

Jornadas de Automática

Modelado de instalación de aire comprimido para su integración en gemelo digital

Camacho, P.G.^{a,*}, Gómez, J.^a, Escaño, J.M.^a, Bordons, C.^b

^aDpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Sevilla, 41092, Sevilla

^bENGREEN - Laboratory of Engineering for Energy and Environmental Sustainability, Universidad de Sevilla, Spain

To cite this article: Camacho, P.G., Gómez, J., Escaño, J.M., Bordons, C. 2024. Modelling of compressed air facility for digital twin integration. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10970>

Resumen

En este trabajo se describe el diseño de un modelo de una instalación industrial de aire comprimido utilizando Simulink y la librería Simscape. Dicha instalación consiste en el transporte de bandejas de una célula de fabricación flexible ubicada en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. El objetivo del modelo es calcular el consumo del motor-compresor para evaluar algoritmos de optimización del consumo energético en el sistema. El documento presenta el modelo y los resultados de la simulación con datos proporcionados por el gemelo digital de la planta industrial.

Palabras clave: Modelado y simulación de eventos discretos, Optimización de procesos, Automatización orientada a costes.

Modelling of compressed air facility for digital twin integration

Abstract

This work describes the design of a model of an industrial compressed air facility using Simulink and the Simscape library. This installation consists of the transport of trays from a flexible manufacturing cell located in the laboratories of the School of Engineering of the University of Sevilla. The aim of the model is to calculate the consumption of the motor-compressor in order to evaluate algorithms for optimising energy consumption in the system. The paper presents the model and simulation results with data provided by the digital twin of the industrial plant.

Keywords: Discrete event modeling and simulation, Process optimization, Cost-Oriented Automation.

1. Introducción

El aire comprimido es ampliamente utilizado tanto en el ámbito industrial como en el de servicios debido a su producción y manejo seguros y sencillos. En numerosas instalaciones industriales, el aire comprimido resulta esencial para diversos procesos de fabricación (U.S. Department of Energy, 2003, 2023a). Entre otros usos, se encuentran las máquinas de control numérico, los pistones neumáticos, herramientas neumáticas de muchos tipos: pistolas de impacto, taladros, lijadoras, pistolas de clavos, llaves de torsión, etc.

La generación de aire comprimido requiere una cantidad considerable de energía, y en muchas operaciones industriales, los costos energéticos relacionados con el aire comprimi-

do representan una porción significativa de los gastos energéticos totales. Los costos operativos anuales de los compresores de aire, secadores y equipos auxiliares pueden llegar a constituir entre el 70 % y el 90 % del total de la factura eléctrica. Además, el aire comprimido suele ser la forma más costosa de energía en una planta, ya que solo el 19 % de su potencia es realmente utilizable (U.S. Department of Energy, 2003; Initiative, 2023).

En la Unión Europea, el aire comprimido puede llegar a representar hasta el 10 % del consumo de electricidad en el sector industrial (Initiative, 2023). No obstante, existe una carencia notable de información fiable sobre la eficiencia energética de los sistemas de aire comprimido típicos (U.S. Department of Energy, 2023b). Una solución que se puede adoptar ante

este hecho es la utilización de sistemas de gestión de energía respaldados por aprendizaje automático.

El objetivo principal de este trabajo es la creación del modelo digital de una instalación de aire comprimido, de manera que este pueda formar parte de un Gemelo Digital (GD) de una célula de fabricación flexible (Torres et al., 2022). Esta se encuentra ubicada en el laboratorio del departamento de Ingeniería de Automática y Sistemas de la Universidad de Sevilla, y su GD ha sido desarrollado dentro del proyecto europeo *Digital intelligence for collaborative ENergy management in Manufacturing* (DENiM, 2020). Así, una vez obtenido el modelo, se pretende hacer uso del mismo, empleando algoritmos genéticos con el fin de optimizar la energía consumida por la instalación de aire comprimido de la célula. Dicha energía dependerá del proceso que se esté llevando a cabo en la planta en ese momento, y el propósito del empleo de algoritmos genéticos es realizar los procesos que requieran mayor consumo de potencia cuando la energía sea más barata y viceversa.

