

Modelado de perfiles de consumo de energía eléctrica en equipos de acondicionamiento de aire para confort humano

Mattivi Federico Manuel ^{a*}, Potschka Julio Ariel ^a Mazzoletti Armando Manuel ^a.

^a *Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería, LIDEE, Oberá, Misiones, Argentina.*

e-mails: fmmattivi@outlook.com, potschka@fio.unam.edu.ar, mazzoletti@fio.unam.edu.ar .

Resumen

Este artículo presenta el análisis de un modelo analítico para obtener el perfil de carga de un equipo de acondicionamiento de aire mediante la medición de la temperatura interior de un ambiente determinado. La evaluación de la eficiencia energética es importante para reducir el consumo de energía y minimizar el impacto ambiental, dado que los sistemas de acondicionamiento de aire representan una porción considerable del consumo energético en edificaciones residenciales y comerciales. Este estudio propone obtener un perfil de carga de un sistema de acondicionamiento de aire conociendo la variación de la temperatura del ambiente interior, cuyos resultados muestran un mayor consumo energético en periodos de alta temperatura debido a la mayor demanda del equipo.

Palabras Clave – *Acondicionamiento de aire, Energía Eléctrica, Modelado, Perfil de consumo.*

1. Introducción

El consumo de energía para la climatización de ambientes, que incluye tanto la calefacción como la refrigeración, representa una parte significativa del consumo total de energía eléctrica en muchos países, especialmente en aquellos con condiciones climáticas extremas.

Según la U.S. Energy Information Administration (eia) los hogares de los EEUU necesitan energía para alimentar numerosos dispositivos y equipos domésticos, pero, en promedio, más de la mitad (52 % en 2020) del consumo energético anual de un hogar se destina a la: calefacción y acondicionamiento de aire [1].

La comercialización de equipos de refrigeración y de aire acondicionado ha crecido significativamente debido a la demanda de confort térmico en regiones cálidas. Según un informe de la Agencia Internacional de Energía (AIE), se espera que el número de aires acondicionados en todo el mundo se triplique para el año 2050, llegando a 5.600 millones de unidades, lo que incrementará notablemente la demanda de electricidad y el consumo de energía [2].

El consumo de energía se evalúa mediante el monitoreo y medición utilizando equipos como los medidores de energía inteligente, así como también, mediante el uso de modelos energéticos utilizados para predecir el consumo de energía e implementando la gestión energética conforme a las normas ISO 50001. La norma ISO proporciona un marco de trabajo sistemático para mejorar la eficiencia energética, reduciendo los costos y mejorando el desempeño energético a través de la implementación de políticas, objetivos y procesos claramente definidos.

La temperatura es una magnitud física que expresa el grado de frío o calor de los cuerpos o del ambiente e influye de manera notable en el consumo de energía eléctrica por el accionar de las personas, especialmente en lo referente a los sistemas de acondicionamiento de aire utilizado para el confort humano, siendo este, un indicador que se manifiesta a través de varios factores que afectan el funcionamiento de estos equipos.

La evaluación de la eficiencia energética es importante para reducir el consumo de energía eléctrica y minimizar el impacto ambiental, por lo tanto, es importante evaluarlo en los sistemas de acondicionamiento de aire que son responsables de una porción significativa del consumo energético en edificaciones residenciales y comerciales. Según estudios realizados por la AIE, el uso de sistemas

de climatización puede representar hasta un 40% del consumo total de energía en edificios durante los meses de verano [3].

La eficiencia energética de los equipos acondicionadores de aire (AA) puede entenderse como la relación entre la energía térmica proporcionada y la energía eléctrica consumida. Para mejorar la eficiencia de los sistemas de AA, es fundamental considerar tanto el diseño del equipo como la forma en que se utiliza. Es por ello que la implementación de tecnologías avanzadas, como compresores de velocidad variable (equipos de acondicionamiento de aire inverter) y sistemas de control inteligente, puede mejorar significativamente la eficiencia operativa. A su vez, el mantenimiento regular y la limpieza de filtros son prácticas recomendadas para asegurar un rendimiento óptimo.

Según la Secretaría de Energía, los equipos de AA para el confort humano deben ser seteados en 24/25 °C, al regular los termostatos, cada grado de diferencia supone un ahorro de un 8% de energía. Aumentar en 1°C en los aires acondicionados en modo refrigeración puede generar un ahorro de energía superior al 25% [4].

