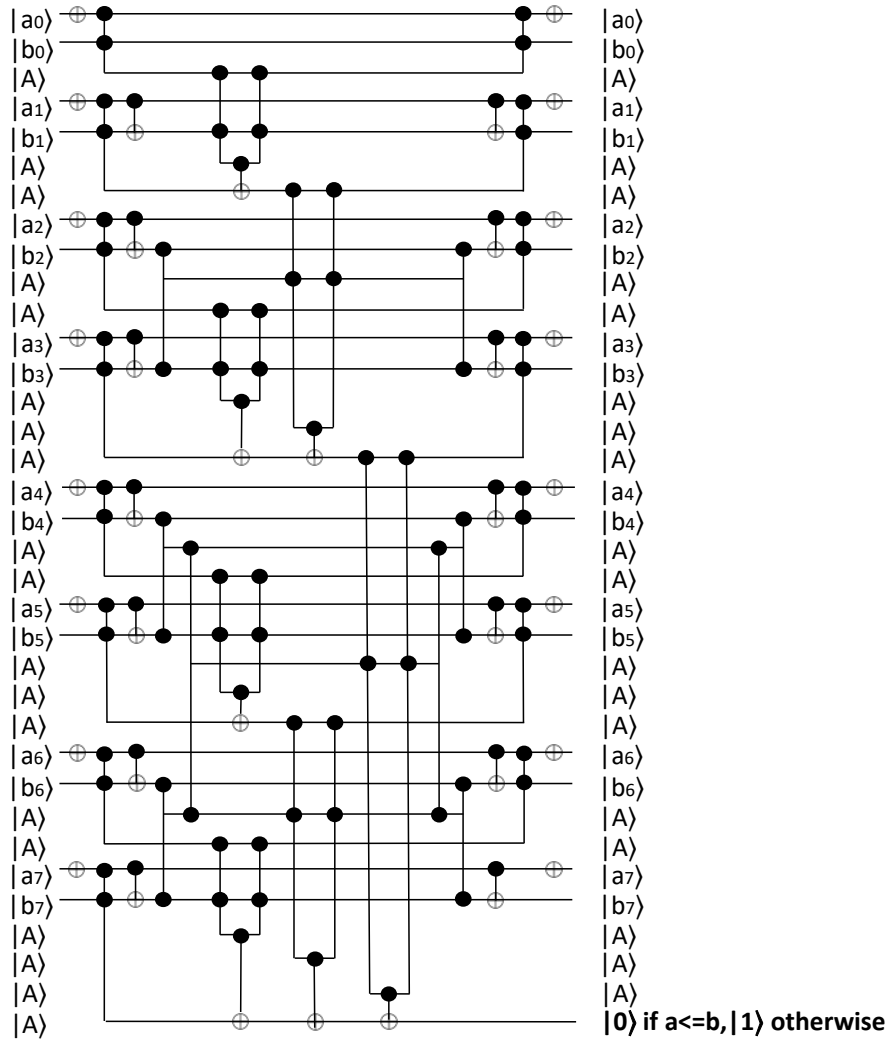


Fig. 2: Ejemplo del primer comparador propuesto, para el caso $n = 8$. Este comparador se centra en reducir el T-depth.

realizar sólo el cálculo del signo. El circuito se puede reproducir para cualquier tamaño n de bits siguiendo estos pasos:

- Para $i = 0$ a $i = n - 1$, aplicar una puerta Pauli-X en cada bit a_i para realizar \bar{a} . Estas operaciones se calculan en paralelo como se muestra en el ejemplo de circuito de la Fig. [1](#).
- Realizar la operación a_0b_0 utilizando una puerta lógica-AND temporal en lugar de una puerta Toffoli. Cada lógica-AND temporal requerirá un qubit extra, que debe ser inicializado en el estado $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{i\frac{\pi}{4}}|1\rangle)$. Estos qubits auxiliares están marcados con la letra A en la Fig. [1](#).
- Para $i = 1$ a $i = n - 1$, aplicar dos puertas CNOT para calcular $(a_{i-1}b_{i-1}) \oplus a_i$ y $(a_{i-1}b_{i-1}) \oplus b_i$. A continuación, aplicar una puerta lógica-AND temporal para calcular $a_i b_i$. Por último, aplicar otra puerta CNOT para realizar $(a_{i-1}b_{i-1}) \oplus (a_i b_i)$. Cada paso del bucle debe ser calculado secuencialmente.
- El resultado viene dado por la última operación de la última iteración calculada en el paso anterior. Sin embargo, es necesario descomputar varios qubits para evitar salidas basura. En primer lugar, aplicar dos puertas CNOT para realizar $(a_{n-2}b_{n-2}) \oplus a_{n-1}$ y $(a_{n-2}b_{n-2}) \oplus b_{n-1}$.
- Para $i = n - 2$ a $i = 1$, aplicar una puerta CNOT para realizar $(a_{i-1}b_{i-1}) \oplus (a_i b_i)$. A continuación, aplicar el circuito de descomputación para la operación lógica y en $a_i b_i$. Por último, aplicar dos puertas CNOT en $(a_{i-1}b_{i-1}) \oplus a_i$ y $(a_{i-1}b_{i-1}) \oplus b_i$. De nuevo, cada paso del bucle debe ser calculado secuencialmente.
- Por último, para $i = 0$ a $i = n - 1$ se aplica una puerta Pauli-X en cada bit a_i para descomputarlos. Todos los qubits, excepto el que contiene el resultado, han sido descomputados.

El segundo comparador propuesto se muestra en la Fig. [2](#). Se basa en la metodología del sumador desarrollado por Thapliyal et al. en 2020 [\[17\]](#), que es el mejor sumador en términos de T-depth actualmente disponible [\[11\]](#). De nuevo, la comparación se realiza calculando $\bar{a} + \bar{b}$. Este circuito implica el uso de una gran cantidad de qubits auxiliares para conseguir una profundidad T logarítmica, ya que cada operación se realiza utilizando puertas lógicas-AND temporales. Estas puertas podrían sustituirse total o parcialmente por puertas Tóffoli para reducir el número de entradas auxiliares. Sin embargo, esto aumentará la profundidad y el coste del circuito en términos de puertas T. El comparador se puede reproducir para cualquier tamaño n de bits siguiendo estos pasos:

- Para $i = 0$ a $i = n - 1$, aplicar una puerta Pauli-X en cada bit a_i para realizar \bar{a} . A continuación, aplicar una puerta lógica-AND temporal para calcular $a_i b_i$. De acuerdo con el sumador original, este valor será renombrado como $g[i, i + 1]$.
- Para $i = 1$ a $i = n - 1$, aplicar una puerta CNOT en $a_i \oplus b_i$. Este valor será renombrado como $p[i, i + 1]$.
- Para $i = 2$ a $i = \log(n) - 1$, y para $j = 1$ a $j = \frac{n}{2^i} - 1$, aplicar una puerta lógica-AND temporal en las posiciones $p[x, y], p[y, z]$, siendo $x = 2^i j$, $y = 2^i j + 2^i$, y $z = 2^i j + 2^{i-1}$, respectivamente.

- Para $i = 1$ a $i = \log(n)$, y para $j = 0$ a $j = \frac{n}{2^i} - 1$, aplicar una puerta lógica-AND temporal y una puerta de descomputación en las posiciones $g[x, y], g[y, z]$, siendo $x = 2^i j$, $y = 2^i j + 2^i$, y $z = 2^i j + 2^{i-1}$, respectivamente.
- Para $i = \log(\frac{2n}{3})$ a $i = 1$, y para $j = 1$ a $j = \frac{n-2^{i-1}}{2^i}$, aplicar una lógica-AND temporal y su descomputación en $g[0, x]$, $p[x, y]$ y $g[x, y]$, siendo $x = 2^i j$, y $y = 2^i j + 2^{i-1}$, respectivamente.
- Para $i = 1$ a $n - 1$, aplicar una puerta CNOT en $p[i, i+1]$ y $g[0, i]$.
- Para $i = 1$ a $n - 1$, aplicar una puerta CNOT en $p[0, 1]$ y la entrada ancilla correspondiente.
- Los pasos 3, 2, y 1 (en este orden) deben ser computados de nuevo para descomputar las salidas basura.

4 Análisis y comparación

Los comparadores propuestos constan de sólo cuatro tipos de puertas: Puertas Pauli-X, puertas CNOT, puertas lógicas-AND temporales y la puerta de descomputación de la puerta lógica-AND temporal. Entre estas puertas, sólo la lógica-AND temporal implica puertas T. Por lo tanto, el T-count y el T-depth de nuestros circuitos se pueden obtener del número total de puertas lógicas-AND temporales que tienen y el número de puertas lógicas-AND temporales que los circuitos deben computar secuencialmente, respectivamente. El T-count y el T-depth de la puerta lógica-AND temporal son 4 y 2, respectivamente.

El primer circuito implica n puertas temporales-AND consecutivas. Entonces, tiene un T-count de $4n$ y un T-depth de $2n$. Dado que el circuito sólo utiliza los qubits auxiliares implicados en las operaciones de las puertas lógicas-AND temporales, se puede concluir que el primer comparador necesita n qubits auxiliares. Por otro lado, el segundo comparador implica $3n - 2W(n) - \log(n)$ puertas lógicas-AND temporales, siendo $W(n)$ el número de unos en la expansión binaria de n . Por lo tanto, su T-count es $12n - 8W(n) - 4\log(n)$. El T-depth no es trivial de calcular ya que la profundidad del circuito depende del valor de n . Sin embargo, hemos demostrado que el circuito crece logarítmicamente. Entonces, podemos afirmar que su T-depth es $\log(n)$.

Circuito Comparador	T-count	T-depth	Qubits auxiliares
Xia et al. (2018) [20]	$14n$	$6n$	2
Xia et al. (2019) [21]	$14n - 7$	$6n - 3$	2
Li et al. (2020) [6]	$14n - 7$	$6n - 3$	1
Comparador 1	$4n$	$2n$	n
Comparador 2	$12n - 8W(n) - 4\log(n)$	$\log(n)$	$4n - 2W(n) - 2\log(n)$

Table 1: Evaluación de comparadores.

La tabla [1] muestra una comparación en términos de T-count, T-depth, y número de entradas auxiliares entre los comparadores más recientes del estado del

arte y los dos circuitos propuestos. En términos de T-count y T-depth, se muestra que los circuitos propuestos superan a los otros comparadores. Centrándonos en el T-count, el primer circuito propuesto es la mejor opción con un T-count de $4n$. El circuito con mejor T-count en la literatura es la propuesta de Li et al. [6]. Este circuito tiene un T-count de $14n - 7$, que es un valor tres veces mayor que nuestra propuesta. Nuestra segunda propuesta tiene un T-count de $12n - 8W(n) - 4\log(n)$, que sigue siendo mejor que el circuito de Li et al [6].

Centrándonos ahora en el T-depth, el único circuito logarítmico es el segundo circuito propuesto. Los demás comparadores son lineales. De nuevo, el circuito de Li et al. es la mejor opción de la literatura, con una profundidad T de $6n - 3$. El primer circuito propuesto, con una profundidad de $2n$, también supera al circuito de Li et al.

5 Conclusiones

Este trabajo continúa el trabajo iniciado en [21] sobre binarización en computación cuántica. En particular, proporciona dos novedosos comparadores centrados en la reducción del ruido interno y externo. Aunque se presentan en un contexto de binarización, estos comparadores son válidos para un propósito general.

Los dos circuitos propuestos son capaces de reducir el número de puertas T necesarias (lo que implica la reducción del T-count y del T-depth), gracias al uso de la puerta lógica-AND temporal propuesta por [2], y también utilizando las metodologías más eficientes para la reducción de ruido en sumadores binarios cuánticos. Nuestro primer circuito se centra en la reducción del T-count, y el segundo se basa en la reducción del T-depth. Sin embargo, los dos circuitos mejoran tanto en T-count como en T-depth a los circuitos actualmente disponibles.

Como complemento, se ha realizado una comparación entre los circuitos propuestos y los comparadores más destacados de la literatura. Las conclusiones son que los circuitos propuestos son la mejor opción cuando el ruido es un problema y su reducción es obligatoria.

References

1. Caraiman, S., Manta, V.: Image processing using quantum computing. In: 2012 16th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC). pp. 1–6. IEEE (2012)
2. Gidney, C.: Halving the cost of quantum addition. *Quantum* **2**, 74 (2018)
3. Häner, T., Steiger, D.S., Svore, K., Troyer, M.: A software methodology for compiling quantum programs. *Quantum Science and Technology* **3**(2), 020501 (2018)
4. Iiyasu, A.M.: Review towards realising secure and efficient image and video processing applications on quantum computers. *Entropy* **15**, 2874–2974 (2013). <https://doi.org/10.3390/e15082874>
5. Jones, T., Brown, A., Bush, I., Benjamin, S.C.: Quest and high performance simulation of quantum computers. *Scientific reports* **9**(1), 1–11 (2019)

6. Li, H.S., Fan, P., Xia, H.Y., Peng, H., Long, G.L.: Efficient quantum arithmetic operation circuits for quantum image processing. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* **63**, 1–13 (2020)
7. Li, P., Shi, T., Zhao, Y., Lu, A.: Design of threshold segmentation method for quantum image. *International Journal of Theoretical Physics* **59**(2), 514–538 (2020)
8. Michalak, H., Okarma, K.: Improvement of image binarization methods using image preprocessing with local entropy filtering for alphanumeric character recognition purposes. *Entropy* **21**(6), 562 (2019)
9. Muñoz-Coreas, E., Thapliyal, H.: Quantum circuit design of a t-count optimized integer multiplier. *IEEE Transactions on Computers* **68**(5), 729–739 (2019)
10. Nielsen, M.A., Chuang, I.: *Quantum computation and quantum information* (2002)
11. Orts, F., Ortega, G., Combarro, E.F., Garzón, E.M.: A review on reversible quantum adders. *Journal of Network and Computer Applications* **170**, 102810 (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102810>
12. Orts, F., Ortega, G., Garzón, E.M.: An optimized quantum circuit for converting from sign-magnitude to two's complement. *Quantum Information Processing* **18**(11), 332 (Nov 2019). <https://doi.org/10.1007/s11128-019-2447-7>
13. Orts, F., Ortega, G., Garzón, E.M.: Efficient reversible quantum design of sign-magnitude to two's complement converters. *Quantum Information & Computation* **20**(9-10), 747–765 (2020)
14. Pachos, J., Lahtinen, V.: A short introduction to topological quantum computation. *SciPost Physics* **3** (09 2017). <https://doi.org/10.21468/SciPostPhys.3.3.021>
15. Shin, S.W., Smith, G., Smolin, J.A., Vazirani, U.: How “quantum” is the D-Wave machine? arXiv preprint arXiv:1401.7087 (2014)
16. Steiger, D.S., Häner, T., Troyer, M.: ProjectQ: an open source software framework for quantum computing. *Quantum* **2**(49), 10–22331 (2018)
17. Thapliyal, H., Muñoz-Coreas, E., Khalus, V.: T-count and qubit optimized quantum circuit designs of carry lookahead adder. arXiv preprint arXiv:2004.01826 (2020)
18. Wang, D., Liu, Z., Zhu, W., Li, S.: Design of quantum comparator based on extended general Toffoli gates with multiple targets. *Comput. Sci.* **39**(9), 302–306 (2012)
19. Wang, L., Ran, Q., Ma, J., Yu, S., Tan, L.: QRCI: A new quantum representation model of color digital images. *Optics Communications* pp. 147–158 (2019)
20. Xia, H.Y., Li, H., Zhang, H., Liang, Y., Xin, J.: An efficient design of reversible multi-bit quantum comparator via only a single ancillary bit. *International Journal of Theoretical Physics* **57**(12), 3727–3744 (2018)
21. Xia, H.Y., Li, H., Zhang, H., Liang, Y., Xin, J.: Novel multi-bit quantum comparators and their application in image binarization. *Quantum Information Processing* **18**(7), 229 (2019)
22. Xia, H.Y., Zhang, H., Song, S.X., Li, H., Zhou, Y.J., Chen, X.: Design and simulation of quantum image binarization using quantum comparator. *Modern Physics Letters A* **35**(09), 2050049 (2020)
23. Yan, F., Ilyasu, A., Le, P.: Quantum image processing: A review of advances in its security technologies. *International Journal of Quantum Information* **15**, 1730001 (04 2017). <https://doi.org/10.1142/S0219749917300017>
24. Yan, F., Venegas-Andraca, S.: *Quantum Image Processing*. Springer (2020)
25. Zhang, F., Chen, J.: Optimizing t gates in Clifford+T circuit as $\pi/4$ rotations around Paulis (2019)
26. Zhang, Y., Lu, K., Gao, Y., Wang, M.: NEQR: a novel enhanced quantum representation of digital images. *Quantum Information Processing* **12**(8), 2833–2860 (2013)

Modeling and control of the microalgae biomass production process in raceway reactors

Enrique Rodríguez Miranda¹

University of Brescia, Brescia, Italy.
Universidad de Almería, Almería, Spain.
`e.rodruiguezmiran@unibs.it`

Abstract. Research on microalgae is gaining importance due, fundamentally, to the advantages of its cultivation and the diversity of applications that biomass has. This work presents the progress made in this year during the development of the PhD. The main objective of the work carried out has been to improve the biomass productivity in the operation of raceway reactors. This improvement focuses on the development of models that serve for the simulation and estimation of characteristic parameters, such as culture temperature and growth rate, as well as temperature and pH control techniques to maintain optimal conditions during cultivation.

Keywords: Microalgae · Raceway reactor · Modeling · Control problem

1 Introduction

Microalgae are microscopic organisms that live in aqueous environments and have the ability to perform photosynthesis. Through this process, the microalgae consume carbon dioxide and nutrients contained in the culture medium to produce oxygen and grow. The objective of microalgae cultivation is the production of biomass in photobioreactors for its subsequent treatment and use in different applications. Among its many uses, microalgae biomass can be used in commercial applications to obtain products of high added value with applications in human nutrition and health, aquaculture, cosmetics and biofertilizers. Furthermore, other promising application that are currently in improving is the use of microalgae biomass for energy purposes, mainly to obtain biofuel. In addition, during their growth, microalgae capture carbon dioxide, contributing to carbon mitigation, and its production can even be combined with wastewater treatment. Figure 1 represents the scheme of a raceway reactor.

During normal operation of the reactor, dissolved oxygen and pH control are usually performed in industry with an On/Off control applied to a valve, where CO₂ or air is bubbled into the sump when the pH or dissolved oxygen levels exceed a certain value. This control is normally carried out automatically during the daytime period and is deactivated at night due to the inactivity of the microalgae, so it is a process that does not require frequent maintenance. On the other hand, the dilution and harvesting processes are those that are responsible

Modeling and control of the microalgae biomass production process in raceway reactors

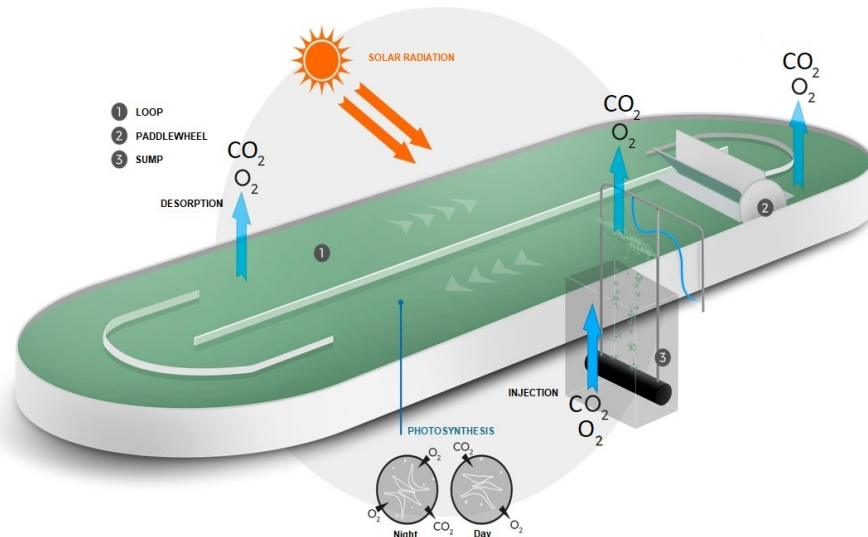


Fig. 1: Schematic of a raceway reactor [1].

for extracting the microalgae biomass from the reactor, and are usually carried out manually. Harvesting is the process by which culture is removed from the reactor through a pipe, for further treatment and processing. Moreover, dilution is the process by which fresh water with fertilizers or another type of culture medium (such as wastewater or salt water) is added. During the dilution process with fresh water, the necessary nutrients are added to allow the growth of microalgae. These nutrients have a lower pH than the culture pH of the reactor, which causes disturbances during dilution.

