

05-012

### **DEVELOPMENT OF AN ENERGY MODEL OF A LARGE-SIZED REFRIGERATED INDUSTRIAL WAREHOUSE FOR ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENTS USING TRNSYS®**

Rubio Rubio, José Javier (1); Vera García, Francisco (1); Hontoria Hernández, Eloy (1); López Belchí, Alejandro (2)

(1) Universidad Politécnica de Cartagena, (2) Centro Universitario de la Defensa en la Academia General del Aire

In this article, computer models are used for searching solutions that increase the energy efficiency of a large-sized refrigerated industrial warehouse used for storing fruits and vegetables. In order to fulfil the aforementioned, a geometric model of the warehouse has been carried out using a 3D design software (SketchUp®) and, subsequently, importing it into an energy simulation software (TRNSYS®) where the energy model is developed, which will serve as an analysis tool for energy improvements, has been developed. A methodology for estimating the values of two facts that have a significant influence on the energy demand of the warehouse, air infiltrations and stored goods, has been carried out to achieve an accurate energy model. This methodology is summarized in this article. The drafted procedure allows to obtain a sufficiently precise model which achieve an annual difference between the actual and simulated energy demand less than 10 %. In this way, this model allows energy efficiency studies to be carried out by the company with low operating costs, thus allowing to contribute to cost savings and the sustainability of the planet.

Keywords: Energy model; TRNSYS®; energy efficiency; air infiltrations; goods

### **DESARROLLO DE UN MODELO ENERGÉTICO MEDIANTE TRNSYS® DE UNA NAVE INDUSTRIAL FRIGORÍFICA PARA MEJORAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Este artículo aborda la búsqueda de soluciones mediante modelos informáticos que aumenten la eficiencia energética de una nave industrial frigorífica de grandes dimensiones destinada al almacenamiento de productos hortofrutícolas. Para poder conseguir lo anterior, se ha llevado a cabo el modelado geométrico de la nave haciendo uso de un software de diseño 3D (SketchUp®) y, posteriormente, importando este modelo geométrico a un software de simulación energética (TRNSYS®) con el cual se ha desarrollado el modelo energético de la nave que servirá como herramienta de análisis de mejoras energéticas. La realización del modelo energético ha llevado consigo el desarrollo de una metodología de estimación de los valores de dos factores que influyen considerablemente en la demanda energética de la nave: las infiltraciones de aire exterior y la mercancía almacenada. Esta metodología se muestra resumida en este artículo. El procedimiento redactado permite obtener un modelo ajustado de la nave, con una diferencia anual entre los datos reales y los resultados de la simulación inferior al 10 %. De esta manera, este modelo permite realizar estudios de eficiencia energética para la empresa con bajos costes operativos, permitiendo así contribuir al ahorro de costes y la reducción de la huella de carbono.

Palabras clave: Modelo energético; TRNSYS®; eficiencia energética; infiltraciones de aire exterior; mercancía

Correspondencia: José Javier Rubio Rubio. Correo: josejavier.rubio@edu.upct.es



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

Las pérdidas energéticas por infiltraciones de aire exterior pueden llegar a suponer un 40 % de la energía demandada por los edificios industriales para mantener las condiciones de confort en edificios residenciales o las condiciones de temperatura y humedad en los edificios industriales, (Brinks, Kornadt, & Oly, 2015). Debido a las dimensiones de la nave industrial destinada al almacenamiento de productos perecederos, así como el volumen productivo de la empresa logística y la localización de la misma, (Zarco-Soto, Zarco-Periñán, & Sánchez-Durán, 2020), implican unos consumos energéticos elevados de la instalación frigorífica encargada de cubrir la demanda energética de la nave. Las infiltraciones de aire exterior durante la carga y descarga de mercancía se encuentran entre los factores más influyentes sobre la demanda energética, (Ji, Duanmu, Liu, & Dong, 2020). La cantidad de mercancía es un factor que se puede estimar más fácilmente debido a que la empresa registra de manera aproximada la cantidad de palés que se almacenan en la nave. Sin embargo, las infiltraciones de aire exterior pueden ser consideradas de interés puesto que variarán de un estado de carga a otro, al contrario que la mercancía que se mantendrá prácticamente constante.

Las infiltraciones de aire exterior o “stack effect” se dan por la diferencia de densidades entre el aire del interior y del exterior. Además, la densidad es una propiedad física que depende de la temperatura interior y exterior que influyen en el gasto másico de infiltraciones de aire exterior al igual que la propia geometría de la nave analizada, (Ji et al. 2020).

Este trabajo presenta un modelo capaz de modelar una nave industrial de almacenamiento de productos perecederos en tiempo real, de forma que puede adaptarse a las condiciones del entorno, a las necesidades de la planta sin necesidad de parar el proceso para comprobar los cambios y conocer cómo influyen los factores más importantes en la demanda energética de una nave de este tipo. Además, se facilita la selección del software de simulación energética para realizar trabajos similares al mostrar las diferencias entre dos programas informáticos de extendido uso entre los profesionales del sector.

## 2. Objetivos

En este trabajo, los autores pretenden comparar los resultados obtenidos con dos programas informáticos de simulación energética de edificios, CLIMA® y TRNSYS®, de la demanda energética de una nave industrial frigorífica de grandes dimensiones. De esta manera, se persigue obtener la diferencia existente entre ambos programas informáticos para el mismo caso de estudio y cuál de los dos es más preciso respecto a los datos reales de demanda energética.