Los perfiles de carga son una herramienta en la planificación y gestión de sistemas eléctricos que muestra la variación de la demanda de energía a lo largo del tiempo. Particularmente en un sistema de acondicionamiento de aire, está estrechamente relacionado con la temperatura ambiente, lo cual provoca que, en periodos de alta temperatura, el consumo de energía aumente.

La climatización eficiente también puede beneficiarse del uso de materiales de construcción con propiedades aislantes y la optimización del diseño arquitectónico para minimizar las ganancias de calor. Por ejemplo, el uso de ventanas de DVH (doble vidriado hermético) y aislamiento adecuado en techos y paredes puede reducir la carga de enfriamiento y el consumo de energía. Siendo esto evaluado a través del etiquetado de edificios en términos de eficiencia energética, que proporciona información valiosa acerca del diseño arquitectónico, orientación, protecciones solares, sistemas de calefacción, refrigeración y el consumo de energía anual [4].

En este artículo se propone un modelo analítico que permite obtener el perfil de carga de un equipo de acondicionamiento de aire mediante la medición de la temperatura ambiental, así como también, la propuesta de validación del mismo mediante un análisis termodinámico y de transferencia de calor en un recinto cerrado.

2. Desarrollo

La principal función del AA es mantener condiciones de confort dentro de un espacio determinado. Este espacio también llamado ambiente físico es una zona específica dentro de un edificio o estructura que se controla para asegurar ciertos parámetros de temperatura, humedad y calidad del aire [5].

La temperatura del ambiente tiene un impacto significativo en el consumo de energía eléctrica, especialmente cuando se trata de equipos de AA destinados al confort humano. El impacto de este fenómeno se puede explicar a través de varios factores relacionados con el funcionamiento y la eficiencia de estos equipos [6].

Cuando la temperatura exterior es alta, la carga térmica dentro de los espacios acondicionados también aumenta. La carga térmica se relaciona a la cantidad de calor que necesita ser extraída para mantener una temperatura interior confortable. Este calor puede provenir de diversas fuentes como ser: radiación solar, personas, equipos electrónicos, infiltración del aire exterior y la transferencia de calor a través de las paredes, techos y ventanas [5]. A medida que la temperatura exterior se eleva, la transferencia de calor hacia el interior del recinto aumenta, demandando mayor energía del sistema para mantener la temperatura deseada, lo cual se traduce en un mayor consumo de energía eléctrica.

El equipo responsable de lograr y mantener las condiciones de confort es el AA, cuya función principal es proporcionar confort térmico a los ocupantes enfriando y deshumidificando el aire interior durante los meses cálidos y, en algunos casos, calentándolo durante los meses fríos. Es importante destacar que la energía consumida por este equipo se transfiere porcentualmente a través de las diversas partes del ambiente físico tal como se puede observar en la Fig. 1.



Fig. 1. Porcentajes de pérdidas de energía en una casa convencional.
Fuente: Secretaría de energía [4].

Uno de los elementos principales de un sistema de AA es el compresor, que eleva la presión del refrigerante y permite lograr el ciclo de enfriamiento. En climas más cálidos, el compresor debe funcionar con mayor frecuencia y por períodos más largos para mantener la temperatura interior estable. Esto se traduce en un mayor consumo de energía eléctrica, ya que el compresor es uno de los componentes que más energía consume en el sistema de aire acondicionado [6].

2.1 Metodología utilizada para realizar el modelo del perfil de carga

La energía eléctrica consumida por los equipos o dispositivos se refiere a la cantidad de electricidad utilizada durante un período específico, en este caso por los equipos de AA para la climatización a criterio del usuario. Se mide en unidades de energía, generalmente en kilovatios-hora (kWh) y se puede expresar mediante (1).

$$E = \sum_{i=0}^n P_n * t_i \quad (1)$$

donde: P_n es la potencia activa nominal del equipo y t_i es el período de tiempo.

El presente modelo posee las siguientes condiciones de contorno:

$$\begin{cases} T > T_{SP} \rightarrow P = P_n \\ T < T_{SP} \rightarrow P = 0 \end{cases} \quad (2)$$

donde: T es la temperatura instantánea del perfil de temperatura, T_{sp} es la temperatura seteada por el usuario en el equipo.