La organización del artículo es la siguiente: en la sección 2 se muestra tanto el sistema real de la célula de fabricación como su parte digital. En la sección 3 se explica el procedimiento que se ha seguido para la elaboración del modelo de aire comprimido y en la sección 4 algunas gráficas con resultados obtenidos de la simulación del modelo. En la última sección se muestran las conclusiones obtenidas, así como trabajos futuros.

2. Descripción de la planta real y del gemelo digital

Como se ha dicho anteriormente, la instalación de aire comprimido se encuentra en la célula de fabricación flexible ubicada en el laboratorio del departamento de sistemas y automática de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. Como el gemelo digital de la planta todavía se encuentra en desarrollo, no se han integrado en el mismo todos los elementos que actualmente conforman la planta, como se verá a continuación.

2.1. Célula de fabricación e instalación de aire comprimido

La planta en cuestión está compuesta por un circuito formado por cuatro cintas transportadoras dispuestas en forma de cuadrado como se puede ver en la Figura 1. Las cintas se encargan de transportar unas bandejas que pueden contener piezas variadas, y así, en los distintos puntos de la planta existen diversas máquinas que van tratando las distintas piezas.

El aire comprimido que se emplea en la célula se utiliza para activar dos tipos distintos de pistones: los pistones de cambio, que elevan una plataforma, situada en cada esquina del cuadrado, y permiten el cambio de cinta de las bandejas que circulan por ellas; y el pistón de parada, que detienen las bandejas de una cinta justo antes de que estas lleguen a la plataforma de cambio de bandeja. Los datos de ambos pistones se encuentran recogidos en la tabla 2.1.

Tabla 1: Especificaciones técnicas pistón de parada

| Pistón | Parada | Cambio |
|--------------|--------------------|------------------------|
| Tipo | Simple | Simple |
| Diámetro | 3.2 cm | 2 x 5 cm |
| Elevación | 2.0 cm | 2 x 2.5 cm |
| Volumen | 16 cm ³ | 2x 118 cm ³ |
| Presión aire | 4-6 bar | 4-6 bar |

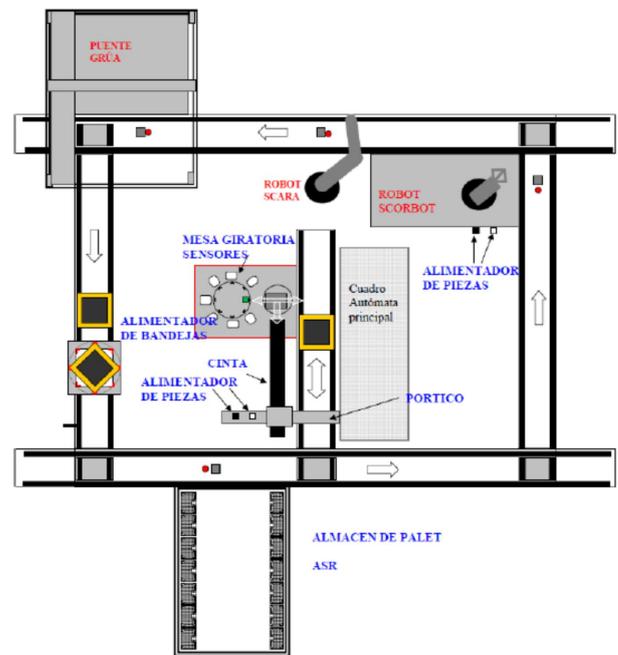


Figura 1: Diagrama de la planta

Por otro lado, el compresor empleado en la célula, de la marca *Worthington Creyssensac*. El modelo es un Rollair 40T, de 40 HP que equivalen a unos 30 kW, y con presión de trabajo de 10 bar. En cuanto al tanque, su volumen es de 1000 L y la presión máxima admisible que soporta es de 10 bar. Por último, en relación al tamaño de las tuberías, la tubería principal que lleva el aire comprimido del tanque a la planta tiene un diámetro interior de 1.1 cm, mientras que el resto de tuberías que conectan a los distintos pistones son entre 0.4 y 0.65 cm de diámetro.