Generally, temperature control is not carried out in open reactors at industrial level, due to their high energy and investment related costs. However, the volume variation in the reactor through the harvesting and dilution processes affects the dynamic evolution of the culture temperature. Through the use of optimal control of these processes, it is possible to regulate the temperature of the culture in order to improve the productivity of the microalgae.

2 Temperature model

A new simple temperature model is presented [5, 7], based on a review of the empirical relationships defined by Béchet *et al.* and Slegers *et al.* in [2, 10], and adapted to a raceway reactor. The culture temperature is calculated from a thermal balance in the reactor, taking into account all available environmental variables. This model allows the estimation of the culture temperature in the reactor for certain environmental conditions. In this way, the model could estimate parameters of interest, such as the time for harvesting or anticipate risk

Modeling and control of the microalgae biomass production process in raceway reactors

temperatures that can negatively affect the culture. In addition, the model may be used to analyse the temperature impact on biomass production for different locations. Therefore, design tools could be developed to study the viability of the microalgae production zones to determine the most suitable cultivation strains. Moreover, the temperature model can be used to improve existing microalgae estimation models or biomass growth models, such as those presented in [3] and [4]. Also, the temperature model can be used when there is a lack of temperature measurements in the reactor, being useful as a temperature estimator. Furthermore, the model can be used for optimal control purposes, where knowledge of the evolution of the controlled variables is essential to develop control approaches.

The model depends on a series of environmental input variables that are solar irradiance, ambient temperature, relative humidity and wind speed. Other input variables are culture depth, harvesting and dilution rates, soil temperature and dilution medium temperature, which can be easily estimated or approximated, instead of measured. Specifically, the culture depth can be set to its common value, the harvesting and dilution rate usually are constant values, and the temperature of the soil under the reactor and the dilution medium can be estimated or set to constant values, based on approximations with ambient temperature or historical data. In this way, only the measurements of the environmental variables would be needed to run the model and use it as a temperature estimator.

The dynamic evolution of culture temperature is described as:

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{Q_{total}}{h \cdot A \cdot C_p \cdot \rho}$$

where

$$\begin{aligned} Q_{total} = & Q_{irradiance} + Q_{radiation} + Q_{evaporation} + Q_{convection} + \\ & + Q_{conduction} + Q_{harvesting} + Q_{dilution} \end{aligned} \quad (1)$$

where h [m] is the culture depth, A [m²] is the surface of the reactor, C_p [J kg⁻¹ °C⁻¹] is the specific heat capacity of the culture, ρ [kg m⁻³] is the density of the culture, T_w [°C] is the culture temperature in the reactor, Q_{total} is the total heat in the reactor, $Q_{irradiance}$ represents the heat flow from sunlight, $Q_{radiation}$ is the long-wave radiation heat flow, $Q_{evaporation}$ accounts for the heat flow produced by the evaporation process, $Q_{convection}$ is the heat flow caused by convection, $Q_{conduction}$ represents the heat flow between the reactor and the polyethylene layer under it through a conduction process, $Q_{harvesting}$ represents the heat flow due to volume loss by harvesting, and $Q_{dilution}$ describes the heat flow by the difference of new medium added into the reactor.

3 Combined microalgae biomass production process and wastewater treatment

The combination of microalgae biomass production processes and wastewater treatment is an innovative goal that poses several challenges. In collaboration with a researcher from the IFAPA center and using a biomass growth and production model for this combined process, a calibration of its characteristic parameters has been carried out [9]. This model represents the influence of the nutrients and compounds present in the wastewater on the growth of microalgae and bacteria. The model is made up of a series of parameters, some of which are known for their value in a certain range. This fact highlights the need for an adequate calibration process to determine the value of these parameters. From experimental data and through genetic algorithm calibration, the value of the model parameters has been determined, making it possible to use it in the estimation of all the compounds that form the combined biomass production and wastewater treatment process.

Figure 2 shows the inputs and outputs of the simulation model developed to estimate the concentration of the different elements involved in the reactor.

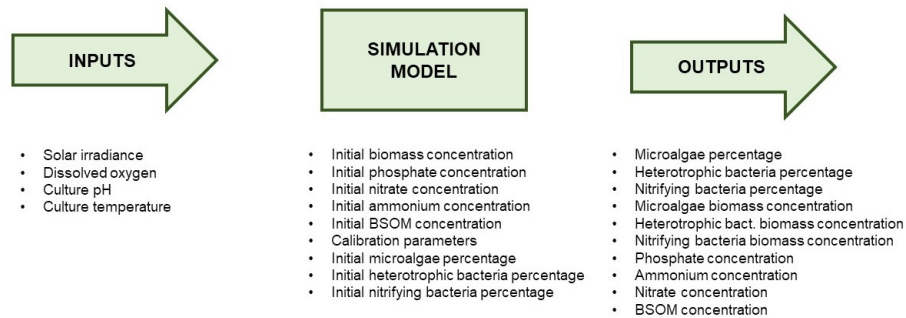


Fig. 2: Inputs and outputs of the model.

3.1 Calibration

A genetic algorithms implemented in Matlab have been used to calibrate the model parameters. The cost function is computed as the Root Mean Square Error (RMSE) between the simulated organism and nutrients (total biomass, ammonium, nitrate, phosphate and BSOM) and the real measured values. The data used during the calibration process correspond to the experimental measurements taken for a 0.7 L laboratory scale reactor for 14 consecutive days. The reactor operating conditions are equivalent to the operation of a raceway reactor, with light and dark cycles representing day and night. In addition, pH and dissolved oxygen are controlled by injecting CO₂ and air.

Modeling and control of the microalgae biomass production process in raceway reactors

Figure 3 represents the calibration results obtained in the estimation of the model variables. This figure is made up of six independent graphs that represent different variables estimated in the model. Figure 3.a shows the percentages of each species of microorganisms within the reactor. Figure 3.b represents the biomass concentration for each organism in the reactor (microalgae, heterotrophic bacteria and nitrifying bacteria), in addition to the total biomass concentration, expressed as the sum of the individual concentrations and the representation of the experimental measured points. Figure 3.c represents the estimated phosphate concentration and the experimental measured points. Figure 3.d shows the estimated ammonium concentration and the experimental measurements points taken. Figure 3.e represents the estimated nitrate concentration and the experimental measured points. Finally, Figure 3.f represents the estimated biodegradable soluble organic matter concentration, compared with the experimental measurements points taken.

As a result of the calibration, initial percentages of 82.1% for microalgae, 13.2% for heterotrophic bacteria and 4.7% for nitrifying bacteria have been established. Looking at Figures 3.a and 3.b, it is observed how the concentration of microalgae decreases until reaching a steady state. On the other hand, the concentration of heterotrophic bacteria grows slightly, consuming ammonium and organic matter, while the concentration of nitrifying bacteria remains practically constant. The sum of the concentrations of each species represents the total biomass concentration (dashed line), which properly adjusts to the points measured experimentally in the reactors.

The results obtained from the comparison between the estimated values with respect to the measured experimental data have been satisfactory. The concentrations of the elements are adjusted within the range formed by the measurement points, despite being scattered data. The percentages of microalgae and bacteria within the reactor over time show values close to those obtained in the literature.

4 Feasibility study on biomass productivity

From the temperature model described and the characterization of four new strains, an analysis of the influence of the culture depth on biomass productivity has been carried out [8]. This study has focused on four types of microalgae strains that correspond to *Chlorella vulgaris*, *Isochrysis galbana*, *Nannochloropsis gaditana* and *Spirulina platensis*. These strains are commonly grown on an industrial level and are characterized by a high optimum growing temperature.

A feasibility simulation study has been carried out with environmental data, corresponding to all seasons, for each strain of microalgae presented. The simulation has been based on the dimensions of an 80 m² raceway reactor. Afterwards, a comparison of the biomass productivity has been carried out, throughout the four seasons, differentiating between the operation of the reactor with a fixed depth of 15 cm and the operation with the optimal depth for each period. The

Modeling and control of the microalgae biomass production process in raceway reactors

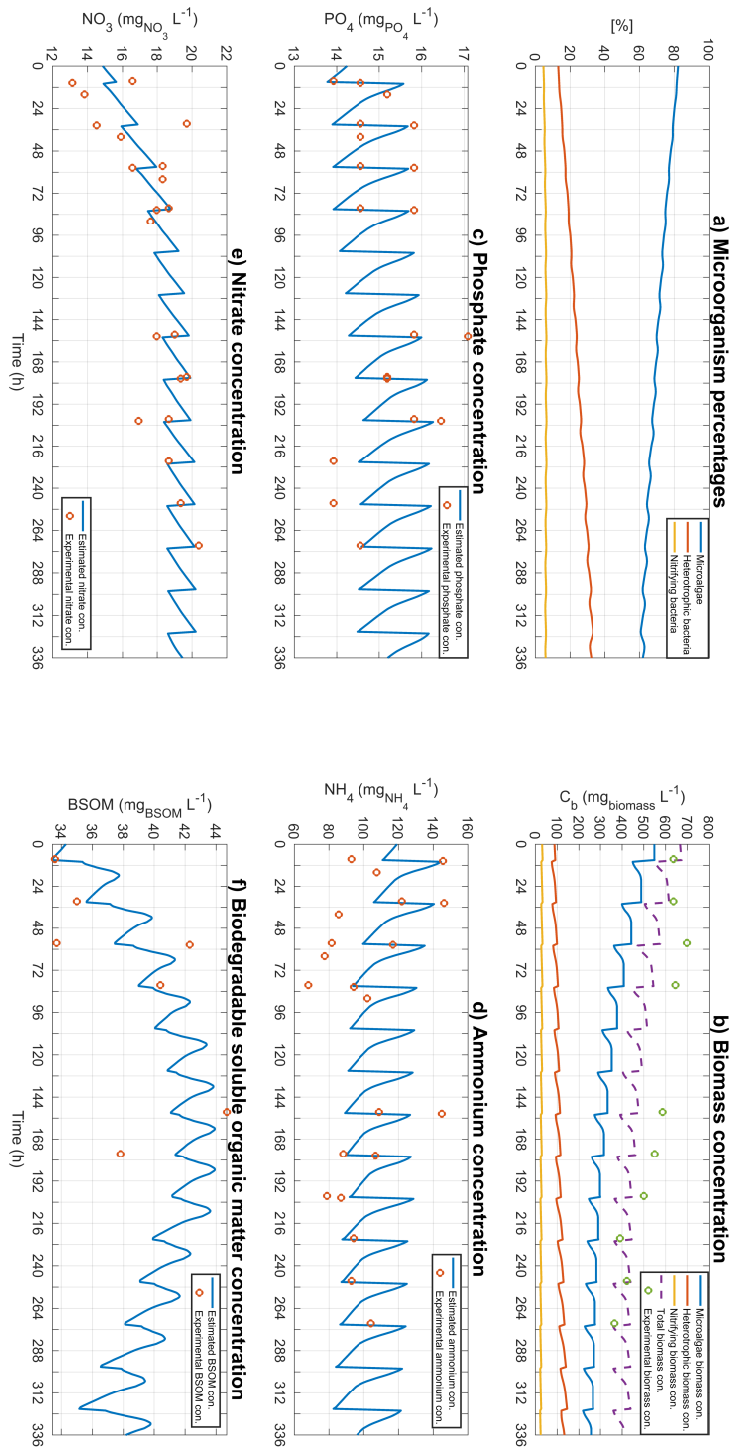


Fig. 3: Calibration results for the biomass production model with wastewater medium.

Modeling and control of the microalgae biomass production process in raceway reactors

objective is to demonstrate that the use of the optimal culture depth increases biomass productivity.

5 Indirect regulation of temperature

This section presents a simple method for temperature regulation by varying the volume in the reactor throughout the daytime period [6]. A culture depth optimizer has been designed to determine the culture depth variation that minimizes the difference between the reactor temperature and the desired optimal culture temperature. The control of the culture depth in the reactor is carried out by means of the harvesting and dilution processes, being a method that does not require the use or installation of new devices for cooling or heating the reactor culture. A scheme of the control system is shown in Figure 4.

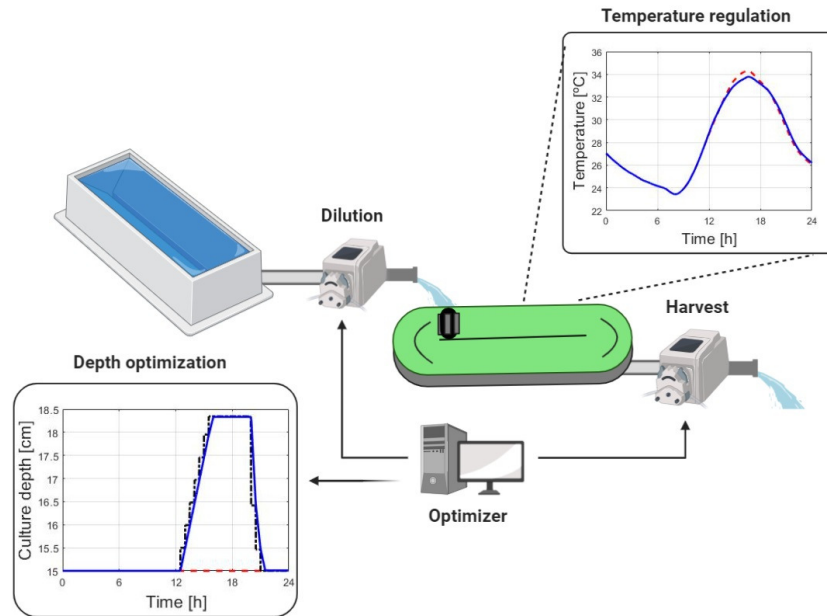


Fig. 4: Culture depth optimization scheme.

As a solution to the optimization problem, two approaches have been proposed. Initially, an one-step horizon has been established for the optimization, so that the objective function is based only in the current inputs values. Subsequently, weather forecast and future horizon optimization have been included with the aim of improving performance.

Figure 5 represents the results obtained using the optimizer with the one-step approach during a week in August. As Figure 5.a shows, the difference in

Modeling and control of the microalgae biomass production process in raceway reactors

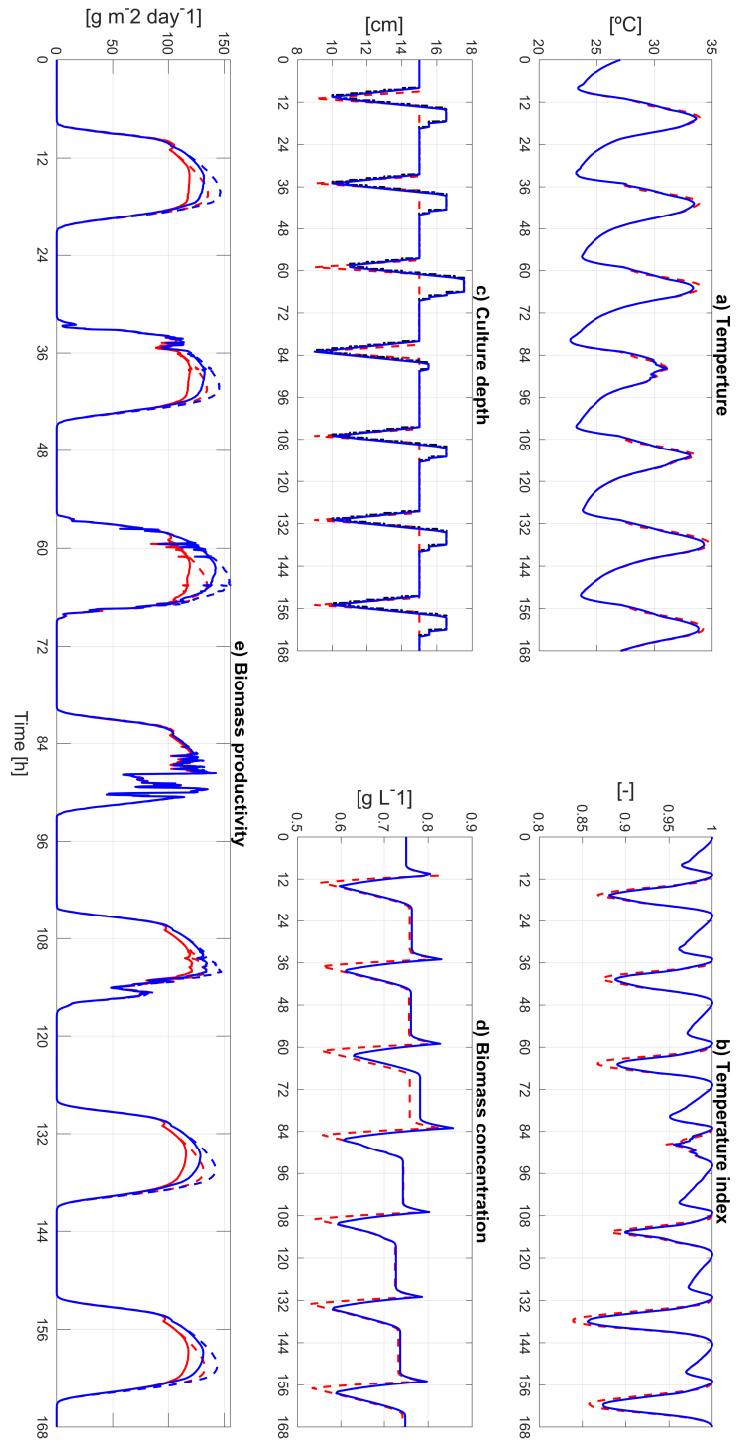


Fig. 5: One-step constrained optimization comparison results for a week on August. Red lines represent the results for normal reactor operation, while blue lines represent the results applying the culture depth optimizer. Dashed black lines on graph c) represent the culture depth set-point from the optimizer. Dashed lines on biomass productivity (graph e)) represent maximum theoretical biomass productivity.

Modeling and control of the microalgae biomass production process in raceway reactors

the culture temperature is small, only 0.5°C . Even so, this slight difference has allowed the dilution rate parameter to be increased in the optimized scenario. The improvement in the temperature index (Figure 5.b) was 12%. As can be seen in Figure 5.c, the evolution in the culture depth, at the beginning of the day, is similar to the normal operation. However, because the dilution is greater, the depth during the dilution period increases more, in addition to allowing a greater harvesting capacity. In this case, the dilution rate for the optimized scenario has been 43% of the total volume in the reactor, instead of 40% for normal operation during this period. Although the dilution rate with the optimizer is higher, the biomass concentration (Figure 5.d) at the end of the test has been the same as for normal operation, which denotes the improvement in biomass productivity (Figure 5.e), which increases 11% on average. Due to this improvement, the estimate of the harvested biomass is 6.8% more than the biomass harvested with normal operations.

Figure 6 represents the results obtained for August using the optimizer with perfect forecast. Observing Figure 6.a, the decrease in the maximum culture temperature has been on average 1.3°C less than the normal operation case. The improvement in the temperature index (Figure 6.b) was 31.8%, very similar to the previous case. The improvement in biomass productivity (Figure 6.e) has been 45% compared to normal operation, slightly higher than the previous case. Due to this increase, the estimation for biomass harvesting has been 26.4% more than normal operations.

6 Conclusions

The description of the combined model of biomass production and wastewater treatment has been introduced. The calibration carried out by means of genetic algorithms opens the door to a simple method of adjusting the various parameters that make up the model, so that it can be recalibrated from experimental measurements of different medium and culture scenarios, since the concentration of nutrients varies from one type of medium to another.