Por otro lado, se persigue demostrar la influencia sobre la demanda energética de la nave modelada de las infiltraciones de aire exterior. Para ello, se introducen en TRNSYS® tres casos con distintos flujos volumétricos de infiltraciones de aire exterior estimados para obtener la diferencia en la demanda energética entre los tres estados y poder extraer conclusiones al respecto.

## 3. Metodología

Previamente a explicar la metodología, es interesante que el lector conozca de forma breve el marco teórico para realizar los cálculos. Aunque en el presente trabajo se utiliza también CLIMA®, cabe destacar que los cálculos realizados se basan en el método proporcionado por la herramienta TRNSYS® en su plataforma TRNBuild®. Esta plataforma utiliza el modelado

por nodos térmicos teniendo en cuenta las contribuciones de todos los términos en la transferencia de calor:

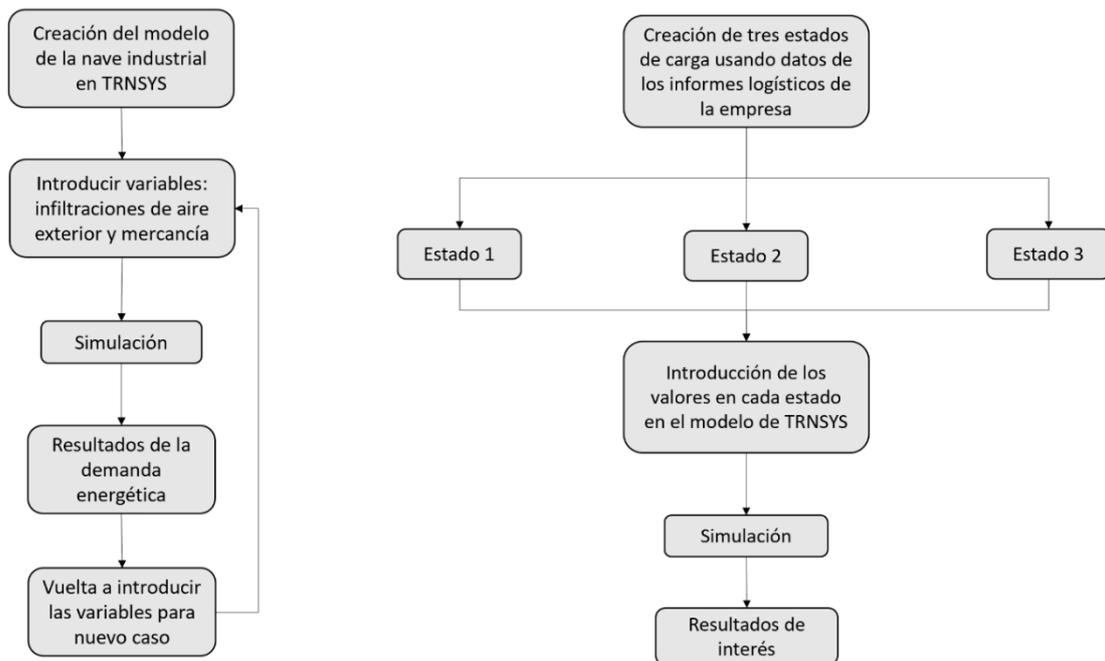
$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_C + \dot{Q}_I + \dot{Q}_R + \dot{Q}_V + \dot{Q}_G + \dot{Q}_S + \dot{Q}_{ab} + \dot{Q}_{con} \quad (1)$$

Donde,  $\dot{Q}_T$  es el calor total del nodo,  $\dot{Q}_C$  el calor debido a la conducción por las paredes del nodo al exterior y a las zonas colindantes,  $\dot{Q}_I$  calor debido a infiltraciones tanto del exterior como de nodos anexos,  $\dot{Q}_R$  calor por radiación directa al nodo,  $\dot{Q}_V$  calor debido a ventilación con el exterior o con nodos anexos,  $\dot{Q}_G$  calor debido a ganancias internas en el nodo,  $\dot{Q}_S$  calor debido a la aportación solar directa en ventanas, huecos, etc,  $\dot{Q}_{ab}$  calor debido a la absorción de la radiación absorbida por todos los dispositivos de sombreado,  $\dot{Q}_{con}$  calor debido a otras condiciones de contorno no consideradas anteriormente. Una explicación detallada de estos términos, el proceso para su cálculo y la base teórica de cada uno de ellos se encuentra ampliamente explicada en el manual de TRNSYS®, (Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2012), no nos extendemos más en esta comunicación por ahorro de espacio.

Como anotación para los cálculos que posteriormente se desarrollarán, el uso de  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  como unidades en lugar de  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  se hace, principalmente, para distinguir los tiempos del gasto volumétrico de infiltraciones de aire exterior de los tiempos de almacenamiento, carga y descarga, etc., y darle, desde el punto de vista de los autores, más sentido a los parámetros o constantes utilizados.

