

Actas del II Simposio Conjunto de los Grupos Temáticos de CEA

Modelado, Simulación, Optimización
e Ingeniería de Control

MADRID, 19-21 ABRIL 2023

Editora: María Guinaldo Losada





Libro de Actas

II Simposio Conjunto de los Grupos Temáticos de CEA

Modelado, Simulación, Optimización e Ingeniería de Control

Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
Madrid, abril 2023

ISBN: 978-84-09-51177-8

Editora: María Guinaldo Losada

Las actas del II Simposio Conjunto de los Grupos Temáticos de CEA Modelado, Simulación, Optimización e Ingeniería de Control están sujetas a una licencia Creative Commons Attribution 4.0 International License.





Índice

Descomposición de problemas de scheduling estocástico de dos etapas formulados en base de tiempo continuo usando el índice de similitud Daniel Montes, José Luis Pitarch, César de Prada.....	1
Estimación dinámica de modificadores aplicada a un splitter industrial de propano-propileno Erika Oliveira-Silva, César de Prada, Daniel Navia.....	3
Alternativa para la estimación de parámetros en sistemas biológicos Irina Bausa-Ortiz, Raúl Muñoz, Smaranda P. Cristea, César de Prada.....	5
Desarrollo de un modelo matemático para la predicción de la degradación de calidad en pescado fresco Miguel Novoa, Silvia Muñoz, Juan R. Herrera, Miriam R. García, Marta López-Cabo, Carlos Vilas...	7
Programación mensual de operaciones de crudos en una refinería con terminal marítima Tomás García, Gloria Gutiérrez, Carlos Méndez, César de Prada.....	9
Sistemas ciberfísicos multi-agente en realidad mixta Francisco José Mañas, María Guinaldo, Raquel Dormido, Rafael Socas, Sebastián Dormido.....	11
Gestión de energía en sistemas de almacenamiento híbrido Miquel Martí, Andreu Cecilia, Ramón Costa-Castelló.....	16
Control óptimo de estaciones de repostaje de hidrógeno para el sector transporte Pol Cardona, María Serra, Carlos Ocampo-Martínez.....	18
Control y optimización de la producción de cultivos bajo invernadero Francisco García Mañas, Francisco Rodríguez, Manuel Berenguel.....	20
Identificación preliminar de la dinámica de la barcaza de una turbina eólica flotante Ignacio Galeote, Giordy A. Andrade, Segundo Esteban, Matilde Santos	22
Métodos computacionales en observabilidad, controlabilidad y control óptimo de sistemas biológicos Sandra Díaz-Seoane, Alejandro F. Villaverde.....	24
Modelado computacional de la dinámica de reacciones inmunes: metodologías de análisis estructural Xabier Rey Barreiro, Alejandro F. Villaverde.....	26
Open-loop validation experiments of non-linear state observers for autonomous surface vehicles Thalia A. Morel, Guillermo Bejarano, Luis Orihuela.....	28
Optimización estacionaria de parques eólicos Samuel Martínez-Gutiérrez, Daniel Sarabia, Alejandro Merino.....	34
Diseño preliminar y control de un prototipo de turbina eólica Giordy Andrade, Segundo Esteban, Ignacio Galeote, Matilde Santos.....	41
Modelado estructurado en resistencia del crecimiento y muerte bacterianos bajo estrés antimicrobiano Nerea Martínez-López, Carlos Vilas, Miriam R. García.....	43
Modelo para la identificación de maniobras peligrosas en carretera Felipe Barreno , Matilde Santos, Manuel G. Romana.....	45
Metodología para escalamiento de modelos de turbinas eólicas Laura Olaya, J.E. Sierra-García, Matilde Santos.....	47





Descomposición de Problemas de Scheduling Estocástico de Dos Etapas Formulados en base de Tiempo Continuo Usando el Índice de Similitud



Daniel Montes^{*a,c}, José Luis Pitarch^b, César de Prada^{a,c}

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, C/ Dr. Mergelina s/n, Valladolid, España

^bInstituto Universitario de Automática e Informática Industrial (ai2), Universitat Politècnica de València, Cno. de Vera s/n, Valencia, España

^cInstituto de Procesos Sostenibles, Universidad de Valladolid, C/ Dr. Mergelina s/n, Valladolid, España

Resumen

En los problemas de scheduling se busca asignar de forma óptima una serie de recursos limitados a unas tareas que se deben llevar a cabo a lo largo de un horizonte de tiempo. Usualmente, estos se formulan como problemas de optimización mixto-entero pues es necesario el uso de variables binarias para representar decisiones como asignaciones o estados. Por otra parte, la toma de decisiones siempre está sujeta a la incertidumbre de ciertos parámetros, como podrían ser el clima, el precio y disponibilidad de materias primas, etc. Si no se tiene en cuenta la incertidumbre, las decisiones serán claramente sub-óptimas e incluso podrían llevar a problemas para cumplir el plan de producción.

Existen diferentes formas para incorporar la incertidumbre en los problemas de scheduling, entre ellas la programación estocástica de dos etapas. En esta, se dividen las decisiones en dos: de primera y segunda etapa. Las decisiones de primera etapa son conocidas como “aquí y ahora” y se toman sin conocer el valor de los parámetros inciertos. Luego, las decisiones de segunda etapa, conocidas como del tipo “esperar y observar”, consideran los distintos valores que pueden tomar los parámetros inciertos para ajustar las decisiones de la primera etapa. La distribución probabilística de los parámetros inciertos se discretiza en una serie de escenarios con una probabilidad de ocurrencia asociada.

La principal dificultad de la programación estocástica de dos etapas radica en la dimensión de los problemas resultantes. El número de ecuaciones y restricciones comparado con el problema determinista (sin incertidumbre) se multiplica por el número de escenarios considerados para los parámetros inciertos. Teniendo en cuenta que los problemas mixto-enteros son del tipo “NP-complete”, su dificultad computacional tiende a escalar de forma exponencial con el número de variables en el peor de los casos. Así, los tiempos necesarios para resolver casos de estudio representativos de la realidad son prohibitivos. Por tanto, es necesario disminuir de alguna forma estos tiempos de cómputo para facilitar la incorporación de incertidumbre en la toma de decisiones de problemas de scheduling a nivel industrial.

En la edición 2022 del Simposio Conjunto de los Grupos Temáticos de CEA: Modelado, Simulación, Optimización e Ingeniería de Control, los autores presentaron un método de descomposición que permite resolver cada escenario de realización de incertidumbre como un problema de optimización independiente, lo que permitía obtener soluciones hasta sesenta veces más rápido que la formulación tradicional [1]. Para esto, se usaba un índice de similitud que permitía comparar las soluciones de cada escenario en la primera etapa. Tal índice se maximizaba en cada iteración hasta que las soluciones de primera etapa fueran iguales y se cumplieran las restricciones de no anticipabilidad.

Sin embargo, nuestra propuesta anterior solo estaba pensada para problemas de scheduling con una representación discreta del tiempo. Es decir, aquellos problemas en los que de antemano se fijaba la duración y número de los periodos de tiempo del horizonte. La aproximación discreta del tiempo lleva a soluciones sub-óptimas por definición y además incrementa de forma drástica el número de variables binarias asociadas con cada intervalo temporal [2]. Para superar estas limitaciones, se desarrollaron formulaciones que usan una representación continua del tiempo. En estas, la duración de los intervalos de tiempo son una variable de decisión más del problema de optimización. Estos modelos aunque son más difíciles de desarrollar, pueden dar lugar a soluciones más precisas y menores tiempo de cómputo.

La principal dificultad para extender el uso del Índice de Similitud a problemas basados en formulaciones de tiempo continuo se debe a que la duración de los intervalos temporales es variable. Si se tuviera en cuenta la duración de estos periodos a la hora de calcular la similitud entre sub-problemas, aparecerían términos altamente no lineales y no convexos con lo que se complicaría enormemente la solución. Para contrarrestar este inconveniente, se propone desligar completamente el cálculo del índice de similitud de la duración de los periodos. Luego, para que la duración de los periodos sea igual en todos los escenarios, se puede usar el algoritmo de Progressive Hedging (PHA) [3]. Este está basado en el lagrangiano aumentado y penaliza la desviación de las variables del valor esperado calculado a partir de la solución de todos los escenarios. Así, se combinaría en una misma función de costo el término de maximización del índice de similitud y los términos correspondientes al PHA.

*Autor para la correspondencia: danielalberto.montes.lopez@uva.es

Se probó el método de combinar el SI y el Progressive Hedging en un caso de estudio de la literatura sobre un problema híbrido de planificación y scheduling de una planta continua multiproducto con una única unidad de procesamiento [4]. El problema original era determinista y se extendió considerando la demanda de productos como una variable incierta. El caso de estudio resultante tenía un horizonte de cuatro semanas, siendo las primeras dos correspondientes a la primera etapa. Considerando 5 productos distintos y ocho escenarios igualmente probables, el problema de optimización resultante tenía 8801 variables continuas, 1120 variables binarias y 9155 restricciones. El problema se codificó en GAMS 40.2.0 y se usó Gurobi 9.5 para resolverlo.

El enfoque monolítico llegó a una solución $z^P = 10685$ tras alrededor de 10 horas de cómputo. Por otra parte, la propuesta de combinación de SI + PHA llegó a $z^P = 9883$ en 269 iteraciones y 2141 segundos. Aunque la solución del enfoque de descomposición es ligeramente peor (se está maximizando), estos resultados preliminares parecen indicar que el enfoque de descomposición permite obtener soluciones factibles de buena calidad mucho más rápido que con su contraparte monolítica. En la Figura 1 se muestra cómo evoluciona el índice de similitud y el error del PHA a lo largo de las iteraciones. Se puede ver que el SI converge rápidamente al valor máximo posible de 1 (las soluciones binarias son iguales), mientras que el error del PHA tarda bastante en cumplir el criterio de convergencia establecido.

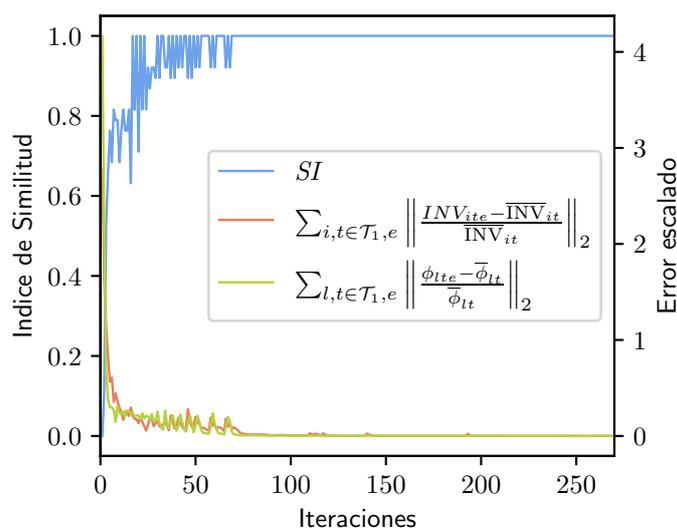


Figura 1. Evolución del SI y el error escalado a lo largo de las iteraciones

Como trabajo futuro se plantea buscar reemplazar el PHA para cumplir las restricciones de no anticipación en las variables continuas del problema. Con estos resultados preliminares, se pudo observar que el algoritmo está limitado principalmente por la convergencia de las variables continuas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal de Investigación a través de los proyectos a-CIDiT (PID2021-123654OB-C31, PID2021-123654OB-C32) y LOCPU (PID2020-116585GB-I00). Daniel Montes agradece a la Universidad de Valladolid y el Banco Santander por financiar sus estudios a través de la convocatoria 2020 de contratos predoctorales de dicha universidad.

Referencias

- [1] D. Montes, J. L. Pitarch y C. de Prada, «Descomposición de Problemas de Scheduling de Dos Etapas Usando un Índice de Similitud,» *Actas del Simposio Conjunto de los Grupos Temáticos de CEA Modelado, Simulación, Optimización e Ingeniería de Control*, págs. 34-38, abr. de 2022.
- [2] C. A. Floudas y X. Lin, «Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review,» *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, págs. 2109-2129, 11 2004. DOI: 10.1016/J.COMPCHEMENG.2004.05.002.
- [3] R. Rockafellar y R. J. Wets, «Scenarios and Policy Aggregation in Optimization Under Uncertainty,» *Mathematics of Operations Research*, vol. 16, págs. 119-147, 1 1991.
- [4] M. E. Dogan e I. E. Grossmann, «A decomposition method for the simultaneous planning and scheduling of single-stage continuous multiproduct plants,» *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 45, págs. 299-315, 1 2006. DOI: 10.1021/ie050778z.

Erika Oliveira-Silva^{a,*}, Cesar de Prada^a, Daniel Navia^b

^a Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid. C/ Real de Burgos s/n, 47011, Valladolid, España
Instituto de Procesos Sostenibles, Dr. Mergelina s/n, 47011, Valladolid, España

^b Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Técnica Federico Santa María, Avd. Vicuña Mackenna, Campus San Joaquín, Santiago, Chile

Resumen

Este trabajo presenta un estudio para implementación de una capa de Optimización Dinámica en Tiempo Real (dRTO) con Adaptación de Modificadores (MA) (Marchetti et al., 2009) a un splitter industrial de propano-propileno de una refinería de España. Un splitter de propano-propileno es una superfraccionadora, es decir, una columna de destilación que realiza la separación de componentes de volatilidad relativa bastante baja ($<1,2$) entre los componentes, y por eso la columna necesita de un elevado número de etapas de equilibrio, tardando más de 10 horas en alcanzar el estado estacionario. El objetivo del splitter estudiado es producir propileno de alta pureza a partir de una corriente de propileno, propano y una pequeña cantidad de impurezas. Un controlador DMC mantiene la concentración de propileno en el destilado dentro de un rango, manipulando el flujo de destilado y el flujo de vapor al hervidor.

Dado que las dos variables manipuladas del DMC están directamente relacionadas con los costes principales (vapor) y beneficios (producción de destilado), parece lógico añadir una capa RTO capaz de calcular el óptimo del proceso (las consignas para el DMC) como se presenta en la imagen 1. Normalmente, en una RTO se utiliza un modelo no lineal basado en primeros principios, pero en el presente caso, debido al gran tamaño del modelo (más de 12000 ecuaciones), complejidad y tiempo de desarrollo/mantenimiento de un modelo de este tipo, no se recomienda su uso. En su lugar, se usará el modelo lineal ya desarrollado para el DMC para este fin. Sin embargo, el uso de un modelo con grandes incertidumbres paramétricas y estructurales, como el modelo lineal del DMC, puede dar lugar a suboptimalidad en el proceso. Para evitar este problema, se ha incluido conceptos de MA en la optimización dinámica. El MA propone modificar el problema de optimización de modo que las condiciones necesarias de optimalidad del problema (NCO) del modelo se igualen a los de la planta real, independientemente de la presencia de incertidumbres modelo-proceso. Además, la dinámica lenta del splitter requiere la estimación de los modificadores de MA utilizando medidas del transitorio, por lo que se utiliza la Estimación Dinámica de Modificadores (DME) (Oliveira-Silva et al., 2021).

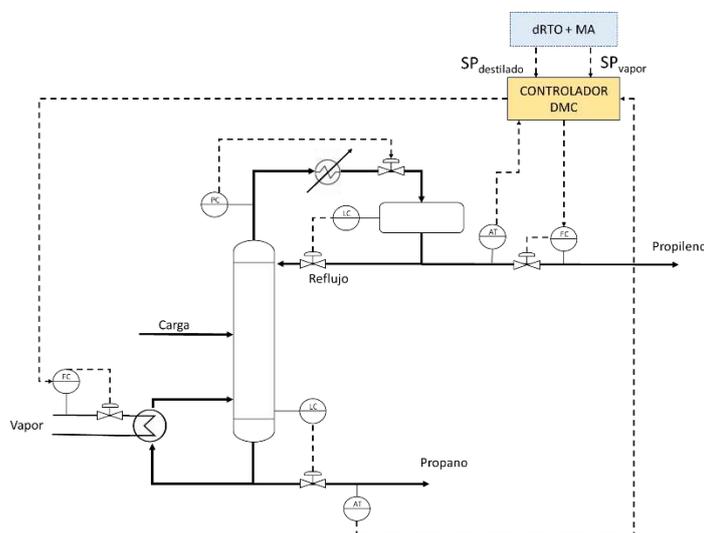


Imagen 1. Diagrama de flujo del proceso real con la propuesta de inclusión de una capa dRTO+MA.

Las pruebas para la propuesta de inclusión de una capa de optimización dinámica en el proceso se realizan en un entorno de planta virtual que imita la planta real, como se muestra en la imagen 2. La planta virtual utiliza un modelo dinámico riguroso de primeros principios en lugar del splitter. La planta virtual está integrada con el mismo controlador DMC que la planta real, y la comunicación entre las distintas capas de la pirámide de automatización se realiza mediante OPC-UA (Oliveira-Silva et al., 2022). La función de coste económico de la capa RTO considera el beneficio de vender propileno y propano menos el coste de

*Autor para la correspondencia: erika.oliveira@autom.uva.es

producir vapor en estado estacionario. El precio del destilado depende de la concentración de propileno ($\geq 97,5\%$ molar), es decir, por debajo de este valor, el precio disminuye en función de la composición.

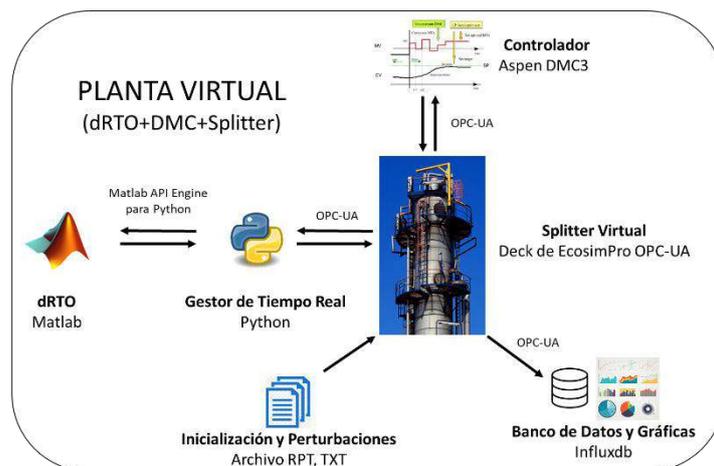


Imagen 2. Arquitectura de la planta virtual.

Los resultados muestran que la aplicación de MA utilizando DME se mantiene en el valor óptimo de la función de coste durante un periodo de tiempo más largo, debido a que el algoritmo MA es capaz de cumplir la restricción durante la mayor parte del tiempo de operación. En conclusión, la arquitectura de dRTO con MA utilizando datos transitorios y controlador DMC fue capaz de aumentar el rendimiento económico global de la planta en comparación con la no utilización de la metodología MA.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo de la Junta de Castilla y León y la UE-FEDER (CLU 2017-09, CL-EI-2021-07, UIC 233), así como con el proyecto PID2021-123654OB-C31 (a-CIDit), de MCIN/AEI/10.13039/501100011033 / FEDER, UE. El primer autor agradece al Fondo Social Europeo y a la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León. Todos los autores desean también agradecer a la dirección de Petronor por su compromiso y ayuda.

Referencias

- Marchetti, A., Chachuat, B., Bonvin, D., 2009. Modifier-Adaptation Methodology for Real-Time Optimization. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 6022–6033. <https://doi.org/10.1021/ie801352x>
- Oliveira-Silva, E., de Prada, C., Navia, D., 2022. Simulation platform of an industrial propylene-propane splitter integrated to Advanced Process Control for Real Time Optimization experiments. *IFAC-PapersOnLine* 55, 673–678. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.521>
- Oliveira-Silva, E., de Prada, C., Navia, D., 2021. Economic MPC with Modifier Adaptation using Transient Measurements, in: *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier Masson SAS, pp. 1253–1258. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88506-5.50193-5>.

Irina Bausa-Ortiz^{a,b,*}, Raúl Muñoz^{a,c}, Smaranda P. Cristea^{a,b}, Cesar de Prada^{a,b}

^a Instituto de Procesos Sostenibles. Universidad de Valladolid. C/ Doctor Mergelina s/n, 47011, Valladolid, España

^b Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid. Prado de la Magdalena 3-5, 47011, Valladolid, España

^c Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. Universidad de Valladolid. C/ Doctor Mergelina s/n, 47011, Valladolid, España

Resumen

En este trabajo se propone una alternativa para la estimación de parámetros cuando el problema de optimización involucra un elevado número de variables de salida y parámetros a estimar. Este tipo de problemas de optimización es común en los sistemas biológicos; caracterizados, además, por la interdependencia entre los diferentes procesos y variables involucrados en los mismos. La metodología propuesta resuelve un conjunto de problemas de optimización de complejidad creciente para estimar los parámetros del modelo de forma gradual, evitando problemas de convergencia. En cada etapa se plantea resolver un problema de estimación de parámetros mediante optimización dinámica con el objetivo de ajustar las salidas del modelo a los datos experimentales. La idea es formular inicialmente un problema de optimización más simple, que involucre solamente un determinado número de salidas y parámetros, reemplazando las otras salidas por los datos experimentales y luego utilizar estos valores estimados como valores iniciales de los parámetros en el planteamiento del siguiente problema de optimización. En este enfoque se plantea realizar la optimización en varias etapas incrementando el tamaño de los subconjuntos, hasta que todas las salidas del modelo sean consideradas en el problema de optimización.

La metodología propuesta ha sido aplicada al problema de estimación de parámetros en un fotobiorreactor de microalgas y bacterias para el tratamiento de aguas residuales domésticas. En este trabajo se utiliza el modelo BIO_ALGAE 2 (Solimeno, Gómez-Serrano, and Acien 2019) para describir el fotobiorreactor. Se han considerado cinco salidas del modelo: la concentración de Sólidos en Suspensión Totales (TSS), la concentración de oxígeno disuelto en el fotobiorreactor (S_{O_2}), la concentración de Carbono Orgánico Total (TOC) disuelto, la concentración de Carbono Inorgánico (IC) disuelto y la concentración de amonio disuelto ($S_{NH_4^+}$). El modelado, simulación y estimación de parámetros se realizan utilizando el entorno de simulación dinámica PROOSIS® (EA International, 2022).

Previo a la estimación de parámetros se realiza un análisis de sensibilidad para determinar los parámetros del modelo que presentan una mayor influencia sobre las salidas del proceso. Para el análisis de sensibilidad se consideraron parámetros del modelo involucrados en los procesos de microalgas, bacterias heterótrofas, bacterias nitrificantes y transferencia de gases a la atmósfera. Los resultados del análisis de sensibilidad indicaron que las salidas del modelo presentan una elevada sensibilidad a los parámetros relacionados con las tasas máximas específicas de crecimiento de microalgas (μ_{ALG}) y bacterias heterótrofas (μ_H), las constantes de inactivación de microalgas ($k_{death,ALG}$) y bacterias heterótrofas ($k_{death,H}$) y los coeficientes de transferencia de masa del amoníaco (K_{la,NH_3}), oxígeno (K_{la,O_2}) y dióxido de carbono (K_{la,CO_2}). En este trabajo se utilizan los resultados del análisis de sensibilidad como una guía para seleccionar los subconjuntos a utilizar en el planteamiento de los problemas de optimización. Además, para la selección de estos subconjuntos debe considerarse el conocimiento previo sobre la dinámica del proceso y las dependencias más significativas entre las salidas del modelo y los parámetros a estimar. En la Imagen 1 se muestran los subconjuntos de variables de salida utilizados en el problema de estimación de parámetros mediante optimización dinámica, así como las etapas necesarias para incluir todas las salidas en el problema de optimización.

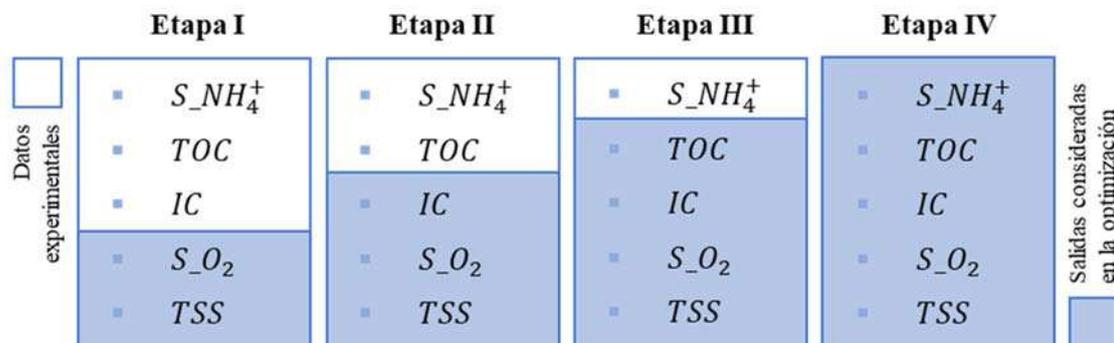


Imagen 1. Etapas del problema de optimización en el fotobiorreactor

En la primera etapa del problema de optimización se consideraron dos salidas del modelo: la concentración de TSS y la concentración de oxígeno disuelto. Ambas salidas poseen una elevada sensibilidad a la tasa máxima específica de crecimiento

*Autor para la correspondencia: irina.bausa@uva.es

de las microalgas, la constante de inactivación de las microalgas y el coeficiente de transferencia de masa del oxígeno. En la segunda etapa del problema de optimización se incluye la concentración de carbono inorgánico disuelto como salida del modelo; el parámetro con mayor influencia sobre la concentración de este es la tasa máxima específica de crecimiento de las microalgas. Además, el carbono inorgánico está altamente afectado por el coeficiente de transferencia de masa del dióxido de carbono. En la tercera etapa la concentración de carbono orgánico disuelto se incluye como salida del modelo. En los sistemas basados en consorcios de microalgas-bacterias, las bacterias heterótrofas oxidan la materia orgánica presente en el agua residual, por lo cual, la concentración de TOC está afectada principalmente por la tasa máxima específica de crecimiento de las bacterias heterótrofas y la constante de inactivación de las bacterias heterótrofas. Por último, la concentración de amonio disuelto se incluye como salida del modelo en la última etapa. La concentración de amonio disuelto depende en gran medida de la razón máxima específica de crecimiento de las microalgas, la constante de inactivación de las microalgas y el coeficiente de transferencia de masa del amoníaco.

En este trabajo se utilizó el estimador *fair function* (Huber, 2011) como función objetivo robusta en el problema de estimación de parámetros. A diferencia de los estimadores basados en mínimos cuadrados, este estimador es robusto ante errores de medición que no presentan una distribución gaussiana. En la Tabla 1 se muestran los resultados de la solución del problema de optimización en cada etapa. Los valores iniciales de los parámetros en la primera etapa, así como el rango de valores de estos para la optimización se han definido de acuerdo con resultados previos reportados en la literatura (Bausa et al., 2022).

Tabla 1. Valores de los parámetros estimados en el fotobiorreactor #

Parámetro	Valor				Rango de valores para la optimización
	Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3	Etapas 4	
μ_{ALG} [d^{-1}]	1.627	0.990	1.062	1.062	0.4 – 2
$k_{death,ALG}$ [d^{-1}]	0.101	0.050	0.050	0.050	0.05 – 0.21
μ_H [d^{-1}]	1.656	1.000	1.210	1.211	1 – 6
$k_{death,H}$ [d^{-1}]	0.895	0.900	0.900	0.900	0.12 – 0.9
K_{la, O_2} [d^{-1}]	13.081	4.000	4.000	4.000	4 – 30

La aplicación de este enfoque para la estimación de parámetros en el fotobiorreactor permitió obtener un mejor ajuste del modelo a los datos experimentales y menor tiempo de convergencia respecto al planteamiento del problema de optimización considerando todas las salidas a la vez en una sola etapa.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Castilla y León y EU-FEDER (CLU 2017-09, CL-EI-2021-07, UIC 233, UIC 315), por la Junta de Castilla y León y el Fondo Social Europeo (Orden EDU/601/2020) y por el Proyecto a-CIDiT (PID2021-123654OB-C31).

Referencias

- Bausa, I., Muñoz, R., Podar, S., & de Prada, C., 2022. Modeling and simulation of anoxic-aerobic algal bacterial photobioreactor for nutrients removal. In L. Montastruc & S. Negny (Eds.), *COMPUTER-AIDED CHEMICAL ENGINEERING, 51 - PROCEEDINGS OF THE 32nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE32)*, June 12-15, 2022, Toulouse, France (Vol. 2, pp. 151–156). © 2022 Elsevier B.V. All rights reserved. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50026-6>
- EA International, 2022. EcosimPro | PROOSIS - Modelling and Simulation Toolkits and Services. <https://www.ecosimpro.com/> (Accessed: 18 July 2022)
- Huber, P. J., 2011. Robust Statistics. In M. Lovric (Ed.), *International Encyclopedia of Statistical Science*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_594
- Solimeno, A., Gómez-Serrano, C., & Ación, F. G. 2019. BIO_ALGAE 2: improved model of microalgae and bacteria consortia for wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(25), 25855–25868. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05824-5>

Desarrollo de un modelo matemático para la predicción de la degradación de calidad en pescado fresco



Miguel Novoa^a, Silvia Muñoz^b, Juan R. Herrera^b, Míriam R. García^a,
Marta López-Cabo^b, Carlos Vilas^{*a}

^aGrupo de Bioingeniería y Bioprocesos, IIM-CSIC, Eduardo Cabello, 6, 36208 Vigo, España

^bGrupo de Microbiología y Tecnología de Productos Marinos, IIM-CSIC, Eduardo Cabello, 6, 36208 Vigo, España

Resumen

El pescado fresco es un producto que se degrada con rapidez (Tavares et al., 2021), lo que conlleva que cerca de un 15 % del pescado capturado se desperdicie. Si las condiciones de transporte y almacenamiento (principalmente temperatura) no son adecuadas, el desperdicio puede llegar al 35 % (Corradini, 2018). Los modelos matemáticos que describen la degradación de calidad de pescado fresco a lo largo de toda la cadena de valor son herramientas útiles que nos permiten determinar los efectos de posibles abusos de temperatura. Además, también permiten proporcionar al consumidor información relevante sobre el estado del producto y su vida útil, aumentando el valor añadido del mismo, sin necesidad de realizar una evaluación experimental. Cabe destacar que dicha evaluación es un proceso invasivo, lento, y que tiene que ser realizado por personal especializado.