En la Fig. 2. se puede observar un perfil de temperatura modelo. En la parte inferior se pretende graficar el perfil de carga de un equipo de AA de potencia nominal P_n .

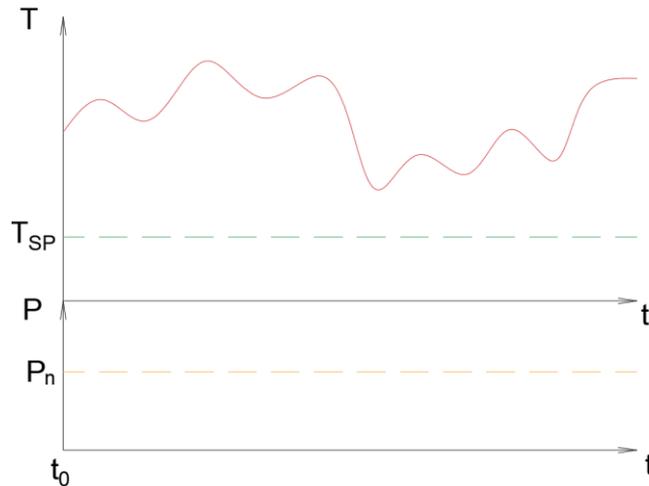


Fig. 2. Gráfica de temperatura y potencia en función del tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

Considerando un lazo de control ON/OFF, despreciando el consumo del equipo funcionando en modo de espera (Stand-By) y despreciando la histéresis del lazo de control, se pueden clasificar los siguientes 3 casos que se ven representados en las Fig. 3., Fig. 4. y Fig. 5.

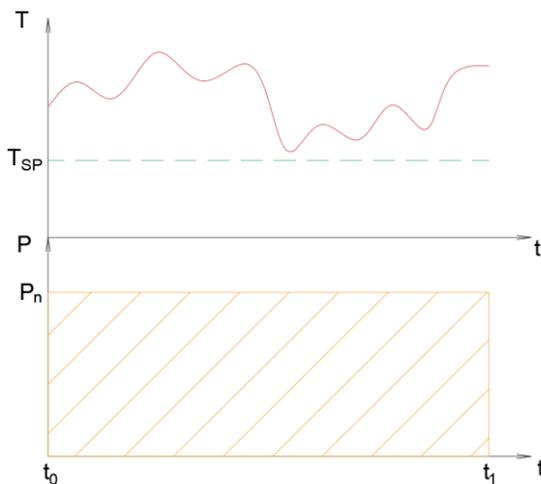


Fig. 3. Caso 1.
Fuente: Elaboración propia.

Caso 1: el perfil de temperatura supera en todo momento a la temperatura seteada por el usuario del equipo (T_{SP}), por lo tanto, la energía consumida por el equipo será:

$$E = P_n t_{0-1} \text{ [kWh]} \quad (3)$$

Extremo superior, el equipo permanece encendido las 24hs del día.

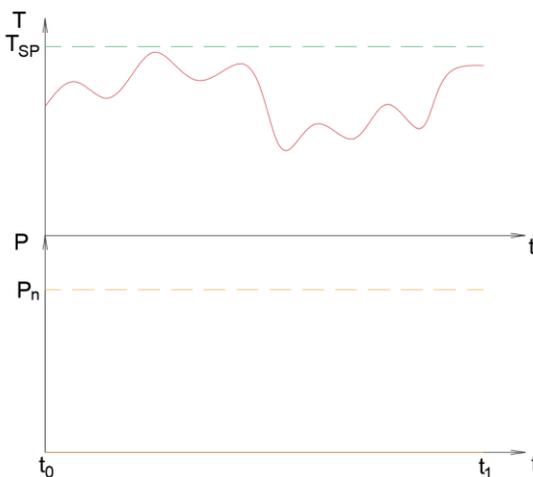


Fig. 4. Caso 2.
Fuente: Elaboración propia.

Caso 2: el perfil de temperatura no supera a la temperatura seteada por el usuario del equipo (T_{SP}), por lo tanto, la energía consumida por el equipo será:

$$E = 0 \text{ [kWh]} \quad (4)$$

Extremo inferior, el equipo permanece apagado las 24hs del día.