En este trabajo se ha llevado a cabo la modelización de la nave mediante dos programas de simulación energética de edificios: CLIMA® y TRNSYS®, (Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2008). En la Figura 1.a se puede observar el esquema de la metodología seguida para ambos programas informáticos. Con CLIMA® se puede realizar el cálculo de cargas térmicas y la estimación de la demanda de energía térmica de la nave, pudiendo obtener la carga térmica máxima del edificio introducido, así como la demanda energética anual, tanto en calefacción como en refrigeración, para unas condiciones de funcionamiento especificadas. Por otro lado, TRNSYS® se caracteriza por permitir la simulación de sistemas transitorios, siendo su uso principal el diseño de sistemas y simulación energética de edificios. Esto permite introducir los parámetros influyentes, flujo volumétrico de infiltraciones de aire exterior en este caso, de una forma más precisa haciendo uso de las funciones de control.

**Figura 1. (a) Diagrama de proceso de simulación de la demanda energética en CLIMA® y TRNSYS®. (b) Diagrama de proceso de análisis para distintos estados de carga en TRNSYS®.**



El (a) procedimiento seguido está formado por (b) dos análisis diferenciados:

- En el primero de ellos se lleva a cabo una comparación entre los resultados para la demanda energética de la nave para unas condiciones específicas e impuestas de infiltraciones de aire exterior y mercancía en CLIMA® y TRNSYS®. En CLIMA®, por no contar con una herramienta concreta para infiltraciones, se introducen como ventilación mientras que la mercancía se estima en  $W \cdot m^2$ , como carga sensible y latente. En TRNSYS®, estos valores se introducen como una función temporal que será constante para que se asemeje lo máximo posible a los valores introducidos en CLIMA®.

En cuanto a la mercancía, la carga térmica que aporta la máxima cantidad posible de mercancía almacenada se obtiene de informes logísticos de la empresa, siendo su valor de 474 kW aproximadamente. Las infiltraciones de aire exterior estimadas son de  $2.309,33 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  y se obtienen a partir de los datos de carga y descarga como se explica al final de este apartado.

- En el segundo análisis se deja de lado CLIMA® por sus limitaciones para variar en el tiempo las condiciones y se centrará el estudio en TRNSYS®, donde se estimarán diferentes valores del flujo volumétrico de infiltraciones de aire exterior para los meses de enero, febrero y marzo de 2020 estimados a partir de los informes logísticos de la empresa, Figura 1.b.

Las infiltraciones de aire exterior se estiman a partir del número aproximado de cargas y descargas obtenido de los informes logísticos de la empresa que se producen a lo largo de los tres meses analizados. Estos datos se relacionan con la superficie libre,  $0,36 \text{ m}^2$  por muelle, que existe entre el camión una vez está acoplado al muelle, ya que este no es hermético del todo, durante el proceso de carga y descarga de mercancía. Con este valor de

la superficie libre por muelle y la velocidad del aire media de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , obtenida del sistema de adquisición de datos en tiempo real instalado en la nave, se obtiene el flujo volumétrico de aire exterior que entra a la nave por hora. Sin embargo, este flujo volumétrico hay que relacionarlo con los datos de carga y descarga para obtener así una estimación más real del volumen de aire que se infiltra a la nave. Además, hay que tener en cuenta que el proceso de carga y descarga puede durar entre 10 y 20 minutos según la propia empresa por lo que los tres estados de carga analizados son para 10, 15 y 20 minutos respectivamente.

A continuación, se explica con un ejemplo cómo se obtiene el flujo volumétrico medio de infiltraciones de aire exterior para cada mes. Si seleccionamos un día del mes de enero con 28 cargas y descargas y en cada una se emplean 10 minutos, se obtiene de media que un muelle se encuentra abierto 4,67 horas cada día. Una vez conocido el tiempo. Únicamente tendríamos que multiplicarlo por el volumen de aire que entraría por hora a la nave. Considerando la velocidad del aire media de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y que el área libre de paso es de  $0,36 \text{ m}^2$ . Esto resulta en un valor de  $1.440 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  que multiplicado por las 4,67 horas por día que se mantiene abierto un muelle y dividido entre las 24 horas que tiene un día, daría el flujo volumétrico de aire que entraría la nave que, para este caso, sería de  $280,20 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ . Repetimos este proceso para todos los días del mes y obtenemos la media que utilizamos como flujo volumétrico de infiltraciones de aire exterior para el análisis.

Hay que tener en cuenta que en TRNSYS® este valor se introduce como renovaciones por hora por lo que simplemente deberíamos dividir el valor en  $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  que obtengamos entre el volumen total de la nave que es de  $98.000 \text{ m}^3$  aproximadamente.

Los tres casos de estudio se diferencian únicamente en el tiempo de duración del proceso de carga y descarga que es de 10 minutos para el estado 1, 15 minutos para el estado 2 y 20 minutos para el estado 3. En la Tabla 1 se muestra la cantidad el flujo volumétrico de infiltraciones de aire exterior empleado para los tres casos de estudio.