La calidad del pescado es un concepto complejo en el que intervienen diferentes atributos nutricionales y organolépticos. Algunos de los indicadores más utilizados para su determinación son (García et al., 2022): el contenido microbiológico, la concentración de bases volátiles nitrogenadas (TVB-N) producidas por bacterias, o ciertos indicadores sensoriales como el QIM (del inglés *Quality Index Method*). La evaluación del QIM se realiza de forma subjetiva mediante un panel de expertos que valoran distintos atributos sensoriales (color, olor, textura, etc.) del pescado (Escribano et al., 2015).

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo matemático que permita describir la evolución de dichos indicadores (contenido microbiológico, TVB-N y QIM) a lo largo de toda la cadena de valor, es decir, desde la pesca hasta su venta al consumidor final. Dado que la temperatura afecta significativamente al crecimiento bacteriano, el modelo debe recoger este efecto. El producto considerado es Merluza (*Merluccius merluccius*) fileteada y envasada en atmósferas modificadas (50 % de CO₂ y 50 % de N₂). Como se muestra en la Figura 1, se considerarán dos enfoques distintos para el desarrollo del modelo. Por una parte, el crecimiento bacteriano y la evolución de TVB-N se describirán utilizando modelos inspirados en los mecanismos del proceso. La temperatura a lo largo del proceso, variable sencilla de medir, se introduce como una entrada en el modelo. Por otra parte, dado que el QIM es un indicador subjetivo en el que hay involucrados distintos indicadores sensoriales, se utilizará un algoritmo de aprendizaje automático. Dado que el número de datos experimentales no es elevado, se utilizará el algoritmo de bosque aleatorio (Breiman, 2001). Las entradas del modelo de bosque aleatorio son el contenido bacteriano y la concentración de TVB-N en el pescado. Además, los datos tomados experimentalmente se combinarán con datos sintéticos generados por modelos de deep learning (<https://gretel.ai/>) para aumentar el número de muestras utilizadas durante el entrenamiento.

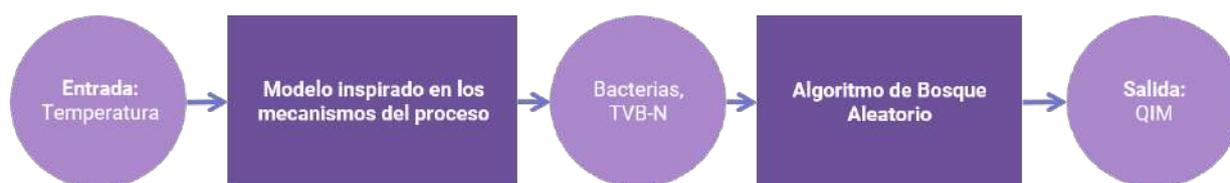


Figura 1. Diagrama de flujo del modelo utilizado para la evaluación y predicción de calidad en pescado fresco. Dicho modelo combina ecuaciones inspiradas en los mecanismos del proceso con algoritmos de aprendizaje automático.

En condiciones anaerobias, la principal bacteria responsable de la degradación de calidad en pescado es *Photobacterium phosphoreum*. Para describir la evolución de su población (m), se utilizará un modelo logístico de la forma (García et al., 2015):

$$\frac{dm}{dt} = \mu(T)(1 - 10^{m-m^*}), \quad \text{con} \quad \mu(T) = b^2(T - T_0)^2, \quad (1)$$

siendo m^* la concentración máxima de bacterias en escala logarítmica, T la temperatura durante el transporte y almacenamiento, y T_0 una temperatura conceptual mínima para el crecimiento bacteriano.

Las bases volátiles nitrogenadas se producen por la acción bacteriana (en este caso *Photobacterium phosphoreum*) en el alimento. En este trabajo, para describir la formación de TVB-N se considera una reacción de orden n de la forma:

$$\frac{d\text{TVB-N}}{dt} = k(T)m^n, \quad \text{con} \quad k(T) = k_{ref} \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (2)$$

* Autor para la correspondencia: carlosvf@iim.csic.es

donde k_{ref} es el valor del coeficiente de crecimiento a una temperatura de referencia T_{ref} y E_a es la energía de activación.

Con el objetivo de dotar de capacidad predictiva al modelo (1)-(2), los parámetros desconocidos del modelo (m^* , k_{ref} , E_a , b , n y T_0) y las condiciones iniciales ($m(t=0)$ y $TVB-N(t=0)$) se estimarán a partir de datos experimentales. Se incluyen las condiciones iniciales en la estimación, ya que se considera que todos los puntos experimentales tienen la misma relevancia. Para obtener los datos experimentales que se utilizarán en la estimación, se realizarán 3 experimentos a distintas temperaturas (1.6, 2.2 y 4.8 °C) correspondientes a los rangos típicos de temperatura utilizados durante el transporte y almacenamiento de pescado fresco. En dichos experimentos se tomarán diariamente tres medidas (réplicas) de cada uno de los indicadores de calidad (concentración de bacterias, TVB-N y QIM). Como se ha mencionado anteriormente, la evaluación del QIM la realiza un panel de 7 expertos del IIM-CSIC que valoran diferentes atributos del pescado. Dicho panel asigna una puntuación de demérito de 0 a 3 en la evaluación de la firmeza muscular, olor y sequedad, y una puntuación de demérito de 0 a 2 para las marcas o hematomas. El valor del QIM se corresponde con la suma de todas las puntuaciones. A mayor puntuación, menor calidad.

Los modelos de bosque aleatorio se basan en la construcción de árboles de decisión que calculan predicciones independientes de la variable a estimar, después se calcula la media de estas predicciones para dar un resultado final. Para seleccionar los hiperparámetros óptimos en el algoritmo de bosque aleatorio, por ejemplo, la profundidad máxima o el número de árboles de decisión, se utilizarán técnicas de validación cruzada anidada. Para evaluar la calidad de los modelos se usará validación cruzada de k iteraciones y validación cruzada repetida de k iteraciones.

La estimación de los parámetros del modelo (1)-(2) consiste en encontrar el vector de parámetros que minimiza la distancia entre la predicción del modelo y los datos experimentales. Para el cálculo de dicha distancia se utilizará el *log-likelihood* :

$$J_{llk}(\theta) = \frac{-1}{2} \sum_{k=1}^{n_c} \sum_{i=1}^{n_{x_k}} \left[\log(2\pi) + \log(\sigma_{x_{k,i}}^2) + \left(\frac{x_{k,i}(\theta) - x_{k,i}^{exp}}{\sigma_{x_{k,i}}} \right)^2 \right], \quad (3)$$

donde θ se corresponde con el vector de parámetros a estimar, n_c es el número de variables medidas experimentalmente (observables), n_{x_k} indica el número de puntos de muestreo de cada observable, y $x_{k,i}(\theta)$ y $x_{k,i}^{exp}$ representan, ambos, el valor del observable x_k a tiempo t_i . El primero ($x_{k,i}$) se refiere al valor calculado por el modelo, mientras que el segundo ($x_{k,i}^{exp}$) es el valor experimental. $\sigma_{x_{k,i}}(\theta)$ es la desviación estándar de la muestra del observable x_k en el tiempo t_i .

Es habitual que la función objetivo (3) sea multimodal (contiene varios mínimos en el espacio de búsqueda). Por lo tanto, para encontrar el mínimo global, se utilizará un método híbrido que combina búsqueda global con local. En particular, se utilizará el algoritmo *ESS*, implementado en la toolbox de Matlab *AMIGO* (Balsa-Canto et al. (2016)).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos: Pescando4.0 (ref. 202178002), financiado por fondos NextGenerationEU -Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR)- gestionado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación mediante el Real Decreto 685/2021; y del programa de Ciencias Marinas (ThinkInAzul) apoyado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y Xunta de Galicia con financiación de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y el Fondo Europeo Marítimo y de Pesca.

Referencias

- Balsa-Canto, E., Henriques, D., Gábor, A., Banga, J.R., 2016. Amigo2, a toolbox for dynamic modeling, optimization and control in systems biology. *Bioinformatics* 32, 3357—3359. doi:<https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btw411>.
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning*, 5–32doi:<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Corradini, M.G., 2018. Shelf life of food products: From open labeling to real-time measurements. *Annual Review of Food Science and Technology* 9, 251–269. doi:<https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012433>.
- Escribano, E., Massa, A., Yeannes, M.I., 2015. Desarrollo del método del índice de calidad (qim) para evaluar la frescura de la merluza común (*merluccius hubbsi*) almacenada en hielo. *La industria cárnica latinoamericana*, 48–54doi:<https://hdl.handle.net/11336/45340>.
- García, M.R., Ferez-Rubio, J.A., Vilas, C., 2022. Assessment and prediction of fish freshness using mathematical modelling: A review. *Foods* 11, 2312. doi:<https://doi.org/10.3390/foods11152312>.
- García, M.R., Vilas, C., Herrera, J.R., Bernárdez, M., Blasa-Canto, E., A. Alonso, A., 2015. Quality and shelf-life prediction for retail fresh hake (*merluccius merluccius*). *International Journal of Food Microbiology* 208, 65—74. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.05.012>.
- Tavares, J., Martins, A., Fidalgo, L.G., Lima, V., Amaral, R.A., Pinto, C.A., Silva, A.M., Saraiva, J.A., 2021. Fresh fish degradation and advances in preservation using physical emerging technologies. *Foods* 10, 780. doi:<https://doi.org/10.3390/foods10040780>.

Tomas Garcia Garcia-Verdier^{*a,b}, Gloria Gutierrez^{a,b},
Carlos Mendez^c, Cesar de Prada^{a,b}

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, C/ Dr. Mergelina s/n, Valladolid, 47011, Valladolid, España

^bInstitute of Sustainable Processes, Dr. Mergelina s/n, Valladolid, 47011, Valladolid, Spain

^cCenter for Advanced Process Systems Engineering (CAPSE), INTEC (UNL - CONICET), Industrial Engineering Dpt. (FIQ-UNL), Güemes 3450, Santa Fe, 3000, Santa Fe, Argentina

Resumen

El presente abstract se focaliza en la optimización de la programación de operaciones de crudos de una refinería con terminal marítima, correspondiente a un caso real. Para hacer frente a este problema hemos desarrollado un modelo de programación matemática mixto entero no lineal (MINLP) con formulación de tiempo continuo. Debido a la complejidad del modelo y a su naturaleza no lineal y no convexa, resulta imposible resolverlo de forma monolítica para horizontes de planificación extensos. Por lo tanto, hemos propuesto una técnica de descomposición temporal, en conjunto con una aproximación lineal, que permite obtener soluciones para un horizonte mensual y en un tiempo acorde a las necesidades del usuario.

Una de las principales motivaciones de este trabajo consiste en que, si bien hay artículos que abordan este problema, la mayoría de ellos lo hace empleando un enfoque de formulación de tiempo discreto (Hamisu et al. (2013)) y un número muy reducido empleando formulación de tiempo continuo (Castro and Grossmann (2014)). Además, existe un punto en común entre estos trabajos y es que resuelven el problema para un horizonte de planificación corto.

Antes de explicar en qué consiste el método, se describe la configuración y las características de operación del sistema bajo estudio (Figura 1). La refinería se abastece de crudos mediante barcos y, por lo tanto, cuenta con un puerto a través del cual se reciben los crudos que se almacenarán en los tanques; estas dos áreas (puerto y parque de tanques) se encuentran conectadas por un oleoducto.

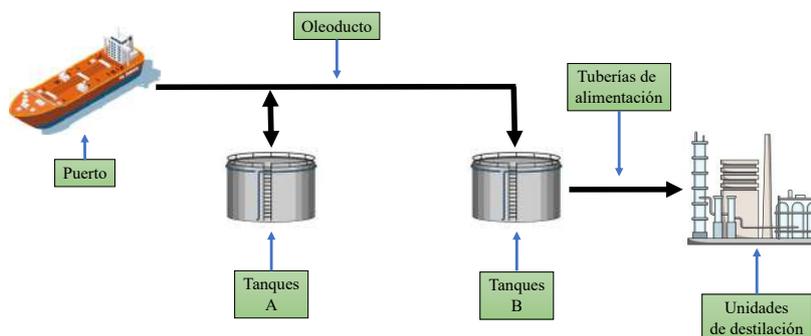


Figura 1. Esquema del sistema

Dentro del área de tanques se distinguen dos tipos, A y B, la diferencia entre un tipo y otro radica en que los tanques pertenecientes al tipo A no pueden alimentar a las unidades de destilación ya que no se encuentran conectados físicamente a ellas, solo pueden almacenar crudos y transferir a los tanques de tipo B. Debemos notar que esta clasificación se debe a características espaciales de los tanques y no depende de la composición de las mezclas almacenadas.

Por último, respecto a la configuración, se encuentran las unidades de destilación que procesan las mezclas obtenidas aguas arriba para cumplir con la demanda de productos finales. Cabe destacar que dichas mezclas deben cumplir con especificaciones de calidad, es decir, los valores de ciertas propiedades deben encontrarse dentro de un rango.

Una particularidad del problema es que existen ciertas calidades genéricas que se utilizan para clasificar tanto a los tanques como a los crudos. La clasificación de los tanques se realiza en función de reglas que evalúan la composición (clases de crudos almacenados y volúmenes) de los mismos y cada tanque tiene asociada una única calidad por vez, pero puede variar a lo largo del horizonte.

Un punto clave relacionado a los crudos es su descarga desde los barcos ya que debe tenerse en cuenta la clase del tanque receptor. Un crudo de una determinada clase puede descargarse en tanques de diferentes calidades, aunque existe una escala de prioridad que relaciona clase de crudos con clase de tanques receptores.

Además, en la refinería se llevan a cabo tres tipos de procesos de crudos y para cada uno de ellos existen recetas, las cuales indican las clases de tanques admitidas en la preparación de las mezclas de alimentación. Las fechas de las campañas de cada uno de estos procesos no están fijadas y se obtienen como resultado de la optimización.

* Autor para la correspondencia: tomasjorge.garcia@uva.es

Inicialmente, el modelo desarrollado puede resolverse de forma monolítica para horizontes de programación cortos, pero como se mencionó anteriormente, el horizonte para el cual se debe resolver el problema es de 30 días y en estos casos surgen problemas de convergencia al resolverlo monolíticamente.

A raíz de lo anterior, proponemos un método que consiste en resolver el horizonte de forma gradual, para lo cual iteramos sobre los barcos programados respetando el orden de llegada. En cada iteración incorporamos un nuevo barco y cada uno de ellos define un subhorizonte a optimizar. A partir de la solución obtenida en cada iteración, fijamos un conjunto de variables. Luego, las variables no fijadas se reoptimizan sucesivamente en las iteraciones posteriores. Repetimos el procedimiento hasta resolver el último barco y, de esta manera, logramos obtener la programación del horizonte completo. A partir de la resolución de diferentes instancias, podemos concluir que el método desarrollado nos permite obtener soluciones de buena calidad para un horizonte mensual y en un tiempo razonable.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero brindado por el Gobierno de España y el Fondo Social Europeo a través de los proyectos a-CIDiT (PID2021-123654OB-C31) e InCo4In (PGC 2018-099312-B-C31). Además, este trabajo ha contado con el apoyo de la Junta de Castilla y León y del EU-FEDER (CLU 2017-09, CL-EI-2021-07, UIC 233).

Referencias

- Castro, P.M., Grossmann, I.E., 2014. Global optimal scheduling of crude oil blending operations with rtn continuous-time and multiparametric disaggregation. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 53, 15127–15145. doi:10.1021/ie503002k.
- Hamisu, A.A., Kabantiok, S., Wang, M., 2013. Refinery scheduling of crude oil unloading with tank inventory management. *Computers and Chemical Engineering* 55, 134–147. doi:10.1016/j.compchemeng.2013.04.003.

Resumen

Robotic Park es un plataforma de sistemas ciberfísicos multi-agente en el campo de la robótica de reciente creación. Está enfocada al apoyo tanto de la investigación como de la educación fundamentalmente en el ámbito del control. Este tipo de plataformas deben mantenerse en continuo desarrollo para garantizar la continuidad en el trabajo de vanguardia. En este sentido, la arquitectura implementada en *Robotic Park* está basada en ROS 2 ya que facilita la adición de nuevos agentes, además de un sistema de comunicación descentralizado y una mayor integración con los entornos de simulación. Estos entornos de simulación se emplean, entre otras cosas, para el desarrollo de gemelos digitales de agentes reales y permiten incrementar fácilmente el número de agentes en experiencias de realidad mixta.

En este trabajo se presentan distintas experiencias de control de formaciones con robots reales y virtuales. En ellas se examinan los principales índices de desempeño en la formación y la comunicación entre los agentes. Como agentes se utilizan los nanocuatricópteros Crazyflie 2.1 y los robots móviles Khepera IV. En el caso de los robots virtuales y gemelos digitales se emplea la herramienta de simulación Webots. Todos los resultados obtenidos corroboran la adecuación de las estrategias basadas en eventos para la reducción de la transmisión de mensajes y la idoneidad de la arquitectura propuesta para el desarrollo de experiencias en realidad mixta.

1. Introducción

Los sistemas ciberfísicos (SCF) integran componentes físicos y digitales que interactúan durante su funcionamiento. El interés de los investigadores de distintos ámbitos en estos sistemas es patente. La atención sanitaria (Shishvan et al., 2018; Dey et al., 2018), los procesos de fabricación colaborativa (Liu and Wang, 2020), el Internet de las Cosas (IoT del *Internet of Things*) o los diferentes retos relacionados con la seguridad (Humayed et al., 2017) son algunos de ellos. En robótica, los SCF interactúan con los robots físicos mediante la computación, la comunicación y el control. Midiendo, procesando y reaccionando a la información recibida del mundo físico son capaces de operar de manera segura incluso en presencia de incertidumbre o con limitaciones de recursos. Permiten, por ejemplo, disminuir restricciones en la capacidad de cómputo que puedan existir (Chaâri et al., 2016). Una ventaja fundamental de los SCF es que permiten la recopilación e intercambio de datos en tiempo real. El hecho de poder monitorizar la actividad de los robots en tiempo real permite optimizar las tareas que realizan, mejorar en su eficiencia y productividad, maximizando de esta forma su rendimiento. Además, la monitorización en tiempo real también puede ayudar a identificar problemas y prevenir fallas, lo que puede reducir los costes de mantenimiento y aumentar la vida útil de los robots.

Un factor crítico en el desarrollo de cualquier SCF es el establecimiento de una arquitectura de comunicación que evite interrupciones entre componentes (Shi et al., 2011). En el caso particular de los sistemas multi-robot que realizan tareas colaborativas y coordinadas, los elementos computacionales que establecen la comunicación entre robots y con el entorno son fundamentales.

Dos componentes digitales al alcance los SCF que están experimentando un gran auge son los gemelos digitales (GD) y

las sombras digitales (SD) (Phanden et al., 2021; Guo et al., 2022). Tanto los GD como las SD son tecnologías que permiten la creación de modelos virtuales precisos de robots o procesos en entornos simulados. La diferencia entre estos componentes respecto a un modelo digital clásico es la naturaleza y dirección del flujo de datos entre el sistema físico y el digital. Un modelo digital es una versión digital de un objeto físico y no hay comunicación en tiempo real entre el sistema físico y el modelo digital. Esto es, una vez que se crea el modelo digital, cualquier cambio en el sistema físico no tendrá impacto en el modelo digital. En los GD y SD, existe comunicación en tiempo real entre el sistema físico y el sistema digital. Cuando la comunicación es bidireccional se trata de un GD. La SD corresponde al caso en el que la comunicación sea unidireccional desde el sistema físico hacia el sistema digital (Fuller et al., 2020). Tanto los GD como las SD permiten realizar con datos obtenidos en tiempo real estimaciones de parámetros, controladores predictivos, detección de fallas, etc sobre el sistema físico. La explotación de los gemelos, sombras y modelos digitales en el marco de los SCF dan lugar a gran cantidad de desafíos y casuísticas en el ámbito de la robótica y del control.

Otra tecnología relativamente reciente, que también ha contribuido significativamente a la integración de los entornos físicos y digitales en el ámbito de la robótica, es la realidad aumentada (RA) (Makhataeva and Varol, 2020). A diferencia de la realidad virtual (RV) que genera representaciones del mundo físico, la RA, enfocada principalmente en la robótica colaborativa, permite superponer información digital en elementos del mundo físico. La realidad mixta (RM) supone una combinación de la RV y la RA (Hoenig et al., 2015). La RM, muy utilizada en los sistemas colaborativos (Sievers et al., 2020), interactúa y manipula elementos y entornos tanto físicos como digitales. La interacción es completamente bidireccional entre ambos entornos. Esto implica que los comportamientos de los modelos digitales tienen un efecto en el comportamiento de los sistemas físicos y viceversa.

* Autor para la correspondencia: fjanas@dia.uned.es

En este trabajo se presentan los progresos realizados sobre la plataforma *Robotic Park*. El SCF sobre el que se trabaja en esta plataforma es un sistema multiagente de robots heterogéneos. En particular se tratan problemas en el ámbito del control distribuido de formaciones. Dadas las limitaciones hardware de los robots, la gestión de los recursos energéticos supone un factor clave en las experiencias llevadas a cabo. Por esta razón, se evalúa el desempeño del sistema de control empleando una comunicación basada en eventos con umbral de disparo constante frente al caso de comunicación a frecuencia constante. De igual forma, se presentan los resultados iniciales del desarrollo de SCF multi-agente en los que se emplean robots físicos y virtuales en experiencias de RM. Estos desarrollos permiten evaluar sistemas de mayor complejidad escalando el número de agentes, además de poderse validar la inclusión de nuevos robots en el sistema si se dispone de modelos precisos de estos. Los resultados obtenidos demuestran que con la arquitectura propuesta en ROS 2, el comportamiento del sistema es indiferente a la naturaleza real o virtual de los robots y el empleo de estrategias basadas en eventos en la comunicación libera de forma significativa el uso del canal de comunicación.

La estructura del trabajo es la siguiente: en la sección 2 se describen las últimas características añadidas a la plataforma *Robotic Park*. En la sección 3 se describen los principales aspectos teóricos del control de formación y comunicación empleados en las experiencias descritas en la sección 4, donde se presentan algunas de las experiencias más representativas realizadas recientemente junto con sus resultados. Finalmente, en la sección 5 se resumen las conclusiones del trabajo, así como algunas posibles líneas de actuación futuras.

2. Plataforma Experimental, *Robotic Park*

En esta sección se describen las principales características incorporadas a *Robotic Park* (Mañas-Álvarez et al., 2022a). Esta plataforma está diseñada para la experimentación de SCF multi-robot. Su desarrollo, altamente modular y flexible, no se ha concebido para mantener una configuración estática sino que está pensado para facilitar un proceso de mejora continuo. Esto permite que la experimentación con diferentes arquitecturas, jerárquicas o componentes no requiera modificaciones hardware y todo sea configurable desde ficheros de configuración preestablecidos.

2.1. Arquitectura software en ROS 2 Humble

La arquitectura implementada en *Robotic Park* está basada en ROS 2 (*Robot Operating System 2*) (Macenski et al., 2022) en su distribución Humble. ROS es uno de los estándares de código abierto más usados en el mundo de la robótica. A diferencia de su primera versión, este sistema permite implementar en la misma red arquitecturas centralizadas y distribuidas en la comunicación entre componentes. Además, con parámetros como `ROS_DOMAIN_ID` se pueden crear subespacios dentro de la misma red para operar de forma independiente y aisladas sistemas de ROS 2. Gracias al uso de tipos estándar en las variables que se emplean, la integración de nuevos robots que ya dispongan de drivers para este sistema no requiere de ninguna modificación en el entorno o en el resto de agentes. Existe otra versión de ROS desarrollada recientemente que permite integrar dispositivos basados en microcontroladores directamente

en la red de ROS 2 a través de “clientes”, Micro ROS ó u-ROS. Gracias a esta versión, robots que empleen dispositivos como los ESP32 o Raspberry Pi Pico pueden integrarse igual que un PC o sistemas embebidos como Raspberry Pi o NVIDIA Jetson Nano.

Para realizar experiencias multi-robot, cada agente se configura para operar en su propio *namespace*. Esto facilita la escalabilidad de la plataforma evitando tener que cambiar manualmente nombres a los nodos y *topics* de robots similares. En Figura 1 se muestra un ejemplo de *namespace* para un robot genérico que dispone de un gemelo digital durante una experiencia de control de formación.

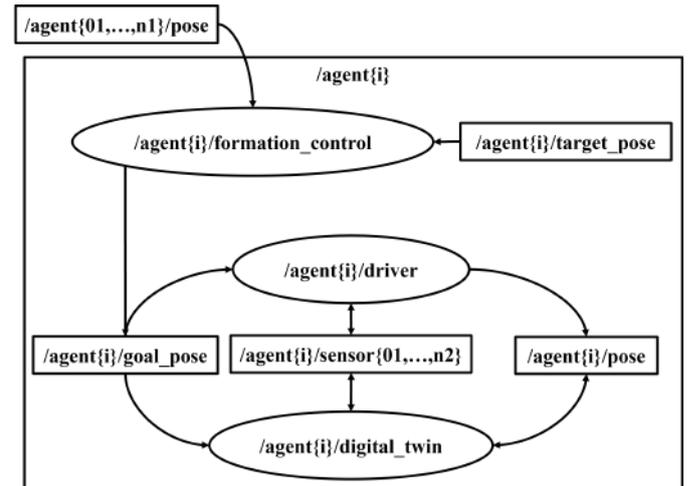


Figura 1: *Namespace* genérico para un robot con gemelo digital.

2.2. Robots

Actualmente *Robotic Park* cuenta con 5 tipos de robots disponibles para el diseño de experiencias reales, Figura 2. Los robots aéreos operativos son los cuadricópteros de código abierto Crazyflie 2.1 de Bitcraze (Giernacki et al., 2017) y los comerciales Tello de DJI (Giernacki et al., 2022). Los robots móviles diferenciales disponibles son los Khepera IV de K-Team (Soares et al., 2016) y los Turtlebot3 Burger de Robotis (Amsters and Slaets, 2020). La última incorporación a la plataforma es el robot Limo de Agilex. La locomoción de este robot multimodal y se puede configurar para que tenga un comportamiento omnidireccional, diferencial de cuatro ruedas, diferencial mediante cadenas o de tipo ackermann.

La comunicación con los Crazyflie se realiza mediante la antena Crazyradio y su driver para ROS 2 está basado en su librería *cflib*^{*}. Los drones Tello cuentan con un driver no oficial que permite tanto el control de robots reales como su modelo de simulación para Gazebo^{**}. Los robots Turtlebot3 Burger y Limo disponen de su propio driver oficial que se ejecuta en la Raspberry Pi 4 y Jetson Nano que incorporan respectivamente. De esta forma pueden operar de forma completamente autónoma en la red. Finalmente, el robot Khepera IV no dispone de driver para ROS 2. La forma que se ha adoptado para integrarlos dentro de la red ha sido mediante un sistema cliente-

^{*}<https://github.com/bitcraze/crazyflie-lib-python>

^{**}https://github.com/clydemcqueen/tello_ros

servidor o mediante u-ROS a través de un microcontrolador ESP32 y comunicación I2C o puerto serie con el robot.

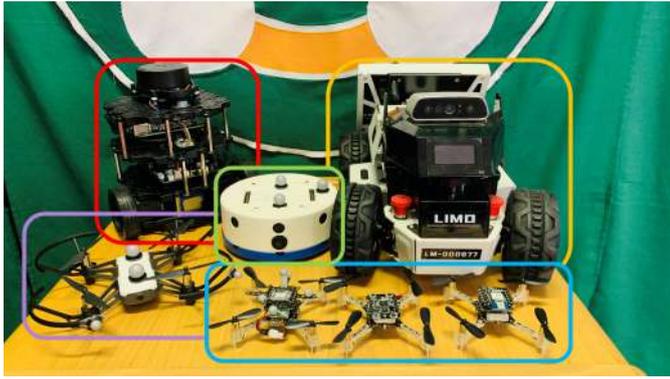


Figura 2: Robots disponibles en *Robotic Park*. Turtlebot3 Burger (rojo), Khepera IV (verde), Limo Robot (naranja), DJI Tello (morado) y Crazyflies 2.1 (azul) con cubiertas para distintos sistemas de posicionamiento: MoCap (izquierda), LightHouse (centro), LPS (derecha).

2.2.1. Gemelos digitales

Disponer de GD de los robots disponibles aporta un gran valor a la funcionalidad de la plataforma. Los gemelos empleados hasta el momento son modelos virtuales que se ejecutan en los entornos de simulación. Su funcionalidad está enfocada en la realimentación sensorial de aquellos robots exclusivamente virtuales en experiencias de RM. Gracias a la comunicación entre el robot físico y su gemelo, se pueden implementar estrategias de evasión de obstáculos entre robots reales y simulados para perfilar el comportamiento realista que se obtendrían si todos los robots operasen en el mismo entorno. De igual forma, la configuración de los gemelos está abierta para poder destinarse a otras finalidades como algoritmos de control predictivos o estudios de detección de fallas.