On the other hand, culture temperature is one of the parameters that mostly affects the growth of microalgae, being also a difficult variable to control at an industrial level. The results obtained with the application of the optimizer with constraints have been satisfactory, with a considerable increase on biomass productivity during summer with respect to the normal operation of the raceway reactor performed everyday. The culture depth optimizer opens the door to new ways of controlling temperature and improving biomass productivity. Due to its characteristics and restrictions, the regulation is carried out by means of the dilution and harvesting processes in the reactor, and it does not require any expensive devices with respect to the normal operation of the reactor, such as heat exchangers for cooling and heating.

Modeling and control of the microalgae biomass production process in raceway reactors

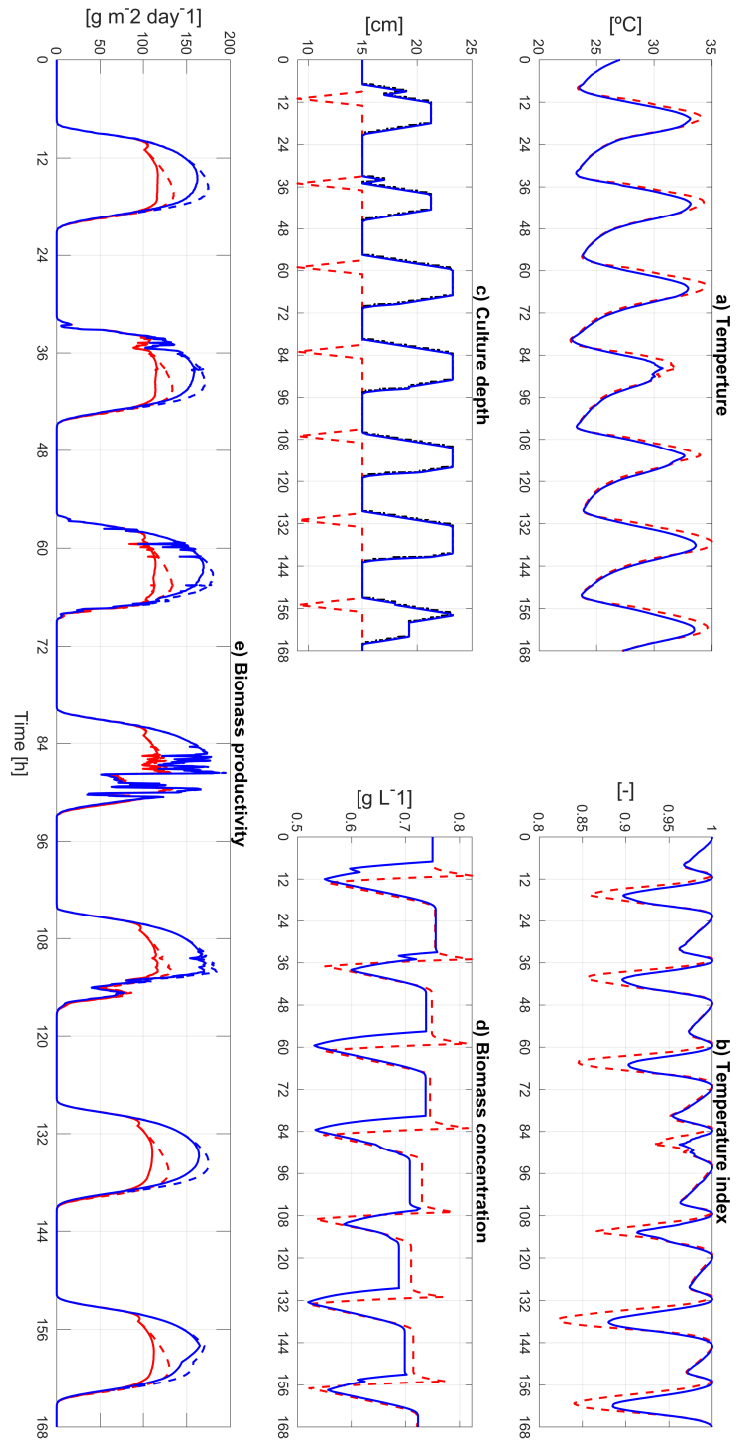


Fig. 6: Perfect forecast receding horizon optimization comparison results for August. Red lines represent the results for normal reactor operation, while blue lines represent the results applying the culture depth optimizer. Dashed black lines on graph c) represent the culture depth set-point from the optimizer. Dashed lines on biomass productivity (graph e)) represent maximum theoretical biomass productivity.

Bibliography

- [1] M. Barceló-Villalobos, J. L. Guzmán, F. G. Acién, I. Martín, and J. A. Sánchez. Análisis del coeficiente de transferencia de materia en reactores raceways. *XXXVIII Jornadas de Automática*, pages 534 – 538, 2017. <https://doi.org/10.3390/app11030998>.
- [2] Q. Béchet, A. Shilton, J. K. Park, R. J. Craggs, and B. Guieysse. Universal temperature model for shallow algal ponds provides improved accuracy. *Environmental Science and Technology*, 45:3702–3709, 2011. <https://doi.org/10.1021/es1040706>.
- [3] I. Fernández, F. G. Acién, J. M. Fernández, J. L. Guzmán, J. J. Magán, and M. Berenguel. Dynamic model of microalgal production in tubular photobioreactors. *Bioresource Technology*, 126:172 – 181, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.087>.
- [4] J. L. Guzmán, F. G. Acién, and M. Berenguel. Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 18(1):1 – 18, 2021. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.13604>. URL <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/13604/12866>.
- [5] E. Rodríguez, F. G. Acién, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and A. Visioli. Modelo de temperatura para reactores abiertos de microalgas. *In XL Jornadas de Automática, Ferrol, Spain*, pages 582 – 588, 2019. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497169.582>.
- [6] E. Rodríguez, J. L. Guzmán, F. G. Acién, M. Berenguel, and A. Visioli. Indirect regulation of temperature in raceway reactors by optimal management of culture depth. *Biotechnology and Bioengineering*, pages 1 – 13, 2020. <https://doi.org/10.1002/bit.27642>.
- [7] E. Rodríguez, F. G. Acién, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and A. Visioli. A new model to analyze the temperature effect on the microalgae performance at large scale raceway reactors. *Biotechnology & Bioengineering (In press)*, 2021. <https://doi.org/10.1002/bit.27617>.
- [8] E. Rodríguez, A. Sánchez, F. G. Acién, and J. L. Guzmán. Feasibility seasonal study for culture depth influence on temperature for different microalgae strains. *Biotechnology and Bioengineering (Submitted)*, 2021.
- [9] A. Sánchez, E. Rodríguez, J. L. Guzmán, F. G. Acién, J. M. Fernández, and E. Molina. Abaco: A new model of microalgae-bacteria consortia for biological treatment of wastewaters. *Applied Sciences*, 11(3):998 – 1022, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11030998>.
- [10] P. M. Slegers, M. B. Lösing, R. H. Wijffels, G. van Straten, and A. B. van Boxtel. Scenario evaluation of open pond microalgae production. *Algal Research*, 2:358–368, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.05.001>.

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

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...

recodificación de las imágenes, ni ningún procesamiento adicional. En este proceso de intercambio el servidor extrae sólo los datos requeridos de las imágenes comprimidas y los transmite a los clientes.

En particular, el protocolo JPIP ha demostrado ser muy eficiente para la visualización de imágenes solares. Actualmente está siendo utilizado por el Proyecto JHelioviewer [6] para permitir a los investigadores y al público en general explorar datos de imágenes solares de diferentes observatorios espaciales, hacer zoom de manera interactiva en áreas de interés y reproducir secuencias de imágenes de alta resolución con diferentes niveles de cadencia temporal.

Dependiendo de la resolución de las imágenes, su contenido y la cadencia temporal que el usuario ha seleccionado, la cantidad de datos que deben enviarse desde el servidor hasta el cliente puede ser muy elevada. Este problema es más evidente cuando aumenta el número de usuarios que están realizando peticiones al servidor de forma concurrente. Para resolver este problema de escalabilidad, nosotros proponemos explotar la redundancia temporal que existe en las secuencias de imágenes que se están transmitiendo, realizando compensación de movimiento y refresco condicional.

Aunque el uso de compensación de movimiento y refresco condicional ya han sido utilizados en otros trabajos [1–3, 7–9], nuestra propuesta es la primera en ser compatible al 100% con cualquier servidor JPIP. Esto significa que cualquier servidor JPIP estándar, como el que se está utilizando actualmente en el Proyecto JHelioviewer, puede hacer uso de esta solución. De hecho, nuestra propuesta [10] sólo requiere que los clientes tengan algún grado de acceso aleatorio espacial a las imágenes en el servidor.

2 MCCR (Motion Compensated Conditional Replenishment)

Esta sección describe MCCR, una propuesta totalmente compatible con el estándar JPIP [5] que permite la transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 utilizando las técnicas de compensación de movimiento y refresco condicional de precintos JPEG2000. La lógica de MCCR está implementada exclusivamente en el lado del cliente, mientras que el servidor no necesita realizar ningún cambio. Precisamente esta característica es la que hace que esta propuesta sea realmente interesante.

Mediante el protocolo JPIP, los clientes pueden solicitar ventanas de interés (WOIs) a los servidores, que responden con uno o más *data-bins*, que son fragmentos de *codestream* de un archivo JPEG2000. Es importante tener en cuenta que: (1) los clientes solicitan WOIs al servidor, no solicitan paquetes ni *data-bins* y (2) debido a que dos o más WOIs pueden solaparse, los clientes almacenan los paquetes que reciben en una caché local, de modo que los servidores JPIP pueden conocer el estado de las cachés de los clientes con el objetivo de evitar tener que enviar los mismos datos que ya ha enviado previamente a los clientes en la misma sesión JPIP.

2.1 Descripción

Para facilitar la descripción de MCCR, vamos a suponer que el cliente va a solicitar la secuencia de imágenes en su máximo nivel de resolución temporal, es decir, no van a existir imágenes intermedias entre I_i and I_{i+1} . Sin embargo, MCCR permite utilizar cualquier resolución temporal en el cliente para renderizar la secuencia de imágenes.

A continuación se describe la secuencia de pasos del algoritmo MCCR.

1. En primer lugar se descargan las dos primeras imágenes de la secuencia en su máximo nivel de resolución y con el máximo número de capas de calidad. A estas imágenes las denominamos I_i y I_{i+1} , donde i representa en qué iteración del algoritmo nos encontramos.
2. Las imágenes renderizadas que se muestran en el cliente se denominan \tilde{I} . Para las dos primeras imágenes de la secuencia tenemos que las imágenes que hemos descargado son las mismas imágenes que se visualizan en el cliente, es decir, $\tilde{I}_i = I_i$ y $\tilde{I}_{i+1} = I_{i+1}$.
3. Realizamos la estimación de movimiento entre las imágenes \tilde{I}_i y \tilde{I}_{i+1} utilizando una precisión subpixel igual a A y un área de búsqueda de $S \times S$ pixels. Para calcular los vectores de movimiento, \vec{V} , utilizamos un estimador de movimiento basado en bloques de tamaño $B \times B$ pixels.
4. Una vez calculados los vectores de movimiento, generamos una imagen predicción \hat{I}_{i+2} , proyectando los vectores de movimiento \vec{V} sobre la imagen \tilde{I}_{i+1} . Es decir,

$$\hat{I}_{i+2} = \vec{V}(\tilde{I}_{i+1}). \quad (1)$$

Hay que tener en cuenta que que estamos suponiendo que existe un movimiento constante de los bloques entre las imágenes de la secuencia.

5. A partir de la imagen \hat{I}_{i+2} obtenemos una representación en un bajo nivel de resolución, $\text{Thumbnail}(\hat{I}_{i+2})$.
6. Solicitamos al servidor una representación en un bajo nivel de resolución de la imagen I_{i+2} , $\text{Thumbnail}(I_{i+2})$.
7. Calculamos las diferencias a nivel de pixel que existen entre el *thumbnail* de la siguiente imagen de la secuencia, $\text{Thumbnail}(I_{i+2})$ y el *thumbnail* de la imagen predicción, $\text{Thumbnail}(\hat{I}_{i+2})$.

$$E = \text{Thumbnail}(I_{i+2}) - \text{Thumbnail}(\hat{I}_{i+2}) \quad (2)$$

8. Calculamos la media del error E que existe en cada una de las WOIs y ordenamos la lista de WOIs en modo descendente. De modo que el resultado contiene una lista L de WOIs que están ordenadas por distorsión. Las WOIs que aparezcan en primer lugar serán las primeras WOIs que deberemos solicitar al servidor.
9. A partir de la lista L y dependiendo del ancho de banda disponible, solicitamos un número determinado de WOIs (con todos los niveles de calidad) de la imagen I_{i+2} . Las WOIs seleccionadas serán las que aparezcan en las primeras posiciones de la lista L .

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...

10. Creamos la imagen \tilde{I}_{i+2} , que será el resultado de mezclar los precintos (WOIs) que hemos recibido de la imagen I_{i+2} con los precintos que teníamos previamente en la imagen \hat{I}_{i+2} . La imagen resultado \tilde{I}_{i+2} será la que visualizará en el cliente.
11. $i \leftarrow i + 1$. Ir al paso 4.

2.2 Requisitos de compresión de las imágenes

Para poder usar MCCR, es necesario: (1) tener acceso aleatorio sobre los datos comprimidos de la imagen que se corresponden con las WOIs que utilizamos para calcular las predicciones, y (2) las imágenes deben estar comprimidas teniendo en cuenta que deben tener el mismo número de precintos en cada nivel de resolución. También habrá que tener en cuenta que el número D de niveles DWT (Discrete Wavelet Transform) que podemos aplicar sobre las imágenes debe seleccionarse teniendo en cuenta la resolución que queremos que tengan los *thumbnails* con los que vamos a trabajar.

3 Resultados experimentales

3.1 Stockholm

Stockholm es una secuencia de imágenes a color de 1280×720 , con un nivel de movimiento medio, donde una cámara realiza una panorámica del paisaje de la ciudad de Estocolmo a 50 frames/segundo. En la secuencia aparecen casas, agua y coches en movimiento. La Figura 1 muestra las cuatro primeras imágenes de la secuencia, la primera muestra la imagen original de la secuencia y las tres imágenes siguientes muestran las diferencias que existen en cada imagen respecto a la primera imagen.

Las primeras 100 imágenes de la secuencia Stockholm han sido comprimidas con JPEG2000, generando 3 niveles de resolución espacial y 8 capas de calidad. El tamaño de code-block es de 32×32 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 2 muestra la calidad de las reconstrucciones que se han obtenido simulando diferentes escenarios con distinto ancho de banda. En cada simulación la cantidad de bytes que se ha transmitido para cada imagen va desde los 11000 bytes hasta los 51000 bytes. En este caso tenemos una secuencia con mayor movimiento que en la secuencia Speedway, y los resultados muestran el comportamiento esperado:

1. Cuanto más complejo es el movimiento de la secuencia, existe menor correlación temporal entre las imágenes de la secuencia y por lo tanto MCCR ofrece menor beneficio en las reconstrucciones.
2. Si el bit-rate de las transmisiones es muy pequeño, entonces el número de WOIs que son actualizadas en la predicción no es suficiente para obtener una buena reconstrucción de las imágenes. Este efecto se puede observar cuando

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...

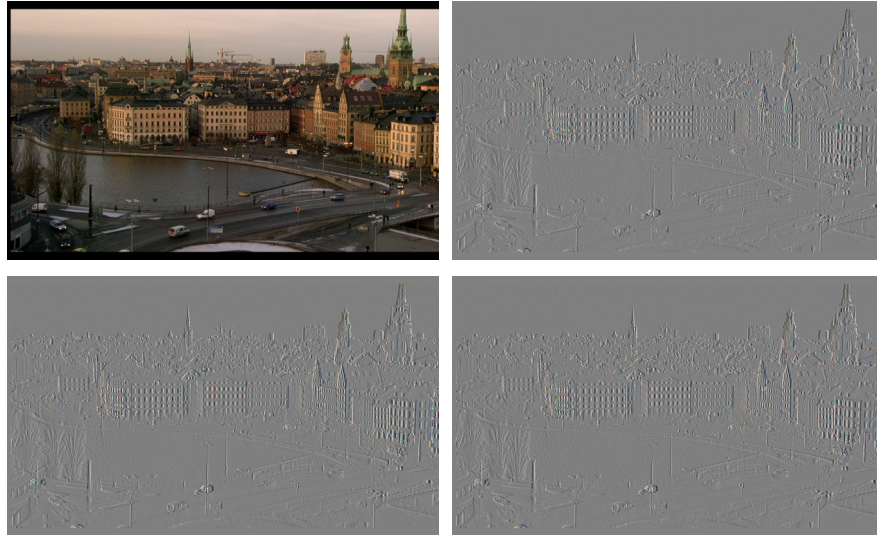


Fig. 1. Frames 3, 4, 5 y 6 de la secuencia Stockholm. Se muestra la imagen 3 y las diferencias que existen en las imágenes 4, 5 y 6, respecto a la imagen 3 de la secuencia. Las diferencias muestran que en esta secuencia existe un movimiento mayor que el de la secuencia Speedway.

utilizamos un bit-rate de 11000 bytes por imagen y puede ser resuelto monitorizando la calidad en el cliente y solicitando una imagen “intra” cuando la calidad de las reconstrucciones se encuentre por debajo de un umbral que esté controlado por el usuario.

La Figura 3 muestra las reconstrucciones que se han obtenido para MCCR y Motion JPEG2000 cuando se transmiten 16000 bytes por imagen de la secuencia Stockholm. Igual que ocurría en Speedway, la calidad visual que proporciona MCCR es superior a la que ofrece Motion JPEG2000.

4 Avances

4.1 Estimación del movimiento con *Optical Flow*

En la primera versión de MCCR hemos estado utilizando una técnica de *block matching* para calcular la estimación de movimiento entre las imágenes consecutivas de la secuencia de vídeo. Hemos estado investigando la posibilidad de mejorar los resultados de MCCR utilizando la estimación del flujo óptico para calcular la estimación del movimiento.

El flujo óptico es el patrón del movimiento de los objetos que aparecen en una escena entre dos frames consecutivos dentro de una secuencia de vídeo, el

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...

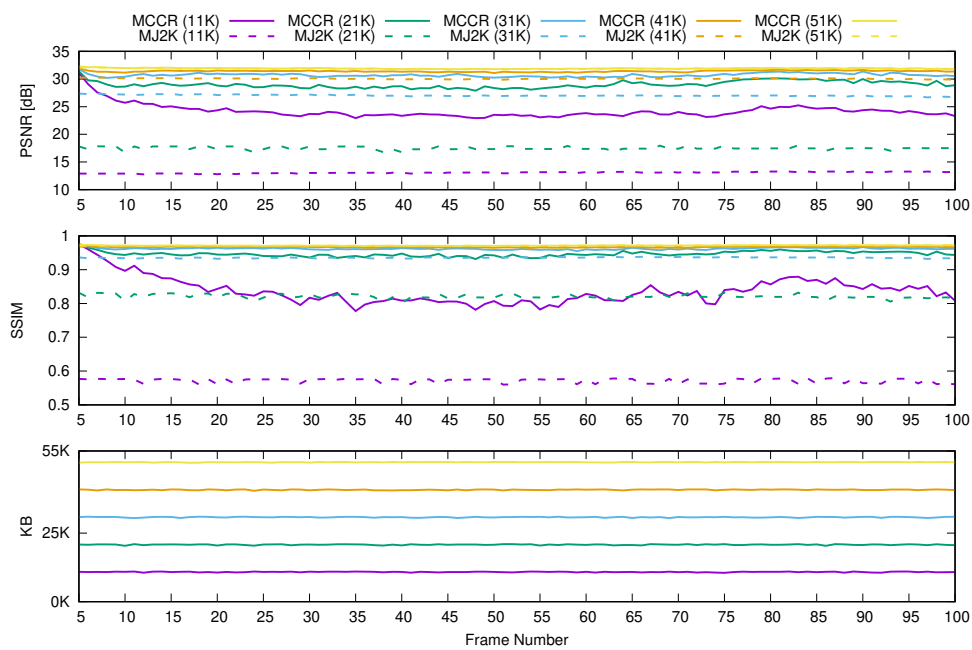


Fig. 2. Calidad de las reconstrucciones de las primeras 100 imágenes de la secuencia Stockholm utilizando MCCR y Motion JPEG2000 (MJ2K). Se han simulado varios escenarios con diferente ancho de banda donde la cantidad de bytes transmitidos por imagen en cada uno de ellos varía desde los 11000 hasta los 51000 bytes. Se han utilizado dos métricas para evaluar la distorsión de las reconstrucciones: PSNR y SSIM.