**Tabla 1. Porcentaje del caudal de aire que se infiltra para cada estado (1, 2 y 3) respecto al volumen total de la nave.**

	$Q_1 (\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	$Q_2 (\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	$Q_3 (\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$
<b>Enero</b>	2.309,33	3.464,00	4.618,67
<b>Febrero</b>	2.313,10	3.469,66	4.626,21
<b>Marzo</b>	2.196,13	3.294,19	4.392,26
<b>Media</b>	2.272,86	3.409,28	4.545,71
<b>Renov·h<sup>-1</sup></b>	<b>0,023 (2,3 %)</b>	<b>0,035 (3,5 %)</b>	<b>0,047 (4,7%)</b>

#### 4. Caso de estudio

La nave se sitúa en sureste de la Península Ibérica, concretamente en la provincia de Almería, donde la carga debida a la refrigeración supone un porcentaje importante del consumo energético. Se ha modelado un centro logístico de frutas y verduras que está formado por dos zonas diáfanas diferenciadas por el tipo de producto almacenado. En la de mayor superficie, se almacena producto de temperatura media,  $8^\circ\text{C}$ , y en la menor superficie a una temperatura de  $4^\circ\text{C}$ . La envolvente térmica está dividida en varias alturas según la composición. En la primera altura hay un muro de contención sobre el que descansan los muelles de carga y descarga. A partir de la altura de los muelles, la nave cuenta con una capa de hormigón prefabricado. Una vez terminada esta capa de aproximadamente 5,50 metros se finaliza hasta

la cubierta de la nave con panel sándwich. La cubierta es a dos aguas, cuenta con cuatro capas de aislamiento y tiene situados sobre ella varios lucernarios y exutorios.

La instalación frigorífica está compuesta por un sistema de refrigeración indirecto, En primer lugar, se tienen los equipos principales, cuatro enfriadoras que trabajan en paralelo según demanda contra un circuito continuo de agua glicolada impulsada por un sistema de bombeo para ser repartido a los evaporadores dispuestos en el interior de la nave. Cada evaporador tiene un sistema de control independiente que deja pasar más o menos agua glicolada en función de la temperatura del aire entrante a este.

Por último, en cuanto al movimiento de apertura y cierre de los muelles de carga y descarga a lo largo de un mes tipo, los flujos volumétricos de infiltraciones de aire exterior van desde 2.000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> a 4.500 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. Este parámetro depende de la velocidad del viento, (Rincón-Casado et al. 2017), que se mantiene constante en este estudio por simplificar. Otra hipótesis tomada y que debilita el estudio es el hecho de que se tome un flujo volumétrico de infiltraciones de aire exterior prácticamente constante durante el tiempo de análisis.

Con los resultados obtenidos podremos, en primer lugar, comprobar como varían los resultados de las simulaciones en CLIMA® y TRNSYS®. Por otro lado, también observaremos como varía porcentualmente respecto al caso en el que no existe ninguna infiltración exterior la demanda energética de la nave en TRNSYS® en función del flujo volumétrico de aire exterior que se infiltre en la nave y como esta variación sigue una relación casi lineal.