3. Control distribuido de formaciones

Los trabajos realizados recientemente se han enfocado en el control de formación de sistemas multi-agente que combinan robots aéreos y robots terrestres. La comunicación entre agentes se ha enfocado en el caso bidireccional o por consenso (Soni and Hu, 2018). Estos problemas se pueden abordar con distintas estrategias de control distribuido, como controladores PI (Mañas-Álvarez et al., 2022b) descritos por

$$u_i^s(k) = \frac{-1}{N_i} \sum_{j \in N_i} p_{ij}^* - (p_i(k) - p_j(k)) + \sum_{l=1}^{k-1} \frac{-1}{N_i T_i} \sum_{j \in N_i} p_{ij}^* - (p_i(l) - p_j(l)). \quad (1)$$

donde N_i representa el número de agentes, T_i es el tiempo integral del controlador, $p_i \in \mathbb{R}^3$ la posición del agente i y $p_{ij}^* \in \mathbb{R}^3$ la posición relativa deseada entre los agentes i y j .

Por otro lado, una de las estrategias de control de formaciones más extendidas para sistemas multi-agente (véase por

ejemplo Sun (2018)), viene descrita por el controlador

$$u_i^s(k) = \frac{-1}{2} \sum_{j \in N_i} \mu_{ij} (d_{ij}^{*2} - \|p_i(k) - p_j(k)\|^2) (p_i(k) - p_j(k)), \quad (2)$$

donde $\mu_{ij} > 0$ es la ganancia del controlador. y d_{ij}^* representa la distancia deseada entre los agentes i y j . La señal de control de estos controladores son el desplazamiento que deben realizar los agentes desde su posición actual. En ambos casos, las señales de control tienden a cero cuando la distancia relativa entre agentes converge a la distancia deseada.

Otro factor de gran importancia en las estrategias de control multi-agente, contrastado a lo largo de las experiencias realizadas, es la periodicidad en el muestreo en la transmisión de las comunicaciones entre agentes. En el caso ideal, la comunicación continua permite un control constante y corrige errores continuamente. No obstante la realidad presenta restricciones en las capacidades de los canales de comunicación o consumos energéticos. Para abordar estos fenómenos se ha contrastado la eficacia de las estrategias de muestreo basadas en eventos frente a la comunicación periódica. Un ajuste adecuado de los umbrales de los sistemas basados en eventos permite reducir las transmisiones innecesarias y el consumo energético que requieren. De igual forma, en sistemas que presentan cierto nivel de oscilaciones en estacionario, como es el caso de los drones, estas estrategias ayudan a actuar como filtro en la referencia y evitan la propagación de las oscilaciones al resto del grafo que compone el sistema multi-agente.

La generación de eventos que indican el instante en el que se produce la transmisión del estado p_i de un agente i a sus vecinos se realiza mediante lo que se denomina condición de disparo, f_i . Los instantes t_k^i en los que se genera un evento en el agente i se pueden determinar de forma recursiva como

$$t_{k+1} = \inf\{t : t > t_k, f_i > 0\}, \quad (3)$$

Una de las condiciones de disparo más usadas por su simplicidad de comprobación es la denominada “send-on-delta” (Miskowicz, 2006)

$$f_i(e_i(t)) = \|e_i(t)\| - c_0^i, \quad (4)$$

donde $e_i(t) = p_i(t) - p_i(t_k^i)$, es decir, la diferencia entre la posición actual y la última posición transmitida, y $c_0^i \in \mathbb{R}_{>0}$. En esta definición, el umbral de disparo es constante y aplicado a los robots empleados, representa el radio de la esfera en la que pueden moverse sin actualizar su posición a sus vecinos.

4. Resultados

La experiencia presentada en este trabajo consiste en una comparación en el muestreo de las posiciones de cada agente en el control de formación de un conjunto de robots reales y virtuales en RM. En este caso se emplea un robot aéreo del tipo Crazyflie 2.1 (CF01) y cuatro robots móviles Khepera IV de los cuales dos son reales (KH01 y KH02) y dos virtuales (KH03 y KH04). Los robots virtuales se ejecutan en el entorno Webots (Michel, 2004). Como los robots virtuales y los reales usan la misma nomenclatura son indistinguibles. Esto es, desde el punto de vista de los controladores, es imposible distinguir qué información procede del mundo real y cual del entorno de simulación. La tipología de comunicación implementada y las

distancias deseadas en metros entre robots se muestran en la Figura 3.

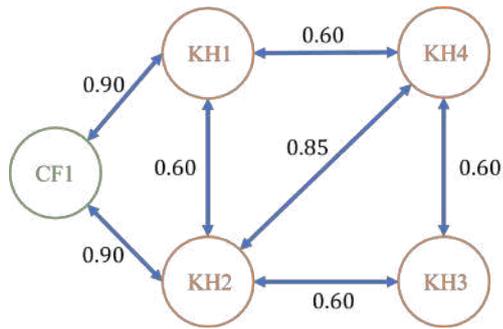


Figura 3: Topología del sistema de cinco agentes.

Se analizan dos supuestos de comunicación. En el primero de ellos, caso A, se emplea un protocolo de muestreo continuo en la transmisión de la posición de cada robot. Los robots Khepera emplean una frecuencia de 100Hz (frecuencia del sistema de posicionamiento externo) mientras que los drones operan a 50Hz . En la estrategia basada en eventos, Caso B, se utiliza un umbral constante, (4), fijado en un valor de 1cm . En ambos casos, el control de formación implementado es el mostrado en (2) con ganancias unitarias en todos los controladores.

Para hacer un análisis cuantitativo del desempeño de ambas estrategias se emplean los siguientes índices:

- **Frecuencia media (f).** Con este parámetro analizamos el número de transmisiones realizadas por los agentes a lo largo del experimento. Este índice muestra el flujo de información a través del canal de comunicación.
- **Integral del Error Absoluto (Integral Absolute Error, IAE).** Este índice pondera todos los errores por igual a lo largo del tiempo. Proporciona información global sobre los agentes.
- **Integral del Error Absoluto ponderado en el Tiempo (Integral of Time-weighted Absolute Error, ITAE).** En los sistemas que utilizan entradas escalonadas, el error inicial es siempre elevado. En consecuencia, para hacer comparaciones entre sistemas, es más relevante que los errores que se mantienen en el tiempo tengan un peso mayor que los errores iniciales.
- **Raíz del Error Cuadrático Medio (Root Mean Square Error, RMSE).** Este índice de rendimiento se utiliza para evaluar la precisión del modelo en términos de varianza del error.

En las Figuras 4 y 5 se muestran las trayectorias seguidas por cada robot en el caso de muestreo continuo y basado en eventos respectivamente. En ambos casos se puede observar un comportamiento similar.

A fin de representar la variación que supone la estrategia basada en eventos frente al muestreo continuo, se han normalizado los resultados obtenidos en el Caso B respecto al Caso A, tal como se observa en la Figura 6. Estos resultados reflejan una mejora del 98% en el número de muestras requeridas por los controladores. Esta diferencia es tan pronunciada debido a dos razones. En primer lugar, no se producen grandes desplazamientos por parte de los agentes a lo largo del tiempo, por lo

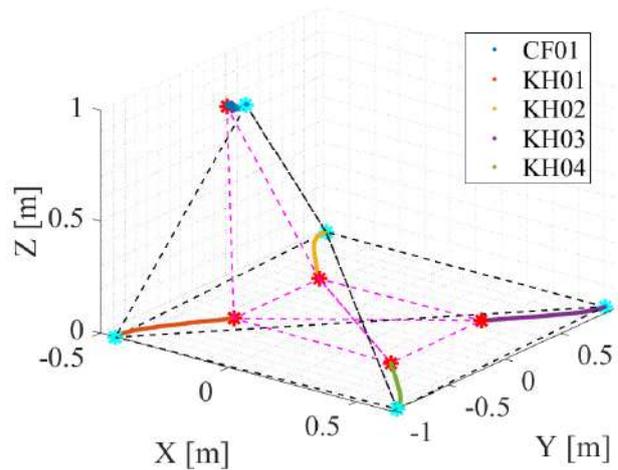


Figura 4: Trayectorias Caso A. Formación inicial (negro). Formación deseada final (magenta). Posiciones iniciales: *; Posiciones finales: *.

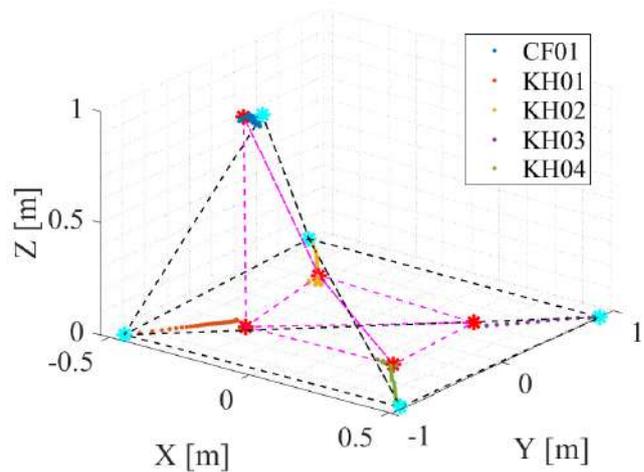


Figura 5: Trayectorias Caso B. Formación inicial (negro). Formación deseada final (magenta). Posiciones iniciales: *; Posiciones finales: *.

que al converger hacia la formación deseada se dejan de generar eventos. En segundo lugar, los robots móviles tienen un movimiento muy estable, por lo que una vez alcanzan su posición objetivo, no se desvían de ella hasta recibir nuevas consignas. En el caso de los drones, por la dinámica que poseen en el entorno real, es muy difícil que mantengan una posición de forma perfecta por lo que tienen a presentar ligeras oscilaciones en estacionario. En este caso, la mejora que se alcanza es del 85% . En los términos asociados al error absoluto y su evolución temporal, IAE e ITAE respectivamente, se observa una mejora del 15% . Finalmente, en el caso del RMSE que normaliza el error por la duración del ensayo, se alcanza una mejora del 43% .

5. Conclusiones

Los resultados de los casos analizados en la experiencia realizada este trabajo muestran cómo la estrategia de muestreo basado en eventos para el control es adecuada en la operación de sistemas multi-robot ya que consigue reducir las transmisiones

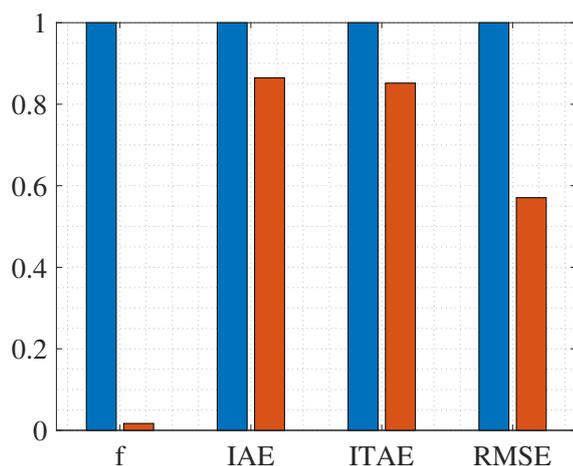


Figura 6: Resultados globales.

de mensajes entre robots sin perjudicar el desempeño de la formación. Además, en sistemas de realidad mixta donde el desempeño de una parte de los agentes está sujeto al rendimiento del sistema de cómputo, las estrategias que permiten aliviar el uso de los recursos digitales favorece su rendimiento y la escalabilidad del sistema. Como se puede observar, se consigue una reducción global del 98 % para un umbral de disparo constante de 1cm, siendo el caso más desfavorable el de los Crazyflies con un 85 %. La repercusión de esta reducción sobre los principales índices de desempeño estudiados consiste en una mejora del 15 % para el IAE e ITAE y del 43 % para el RMSE. Esto puede estar asociado al efecto filtrado que tiene el sistema basado en eventos sobre la señal de entrada de los controladores.

Como futuras líneas de desarrollo, se trabajará en la mejora de las leyes de control multi-robot para sistemas heterogéneos con distintas restricciones de movimiento así como el estudio y explotación de los sistemas de RM.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de la Agencia Estatal de Investigación (AEI) a través de los proyectos PID2020-112658RB-I00/AEI/10.13039/501100011033, 2021V-TAJOV/001 e IEDData 2016-6.

Referencias

- Amsters, R., Slaets, P., 2020. Turtlebot 3 as a robotics education platform, in: *Robotics in Education: Current Research and Innovations* 10, Springer. pp. 170–181.
- Chaâri, R., Ellouze, F., Koubâa, A., Qureshi, B., Pereira, N., Youssef, H., Tovar, E., 2016. Cyber-physical systems clouds: A survey. *Computer Networks* 108, 260–278.
- Dey, N., Ashour, A.S., Shi, F., Fong, S.J., Tavares, J.M.R., 2018. Medical cyber-physical systems: A survey. *Journal of medical systems* 42, 1–13.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C., 2020. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE access* 8, 108952–108971.

Giernacki, W., Rao, J., Sladic, S., Bondyra, A., Retinger, M., Espinoza-Fraire, T., 2022. Dji tello quadrotor as a platform for research and education in mobile robotics and control engineering, in: *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, IEEE. pp. 735–744.

Giernacki, W., Skwirczyński, M., Witwicki, W., Wroński, P., Kozierski, P., 2017. Crazyflie 2.0 quadrotor as a platform for research and education in robotics and control engineering, in: *2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, IEEE. pp. 37–42.

Guo, J., Bilal, M., Qiu, Y., Qian, C., Xu, X., Choo, K.K.R., 2022. Survey on digital twins for internet of vehicles: fundamentals, challenges, and opportunities. *Digital Communications and Networks*.

Hoening, W., Milanes, C., Scaria, L., Phan, T., Bolas, M., Ayanian, N., 2015. Mixed reality for robotics, in: *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE. pp. 5382–5387.

Humayed, A., Lin, J., Li, F., Luo, B., 2017. Cyber-physical systems security—a survey. *IEEE Internet of Things Journal* 4, 1802–1831.

Liu, H., Wang, L., 2020. Remote human–robot collaboration: A cyber–physical system application for hazard manufacturing environment. *Journal of manufacturing systems* 54, 24–34.

Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C., Woodall, W., 2022. Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics* 7, eabm6074. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.abm6074>, doi:10.1126/scirobotics.abm6074.

Makhataeva, Z., Varol, H.A., 2020. Augmented reality for robotics: A review. *Robotics* 9, 21.

Mañas-Álvarez, F., Dormido, R., Guinaldo, M., Socas, R., Dormido, S., 2022a. A vision based navigation platform for control learning. *IFAC-PapersOnLine* 55, 138–143.

Mañas-Álvarez, F.J., Guinaldo, M., Dormido, R., Socas, R., Dormido, S., 2022b. Formation by consensus in heterogeneous robotic swarms with twins-in-the-loop, in: *ROBOT2022: Fifth Iberian Robotics Conference: Advances in Robotics*, Volume 1, Springer. pp. 435–447.

Michel, O., 2004. Cyberbotics Ltd. webots™: professional mobile robot simulation. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 1, 5.

Miskowicz, M., 2006. Send-on-delta concept: An event-based data reporting strategy. *sensors* 6, 49–63.

Phanden, R.K., Sharma, P., Dubey, A., 2021. A review on simulation in digital twin for aerospace, manufacturing and robotics. *Materials today: proceedings* 38, 174–178.

Shi, J., Wan, J., Yan, H., Suo, H., 2011. A survey of cyber-physical systems, in: *2011 international conference on wireless communications and signal processing (WCSP)*, IEEE. pp. 1–6.

Shishvan, O.R., Zois, D.S., Soyata, T., 2018. Machine intelligence in healthcare and medical cyber physical systems: A survey. *IEEE Access* 6, 46419–46494.

Sievers, T.S., Schmitt, B., Rückert, P., Petersen, M., Tracht, K., 2020. Concept of a mixed-reality learning environment for collaborative robotics. *Procedia Manufacturing* 45, 19–24.

Soares, J.M., Navarro, I., Martinoli, A., 2016. The khepera iv mobile robot: performance evaluation, sensory data and software toolbox, in: *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference: Advances in Robotics*, Volume 1, Springer. pp. 767–781.

Soni, A., Hu, H., 2018. Formation control for a fleet of autonomous ground vehicles: A survey. *Robotics* 7, 67.

Sun, Z., 2018. Cooperative coordination and formation control for multi-agent systems. Springer.

Resumen

La transición energética requiere del uso conjunto de fuentes de energía renovables y sistemas de almacenamiento energético. Sin embargo, no existe una tecnología de almacenamiento barata, versátil, durable, capaz y con densidades de potencia y energía óptimas. Es por ello que el almacenamiento utilizando sistemas híbridos (HESS) permite realizar estrategias de gestión de energía y potencia óptimas y alargar la vida útil de los componentes.

Para la gestión eficiente de un HESS, es imprescindible conocer ciertos parámetros tales como el estado de carga (SOC) y estado de salud (SOH), que son difíciles de medir. Por este motivo, es necesario desarrollar algoritmos que estimen dichos estados. En este trabajo, se propone el diseño de observadores no lineales que permitan realizar la observación. En concreto, nos centramos en sistemas con supercondensadores y baterías de iones de litio, desde su modelado al desarrollo de observadores, para su posterior incorporación sistemas de gestión de energía.

1. Modelo electroquímico

En la literatura, nos encontramos primero con el modelo P2D (pseudo-2-dimensional) o DFN (Doyle-Fuller-Newman) (Fuller et al., 1994), uno de los modelos más utilizados por simplificar enormemente la geometría de la celda. Sin embargo, al tratarse de un modelo de parámetros distribuidos su coste computacional suele ser elevado.

De este modelo se deriva otro modelo conocido como de partícula única (SPM), que asume que la partícula de electrodo es esférica y uniforme, y describe la transferencia de iones de litio y electrones en la partícula. El modelo también tiene en cuenta las propiedades electroquímicas de la partícula, como la densidad de carga y la capacidad de la partícula para almacenar iones de litio. Según (Planella et al., 2022), los modelos SPM se pueden agrupar en dos grandes familias según si se consideran las dinámicas del electrolito o no. En el mismo artículo, que analiza diversos modelos de batería, también se afirma que las principales diferencias entre modelos se hallan en las ecuaciones para calcular magnitudes derivadas como el voltaje, no en las ecuaciones diferenciales que describen el sistema.

Aún así, el modelo SPM sigue estando descrito mediante ecuaciones en derivadas parciales. Esto significa que el uso de este modelo para el desarrollo de observadores y la computación en tiempo real no son factibles. En este trabajo se propone el uso del método de elementos finitos en (Allam and Onori, 2020; Dey et al., 2015) como forma de obtener un modelo tratable.

2. Observadores de estado

Un observador es un algoritmo que utiliza información de las salidas medibles de un sistema para estimar los estados internos del mismo sistema. Siendo la batería un sistema dinámico no lineal con estados no medibles, el diseño de observadores es un proceso complejo sin una metodología clara.

En la literatura existen multitud de casos en los que se usan diversos filtros de Kalman extendido para la observación del SoC (entre otros estados) (Mastali et al., 2013). Sin embargo, este tipo de observador se basa en una linealización del sistema.

El uso de otros tipos de observadores garantiza la convergencia entre el estado estimado y el real sin la necesidad de inicializar correctamente los estados del observador. Algunos ejemplos son observadores KKL (Kazantzis–Kravaris/Luenberger) (Bernard and Andrieu, 2019), u observadores de alta ganancia (Cecilia et al., 2021). Sin embargo, el uso de este tipo de observadores se ha obviado en la literatura. Este trabajo propone el uso de este tipo de observadores para garantizar una correcta estimación de los estados del sistema.

3. Gestión de energía

Una vez se dispone de la estimación de los estados, puede procederse a incorporarlos en un algoritmo de gestión de energía. Existen multitud de estrategias de control, de las cuales el artículo de (Zia et al., 2018) menciona, entre otros, el control basado en reglas, en lógica difusa, redes neuronales o control óptimo. En una cantidad significativa de los artículos revisados en el mencionado artículo el SoC o el SoH son parámetros importantes en los algoritmos. Otra estrategia en la que frecuentemente intervienen estos estados es el control basado en filtros (Gunther et al., 2022), o la gestión de energía mediante MPC (model predictive control) (Hu et al., 2021). En (Clarke et al., 2017) se propone el uso de MPC para minimizar el coste económico de la operación de una microrred.

* Autor para la correspondencia: miquel.marti.florences@upc.edu

Es de especial interés el análisis de estabilidad de la propuesta para garantizar una estimación adecuada y una gestión segura. En resumen, en este trabajo proponemos un sistema de gestión energético que combina las técnicas de observadores no lineales y MPC para realizar una gestión óptima del sistema.

4. Conclusiones

Para una correcta gestión de la energía, es preciso conocer con fiabilidad los estados de los componentes que forman el sistema. Se ha identificado un modelo que lo permite (el modelo SPM simplificado mediante elementos finitos) y es suficientemente simple para aplicaciones de tiempo real sin perder de vista el comportamiento electroquímico de las baterías. Dicho modelo hará factible el diseño de observadores que reflejen el dicho comportamiento y que a la vez puedan garantizar la convergencia y un margen de error acotado.

Agradecimientos

This work is part of the project MAFALDA (PID2021-126001OB-C31) funded by MCIN/ AEI /10.13039/501100011033 and by "ERDF A way of making Europe".

This work is part of the project MASHED (TED2021-129927B-I00), funded by MCIN/ AEI/10.13039/501100011033 and by the European Union Next GenerationEU/PRTR.

This research has been developed within the CSIC Interdisciplinary Thematic Platform (PTI+) Transición Energética Sostenible+ (PTI-TRANSENER+) as part of the CSIC program for the Spanish Recovery, Transformation and Resilience Plan funded by the Recovery and Resilience Facility of the European Union, established by the Regulation (EU) 2020/2094.

Referencias

- Allam, A., Onori, S., 2020. Online capacity estimation for lithium-ion battery cells via an electrochemical model-based adaptive interconnected observer. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 29, 1636–1651.
- Bernard, P., Andrieu, V., 2019. Luenberger observers for nonautonomous nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 64, 270–281.
- Cecilia, A., Serra, M., Costa-Castelló, R., 2021. Nonlinear adaptive observation of the liquid water saturation in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 492, 229641.
- Clarke, W.C., Manzie, C., Brear, M.J., 2017. An economic mpc approach to microgrid control. 2016 Australian Control Conference, AuCC 2016 , 276–281.
- Dey, S., Ayalew, B., Pisu, P., 2015. Nonlinear robust observers for state-of-charge estimation of lithium-ion cells based on a reduced electrochemical model. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 23, 1935–1942.
- Fuller, T.F., Doyle, M., Newman, J., 1994. Simulation and optimization of the dual lithium ion insertion cell. *Journal of The Electrochemical Society* 141, 1–10.
- Gunther, S., Weber, L., Bensmann, A.L., Hanke-Rauschenbach, R., 2022. Structured analysis and review of filter-based control strategies for hybrid energy storage systems. *IEEE Access* 10, 126269–126284.
- Hu, J., Shan, Y., Guerrero, J.M., Ioinovici, A., Chan, K.W., Rodriguez, J., 2021. Model predictive control of microgrids – an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 136, 110422.
- Mastali, M., Vazquez-Arenas, J., Fraser, R., Fowler, M., Afshar, S., Stevens, M., 2013. Battery state of the charge estimation using kalman filtering. *Journal of Power Sources* 239, 294–307.
- Planella, F.B., Ai, W., Boyce, A.M., Ghosh, A., Korotkin, I., Sahu, S., Sulzer, V., Timms, R., Tranter, T.G., Zyskin, M., Cooper, S.J., Edge, J.S., Foster, J.M., Marinescu, M., Wu, B., Richardson, G., 2022. A continuum of physics-based lithium-ion battery models reviewed. *Progress in Energy* 4, 042003.
- Zia, M.F., Elbouchikhi, E., Benbouzid, M., 2018. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied Energy* 222, 1033–1055.

Control óptimo de estaciones de repostaje de hidrógeno para el sector transporte

P. Cardona*, M. Serra, C. Ocampo-Martinez

Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC, Llorens i Artigas 4-6, 08028, Barcelona, España

1. Contexto

Los datos recogidos por International Energy Agency (IEA) (IEA, 2022) muestran un incremento del 60% en 2021 respecto a 2020 en la demanda de hidrógeno anual para el sector de transporte por carretera, dejando la cifra en un consumo 30 kt de hidrógeno mundialmente. En consecuencia, se ha experimentado un incremento global de 700 a 975 Estaciones de Repostaje de Hidrógeno (ERH) en operación entre finales de 2021 - Junio 2022 (IEA, 2022). Esta tendencia se espera ver acelerada en el futuro próximo debido a la predicción de incremento de vehículos basados en pila de combustible (FCEV) en circulación. En 2022 había más de 59.000 FCEV a nivel mundial, pero este valor se predice posicionarse en 3.3M en 2030 y entre los 100M y 400M en 2050 (Apostolou and Xydis, 2019). Según IEA, el consumo de hidrógeno anual para transporte por carretera a nivel mundial se posicionaría entre los 0.7 Mt y 8 Mt según los escenarios del plan de descarbonización Stated Policies Scenario y Announced Pledges Scenario, respectivamente (IEA, 2022). Por esta razón, existe una necesidad de mejora en la infraestructura de servicio de hidrógeno.

Actualmente en España, el proyecto del Corredor del Hidrógeno del Ebro es un claro ejemplo de la evidente y decisiva importancia de la energía basada en hidrógeno y la economía del hidrógeno para un futuro sostenible. Uno de los objetivos de este proyecto es pasar de las 6 ERH actuales a 100 ERH en 2030 (Repsol, 2022).

2. Estado del arte

La investigación realizada sobre ERH es más bien escasa, siendo órdenes de magnitud inferior en el número de artículos publicados que en el ámbito de pilas de combustible o FCEV (J. Kurtz and Bradley, 2019). Además, la gran diversidad de topologías y ámbitos de investigación de las ERH dificulta la comparación directa de los resultados. En cuanto a la topología de ERH, ésta viene definida por la ubicación en la que se realiza la producción de hidrógeno, ya sea fuera del emplazamiento o in situ en la propia estación, o por los componentes y su configuración que forman las microrredes eléctricas e hidráulicas que definen el caso de estudio ERH. En cuanto al foco de la investigación actual sobre ERH, los principales temas de estudio han sido la localización, la optimización del dimensionamiento y diseño, y el control de los subsistemas presentes en ERH.

La complejidad de los sistemas ERH, especialmente en topologías de producción in situ, provoca que la búsqueda del óptimo en la solución del problema operacional de la ERH sea un reto interesante, ya que se pueden ver implicadas varias fuentes de energía eléctrica, cargas eléctricas, tanques de hidrógeno presurizados, compresores de hidrógeno, sistemas de refrigeración, válvulas y dispensadores, entre otros componentes, que tienen que ser controlados con estrategias eficientes que puedan garantizar la satisfacción de la demanda y reduzcan los costes operativos de tal manera que no se violen las restricciones físicas y operativas. En la literatura, el problema operacional de las ERH se ha resuelto principalmente mediante planificación óptima fuera de línea, donde generalmente se comprueba el efecto de la estocasticidad en las perturbaciones, diferentes algoritmos de optimización o el dimensionamiento óptimo. Los métodos de planificación fuera de línea son aquellos en los que se encuentra una solución específica a la totalidad del problema operacional resultado de considerar previamente un escenario de operación (estados y perturbaciones) completo y específico. Sin embargo, para cualquier caso real de ERH, debe resolverse un problema de control. Por lo tanto, un método de control en línea actuará en tiempo real, y sus acciones de control se adaptarán a los estados, perturbaciones y eventos a medida que evolucionen en el tiempo. En el campo de la gestión energética, estos métodos suelen ser métodos de control clásicos, control basado en reglas, control basado en optimización o control inteligente (Zia et al., 2018).

Existen varios artículos en los que se contrastan diferentes estrategias de control basado en reglas que difieren en la priorización de operación de ciertos componentes de la ERH estudiada, ya sea decidir cuándo se genera hidrógeno, cuándo se consume electricidad de la red, cómo se distribuye la generación de energía renovable, cómo se distribuye el hidrógeno en los tanques, etc. Estas estrategias de control, definidas por un conjunto de normas de operación, son resolutivas pero no óptimas. En cuanto al control basado en optimización aplicado a ERH, hay muy pocos artículos publicados. Particularmente, (Carr et al., 2016) desarrolla un modelo no lineal de una ERH para vehículos ligeros conectada a la red basándose en una planta real y formula un problema de optimización de horizonte fijo para diseñar un controlador basado en optimización.

3. Objetivos

Esta tesis pretende contribuir al estado del arte en el diseño del control de ERH dentro del sector transporte. Con este objetivo, se debe atender a la diversidad de topologías y definiciones de rendimiento, desarrollando un marco de referencia que atienda a

*Autor para la correspondencia: pol.cardona@upc.edu

los retos de modelado, diseño del controlador y análisis que este objetivo general plantea.

En referencia a los sistemas de producción, almacenamiento y servicio de hidrógeno para el sector transporte, se presentan los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un modelo orientado a simulación modular que permita tratar la alta diversidad topológica.
- Desarrollar un modelo orientado a control que permita resolver el problema operacional.
- Diseñar una metodología que resuelva el problema del control dinámico del sistema basada en la solución de un problema de optimización.
 - Validar su rendimiento en términos de topología y flexibilidad paramétrica del sistema.
 - Estudiar los potenciales beneficios en la operación de ERH de las metodologías de control:
 - Cascaded multi-level Model Predictive Control (MPC).
 - Hybrid MPC.
 - Robust MPC.
 - Non-centralized MPC.
 - Explorar la posibilidad de establecer una metodología de análisis de rendimiento y mejora topológica y/o paramétrica que permita al usuario conocer puntos de mejora en el potencial caso de estudio.

4. Contribuciones

Artículo: P. Cardona, R. Costa-Castelló V. Roda, J. Carroquino, L. Valiño, M. Serra, Model predictive control of an on-site green hydrogen production and refuelling station, *International Journal of Hydrogen Energy* doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.191.