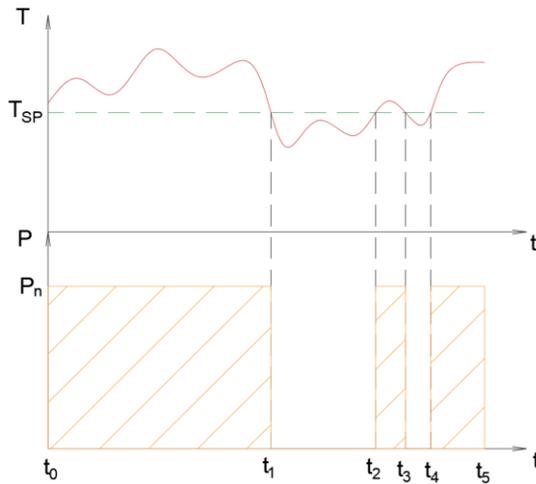


Fig. 5. Caso 3.
Fuente: Elaboración propia.

Caso 3: existen momentos donde el perfil de temperatura supera a la temperatura seteada por el usuario del equipo (T_{SP}) y otros en donde esto no ocurre, por lo tanto, la energía consumida por el equipo será:

$$E = P_n t_{0-1} + P_n t_{2-3} + P_n t_{4-5} \text{ [kWh]} \quad (5)$$

Caso intermedio, donde el equipo se enciende y apaga de forma intermitente a lo largo del día.

2.2 Resultados obtenidos

Para modelar el perfil de carga de un equipo de AA, se consideró un equipo de la marca comercial Surrey. En la Fig. 6. se muestra la ficha técnica del equipo utilizado, de la cual se identificó la potencia consumida en modo de refrigeración.

La imagen muestra un equipo de climatización de la marca Surrey. A su lado se encuentra su ficha técnica, que incluye los siguientes datos:

Modelo Frío Calor de 3000 kcal/h			
Conjunto	553GIQ1201F	Eficiencia Energética	
Unidad Interior	619GIQ1201F	Letra Refrigeración	A+
Unidad Exterior	538GIQ1201F	Letra Calefacción	A
Capacidad Refrigeración		Consumo Eléctrico	
2967 kcal/h	3,45 kW	Refrigeración	1,18 kW
Capacidad Calefacción		Calefacción	0,95 kW
3165 kcal/h	3,68 kW	Corriente Eléctrica	
Peso		Refrigeración	5,51 A
Unidad Interior	8,8 kg	Calefacción	4,37 A
Unidad Exterior	22,3 kg	Dimensiones (mm)	
Unidad Interior		802x200x295	
Unidad Exterior		720x270x495	

Fig. 6. Ficha técnica del equipo utilizado para el modelo.
Fuente: Surrey.

Con el dato de potencia consumida en modo de refrigeración, se establece que el equipo se encontrará seteado a la temperatura establecida por el usuario, con un lazo de control ON/OFF.

Consideraciones que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del modelo:

- El equipo se considera encendido las 24hs.
- Para el modelo se utiliza el perfil de temperatura real del ambiente interior obtenido con el equipo en funcionamiento.
- A modo comparativo se mide temperatura y humedad exterior.

Para realizar la medición y registro de temperatura y humedad del ambiente interior, se utiliza un Data Logger de la marca "Hobo" que se muestra en la Fig. 7.

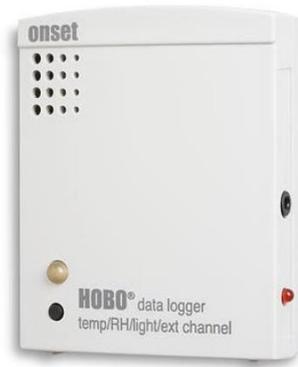


Fig. 7. Data Logger para la medición de temperatura y humedad.
Fuente: Hobo [10].

El perfil de temperatura y humedad obtenido se representa en la Fig. 8., observándose desde la hora 0 hasta la hora 8 variaciones progresivas tanto de humedad y temperatura. Luego de la hora 8 y hasta la hora 20 se observan variaciones intermitentes de temperatura y humedad interior posiblemente debidas a efectos de las personas que realizan sus tareas en el ambiente bajo estudio como así también el uso de equipos.