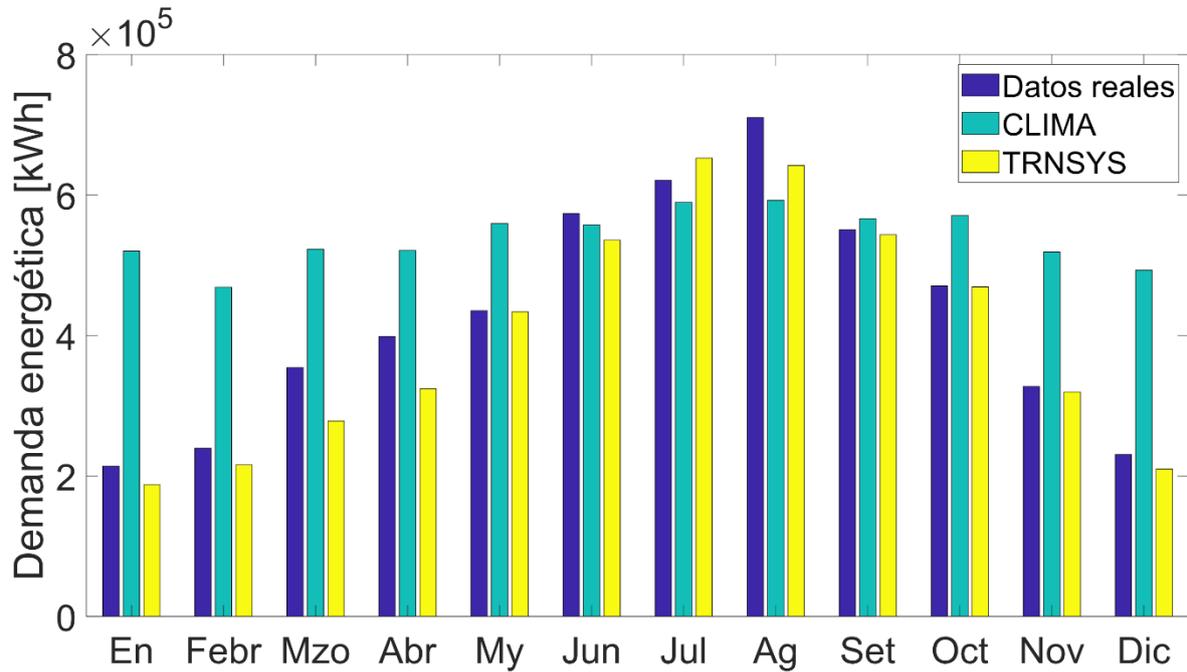
## 5. Resultados

### 5.1. Comparativa de resultados entre CLIMA® y TRNSYS®

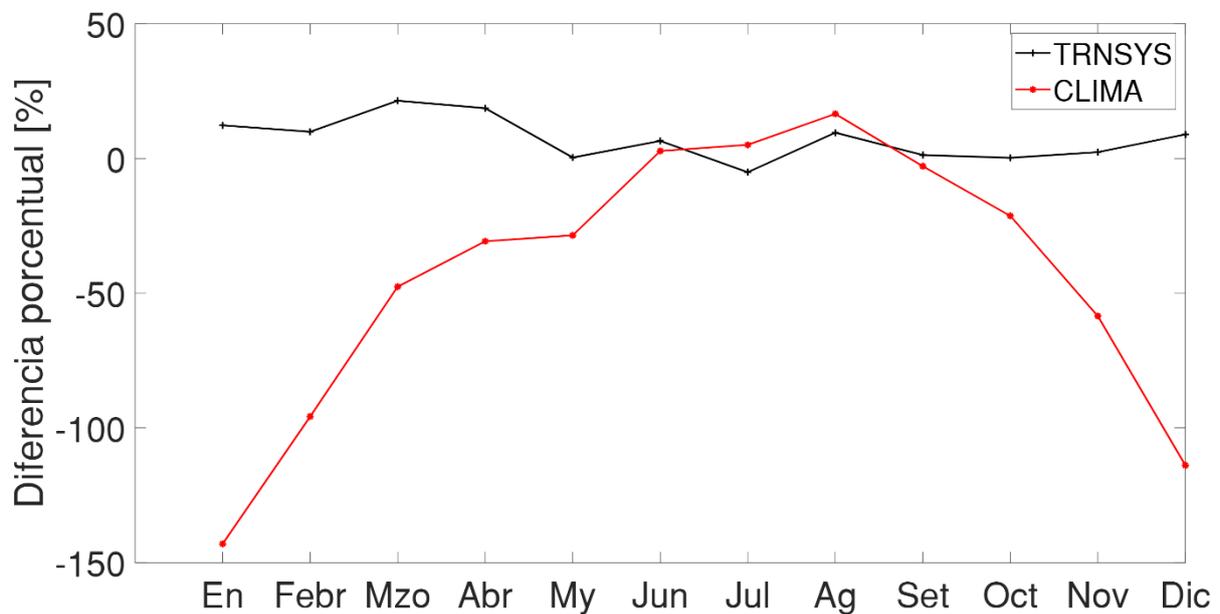
Como se ha indicado en el apartado 3, para esta parte del estudio se ha establecido que el flujo volumétrico de infiltraciones de aire exterior sea un valor estimado a partir de los datos de los informes logísticos de la empresa y que la carga térmica generada por la mercancía almacenada sea la equivalente al caso más desfavorable.

En la Figura 2 se representan los resultados de ambos programas informáticos que se han comparado con los datos reales de demanda energética que se han obtenido de la empresa. Además, como se puede observar en la Figura 3, en TRNSYS® se obtienen resultados más precisos que en CLIMA®, siendo la diferencia anual promedio en valor absoluto con los datos reales de 7,22 % y 43,13 % respectivamente. Por otro lado, conforme nos adentramos en meses con temperaturas más altas en las horas centrales del día, la demanda energética de la nave va aumentando. Este es un comportamiento lógico para una instalación situada en una zona climática mediterránea.

**Figura 2. Resultados de CLIMA® y TRNSYS® para la demanda energética de la nave frigorífica modelizada.**



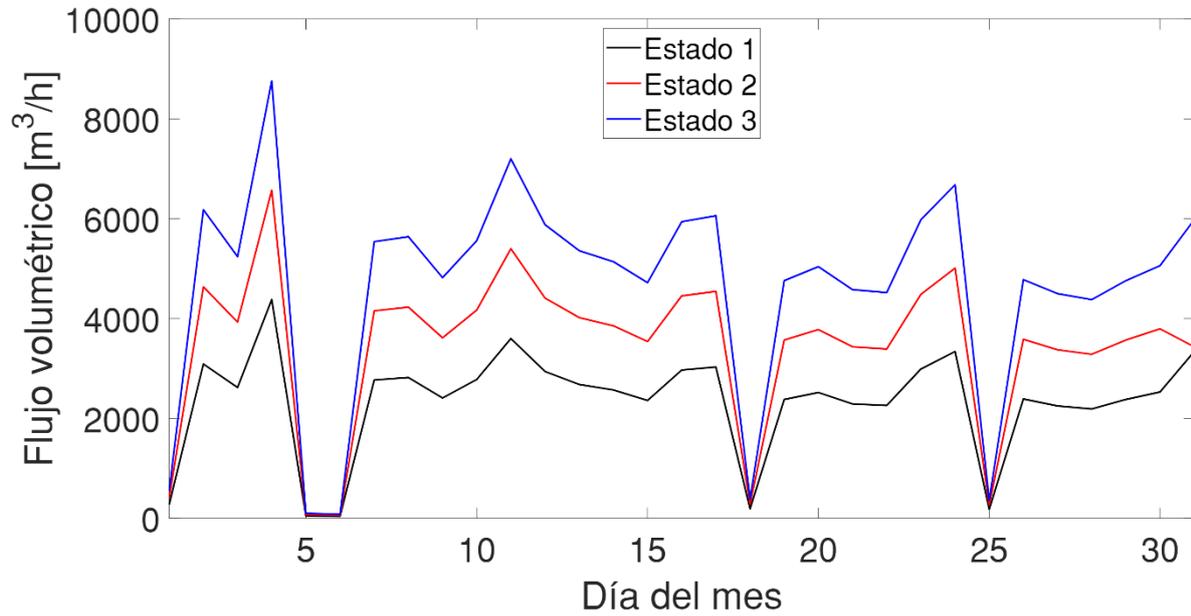
**Figura 3. Diferencia porcentual entre los datos reales y los resultados obtenidos con CLIMA® y TRNSYS®.**