Agradecimientos

Esta investigación se desarrolla dentro de la Plataforma Temática Interdisciplinar (PTI+) del CSIC Transición Energética Sostenible+ (PTI-TRANSENER+)[TRE2103000] como parte del programa del CSIC para el Plan Español de Recuperación, Transformación y Resiliencia financiado por el Mecanismo de Recuperación y Resiliencia de la Unión Europea, establecido por el Reglamento (UE) 2020/2094; proyecto MASHED [TED2021-129927B-I00] financiado por MCIN/ AEI /10. 13039/501100011033 y por la “European Union NextGenerationEU/PRTR”; y el proyecto MAFALDA [PID2021-126001OB-C31] financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033 y por “ERDF A way of making Europe”.

Referencias

- Apostolou, D., Xydis, G., 2019. A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure. current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 113. doi:10.1016/j.rser.2019.109292.
- Carr, S., Zhang, F., Liu, F., Du, Z., Maddy, J., 2016. Optimal operation of a hydrogen refuelling station combined with wind power in the electricity market. *International Journal of Hydrogen Energy* 41, 21057–21066. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.09.073.
- IEA, 2022. Global hydrogen review 2022. URL: www.iea.org/t&c/.
- J. Kurtz, S.S., Bradley, T.H., 2019. Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability. *International Journal of Hydrogen Energy* 44, 12010–12023. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.03.027.
- Repsol, 2022. Nace el corredor del hidrógeno del ebro, referente para desarrollar esta energía renovable. URL: <https://www.repsol.com/es/sala-prensa/notas-prensa/2022/nace-el-corredor-del-hidrogeno-del-ebro-referente-para-desarrollar-esta-energia-renovable/index.cshtml>.
- Zia, M.F., Elbouchikhi, E., Benbouzid, M., 2018. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied Energy* 222, 1033–1055. doi:10.1016/j.apenergy.2018.04.103.

Control y optimización de la producción de cultivos bajo invernadero

F. García-Mañas^{*a}, F. Rodríguez^a, M. Berenguel^a

^aUniversidad de Almería, Departamento de Informática, CIESOL, ceiA3, 04120 Almería, España

Resumen

En este trabajo se resume la temática de la tesis doctoral del primer autor, que está centrada en la aplicación de estrategias de control para gestionar de forma óptima la producción de cultivos bajo invernadero. Como se puede apreciar en la parte inferior de la figura 1, un invernadero es un recinto en cuyo interior se establecen unas condiciones climáticas que pueden favorecer al crecimiento de los cultivos, además de protegerlos. El clima en el interior de un invernadero es consecuencia del efecto de distintas variaciones del clima que ocurre en su exterior. Por ejemplo, la radiación solar traspasa la cubierta del invernadero y provoca un aumento de la temperatura del aire confinado en su interior, lo que puede ser beneficioso para acelerar el crecimiento de los cultivos. No obstante, en determinadas circunstancias, el clima exterior provoca condiciones no deseadas para el clima interior, como pueden ser temperaturas excesivamente elevadas o bajas, que pueden dañar al cultivo, por lo que se requiere de sistemas auxiliares (*i. e.*, actuadores) que permitan mantener las condiciones óptimas para el desarrollo de los frutos. Por tanto, desde el punto de vista de control automático, las variables controlables son aquellas que afectan directamente al crecimiento del cultivo, como la temperatura y la humedad, entre otras. Las perturbaciones son las variaciones del clima exterior al invernadero. Las variables manipulables son aquellas que compensan el efecto indeseado de las perturbaciones, como la ventilación natural, la calefacción, la humidificación, y la deshumidificación, por nombrar algunos ejemplos.

El problema de control y optimización de la producción de cultivos bajo invernadero es complejo debido a la presencia de procesos simultáneos, con distintas dinámicas y con diferentes escalas de tiempo (Rodríguez et al., 2015). En este sentido, el crecimiento del cultivo presenta una dinámica lenta, de días o meses, mientras que la evolución del clima del invernadero se produce con una dinámica rápida, en segundos o minutos. Por este motivo, el problema se debe abordar mediante una arquitectura de control multicapa, como la que se muestra en la figura 1. En los siguientes párrafos se explican las contribuciones realizadas para cada capa durante el desarrollo de la tesis.

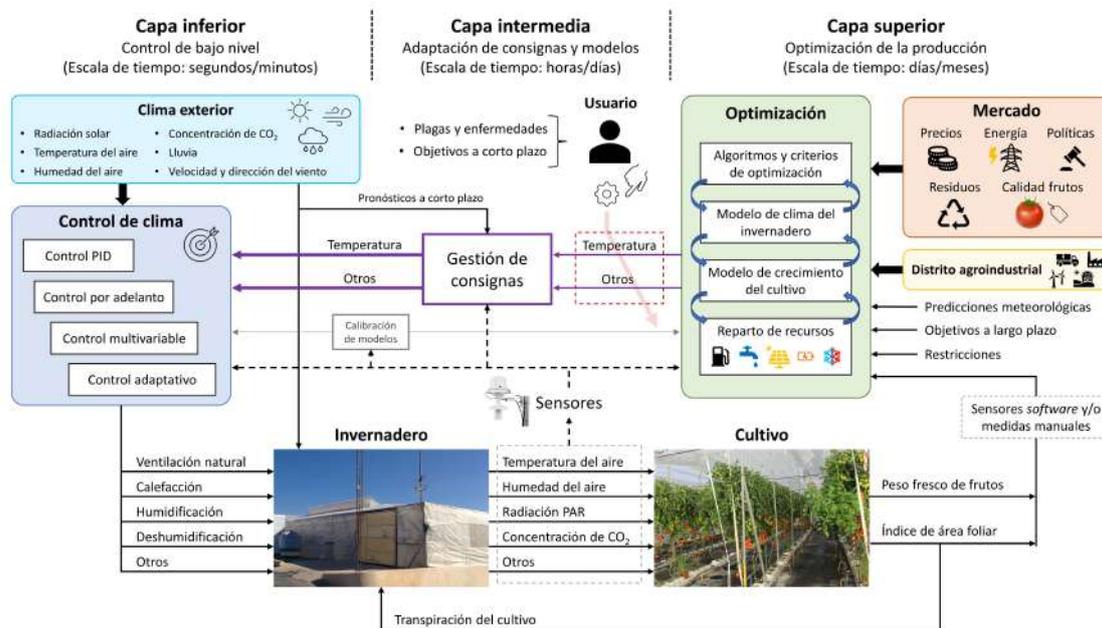


Figura 1. Arquitectura de control

La capa superior está dedicada a la optimización de la producción en base a los objetivos a largo plazo que se desean alcanzar. Estos objetivos suelen ser múltiples, no sólo incrementar la producción, sino también, por ejemplo, maximizar el beneficio económico, minimizar el consumo de energía y de agua, y aumentar la calidad de los frutos. La consecución de estos objetivos está condicionada por distintos factores del mercado y por las necesidades de otras instalaciones cercanas al invernadero, que conforman un distrito agroindustrial en el que se intercambian recursos necesarios para el cultivo, tales como agua, fertilizantes, combustibles, etc. En esta tesis, se ha investigado cómo maximizar el beneficio económico por la venta de los frutos, pues,

* Autor para la correspondencia: francisco.gm@ual.es

realmente, este objetivo es el fundamental y los citados anteriormente pueden incluirse como restricciones en el problema de optimización (o bien realizar una formulación multiobjetivo). Se ha diseñado una estrategia de control predictivo basado en modelo que tiene en cuenta la incertidumbre de los precios de mercado y permite determinar las fechas óptimas de venta y las consignas de temperatura para el cultivo. La idea con esta estrategia es que la temperatura a la que se somete el cultivo varíe de tal forma que se acelere o se ralentice el crecimiento de los frutos para alcanzar con la mayor producción posible las fechas en las que se esperan mejores precios de mercado, lo que permitiría a los agricultores aumentar sus ingresos. La estrategia utiliza un modelo del clima del invernadero y un modelo de crecimiento del cultivo para predecir la cantidad de frutos que se obtendrá, así como el consumo de energía y recursos para sistemas como la calefacción, necesarios para modificar la temperatura del invernadero siguiendo la consigna óptima (véase la capa inferior de control). La estrategia se ejecuta con un horizonte deslizante, recibiendo la realimentación del estado del cultivo cada día gracias a sensores *software* que se pueden emplear cuando no se recojan medidas manuales del crecimiento del cultivo (García-Mañas et al., 2020).

La capa intermedia es necesaria para adaptar las consignas calculadas por la capa superior, teniendo en cuenta los objetivos a corto plazo de los agricultores, quienes pueden modificarlas en base a su experiencia, por ejemplo, para lidiar con la aparición repentina de plagas y enfermedades en el cultivo. Asimismo, las consignas también se modifican en base a predicciones meteorológicas a corto plazo, con menor incertidumbre que las utilizadas en la capa superior, lo que ayuda a garantizar que pueden alcanzarse en el invernadero. Por otro lado, en la capa intermedia también se puede realizar el ajuste o recalibración de los modelos de clima del invernadero, o de modelos lineales de bajo orden que se hayan utilizado para calcular parámetros de controladores de bajo nivel. En el marco de esta tesis, se ha contribuido al desarrollo de un estimador de parámetros en línea, que permite ajustar un modelo de temperatura del invernadero basado en ecuaciones diferenciales, como se ha publicado en Guesbaya et al. (2022), ya que algunos de sus parámetros son dependientes del tiempo y de las condiciones climáticas. La importancia de mantener calibrados este tipo de modelos reside en la posibilidad de utilizarlos en la capa inferior para estrategias de control no lineal y adaptativo, reduciendo así la incertidumbre paramétrica.

Por último, las contribuciones en la capa inferior han consistido en el diseño de estrategias de control para la temperatura y la humedad de un invernadero. En esta tesis, se ha optado por la aplicación de técnicas clásicas, con la intención de demostrar que son muy efectivas y que pueden ser una opción sencilla de implementar por técnicos agrícolas con conocimientos básicos de control automático. Por un lado, se han ensayado controladores por adelanto (*feedforward*) para rechazo de perturbaciones medibles que afectan a la regulación de la temperatura diurna con la ventilación natural (Montoya-Ríos et al., 2020). En concreto, se han analizado hasta cinco reglas de diseño para la obtención de compensadores cuando la inversión de retardos no es realizable, problema que puede ocurrir en ocasiones por la dinámica de la temperatura de un invernadero (García-Mañas et al., 2021). Por otra parte, se ha abordado el problema de control multivariable de temperatura y humedad, en el que el principal reto a resolver ha consistido en diseñar una estructura de control por desacoplo que permita tratar de forma satisfactoria las interacciones entre bucles de control de temperatura y humedad, que poseen dinámicas inversamente correlacionadas (García-Mañas et al., 2023).

Agradecimientos

Al proyecto I+D+i del Plan Nacional DPI2017-85007-R del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y Fondos FEDER. Al proyecto PID2021-122560OB-I00 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal de investigación (AEI/10.13039/501100011033/) y “FEDER: Una manera de hacer Europa”. El autor F. García-Mañas es beneficiario de una ayuda FPU del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Los autores agradecen la colaboración de la Estación Experimental “Las Palmerillas”, de la Fundación Cajamar.

Referencias

- García-Mañas, F., Guzmán, J.L., Rodríguez, F., Berenguel, M., Hägglund, T., 2021. Experimental evaluation of feedforward tuning rules. *Control Engineering Practice* 114, 104877. doi:10.1016/j.conengprac.2021.104877.
- García-Mañas, F., Hägglund, T., Guzmán, J.L., Rodríguez, F., Berenguel, M., 2023. Multivariable control of nighttime temperature and humidity in greenhouses combining heating and dehumidification. (Aceptado) 22nd IFAC World Congress.
- García-Mañas, F., Rodríguez, F., Berenguel, M., 2020. Leaf area index soft sensor for tomato crops in greenhouses. *IFAC-PapersOnLine* 53, 15796–15803. doi:10.1016/j.ifacol.2020.12.230. 21st IFAC World Congress.
- Guesbaya, M., García-Mañas, F., Megherbi, H., Rodríguez, F., 2022. Real-time adaptation of a greenhouse microclimate model using an online parameter estimator based on a bat algorithm variant. *Computers and Electronics in Agriculture* 192, 106627. doi:10.1016/j.compag.2021.106627.
- Montoya-Ríos, A.P., García-Mañas, F., Guzmán, J.L., Rodríguez, F., 2020. Simple tuning rules for feedforward compensators applied to greenhouse daytime temperature control using natural ventilation. *Agronomy* 10, 1327. doi:10.3390/agronomy10091327.
- Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J.L., Ramírez-Arias, A., 2015. Modeling and control of greenhouse crop growth. Springer. doi:10.1007/978-3-319-11134-6.

Identificación preliminar de la dinámica de la barcaza de una turbina eólica flotante

Ignacio Galeote ^{*a}, Giordy A. Andrade^a, Segundo Esteban^a, Matilde Santos^b

^aDto. Arquitectura de Computadores y Automática, Facultad de Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Plaza de Ciencias, 1, 28040 Madrid, España

^bInstituto de Ingeniería del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España

Resumen

Las turbinas eólicas marinas se han convertido en una fuente de energía renovable cada vez más atractiva por su potencial para utilizar la energía en aguas profundas con vientos más estables y fuertes. El objetivo de este trabajo es proponer un modelo matemático basado en funciones de transferencia para identificar y estudiar el comportamiento de los seis grados de libertad de las turbinas flotantes. Para ello se ha simulado el sistema con el software OpenFAST para condiciones ambientales específicas. Se ha utilizado un subconjunto de datos para identificar las funciones de transferencia y obtener un modelo orientado al control.

Para diseñar un sistema de control, es más adecuado utilizar un modelo en espacio de estados o función de transferencia que los modelos de tipo malla (Villoslada et al., 2021), utilizados frecuentemente en mecánica de fluidos computacional (CFDs) (Xu et al., 2022), que tienen mayor precisión, pero son herramientas engorrosas y siguen necesitando validación (Otter et al., 2022).

El modelo propuesto corresponde al de un oscilador armónico amortiguado con una fuerza externa (ecuación 1) que depende de las propiedades hidrodinámicas de la plataforma (D) y de las interacciones elásticas entre ella y las líneas de anclaje (K). Se han considerado la acción de las olas (ψ) y el viento (u) como perturbaciones al sistema. ξ es el vector de estados que recoge los tres grados de libertad traslacionales (*surge*, *sway*, *heave*) y rotacionales (*roll*, *pitch*, *yaw*).

$$\ddot{\xi} - D\dot{\xi} - K\xi = F_k \cdot \psi + F_d \cdot \psi + F_w \cdot u \quad (1)$$

La ecuación 1 se puede transformar en una función de transferencia para cada componente de ξ (diagrama de la Figura 1). Para considerar olas no alineadas con los ejes, todas las simulaciones se han realizado con un ángulo de incidencia $\alpha = 30^\circ$.

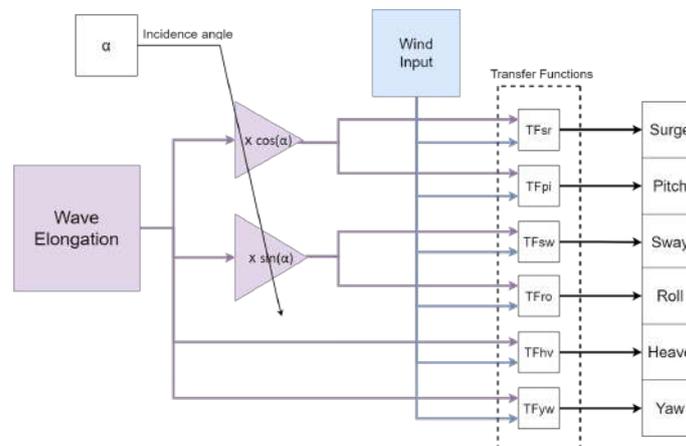


Figura 1. Diagrama de bloques del modelo propuesto.

El sistema se ha excitado con un espectro de ola desarrollado (JONSWAP), que modela un estado del mar realista a partir de dos parámetros principales: la altura significativa de ola H_s , y el periodo espectral pico T_p .

La calidad de la identificación se mide por el ajuste del error cuadrático medio normalizado (NRMSE). Se han empleado distintas técnicas de mejora de la identificación, dando prioridad a la maximización del ajuste.

El procedimiento de identificación es el siguiente. En primer lugar, los datos se generan utilizando OpenFAST y se analizan. En determinadas ventanas de interés, se realiza una identificación del modelo utilizando herramientas de MATLAB. Por último, se evalúa el comportamiento de los modelos.

Primero, se ha analizado el caso sin la perturbación debida al viento para aislar el comportamiento hidrodinámico del sistema.

Una identificación directa de los datos sintéticos de OpenFAST da un resultado pobre debido a los múltiples acoples y retroalimentaciones presentes entre los seis grados de libertad.

Para mejorar la identificación, se han empleado una serie de técnicas: para *surge* y *sway* se escogen ventanas de identificación y validación, y se filtra la señal para diferenciar componentes de frecuencia lenta, asociadas a la dinámica interna, de las rápidas correspondientes a la ola. Para *pitch* y *roll* se han utilizado como datos de identificación lóbulos de la señal, los suficientemente

*Autor para la correspondencia: igaleote@ucm.es

significativos como para entrenar el modelo, ya que perturbaciones de unos pocos grados son difíciles de distinguir del ruido. Por último, para el *yaw*, el grado de libertad más acoplado y complejo, se propone una entrada cruzada no lineal. La identificación resultante aparece en la Figura 2.

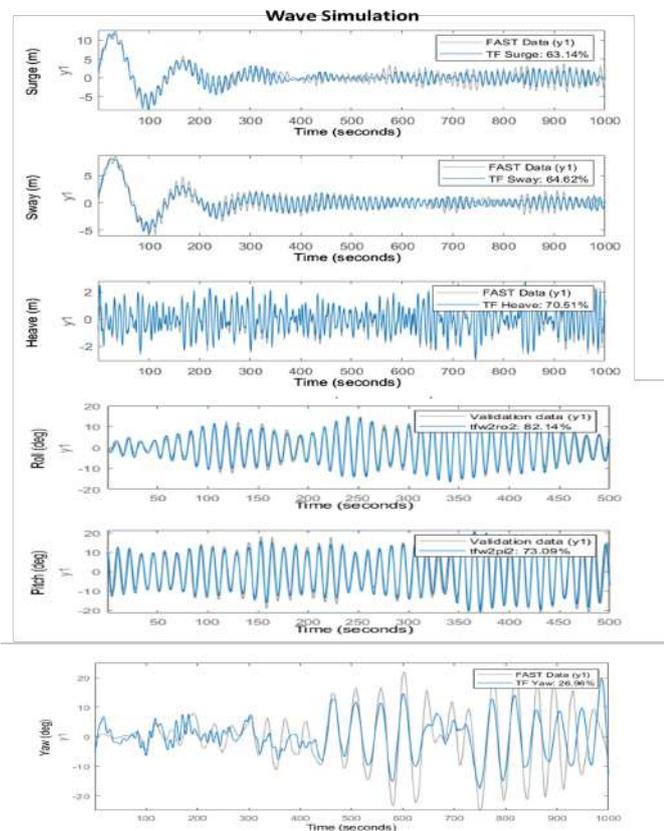


Figura 2. Identificación de la respuesta del sistema ante la perturbación de ola

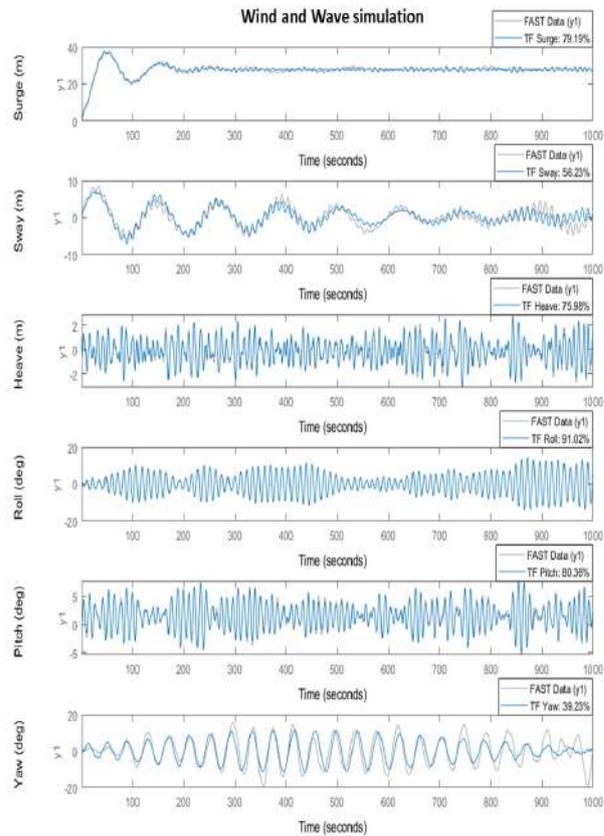


Figura 3. Identificación ante la perturbación de ola y viento

Por último, en la Figura 3 se recoge el resultado de la identificación del sistema con un viento uniforme longitudinal de 8 m/s, manteniendo el estado de la mar anterior. Ahora se ha permitido la introducción de dos entradas en la función de transferencia de acuerdo con el diagrama de la Figura 1. Se observa que el viento reduce las no linealidades de la oscilación libre, por lo que el error es reducido sin necesitar de otras técnicas de identificación.

Se ha observado el comportamiento de los diferentes grados de libertad de la FOWT bajo cargas de oleaje y viento, y se han discutido las técnicas más comunes para mejorar la capacidad predictiva del modelo, operando siempre con funciones de transferencia fáciles de implementar en un algoritmo de control, lo que trata uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta el modelado de turbinas eólicas flotantes, que es la caracterización de las cargas no lineales del sistema (Matha et al., 2011).

Dada la simplicidad del modelo, se ha conseguido una identificación satisfactoria de la respuesta acoplada hidro-eólica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación español en el marco del proyecto MCI/AEI/FEDER número PID2021-123543OB-C21.

Referencias

Matha, D., Schlipf, M., Jonkman, J., 2011. Challenges in simulation of aerodynamics, hydrodynamics, and mooring-line dynamics of floating offshore wind turbines, in: The twenty-first international offshore and polar engineering conference, OnePetro.

Otter, A., Murphy, J., Pakrashi, V., Robertson, A., Desmond, C., 2022. A review of modelling techniques for floating offshore wind turbines. *Wind Energy* 25.

Villoslada, D., Santos, M., Tomás-Rodríguez, M., 2021. General methodology for the identification of reduced dynamic models of barge-type floating wind turbines. *Energies* 14, 3902.

Xu, S., Xue, Y., Zhao, W., 2022. A review of high-fidelity computational fluid dynamics for floating offshore wind turbines.



Métodos computacionales en observabilidad, controlabilidad y control óptimo de sistemas biológicos



Sandra Díaz-Seoane ^{*a} and Alejandro F. Villaverde^{a, b}

^aUniversidad de Vigo, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, 36310 Vigo, Galicia, España

^bCITMAga, 15782 Santiago de Compostela, Galicia, Spain

Resumen

En biología de sistemas los procesos suelen ser no lineales, y su dinámica se suele describir mediante ecuaciones diferenciales ordinarias. La elevada dimensión de algunos de estos modelos, unida a la no linealidad, dificulta el análisis de propiedades como la identificabilidad estructural, la observabilidad y la controlabilidad. La presente tesis se centra en el desarrollo, desde un punto de vista de geometría diferencial, de métodos computacionales que faciliten estos análisis. Además, se explorará el control óptimo de ciertos sistemas biológicos de interés.

Un modelo es observable si es teóricamente posible determinar sus variables de estado observando sus salidas. Una propiedad análoga es la identificabilidad estructural, que alude a la posibilidad de determinar los valores de los parámetros. Cuando hablemos en general de identificabilidad de un modelo haremos referencia a ambas, así como a la posibilidad de determinar entradas desconocidas. Por su parte, la controlabilidad se puede entender como la capacidad de llevar un sistema desde un estado inicial a un estado final en una cantidad finita de tiempo.

Tanto para el análisis de la identificabilidad como para el de la controlabilidad la comprobación se realiza mediante el cálculo de una matriz construida usando distintas operaciones de geometría diferencial en cada caso. Para la identificabilidad se usan derivadas de Lie y en controlabilidad corchetes de Lie. El cálculo de este tipo de expresiones de manera recursiva conlleva grandes aumentos en los tiempos de computación al aumentar la dimensión del problema, ya que a mayor dimensión mayor número de iteraciones necesarias, y la complejidad de los cálculos aumenta por norma general en cada paso.

En este contexto se enmarca el primer artículo de esta tesis (Díaz-Seoane et al., 2023), en el cual se describe un algoritmo probabilístico para el análisis de identificabilidad estructural y observabilidad implementado dentro de la toolbox de MATLAB STRIKE-GOLDD (Villaverde et al., 2016). Este nuevo algoritmo, basado en el inicialmente desarrollado por Sedoglavic (2001), permite la aceleración computacional de la comprobación de la identificabilidad para modelos racionales, especialmente cuando existe un gran número de variables que analizar. También se incluyó un procedimiento para la reformulación de modelos con expresiones no racionales pero aproximables mediante polinomios de Taylor, lo cual aumenta el conjunto de sistemas analizables con esta implementación. Un ejemplo de los resultados obtenidos se puede ver en la figura 1.

Como segunda tarea de la tesis nos proponemos avanzar en el análisis de la controlabilidad de biosistemas no lineales. Esta propiedad está bien definida para sistemas lineales pero, en lugar de poder aplicarse de una manera directa al caso no lineal, es necesario utilizar una serie de propiedades más débiles (tales como la accesibilidad) para conseguir un resultado similar. En un artículo actualmente en revisión, estudiamos algunas de dichas propiedades que aparecen en la literatura Kawski (2017) y proporcionamos una implementación en MATLAB que permite caracterizar la accesibilidad y controlabilidad de distintos sistemas biológicos, principalmente redes de señalización celular. La implementación se puede encontrar en el repositorio de Github NLcontrollability. En un futuro pretendemos ampliar las capacidades de los algoritmos para conseguir determinar la controlabilidad de manera parcial, es decir, qué variables en particular serían un problema a la hora de controlar el sistema, así como la posible influencia de entradas desconocidas. Además, se piensa explorar la posibilidad de aplicar una idea similar a la empleada en el algoritmo mencionado anteriormente para el análisis de observabilidad, con el fin de obtener un algoritmo computacionalmente más eficiente y aplicable a sistemas con un mayor número de variables.

Finalmente, el trabajo futuro contempla la aplicación de herramientas de control óptimo en campos como el de la biología sintética, la electrofisiología cardíaca y los bioprocesos de fermentación basados en bacterias. Históricamente el control óptimo se ha utilizado para determinar la intervención que debemos aplicar a un sistema para alcanzar un determinado objetivo, teniendo en cuenta las limitaciones en la acción de control (Liberzon, 2011). Así mismo, en ciertas aplicaciones biológicas se han explorado aproximaciones desde el control óptimo inverso, con el fin de intentar entender mejor los funcionamientos básicos o los procesos con los que nos encontramos (Tsiantis et al., 2018). En este ámbito el control óptimo inverso facilita el modelado de las dinámicas y las funciones de coste que describen los principios de optimalidad. Estos principios están relacionados con la búsqueda de estructuras biológicas lo más simples posibles y que gestionen de manera eficiente los requisitos de materia y energía que conlleva una tarea. Para estas aplicaciones comenzaremos por explorar el uso de herramientas como AMIGO2 (Balsa-Canto et al., 2016).

* Autora para la correspondencia: sandra.diaz@uvigo.gal

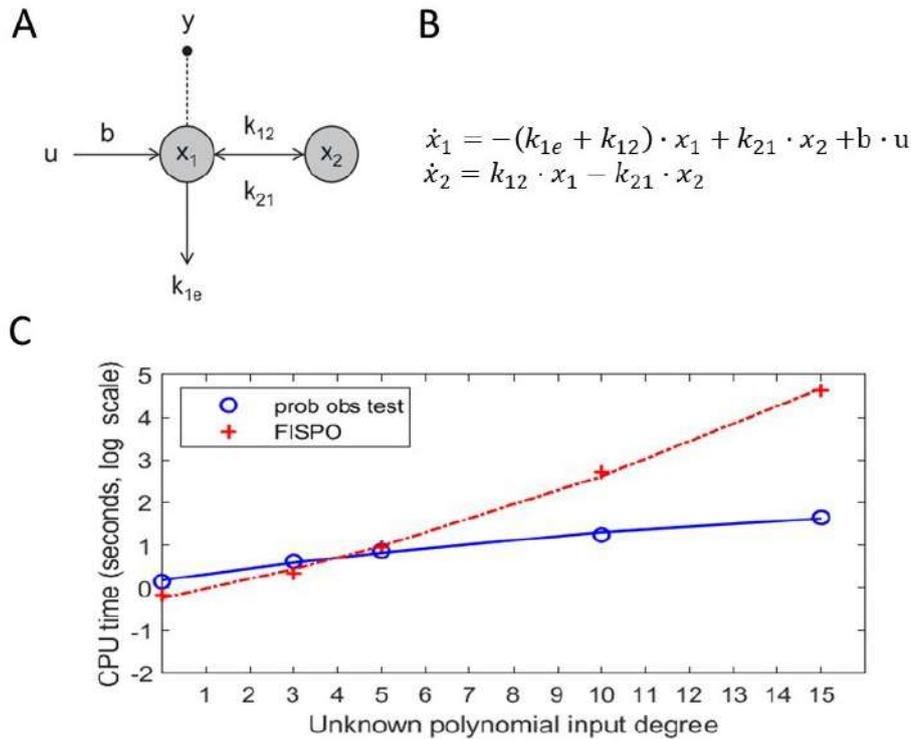


Figura 1. Resultados obtenidos en el estudio de la observabilidad e identificabilidad para el modelo C2M Villaverde et al. (2018) con la herramienta STRIKE-GOLDD. (A) Esquema del modelo C2M. (B) Ecuaciones del modelo C2M donde la entrada u es desconocida y el parámetro b conocido. (C) Comparativa de los tiempos de cálculo con el algoritmo previo en STRIKE-GOLDD (FISPO) y el nuevo (prob obs test) al aumentar el grado del polinomio que representa la entrada desconocida, y por tanto el tamaño del sistema.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por: ayuda ED431F 2021/003 de la Consellería de Cultura, Educación e Ordenación Universitaria, Xunta de Galicia; proyecto PID2020-113992RA-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 (PREDYCT-BIO); ayuda RYC-2019-027537-I financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por El FSE invierte en tu futuro.