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...

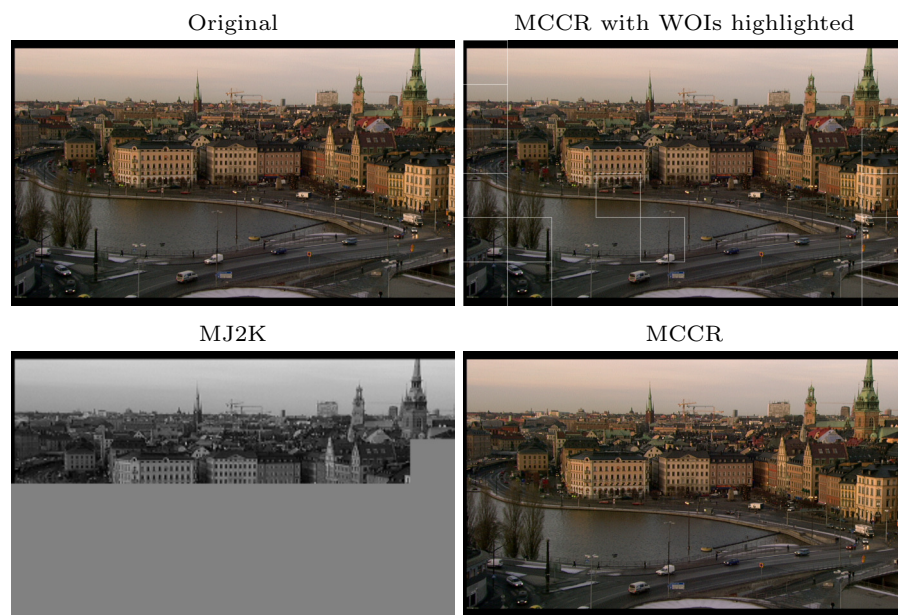


Fig. 3. Reconstrucción de la tercera imagen de la secuencia Stockholm utilizando MCCR y Motion JPEG2000 cuando se transmiten 16000 bytes por imagen. En la esquina superior izquierda se muestra la imagen original, en la esquina superior derecha está la reconstrucción obtenida con MCCR, se han resaltado las WOIs que se han actualizado. En la esquina inferior derecha tenemos la misma imagen pero sin resaltar las WOIs y en la esquina inferior izquierda está la reconstrucción obtenida con Motion JPEG2000.

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...

movimiento detectado puede ser debido al movimiento de los objetos o de la cámara. Se trata de un conjunto de vectores 2D donde cada vector es un vector de desplazamiento que muestra el movimiento de los píxeles desde el primer frame hasta el segundo.

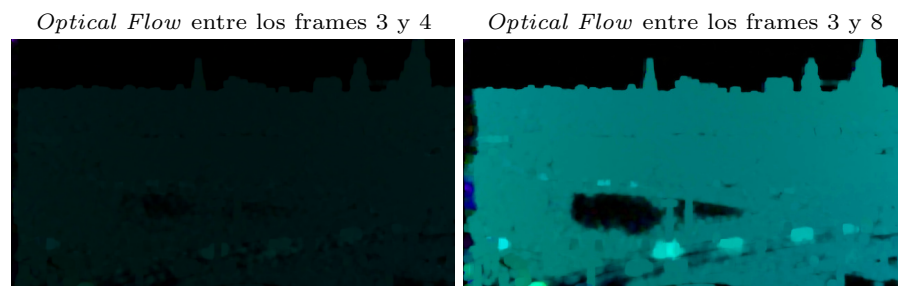


Fig. 4. Ejemplo del cálculo del flujo óptico utilizando el método Farneback entre imágenes de la secuencia Stockholm

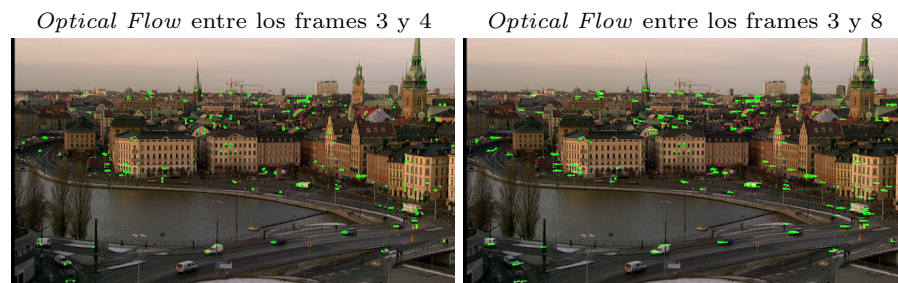


Fig. 5. Ejemplo del cálculo del flujo óptico utilizando el método Lucas-Kanade entre imágenes de la secuencia Stockholm

4.2 Transmisión de secuencias de video 360° utilizando MCCR

Otra de las líneas de investigación que hemos estado explorando, 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

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...

optimizar la transmisión de secuencias de vídeo 360° y utilizar el ancho de banda disponible entre cliente y servidor de manera eficiente.

5 Conclusiones y trabajo futuro

El trabajo que se ha realizado hasta este momento demuestra que MCCR puede llegar a ser una alternativa más eficiente que Motion JPEG2000 cuando se requiere obtener una secuencia de imágenes JPEG2000 con poco movimiento desde un servidor JPIP. Lo que diferencia MCCR de otras propuestas existentes, es que puede ser compatible con cualquier servidor JPIP estándar sin tener que realizar ninguna modificación en el servidor.

Las líneas de investigación relacionadas con MCCR que se plantean como trabajo futuro son las siguientes:

- Mejorar la estimación del movimiento estudiando otros estimadores que puedan mejorar el rendimiento y las reconstrucciones obtenidas actualmente con MCCR.
- Estudiar el comportamiento de MCCR con precintos de menor tamaño. El tamaño de los precintos determina el tamaño de la WOI más pequeña que podemos solicitar al servidor, por lo tanto, en secuencias de imágenes con movimientos complejos, podríamos obtener mejores resultados si el tamaño de los precintos fuese más pequeño.

References

1. Alvaro Luis Bustamante, José M. Molina López, M.A.P.: MIJ2K: Enhanced video transmission based on conditional replenishment of JPEG2000 tiles with motion compensation. *Journal of Visual Communication and Image Representation* pp. 332–344 (May 2011)
2. Devaux, F., Meessen, J., Parisot, C., Delaigle, J., Macq, B., Vleeschouwer, C.D.: A flexible video transmission system based on JPEG 2000 conditional replenishment with multiple references. In: 2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP '07. vol. 1, pp. I-825–I-828 (April 2007). <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2007.366035>
3. Devaux, F., Meessen, J., Parisot, C., Delaigle, J., Macq, B., Vleeschouwer, C.D.: Remote interactive browsing of video surveillance content based on jpeg 2000. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* **19**(8), 1143–1157 (Aug 2009). <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2009.2022777>
4. International Organization for Standardization: Information Technology - JPEG 2000 Image Coding System - Part 1: Core Coding System (2004)
5. International Organization for Standardization: Information Technology - JPEG 2000 Image Coding System - Part 9: Interactivity Tools, APIs and Protocols (2005)
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>

Transmisión de secuencias de imágenes JPEG2000 usando actualización condicional...

7. Naman, A.T., Taubman, D.: A novel paradigm for optimized scalable video transmission based on JPEG2000 with motion. In: 2007 IEEE International Conference on Image Processing. vol. 5, pp. V - 93-V - 96 (Sept 2007). <https://doi.org/10.1109/ICIP.2007.4379773>
8. Naman, A.T., Taubman, D.: Optimized scalable video transmission based on conditional replenishment of JPEG2000 code-blocks with motion compensation. In: Proceedings of the International Workshop on Workshop on Mobile Video 2007. pp. 43-48 (Sept 2007). <https://doi.org/10.1145/1290050.1290061>
9. Naman, A.T., Taubman, D.: Rate-distortion optimized delivery of JPEG2000 compressed video with hierarchical motion side information. In: 2008 15th IEEE International Conference on Image Processing. pp. 2312-2315 (Oct 2008). <https://doi.org/10.1109/ICIP.2008.4712254>
10. Sánchez-Hernández, J.J., García-Ortiz, J.P., González-Ruiz, V., García, I., Müller, D.: Transmission of low-motion jpeg2000 image sequences using client-driven conditional replenishment. In: Proceedings of the International Conference on Signal Processing and Multimedia Applications. pp. 1-6 (July 2011)

Evaluación de computación paralela en un cluster basado en raspberry pi

Teresa Santamaria-López

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

RESUMEN: La evolución de las nuevas tecnologías pone en evidencia la intensificación del uso de diferentes arquitecturas computacionales que puedan brindar mayor confiabilidad y eficiencia en el manejo de grandes volúmenes de datos a alta velocidad. A menudo, los datos requieren procesamiento en tiempo real para apoyar alta respuesta del sistema que puede ser soportada por paradigmas de computación distribuida y paralela. En centros de educación superior de países en vía de desarrollo es complicado contar con tecnología de punta que permita al docente y estudiantes interactuar y aprender con escenarios de alta exigencia dentro del aula. El objetivo de este trabajo es evidenciar el armado, configuración, puesta en marcha y evaluación de un clúster basado en tecnologías de bajo costo, que presenten alternativas de respuesta como soluciones de procesamiento distribuido, portable y que puedan estar en capacidad de satisfacer necesidades de comunidades informáticas específicas. Para esta propuesta se usará como base placas de tipo ARM, específicamente un conjunto de Raspberries PI 3 y Python como lenguaje de programación.

PALABRAS CLAVE: Clúster, computación paralela, ARM, raspberry pi, computación distribuida.

1 Introduction

El conocimiento y manejo de servidores es de considerable importancia en el área de la computación, debido a la iteración constante de grandes cantidades de datos y manejo de recursos tecnológicos, lo cual genera una necesidad en la optimización de espacio, tiempo y coste que permitan consolidar los diferentes servicios que se desee brindar en un sistema informático.

En el mundo de los datos y su interacción con el internet, supone diferentes cambios a nivel tecnológico y logístico, de lo cual surge la necesidad de utilizar una arquitectura que permita manejar la menor cantidad de recursos posibles, y entregue un servicio con eficiencia y eficacia de igual manera o con un margen de error ínfimo en relación con las arquitecturas costosas y de mayor tiempo de configuración y armado presentes en el mercado. La propuesta tecnológica actual de las principales empresas de Internet para responder al reto tecnológico es la implementación de clúster de altas prestaciones [3].

Las aplicaciones paralelas escalables requieren: buen rendimiento, baja latencia, comunicaciones que dispongan de gran ancho de banda, redes escalables y acceso rápido a archivos. Un

Evaluación de computación paralela en un cluster basado en raspberry pi

clúster puede satisfacer estos requisitos usando los recursos que tiene asociados a él. La implementación de un clúster permite a las organizaciones incrementar su capacidad de procesamiento usando tecnología estándar, tanto en componentes de hardware como de software que pueden adquirirse a un costo relativamente bajo de los clústeres [15].

En el presente trabajo se realizará la implementación y evaluación de rendimiento energético y de procesamiento de un clúster de bajo costo, implementado el componente de hardware con 16 placas Raspberry Pi 3, teniendo una distribución del sistema operativo GNU/Linux como sistema operativo de cada placa. Como lenguaje de desarrollo en las interacciones de prueba se seleccionó Python. Para la evaluación del clúster, es importante saber como va a comportarse un servidor sometido a pruebas específicas que permitan dar una idea de lo que es capaz, que el volumen de carga que la plataforma operativa no tenga un crecimiento desmedido que pueda producir lentitud o incluso cortes en los servicios que se evalúan. como se trata de un proyecto práctico para los estudiantes, estas técnicas permiten mejorar la docencia y motiva el aprendizaje

2 Trabajos relacionados

2.1 Clúster

Un clúster es un grupo de múltiples ordenadores unidos mediante una red de alta velocidad, de tal forma que el conjunto es visto como un único ordenador, más potente que los computadores comunes [4].

De un clúster se espera que presente combinaciones de los siguientes servicios [4] [2].

1. Alto rendimiento
2. Alta disponibilidad
3. Balanceo de carga
4. Escalabilidad

Para la construcción de un clúster se debe de tener consideración algunos aspectos relacionados a la arquitectura de los equipos individuales que los conforman, en la tabla 1 se muestra las consideraciones que inciden en el costo al desarrollar un clúster de computadoras [15]

S	Características de hardware	Características de software
Clúster Homogéneo	Todos tienen la misma configuración de hardware	Todos tienen la misma configuración de sistema operativo
Clúster Semihomogéneo	Diversas arquitecturas de hardware	Todos tienen la misma configuración de hardware
Clúster Heterogéneo	Diversas arquitecturas de hardware	Diversos sistemas operativos

Tabla 1: Características para el diseño de un clúster

Para que un clúster funcione como tal, no basta solo con conectar entre sí los ordenadores, sino que es necesario proveer un sistema de manejo del clúster, el cual se encargue de interactuar con el usuario y los procesos que corren en él para optimizar el funcionamiento [11] [8]. Los

Evaluación de computación paralela en un cluster basado en raspberry pi

tipos de clústeres, establecidos de acuerdo con el uso que se dé y los servicios que ofrecen, determinan el significado del término para el grupo que lo utiliza. Los clústeres pueden clasificarse según sus características:

1. HPCC (High Performance Computing Clusters: clústeres de alto rendimiento).
2. HA o HACC (High Availability Computing Clusters: clústeres de alta disponibilidad)
3. HT o HTCC (High Throughput Computing Clusters: clústeres de alta eficiencia).

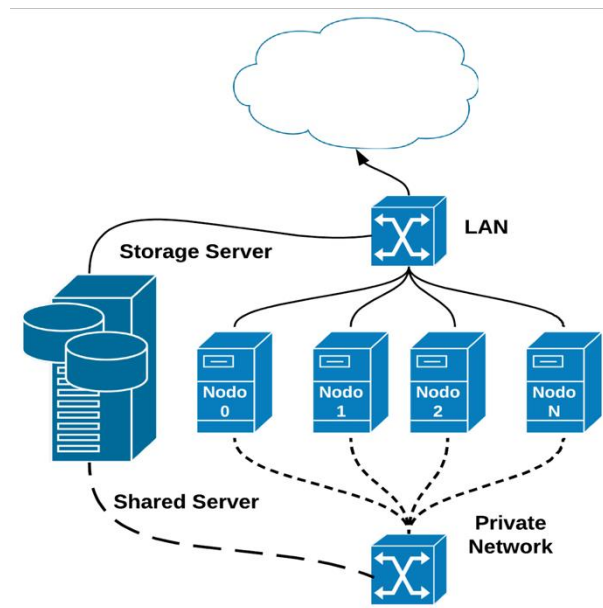


Figura 1: Diseño de un clúster de servidores

2.2 Computación paralela

La computación paralela y de alto rendimiento (HPC) implementada en las plataformas modernas de supercomputación no es nueva, y se remonta a los sistemas de computadoras vectoriales en la segunda mitad de la década de 1970 [5]. La computación paralela es una técnica de programación en la que muchas instrucciones se ejecutan simultáneamente. En la computación paralela, se definen los algoritmos paralelos que pueden ejecutarse simultáneamente en múltiples nodos para beneficiarse de la potencia de computación paralela. Como tal, aumentar los nodos de procesamiento aumentará el rendimiento de los programas paralelos. Un desafío importante en este contexto es el mapeo de algoritmos paralelos en una plataforma informática que consiste en múltiples nodos de procesamiento paralelo. Un algoritmo paralelo se puede asignar de diferentes formas alternativas a los nodos de procesamiento [12]. La clave para la computación paralela es la concurrencia explotable, existe un problema computacional cuando el problema se puede descomponer en subproblemas que pueden ejecutarse de manera segura al mismo tiempo [16].

Evaluación de computación paralela en un cluster basado en raspberry pi

2.3 Tipos de computación paralela

2.3.1 Paralelismo a nivel de bit

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.

2.3.2 Paralelismo a nivel de instrucción

Para aumentar el rendimiento de los computadores es necesario que se puedan ejecutar varias instrucciones en paralelo. Desde 1985 la mayoría de computadoras han explotado el paralelismo a nivel de instrucción implementando la técnica conocida como segmentación, una técnica que promueve una disposición concreta de los recursos de la máquina y una división de la ejecución de las instrucciones en etapas para conseguir un funcionamiento similar al de una cadena de montaje. Esta técnica tiene como simulador didáctico de arquitectura de computadores [1].

2.3.3 Paralelismo de datos

El paralelismo de datos es el paralelismo inherente en programas con ciclos, que se centra en la distribución de los datos entre los diferentes nodos computacionales que deben tratarse en paralelo.

Una dependencia de terminación de ciclo es la dependencia de una iteración de un ciclo en la salida de una o más iteraciones anteriores. Las dependencias de terminación de ciclo evitan la paralelización de ciclos. Los WMS tienen operadores que permiten flujos de trabajo, diseñadores para definir explícitamente el paralelismo de datos en el flujo de trabajo [25].

2.3.4 Paralelismo de tareas

Asigna tareas diferentes a cada uno de los procesadores del sistema, por lo que cada procesador realiza operaciones diferentes entre sí [23].

La computación paralela se ha convertido en el paradigma dominante en la arquitectura de computadores, principalmente en los procesadores multinúcleo. Sin embargo, recientemente, el consumo de energía de los ordenadores paralelos se ha convertido en una preocupación.

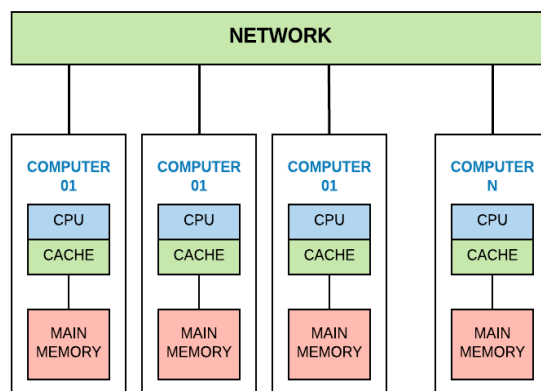


Figura 2: Computación Paralela**2.4 Placas ARM**

Las placas ARM se presentan como los nuevos dispositivos que están cubriendo el mercado de la electrónica, alcanzando un potencial crecimiento en el año 2013, debido que reducen el tiempo de desarrollo de soluciones embebidas. Se presentan como una alternativa de bajo consumo para el desarrollo de plataformas interfaz hombre-máquina, en los últimos años se ha desarrollado toda una nueva industria de tarjetas de desarrollo electrónicas para sistemas embebidos, es decir, para sistemas móviles que muchas veces corren de manera automática e independientemente [19].

2.5 Raspberry Pi

Raspberry Pi es una computadora de una sola placa que tiene la misma capacidad que una PC de escritorio. Raspberry Pi utiliza el Broadcom SoC, que contiene una GPU Videocore4 y un núcleo de CPU de máquina RISC avanzada (ARM) de 64 bits, específicamente ARM Cortex - A53. que corre a 1.2 GHz con 1 GB de RAM. El sistema operativo de la Raspberry Pi es Raspbian, que es una versión de GNU Linux, fue desarrollada con el objetivo de estimular la enseñanza de informática [18].

2.6 Computación Distribuida

La computación distribuida o informática en malla es un modelo para resolver problemas de computación masiva utilizando un gran número de ordenadores organizados en clústeres incrustados en una infraestructura de telecomunicaciones distribuida. La enseñanza de la computación distribuida debe abordar temas más allá de lo estrictamente tecnológico. Casi por definición, la computación distribuida tiene dos aspectos que pueden no encontrarse en la enseñanza básica de TI, pero son fundamentales para los sistemas distribuidos: escala y colaboración [13]. La computación distribuida puede admitir aplicaciones con recursos adicionales al tiempo que introduce una mayor complejidad [7].