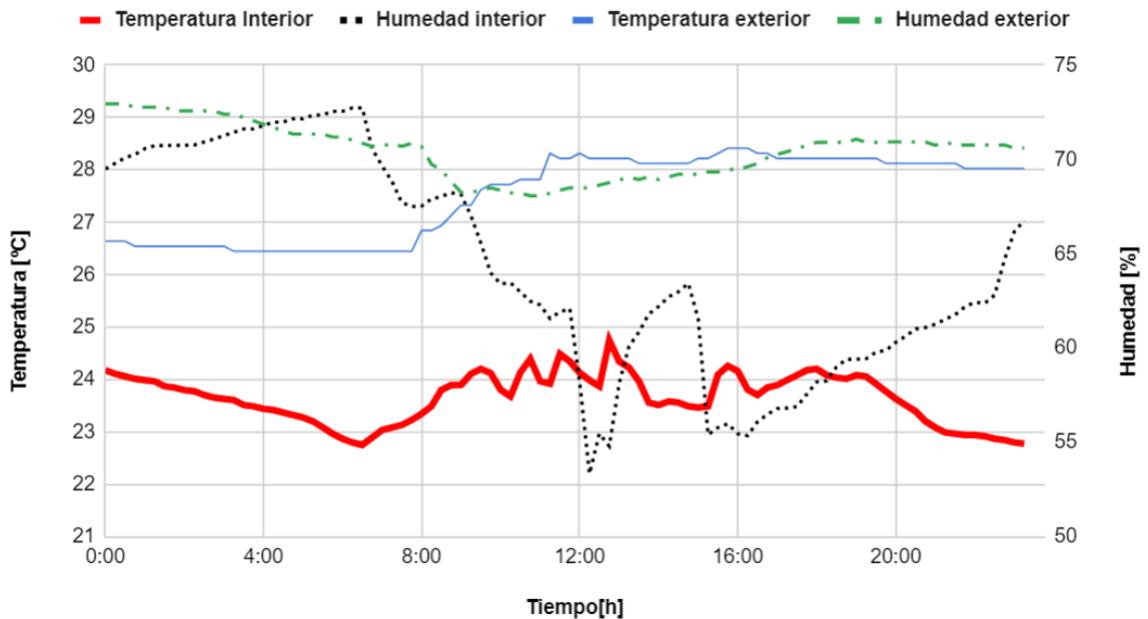


Fig. 8. Perfil de temperatura y humedad utilizado para realizar el modelo del perfil de carga.
Fuente: Elaboración propia.

Aplicando la metodología expuesta en la sección 2.1 se obtienen dos perfiles de carga que se visualizan en Fig. 9. y Fig. 10., utilizando el perfil de temperatura interior (■), para los cuales se realiza el siguiente análisis:

- a) En la Fig. 9., el equipo opera seteado a 24°C por el usuario, donde el compresor se enciende y apaga de forma intermitente según los requerimientos necesarios para mantener una temperatura estable en el interior del ambiente físico.
- b) En la Fig. 10, se observa que el compresor permanece encendido durante un período más prolongado para lograr mantener la temperatura estable en el interior del ambiente climatizado con el equipo seteado por el usuario a una temperatura de 23°C.

Estas diferencias se ven reflejadas en el consumo de energía del equipo, el cual se representa en ambos gráficos por el área bajo la curva. Cabe destacar que cuando el compresor se encuentra

apagado, el equipo consume una potencia de 0,2 kW debido a que la unidad interior posee un ventilador que se considera encendido en todo momento, así como también, es necesario alimentar el circuito electrónico de control.