2.2. Gemelo digital de la planta

Descritas ya las principales características del sistema real, se presenta ahora el modelo de gemelo digital que se ha realizado en varios trabajos por parte de miembros integrantes del equipo de trabajo de DENiM (Gómez Jiménez, 2021a), (Gómez Jiménez, 2021b) y (Olivar et al., 2022). En estos trabajos no se incluyó el tratamiento de aire comprimido, y por tanto, el modelo realizado se pretende integrar con este gemelo digital para hacerlo más fiel a la realidad.

El modelo consta de varias partes claramente diferenciadas con una doble característica en la metodología empleada

para su desarrollo: su alta precisión y su capacidad de adaptación. La precisión se logra al desarrollar modelos que se ajustan fielmente a la realidad, y al dotar al gemelo digital con la habilidad de aprender por sí mismo. Además, su capacidad de adaptación, es decir, su escalabilidad, permite que el gemelo digital pueda ajustarse a las modificaciones en el entorno real de la célula sin requerir cambios significativos en su programación.

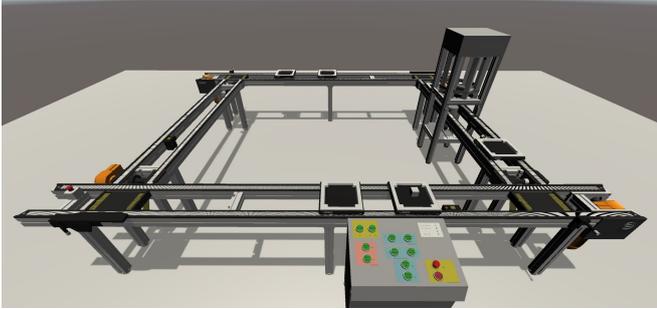


Figura 2: Modelo visual del GD

Una imagen del modelo visual del gemelo se muestra en la Figura 2. La arquitectura interna del gemelo (Gómez Jiménez, 2021b) se ha realizado modularmente, de forma que permite la integración de nuevos módulos a la par que estos se van creando, dotando, como ya se ha dicho, de gran escalabilidad al sistema. El desarrollo del gemelo digital, exceptuando el modelo de aire comprimido, se ha hecho mediante el software Unity3D, un software pensado para el diseño de videojuegos que combina programación en lenguaje C# con una interfaz gráfica. Se eligió dicho software tras haber hecho una evaluación de algunas herramientas industriales para el desarrollo de gemelos digitales (Camacho et al., 2023).

La inclusión de un modelo de la instalación del aire comprimido, permite la obtención de métricas para poder analizar datos tales como las pérdidas de presión, activaciones del compresor, etc. cuyos resultados se muestran en la sección 4.

3. Modelo digital de la instalación de aire comprimido

El modelo digital de la instalación de aire comprimido se ha realizado en el entorno de desarrollo *Simulink*, una herramienta de simulación de sistemas dinámicos dentro de *Matlab*. Para ello, se ha hecho uso de la librería *Simscape*, la cual proporciona componentes predefinidos que representan sistemas físicos, desde circuitos mecánicos o eléctricos, hasta térmicos o neumáticos, simplificando así la creación de modelos propios de sistemas complejos (MathWorks, 2022).

El modelo consta de cuatro subsistemas claramente diferenciados, que conforman las distintas etapas por las que va pasando el aire hasta llegar a los distintos pistones: el compresor, el tanque, las tuberías y la célula de fabricación, que contiene los modelos de todos los pistones así como las pequeñas tuberías que van desde la toma de aire principal de la planta hasta cada uno de los pistones. A continuación, se explican cada uno de ellos

En primer lugar, el modelo del compresor está formado por un bloque de activación, donde se encuentra el controlador del compresor. Si la presión cae por debajo de un mínimo,

se activa hasta que la presión llegue a los 10 bar, momento en el que se desactiva. Además, también se ha incluido un bloque PID para mantener fija la velocidad del compresor. Así, tanto la señal de activación como la velocidad del compresor se pasan al modelo físico del mismo, como se puede ver en la Figura 9.