Referencias

- Balsa-Canto, E., Henriques, D., Gábor, A., Banga, J.R., 2016. AMIGO2, a toolbox for dynamic modeling, optimization and control in systems biology. *Bioinformatics* 32, 3357–3359. doi:10.1093/bioinformatics/btw411.
- Díaz-Seoane, S., Rey Barreiro, X., Villaverde, A.F., 2023. Strike-goldd 4.0: user-friendly, efficient analysis of structural identifiability and observability. *Bioinformatics* 39, btac748. doi:10.1093/bioinformatics/btac748.
- Kawski, M., 2017. High-order small-time local controllability, in: *Nonlinear controllability and optimal control*. Routledge, pp. 431–467.
- Liberzon, D., 2011. *Calculus of variations and optimal control theory: a concise introduction*. Princeton university press.
- Sedoglavic, A., 2001. A probabilistic algorithm to test local algebraic observability in polynomial time, in: *Proceedings of the 2001 international symposium on Symbolic and algebraic computation*, pp. 309–317. doi:10.1145/384101.384143.
- Tsiantis, N., Balsa-Canto, E., Banga, J.R., 2018. Optimality and identification of dynamic models in systems biology: an inverse optimal control framework. *Bioinformatics* 34, 2433–2440. doi:10.1093/bioinformatics/bty438.
- Villaverde, A.F., Barreiro, A., Papachristodoulou, A., 2016. Structural identifiability of dynamic systems biology models. *PLoS computational biology* 12, e1005153. doi:10.1371/journal.pcbi.1005153.
- Villaverde, A.F., Evans, N.D., Chappell, M.J., Banga, J.R., 2018. Input-dependent structural identifiability of nonlinear systems. *IEEE Control Systems Letters* 3, 272–277. doi:10.1109/LCSYS.2018.2868608.

Xabier Rey Barreiro^{*a} and Alejandro F. Villaverde^{a,b}

^aUniversidad de Vigo, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, 36310 Vigo, Galicia, España

^bCITMAga, 15782 Santiago de Compostela, Galicia, España

Resumen

En el presente proyecto de tesis abordamos el modelado matemático de sistemas inmunológicos (Figura 1), utilizando conceptos de teoría de sistemas y control para desarrollar modelos dinámicos precisos y caracterizar sus propiedades (Chakraborty, 2017). El trabajo se centra en el desarrollo de técnicas computacionales que faciliten la identificación y análisis de estos modelos. Se consideran modelos dinámicos definidos por sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias o estocásticas, que son capaces de describir con precisión una amplia gama de procesos biológicos (DiStefano, 2015). Aunque las metodologías desarrolladas son de propósito general y aplicables a problemas de diferentes campos, la motivación principal viene dada por aplicaciones en inmunología, es decir, sobre procesos que intervienen en el inicio y mantenimiento de respuestas inmunes y su posible variación para controlar o curar enfermedades de base inmunológica. En particular, se estudiará la reacción de centro germinal, su dinámica de activación y las posibles variaciones que puedan desarrollarse en ella.

La identificación de sistemas (Ljung, 1999) busca construir modelos matemáticos que se ajusten de manera óptima a los datos experimentales disponibles y al conocimiento mecanicista de los sistemas dinámicos estudiados (Villaverde et al., 2022). En la tesis nos centramos en dos propiedades clave para la identificación de sistemas: *identificabilidad estructural* y *observabilidad*. La primera indica si es posible inferir los valores de los parámetros de un modelo a partir de las mediciones de su salida, (Wieland et al., 2021); la *observabilidad* es una propiedad análoga que describe la posibilidad de inferir los valores de todas las variables de estado a partir de medidas de la salida (Villaverde et al., 2019).

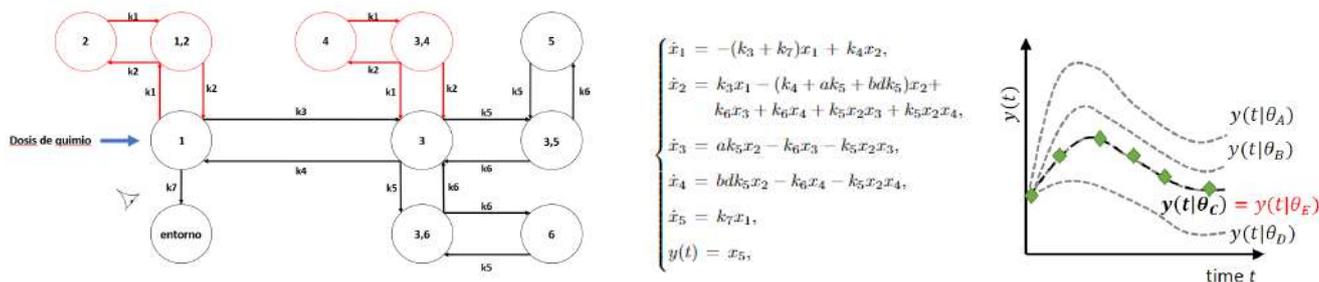


Figura 1. En la imagen de la izquierda se muestra la representación gráfica del proceso inmunológico de la aplicación de radioisótopos en anticuerpos antitumorales. En el centro, la modelización mediante ecuaciones diferenciales ordinarias del proceso inmunológico anterior. En la derecha, ilustración de cómo la identificabilidad estrictamente local impide una correcta calibración del modelo.

El interés por el estudio y aplicación de técnicas para analizar estas propiedades surge a partir de la necesidad de ampliar nuestro conocimiento sobre procesos complejos pero esenciales que están involucrados en la generación y mantenimiento de respuestas inmunitarias contra toxinas y microorganismos patógenos (Chakraborty, 2017). Comenzamos la investigación con el análisis de modelos de activación de linfocitos T por medio de interacciones ligando-receptor. La activación de un linfocito T por medio de sus receptores específicos de antígeno (TCR, T-cell receptor) se basa en la interacción reversible de sus TCRs con su ligando (un complejo péptido con una molécula del MHC, major histocompatibility complex, denominado pMHC), el cual es necesariamente un complejo molecular mostrado en la membrana de una célula presentadora de antígeno (Rudolph et al., 2006). Las interacciones de los TCR con sus ligandos pMHC implican una difusión translacional en dos dimensiones y una restricción en la difusión rotacional. En este ámbito, examinaremos los modelos dinámicos de las reacciones de los centros germinales, que son el centro de la respuesta inmune. Una comprensión detallada de la dinámica de la activación de los linfocitos y el sistema multicelular implicado en la reacción del centro germinal, incluyendo las posibles variaciones, facilitaría el control y tratamiento de enfermedades con base inmunológica (King et al., 2008).

Para avanzar hacia esta meta nos proponemos analizar las propiedades de estos sistemas a través del modelado matemático. Por ello, el primer paso de esta tesis fue realizar una evaluación crítica del rendimiento y capacidades de las herramientas de análisis de identificabilidad estructural existentes hasta la fecha. El objetivo es determinar las fortalezas y limitaciones de las diferentes herramientas que han implementado métodos particulares para analizar la identificabilidad de sistemas dinámicos no lineales. En el trabajo resultante (Rey Barreiro and Villaverde, 2023) constatamos que aquellos métodos que son capaces de calcular la identificabilidad estructural global (es decir, en todo el espacio paramétrico), están restringidos a modelos racionales.

* Autor para la correspondencia: xabier.rey@uvigo.gal

Sin embargo, los sistemas de ecuaciones que modelan procesos inmunológicos tienden a contener algún término exponencial. Esto conlleva que sólo podamos obtener resultados acerca de la identificabilidad local en estos modelos con exponentes. Entonces, podría darse la situación en la que existan varias soluciones de los parámetros que den lugar al mismo valor de las mediciones (Saccomani and Thomaseth, 2019). Por ello es importante clarificar las diferencias entre identificabilidad local y global en modelos biológicos. Con este fin, en la investigación actualmente en curso estamos estudiando las causas que originan que los parámetros sean identificables localmente pero no globalmente (ver Fig.1, derecha), y las posibles consecuencias.

Se contemplan además dos posibles desarrollos futuros. El primero se refiere a la extensión de los resultados anteriores a modelos estocásticos. La mayoría de las metodologías disponibles se aplican a modelos basados en ecuaciones diferenciales ordinarias, los cuales pueden reproducir el comportamiento de muchos procesos biológicos con una precisión razonable. Sin embargo, existen casos que involucran una pequeña cantidad de moléculas donde es necesario recurrir a ecuaciones diferenciales estocásticas. Este enfoque ha sido utilizado con éxito para modelar las reacciones de centros germinales (Wang et al., 2016). De aquí surge uno de los objetivos de la tesis: desarrollar metodologías eficientes para el análisis de la identificabilidad en sistemas estocásticos, aplicables a su vez a modelos de centros germinales.

Por último, en nuestro primer estudio (Rey Barreiro and Villaverde, 2023) comprobamos como las metodologías de análisis de identificabilidad y observabilidad existentes en la actualidad presentan altos costes computacionales, o directamente incapacidad para realizar el análisis en ciertos modelos debido al tamaño del mismo. Para solventar estos límites, nos proponemos explorar posibles combinaciones entre las técnicas actuales de identificabilidad con técnicas de inteligencia artificial, bajo la premisa de que la sinergia entre los dos enfoques podría reducir los costes computacionales de los métodos de análisis estructural.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por: ayuda ED431F 2021/003 de la Consellería de Cultura, Educación e Ordenación Universitaria, Xunta de Galicia; proyecto PID2020-113992RA-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 (PREDYCT-BIO); ayuda RYC-2019-027537-I financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por El FSE invierte en tu futuro.

Referencias

- Chakraborty, A.K., 2017. A perspective on the role of computational models in immunology. *Annual review of immunology* 35, 403–439.
- DiStefano, J., 2015. *Dynamic systems biology modeling and simulation*. Academic Press.
- King, C., Tangye, S.G., Mackay, C.R., 2008. T follicular helper (t_{fh}) cells in normal and dysregulated immune responses. *Annual review of immunology* 26, 741–766.
- Ljung, L., 1999. *System identification: theory for the user*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Rey Barreiro, X., Villaverde, A.F., 2023. Benchmarking tools for a priori identifiability analysis. *Bioinformatics* 39. Btad065.
- Rudolph, M.G., Stanfield, R.L., Wilson, I.A., 2006. How tcrs bind mhcs, peptides, and coreceptors. *Annual review of immunology* 24, 419–466.
- Saccomani, M.P., Thomaseth, K., 2019. Calculating all multiple parameter solutions of ode models to avoid biological misinterpretations. *Mathematical Biosciences and Engineering* 16, 6438–6453.
- Villaverde, A.F., Pathirana, D., Fröhlich, F., Hasenauer, J., Banga, J.R., 2022. A protocol for dynamic model calibration. *Briefings in bioinformatics* 23, bbab387.
- Villaverde, A.F., et al., 2019. Observability and structural identifiability of nonlinear biological systems. *Complexity* 2019.
- Wang, P., Shih, C.m., Qi, H., Lan, Y.h., 2016. A stochastic model of the germinal center integrating local antigen competition, individualistic t–b interactions, and b cell receptor signaling. *The Journal of Immunology* 197, 1169–1182.
- Wieland, F.G., Hauber, A.L., Rosenblatt, M., Tonsing, C., Timmer, J., 2021. On structural and practical identifiability. *Current Opinion in Systems Biology* 25, 60–69.

Thalia A. Morel^{*a}, Guillermo Bejarano^a, Luis Orihuela^{a,b}

^aDepartamento de Ingeniería, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Loyola Andalucía, Avenida de las Universidades s/n. 41704 Dos Hermanas, España.

^bDepartamento de Ingeniería Electrónica, Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva. Avda. de las Fuerzas Armadas s/n 21007 Huelva, España

Abstract

The application and experimental validation of two different extended state observers for autonomous surface vehicles is discussed in this article.

The vessel is equipped with sensors that measure its position and orientation, so the rest of dynamical variables are to be recovered by the observer. In particular, and assuming planar movement, the observer aims to estimate surge, sway, and yaw velocities, and a vector of lumped generalised disturbances that groups together environmental disturbances as well as non-linear and unmodelled vessel dynamics.

The experimental setup and the open-loop experiments are described. Those experiments, in which the vehicle is manually driven by a radio controller, were carried out to evaluate and validate the performance of the observers.

Although some room for improvement can be seen in the estimation of the state dynamics, the experimental findings validate the predictions made by their previously published simulation results.

1 Introduction

Due to their high manoeuvrability and adaptability to autonomous tasks in unstructured aquatic environments, autonomous surface vehicles (ASVs) are becoming increasingly popular for a variety of civilian and military applications, including ocean exploration/monitoring and border surveillance (Zhang et al., 2015).

Effective motion control of ASVs is difficult due to non-linearities, unmodelled hydrodynamics, internal parametric uncertainty, and non-measurable environmental disturbances (Breivik, 2010). Numerous controllers rely heavily on how disturbances and uncertainties are estimated because they can be compensated if the estimations are accurate (Chen et al., 2017; Wang et al., 2019).

Additionally, navigation systems require precise state estimation. Despite the increasing availability of more accurate and cost-effective instruments, such as global navigation satellite system and differential positioning systems (GNSS and DGPSs) and inertial measurement units (IMUs) (Manley, 2008), only the position and orientation of the ASV are typically measured accurately (Liu et al., 2016). It is thus necessary to recover velocities and accelerations from the position and heading measured by a GNSS and gyroscope.

Concerning disturbance estimation, the related literature typically presents two approaches: a) model-based control techniques, in which adaptive controllers estimate and then compensate for disturbances and unmodelled dynamics, as in Chen et al. (2017), Wang et al. (2019); and b) integral-based control techniques, in which the effect of disturbances and unmodelled dynamics is mitigated by integral action, as presented by Pan et al. (2013). The aforementioned control strategies, however, rely on accurate velocity measurement, which may not be possible. Concerning state estimation, GNSS and gyroscope

measurements are typically affected by environmental factors. High-gain observers by Zhang et al. (2011) and Chen et al. (2012), and different varieties of Kalman filters, as presented by Motwani et al. (2013) and Tran et al. (2014), have been applied to provide estimates of velocities and accelerations. Still, the uncertainty and perturbation terms have either been grossly underestimated or have not been reliably estimated.

Liu et al. (2019) propose a finite-time non-linear extended state observer (ESO) that ensures input-to-state stability of estimation errors of both uncertainties and velocities without relying on the control law, unlike previous observers by Li and Tong (2016) and Li et al. (2016). However, the ESO proposed by Liu et al. (2019) assesses position and orientation measurements without noise. Two tuning parameters related to rate of convergence are provided, but their physical significance is unclear. To the authors' knowledge, no experimental substantiation has been reported, despite the presentation of promising simulation results. Recent work by Bejarano et al. (2022) has proposed a generalisation of the ESO by Liu et al. (2019) to cope with position measurements that are prone to noise. The decomposition of positional and rotational dynamics is proposed, as well as a small number of meaningful tuning parameters. This allows the user to independently set the rate of convergence of the positional and rotational estimates and to accomplish a user-defined trade-off between noise and disturbance rejection in the positional estimator. In simulation, this observer outperforms the ESO by Liu et al. (2019), but no experimental validation has been published yet.

While experimental validation of controllers is common in the literature, as seen in Liu et al. (2016), Gonzalez-Garcia and Castañeda (2021), experimental validation of open-loop state estimators is significantly scarce. In the work by Gu et al. (2020), two non-linear observers that estimate positions and velocities using GNSS/IMU integration with loose coupling are validated, but the uncertainties are not estimated. Using an experimental platform constructed at Universidad Loyola An-

*Autor para la correspondencia: tamorel@uloyola.es

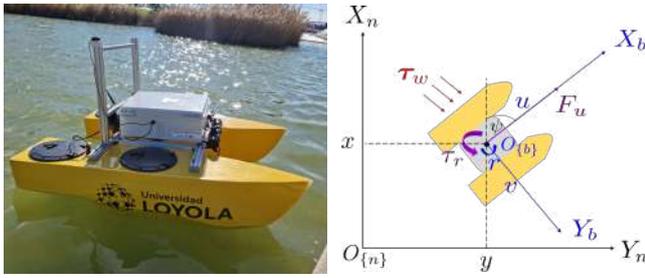


Figure 1: The Yellowfish ASV and reference frames

dalucía, the ESOs by Liu et al. (2019) and Bejarano et al. (2022) are validated in Morel et al. (2022a).

In this work, the Yellowfish ASV in Fig. 1 is described, and the performance of the observers during open-loop operations in which the ASV is remotely controlled is compared. The estimations are validated by a gyroscope for angular velocity and an offline numerical derivation for linear velocity.

2 Modelling

According to Fossen (2011), the kinematics and kinetics models of a vessel moving in the horizontal plane can be written as:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})\mathbf{v} \\ \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} = -\mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{\tau}_w + \boldsymbol{\tau}, \end{cases} \quad (1)$$

where $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \boldsymbol{\psi}]^T$ is the planar position and heading vector expressed in the earth-fixed inertial frame $\{n\}$ (see Fig. 1), $\mathbf{v} = [u \ v \ r]^T$ is the linear and angular velocity vector expressed in the body-fixed frame $\{b\}$, $\boldsymbol{\tau} = [F_u \ 0 \ \tau_r]^T$ denotes the force/torque vector, which represents the control action, and $\boldsymbol{\tau}_w = [F_{w,u} \ F_{w,v} \ \tau_{w,r}]^T$ refers to the environmental forces and torque resulting from the wind, waves, and currents. \mathbf{M} is the inertia matrix, $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ the Coriolis and centrifugal matrix, $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ the damping matrix, and $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ characterises the gravitational and buoyancy forces. The rotation matrix $\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})$ between $\{b\}$ and $\{n\}$ is given by:

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}) = \begin{bmatrix} \cos(\boldsymbol{\psi}) & -\sin(\boldsymbol{\psi}) & 0 \\ \sin(\boldsymbol{\psi}) & \cos(\boldsymbol{\psi}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2(\boldsymbol{\psi}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

where $\mathbf{R}_2(\boldsymbol{\psi}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ is the upper left submatrix of $\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})$.

Under manoeuvring theory (almost constant forward velocity and relatively placid waters) and assuming homogeneous mass distribution and XZ-plane symmetry (see Fossen (2011)), the inertia matrix \mathbf{M} is:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_g - Y_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

where m is the ASV total mass, x_g is the distance from the centre of gravity of the vessel to the origin of $\{b\}$ (measured along the aft-to-fore axis X_b), I_z is the moment of inertia about the top-to-bottom Z_b axis, and $X_{(\cdot)}$, $Y_{(\cdot)}$, and $N_{(\cdot)}$ are hydrodynamic parameters according to standard notation (see The Society of Naval Architecture and Marine Engineers (1950)). Notice that the structure of \mathbf{M} ensures that \mathbf{M}^{-1} exists for well-designed vessels (Fossen, 2011).

As proposed by Liu et al. (2019), the lumped generalised disturbance vector $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_u \ \sigma_v \ \sigma_r]^T \in \mathbb{R}^3$ can be defined as:

$$\boldsymbol{\sigma} \equiv \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{\tau}_w). \quad (4)$$

Vector $\boldsymbol{\sigma}$ groups together disturbances due to hydrodynamic effects, internal unmodelled and coupling dynamics, uncertainties, and external disturbances. Using (4), the ASV model (1) can be redefined as:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})\mathbf{v}, \\ \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{M}^{-1}\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\sigma}. \end{cases} \quad (5)$$

The time derivative of the lumped disturbances $\boldsymbol{\sigma}$ is represented by the notation $\boldsymbol{\omega}$, i.e. $\boldsymbol{\omega} \equiv \dot{\boldsymbol{\sigma}}$.

Models (1) and (5) represent the same vessel dynamics. However, they are used under different conditions and pursuing different objectives. While model (1) requires to know Coriolis, damping, and buoyancy terms, model (5) only needs the inertia matrix. If those non-linear terms were known, one could design a non-linear controller that benefits from model (1). In contrast, model (5) groups all the non-linear terms into one unknown vector. In order to apply a controller with the same capabilities using model (5), a state observer that recovers $\boldsymbol{\sigma}$ is required. If such state vector were available, then model (5) would be easier to handle for the design of controllers, and for stability and other guarantees proofs.

Finally, the ASV is assumed to be equipped with a GNSS and gyroscope, which provide noisy measurements \mathbf{y} of the vessel position and orientation:

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\eta} + \mathbf{n}, \quad (6)$$

where $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_\psi]^T = [\mathbf{n}_p^T \ n_\psi]^T$ refers to the noise affecting the measured variables.

3 Observers formulation

3.1 ESO for noiseless measurements by Liu et al. (2019)

From the model (5), Liu et al. (2019) proposed the non-linear ESO with finite-time convergence (7), which is independent of the specific dynamical characteristics of the control law $\boldsymbol{\tau}$.

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})\hat{\mathbf{v}} - 3\varepsilon\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})\left(\mathbf{R}^T(\boldsymbol{\psi})\frac{\hat{\boldsymbol{\eta}} - \boldsymbol{\eta}}{\varepsilon^2}\right)^\alpha, \\ \dot{\hat{\mathbf{v}}} = \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \mathbf{M}^{-1}\boldsymbol{\tau} - 3\left(\mathbf{R}^T(\boldsymbol{\psi})\frac{\hat{\boldsymbol{\eta}} - \boldsymbol{\eta}}{\varepsilon^2}\right)^{2\alpha-1}, \\ \dot{\hat{\boldsymbol{\sigma}}} = -\frac{1}{\varepsilon}\left(\mathbf{R}^T(\boldsymbol{\psi})\frac{\hat{\boldsymbol{\eta}} - \boldsymbol{\eta}}{\varepsilon^2}\right)^{3\alpha-2}, \end{cases} \quad (7)$$

where $\{\cdot\}^\alpha = \text{sign}(\cdot) \cdot |\cdot|^\alpha$, and $\alpha > 0$ and $\varepsilon > 0$ are two scalar parameters to be tuned. In particular, the rate of convergence can be tuned with ε , and α is required to ensure finite-time convergence (see the work by Liu et al. (2019) for further details). The error dynamics of the proposed ESO are shown to be finite-time input-to-state stable (ISS) with respect to $\boldsymbol{\omega}$, provided that Assumptions 1–3 hold.

Assumption 1. The lumped generalised disturbance vector $\boldsymbol{\sigma}$ satisfies $\|\dot{\boldsymbol{\sigma}}\| = \|\boldsymbol{\omega}\| \leq \omega^*$, where ω^* a positive constant.

Assumption 2. The yaw velocity r is constrained by some known minimum and maximum values r_{\min} and r_{\max} .

Assumption 3. The orientation and position measurements are not affected by noise, $\mathbf{n} = \mathbf{0}$.

3.2 ESO for noisy GNSS measurements by Bejarano et al. (2022)

The second observer, proposed by Bejarano et al. (2022), considers noisy GNSS position data. Thus, it maintains Assumptions 1 and 2, but modifies Assumption 3 as follows:

Assumption 4. *The orientation measurements are assumed to be noiseless, but bounded noise corrupt the position data. This is, $n_\psi = 0$ and $\|\mathbf{n}_p\| \leq n_p^*$, such that $n_p^* \in \mathbb{R}_{>0}$.*

Attending to model (5) and the structure of the inertia matrix, the dynamics of the vessel can be written in cascaded form, with an independent rotational part, and a positional part that depends on the orientation angle ψ . This state partition allowed for the definition of a cascaded observer (Bejarano et al., 2022):

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\chi}}}_\psi = \mathbf{A}_\psi \hat{\boldsymbol{\chi}}_\psi + \mathbf{B}_\psi \boldsymbol{\tau} + \mathbf{L}_\psi (\boldsymbol{\psi} - \mathbf{C}_\psi \hat{\boldsymbol{\chi}}_\psi), \quad (8a)$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\chi}}}_p = \mathbf{A}_p(\boldsymbol{\psi}) \hat{\boldsymbol{\chi}}_p + \mathbf{B}_p \boldsymbol{\tau} + \mathbf{L}_p(\boldsymbol{\psi}) (\mathbf{y}_p - \mathbf{C}_p \hat{\boldsymbol{\chi}}_p), \quad (8b)$$

where vectors $\boldsymbol{\chi}_\psi \equiv [\psi \ r \ \sigma_r]^T$ and $\boldsymbol{\chi}_p \equiv [\boldsymbol{\eta}_p \ \mathbf{v}_p \ \boldsymbol{\sigma}_p]^T$ are defined as $\boldsymbol{\eta}_p \equiv [x \ y]^T$, $\mathbf{v}_p \equiv [u \ v]^T$, and $\boldsymbol{\sigma}_p \equiv [\sigma_u \ \sigma_v]^T$. \mathbf{A}_ψ , $\mathbf{A}_p(\boldsymbol{\psi})$, \mathbf{B}_ψ , \mathbf{B}_p , \mathbf{C}_ψ , and \mathbf{C}_p derive directly from (5)–(6) (Bejarano et al., 2022). The positional measurement $\mathbf{y}_p \equiv \boldsymbol{\eta}_p + \mathbf{n}_p$ is directly from \mathbf{y} in (6).

The rotational observer gain \mathbf{L}_ψ is computed as $\mathbf{L}_\psi = -\mathbf{P}_\psi^{-1} \mathbf{W}_\psi$, where \mathbf{P}_ψ and \mathbf{W}_ψ are part of the solution of an optimization problem presented by Bejarano et al. (2022), subject to certain Linear Matrix Inequalities (LMIs). A parameter, $\delta_{\psi,1}$, can be tuned in the optimization problem to adjust the rate of convergence.

The positional observer $\mathbf{L}_p(\boldsymbol{\psi})$ is calculated as:

$$\mathbf{L}_p(\boldsymbol{\psi}) = -\mathbf{T}_p(\boldsymbol{\psi})^{-1} \mathbf{P}_p^{-1} \mathbf{W}_p \mathbf{R}_2^T(\boldsymbol{\psi}), \quad (9)$$

where $\mathbf{T}_p(\boldsymbol{\psi})$ is computed as:

$$\mathbf{T}_p(\boldsymbol{\psi}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2^T(\boldsymbol{\psi}) & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

being \mathbf{I}_2 the two-dimensional identity matrix. Constant matrices \mathbf{P}_p and \mathbf{W}_p are part of the solution of another LMI-based optimization problem where three tuning parameters are given to the designer: $\delta_{p,1}$ for the rate of convergence, $k_{\omega,p}$ is the weighting parameter for robustness against disturbances, and $k_{n,p}$ is the weighting parameter for noise rejection. The estimation error in both partially decoupled observers are shown to be ISS with respect to $\boldsymbol{\omega}$ and \mathbf{n}_p , while the gains are chosen to minimise the estimation error bounds.

4 ASV description

This section provides a concise description of the Yellowfish ASV used to validate the observers, as well as details regarding the identification of the actuation system. Due to the limited extension of this manuscript, the reader is kindly referred to the work by Morel et al. (2022b), which provides a much more exhaustive analysis of the ASV, modelling, identification, and resultant values for the actual vessel.

The ASV, depicted in Fig. 1, has dimensions of $128 \times 98 \times 80$ cm and a total mass of $m = 24.39$ kg. Its hardware consists of a Raspberry Pi and a Navio2 module as controllers, a couple of propellers in a catamaran configuration as actuators, and a GNSS with a gyroscope as sensors.

The location of the centre of gravity x_g is determined by considering both hulls and the electronics box as separate rigid solids, whereas the moment of inertia about Z_b is calculated using Steiner's theorem. The computation of hydrodynamic parameters is described in the work by Morel et al. (2022b).

The Yellowfish ASV is a catamaran with two propellers that provide two thrusts, T_L and T_R (for left and right, respectively), where the relation between thrusts and $\boldsymbol{\tau}$ must be determined. In addition, there is no direct measurement of such thrusts. The actual control actions of the Yellowfish are the pulse-width modulation (PWM) signals transmitted to the propellers, as indicated in (11), where d is the distance between propellers.

$$F_u = T_R + T_L, \quad \tau_r = \frac{d}{2} (T_L - T_R). \quad (11)$$

To obtain the thrust exerted for a given PWM signal, a non-linear model with dead zone is considered. While the non-linear model is inspired by the specifications of the manufacturer, the dead zone has been experimentally identified (see the work by Morel et al. (2022b) for further details).

The observers require $\boldsymbol{\eta}$ to be referred to the origin of the body-fixed frame. This origin is located for convenience where the gyroscope is placed. However, in practice, the position is measured by the GNSS, while its antenna is located at a different position. Therefore, in the experiments that will be carried out in the following section, a rigid transform to operate with the change of position is required, which is detailed in the work by Morel et al. (2022b).

5 Experimental Results

In this section, the performance of the ESOs presented in Section 3 is analysed and compared in an open-loop experiment of the Yellowfish ASV. A radio controller transmits the commands to the propellers. In addition to orientation and position data, the commands provided by the radio controller are converted to thrusts and then to the force and torque shown in Fig. 3. Only a specific zoomed-in time window is depicted in the following figures, although the experiment in Fig. 2 is quite longer.