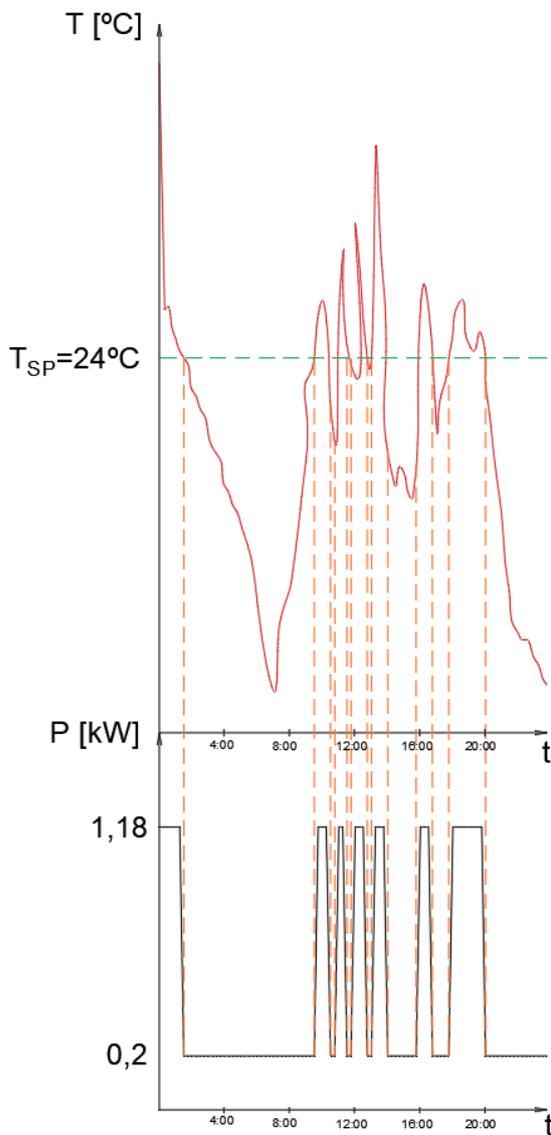


Fig. 9. Perfil de carga equipo de acondicionamiento de aire funcionando con $T_{SP} = 24^{\circ}C$.
Fuente: Elaboración propia.