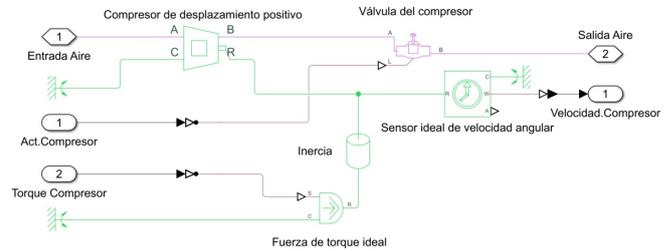


Figura 3: Esquema del compresor

En cuanto al esquema del compresor del aire, se han tomado algunas suposiciones, debido a la falta de datos sobre el mismo, teniendo en cuenta que es una instalación externa a la planta. En primer lugar, se ha optado por un modelo de compresor de Simscape de desplazamiento positivo, con una válvula a la salida de gas del mismo (línea rosa de la Figura 3.4), que es la que determina el bloqueo o la puesta en marcha del compresor. Además, debido a una serie de problemas en las simulaciones, se optó por añadir un bloque de inercia a la salida mecánica del compresor (línea verde de la Figura 3.4). El compresor toma aire del exterior a través de una tubería de cuya área de sección es de 10 cm². Dicho aire se ha supuesto en condiciones normales de presión y temperatura, es decir, a 1 atm y 25 °C. Una vez comprimido, el aire sale del compresor a través de la válvula por una tubería de menor diámetro que a la entrada (2 cm.).

El siguiente modelo sería el del tanque, inicialmente modelado con una presión de 5 bar para permitir la activación de pistones en la célula desde el primer instante de la simulación. Se ha modelado con los mismos datos que del sistema real, ya indicados en la sección 2.

Para la conexión del tanque de aire con la planta se ha realizado el módulo de tuberías, que se muestra en la Figura 4, y que consta de dos subsistemas principales: el conducto de transporte desde el tanque hasta la planta, y las pérdidas, que se han modelado como una tubería muy pequeña, de 10 cm longitud y 0.2 cm de diámetro, al final del conducto de transporte, de forma que se asemeje a un simple orificio por donde se libera aire al ambiente. La longitud de la tubería principal es de 5 metros, lo cual es una suposición que se ha tomado, ya que no se ha podido medir la longitud exacta de dicha tubería desde el tanque hasta la planta. Además, se pueden apreciar otros subsistemas en la figura 4, que no son más que caudalímetros y manómetros para tener constancia de esas medidas en todo momento.

Por último se encuentran los pistones de la célula de fabricación. El sistema consta de 4 módulos como el que se ve en la Figura 5. En cada uno de esos módulos se encuentran el modelo de pistón de parada, como el que se ve en la Figura 5 y el pistón de doble cilindro del cambio de cinta, de esquema similar al anterior. Además de la entrada de aire, el subsistema

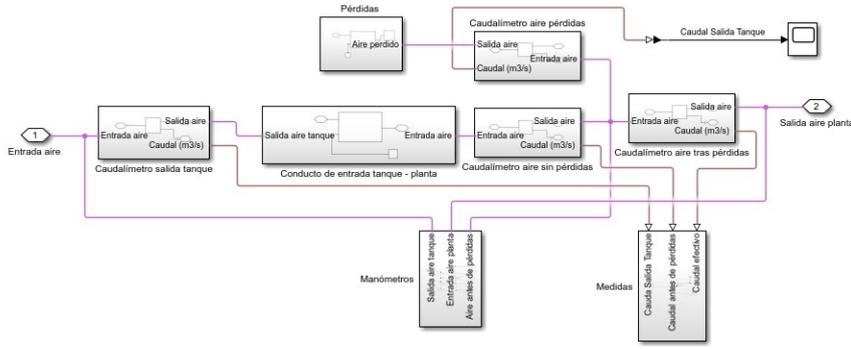


Figura 4: Módulo de tuberías

de cada pistón tiene también su señal de activación, que activa o desactiva el pistón.