2.7 Metodología

Para el desarrollo del proyecto se determinó que esta investigación tiene un diseño de clase cuasi-experimental, donde se ha manipulado intencionalmente la variable independiente (aplicaciones paralelas) para verificar el efecto y relación con la variable dependiente (rendimiento). En este caso, los grupos de estudio son las placas Raspberry Pi con sus procesadores multinúcleo embebidos. [14] [22].

El proceso experimental entonces se definió a través del cumplimiento de los siguientes pasos:

- Evaluación de ventajas y de ventajas de placas ARMM disponibles en el mercado para la realización del proyecto.
- Se realizó una comparación inicial entre la mayoría de las placas ARM disponibles para adquirir. Por cuestiones de costo y acceso a los dispositivos se redujo la comparativa a los dispositivos raspberry pi, para lo cual se evaluó sus características de

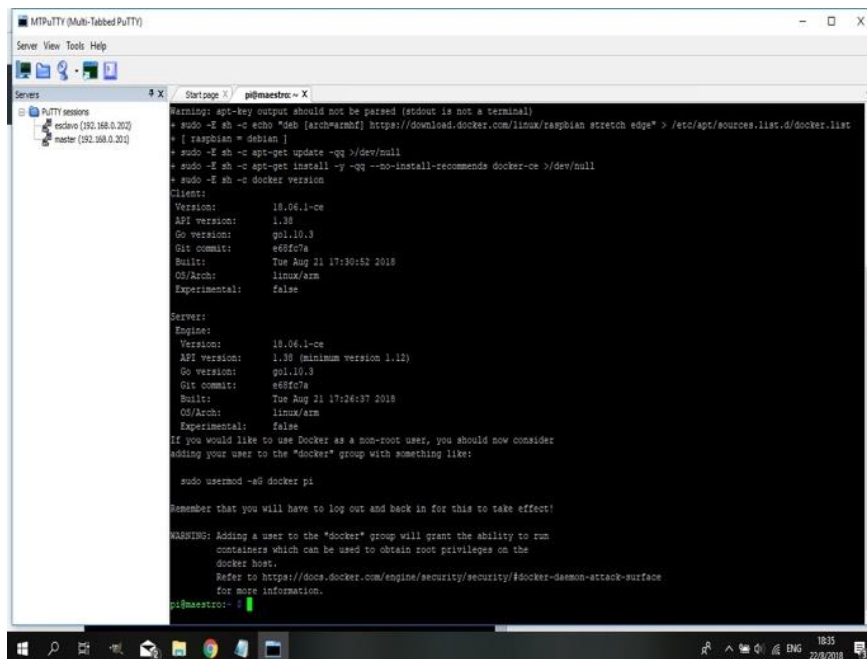
Evaluación de computación paralela en un cluster basado en raspberry pi

hardware y compatibilidad con los sistemas operativos a utilizar. Ver tabla comparativa de los últimos tres diseños de la placa [21].

- Selección de un modelo específico de placa con la cual se creará los nodos del clúster.
- En la tabla se puede verificar la revisión que se realizó sobre los últimos tres modelos de la placa Raspberry Pi, por precio y acceso se seleccionó el modelo B+.
- Armado del clúster, tomando consideraciones de diseño de la arquitectura de comunicaciones y selección del sistema operativo que gobierne en los nodos y el equipo máster [6].
- De acuerdo a las necesidades de velocidad de transmisión de datos se seleccionó un router cisco modelo y como sistema operativo de los nodos se escogió Raspbian [17].

3 Resultados

Pruebas de desempeño del cluster con un solo nodo y con todos los nodos del diseño propuesto.



```

Warning: apt-key output should not be passed (stdout is not a terminal)
+ sudo -E sh -c echo "deb [arch=armhf] https://download.docker.com/linux/raspbian stretch edge" > /etc/apt/sources.list.d/docker.list
+ [ raspbian = debian ]
+ sudo -E sh -c apt-get update -qq >/dev/null
+ sudo -E sh -c apt-get install -y -qq --no-install-recommends docker-ce >/dev/null
+ sudo -E sh -c docker version
Client:
Version:      18.06.1-ce
API version:  1.38
Go version:   go1.10.3
Git commit:   e68fc7a
Built:        Tue Aug 21 17:30:52 2018
OS/Arch:     linux/arm
Experimental: false

Server:
Engine:
Version:      18.06.1-ce
API version:  1.38 (minimum version 1.12)
Go version:   go1.10.3
Git commit:   e68fc7a
Built:        Tue Aug 21 17:26:37 2018
OS/Arch:     linux/arm
Experimental: false

If you would like to use Docker as a non-root user, you should now consider
adding your user to the "docker" group with something like:

  sudo usermod -s docker pi

Remember that you will have to log out and back in for this to take effect!

WARNING: Adding a user to the "docker" group will grant the ability to run
containers which can be used to obtain root privileges on the
docker host.
Refer to https://docs.docker.com/engine/security/security/#docker-daemon-attack-surface
for more information.

pi@maestro:~$

```

Figura 3: Instalación del docker

Evaluación de computación paralela en un cluster basado en raspberry pi

```

top - 04:42:55 up 42 min, 1 user, load average: 5.23, 5.66, 4.60
Tasks: 112 total, 1 running, 60 sleeping, 3 stopped, 0 zombie
%Cpu(s): 0.9 us, 2.2 sy, 0.1 ni, 77.5 id, 19.0 wa, 0.0 hi, 0.3 si, 0.0 st
KiB Mem : 949444 total, 175824 free, 178940 used, 594680 buff/cache
KiB Swap: 102396 total, 102396 free, 0 used. 686660 avail Mem

  PID USER      PR  NI  VIRT  RES  SHR  S  %CPU  %MEM     TIME+ COMMAND
 8164 root        20   0     0    0    0   0  I   8.9   0.0   1:03.51 kworker/0:3
  518 root        20   0 1051732 83168 27556  S   2.3   8.8   2:15.40 dockerd
 3723 root        20   0 212208 49348 26908  S   2.0   5.2   1:36.15 Plex Media Serv
20817 pi          20   0   8108  3284  2804  R   1.3   0.3   0:00.06 top
  540 root        20   0 980428 27888 14192  S   1.0   2.9   0:25.14 docker-containe
 3970 root        20   0 142840 23108 18564  S   0.7   2.4   0:06.39 Plex DLNA Serve

```

Figura 3: Listado de procesos

Características	Raspberry PI 2 Modelo B	Raspberry PI 3 Modelo B	Raspberry PI 3 Modelo B+
S	Broadcom BCM 2836 (CPU + GPU + DSP + SDRAM + Puerto USB)	Broadcom BCM 2837 (CPU + GPU + DSP + SDRAM + Puerto USB)	Broadcom BCM 2837 (CPU + GPU + DSP + SDRAM + Puerto USB)
CPU	900 MHz quad- core ARM Cor- tex A7	1.2 GHz 64-bit quad-core ARMv8	1.4 GHz 64-bit quad-core ARMv8
Juego de ins- trucciones	RISC de 32 bits	2RISC de 64 bits	RISC de 64 bits
Memoria	512 MB	1GB	1GB
Conectividad de Red	10/100 Ether- net (RJ-45) via hub USB	10/100 Ether- net (RJ-45) via hub USB, 63 Wifi 802.11n, Bluetooth 4.1	10/100/1000 Ethernet (RJ- 45) via hub USB Max, 300Mbits/s, 63 Wifi

Evaluación de computación paralela en un cluster basado en raspberry pi

										802.11n/ac, Bluetooth 4.2 BLE
Consumo ener- gético	800	mA	(4.0	800	mA	(4.0	800	mA	(4.0	
	W)			W)			W)			

Tabla 2: Comparación de modelos de placas Raspberry Pi 2 y 3

4 Conclusiones

Para informar la discusión sobre la instrucción de computación paralela, se necesita una herramienta de evaluación que mida consistentemente la comprensión del estudiante de los patrones fundamentales del diseño paralelo. En una serie de artículos, Mattson, et al. han desarrollado un lenguaje de patrones para la programación paralela [15]. Lo más notable es el primer espacio de diseño, Finding Concurrency, que "se ocupa de estructurar el problema para exponer la concurrencia explotable. El diseñador que trabaja en este nivel se centra en cuestiones algorítmicas de alto nivel y las razones del problema para exponer la concurrencia potencial". Mattson y col. también afirman que identifica la concurrencia explotable.

Bibliografía

- [1] Abreu González, A. Simulador didáctico de arquitectura de computadores.
- [2] Barroso, L. A., Clidaras, J., and Holzle, U. The datacenter as a computer: An introduction to the design of warehouse-scale machines. Synthesis lectures on computer architecture 8, 3 (2013), 1–154.
- [3] Cloutier, M. F., Paradis, C., and Weaver, V. M. A raspberry pi cluster instrumented for fine-grained power measurement. Electronics 5, 4 (2016), 61.
- [4] Delgado, M., Porter, M. E., and Stern,
- [5] S. Clusters, convergence, and economic performance. Research policy 43, 10 (2014), 1785–1799.
- [6] Dongarra, J., Foster, I., Fox, G., Grop, W., Kennedy, K., Torczon, L., and White, A. Sourcebook of parallel computing, vol. 3003. Morgan Kaufmann Publishers San Francisco, 2003.
- [7] Dordoigne, J. Redes informáticas-Nociones fundamentales (5ª edición):(Protocolos, Arquitecturas, Redes inalámbricas, Virtualización, Seguridad, IP v6...). Ediciones ENI, 2015.
- [8] EDINGER, J., SCHÄFER, D., BREITBACH, M., AND BECKER, C. Developing distributed computing applications with tasklets. In Pervasive Computing and Communications Workshops

Evaluación de computación paralela en un cluster basado en raspberry pi

- (PerCom Workshops), 2017 IEEE International Conference on (2017), IEEE, pp. 94–96.
- [10] FERSI, G. A distributed and flexible architecture for internet of things. *Procedia Computer Science* 73 (2015), 130–137.
- [11] Gupta, V., Kaur, K., and Kaur, S. Developing small size low-cost software-defined networking switch using raspberry pi. In *Next-Generation Networks*. Springer, 2018, pp. 147–152.
- [12] Gürbüz, H. G., and Tekinerdogan, B. Software metrics for green parallel computing of big data systems. In *Big Data (BigData Congress)*, 2016 IEEE International Congress on (2016), IEEE, pp. 345–348.
- [13] Hella, L., Jarvisalo, M., Kuusisto, A., Laurinharju, J., Lempinen, T., Luosto, K., Suomela, J., and Virtema, J. Weak models of distributed computing, with connections to modal logic. *Distributed Computing* 28, 1 (2015), 31–53.
- [14] Hernández Sampieri, R., and Fernández Collao, C. *Libro metodología de la investigación sampieri*. Libro
- [15] Jadeja, Y., and Modi, K. Cloud computing-concepts, architecture and challenges. In *Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET)*, 2012 International Conference on (2012), IEEE, pp. 877–880.
- [16] Mattson, T. G., Sanders, B., and Masingill, B. *Patterns for parallel programming*. Pearson Education, 2004.
- [17] Mustaffa, I. B., and Khairul, S. F. B. M. Identification of fruit size and maturity through fruit images using opencv-python and raspberry pi. In *Robotics, Automation and Sciences (ICORAS)*, 2017 International Conference on (2017), IEEE, pp. 1–3.
- [18] Muzammil, M. J., and Zaidi, S. Application of image processing techniques for the extraction of vehicle number plates over arm target board. In *Computer, Control & Communication (IC4)*, 2013 3rd International Conference on (2013), IEEE, pp. 1–5.
- [19] Pahl, C., Helmer, S., Miori, L., Sanin, J., and Lee, B. A container-based edge cloud paas architecture based on raspberry pi clusters. In *Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)*, IEEE International Conference on (2016), IEEE, pp. 117–124.
- [20] Parraga Parraga, J. V., López, C., and Fernando, L. Desarrollo de un algoritmo que permita paralelizar imágenes 3d sobre tecnología nvidia y opencl. B.S. thesis, 2017.
- [21] Stratton, J. A., Rodrigues, C., Sung, I.-J., Obeid, N., Chang, L.-W., Anssari, N., Liu, G. D., and Hwu, W.-m. W. Parboil: A revised bench-

Evaluación de computación paralela en un cluster basado en raspberry pi

mark suite for scientific and commercial throughput computing. Center for Reliable and High-Performance Computing 127 (2012).

- [22] Watanabe, E. N., and Braghetto, K. R. Improving parallelism in data-intensive workflows with distributed databases. In 2018 IEEE International Conference on Services Computing (SCC) (2018), IEEE, pp. 209–216.

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática en los estudiantes universitarios caso Ecuador.

Tobar Farias Galo Wilfrido¹

¹ universidad de Almería (España), estudiante Doctorado en Informática, Máster en Educación Informática, Guayaquil-Ecuador
orcid.org/0000-0002-2746-031X
galotobar@gmail.com, galo.tobarf@ug.edu.ec

Abstract. En el estudio sobre el avance de las matemáticas los sistemas de seguridad basados en la criptografía han pasado por diferentes etapas para llegar lo que es actualmente al manejo de algoritmos complejos y sistemas de llaves de seguridad informática. Se le considera el intercambio de información de manera oculta entre un emisor y un receptor, es el arte para codificar y a la vez de descodificar mensajes burlando a intrusos. En algunas partes este documento se analiza el sistema matemático empleados para los lenguajes de programación en el desarrollo de pantallas en Java y su incidencia en los jóvenes para desarrollar inicialmente algoritmos básicos de programación a medida que comienzan a incrementar su nivel matemático en el desarrollo de algebra lineal, matrices y logaritmos. En este artículo se da un breve repaso de su historia, la importancia de las matemáticas para la codificación y descodificación de manera conmutativa, las dos presentan diferentes interpretaciones de los mensajes, el paso a las encriptaciones de las llaves públicas como privadas con la innovación de los algoritmos en la criptografía desarrollada en la no conmutativa, permitiendo limitar hasta un cierto punto la información para los destinatarios. Las técnicas de seguridad es requisito en las empresas por la confidencialidad y la integridad de este por aspectos que influyen a diario a las encriptaciones de mensajes esto se debe a los robos de información, estafas valiéndose de las tarjetas de crédito procediendo a las extorsiones de cantidades de dinero según lo importante para la recuperación de los mismos, por ello, la importancia de recurrir e innovar cada día a las encriptaciones disfrazando los mensajes a códigos encubiertos. Cifrar el contenido del mensaje dependerá de cuán importante la organización el individuo considere a qué nivel de protección tendrá que adquirir en equipos de seguridad tecnología.

Keywords: Matemáticas, Criptografía, Conmutación de datos.

1 Antecedentes de la Metodologías para la enseñanza de matemáticas

1.1 Aprehensión de las matemáticas

Las matemáticas son fundamentales para el desarrollo de la criptografía, los motivos por los que recae su valor, es que está presente en todos lados y se usan cotidianamente, para encontrar diferentes formas de soluciones a un problema matemático, nos contribuye a ser más observador y analizar distintos tipos de dilemas, en cuanto se sabe la solución se obtiene un nuevo conocimiento.

Como ya se ha expresado en este trabajo escrito, las matemáticas es una asignatura categorizada como compleja y de poca práctica por parte de los grupos estudiantiles en la educación media y superior. Se motiva a los estudiantes a la vinculación de esta área con otras para el origen de un conocimiento interdisciplinario y que posteriormente salga a la luz el interés de los aprendices.

La poca aprehensión de las matemáticas se registra por la carencia de atracción de esta. Esto se debe que, desde la formación escolar, los alumnos están condicionados a relacionar las matemáticas solo con elementos cuantitativos y sin el contexto del estudiante.

Es decir, que cada estudiante tiene concepciones diferentes y esto es debido al ambiente que lo rodea, por lo tanto, se estaría creando una imaginación y no una reciprocidad con su propio contenido y esto puede crear espacios intelectuales.

Así como se dicta en Aportes para la enseñanza de la matemática: “La resolución de problemas de la posibilidad a los estudiantes de enfrentarse a situaciones desafiantes antes de que tengan problemas para su solución variadas habilidades”. Cabe recalcar que la actitud teórica puede intervenir lecturas, exposiciones donde el docente suscite la búsqueda de información: “recuerde que la lectura, indagación específica y exposición sobre temas relacionados con la Matemática, son otro tipo de actividades que también apoyan el aprendizaje y la aplicación de los conocimientos.”

Si se aplicaran estas actitudes educacionales, el alumnado apreciaría el contenido matemático y conllevaría al dominio de ejercicios ya sean arduos o no complejos. Donde, se puede instalar conexiones y vinculaciones acorde a su realidad, mostrando un desempeño en cuanto al conocimiento. Entonces el estudiante se sentirá capaz de adquirir y desarrollar enseñanzas de aprendizaje, reforzando su discernimiento en la asignatura.

Desde otra perspectiva, el vacío de las matemáticas también se evidencia, porque los estudiantes cuando se encuentran en modo de preparación básica, sólo se enfrentan a fórmulas y procesos exactos, donde en la suma de los casos se requiere la memorización, esto es un factor limitante para éste.

Otro causal también se debe a que los estudiantes sólo pueden solucionar ejercicios por el uso inadecuado de vías tecnológicas como: calculadoras científicas, aplicaciones de celulares, páginas web, etc. No obstante, la clave está en trabajar las situaciones cotidianas y los problemas presente en los libros de texto desde un nuevo enfoque, apo-

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

yadas en las herramientas tecnológicas disponibles”. Dejando a un lado la su razonamiento y conocimientos. Es por esto, que en la Educación Superior encuentran un choque referente a estos estándares. Sin embargo, órganos educativos, se esfuerzan por el uso de herramientas tecnológicas para las asignaturas, por lo tanto, se recomienda que este se extienda a uno pedagógico y que docentes se preocupen por instruir a sus estudiantes para el buen uso de la tecnologías para completar y plantar conocimientos matemáticos, ya que usualmente en páginas web existen cursos online, problemas resueltos, libros en línea que ayudan en el proceso de aprendizaje del estudiante, siempre motivando a los mismos; tal como lo señala Rojas.

(Rojas Cairampoma, Marcelo , 2015) afirma:

“Se considera que los recursos informáticos a utilizar no son los que marcarán la diferencia, sino las actividades planificadas por el profesor en su interrelación y que serán desarrolladas por los estudiantes en el proceso de enseñanza aprendizaje utilizando dichos recursos”.

Para el Ministerio de Educación del Ecuador, sugiere que son importante estas nuevas tecnologías ya que podrán encontrar diversos métodos para resolución de problemas que al mismo tiempo los alumnos hagan funcionar su sistema de aprendizaje;

Es importante que utilice varios recursos para el trabajo con sus estudiantes, como la calculadora (básica o científica) o un software de cálculo, geometría o estadística. Muchas de estas páginas de Internet incluyen también estrategias y metodologías para abordar ciertos temas.

1.2 Metodologías para la enseñanza de matemáticas

En los últimos años, la educación media se ha esforzado en implantar nuevas metodologías innovadoras para una correcta y eficaz enseñanza de las matemáticas. Dejando a un lado las técnicas tradicionales ya que la enseñanza tradicional no capacita al estudiante para hacer una lectura del contexto de las cuales han sido de mayor utilización por estas instituciones para formar jóvenes matemáticos. Es donde se busca que cada docente y alumnos se esfuercen por dominar estas técnicas. Entre ellas se encuentra el Método Singapur, este se caracteriza por comenzar desde la óptica de los estudiantes.

Dividiéndose primero por la fase concreta, quiere decir que, el estudiante va a trabajar con elemento que esté a su alcance y que al propio tiempo sea manejable por el actor del conocimiento.

El apartado de la denominada fase pictórica, donde pasará a dibujarlos y posteriormente culminaría con la fase abstracta por medio de simbologías. Este método tiene como fin captar los disimiles niveles de complejidad. Este método hace hincapié en que el estudiante sea el propio autor de su conocimiento y el que desarrolle su mentalidad, reflexionando para encontrar la solución de los ejercicios matemáticos y le da protagonismo al proceso y al comportamiento exhaustivo del alumno, mientras que el docente es un mecanismo secundario durante este transcurso.