Both observers are fed with the data collected and tuned as follows: $\{\epsilon = 0.5, \alpha = 1\}$ for the ESO by Liu et al. (2019), and $\{\delta_{\psi,1} = 0, \delta_{p,1} = 0, k_{\omega,p} = 1, k_{n,p} = 1\}$ for the ESO by Bejarano et al. (2022). Both parameter tunings entail a soft estimation behaviour that attempts to minimise noise sensitivity. Observe



Figure 2: Trajectory described by the ASV in open loop

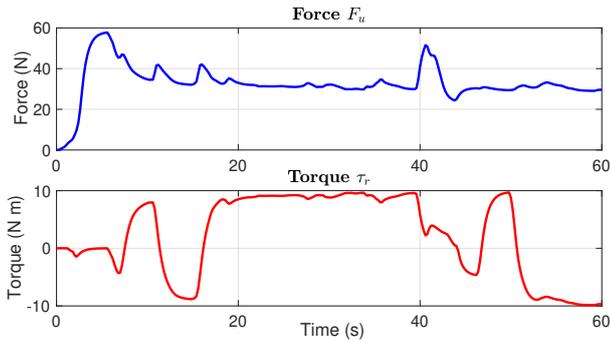


Figure 3: Control actions F_u and τ_r

that the ESO by Bejarano et al. (2022) allows various tuning in the rotational/positional states to account for potential differences in the sensor noise energy. In addition, both ESOs, which were originally presented in continuous time, are implemented in discrete time with a sample time of 200 ms, which is constrained by the GNSS rate.

Fig. 4 depicts the estimated position variables, whereas Fig. 5 depicts the estimated surge u , sway v , and yaw r . Regarding Fig. 4, the estimation errors are computed with respect to the measured variables. Note that the actual values of these variables are unknown because the sensors may be affected by noise, which indeed they are.

Notice in Fig. 4 that, as expected, the estimates of the measured positions are accurate for both ESOs, where the most remarkable differences appear in the estimation of the orientation ψ . The errors of the ESO by Bejarano et al. (2022) are smaller than those of the ESO by Liu et al. (2019) due to the structure of the former, which allows to set the rate of convergence of the positional and rotational estimates independently and, since the measured heading angle is assumed to be correct (no noise affects that variable), the rotational estimator can be aggressively tuned. A tighter tuning of the ESO by Liu et al. (2019) might also be achieved by reducing the value of parameter ε but, as previously explained, this would make this observer much more sensitive to noise in the estimation of the other state variables, especially the positional ones, since the GNSS noise appears to be more significant than the gyroscope one. Anyway, and even without knowing the actual heading angle, the expected trade-off between noise sensitivity and rate of convergence is experimentally observed.

In the case of Fig. 5, only the yaw r can be used for validation since it is measured directly by the gyroscope, whereas the computed values of u and v are obtained by numerical derivation of the positions provided by the GNSS and then rotated using the matrix (2) and the measured orientation ψ , as described in Section 4.

Offline application of the Savitzky-Golay (SG) filter (Savitzky and Golay, 1964) yields GNSS positions with smoother numerical derivatives. For comparison purposes, an additional curve obtained by backwards numerical derivation is also depicted in Fig. 5a– 5c since this could be obtained online by applying the kinematics of the vessel. Indeed, this would be an alternative way of estimating velocities from the measured data.

The actual validation of the observers is based on the yaw estimation in Fig. 5c, since the information provided by the gy-

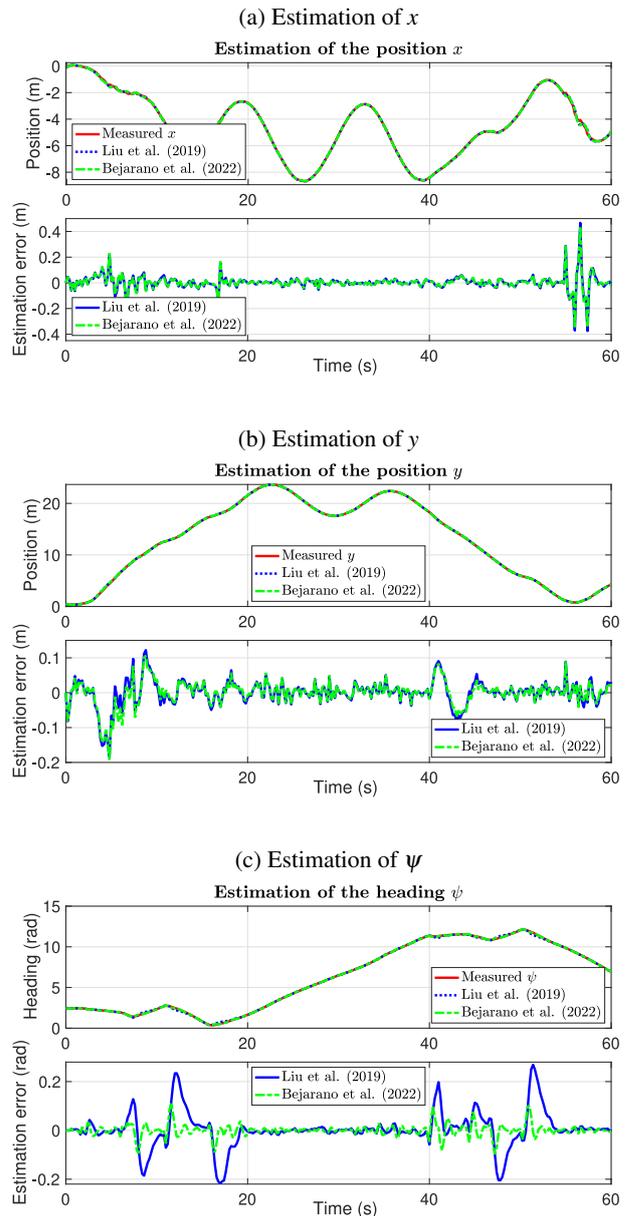


Figure 4: Estimation of η

roscope is not used by any observer. The estimates provided by the ESO by Bejarano et al. (2022) are more accurate than those of the ESO by Liu et al. (2019), especially during the transients. The quasi-steady-state values achieved during the experiment are well captured by both ESOs, but the dynamics of both estimates are much different. Similarly to the orientation ψ , the transient performance of the ESO by Liu et al. (2019) could be enhanced through a tighter parameter tuning, but the sensitivity to noise would also increase, giving rise to much noisier estimates. Comparing both estimates with the yaw computed through online backwards numerical derivation, the latter method shows to perform better than the model-based observers. The main reason is that both observers include the kinetic model in the estimation of the whole state; if there are discrepancies between the model and the actual vessel concerning the radio-controller commands-thrust conversion and the inertia matrix, the provided estimates deviate from the actual

values during the transient. However, the numerical derivation only provides velocities, while the analysed observers are also able to provide estimates of the lumped disturbances.

In the case of u and v , similar performance of both ESOs is noticed in Fig. 5a–5b, although the numerical nature of the computed values of u and v must be again remarked, since no actual measurements of such variables are available and an IMU would be required to validate these velocities. The ESO by Bejarano et al. (2022) could be tuned tighter for the positional variables either by increasing the value of $k_{\omega,p}$ with respect to $k_{n,p}$ or increasing the value of $\delta_{p,1}$, although the provided estimates would be noisier. The backwards numerical derivation and rotation to compute online u and v generates noisy signals which could hardly be used within a closed-loop controller.

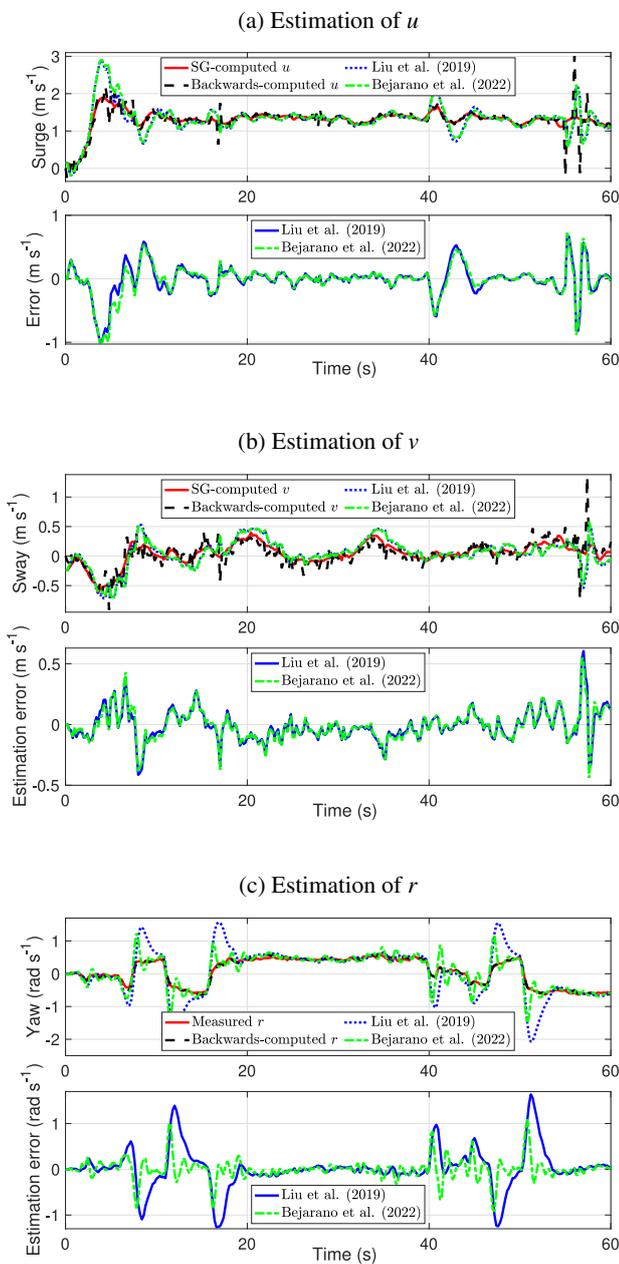


Figure 5: Estimation of \mathbf{v}

Fig. 6 shows the estimates of the components of the lumped generalised disturbance vector $\boldsymbol{\sigma}$, provided by both ESOs. Notice that a tighter tuning for higher velocity estimation accuracy, as that achieved by the ESO by Bejarano et al. (2022) in r , results in a noisier estimate of the corresponding disturbance σ_r , in comparison with the looser tuning provided by the ESO by Liu et al. (2019), as shown in Fig. 6c. This illustrates the huge challenge that the joint estimation of velocities and disturbances relying just on position measurements poses, and this new trade-off arises. This was not pointed out in the original works and needs to be highlighted. Unfortunately, the values of $\boldsymbol{\sigma}$ cannot be validated experimentally due to their miscellaneous nature, but their estimates, especially during quasi-steady-state time windows, could be used within model-based control techniques to counteract the effect of external disturbances and uncertainties and achieve more effective and reliable motion control, as widely studied in previous works (Chen et al., 2017; Wang et al., 2019).

Finally, some of the tuning capabilities of both observers concerning the yaw estimation are illustrated in Fig. 7. Similar conclusions to those obtained in simulation by Liu et al. (2019) and Bejarano et al. (2022) can be drawn; this is, faster but noisier estimates can be provided by a suitable observer parameter tuning.

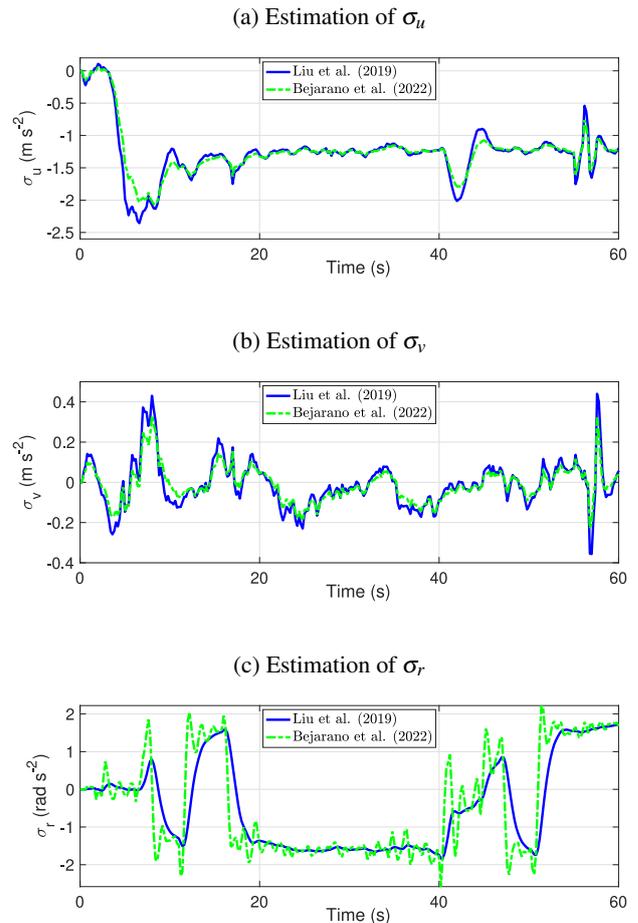


Figure 6: Estimation of $\boldsymbol{\sigma}$

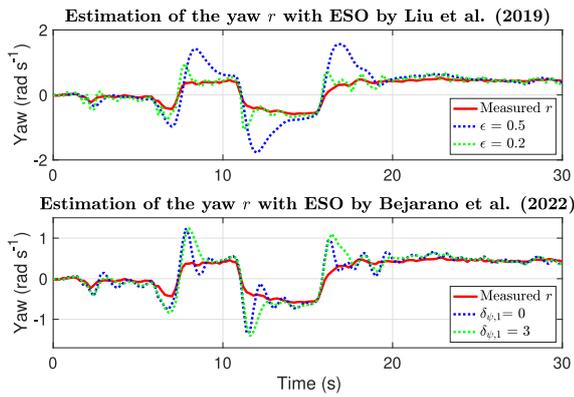


Figure 7: Estimation of r for different tuning parameters

6 Conclusions and future works

This work shows the experimental validation of two distinct ESOs on an experimental setup carried out in operating conditions. Both ESOs consider that only the position and orientation are measured and propose to recover the velocities and generalised lumped disturbances. The efficacy of both ESOs is evaluated using an open-loop experiment in which the ASV is radio-controlled. As anticipated, both ESOs provide accurate estimates of the measured variables while their authors' tuning suggestions are experimentally validated. Due to the increased degrees of freedom and the fact that it accounts for GNSS noisy data, the ESO by Bejarano et al. (2022) provides more accurate estimates of the rotational variables, validated by the measured yaw. The dynamics of the estimated velocities do not match those empirically measured, indicating that the identification of the inertia matrix and/or the actuation system has an inaccurate model identification. Future research will concentrate on (a) obtaining a more accurate model of the inertia matrix and actuation system, (b) validating the linear velocities using the IMU, and (c) modifying the ESO structure to incorporate measured velocities.

Acknowledgment

The authors would like to acknowledge Spanish MCEI (Grants TED2021-131326A-C22 and PID2021-126921OA-C22) for funding this work.

References

Bejarano, G., Sufiyan, N.Y., Orihuela, L., 2022. Velocity and disturbance robust nonlinear estimator for autonomous surface vehicles equipped with position sensors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 30, 2235–2242. doi:10.1109/TCST.2021.3136334.

Breivik, M., 2010. Topics in guided motion control of marine vehicles. Ph.D. thesis. Dept. Eng. Cybern., Norwegian Univ. Sci. Technol.

Chen, M., Chen, S.d., Wu, Q.x., 2017. Sliding mode disturbance observer-based adaptive control for uncertain mimo nonlinear systems with dead-zone. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 31, 1003–1018. doi:10.1002/acs.2744.

Chen, M., Ge, S.S., How, B.V.E., Choo, Y.S., 2012. Robust adaptive position mooring control for marine vessels. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 21, 395–409. doi:10.1109/TCST.2012.2183676.

Fossen, T.I., 2011. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, London, U.K.

Gonzalez-Garcia, A., Castañeda, H., 2021. Guidance and Control Based on Adaptive Sliding Mode Strategy for a USV Subject to Uncertainties. *IEEE J. Ocean. Eng.* 46, 1144–1154. doi:10.1109/JOE.2021.3059210.

Gu, N., Peng, Z., Wang, D., Liu, L., Jiang, Y., 2020. Nonlinear observer design for a robotic unmanned surface vehicle with experiment results. *Appl. Ocean Res.* 95, 102028. doi:10.1016/j.apor.2019.102028.

Li, Y., Tong, S., 2016. Adaptive fuzzy output-feedback stabilization control for a class of switched nonstrict-feedback nonlinear systems. *IEEE Trans. Cybern.* 47, 1007–1016. doi:10.1109/TCYB.2016.2536628.

Li, Y., Tong, S., Li, T., 2016. Hybrid Fuzzy Adaptive Output Feedback Control Design for Uncertain MIMO Nonlinear Systems With Time-Varying Delays and Input Saturation. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 24, 841–853. doi:10.1109/TFUZZ.2015.2486811.

Liu, L., Wang, D., Peng, Z., 2019. State recovery and disturbance estimation of unmanned surface vehicles based on nonlinear extended state observers. *Ocean Eng.* 171, 625–632. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.11.008.

Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., Yuan, C., 2016. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annu. Rev. Control* 41, 71–93. doi:10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.

Manley, J.E., 2008. Unmanned surface vehicles, 15 years of development, in: *OCEANS 2008, IEEE*. pp. 1–4. doi:10.1109/OCEANS.2008.5152052.

Morel, T.A., Bejarano, G., Manzano, J.M., Orihuela, L., 2022a. Experimental validation of robust non-linear state observers for autonomous surface vehicles equipped with position sensors, in: *2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, IEEE. pp. 357–362. doi:10.1109/CCTA49430.2022.9966024.

Morel, T.A., Manzano, J.M., Bejarano, G., Orihuela, L., 2022b. Modelling and Identification of an Autonomous Surface Vehicle: Technical Report. Technical Report. Universidad Loyola Andalucía. URL: repositorio.uloyola.es/handle/20.500.12412/3270.

Motwani, A., Sharma, S., Sutton, R., Culverhouse, P., 2013. Interval Kalman filtering in navigation system design for an uninhabited surface vehicle. *J. Navig.* 66, 639–652. doi:10.1017/S0373463313000283.

Pan, C.Z., Lai, X.Z., Yang, S.X., Wu, M., 2013. An efficient neural network approach to tracking control of an autonomous surface vehicle with unknown dynamics. *Expert Syst. Appl.* 40, 1629–1635. doi:10.1016/j.eswa.2012.09.008.

Savitzky, A., Golay, M.J.E., 1964. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.* 36, 1627–1639. doi:10.1021/ac60214a047.

The Society of Naval Architecture and Marine Engineers, 1950. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. *Tech. Res. Bull. No.* , 1–5.

Tran, N.H., Choi, H.S., Baek, S.H., Shin, H.Y., 2014. Tracking control of an unmanned surface vehicle, in: *AETA 2013: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences*. Springer, pp. 575–584. doi:10.1007/978-3-642-41968-3_57.

Wang, N., Sun, Z., Yin, J., Zou, Z., Su, S.F., 2019. Fuzzy unknown observer-based robust adaptive path following control of underactuated surface vehicles subject to multiple unknowns. *Ocean Eng.* 176, 57–64. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.02.017.

Zhang, F., Marani, G., Smith, R.N., Choi, H.T., 2015. Future trends in marine robotics. *IEEE Robot. Autom. Mag.* 22, 14–22. doi:10.1109/MRA.2014.2385561.

Zhang, L.J., Jia, H.M., Qi, X., 2011. NNFFC-adaptive output feedback trajectory tracking control for a surface ship at high speed. *Ocean Eng.* 38, 1430–1438. doi:10.1016/j.oceaneng.2011.07.006.

Resumen

Alcanzar la neutralidad climática en 2050 es fundamental. Para lograr este objetivo se debe aumentar el uso de las energías renovables y abandonar paulatinamente el uso de combustibles fósiles, y así, reducir las emisiones de carbono.

La energía eólica es una de las energías renovables que más peso está ganando en los últimos años y se espera que en Europa aporte el 50 del mix eléctrico en el año 2050. Sin embargo, no solo hay que aumentar la potencia instalada, sino también mejorar la eficiencia en la producción mediante el uso de *herramientas de operación en tiempo real más sofisticadas*.

La amplia difusión de las energías renovables supone un nuevo reto para la gestión de la red eléctrica, por su bidireccionalidad y la alta incertidumbre en torno a la disponibilidad de los recursos primarios. Esto último hace necesaria la utilización de algún sistema de almacenamiento de energía. El hidrógeno ha sido propuesto como sistema de almacenamiento de energía hace ya algunos años, y, además, se está postulando como el vector energético clave para descarbonizar los sectores donde la electrificación no es viable, por lo que su producción parece fundamental. El ciclo de producción de hidrógeno, almacenamiento, distribución, utilización y reelectrificación es lo que se ha convenido llamar ciclo Power-to-H₂-to-Power.

En este artículo se plantea resolver de manera estacionaria el problema de reparto de consignas en parques eólicos, como primer paso para poder desarrollar en un futuro una herramienta de gestión óptima y en tiempo real del ciclo Power-to-H₂-to-Power.

1. Introducción

Las energías renovables están cobrando una importancia creciente en nuestra sociedad debido al deseo de reducir las emisiones de carbono y conseguir la neutralidad climática en el año 2050 (Comisión Europea, 2018). Para alcanzar estos objetivos, la Unión Europea ha elaborado un reglamento marco europeo sobre el clima y la energía con diferentes horizontes temporales. Un gran hito en este camino es el año 2030, momento en el que se espera cumplir con la reducción de un 40 % de emisión de gases de efecto invernadero, la reducción de un 40 % de generación a partir de fuentes renovables y una mejora de un 32.5 % en la eficiencia energética.

En lo referente a las energías renovables, la energía eólica es una de las que mayor crecimiento ha tenido y tendrá en el futuro en cuanto a potencia instalada en el mundo, solo superada por la solar fotovoltaica (IEA, 2022). A pesar de la previsión de menor potencia eólica instalada frente a la solar fotovoltaica, se espera que ambas energías combinadas suministren entre uno y dos tercios de la demanda total de electricidad mundial y que solamente la eólica suministre entre un cuarto y un tercio en todo el mundo en el 2050 (Veers et al., 2019). En Europa se espera que la energía eólica suministre un tercio de la demanda energética total y que represente el 50% en el mix eléctrico (Fraile et al., 2021). Alcanzar esta meta no es posible únicamente mediante la instalación de una mayor potencia eólica, se requiere sobre todo una *producción mucho más eficiente* basada en una *operación en tiempo real* y conjunta de un número elevado de parques eólicos, donde las decisiones óptimas se tienen que tomar de manera lo más racional posible (Veers et al., 2019)

Por otro lado, la mayor presencia y penetración, tanto presente como futura de las energías renovables ha supuesto la aparición de nuevos retos en la gestión de la red eléctrica. Se puede destacar que las energías renovables han supuesto un cambio en el funcionamiento de la red eléctrica, pasando

desde una estructura en la que la energía circulaba desde los productores hacia los consumidores a otra bidireccional mucho más compleja y difícil de gestionar. Debido a ello, los operadores de las redes delegan cada vez más responsabilidades de regulación en las compañías productoras de electricidad imponiendo requisitos muy exigentes en seguimiento de potencia, satisfacción de restricciones temporales y regulación de frecuencia, lo que hace necesario que estas empresas se doten de *herramientas de operación en tiempo real mucho más sofisticadas*. Además, la naturaleza no gestionable de los recursos primarios como el sol o el viento hacen imprescindible combinar la generación con algún tipo de sistema de almacenamiento. En este campo existen varias alternativas (Hall & Bain, 2008) las centrales de bombeo son una de las más empleadas hasta el momento (Álvarez, 2020), sin embargo, este medio de almacenamiento no siempre es una opción ya que necesita de unas características geológicas e hidrográficas en la zona de almacenamiento para ser aplicado. Desde hace ya algunos años se ha propuesto uso de hidrógeno como forma de almacenar energía procedente de las fuentes renovables. Este hidrógeno puede almacenarse in situ en las plantas de generación, transportarse a otras zonas a través de gaseoductos o mediante otro medio de transporte (Andersson & Grönkvist, 2019). El hidrógeno además de utilizarse para almacenar energía proveniente de fuentes renovables, se está postulando como el vector energético clave para descarbonizar sectores en los que la electrificación no es viable (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020), por lo que su producción parece ser fundamental.

Por ello se está trabajando en el desarrollo de plantas que producen energía eléctrica a partir de fuentes renovables, principalmente eólica o fotovoltaica y que pueden verter esa energía directamente a la red o almacenarla en forma de H₂ verde, que puede, o distribuirse como tal para satisfacer la demanda de H₂ de los usuarios, o volver a quemarse en turbinas de H₂ o en combinación con gas natural, para producir

*Autor para la correspondencia: samuel.martinez@ubu.es

de nueva energía eléctrica, en lo que se llama ciclo Power-to-H2-to-Power (Figura 1).

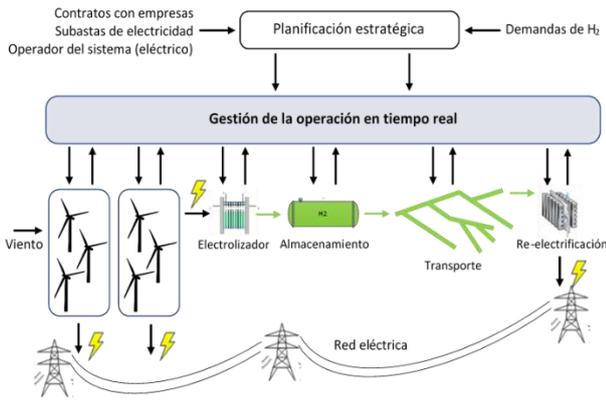


Figura 1. Ciclo Power-to-H2-to-Power.

Este artículo se centra en resolver de manera estacionaria la asignación de consignas óptimas para varios parques eólicos. El ejemplo aquí planteado es el primer paso para que en el futuro se puedan desarrollar herramientas para la operación en tiempo real del ciclo Power-to-H2-to-Power, donde a la gestión convencional de un número elevado de parques eólicos que vierten la electricidad a la red eléctrica se le añade un número elevado de electrolizadores y la posibilidad de reelectrificación en otro punto de la red eléctrica, satisfaciendo en todo momento las demandas de H2 por parte de los usuarios.

2. Planteamiento del problema

Normalmente los parques eólicos se agrupan para verter su producción en el mismo punto de la red eléctrica, denominado PCC (Point of Common Coupling), de esta manera las empresas operadoras de los parques pueden cumplir con la regulación secundaria. Es decir, la demanda que tiene que satisfacer esa agrupación se corresponde con la demanda de energía en ese punto de la red y está fijada por los operadores del sistema, en el caso de España por Red Eléctrica. Un mismo parque no puede verter en dos nodos distintos. Además, las empresas que operan los parques pueden agrupar los parques eólicos de acuerdo a intereses particulares, estableciendo una demanda de potencia determinada en dichas agrupaciones.

En este documento se ha planteado un problema estacionario en el que hay siete parques eólicos. Estos siete parques eólicos forman dos agrupaciones que vierten cada una en un punto PCC distinto: la 1 formada por cuatro parques eólicos, y la 2, formada por tres parques eólicos. Existe además una agrupación comercial, la 3, que está conformada por dos parques eólicos de la agrupación 1 y un parque de la agrupación 2. En la figura 2 se puede ver la representación gráfica de la estructura del problema.

El problema consiste en establecer qué set point hay que enviar a cada parque para poder satisfacer la demanda de energía eléctrica de la red de manera óptima. Para poder establecer un óptimo, hay que especificar qué objetivos debe cumplir dicho óptimo. En el siguiente apartado se establecen los objetivos a cumplir por las agrupaciones y los parques eólicos.

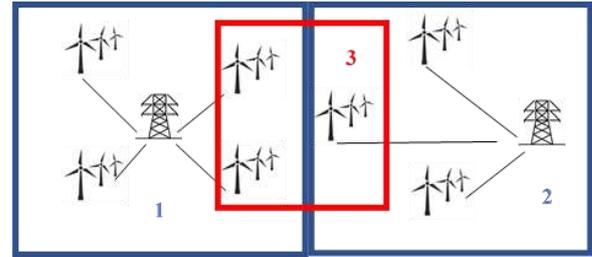


Figura 2. Estructura del problema.

2.1 Objetivos de agrupaciones y parques

Un objetivo de seguimiento de consigna σ_{seg} que minimiza la diferencia entre la demanda eléctrica de la agrupación y la potencia generada en esa agrupación destinada a producir electricidad (1). Donde SPA_j es el set point de cada agrupación, PA_j es la demanda de potencia eléctrica de cada agrupación, y M es el conjunto de agrupaciones formadas por m agrupaciones. Cada término está normalizado por el máximo error permitido al cuadrado, max_err^2 , en el seguimiento de la consigna.

$$\sigma_{seg} = \sum_{j \in M} \frac{(SPA_j - PA_j)^2}{max_err^2} \quad (1)$$

Un objetivo económico σ_{cos} que minimiza el coste de producción (2). Donde $cwfi_i$ es el coste de producción de cada parque eólico, SP_i es el set point de cada parque eólico y N es el conjunto de los parques eólicos formados por n parques. Cada término está normalizado por los términos $cwfi_{max}$, que es el mayor coste de producción de entre todos los parques eólicos y Pn_{max} que es la mayor potencia nominal de entre todos los parques eólicos, garantizando así que cada término de la función de coste toma un valor máximo de uno.

$$\sigma_{cos} = \sum_{i \in N} \frac{cwfi_i \cdot SP_i}{cwfi_{max} \cdot Pn_{max}} \quad (2)$$

Un objetivo de prioridad de arranque y parada σ_{AP} (3). Lo que se pretende con este objetivo es conseguir que los parques eólicos que tienen una prioridad de arranque alto sean los primeros en entrar en funcionamiento y los últimos en pararse y que los parques que tienen una prioridad de parada baja sean los últimos en entrar en funcionamiento o sean los primeros en pararse.

$$\sigma_{AP} = \sum_{i \in N} \left(P(i) \cdot \frac{SP_i}{Pn_i} + A(i) \cdot \left(\frac{Pn_i - SP_i}{Pn_i} \right) \right) \quad (3)$$

Para tener en cuenta la prioridad de arranque y parada, se han creado dos parámetros, arranque $A(i)$, y parada $P(i)$ que pueden tomar tres valores, 1, 0.5 y 0. Las combinaciones posibles, son las que se muestran en la Tabla 1.