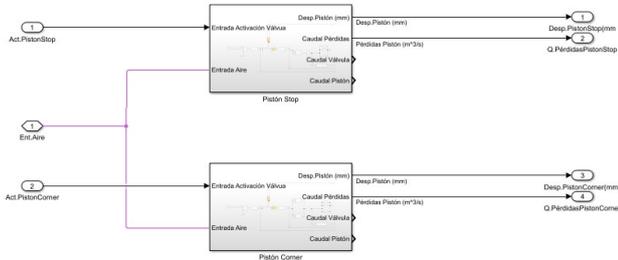


Figura 5: Módulos de pistones

Para el modelado de la parte mecánica del pistón (línea verde de la Figura 6, se ha considerado una masa de 100 g para la pestaña que eleva el pistón, un límite de desplazamiento del pistón igual a su elevación correspondiente, y dos bloques adicionales: uno de gravedad para mantener el pistón elevado cuando entra aire, y otro de caída suave para evitar que el descenso sea brusco y cause errores durante la simulación.

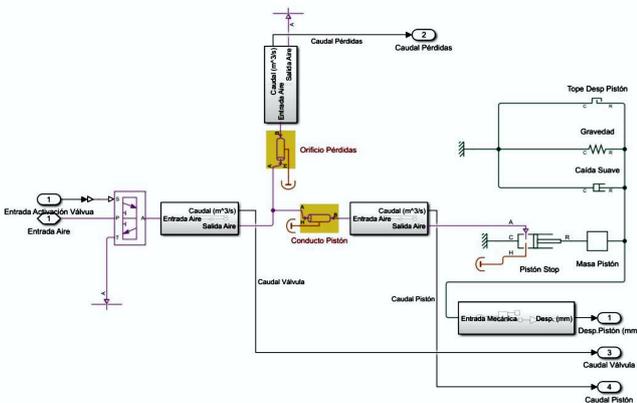


Figura 6: Esquema del pistón de parada

Por otro lado, se disponen de dos pequeños conductos adi-

cionales: uno que simula la entrada de aire del pistón y otro que representa un pequeño orificio con pérdidas. El primero tiene un diámetro de 0.413 cm y una longitud de 2 m, mientras que el segundo tiene un diámetro que es una cuarta parte del primero, es decir, 0.1032 cm, y una longitud de 10 cm. Todos estos componentes son accesibles a través de una válvula direccional de tres vías. Dependiendo de la activación de la válvula, el fluido puede pasar desde la entrada de aire hacia los conductos o desde estos hacia el ambiente, vaciando así el aire del pistón y permitiendo que descienda a su posición de reposo. Los demás elementos del esquema se utilizan para realizar diversas mediciones en el circuito.

El diseño del pistón de cambio de cinta es idéntico al anterior, excepto por el doble cilindro de elevación. Los parámetros también varían, siendo el más destacado la masa del pistón, de 3 kg, ya que incluye no solo la plataforma de elevación, sino también el peso de la bandeja. Por esta razón, el pistón es considerablemente más grande, con un diámetro de 5 cm, requiriendo un volumen de aire de 98.175 cm³, dado que la elevación de la plataforma es de 2.5 cm. En cuanto a los tamaños de los conductos de aire, el de entrada al pistón se ha considerado igual al del pistón de parada, es decir, 2 m de longitud, pero ligeramente más grande, con un diámetro de 0.648 cm. Para el conducto que simula las pérdidas, se han considerado las siguientes dimensiones: 0.162 cm de diámetro y 10 cm de longitud.

4. Resultados

Para la obtención de resultados, se han tomado datos obtenidos de una simulación del GD de la planta con varias bandejas en las cintas. Dichos datos consisten en un registro de activación de pistones, que se muestra en la Figura 7, el cual ha sido previamente procesado antes de enviarlo al modelo en *Simulink*. Los datos que se muestran en las siguientes gráficas son los resultados de la simulación del modelo de aire comprimido en *Matlab*.