Es así como este método proveniente de Singapur (un país asiático) ha revolucionado alrededor del mundo, siendo tendencia en unidades educativas a nivel global.

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

Como lo ya se ha explicado con anterioridad es que se destaca por llevar a jóvenes a ser reflexivos en el área de las matemáticas. En los Estados Unidos, el método Singapur ha sido una tendencia creciente y quienes lo promueven aseguran obtener excelentes resultados”.

La incorporación de bosquejos y figuras ha hecho que sea apropiado para dar una buena visión a los estudiantes quienes practican este método, abriéndole una infinidad de caminos para que estos desplieguen sus capacidades de imaginación analizando desde distintos conceptos. Esta forma de enseñanza en el continente oriental es muy usada ya que de acuerdo con PISA (Programa Internacional para la Evaluación de los Estudiantes), países como: Singapur, Corea del Sur, China y Japón; tuvieron puntuaciones muy altas en áreas de matemáticas y ciencias y no sólo eso:

En el TIMSS de matemática 2011, Singapur obtuvo en 4º grado de primaria a, un promedio de 599 puntos y en 8º grado de primaria, un promedio de 593 puntos, siendo el puntaje de referencia TIMSS de 500 puntos en ambos grados. Además, se destaca que Singapur se posicionó en segundo y tercer lugar, respectivamente de un total de 60 sistemas educativos a nivel internacional, en donde la prueba fue aplicada.

Demuestra, que este país del lado oriental, se enfocan mucho en la preparación de estudiantes en cuento a lo académico, comenzando desde los variados niveles de educación. Finalmente obtienen buenos resultados.

Es por ello por lo que el modo de que las y los estudiantes aprendan es que todos deben de concebir el concepto y el docente no avanza hasta que todos estén en el mismo nivel de aprendizaje. También, las familias cumplen un rol fundamental ya que ellos se desenvuelven como impulsores para la formación de sus representados, reconociendo sus errores, el proceso que hicieron, los aciertos obtenidos, validando el brío empleado para obtener a la solución. Los padres se enfocan en convertir acciones cotidianas en charlas matemáticas (además de usar estos ejemplos para ejercicios matemáticos), para que los estudiantes se sientan familiarizado con la asignatura en su formación académica.

La igualdad, una de las misceláneas particularidades que tiene este modelo de enseñanza, de modo que, los aprendices no están divididos en segmentos por sus niveles de intelectualidad, al contrario, todos están unidos y todos van aprendiendo a un ritmo paralelo. Sin que los alumnos se vean afectados. Tal como lo expresa Barría en BBC “Todos los chicos estudian al mismo tiempo el principio básico que deben aprender en la clase y ninguno da el siguiente paso hasta que todos sus compañeros lo hayan aprendido”.

Desde otro ángulo, se encuentra el método Modelación matemática, este nace como una nueva forma de enseñar a través de interrogantes y la anexión con otras áreas temáticas. Es decir, el alumno y/o la alumna tendrán la posibilidad de escoger una asignatura y posteriormente de ella un tema, la que más le interese. Por consiguiente, el estudiante propondrá preguntas y procederá a realizar una investigación y finalmente con la supervisión del profesor construirá un modelo matemático. Esto hará que el alumnado cree sus conocimientos de una manera interactiva y audaz. “considerando que el alumno no sólo aprende matemática inserta en el contexto de otra área de conocimiento, sino que también despierta su sentido crítico y creativo”

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

Este método, se defiende porque otras asignaturas pueden integrarse a las matemáticas, en el cual el estudiante adquiere conocimientos leyendo, formulando cuestiones, interpretaciones y resolviendo problemas. La redacción es el primer órgano de esta técnica de enseñanza porque mediante la investigación el grupo estudiantil redactará de manera reflexiva y creativa para que nazca un modelo o problema de las matemáticas. No obstante, la modelación matemática se ajusta a cualquier nivel de educación, donde el profesor da paso a desarrollar y a orientar.

Este tipo de enseñanza influye a que el estudiante capte las matemáticas y lo asimile como un área no complicada, ya que se moldea a sus afinidades e intereses propios. “El proceso de enseñanza-aprendizaje para los alumnos requiere orientación adecuada, formalización y organización de los contenidos, así como estímulos a la creatividad”

A lo largo de este trabajo se ha estado tratando sobre los componentes que efectúan la carencia de las matemáticas en los estudiantes de la Educación Superior, consecuentemente, se procedió a realizar una encuesta para sustentar y demostrar los argumentos escritos. La encuesta fue dirigida exclusivamente a una población determinada, obtenida por la siguiente cuantificación. Para contextualizar, se explicará las definiciones que están relacionadas a base este concepto.

1.3 Introducción a la criptografía Matemática

Desde la referencia de un libro titulado “Nuevas Direcciones en Criptografía” publicado en 1976 por Whitfield Diffie y Martin Hellman, formula el concepto de un sistema de encriptación de llave pública, en el cual se describen definiciones y objetivos básicos en el ámbito de las matemáticas y las ciencias de la computación digital. La principal contribución de D-H en esta publicación fue la definición de una Criptosistema de clave pública (CCP) y de sus componentes asociados.

La Clave de un CCP consiste en dos partes, una clave privada y una clave pública, que se obtiene aplicando un algoritmo de creación de clave sobre clave privada. Para cada par (clave pública y clave privada) hay un algoritmo de encriptación y su correspondiente algoritmo de decrepitación. El algoritmo de encriptación corresponde a clave pública es de público conocimiento y de fácil computar. La clave privada es la información atajo para la función clave pública, ya que sin esa información de atajo es muy difícil de computar la función inversa de clave pública.

Diffie y Hellman describieron un método de clave pública para compartir cierto material de manera segura por medio de un canal inseguro. Su método fue llamado intercambio de clave Diffie – Hellman, el cual se basa en la idea de que el problema del logaritmo Discreto (PLD) es difícil de resolver.

El intercambio de clave Diffie – Hellman resuelve la siguiente temática. Ana y Bruno usan la misma clave para encriptar que para desencriptar el mensaje. Todos sus medios de comunicación son inseguros, es decir que cualquier información que ellos intercambien será visto por Inés. ¿La pregunta que se plantea ante tal situación será que Ana y Bruno puedan intercambiar información sin que Inés lo sepa? Diffie y Hellman ante la dificultad del PLD, plantearon la siguiente solución.

El primer paso es que Ana y Bruno se pongan de acuerdo en un primo grande p , y un entero no nulo g , de preferencia que sea un primo grande, luego cada uno debe de

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

elegir un número que será secreto, Ana elige a y Bruno b . A continuación, su enunciado matemático.

$$\underbrace{A \equiv g^a(\text{mod } p)}_{\text{Computo de Ana}} \quad \text{y} \quad \underbrace{B \equiv g^b(\text{mod } p)}_{\text{Computo de Bruno}}$$

Luego intercambian esta información, Ana le envía A a Bruno, y Bruno B a Ana, haciendo esto Ana y Bruno, sus claves siguen siendo inseguras, por consiguiente, la clave de Ana y Bruno reside en el siguiente problema (más sencillo).

El algoritmo de Diffie – Hellman nos proporciona un método para compartir una clave secreta a través de un medio público, no es estrictamente un CCP. El primer CCP conocido fue el RSA en 1978, pero el CCP descrito por Taher ElGamal es de 1985 el cual está más relacionado con el PLD y el algoritmo de Diffie – Hellman. Las claves y los algoritmos en el caso particular del CCP de ElGamal Ana necesitara un número primo p grande para el cual el PLD sea difícil y un elemento g módulo de p de orden primo y grande. Luego se elige un número secreto a que será por consiguiente su clave privada.

$$A \equiv g^a(\text{mod } p)$$

(GReAT, 2015) sostiene que:

“La existencia de una campaña de ataques a entidades financieras, que aún continúa, y que se bautizó como Carbanak. Cuyo objetivo es que el atacante busque información, sino dinero, hablamos propiamente de ciberdelincuencia. La víctima es directamente la institución financiera, a través de transferencias por la red SWIFT (lo que ubica este ataque en el contexto de este proyecto), utilizando múltiples recursos para conseguir el robo de cantidades al parecer prefijadas. Una vez conseguido el objetivo, la víctima es abandonada y se eliminan los rastros”. (p.71).

La relación que existe entre ElGamal y el problema de Diffie – Hellman es el siguiente: Fijar un primo p y una base g para usar la encriptación de ElGamal.

A través de la criptografía la información puede ser protegida contra el acceso no autorizado, su interceptación, su modificación y la inserción de información extra.

(Hewlett, P, 2016) afirma que:

“El robo interno de datos y los ataques de malware encabezan la lista de problemas más relevantes para los ejecutivos de seguridad. Una de las principales conclusiones del estudio “The State of Cybersecurity and Digital Trust 2016” es que el 69% ha experimentado un robo o intento de robo de datos por parte de sus empleados en los últimos 12 meses, siendo los sectores de medios de comunicación y las TIC los más afectados por este hecho, con un 77%. La investigación demuestra, además, cómo la falta de presupuesto para la contratación de talento experto en ciberseguridad y empleados bien formados está dificultando la habilidad de las organizaciones para defenderse de estos ataques”. (pp.1-2)

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

Por lo tanto, proporciona un conocimiento para que los profesionales de seguridad tengan un criterio en la elección entre un algoritmo criptográfico globalmente conocido u otro, sin descartar la posibilidad diseñar e implantar uno propio.

En la parte inferior se encuentra la resolución del ejercicio en donde podemos determinar que la clave privada es $k_m=2$ y a través de esta se pueden comunicar ya que ambos tienen el mismo código. La persona que quiere interceptar esta comunicación si bien es cierto va a tener los datos públicos tanto de g como p , pero al no tener y factor x no puede llegar a tener el valor que arroja a los dos comunicadores principales.

$k = g^x \pmod{p}$

Persona A

Los datos públicos los tiene A y B
 Dato publico $g = 2$
 Dato publico $p = 23$
 Base $x = 15$
 Desarrollamos la fórmula $k = g^x \pmod{p}$
 $k = 2^{15} \pmod{23}$
 $k = 32768 \pmod{23}$
 $k = 16$

Para comprobar que 16 es el numero
 ka se realiza una división, resolución

32768	23
32752	1424
16	

Para hallar la clave privada se saca un k_m ,
 para esto se intercambia los resultados el de k_b
 migra a k_a y el de k_a migra a k_b .
 $k_m = ka^x \pmod{p}$
 $k_m = 8^{15} \pmod{23}$
 $k_m = 35.184.372.088.372$
 Comprobación para clave privada
 35.184.372.088.332
 35.184.372.088.330
 Clave de descripción
 $k_m = 2$

Persona B

Los datos públicos los tiene A y B
 Dato publico $g = 2$
 Dato publico $p = 23$
 Base $x = 3$
 Desarrollamos la fórmula $k = g^x \pmod{p}$
 $k = 2^3$
 $k = 8^3 \pmod{23}$
 $k = 8$

Para comprobar que 8 es el numero
 ka se realiza una división, resolución

8	23
0	0,34782

Para hallar la clave privada se saca un k_m , para esto se
 intercambia los resultados el de k_a migra a k_b y el de k_b
 migra a k_a .
 $k_m = ka^x \pmod{p}$
 $k_m = 16^3 \pmod{23}$
 $k_m = 4096$
 Comprobación para clave privada

4096	23
4094	178
2	

Clave de descripción
 $k_m = 2$

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

La criptografía clásicamente escondía el mensaje y el receptor tenía que dedicarse al tipo de clave enviada y el tiempo que ocupaba descifrarlo. La criptografía moderna permite el cambio a métodos de cálculos rápidos, estabilidad y seguridad.

El avance matemático dio paso a los sistemas seguros criptográficos. Encriptaciones que se volvieron factores como cifrarlo para el público, por los avances de algoritmos. En esta etapa se desarrolló los criptosistemas como públicos, cuya clave se mantiene en secreto.

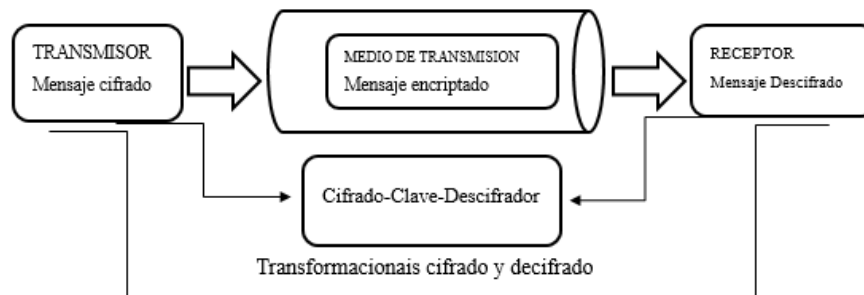


Fig. 1. La figura muestra el proceso de transmisión de los datos en una comunicación simple entre el transmisor y receptor.

Las claves, transformaciones de claves, espacios de textos cifrados, espacios claves, espacio de mensajes, llevan procesos donde se debe codificarse de manera correcta. Las codificaciones permiten que los códigos sean formulados mediante las pautas necesarias para llevar un correcto proceso de encriptación. Como indica (YEISON, 2016).

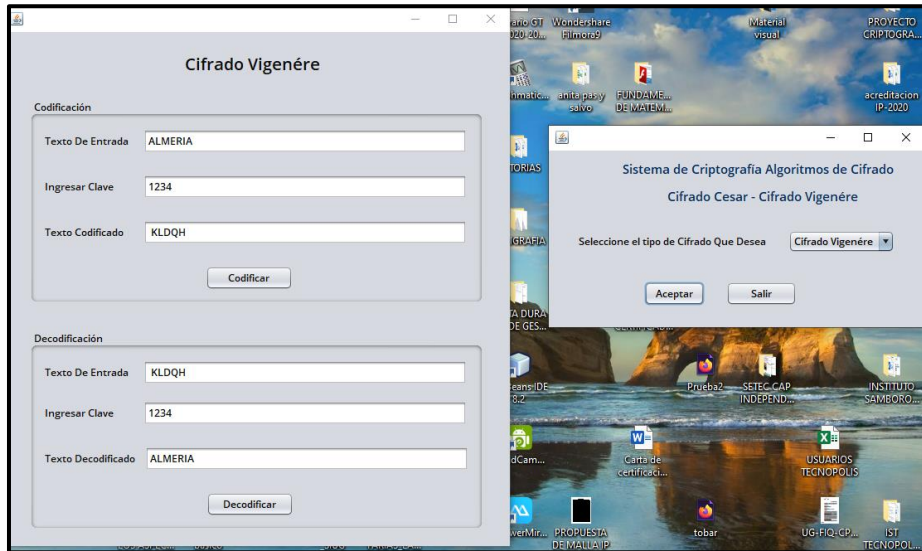
Las codificaciones son las transformaciones de las formulaciones de los mensajes a través de las normas o reglamentos de los códigos o un lenguaje anticipado. También se determina codificar a las operaciones con mayor de complejidad que se requiera menos interlocutores. Ejecutada por información emitida como código Morse.

Una programación inoportuna puede ocurrir que el programa no realice las funciones inicialmente planificadas. La confidencialidad como integridad son aspectos fundamentales, los cuales, de brindar disponibilidad a los sistemas, es importante el entorno de intercambios de informaciones que testificada mediante el internet.

Las nuevas bases surgidas ininteligiblemente a los sistemas criptográficos manipulando metodologías de cifrados dependiendo de los bloques que se clasifiquen, según los tipos de claves en tipos (dos) o en principales (familias), Claves como: Simétrica y pública.

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

Fig. 2. La figura muestra el desarrollo de programación en java para los cifrados de encriptación la palabra cifrada “ALMERIA” texto codificado “KLDQH”.



2 Desarrollo de código java de cifrado

```

package cifradocesar;
public class CifradoCesar {
    private String cadena;
    public CifradoCesar (String cadena) {
        this.cadena = cadena;
    }
    public String cifrarCadena(){
        return traducirCadena("cifrar");
    }
    public String descifrarCadena(){
        return traducirCadena("descifrar");
    }
    private String traducirCadena(String operacion){
        String cadenaCifrada = "";
        for (int i = 0; i < cadena.length(); i++) {
            char caracter = cadena.toLowerCase().charAt(i);
            if(caracter>=97 && caracter<=122){
                if(operacion.equals("cifrar")){
                    if(caracter>='x'){
                        caracter = (char)('a' + ('z'-caracter));
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

```

    }
    else{
        caracter+=3;
    }
    cadenaCifrada+=(char)(caracter);
}

else{
    if(caracter<='c'){
        caracter = (char)('z' - (caracter - 'a'));
    }
    else{
        caracter-=3;
    }
    cadenaCifrada+=(char)(caracter);
}
}
else{
    cadenaCifrada+=caracter;
}
}
cadena = cadenaCifrada;
return cadena;
}
public static void main(String[] args) {
    CifradoCesar cc = new CifradoCesar("Simplemente eran dos extraños queriendose amar.");
    System.out.println(cc.cifrarCadena());
    System.out.println(cc.descifrarCadena());
}
}

```

Código java de cifrado de Polibio

Se trata de un algoritmo trivial, donde cada letra del alfabeto es reemplazada por las coordenadas de su posición en un cuadrado. Es un caso particular de transposición mono-alfabética.