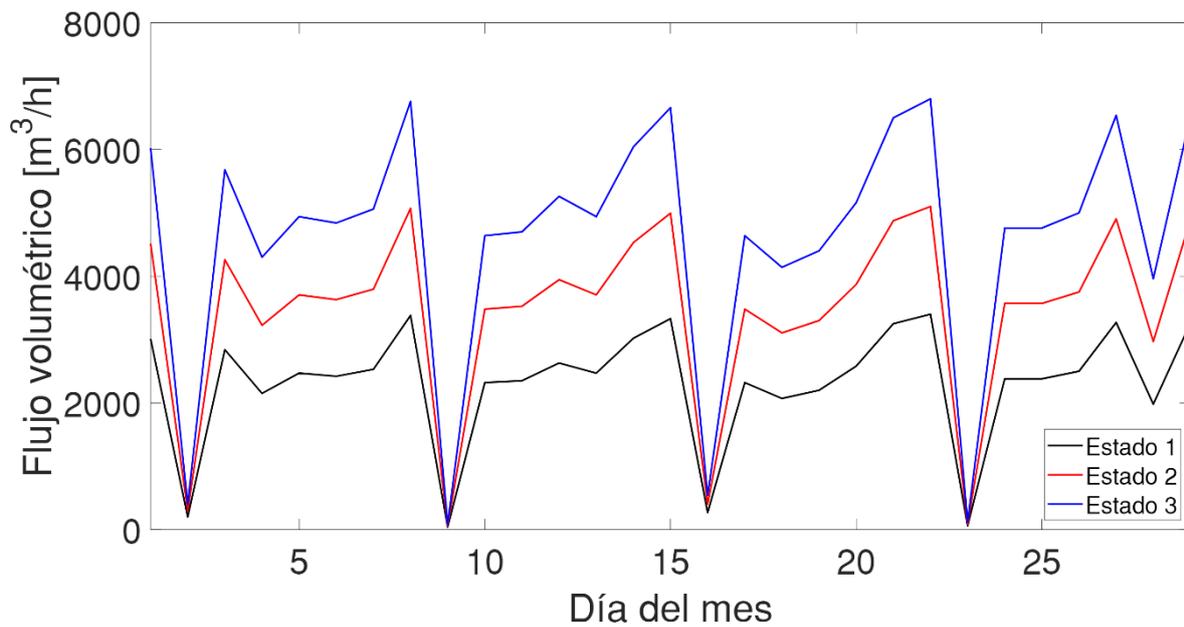
### 5.2. Resultados para distintos flujos volumétricos de infiltraciones de aire exterior en TRNSYS®

La Figura 4, Figura 5 y Figura 6 muestran el flujo volumétrico de infiltraciones de aire exterior en los meses de enero (figura 4), febrero (figura 5) y marzo (figura 6) para los tres estados analizados. Estos estados se diferencian únicamente en la duración del proceso de carga o descarga de mercancía, siendo de 10, 15 y 20 minutos para el estado 1, 2 y 3 respectivamente.

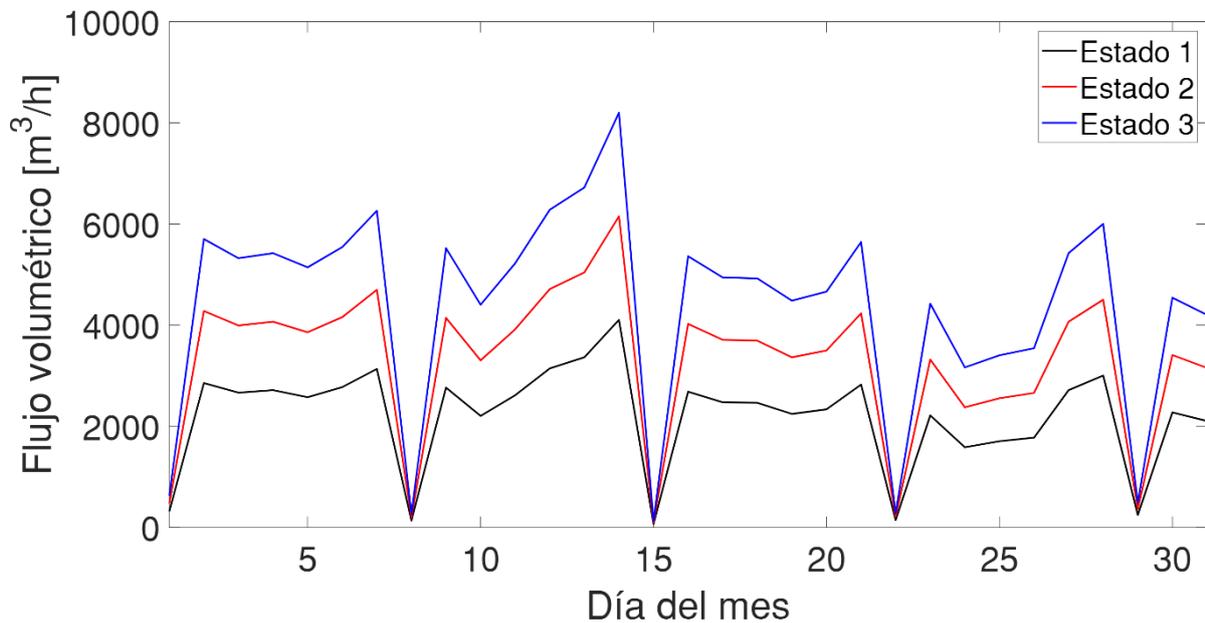
**Figura 4. Evolución mensual del flujo volumétrico de infiltraciones de aire exterior para los distintos estados en el mes de enero.**