En la gráfica siguiente (ver Figura 8) se observa la variación de la presión del aire desde el tanque hasta la célula de fabricación flexible. Inicialmente, se aprecia una diferencia de 1 bar debido a las pérdidas a lo largo de la tubería. De esta manera, la presión en la entrada de la planta es similar a la presión en la salida del tanque, aunque esta última no parece estar tan afectada por la activación y desactivación de los pistones, ya que el tanque actúa como un filtro de paso bajo.

El compresor tiene un tiempo total de activación de 28.6 segundos, como se muestra en la Figura 9, con dos periodos de activación, uno al inicio y otro a mitad del proceso. Se observa una fuga de caudal durante la segunda activación del compresor debido a un pequeño fallo en el régimen transitorio al arrancar.

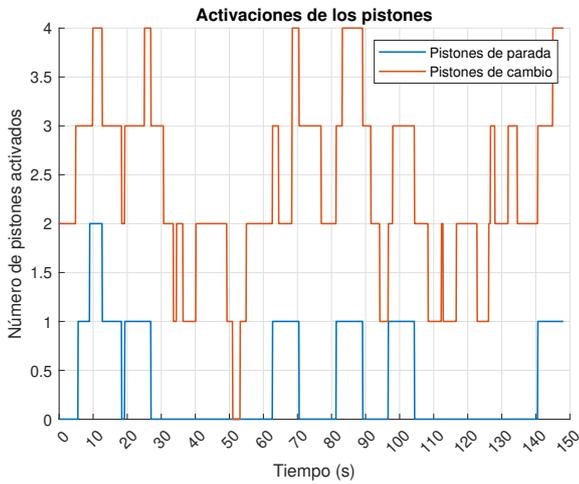


Figura 7: Activación de los pistones de la planta

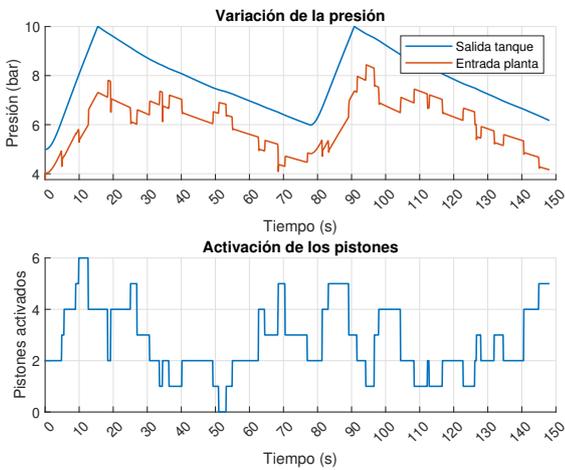


Figura 8: Presión a la salida del tanque y a la entrada de la planta Vs. Activación de los pistones

En relación con el flujo de aire comprimido que atraviesa el conducto de entrada a la planta, la Figura 10 muestra los tres flujos de aire en la bifurcación a la salida de la tubería: el flujo que se pierde y el flujo efectivo que ingresa a la planta, ambos con valores muy similares y cuya suma corresponde al flujo que sale del tanque al inicio de la instalación, el caudal antes de pérdidas. Los picos que se ven en la gráfica son debidos al llenarse los cilindros de los diversos pistones tras la apertura de la válvula de entrada al recibir la señal de activación.