```

package cifradopolibio;
import java.util.Scanner;
public class CifradoPolibio {
    /**
     * @param args the command line arguments
     */
    public static void main(String[] args) {
        // TODO code application logic here
        char [][] matris = {{'a','b','c','d','e','f','g'},
            {'h','i','j','k','l','m','n'},
            {'ñ','o','p','q','r','s','t'},

```

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

```

        {'u','v','w','x','y','z','1'},
        {'2','3','4','5','6','7','8'},
        {'9','0','_',' ','!',';','.'},
        {'$', '#', '%', '&', '+', '*', '/'}};

System.out.println("\t -----");
System.out.println("\t | * CIFRADO POLIBIO* |");
System.out.println("\t -----");
Scanner sc = new Scanner(System.in);

System.out.println("Ingrese el Mensaje: ");
String mensaje = sc.nextLine();
System.out.println("\nMatriz");
Imprimir(matris);
System.out.print("\nCifrado: ");
String [] cipher = Cifrar_Polibio(mensaje,matris);
sc.close();
System.out.print("\nDescifrado: ");
String msj = Descifrar_Polibio(cipher,matris);
}

public static void Imprimir(char [][] matris){
    for(int i=0;i<matris.length;i++){

        for(int j=0;j<matris[i].length;j++){

            System.out.print(matris[i][j]+" ");
        }
        System.out.println("");
    }
}

public static String [] Cifrar_Polibio(String mensaje, char [][] matris ){

    //Se crea un array de el tamaño del mensaje ingresado
    String [] cipher = new String [mensaje.toCharArray().length];
    //Se convierte el mensaje en un array de char
    char [] msj = mensaje.toCharArray();
    //Va por todas las letras del mensaje
    for(int h=0;h<msj.length;h++){

        //Va por todas las filas y columnas de la matriz
        //Hasta encontrar el caracter
        for(int i=0;i<matris.length;i++){

```

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

```

for(int j=0;j<matris[1].length;j++){

    //Si lo encuentra
    if(matris[i][j]== msj[h]){

        //Guarda en nuestro array cipher las posiciones
        //de el caracter i para las filas y j para las columnas
        cipher[h]=Integer.toString(i)+Integer.toString(j);

        //sale del ciclo apenas lo encuentra
        break;
    }
}
// Va imprimiendo el cipher (mensaje ya cifrado)
System.out.print(cipher[h]+" ");
}
//Retorna el cipher
return cipher;
}
public static String Descifrar_Polibio(String [] cipher,char [][] matris){

    //Un array con la direccion de el caracter [fila][columna]
    char [] direccion;
    String mensaje ="";
    //
    //Vamos por todas las posiciones del cipher
    for(int i=0;i<cipher.length;i++){
        //Convertimos la direccion en un array de char
        direccion = cipher[i].toCharArray();

        // sabemos que en la posicion 0 esta la fila y en la posicion 1 esta la columna
        //buscamos en la matriz el caracter que este en esa posicion y lo vamos concatenando al mensaje
        normal

        mensaje+=matris[Character.getNumericValue( direccion[0])][Character.getNumericValue(direccion[1])];
    }
    //Imprime el mensaje ya descifrado
    System.out.println(mensaje);