**Figura 5. Evolución mensual del flujo volumétrico de infiltraciones de aire exterior para los distintos estados en el mes de febrero.**

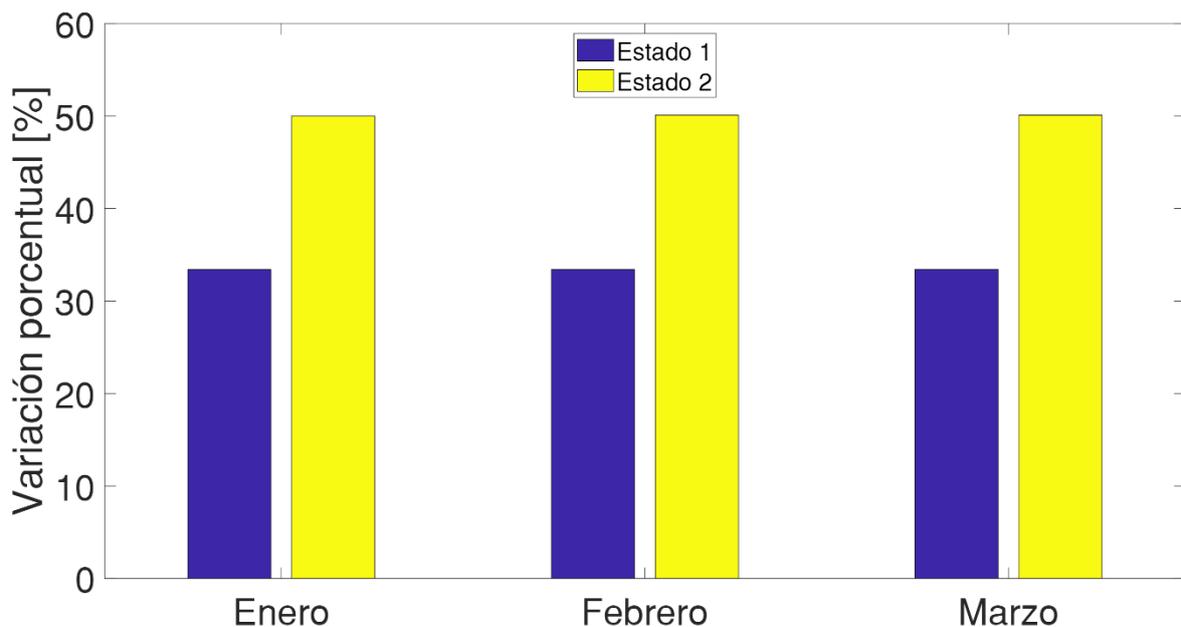


**Figura 6. Evolución mensual del flujo volumétrico de infiltraciones de aire exterior para los distintos estados en el mes de marzo.**