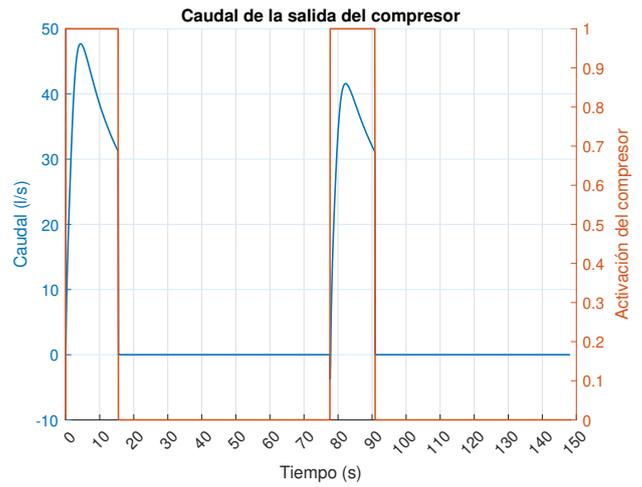


Figura 9: Caudal del compresor

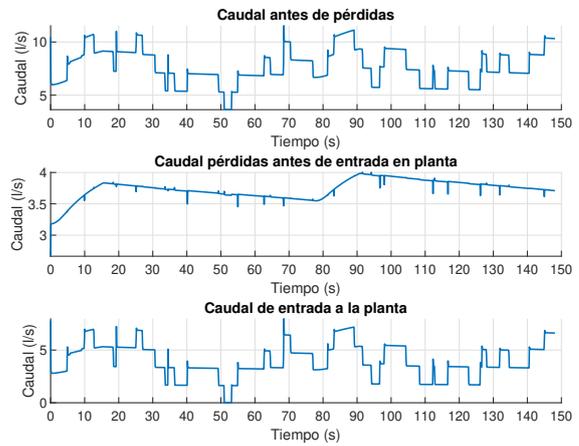


Figura 10: Caudales de aire por la instalación

Finalmente, se realiza un breve análisis económico. En este análisis, únicamente se ha considerado el coste energético (y por ende económico) del compresor de la instalación, ignorando el posible coste relacionado con la activación y desactivación de las válvulas de los pistones, así como otros costes asociados al mantenimiento de la instalación. Considerando n_k como la variable que indica la conexión o desconexión del compresor en el instante k , el costo económico asociado al compresor Q_c durante un periodo de tiempo N se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$Q_c = \sum_{k=1}^N n_k * P_{C_k} * t_k * C_{F_k} \quad (1)$$

Dado que P_{C_k} representa la potencia utilizada por el motor del compresor en el instante k , t_k es el tiempo total real de funcionamiento del compresor en el instante k , y C_{F_k} es el costo instantáneo de la energía de la red eléctrica en el instante k .

En este contexto, dos variables cruciales para el proceso de optimización, mencionado al inicio de la sección, juegan

un papel importante al seleccionar la secuencia de fabricación más económica en un tiempo específico. Estas variables son el costo instantáneo de la energía, C_F , y la potencia consumida, P_C , ya que, dependiendo de ellas, se puede optar por fabricar un tipo de pieza que emplee un proceso que requiera mayor potencia cuando la energía sea más barata y viceversa, con el fin de minimizar el costo total de la planta de fabricación, como ya se mencionó en la introducción.

El término Q_c debe formar parte del funcional a minimizar, pues la secuencia de fabricación implica un coste de compresor asociado. De manera completa, se tiene que el coste total en un horizonte de N , será

$$Q = \sum_{k=1}^N (D(k) - E_B(k) - E_{R1}(k) - \dots - E_{Rn}(k))C_{F_k} + Q_c$$

Donde $D(k)$ es la demanda eléctrica de las máquinas, P_B la energía entregada por un banco de baterías al proceso y $E_{R1}(k), \dots, E_{Rn}(k)$ son diversas fuentes de energía renovables inyectadas en el sistema. Los modelos de predicción de tiempo atmosféricos (irradiancia, viento, etc.) y el precio de mercado eléctrico, predicho por el operador de mercado, permiten evaluar el funcional, junto con el GD, para obtener la secuencia de fabricación dentro de los distintos procesos disponibles en la célula y la carga/descarga del banco de baterías, para que el coste de la energía sea mínimo.

Cabe añadir que los datos recogidos en la simulación realizada no son comparables a una planta industrial comercial en cuanto a coste energético y económico se refiere, pero si pueden ser escalables a la hora de realizar los procesos de optimización. Así, con un gran volumen de distintos tipos de pieza en una fábrica industrial si se darían costes energéticos significativos a la hora de fabricar un tipo de pieza u otro.