Si el parque tiene alta prioridad de arranque ($A(i) = 1$), el valor que tome la diferencia entre la potencia nominal y el set point va a afectar al valor del objetivo, por lo que habrá que minimizar ese término. En cambio, si el parque tiene prioridad de arranque baja ($A(i) = 0$), la diferencia entre la potencia nominal y el set point no afecta al objetivo, por lo que el valor del set point en ese parque es indiferente para esta función objetivo. Existe un tercer valor de prioridad de arranque ($A(i)$

= 0.5) que provoca un efecto intermedio en la función objetivo respecto a los valores de prioridad extremos. El funcionamiento del término de parada es homólogo al de arranque siendo excluyentes la baja/alta prioridad de arranque con la baja/alta prioridad de parada. Además, cada término está normalizado por Pn_i , de esta manera cada término toma el valor máximo de uno.

Tabla 1. Combinaciones prioridades arranque parada.

A(i)	P(i)
1	0
0.5	0
0	0
0	0.5
0	1

Un objetivo de capacidad de regulación σ_{CR} , que penaliza los parques eólicos que no tienen un buen sistema de regulación (4). Lo que se pretende con objetivo es conseguir que los parques eólicos que no tienen un buen sistema de control tiendan a mantener su set point en torno a un valor de referencia, que en este caso se ha decidido que sea el valor de la máxima potencia producible en ese instante, $PI_{max}(t)$.

Para tener en cuenta el sistema de regulación del parque eólico, se ha creado el parámetro $CR(i)$ que puede tomar dos valores, 1, si el parque i no regula bien, o 0 si el parque i regula bien. Si el parque regula bien ($CR(i) = 0$), el valor que tome la diferencia entre la máxima potencia producible y el set point no va a afectar al valor de la función objetivo, pudiendo seleccionar cualquiera. En cambio, si el parque regula mal ($CR(i) = 1$), la diferencia entre la máxima potencia producible y el set point tiene que mantenerse lo más pequeña posible, para que el valor del objetivo sea mínimo. Cada término está normalizado por Pn_i . Igual que en las funciones anteriores la normalización de cada término hace que no puedan superar el valor máximo de uno.

$$\sigma_{CR} = \sum_{i \in N} CR(i) \cdot \left(\frac{PI_{max}(t) - SP_i}{Pn_i} \right) \quad (4)$$

2.2 Modelado matemático del sistema

El modelado estacionario que se ha hecho de los parques es muy sencillo. Se ha considerado que cada parque está formado por un número determinado de turbinas y que la potencia proporcionada por el parque es el producto de la potencia de las turbinas del parque, suponiendo todas iguales, por el número de turbinas del parque, tal y como indica la ecuación (6). Donde P_i es la potencia del parque i , $P_{turb}(v)_i$ es la potencia de cada turbina del parque y n_{turb}_i es el número de turbinas que forman el parque.

$$P_i = P_{turb}(v)_i \cdot n_{turb}_i \quad \forall i \in N \quad (5)$$

La potencia que proporcionan cada turbina de cada parque eólico es dependiente de la velocidad del viento, v , tal y como establece la ecuación (6). Donde ρ es la densidad del aire ($\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$), R es el radio del área barrida por las palas del aerogenerador y C_p , es el coeficiente de potencia, el cual es función del tip speed ratio y del ángulo de pitch, sin embargo, en este ejemplo se ha tomado un valor fijo de 0,5, teniendo en cuenta que el máximo posible queda establecido por el límite de Betz en 0.593.

$$P_{turb}(v)_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot v^3 \cdot R^2 \cdot C_p \quad (6)$$

En función de las distintas velocidades del viento, el aerogenerador va a tener diferentes rangos de operación, tal y como se muestra en la Figura 3.

Si la velocidad instantánea en el parque es superior a la velocidad *cut off* (25 m/s) la potencia entregada por ese parque es 0. Los aerogeneradores se detienen.

Si la velocidad está comprendida entre la velocidad *rated* y la velocidad *cut off* (14-25 m/s). La potencia del aerogenerador, es la nominal.

Si la velocidad del viento está comprendida entre la velocidad *cut in* y la velocidad *rated* (3-14 m/s), entonces la potencia entregada por el aerogenerador es la que indica la ecuación (6).

Si la velocidad es inferior a la velocidad *cut in*, la potencia entregada por ese parque es 0. El aerogenerador se detiene.



Figura 3. Rangos de operación aerogenerador.

Partiendo de la potencia nominal de cada parque y el número de turbinas de cada parque, se puede calcular la potencia nominal de cada turbina Pn_{turb}_i . Con la ecuación (6) y conocido el radio, se puede calcular $P_{turb}(v)_i$ para cualquier rango de velocidades del viento v . Finalmente, se calcula la potencia de cada parque con la ecuación (5).

Todos estos cálculos se hacen de manera previa a resolver el problema de optimización permitiendo estimar la potencia por turbina y por parque que se puede generar en función de la estimación que se haga del viento que exista, es lo que se denomina la potencia producible.

2.3 Formulación RTO

En el apartado 2.1 Objetivos de agrupaciones y parques se han establecido cuatro objetivos a cumplir por los parques eólicos, es por tanto evidente que se está frente a un problema multiobjetivo. Existen multitud de metodologías para poder resolver esta clase de problemas (Miettinen, 1999). Una de las más habituales, debido a su sencillez, es la suma ponderada o el método de los pesos, que consiste en convertir el problema multiobjetivo en uno mono objetivo mediante la suma y ponderación de cada uno de los objetivos.

El método de la suma ponderada presenta una serie de inconvenientes entre los que cabe destacar la dificultad de establecer los valores de los coeficientes de ponderación de cada objetivo (λ), de forma que expresen las preferencias del decisor de manera acertada, también provoca que el espacio de soluciones cambie al cambiar el valor de los coeficientes

λ y la problemática de normalizar objetivos de diferente naturaleza tanto en unidades como en tipo de expresión matemática que los modelan, por ejemplo, combinar expresiones cuadráticas, con no lineales y con lineales. Por este motivo se ha decidido comparar la metodología de la suma ponderada con la resolución por prioridades (Kerrigan & Maciejowski, 2002) o también llamada ordenación lexicográfica (Miettinen, 1999). Esta metodología sigue un proceso iterativo, en la que la solución final se obtiene una vez resuelto p problemas mono objetivo, donde p representa el número de funciones con prioridad del problema. Esta metodología presenta la ventaja de que no hay que otorgar un valor numérico a la importancia de cada objetivo, sino un orden de importancia absoluta entre los objetivos.

En los siguientes subapartados se formula el problema con ambas metodologías

2.3.1 Formulación resolución suma ponderada

La función objetivo para resolver el problema con el método de la suma ponderada sería la que define la ecuación (7).

$$w = \sigma_{cos} + \lambda_{seg} \cdot \sigma_{seg} + \lambda_{CR} \cdot \sigma_{CR} + \lambda_{AP} \cdot \sigma_{AP} \quad (7)$$

Por tanto, el problema de optimización se formularía:

$$\min_{\{SP_i\}} w$$

s.a.:

$$SP_i \leq P_{turb_i}(v) \cdot Tur_{disp_i} \quad \forall i \in N \quad (8)$$

$$SP_i \geq P_{turb_i}(v) \cdot Tur_{bloq_i} \quad \forall i \in N \quad (9)$$

$$SPA_j = \sum_{i \in N_j} SP_i \quad \forall j \in M \quad (10)$$

Donde w es la función objetivo a minimizar, λ_i son los coeficientes de ponderación de los distintos objetivos, y (8), (9) y (10) son las restricciones del problema. $Turb_{disp_i}$ es el número de turbinas disponibles en cada parque, $Turb_{bloq_i}$ es el número de turbinas bloqueadas en cada parque y N_j , es el conjunto de parques pertenecientes a la agrupación j formados por n_j parques. De esta manera se pueden tener en cuenta en cualquier momento la situación actual del parque, por ejemplo, el límite superior (8) no se corresponde con la potencia nominal del parque porque puede haber situaciones en las que no todos los aerogeneradores del parque estén disponibles para producir energía, un ejemplo sería producido por las tareas de mantenimiento. El límite inferior (9) no se ha establecido en cero porque puede haber situaciones en las que se decida que la potencia entregada por un parque está obligada a tener un valor mínimo.

2.3.2 Formulación resolución con prioridades

Con esta metodología habría que establecer la prioridad de cada objetivo, para ello se han creado cuatro funciones objetivo (10), (11), (12) y (13) que se corresponden con los objetivos establecidos anteriormente, siendo f_1 la más importante y f_4 la menos importante.

$$f_1 = \sigma_{seg} \quad (10)$$

$$f_2 = \sigma_{cos} \quad (11)$$

$$f_3 = \sigma_{AP} \quad (12)$$

$$f_4 = \sigma_{CR} \quad (13)$$

Para obtener la solución final, habría que resolver el siguiente problema en cada iteración.

$$\min_{\{SP_i\}} f_p$$

s.a.:

$$(8), (9), (10) \quad (14)$$

$$f_q \leq f_q^* \quad \forall q \in \{1, \dots, p-1\}, p > 1$$

Donde f_p es la función de prioridad p , f_q son las funciones con mayor prioridad que la f_p de la iteración p y f_q^* son los valores óptimos de las funciones f_q y que han sido calculados en $p-1$ iteraciones anteriores. La ecuación (14) establece como restricción de la iteración p el valor óptimo de las funciones de mayor prioridad, obtenidos en las $p-1$ iteraciones anteriores.

3. Resultados

El software utilizado para la implementación y resolución de ambos problemas es Python 3.9 (Van Rossum & De Boer, 1991) junto con la herramienta de modelado y optimización Pyomo 6.4.2 (Hart et al., 2011), (Bynum et al., 2021) y el solver para resolver los problemas de optimización IPOPT 3.11.1(Wachter, 2002).

El proceso de resolución y análisis de resultados es el siguiente: en primer lugar, se resuelve y analiza la solución obtenida con la resolución con prioridades, después, se resuelve el problema mediante la suma ponderada y su solución se compara con las prioridades. Para poder comparar ambos métodos se ha intentado que los coeficientes λ utilizados en la suma ponderada reflejasen la importancia que se ha dado a cada objetivo en el método con prioridades. En concreto, se ha decidido que la importancia de cada objetivo en la suma ponderada sea cuatro veces mayor que la del objetivo anterior en importancia. Siendo el objetivo principal ajustar la producción a la demanda de potencia en cada agrupación. En la Tabla 2, se muestra la equivalencia entre los objetivos con prioridad y los objetivos en la suma ponderada, el resto de datos utilizados se muestran en la Tabla 3, 4 y 5.

Tabla 2. Coeficientes de ponderación y equivalencia con prioridades.

Objetivos Prioridad	Objetivos Suma Ponderada	Coefficientes Suma Ponderada
f_1	σ_{seg}	$\lambda_{seg} = 64$
f_2	σ_{cos}	$\lambda_{cos} = 16$
f_3	σ_{AP}	$\lambda_{prio} = 4$
f_4	σ_{CR}	$\lambda_{CR} = 1$

Tabla 3. Datos de parque.

Parque	P_n (MW)	n_{turb}	$Turb_{disp}$	$Turb_{bloq}$
P1	37	52	52	0
P2	16	8	8	0
P3	37.38	46	40	0
P4	38	19	19	0
P5	30	21	21	0
P6	42	15	15	0
P7	33	50	50	0

Tabla 4. Datos operativos de parque.

Parque	cwf (€/MW)	v (m/s)	$A(i)$	$P(i)$	$CR(i)$
--------	--------------	-----------	--------	--------	---------

P1	60.0	14	1	0	0
P2	60.0	14	1	0	0
P3	90.0	14	1	0	0
P4	60.0	14	0	0	1
P5	90.0	14	1	0	0
P6	50.0	14	0	1	0
P7	50.0	14	0	1	0

Tabla 5. Datos agrupaciones

Agrupación	Parque	PA_i (MW)	max_err (MW)
A ₁	P1, P2, P3, P4	55	2
A ₂	P5, P6, P7	60	2
A ₃	P3, P4, P5	40	2

3.1 Análisis de resolución con prioridades.

Los resultados obtenidos en cada iteración son los que se muestran en la Tabla 6 y 7. En la Tabla 6, las celdas marcadas en amarillo, indican la función objetivo que se está minimizando en cada iteración. Las celdas verdes indican las funciones objetivo que ya han sido optimizadas y se han incorporado como restricción en las iteraciones siguientes. La Tabla 6 también incorpora una función f_{total} , ($f_{total} = f_1 + f_2 + f_3 + f_4$), esta función no tiene ninguna utilidad a la hora de resolver el problema mediante prioridades, pero es necesaria para poder comparar más adelante la resolución con prioridades con la suma ponderada.

Observando la Tabla 6 se puede ver que en cada iteración la función que está siendo optimizada está mejorando su valor, exceptuando la iteración 4, ya que por las condiciones del problema f_4 ha alcanzado su mínimo en la iteración 3.

Respecto a la Tabla 7, que muestra los valores de los sets point en cada iteración, se remarcan en gris los cambios relevantes que se han producido en cada iteración. Se puede comprobar como en la iteración 1 se busca una solución que minimice el objetivo de seguimiento. En la iteración 2 se cumple la función de seguimiento, que se ha establecido como restricción, pero se cambia el set point de los parques eólicos de tal forma que se intenta no utilizar los más caros. Se ve que en cada agrupación los parques cuyo coste era 90 €/MW (P3 y P5) han reducido el máximo de lo posible el valor de su set point, para cumplir con el resto de restricciones. En la iteración 3 solo se cumple con las prioridades de arranque y parada en los casos en los que es posible. En la agrupación 1, P1, P2 y P3 tienen criterio de arranque igual a 1 ($A(i) = 1$), sin embargo, solo P2 aumenta su set point para minimizar el objetivo de arranque. Los otros dos parques no pueden aumentar su set point porque están condicionados por otras restricciones. P3 no aumenta su set point porque aumentaría el coste, y P1 no solo no aumenta su set point, sino que lo disminuye porque si no, no se cumpliría la función de seguimiento. El motivo por el que se escoge aumentar el set point de P2 frente al de P1, teniendo ambos los mismos costes, es que el objetivo de arranque está normalizado por la potencia nominal del parque (Pn), esto hace que tengan preferencia de utilización los parques más pequeños, ya que al ser el denominador más pequeño el efecto del numerador en la función objetivo va a ser mayor. En la agrupación 2, P5 tiene criterio de arranque igual a 1 ($A(i) = 1$), pero al tener el mayor coste, no puede minimizar el objetivo de arranque. P6 y P7 tienen criterio de parada igual a 1 ($P(i) = 1$), sin embargo, solo P7

disminuye su set point para minimizar el objetivo de parada, mientras que P6 lo aumenta. Entre ambos parques tienen que cumplir con la función de seguimiento, P5, no se puede utilizar porque aumentaría el valor del objetivo de coste económico. El motivo por el que se decide aumentar uno y disminuir otro vuelve a ser que los términos están normalizados por la potencia nominal de los parques (Pn). Un incremento de 1 MW en el set point de P6 supone un incremento de la función objetivo de 1/42 ($1/42 \cong 0,0238$), mientras que un incremento de un MW en el set point de P7, supone un incremento de 1/33 ($1/33 \cong 0,0333$). Al ser menor el incremento en P6 que en P7 y al tener este una potencia nominal mayor, el optimizador utiliza este primero para conseguir la mayor parte de la demanda de energía de la agrupación, y después utiliza P7 hasta completar la demanda de la agrupación. En la iteración 4 no se produce ningún cambio porque el objetivo de capacidad de regulación se ha visto minimizado en la iteración 3, alcanzando un valor equivalente a 0, por lo que la mejora ya es imposible.

Tabla 6. Valores funciones con prioridad por iteración.

F. Objetivo	Iter. 1	Iter. 2	Iter. 3	Iter. 4
f_1	3.82e-20	1.0e-08	1.0e-08	1.0e-08
f_2	1.95427	1.68254	1.68254	1.68254
f_3	2.90046	4.91319	4.55509	4.55509
f_4	0.7286	-1.7e-09	-9.8e-09	-9.7e-09
f_{total}	5.58340	6.59572	6.23762	6.23762

Tabla 7. Set Point de parque por iteración.

Parque	Iter. 1	Iter. 2	Iter. 3	Iter. 4
P1	25.086	8.486	1.29e-07	1.91e-07
P2	9.561	6.514	15.000	15.000
P3	10.043	2.000	2.000	2.000
P4	10.311	38.000	38.000	38.000
P5	19.647	1.88e-06	2.96e-06	3.04e-06
P6	21.798	33.993	42.000	42.000
P7	18.556	26.006	18.000	18.000

3.2 Comparación prioridades y suma ponderada.

En este apartado se comparan los resultados obtenidos mediante la suma ponderada y mediante la resolución con prioridades.

En la Tabla 8 se ve como f_{total} en la resolución mediante prioridades, es mayor que en la suma ponderada ya que la resolución con prioridades es un método más restrictivo. Sin embargo, la resolución con prioridad consigue mejores resultados en el objetivo económico (f_2), ya que se ha buscado una solución que minimice concretamente ese objetivo una vez que se ha cumplido con el seguimiento de la demanda (f_1). En cambio, la suma ponderada resuelve a la vez todos los objetivos como si se trataran de uno solo, y aunque unos objetivos tengan más importancia que otros gracias a la utilización de los coeficientes λ , unos objetivos se pueden utilizar para compensar el empeoramiento de otros y así obtener un resultado global mejor. Esto es lo que ha sucedido con σ_{AP} , que en la suma ponderada ha mejorado mucho su valor respecto a f_3 , a costa de empeorar σ_{cos} y σ_{CR} respecto a sus equivalentes f_2 y f_4 respectivamente en la resolución con prioridades.

Tabla 8. Comparación objetivos con prioridades y con suma ponderada.

Objetivos Prioridad	Valores	Objetivos Suma Ponderada	Valores
f_1	1.0e-08	σ_{seg}	3e-05
f_2	1.68254	σ_{cos}	1.98392
f_3	4.55509	σ_{AP}	1.94772
f_4	-9.7e-09	σ_{CR}	0.73691
f_{total}	6.23762	w	4.66859

El empeoramiento de σ_{cos} respecto a f_2 tiene un fuerte impacto económico en la generación de la energía eléctrica que se puede evaluar desnormalizando ambas funciones. Estos resultados se muestran en la Tabla 9 y supone un ahorro de 1139,26 € en la producción de la energía eléctrica si se resuelve el problema con prioridades en vez de con la suma ponderada.

Tabla 9. Comparación económica con prioridades y suma ponderada.

Objetivo	Valor (€)	Objetivo	Valor (€)
f_2	6359.98	σ_{cos}	7499.24

En la Tabla 10 se muestran los set point que se han obtenido con los dos métodos y la potencia demandada en cada agrupación PA_j . Hay diferencias evidentes entre ambos métodos, por ejemplo, en la resolución con prioridades, P5 no se utilizaba porque tenía uno de los costes mayores, sin embargo, en la suma ponderada P5, alcanza su límite superior cumpliendo con el objetivo de minimizar el objetivo de arranque parada ($A(i) = 1$), y que en la resolución por prioridades no se podía minimizar. Otra diferencia que se puede apreciar es que el set point de P1, en la resolución por prioridades no tomaba el valor que minimizaba la función objetivo de arranque parada (f_3), porque se veía condicionado por otras restricciones, en cambio en la suma ponderada sí que se trata de minimizar este objetivo.

Tabla 10. Set Point de parque por agrupación.

Set Points	Prioridades	Suma ponderada
PA₁	55	55
SP[P1]	1.91e-07	28.998
SP[P2]	15.000	16.000
SP[P3]	2.000	3.36e-06
SP[P4]	38.000	9.997
SPA₁	55	54.995
PA₂	60	60
SP[P5]	3.04e-06	30.000
SP[P6]	42.000	29.990
SP[P7]	18.000	2.85e-06
SPA₂	60	59.990
PA₃	40	40
SP[P3]	2.000	3.36e-06
SP[P4]	38.000	9.997
SP[P5]	3.04e-06	30.000
SPA₃	40	39.997

4. Conclusiones

Se ha planteado y resuelto de manera estacionaria el problema de asignación de consignas a parques eólicos, como

primer paso para desarrollar una herramienta de operación en tiempo real del ciclo Power-to-H₂-to-Power.

Se ha comprobado como el problema planteado es un problema multiobjetivo y se ha formulado como un problema de resolución por prioridades para garantizar la optimización estricta de los objetivos de acuerdo a su prioridad en su cumplimiento, dado que es habitual que se especifiquen así por las empresas propietarias de parques. Una vez resuelto el problema se ha comparado con una formulación típica mono objetivo basada en minimizar la suma ponderada de todos los objetivos y se ha comprobado como efectivamente, la resolución con prioridades obtiene los valores óptimos para cada objetivo en función de su prioridad, en cambio la suma ponderada devuelve valores que pueden ser peores para objetivos que son prioritarios. Se constata la dificultad de asignar valores adecuados a los coeficientes de ponderación que además dependerán fuertemente de cómo sea cada función de coste. En el ejemplo propuesto, la función de coste σ_{seg} está formada por tres términos y es cuadrática y las tres restantes son lineales y están formadas por siete términos cada una.

Agradecimientos

La publicación es parte del proyecto "Gestión Óptima en Tiempo Real del ciclo Power-toH₂-to-Power (OptiMaPH2P)" Ref: TED2021-131220B-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR

Referencias

- Alvarez, G. E. (2020). Operation of pumped storage hydropower plants through optimization for power systems. *Energy*, 202, 117797.
- Andersson, J., & Grönkvist, S. (2019). Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 11901–11919.
- Bynum, M. L., Hackebeil, G. A., Hart, W. E., Laird, C. D., Nicholson, B. L., Siirola, J. D., Watson, J.-P., & Woodruff, D. L. (2021). *Pyomo—optimization modeling in python* (Third, Vol. 67). Springer Science & Business Media.
- Comisión Europea. (2018). *Estrategia a largo plazo para 2050*. Comisión Europea. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_es
- Fraille, D., Alexander Vandenberghe, W., Vasiliki Klonari, W., Lizet Ramirez, W., Ivan Pineda, W., Pierre Tardieu, W., Blandine Malvault, W., Ivan Komusanac, W., Rory, W. O., Timbus, A., ABB Power Grids, H., Cronin, A., Gamesa, S., Shapochkina, A., Bach Andersen, A., Bulder, B., Wind, E. J., Ben Ramdane, C., Saiz, C., ... Andersen, M. (2021). *Getting fit for 55 and set for 2050 Electrifying Europe with wind energy* AUTHORS.
- Hall, P. J., & Bain, E. J. (2008). Energy-storage technologies and electricity generation. *Energy Policy*, 36(12), 4352–4355.
- Hart, W. E., Watson, J.-P., & Woodruff, D. L. (2011). Pyomo: modeling and solving mathematical programs in Python. *Mathematical Programming Computation*, 3(3), 219–260.
- IEA. (2022). *Renewables 2022*. 2022. <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>
- Kerrigan, E. C., & Maciejowski, J. M. (2002). Designing model predictive controllers with prioritised constraints and objectives. *Proceedings. IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design*, 33–38.
- Miettinen, K. (1999). *Nonlinear multiobjective optimization* (Vol. 12). Springer Science & Business Media.

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el Hidrógeno Renovable*.
- Van Rossum, G., & De Boer, J. (1991). Interactively testing remote servers using the Python programming language. *CWI Quarterly*, 4(4), 283–303.
- Veers, P., Dykes, K., Lantz, E., Barth, S., Bottasso, C. L., Carlson, O., Clifton, A., Green, J., Green, P., Holttinen, H., Laird, D., Lehtomäki, V., Lundquist, J. K., Manwell, J., Marquis, M., Meneveau, C., Moriarty, P., Munduate, X., Muskulus, M., ... Wiser, R. (2019). Grand challenges in the science of wind energy. *Science*, 366(6464).
- Wachter, A. (2002). An interior point algorithm for large-scale nonlinear optimization with applications in process engineering. Carnegie Mellon University.

Resumen

El gran recorrido de las energías renovables plantea la búsqueda de métodos de control más sofisticados de la mano de una mayor eficiencia proporcionada por los avances técnicos. La reciente aparición de turbinas flotantes ha incrementado considerablemente las expectativas de producción de energía a nivel mundial. Dada la complejidad de estos sistemas, su dinámica no lineal, y las perturbaciones a las que están sometidos, es necesario comprobar en primer lugar la eficacia de los controladores propuestos sobre prototipos a pequeña escala para su posterior validación en modelos a escala media o en dispositivos de vientos reales. De este modo, se pueden observar efectos que no aparecen en las simulaciones.

En este trabajo se presenta un modelo a escala de un aerogenerador el cual incluye dos lazos de control para la generación y estabilización de la potencia extraída: un lazo externo se encarga de controlar la carga eléctrica del generador, y un lazo interno que controla el ángulo de pitch de las palas de la turbina. Se han implementado la electrónica y la mecánica necesarias para trasladar el comportamiento de un aerogenerador convencional a una escala reducida empleando componentes de bajo coste y con una gran capacidad de replicación. El modelo a escala corresponde a una mejora del prototipo inicial [1].

El sistema del prototipo está compuesto de la siguiente forma: una turbina construida sobre un motor de señal continua sin escobillas (brushless) de radio control. Además se dispone de un mecanismo de paso variable para las aspas diseñadas a partir del modelo NACA0012 (National Advisory Committee for Aeronautics) [2]. Se trabaja con dos palas, creadas con una impresora 3D. El rotor de esta turbina recibe el viento de un ventilador que tiene varias velocidades. La parte del hardware está formada por un microcontrolador que realiza la función del muestreo de la señal adaptada entregada por el generador, el cálculo de la frecuencia de dicha señal mediante la FFT, el procesamiento de los algoritmos de control, y la aplicación de los mismos.

Los actuadores tanto de pitch como de carga eléctrica, son los encargados de aplicar la señal de control. A su vez, el sistema es dotado de la comunicación necesaria para poder trasladar la información y el estado del modelo a través de diferentes canales. El software incorporado permite realizar un seguimiento completo del estado del aerogenerador, junto a los valores de las señales de control en tiempo real a través de una conexión puerto serie y representado las señales con Simulink.

En lo referente al control, el objetivo principal del prototipo es la obtención de un comportamiento semejante al de un aerogenerador convencional, respetando las dos regiones de operación correspondientes a la velocidad del viento. Para ello se tiene el control del torque del generador, para velocidad del viento inferiores a la velocidad nominal del mismo, y el control de pitch, por encima de esa velocidad. Se ha implementado un control PID para el ángulo de pitch para esta segunda región de operación, junto a un control PD en la carga eléctrica para la estabilización las rpm del generador. Ambos controladores actúan por lo tanto en distintas regiones de operación de la turbina, diseñando el control de pitch para trabajar en la región nominal del sistema, y aplicando el control de carga en caso de superar un margen establecido de trabajo. Partiendo de una sintonización experimental, se comprueba el desempeño correcto del prototipo y el cumplimiento de las regiones de funcionamiento haciendo uso de un ángulo de pitch óptimo en torno al punto de operación, donde se alcanza el mayor coeficiente de potencia. Para una velocidad objetivo de 500 rpm en la región nominal, se obtuvieron unas ganancias del control de pitch $K_p = 0.03$, $K_i = 0.01$, and $K_d = -0.01$. Fuera del rango de trabajo, se aplica el control de carga eléctrica con unas ganancias de $K_p = 0.007$, $K_d = 0.01$.

El prototipo tiene una plataforma para emular la barcaza de ese tipo de turbina flotante. Está sujeta a ligeras oscilaciones que representan la olas que impactan con ella. El hardware incorporado actualmente en el prototipo facilita el seguimiento de las vibraciones estructurales de la barcaza al incorporar un dispositivo IMU, así como la aceleración, la orientación, las velocidades angulares y el campo magnético a la que está sometida, pudiendo generar voluntariamente olas con un comportamiento sinusoidal a través de los correspondientes actuadores. Esto permite que también que los controladores sean capaces de reducir las oscilaciones a la par que estabilizan las revoluciones de la turbina. Hay que tener en cuenta algunas dinámicas propias del modelo a escala, el cual posee una cierta inercia que ralentiza la respuesta respecto a la señal de entrada y una resistencia inicial que se debe superar para generar el arranque de la turbina.

*giordyan@ucm.es

Con el fin de dotar de una mayor autonomía al sistema, se ha incorporado una supervisión telemática al modelo de aerogenerador a través de conexión wifi y con una interfaz de usuario implementada en MATLAB [3] (Figura 1). De este modo, se consigue llevar un registro completo en la nube del comportamiento del prototipo, la posibilidad de comparar los resultados con gemelos digitales e incluso de manejar una granja de aerogeneradores a escala.

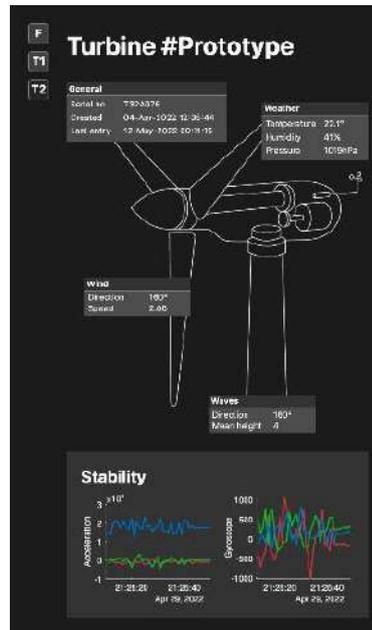


Figura 1. Interfaz de usuario del prototipo aerogenerador flotante.