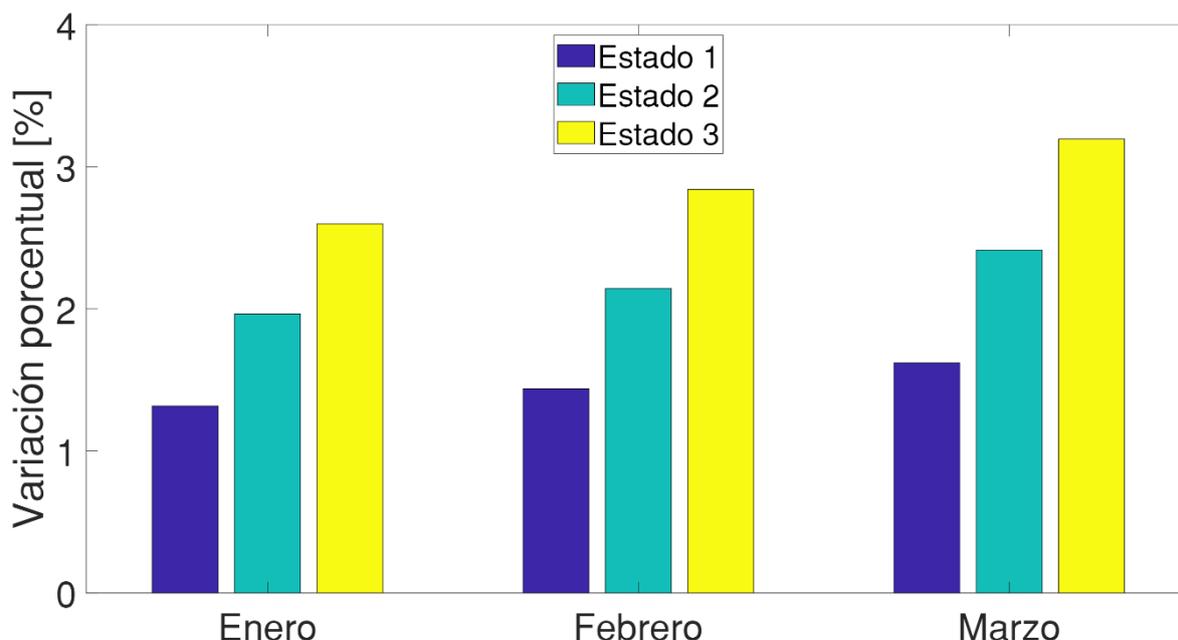
La Figura 7 representa la variación respecto al estado 1 de la diferencia en la demanda energética debida a la diferencia de carga térmica generada por las infiltraciones de aire exterior de los estados 2 y 3. Conociendo que el flujo volumétrico de infiltraciones del aire exterior del estado 2 es 1,5 veces el del estado 1 y el del estado 3, 2 veces el del estado 1, podemos observar como la demanda energética para cada estado no sigue la misma relación. Para el estado 2, se observa un incremento respecto al estado 1 en la demanda energética del 33 % aproximadamente y para el estado 3 del 50 %.

**Figura 7. Incremento porcentual respecto al estado 1 de la demanda energética de la nave para los estados 2 y 3.**



Sin embargo, sí que podemos observar en la Figura 8 como la variación de la demanda energética para cada estado sí que sigue una relación lineal. Es decir, para el estado 2, tenemos una demanda energética 1,5 veces superior al valor porcentual del estado 1 y para el estado 3 asciende a 2 veces el valor porcentual del estado 1 (equivalente a 1,33 veces el estado 2). Es importante tener en cuenta que la variación porcentual representada es respecto al caso sin infiltraciones con  $Q = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

**Figura 8. Incremento porcentual respecto al caso sin infiltraciones de aire exterior de la demanda energética de la nave en función de los distintos estados de carga analizados.**



## 6. Conclusiones

Como primera conclusión se puede afirmar que el modelado con TRNSYS® es mucho más exacto que el proporcionado por CLIMA®, obteniendo un ajuste con los datos medidos de consumo energético mucho más fiable

Por otro lado, se confirma la relación dependencia directa de la demanda energética de la nave con las infiltraciones de aire exterior a la nave. Estas infiltraciones se han modelado en función de los tiempos de carga-descarga de los camiones sobre los muelles y, sobre todo de los tiempos debidos a las maniobras de acoplamiento del camión con el muelle. La variación porcentual de un estado a otro varía en función de la diferencia de flujo volumétrico de aire infiltrado. Si analizamos el estado 2, observamos como su incremento porcentual de la demanda energética es, aproximadamente, 1,5 veces el del estado 1. Del mismo modo, el del estado 3 es 2 veces el del estado 1 aproximadamente (1,33 veces el del estado 2).

También hay que destacar los resultados obtenidos de una mejora en el aislamiento de la nave, no se reduce la demanda energética de una manera porcentual, siendo achacable el mayor porcentaje de energía requerida a las infiltraciones y no al aislamiento. Se puede observar cómo aislando la demanda energética necesaria para cubrir la carga térmica generada por las infiltraciones de aire exterior, la relación lineal anteriormente comentada no se mantiene si no que pasamos a tener una variación del 33 % aproximadamente del estado 2 respecto al estado 1 y del 50 % del estado 3 respecto al estado 1.

Se ha demostrado la capacidad del modelado para la mejora de las operaciones logísticas en una nave de almacenamiento intermedio. Siendo capaz el modelo realizado de indicar las variaciones de demanda energética en el cambio de acciones en el proceso de carga y descarga.

### Referencias bibliográficas

- Brinks, P., Kornadt, O., & Oly, R. (2015). Air infiltration assessment for industrial buildings. *Energy and Buildings*, 86, 663-676.
- Ji, Y., Duanmu, L., Liu, Y., & Dong, H. (2020). Air infiltration rate of typical zones of public buildings under natural conditions. *Sustainable Cities and Society*(61), 102290.
- Rincón-Casado, A., Sánchez-De La Flor, F., Rodríguez-Jara, E., Pavón-Domínguez, P., & Sánchez-Ramos, J. (2017). Influence of ventilation and infiltration flows on energy demand in residential buildings in Spain. *DYNA*, 92(6), 655-660.
- Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. (2008). *17 TRNSYS*. Madison, U.S.A.
- Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. (2012). *TRNSYS 17 Documentation. Multizone Building modelling with Type56 and TRNBuild (7<sup>a</sup> ed.)*
- Zarco-Soto, I. M., Zarco-Periñán, P. J., & Sánchez-Durán, R. (2020). Influence of climate on energy consumption and CO2 emissions: the case of Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(13), 15645-15662.

### Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