5. Conclusiones

En este estudio se ha desarrollado un modelo digital de la instalación de aire comprimido. Se han detallado todas las entidades físicas, proporcionando los datos necesarios para realizar el modelo con mayor precisión, el cual ha demostrado ser resultados razonables. Además, se han generado datos de simulación como presiones, caudales, etc., siendo crucial el tiempo de activación del compresor, ya que determina el uso energético de la instalación de aire comprimido y, por ende, su coste económico.

Como siguientes pasos de cara a seguir mejorando este incipiente trabajo, se pretenden tomar datos reales de presiones y caudales, que hasta ahora no se han podido tomar por falta de instrumental de medida, y así obtener métricas de error para verificar el modelo con más claridad. También se pretende implementar las secuencias de acciones dentro del gemelo digital de la planta para generar diferentes secuencias de acción y así obtener simulaciones con otros consumos energéticos del compresor, así como crear una función que optimice las distintas posibles simulaciones del modelo de aire. Así mismo, se busca la integración completa con el gemelo digital en *Unity3D*, de manera que permita que ambas simulaciones

corran en paralelo. Actualmente, debido al alto grado de precisión de la instalación de aire comprimido, los tiempos de simulación son elevados. Si se encapsula el código y se simplifica las simulaciones del GD, quitando las características de visualización, que consumen mucha computación, se podrán usar funciones de evaluación de las funciones de optimización.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Europea la financiación de este trabajo en el marco del proyecto DENiM. Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención nº 958339. También agradecen al proyecto PID2019-104149RB-I00 financiado por MCI-N/AEI/10.13039/501100011033 y a la Junta de Andalucía (Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades) por la ayuda de investigación "Laboratorio de Ingeniería para la Sostenibilidad Energética y Medioambiental, ENGREEN", referencia QUAL21 006 USE

Referencias

- Camacho, P. G., Jiménez, J. G., Jiménez, J. G., Parra, J. K., Escaño, J. M., Sep 2023. Development of a digital twin: evaluation of industrial software and methodology. In: XLIV Jornadas de Automática. pp. 150–155.
URL: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.150>
DOI: 10.17979/spudc.9788497498609.150
- DENiM, 2020. Digital intelligence for collaborative energy management in manufacturing.
URL: <https://denim-fof.eu>
- Gómez Jiménez, J., 2021a. Diseño de gemelo digital del sistema de transporte de célula de fabricación flexible.
- Gómez Jiménez, J., 2021b. Metodología para el desarrollo de gemelos digitales. aplicación a célula de fabricación flexible.
- Initiative, B. B., 2023. Compressed air.
URL: <https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/compressed-air>
- MathWorks, 2022. Simscape.
URL: <https://es.mathworks.com/products/simscape.html>
- Olivar, M. Á. R., Jiménez, J. G., Castaño, F., Escaño, J. M., Sep. 2022. Desarrollo de gemelo digital de un alimentador de bandejas e integración en entorno de realidad virtual. In: XLIII Jornadas de Automática: libro de actas: 7, 8 y 9 de septiembre de 2022, Logroño (La Rioja). Servicio de Publicaciones da UDC, pp. 591–598.
URL: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498418.0591>
DOI: 10.17979/spudc.9788497498418.0591
- Torres, A., Gómez, J., Escaño, J. M., Sep 2022. Interconexión de gemelo digital de célula de fabricación flexible con plc, para el aprendizaje automático de parámetros. In: XLIII Jornadas de Automática. pp. 241–247.
URL: <http://hdl.handle.net/2183/31386>
DOI: 10.17979/spudc.9788497498418.0241
- U.S. Department of Energy, 2003. Improving Compressed Air System Performance: A Sourcebook for Industry. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
URL: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/compressed_air_sourcebook.pdf
- U.S. Department of Energy, 2023a. Compressed air systems.
URL: <https://www.energy.gov/eere/amo/compressed-air-systems>
- U.S. Department of Energy, 2023b. Technology strategy assessment - compressed air energy storage. Tech. rep., Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/Technology%20Strategy%20Assessment%20-%20Compressed%20Air%20Energy%20Storage_0.pdf