    //Retorna el mensaje
    return mensaje;
}
}

```

3 Matemáticas en la criptografía

La matemática se presenta en diferentes áreas, puesto que, las matemáticas tienen a relacionarse con todas las demás materias de alguna manera, siendo la raíz de las ciencias. Los fundamentos matemáticos dan paso a las innovaciones algorítmicas, permite el camino a la aplicación de los cálculos matemáticos necesarios.

Como lo redacta (JULIA, 2017): “Las matemáticas están en nuestra vida y son un pilar fundamental de la ciencia, porque es el lenguaje donde se han escrito los modelos físicos que, después, han dado paso a la aplicación a través de la ingeniería”, explica un entusiasta Bellido, que va más allá y asegura que por “sí mismas las matemáticas empiezan a ser tecnología.

La criptografía se clasifica de tres corrientes: Criptoanálisis, encargado de los averiguar el diseño del sistema que posee su escritura ocultando el mensaje, criptología encargado de las nuevas formas que proporciona la tecnología permitiendo el mejor avance a las comunicaciones, criptoanálisis, rompe el mensaje cifrado.

Indica (PAZ, 2006), en su determinado momento el entorno común de campos informáticos, criptográficos y las comunicaciones a base de áreas en matemáticas se los consideraban poco aplicadas o puras, pero las mismas han sido pieza fundamental para los avances tecnológicos.

La criptografía clásica ha pasado por fases de operaciones, permitiendo paso a los algoritmos, lo cual fue de gran importancia y relevancia de las matemáticas en la encriptación de mensajes.

María Cristina (CHALER, 2007) indica: “La matemática es el origen de las Ciencias Exactas y su exposición desarrolla en el hombre la tendencia abstracta, analógico, deductivo e inductivo”. La particularidad de la presunción la despierta el trabajo de pensar. Todo ser que piensa, genera estrategias y deduce, se está empleando en los mecanismos que las matemáticas.

3.1 Criptografía Conmutativa

Generalmente se presenta la criptografía de manera conmutativa. Base a ecuación, logaritmos, funciones de la recta, límites, es la manera criptográfica que se basa a realizar las programaciones a bases de operaciones matemáticas.

Unas de las definiciones a trabajar es la Criptograma, siendo mensajes escritos con códigos. Este método se lo puede realizar mediante matrices, donde, consiste en asignar números al alfabeto (espacios en blanco cero) de tal manera:

Tabla 1- Método Criptograma.

A	b	C	d	e	f	g	h	i	j
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K	l	M	n	o	p	q	r	s	t
11	12	13	14	16	17	18	19	20	21

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

U	v	W	x	y	z	_	.
22	23	24	25	26	27	0	28

Fuente: Elaborado por autores.

Convertido, los mensajes pasan a ser repartidos en diferentes matrices cada uno de ellos con "n" elementos. Multiplicando las filas conformadas por "n" elementos, por cada matriz de orden "n" cuadrada, regular, para convertirla en su debido momento a inversa, para el proceso de decodificación.

Ejemplo:

C	R	I	P	T	O	G	R	A	F	I	A
3	19	9	17	21	16	7	19	1	6	9	1

Fuente: elaborado por autores

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[3 \ 19 \ 9] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [21 \ -4 \ 60]$$

$$[17 \ 21 \ 16] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [49 \ 29 \ 80]$$

$$[7 \ 19 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [9 \ -4 \ 64]$$

$$[6 \ 9 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [8 \ 4 \ 33]$$

Mensaje cifrado entonces sería:

21 -4 60 49 29 80 9 -4 64 8 4 33

Con la matriz clave:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

Consecutivamente la inversa de A:

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} & & \\ & & \\ & & \end{bmatrix}$$

$$[3 \ 19 \ 9] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [\quad \quad]$$

$$[17 \ 21 \ 16] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [\quad \quad]$$

$$[7 \ 19 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [\quad \quad]$$

$$[6 \ 9 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [\quad \quad]$$

Con apoyo de la tabla se asocia el mensaje oculto con sus números que se atribuyeron en el alfabeto y se obtiene el mensaje decodificado.

3.2 Firmas electrónicas.

Serie de códigos que representan personas naturales o jurídicas, con validez de igual manera legal como los procesos en personas. Su propósito de agilizar y facilitar los trámites del usuario, evitando que tenga que trasladarse a empresas a firmar de manera manuscrita. Estos procesos se realizan en documentos PDF, Word, Excel. Correo electrónico, como entre otras maneras.

Los servicios que brinda son seguro contrato, security póliza, security factura. Cada uno con procesos diferentes que permiten al usuario procesos seguros, con ahorro de tiempo y de dinero.

Según (EL COMERCIO, 2019): “En el Ecuador 176420 personas utilizan las firmas electrónicas en trámites de importaciones, exportaciones y compras públicas en función a la comodidad del cliente.”

Las personas que asumen esta facilidad permiten que sus archivos sean guardados en CD y USB se considera que trabajos en community manager independiente los más propensos a utilizar debido a la necesidad de agilizar los procesos.

Cifras de certificados mediante la utilización de firmas electrónicas emitidas en Ecuador según (EL COMERCIO, 2019) se estima:

Tabla 2- Cifras de certificados-firmas electrónicas emitidas en Ecuador.

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

NÚMERO DE PERSONAS	PROVINCIAS
6518	Provincia del Oro.
8314	Provincia de Manabí.
9761	Provincia del Azuay.
51422	Provincia del Guayas.
65420	Provincia de Pichincha.

Fuente: (EL COMERCIO, 2019)

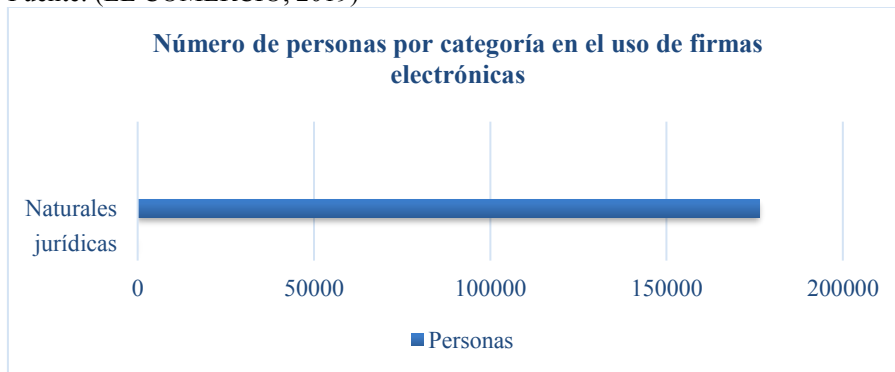


Fig. 2. La figura muestra según los datos de la fuente sobre el uso de las firmas electrónicas por parte de los ecuatorianos.

Fuente: (EL COMERCIO, 2019)

3.3 Experimentación:

El artículo ha presentado la evolución de la criptografía, consiguientemente, se realizó una experimentación a la comunidad universitaria: UG ‘‘Universidad de Guayaquil’’. Basado en una encuesta cuantitativa de conocimientos criptográficos inversos en la vida cotidiana. Preguntas correlacionadas para entablar el conocimiento que se maneja sobre las encriptaciones.

Como lo menciona (WILSON, 2003) ‘‘Conglomeraciones organizadas jurídica como política del ser humano integrada por el Estado como elemento constitutivo’’, siendo un conjunto de seres humanos que habitan en un determinado lugar.

La muestra se define según (CARLOS, 2009): ‘‘Investigaciones cuantitativas con requisitos necesarios considerada de manera representativa. Planteado de manera probabilístico y no probabilístico, toma de estudios o experimentaciones con la finalidad de estudiarlo o definir sus características’’, la fórmula empleada para la encuesta se denomina ‘‘fórmula muestra’’ (GLADYS, 2011).

Para determinar la muestra pertinente el cual se debe medir a la población escogida para el muestreo ejecutado en campo donde se aplicarán las conclusiones de los objetos o individuos.

Nivel de confianza (GLADYS, 2011): Intervalos aleatorios usados para dar valores a una determinada probabilidad de la población el cual puede presentarse alta.

Tabla 3-Tabla nivel de confianza

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

NIVEL DE CONFIANZA	Z_{α}
99.7%	3
99%	2.58
98%	2.33
96%	2.05
95%	1.96
90%	1.64
80%	1.28
50%	0.674

Fuente: Elaborado por autores

Formulación muestra

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{Ne^2 + z^2 \cdot p \cdot q}$$

n = Tamaño de la muestra
z = nivel de confianza
p = Probabilidad a favor
q = Probabilidad en contra
N = Población-censo
e = Error de Estimación

Datos

Z = 95% = 1,96
p = 50% = 0,5
q = 50% = 0,5
N = 2200
e = 5% = 0,05

$$n = \frac{2^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{NE^2 + 2^2 \cdot p \cdot q}$$

$$n = \frac{(1,96)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 2200}{(2200)(0,05)^2 + (1,96)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5} = 327,05$$

La aplicación de la formulación de encuestas a 327 personas. Cinco preguntas formuladas y correlacionadas para evaluar el conocimiento criptográfico a la comunidad universitaria.

Posteriormente las tabulaciones con sus respectivas cuantificaciones.

¿Conoce usted sobre algún sistema de seguridad informática basado en las matemáticas?

Tabla 2- Distribución de respuestas del conocimiento sobre algún sistema de seguridad informática basado en las matemáticas

OPCIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Mucho	13	4%
Algo	68	21%

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

Poco	47	15%
Nada	197	60%
TOTAL	325	100%

Fuente: elaborado por autor

Los resultados de la muestra sobresalen la falta de desconocimiento sobre algún sistema informático por parte de los encuestados.

¿Con qué frecuencia usted cambia las claves de seguridad?

Tabla 3- Distribución de respuestas de la frecuencia usted cambia las claves de seguridad

OPCIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Siempre	194	36%
A veces	116	5%
Nunca	15	59%
TOTAL	325	100%

Los resultados de la muestra sobresalen que las frecuencias de cambios de clave de seguridad acontecen periódicamente por parte de los encuestados.

¿Ha tenido la oportunidad de utilizar algún sistema donde solicite cambio de contraseña?

Tabla 4-Distribución de respuestas

OPCIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Siempre	218	67%
A veces	86	27%
Nunca	21	6%
TOTAL	325	100%

Fuente: elaborado por autor

Los resultados de la muestra sobresalen que los encuestados utilizan frecuentemente algún sistema donde solicite cambio de contraseña.

¿Conoce usted algún método numérico o algorítmico de seguridad informática?

Tabla 5-Distribución de respuestas de conocimiento a métodos numéricos o algorítmico de seguridad informática

OPCIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Mucho	204	63%
Algo	54	16%
Poco	55	17%
Nada	11	3%
Nunca	1	1%
TOTAL	324	100%

Fuente: elaborado por autores

Los resultados de la muestra que los encuestados algún método numérico o algorítmico de seguridad informática

¿Ha escuchado para que sirve o cómo funciona la criptografía?

Tabla 6-Distribución de respuestas del conocimiento de cómo funciona la criptografía

OPCIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE
SI	47	15%

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

NO	275	85%
TOTAL	322	100%

Fuente: elaborado por autor

En el resultado final, pregunta objetiva, demuestran que existen mayores desconocimientos criptográficos en la población universitaria.

¿Considera usted que todas las carreras universitarias deberían constar con una materia relacionada al razonamiento lógico, razonamiento abstracto, formulación básica y componente numérico?

Tabla 7 – Distribución de la estimación si todas las carreras universitarias habrían consignar una materia conexas con las matemáticas.

Opción	Frecuencia	Porcentaje
Si	240	75%
No	20	6%
Tal vez	62	19%
Total	322	100%

Fuente: elaborado por el autor

En base a este último cuestionamiento, se quiso demostrar si la muestra estuviese de acuerdo con que todas las carreras de la Educación Superior constatar con áreas de componentes numéricos, relacionadas a la logística y abstracto. Por lo que, el 74,9% considera que si se debieran de implementar estas materias.

3.4 Prueba del Teorema de Chi-Cuadrado de Pearson

Tabla 8 – Teorema de Chi-Cuadrado de Pearson

Con referencia al pensamiento sobre nivel matemático con el que ingreso a la Universidad en correlación del razonamiento lógico, razonamiento abstracto, formulación básica y componente numérico.

		No	Sí	Tal vez		
¿Piensa usted que el nivel matemático con el que ingreso a la	Bueno	Recuento	4	97	27	128
		Recuento esperado	7,8	95,9	24,3	128,0
		% del total	1,2%	29,7%	8,3%	39,1%
		Recuento	1	20	2	23

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

Universidad es idóneo?	Exce-lente	Recuento es-	<i>1,4</i>	<i>17,2</i>	<i>4,4</i>	<i>23,0</i>
		perado				
		% del total	<i>0,3</i>	<i>6,1%</i>	<i>0,6%</i>	<i>7,0%</i>
			<i>%</i>			
	Malo	Recuento	<i>3</i>	<i>16</i>	<i>5</i>	<i>24</i>
		Recuento es-	<i>1,5</i>	<i>18,0</i>	<i>4,6</i>	<i>24,0</i>
		perado				
			<i>0,9</i>	<i>4,9%</i>	<i>1,5%</i>	<i>7,3%</i>
			<i>%</i>			
	Muy bueno	Recuento	<i>2</i>	<i>52</i>	<i>8</i>	<i>62</i>
		Recuento es-	<i>3,8</i>	<i>46,5</i>	<i>11,8</i>	<i>62,0</i>
		perado				
		<i>0,6</i>	<i>15,9%</i>	<i>2,4%</i>	<i>19,0</i>	
		<i>%</i>			<i>%</i>	
Regular	Recuento	<i>10</i>	<i>60</i>	<i>20</i>	<i>90</i>	
	Recuento es-	<i>5,5</i>	<i>67,4</i>	<i>17,1</i>	<i>90,0</i>	
	perado					
		<i>3,1</i>	<i>18,3%</i>	<i>6,1%</i>	<i>27,5</i>	
		<i>%</i>			<i>%</i>	
Total	Recuento	<i>20</i>	<i>245</i>	<i>62</i>	<i>327</i>	
	Recuento es-	<i>20,0</i>	<i>245,0</i>	<i>62,0</i>	<i>327,0</i>	
	perado					
		<i>6,1</i>	<i>74,9%</i>	<i>19,0%</i>	<i>100,0</i>	
		<i>%</i>			<i>%</i>	

Fuente: elaborado por autor

Pruebas de chi-cuadrado**Tabla 9** – Distribución de la estimación si todas las carreras universitarias habrían consignar una materia conexas con las matemáticas.

Valor	gl	Sig. asintótica (2 carcas)
-------	----	----------------------------

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

Chi-cuadrado de Pearson	13,599 ^a	8	,093
Razón de verosimilitud	13,540	8	,095
N de casos válidos	327		

a. 5 casillas (33,3%) han esperado un recuento menor que 5. El recuento mínimo esperado es 1,41.

Fuente: elaborado por autor

Con el grado de libertad de 8 con probabilidad de existir correlación entre las variables propuestas existe un resultado esperado de 13,59 con un valor de inferior de 0,05 según los datos de las tablas de distribución de para Chi-Cuadrado, con este valor se puede ultimar que existe de estudio matemático en el ingreso a la Universidad de Guayaquil y el poco trabajo en temas de razonamiento lógico, matemático y de formulación básica tanto en el ingreso al sistema de Educación Superior y el Bachillerato en el Ecuador.

Se da por sentado que, la muestra manifiesta una cierta carencia de conocimientos matemáticos, porque la mayoría ingresa con unas moderadas sapiencias de esta área. No obstante, se evidencia que son escasos los que tienen un buen dominio matemático. Por otra parte, un problema para que se patentice estos vacíos y poco manejo de cuestiones es que la mayoría de la muestra determina que recae en que en el bachillerato no se completó todas las enseñanzas, que indiscutiblemente son de suma importancia. Finalmente, se considera que las matemáticas son significativas para todas las carreras de la Educación Superior.

4 Agradecimientos

A los grupos de estudiantes y personal docente de la Universidad de Guayaquil que colaboraron con las respuestas responsables sobre sus conocimientos en referencia a su conocimiento sobre la criptografía.

5 Conclusiones

Para este artículo de tipo documental en base a los datos recogidos en campo en la Universidad de Guayaquil, podemos inferir que un alto número de los encuestados desconocen el término de criptografía o su incidencia de las matemáticas en la seguridad informática, sin embargo, en las preguntas anteriores correlacionadas a la criptografía de manera implícita la mayor frecuencia de respuestas aceptaban haber participado en alguna de las actividades presentadas, de allí se da a relucir que la criptografía no está difundida, por lo tanto, las acciones relacionadas a la criptografía se los realiza sin saber la metodología que se aplica, incluso, en la encuesta se suscitaron casos de no indicar respuesta por evitar su desconocimiento del tema.

Factores por incidir como la falta de autoeducación a temas existentes o nuevos sobre la tecnología, a pesar de estar inversos en el día a día, la base del porque se ejecuta no se está fundamentado, lo que produce estos resultados presentados.

Es necesario seguir recolectando información sobre los procesos académicos en las ciencias matemáticas para impulsar el desarrollo de los jóvenes ecuatorianos a buscar soluciones de seguridad informática, para implementar sistemas informáticos seguros y fiables para los inversionistas en el Ecuador.

Referencias

1. Autor, F.: Article title. Journal 2(5), 99–110 (2016).
2. BRENDA. (25 de Enero de 2012). miarroba. Obtenido de escritura hierática egípcia: <https://fotolog.miarroba.com/monimon1/escritura-hieratica-egipcia-152/>
3. CARLOS, A. J. (2009). MUESTRA EN INVESTIGACION CUANTITATIVA. Redalyc.org, 13-17.
4. CHALER. (21 de Mayo de 2007). Agencia CyTA noticias de ciencia y tecnología. Obtenido de LA CIENCIA MADRE: <https://www.agenciacyta.org.ar/2007/05/la-ciencia-madre/>
5. CORTÉS, S. P. (2005). EL ESCRIBA EGIPCIO. En S. P. CORTÉS, ESCRIBAS (págs. 1-10). México: Departamento Editorial de la Coordinación General de Difusión Cultural de la Universidad Autónoma Metropolitana.
6. Cotés, S. P. (2005). EL ESCRIBA EGIPCIO. En S. P. Cotés, ESCRIBAS (págs. 1-10). México: Departamento Editorial de la Coordinación General de Difusión Cultural de la Universidad Autónoma Metropolitana.
7. ecwiki. (1 de diciembre de 2019). Jeremías. Obtenido de Jeremías: <https://ec.aciprensa.com/wiki/Jerem%C3%ADas>
8. EL COMERCIO. (11 de septiembre de 2019). EL COMERCIO. Obtenido de Actualidad negocios: <https://www.elcomercio.com/actualidad/firma-electronica-ecuador-autorizacion-banco.html>
9. FERNÁNDEZ. (2004). Criptografía clásica. academia.edu, 141.
10. Fernández, S. (2004). La criptografía clásica. academia.edu, 141.
11. FERNANDO, A. N. (2015). Implementación de seguridad mediante criptografía para servidores basados en software libre, para el laboratorio de redes de la carrera de ingeniería en informática y sistemas computacionales, durante período 2013. tesis. unan, 10-25.
12. Gladys, B. (2011). Aproximación al muestreo estadístico en investigaciones científicas. Revista bolivianas-scielo, 3-6.

Carencia de aplicación metodológica de la criptografía matemática

13. GLADYS, B. (2011). Aproximación al muestreo estadístico en investigaciones científicas. revistasbolivianas-scielo, 3-6.
14. GUSTAVO, M. A. (18 de octubre de 2012). PRINCIPIOS PARA EL ANÁLISIS DE CRIPTOGRAFÍA DIGITAL. Obtenido de biblioteca.usac.edu: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0316_EO.pdf
15. HALL, S. (2004). Codificación t descodificación en el discurso televisivo. CIC cuadernos de información en el discurso televisivo, 215-225.
16. JULIA, Y. (05 de junio de 2017). LANZA. Obtenido de Las matemáticas, la madre de casi todas las ciencias: <https://www.lanzadigital.com/provincia/ciudad-real/las-matematicas-la-madre-de-casi-todas-las-ciencias/>
17. LUIS, C. (20 de diciembre de 2013). Vavel. Obtenido de Criptografía a través de la historia: <https://www.vavel.com/es/masvavel/2013/12/20/historia/310875.html>
18. MANUEL, H. J. (s.f.). INTRODUCCION A LA PROTECCIÓN DE LA INFORMACIÓN. academia.edu, 20.
19. MARRERO, T. (2003). La Criptografía como elemento de la seguridad informática. Scielo, 3-12.
20. Matiella, B. (27 de mayo de 2016). QORE. Obtenido de Cosas que no sabías de los jeroglíficos egipcios: <https://www.qore.com/noticias/49792/Cosas-que-no-sabias-de-los-jeroglificos-egipcios>
21. MATIELLA, B. (27 de mayo de 2016). QORE. Obtenido de Cosas que no sabías de los jeroglíficos egipcios: <https://www.qore.com/noticias/49792/Cosas-que-no-sabias-de-los-jeroglificos-egipcios>
22. NEOCHANGE. (5 de 07 de 2009). Neochange. Obtenido de La escitala espartana: <http://neochange.blogspot.com/2009/05/la-escitala-espartana.html>
23. NEOCHANGE BLOG. (5 de 07 de 2009). Neochange blog. Obtenido de La escitala espartana: <http://neochange.blogspot.com/2009/05/la-escitala-espartana.html>
24. ORTEGA, C. (2014). Sistema de Seguridad de Software Aplicando Criptografía Con Ac. scribd, 5-12.
25. PABLO, B. (06 de febrero de 2014). eldiario.es. Obtenido de Código Enigma, descifrado: el papel de Turing en la Segunda Guerra Mundial: https://www.eldiario.es/turing/criptografia/alan-turing-enigma-codigo_0_226078042.html
26. PAZ, M. (23 de mayo de 2006). LAS MATEMÁTICAS EN LA CRIPTOLOGÍA. Encuentros Multidisciplinarios, 1-7. Obtenido de LAS MATEMÁTICAS EN LA CRIPTOLOGÍA.
27. sinfocol. (10 de OCTUBRE de 2008). Cifras hebraicas: Atbash, Albam y Atbah. Obtenido de Atbash: <http://www.sinfocol.org/2008/10/cifras-hebraicas-atbash-albam-y-atbah/>
28. SINFOCOL. (10 de octubre de 2008). Cifras hebraicas: Atbash, Albam y Atbah. Obtenido de Atbash: <http://www.sinfocol.org/2008/10/cifras-hebraicas-atbash-albam-y-atbah/>
29. Velasco, J. J. (20 de 05 de 2014). eldiario.es. Obtenido de Breve historia de la criptografía: https://www.eldiario.es/turing/criptografia/Breve-historia-criptografia_0_261773822.html
30. WILSON, L. H. (2003). LA POBLACION. dialnet-unirioja, 225-229.
31. YEISON, M. (2016). Enigmática. Calaméo, 2-10.

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, mediante la utilización de modelos de caja blanca y caja negra para el control óptimo de la microrred, a través de la selección de una o varias técnicas de optimización que se han probado durante los últimos años en la gestión energética de microrredes. Por otra parte, la puesta en marcha de la microrred, permitirá comprobar los resultados de simulación obtenidos en un entorno real. 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 y libros para validar la investigación realizada en esta tesis doctoral.

Keywords: microrred · gestión energética · modelado.

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 renovables 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 desde hace varias décadas atrás 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 microrred 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

Modelado y gestión energética de una microrred

(GD) (también llamado en inglés *Distributed Generation*), que busca generar energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovable, por otra parte las microrredes 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 microrredes. 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 microrred 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 microrredes 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].

El estudio de esta tesis doctoral tiene como marco de trabajo la microrred ensamblada e instalada en Centro de Investigaciones de la Energía Solar (CIESOL). Esta microrred incorpora un sistema fotovoltaico acoplado a una batería con dos posibilidades de configuración: la configuración *DC-link*, donde la batería está conectada antes del convertidor 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 [9]. Para la microrred 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.

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 microrred, 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

Modelado y gestión energética de una microrred

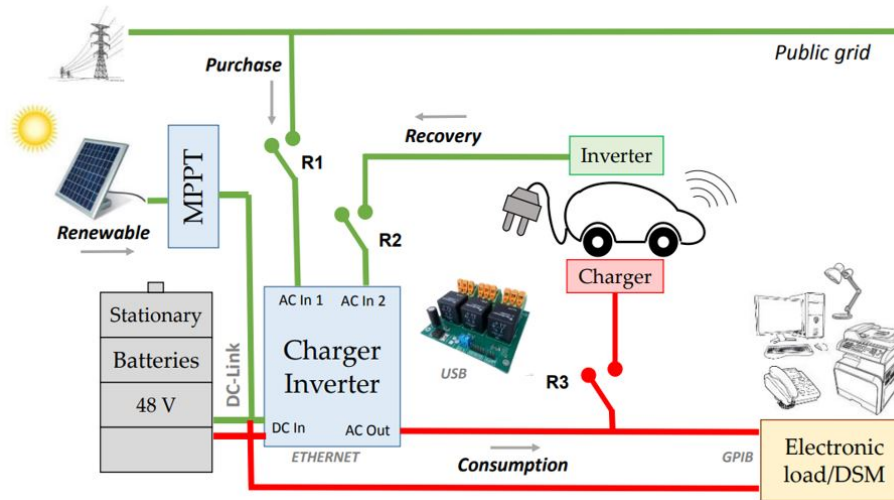


Figura 1. La microrred como objeto de estudio, integra un sistema fotovoltaico con almacenamiento, un vehículo eléctrico y un sistema de gestión de la demanda energética (DSM del inglés Demand System Management) reproducido por un sistema electrónico programable de carga. En el medio, una placa de relé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

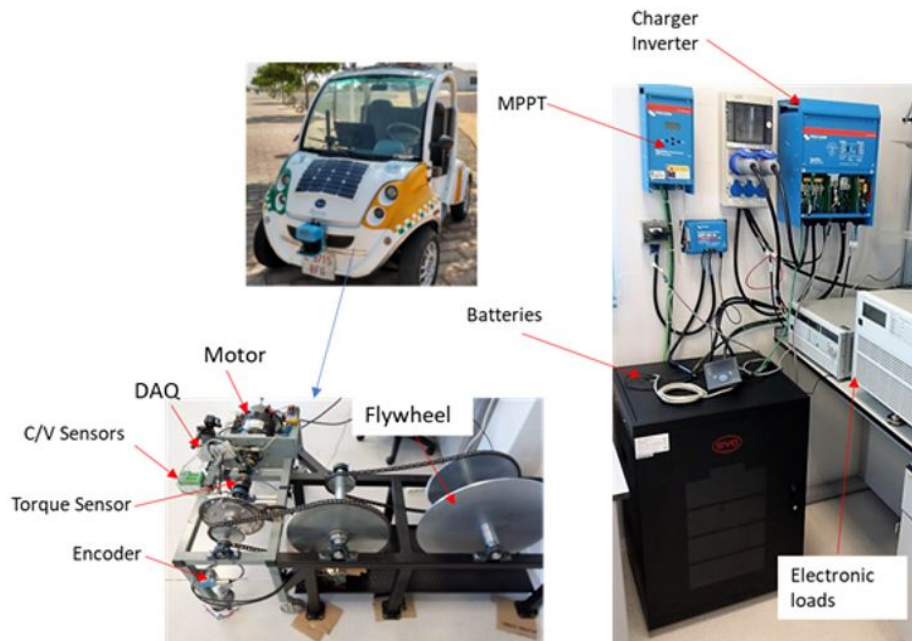


Figura 2. Vehículo eléctrico, microrred instalada en CIESOL e instrumentación del banco experimental construido [8].

estrategias de control [10]. Además, otros artículos relacionados con la gestión energética de edificios se muestran en [5, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17], donde se aplican diferentes tipos de técnicas de optimización, para el control óptimo de microrredes. Esta tesis doctoral, clasificara las técnicas de optimización existentes, para seleccionar la o las más adecuadas para el control óptimo de la microrred.

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 levemente el cumplimiento de nuestros objetivos aprobados inicialmente.

En este primer año de doctorado (2019-2020), cumplimos el primero objetivo, “Revisión bibliográfica del estado del arte de la microrred, mediante un estudio profundo de los trabajos relacionados con el objetivo general de este trabajo de tesis, modelado y gestión óptima de los diferentes elementos de una microrred, para poder comprender así el desempeño y características de estas”. Los resultados obtenidos de esta revisión bibliográfica fueron, la elaboración de un artículo científico titulado “*Towards optimal management in microgrids: an overview*” y el posterior envío a la revista “*Renewable and Sustainable Energy Reviews*”. El artículo describe, los elementos de una microrred 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 microrredes entre ellas tenemos: programación lineal de enteros mixtos (MILP), programación no lineal de enteros mixtos (MINLP), control predictivo basado en modelos (MPC), inteligencia artificial, métodos heurísticos, métodos basados en múltiples agentes, programación dinámica, estocástica y robusta y, además, nuevas técnicas de optimización. Esta clasificación se desarrolló en un periodo de tiempo de 2016-2020, basándonos en trabajos similares disponibles en [18, 19, 20, 21]. El modelo de la microrred está compuesto 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 del modelo de la microrred.

Además, en el periodo (2019-2020) y lo que va del presente año hemos finalizado una parte del objetivo “Modelado de cada uno de los elementos de la microrred mediante técnicas de modelado de caja negra como redes neuronales o identificación no lineal y de caja blanca mediante modelos basados en primeros principios y ecuaciones matemáticas, que permitan describir matemáticamente el sistema completo del objeto de estudio”, a través de modelos físicos del sistema que fueron implementados en MATLAB, mediante información disponible en [22, 23, 24, 25]. La fig. 4 muestra el comportamiento del modelo, frente a datos reales de una microrred ubicada en el edificio bioclimático CIESOL.

Modelado y gestión energética de una microrred

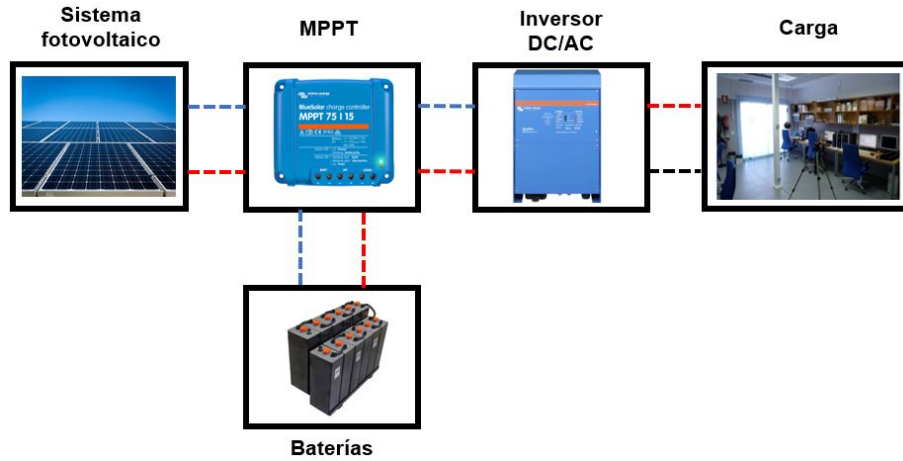


Figura 3. Diagrama de bloques simplificado de la microrred.

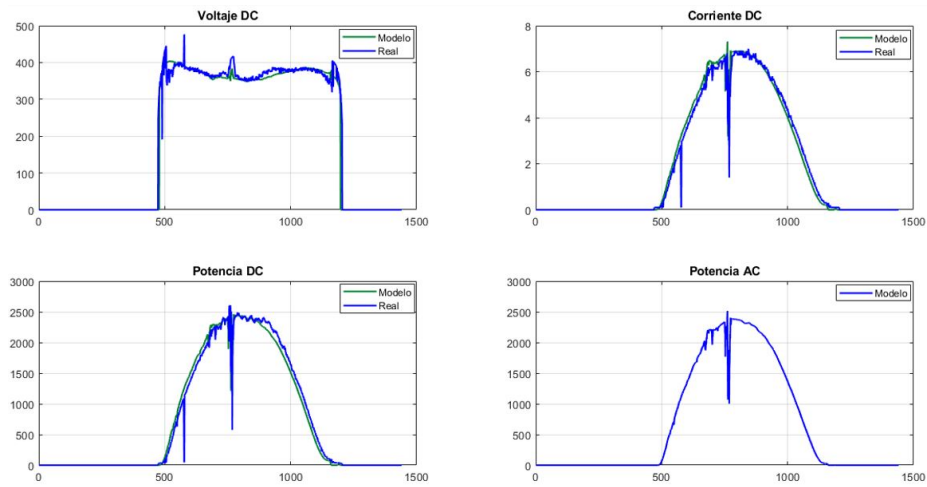


Figura 4. Comportamiento del modelo.

Se espera que una vez se validen dichos modelos se espera durante este año poder desarrollar algún controlador u optimizador, en base a estos modelos, que prediga el comportamiento de los flujos energéticos de la microrred y de esta manera poder controlarla cumpliendo unos objetivos prefijados.

3. Conclusiones

En este periodo de trabajo, se ha finalizado uno de los varios objetivos planteados, donde se obtuvo como resultado un artículo científico que describe las técnicas de optimización más importantes en la gestión energética de microrredes, esto permite tener una idea clara de los métodos de optimización actualmente utilizados en sistemas de gestión energética de microrredes, con el objetivo de seleccionar una o varias técnicas de optimización en la siguiente etapa de la tesis doctoral.

La obtención del modelo físico del sistema permitirá saber el comportamiento del sistema, permitiendo operar en diversos escenarios con perfiles de carga reales, todo esto con el objetivo de realizar la gestión energética de la microrred, a través de un optimizador que será seleccionado basándose en las características de la microrred, este optimizará una función objetivo que puede maximizar la producción de energía de la microrred, minimizar las emisiones de CO₂, minimizar los costos operativos etc.

Bibliografía

- [1] Cristian Bustos, David Watts y Hui Ren. “MicroGrid operation and design optimization with synthetic wins and solar resources”. En: *IEEE Latin America Transactions* 10.2 (2012), págs. 1550-1562. ISSN: 15480992. DOI: 10.1109/TLA.2012.6187599.
- [2] Jacqueline Llanos y col. “A Novel Distributed Control Strategy for Optimal Dispatch of Isolated Microgrids Considering Congestion”. En: *IEEE Transactions on Smart Grid* 10.6 (2019), págs. 6595-6606. ISSN: 19493061. DOI: 10.1109/TSG.2019.2908128.
- [3] David Velasco De La Fuente, Cesar Leonardo Trujillo Rodriguez y Eider Alexander Narvaez. “Review of Anti-Islanding Methods: Analysis by Figures of Merit Tools for Controllers Reconfiguration in Microgrids”. En: *IEEE Latin America Transactions* 13.3 (2015), págs. 679-686. ISSN: 15480992. DOI: 10.1109/TLA.2015.7069092.
- [4] O Núñez y col. “Microgrids Protection Schemes (Esquemas de Protección para Micro-redes)”. En: 15110019 (2015), págs. 597-602.
- [5] Jose Luis Torres-Moreno y col. “Energy management strategy for microgrids with PV-battery systems and electric vehicles”. En: *Energies* 11.3 (2018). ISSN: 19961073. DOI: 10.3390/en11030522.

- [6] M. H.F. Ahamed y col. “Modelling and simulation of a solar PV and battery based DC microgrid system”. En: *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016* i (2016), págs. 1706-1711. DOI: 10.1109/ICEEOT.2016.7754977.
- [7] Lexuan Meng y col. “Microgrid central controller development and hierarchical control implementation in the intelligent microgrid lab of Aalborg University”. En: *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2015-May*.May (2015), págs. 2585-2592. DOI: 10.1109/APEC.2015.7104716.
- [8] Rasmus Luthander y col. “Photovoltaic self-consumption in buildings: A review”. En: *Applied Energy* 142 (2015), págs. 80-94. ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.12.028. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.
- [9] Yannick Riesen, Christophe Ballif y Nicolas Wyrsh. “Control algorithm for a residential photovoltaic system with storage”. En: *Applied Energy* 202 (2017), págs. 78-87. ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.016. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.016>.
- [10] José Luis Torres-Moreno y col. “Banco de ensayo para motores de vehículos eléctricos”. En: *XL Jornadas de Automática*. Universidade da Coruña, Servicio de Publicacións. 2019, págs. 450-457.
- [11] Francisco David Moya, José Luis Torres-Moreno y José Domingo Álvarez. “Optimal model for energy management strategy in smart building with energy storage systems and electric vehicles”. En: *Energies* 13.14 (2020). ISSN: 19961073. DOI: 10.3390/en13143605.
- [12] Eva C. Umeozor y Milana Trifkovic. “Energy management of a microgrid via parametric programming”. En: *IFAC-PapersOnLine* 49.7 (2016), págs. 272-277. ISSN: 24058963. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.278.
- [13] Derong Liu y col. “Residential energy scheduling for variable weather solar energy based on adaptive dynamic programming”. En: *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 5.1 (2018), págs. 36-46. ISSN: 23299274. DOI: 10.1109/JAS.2017.7510739.
- [14] Mario Petrollese y col. “Real-time integration of optimal generation scheduling with MPC for the energy management of a renewable hydrogen-based microgrid”. En: *Applied Energy* 166 (2016), págs. 96-106. ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.014. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.014>.
- [15] Cunbin Li y col. “A microgrids energy management model based on multi-agent system using adaptive weight and chaotic search particle swarm optimization considering demand response”. En: *Journal of Cleaner Production* 262 (2020), pág. 121247. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121247. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121247>.
- [16] Stefano Leonori y col. “Optimization strategies for Microgrid energy management systems by Genetic Algorithms”. En: *Applied Soft Computing*

Modelado y gestión energética de una microrred

- Journal* 86 (2020), pág. 105903. ISSN: 15684946. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105903. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105903>.
- [17] Stefano Leonori y col. “Microgrid Energy Management Systems Design by Computational Intelligence Techniques”. En: *Applied Energy* 277. February (2020), pág. 115524. ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115524. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115524>.
- [18] Luis I. Minchala-Avila y col. “A review of optimal control techniques applied to the energy management and control of microgrids”. En: *Procedia Computer Science* 52.1 (2015), págs. 780-787. ISSN: 18770509. DOI: 10.1016/j.procs.2015.05.133.
- [19] Yimy E. García Vera, Rodolfo Dufo-López y José L. Bernal-Agustín. “Energy management in microgrids with renewable energy sources: A literature review”. En: *Applied Sciences (Switzerland)* 9.18 (2019). ISSN: 20763417. DOI: 10.3390/app9183854.
- [20] Adam Hirsch, Yael Parag y Josep Guerrero. “Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90. September 2017 (2018), págs. 402-411. ISSN: 18790690. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.040. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>.
- [21] N. W.A. Lidula y A. D. Rajapakse. “Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.1 (2011), págs. 186-202. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2010.09.041.
- [22] Shehab Al-Sakkaf y col. “An energy management system for residential autonomous DC microgrid using optimized fuzzy logic controller considering economic dispatch”. En: *Energies* 12.8 (2019). ISSN: 19961073. DOI: 10.3390/en12081457.
- [23] Jeronimo Ramos-Teodoro, Francisco Rodriguez-Diaz, Manuel Berenguel y col. “Modelado de instalaciones fotovoltaicas para la gestión de un energy hub con re-cursos heterogéneos”. En: (2018).
- [24] Tamer Khatib y Wilfried Elmenreich. *Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes*. John Wiley & Sons, 2016.
- [25] John A Duffie y William A Beckman. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, 2013.