Se ha corroborado la eficacia del control en el aerogenerador a escala cuya identificación abre la posibilidad de emplear el modelo para el testeo de algoritmos de control más sofisticados [4, 5] y sirve como base para otros prototipos de aerogeneradores flotantes. Como trabajo a futuro, se desea implementar algoritmos de control o mecanismos que ayuden a paliar las vibraciones estructurales, muy presentes en los aerogeneradores flotantes [6]. Al mismo tiempo, se está diseñando un servidor específico para el modelo a escala el cual reduzca considerablemente la latencia en la transmisión de los datos y permita externalizar los algoritmos de control aplicados.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades con el proyecto MCI/AEI/FEDER PID2021-123543OB-C21.

Referencias

1. Andrade, G.A., Esteban, S.: Modelo a escala de aerogenerador para control. In: Aitor J. Garrido et al. (eds.), *Innovation and Lecture Notes In Control Engineering For Clean Energy Generation*, pp 53-58. Universidad del País Vasco, Bilbao (2021).
2. AIRFOIL TOOL, NACA 0012 AIRFOILS (n0012-il), <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>, last accessed 2023/03/29
3. GITHUB, TFGGiordyAlexander, https://github.com/GGiordy/TFG_Giordy_Alexander.git, last accessed 2022/02/25
4. Torralba-Morales, L. M., Reynoso-Meza, G., & Carrillo-Ahumada, J. (2020). Tuning and comparison of design concepts applying Pareto optimality. a case study of cholette bioreactor. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 17(2), 190-201.
5. Sierra-García, J.E., and Santos, M.: Redes neuronales y aprendizaje por refuerzo en el control de turbinas eólicas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 18.4 (2021): 327-335.
6. Serrano-Barreto, C. L., Santos, M., and Sierra García, J. E. (2021). Controlador de pitch híbrido optimizado con algoritmo genético para aerogeneradores flotantes. In *XLII Jornadas de Automática* (pp. 197-202). Universidade da Coruña, Servicio de Publicacións.

Resumen

El uso extensivo de compuestos antimicrobianos (antibióticos, desinfectantes y conservantes) durante las últimas décadas, especialmente en las industrias farmacéutica y alimentaria, ha acelerado la aparición de bacterias resistentes o “superbacterias”. El problema de la resistencia a los antimicrobianos (AMR, por las siglas en inglés de *Antimicrobial Resistance*) se agrava a un ritmo alarmante, sobrepasando ampliamente nuestra capacidad para desarrollar nuevos tratamientos. Tan sólo en el año 2019, estudios recientes estiman en 1.27 millones los fallecimientos directamente relacionados con infecciones provocadas por bacterias resistentes, mientras que, para 2050, se prevé que esta será la causa de unos 10 millones de decesos anuales alrededor del mundo (Murray et al., 2022).

Una de las principales causas de que las terapias con antimicrobianos fallen es la incapacidad de predecir y atajar rebrotes en la población de bacterias (fenómeno popularmente conocido con el término anglosajón *regrowth*), esto es, la infección reaparece una vez que la población está aparentemente eliminada y el tratamiento ha finalizado. Se puede comprobar cómo los modelos clásicos de crecimiento bacteriano que dividen la población en dos grupos, sensibles y resistentes a la terapia, fallan al predecir este comportamiento (Nikolaou and Tam, 2006). En realidad, la resistencia a los antimicrobianos es una propiedad que se distribuye de manera heterogénea entre las bacterias de la población, formando una suerte de “continuo” (Djidjou-Demasse et al., 2021).

En el presente trabajo, se propone un modelo matemático de crecimiento y muerte celular para una población bacteriana compuesta por distintas cepas que difieren en su grado de AMR, el cual permite predecir rebrotes en la población. Dicho modelo se inspira en el trabajo desarrollado en Nikolaou and Tam (2006), donde los autores introducen heterogeneidad entre las bacterias de la población a través de un conjunto de valores posibles que toma el ratio de muerte (aleatorio) inducido por el antimicrobiano. Aunque el modelo en Nikolaou and Tam (2006) permite predecir repuntes en la población durante el tratamiento de desinfección, las distintas cepas que componen la población evolucionan de manera desacoplada, desechando la posibilidad de que las bacterias aumenten o reduzcan su grado de AMR a través de mutaciones, genotípicas o fenotípicas.

Una interpretación biológica sencilla para el grado de AMR (aunque puede adquirir múltiples significados dependiendo de la complejidad que se desee añadir al modelo) se proporciona en Djidjou-Demasse et al. (2021), donde los autores lo definen como

$$r := \frac{\log(C_r/C_0)}{\log(C_1/C_0)}, \quad (1)$$

con C_r , C_0 y C_1 las concentraciones inhibitorias mínimas (MIC, por las siglas en inglés de *Minimal Inhibitory Concentration*) asociadas, respectivamente, a las cepas bacterianas con grados de resistencia r , 0 (cepa sensible estándar) y 1 (cepa resistente estándar). Estrictamente hablando, el grado de resistencia r se distribuye entre las bacterias de manera continua, como en (1). Sin embargo, asumiendo una discretización $\{r_i \mid i = 1, \dots, n_r, n_r \in \mathbb{N}\} \subset [0, 1]$ lo bastante fina de r , se obtiene una buena aproximación del comportamiento real de la población, a la vez que se simplifica notablemente su estudio.

A cada uno de los valores $\{r_i \mid i = 1, \dots, n_r\}$ que toma la variable aleatoria discreta r se asocia una subpoblación de bacterias $y_i(t) = y(r_i, t)$ que presenta grado de resistencia r_i . Para explicar la evolución con el tiempo de la i -ésima cepa, para $i = 1, \dots, n_r$, se propone el siguiente modelo en ecuaciones diferenciales ordinarias (asumiendo $r_l < r_k$ para $1 \leq l < k \leq n_r$)

$$\frac{dy_i}{dt}(t) = \sum_{j=1}^{n_r} \underbrace{(\mu_{ji}y_j(t))}_{\text{Mutaciones de } j \text{ a } i} - \underbrace{(\mu_{ij}y_i(t))}_{\text{Mutaciones de } i \text{ a } j} + \underbrace{g_i(C(t))y_i(t)}_{\text{Crecimiento neto de } i}, \quad (2)$$

donde μ_{lk} representa el ratio de mutación de las bacterias con grado de resistencia r_l hasta grado r_k , para $1 \leq l < k \leq n_r$, mientras que $g_i(C(t)) = g(r_i, C(t))$ es el ratio de crecimiento neto asociado a la cepa con grado de resistencia r_i , que depende de la concentración de antimicrobiano $C(t)$. Para este trabajo, se escoge un modelo de decaimiento lineal del ratio neto de crecimiento con el grado de resistencia, para reflejar el coste biológico de AMR en las bacterias (*fitness-cost* (Melnyk et al., 2015)). Es decir,

$$g_i(C(t)) = g_S(C(t)) + r_i(g_R - g_S(C(t))), \quad (3)$$

donde $g_R = g(r_{n_r}, C(t)) = g(1)$ es el ratio de crecimiento neto (constante) para la cepa totalmente resistente (R), y

$$g_S(C(t)) = g_S^0 - k_S \frac{C(t)^{H_d}}{C(t)^{H_d} + EC_{50d}^{H_d}}, \quad (4)$$

*miriamr@iim.csic.es

es el ratio de crecimiento neto asociado a la cepa totalmente sensible (S), esto es, $g_S(C(t)) = g(r_1, C(t)) = g(0, C(t))$, el cual es inhibido por una concentración $C(t)$ de antimicrobiano mediante una funcionalidad tipo Hill sobre la muerte celular, donde los parámetros k_S , H_d y EC_{50d} tienen el significado usual, y g_S^0 es el crecimiento neto de S en ausencia de antimicrobiano.

El modelo (2)–(3)–(4) es lo bastante genérico para incluir mutaciones fenotípicas “hacia delante” (*forward-mutations*) y “hacia atrás” (*backward-mutations*). En una primera aproximación, podemos suponer que las bacterias no pueden disminuir apreciablemente su grado de resistencia, de manera que $\mu_{lk} = 0$ para $1 \leq k \leq l \leq n_r$. Podemos escoger, por ejemplo, un ratio de mutación que decaiga exponencialmente con el salto entre grados de resistencia,

$$\mu_{ij} = \mu_M \exp(-k_\mu(r_j - r_i)), \quad 1 \leq i < j \leq n_r, \quad (5)$$

donde μ_M , $k_\mu \in \mathbb{R}^+$ denotan el ratio de mutación máximo y la rapidez con la que se produce el decaimiento, respectivamente.

El modelo (2)–(3)–(4)–(5) es (multi-experimentalmente) estructuralmente identificable (Martínez and Villaverde, 2020; Ligon et al., 2018) a partir de observaciones del número total de bacterias, cuando se aplican distintas concentraciones constantes de antimicrobiano, por lo que el modelo es adecuado para ajuste de datos y estimación paramétrica. En la Figura 1 se representa un ejemplo de ajuste de los parámetros g_S^0 , g_R , k_S , H_d , EC_{50d} , μ_M y k_μ , para dos conjuntos de datos experimentales de crecimiento bacteriano extraídos de Zhu et al. (2017), y que muestra la capacidad del modelo para predecir dinámicas de rebrote complejas.

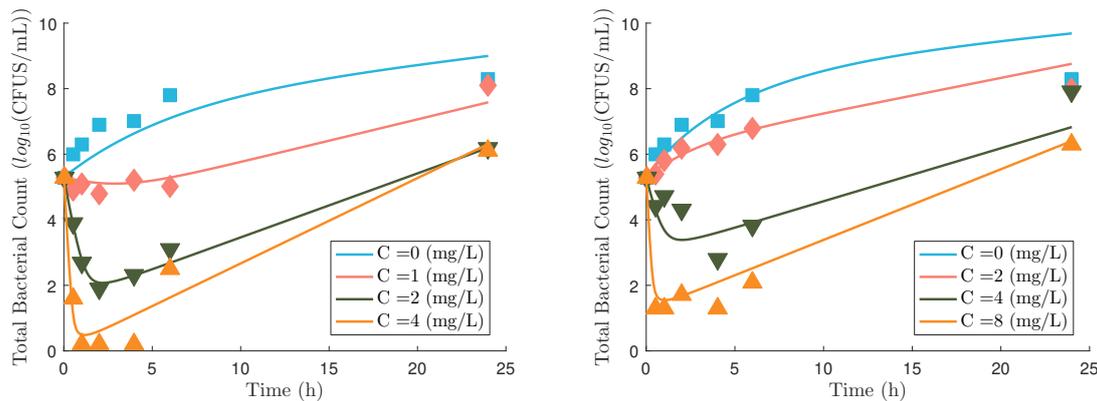


Figura 1. Ajuste paramétrico de la concentración total de bacterias $Y(t) = \sum_{i=1}^{n_r} y_i(t)$ ofrecido por el modelo (2)–(3)–(4)–(5) para datos experimentales extraídos de (Zhu et al., 2017), obtenidos al aplicar dos compuestos distintos basados en Colistina (antibiótico con efecto bactericida).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos ChemBac (20213AT001) y con la ayuda 202270I193, ambos financiados por el CSIC.

Referencias

- Djidjou-Demasse, R., Sofonea, M.T., Choisy, M., Alizon, S., 2021. Within-host evolutionary dynamics of antimicrobial quantitative resistance. URL: <https://hal.science/hal-03194023>. a preprint peer-reviewed and recommended by PCI Mathematical & Computational Biology (<https://mcb.peercommunityin.org/>).
- Ligon, T.S., Fröhlich, F., Chiş, O.T., Banga, J.R., Balsa-Canto, E., Hasenauer, J., 2018. Genssi 2.0: multi-experiment structural identifiability analysis of sbml models. *Bioinformatics* 34, 1421–1423. doi:10.1093/bioinformatics/btx735.
- Martínez, N., Villaverde, A.F., 2020. Nonlinear observability algorithms with known and unknown inputs: Analysis and implementation. *Mathematics* 8, 1876. doi:<https://doi.org/10.3390/math8111876>.
- Melnyk, A.H., Wong, A., R, R.K., 2015. The fitness costs of antibiotic resistance mutations. *Evolutionary Applications* 8, 273–283. doi:<https://doi.org/10.1111/eva.12196>.
- Murray, C.J., Ikuta, K.S., Sharara, F., Swetschinski, L., Robles Aguilar, G., Naghavi, M., y col., 2022. Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *The Lancet* 399, 629–655. doi:[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0).
- Nikolaou, M., Tam, V.H., 2006. A new modeling approach to the effect of antimicrobial agents on heterogeneous microbial populations. *Journal of Mathematical Biology* 52, 154–182. doi:<https://doi.org/10.1007/s00285-005-0350-6>.
- Zhu, C., Schneider, E.K., Wang, J., Kempe, K., Wilson, P., Velkov, T., Li, J., Davis, T.P., Whittaker, M.R., Haddleton, D.M., 2017. A traceless reversible polymeric colistin prodrug to combat multidrug-resistant (mdr) gram-negative bacteria. *Journal of Controlled Release* 259, 83–91. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.02.005>.

Felipe Barreno^{a,*}, Matilde Santos^b, Manuel G. Romana^c

^a Facultad de Informática, Universidad de Complutense, 28040-Madrid, España

^b Instituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad de Complutense, 28040-Madrid, España

^c Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 28040-Madrid, España

Resumen

En un mundo en el que la seguridad es uno de los aspectos más importantes para la sociedad, el comportamiento de los conductores en carretera está recibiendo una atención especial por parte de instituciones, usuarios y empresas (Zaidan et al., 2022). En el sector de la automoción, la identificación de los diferentes comportamientos al volante, principalmente aquellos que pueden entrañar algún riesgo como la falta de atención o la somnolencia, es fundamental para mantener la seguridad del conductor o de otros usuarios de la vía, especialmente en vehículos altamente automatizados.

La experiencia del usuario de la carretera es relevante, porque la geometría de la carretera también influye en la seguridad de la conducción (Barreno et al., 2022). El análisis aquí propuesto del comportamiento del conductor se centra en las maniobras, ya que proporcionan información útil sobre el conductor que las realiza, en concreto en curvas (Rosas-López et al., 2021), donde hay que tener en cuenta las percepciones subjetivas del conductor, según el tipo de carretera en el que esté circulando (Santos & López, 2012).

Durante la conducción, el vehículo está sometido a fuerzas que afectan a su dinámica (ASSHTO, 2010). Además de experimentar las fuerzas correspondientes a aceleración y desaceleraciones, si el vehículo gira mediante una maniobra de dirección, cuanto mayor sea la mayor sea la velocidad, mayor será la fuerza centrífuga sobre él. Por otro lado, las carreteras se definen por sus características geométricas, que determinan si un vehículo puede circular a cierta velocidad con un grado adecuado de comodidad y seguridad. La velocidad de diseño de un tramo (V), independientemente de la velocidad máxima permitida por la administración, está relacionada con algunas de estas características, principalmente con el radio de curvatura (R). Se calcula de la siguiente manera:

$$V^2 = 127R(f_t + \frac{\rho}{100}) \quad (1)$$

Las aceleraciones que actúan sobre el vehículo son la aceleración longitudinal, en la dirección de avance del vehículo, y la lateral, en la dirección ortogonal del vehículo. Además se genera la aceleración debida a la carretera, que se calcula como:

$$a_{road} = g(\rho + f_t) \quad (2)$$

donde a_{road} (m/s²), es la aceleración crítica debida a los efectos de la geometría de la carretera, g (m/s²) es la aceleración de la gravedad, ρ (m) es la pendiente transversal de la carretera y f_t es el coeficiente máximo de fricción transversal movilizada. Esta aceleración de la carretera es la aceleración límite de una curva horizontal para mantener la seguridad y el confort de marcha. Independientemente de la pendiente transversal y del coeficiente de fricción movilizado máximo, que son difíciles de obtener, a_{road} puede también determinarse a partir de sensores inerciales ya que puede definirse como:

$$a_{road} = |\omega| \cdot v_l \quad (3)$$

donde ω (rad/s) es la velocidad angular y v_l (m/s) es la velocidad lineal del vehículo. La aceleración lateral percibida por el conductor a_p (m/s²) debido a un comportamiento de conducción errático es:

$$a_p = |a_m| - a_{road} \quad (4)$$

Donde a_m (m/s²) es la aceleración lateral medida. Desde el punto de vista del conductor, esta aceleración refleja la "sensación" de conducción debida al efecto de la geometría de la carretera. En la Imagen 1 se representan algunas de estas características dinámicas de un vehículo en carreteras urbanas y autopistas (Gaimersheim, Alemania) (Geyer et al., 2020). En la imagen superior se muestra el ángulo de dirección del vehículo; en la inferior, las lecturas de velocidad angular.

El objetivo de este trabajo es identificar si un evento de conducción es una maniobra anómala o peligrosa, utilizando medidas de sensores inerciales. Para ello se aplican redes neuronales convolucionales (CNN). El modelo consiste en una red neuronal de aprendizaje profundo con una capa de entrada con 5 neuronas, y dos capas que aplican filtros convolucionales deslizantes a la entrada. La capa convolucional tiene un filtro de tamaño 3. La primera y la segunda capa convolucional tienen 32 y 64 filtros, respectivamente. Para ambas capas convolucionales, las entradas se rellenan para que las salidas tengan la misma longitud. La tasa de aprendizaje inicial utilizada en este estudio fue de 0,001. El número total de épocas de entrenamiento es 15.

El modelo inteligente propuesto para la caracterización del estilo de conducción incluye la geometría de la carretera mediante características relacionadas como las aceleraciones longitudinales y laterales del vehículo percibidas por el conductor. Por ello las cinco entradas de la CNN son: la aceleración longitudinal, la aceleración lateral, la guiñada, la velocidad lineal del vehículo y el ángulo de dirección. Estas variables de entrada del modelo neuronal se utilizan para detectar el comportamiento de giro anómalo mientras se conduce, que se concreta en la aceleración percibida por el conductor (4).

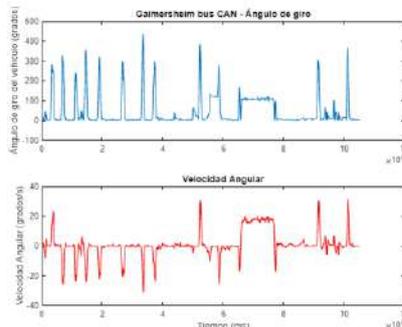


Imagen 1. Algunas entradas de la CNN: ángulo de dirección y velocidad angular (Gaimersheim, Alemania) (Geyer et al., 2020)

La caracterización del estilo del conductor se basa en que si la velocidad actual al pasar por una curva es excesiva, la aceleración lateral será elevada, lo que provocará una maniobra defectuosa del vehículo. Así, la aceleración lateral percibida, que estima la sensación del conductor durante el trayecto, será notable, por lo que el efecto de la geometría de la carretera se tiene en cuenta implícitamente a través de la dinámica del vehículo mediante las características aceleración longitudinal y lateral, la velocidad angular y velocidad del vehículo. Esto podría indicar que el vehículo circula a una velocidad superior al límite de velocidad establecido, y de esta forma se incluye el impacto de la geometría de la carretera.

Resultados

El A2D2 es un conjunto de datos de conducción autónoma pública de Audi (Geyer et al., 2020). La información incluye datos en tiempo real de mediciones recopiladas por sensores inerciales (aceleraciones y giroscopios) extraídos del bus CAN del automóvil, un Audi Q7 e-tron. Con esas medidas se calculan las entradas a la CNN.

Los resultados obtenidos para una carretera urbana en Gaimersheim, Alemania, con la CNN, son:

Localidad	Exactitud	Precisión	Recall	F1-score
Gaimersheim	98.97%	98.93%	98.77%	98,85%

En resumen, el sistema clasificador CNN es capaz de identificar la mayoría de los eventos de conducción en carretera y, por lo tanto, clasificar las maniobras inseguras en eventos de curvas correctamente. Se ha logrado una elevada tasa de éxito en la clasificación.

Conclusiones y trabajo futuros

Se ha diseñado una red neuronal de aprendizaje profundo, una CNN, para clasificar eventos anómalos de conducción en maniobras en carreteras. Utiliza como entradas las medidas reales de acelerómetros, giroscopio y GPS. A partir de esas medidas, obtenidas con el bus CAN (Controller Area Network) incorporado en cualquier vehículo actual, es posible obtener la aceleración debida a la carretera y la aceleración percibida por el conductor. Esta información permite clasificar la conducción ineficiente o defectuosa en los virajes de las curvas. El sistema es capaz de proporcionar información para detectar maniobras temerarias y arriesgadas y, por tanto, prevenir accidentes de tráfico.

Se pueden abordar varios trabajos futuros interesantes. En primer lugar, se podrían considerar más datos si se dispusiera de ellos. Además, siguiendo la idea presentada en este artículo, también podría considerarse la relación entre el comportamiento del conductor y la curvatura de la carretera, así como la percepción de la velocidad y la aceleración de otros vehículos en la carretera.

Referencias

AASHTO. Transportation Officials. (2011). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 2011..
 Barreno, F., Romana, M. G., & Santos, M. (2022). Fuzzy expert system for road type identification and risk assessment of conventional two-lane roads. *Expert Systems*, 39(9), e12837.
 Geyer, J., Kassahun, Y., Mahmudi, M., Ricou, X., Durgesh, R., Chung, A. S., ... & Schuberth, P. (2020). A2d2: Audi autonomous driving dataset. *arXiv preprint arXiv:2004.06320*.
 Rosas-López, C. D., Gaviria-Mendoza, C. A., & Calero-Valenzuela, C. A. (2021). Clasificación de comportamiento de conductores en curvas horizontales de carreteras rurales de dos carriles. *Revista Facultad de Ingeniería*, 30(57), e13410-e13410.
 Santos, M., & López, V. (2012). Fuzzy decision system for safety on roads. In *Handbook on decision making* (pp. 171-187). Springer, Berlin, Heidelberg.
 Zaidan, R. A., Alamoodi, A. H., Zaidan, B. B., Zaidan, A. A., Albahri, O. S., Talal, M., ... & Ameen, H. A. (2022). Comprehensive driver behaviour review: Taxonomy, issues and challenges, motivations and research direction towards achieving a smart transportation environment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 111, 104745.

Laura Olaya^a, J.E. Sierra-García^b, Matilde Santos^{c,*}

^a Facultad de Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Plaza de Ciencias s/n, 28040, Madrid, España

^b Dpto. De Ingeniería Electromecánica, Universidad de Burgos, España

^c Instituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, C/ Profesor García Santesmases 9, 28040, Madrid, España

Resumen

La energía eólica ha demostrado ser una solución limpia y eficaz para la generación de energía. Los aerogeneradores se pueden instalar en diferentes entornos dependiendo de su tamaño y capacidad. Los aerogeneradores pequeños suelen tener una potencia nominal inferior a 50-kW y están diseñados para su uso en aplicaciones residenciales, agrícolas, comercios y pequeñas industrias. Por otro lado, los grandes aerogeneradores, con capacidades de megavatios, se instalan generalmente en parques eólicos, destinados a proporcionar electricidad a la red eléctrica.

El tamaño medio de los aerogeneradores terrestres en la actualidad es de unos 3-MW, con palas de unos 50m de longitud. Sin embargo, como en alta mar hay mucho más viento disponible, los generadores offshore tienen capacidades superiores, hasta 15-MW o 20-MW, alcanzando longitudes de pala de más de 90 metros.

La demanda mundial de energía hace que la energía eólica marina se expanda debido a la disponibilidad de un espacio más amplio, velocidades de viento más elevadas y un menor impacto visual y acústico. Este crecimiento acelerado plantea numerosos desafíos, ya que factores como el incremento en el tamaño del rotor y la altura de la torre aumentan la complejidad de los diferentes subsistemas del aerogenerador, su modelado y control (Sierra-García y Santos, 2021; Otter et al., 2022; Hansen et al., 2021).

El objetivo del presente estudio es definir una metodología paso a paso para construir un modelo de turbina eólica de una capacidad específica. La metodología descrita, entre otros beneficios, permitirá definir un modelo de aerogenerador desde cero, identificar y comprender los diferentes subsistemas individualmente, y escalar un modelo de aerogenerador existente en uno de mayor o menor capacidad. Además, se evalúan todos los parámetros relevantes de los aerogeneradores y sus correspondientes modelos numéricos y gráficos, a la vez que identifica los subsistemas pertinentes según la potencia del aerogenerador. Con esto será posible predecir el comportamiento de turbinas de diferentes capacidades, comparar el comportamiento de prototipos contra sus contrapartes reales y aprovechar las mediciones empíricas realizadas en una turbina de una capacidad determinada para validar un modelo.

En este trabajo se sigue la metodología diseñada para escalar un modelo de aerogenerador de 7-kW desarrollado en MATLAB/Simulink a un modelo de turbina flotante de NREL 5-MW (Jonkman et al., 2009). El modelo obtenido se valida mediante el software de simulación FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence, NREL).

Para ello, primero se describe el modelo de una turbina de 7-kW desarrollado en (Mikati et al., 2013). Corresponde a una turbina terrestre de pequeño tamaño. Para desarrollar el modelo, se realiza un análisis por subsistemas. En concreto se consideran los siguientes módulos: A) viento capturado; B) potencia mecánica; C) relación de engranajes; y D) el generador. Cada uno de ellos viene definido por un conjunto de ecuaciones y de parámetros característicos.

Cabe destacar que el generador implementado en un aerogenerador depende de su potencia nominal de salida. Los aerogeneradores de menor tamaño pueden integrar un generador de corriente continua dado que suelen estar situados cerca de la demanda de potencia y que, por su tamaño, integran sistemas más sencillos. Las turbinas eólicas más grandes deberían implementar un generador de CA para facilitar el transporte de energía a largas distancias y de esta manera abaratar el costo de transmisión. La conexión a la red de turbinas grandes define si se debe usar un dispositivo de CC o de CA. En nuestro caso, al escalar la turbina se ha cambiado de un generador de CC a uno de CA, lo que supone un cambio relevante en el modelo (Álvarez y Santos, 2023).

Además, las turbinas de pequeña escala no necesitan generalmente un control sofisticado (Sierra-García y Santos, 2021b), ya que en aplicaciones comerciales y residenciales es más adecuado un sistema más simple, y por ejemplo el control de guiñada tiene relevancia ya que el viento no es tan fuerte y es necesario aprovecharlo al máximo, alineando el rotor a la dirección del viento. Sin embargo, las grandes turbinas, suelen ser de velocidad variable, para capturar la máxima potencia aerodinámica del viento a medida que varía la velocidad del mismo, y para mitigar sus impactos cuando se alcanzan velocidades de viento más altas. Esto hace que sea necesario implementar sistemas de control para sus distintas regiones de operación, control de torque y control de pitch, según la velocidad del viento esté por debajo o por encima de su valor nominal, respectivamente.

De las ecuaciones que definen el comportamiento de la turbina se derivan una serie de relaciones de dependencia entre los parámetros que intervienen en el modelo del aerogenerador. Se ha estudiado esta relación y se ha realizado un análisis de

*Autor para la correspondencia: msantos@ucm.es

sensibilidad que permite evaluar el impacto de cada parámetro sobre el resto de los parámetros del modelo. Por ejemplo, se observa que la velocidad del viento tiene el mayor impacto sobre la potencia y el par mecánico, como era de esperar, y que la velocidad del rotor y el par mecánico son las medidas que más afectan a los otros parámetros. Por ello, la representación gráfica de estas señales puede aportar mucha información sobre el comportamiento del aerogenerador, sin necesidad de tener conocimiento de otras variables.

Para validar el modelo y la metodología, se somete a los modelos a una entrada de viento de tipo escalón que aumenta de 4 a 10 m/s. Esta señal permite observar el impacto de la inercia del aerogenerador de 5MW en respuesta al viento, que tarda más tiempo en estabilizarse que el de 7-kW, como cabría esperar. También se realiza una simulación con dos entradas constantes de 4 y de 10 m/s, para observar su estabilización.

Se puede pues definir una metodología para evaluar los parámetros relevantes del aerogenerador y definir su correspondiente modelo numérico, lo que permite escalar el modelo de una turbina pequeña a otra de gran tamaño.

Como trabajos futuros se destaca la implementación del modelo del aerogenerador escalado para comprobar el funcionamiento de controladores existentes, y la evaluación de la metodología con turbinas flotantes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades con el proyecto MCI/AEI/FEDER PID2021-123543OB-C21.

Referencias

- Álvarez, A. F. O., Santos, M., 2023. Mechanical stability analysis of a DFIG floating offshore wind turbine using an oriented-control model. *IEEE Latin America Transactions*, 21(1), 91–97.
- Hansen, J. T., Mahak, M., Tzanakis, I., 2021. Numerical modelling and optimization of vertical axis wind turbine pairs: A scale up approach. *Renewable Energy*, 171, 1371–1381.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G., 2009. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development (No. NREL/TP-500-38060). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Mikati, M., Santos, M., Armenta, C., 2013. Electric grid dependence on the configuration of a small-scale wind and solar power hybrid system. *Renewable energy*, 57, 587–593.
- Otter, A., Murphy, J., Pakrashi, V., Robertson, A., Desmond, C., 2022. A review of modelling techniques for floating offshore wind turbines. *Wind Energy*, 25(5), 831–857.
- Sierra-García, J. E., Santos, M., 2021a. Redes neuronales y aprendizaje por refuerzo en el control de turbinas eólicas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 18(4), 327–335.
- Sierra-García, J. E., Santos, M., 2021b. Switched learning adaptive neuro-control strategy. *Neurocomputing*, 452, 450–464.