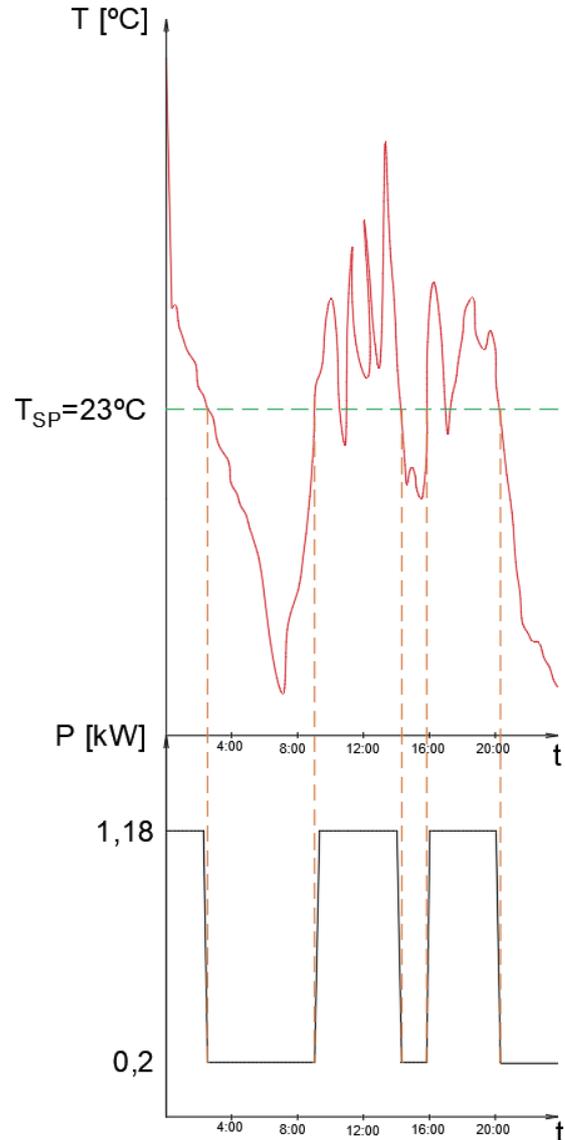


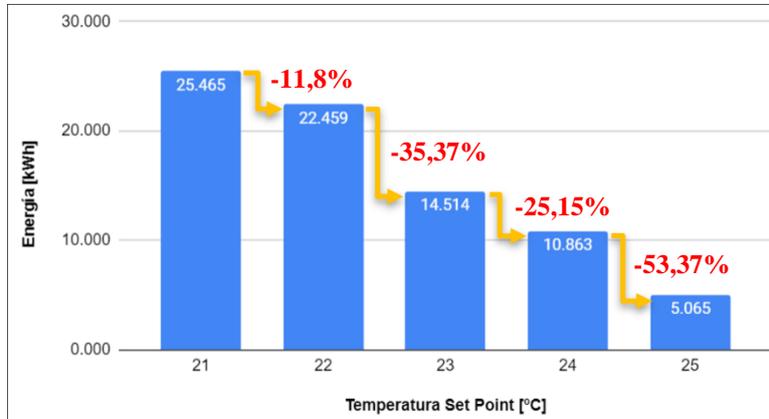
Fig. 10. Perfil de carga equipo de acondicionamiento de aire funcionando con $T_{SP} = 23^{\circ}C$.
Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia del sistema de acondicionamiento de aire se ve afectada con las altas temperaturas exteriores. Esto ocurre porque los sistemas de aire acondicionado están diseñados para funcionar de manera óptima dentro de ciertos rangos de temperatura. Cuando las temperaturas exceden estos rangos, el sistema puede volverse menos eficiente, lo que significa que necesita más energía para producir el mismo efecto de enfriamiento [6]. Esta disminución en la eficiencia es especialmente notable en sistemas más antiguos o con un mantenimiento no adecuado.

En la Fig. 11. se muestra el resultado de la aplicación de este modelo para valores de set point que van desde $21^{\circ}C$ a $25^{\circ}C$, calculando la energía consumida en cada caso y comparando la reducción del consumo energético, a través de la aplicación de la expresión (1).

$$E_{23^{\circ}C} = 0,2kW * 24h + 0,98kW * (2h + 4,4h + 3,5h) = 14,51kWh \quad (6)$$

Además, se realizó una simplificación del modelo considerando que el equipo se encuentra encendido las 24hs, el perfil de temperatura interior se mantiene fijo y la temperatura exterior se mantiene constante. Luego de esto se modela la energía consumida por el equipo de acondicionamiento de aire variando la temperatura de set-point utilizando el mismo perfil de temperatura interior de la Fig. 8.



$$E_r = \frac{E_T - E_{T+1}}{E_T} * 100\% \quad (7)$$

Fig. 11. Energía consumida por el equipo de acondicionamiento de aire al variar la temperatura de set-point.
Fuente: Elaboración propia.

2.3 Trabajos futuros

Dado que el proyecto se encuentra en desarrollo, para validar el modelo del perfil de consumo de energía eléctrica en los equipos de acondicionamiento de aire para confort humano, quedando pendiente las siguientes tareas:

- Medir de manera simultánea temperatura y humedad del ambiente interior, exterior y la energía eléctrica que consumen los equipos de AA, utilizando un equipo analizador de redes [9].
- Modelar el perfil de consumo de energía correlacionando las variables del ambiente interior y exterior.
- Comparar el perfil de energía modelado con el perfil de energía consumida en un recinto y medido por un equipo analizador de redes eléctricas [9].

3. Conclusiones

En este trabajo se determinó el perfil de carga a partir de la medición de la temperatura del interior de un recinto cerrado, observándose una reducción del consumo de energía eléctrica con la variación del set point; por ejemplo, variando el set point de 23°C a 24°C se logra una reducción del consumo de energía eléctrica del 25% para el caso en estudio.

A partir de los perfiles de temperatura se observó un período de intermitencia del funcionamiento del equipo en un rango de tiempo determinado desde la hora 8 hasta la hora 18, posiblemente debido a la concurrencia de las personas a su lugar de trabajo y al uso de los equipos que se encuentran en el ambiente en estudio. Siendo esta intermitencia de funcionamiento una variación de un $\Delta T = 1,5^\circ\text{C}$.

Con un modelado preciso, se puede planificar y gestionar mejor el uso de energía en función de las necesidades específicas de cada usuario, evitando picos de demanda y posibles sobrecargas del sistema eléctrico.

Con el uso del modelo planteado en el presente artículo, se puede aproximar el consumo energético en función de la temperatura interior. La validación del modelo con mediciones empíricas permitirá ajustar estas predicciones, ofreciendo una herramienta para optimizar el uso de sistemas de AA.

4. Referencias

- [1] Use of energy explained, Energy use in homes, eia, Diciembre 2023.
- [2] The future of Cooling, Opportunities for energy-efficient air conditioning, IEA, Mayo 2018.
- [3] Nicholas Howarth, Clara Camarasa, Kevin Lane, Anau Risquez Martin, Keeping cool in a hotter world is using more energy, making efficiency more important than ever, IEA, Julio 2023.
- [4] Secretaría de Energía de Argentina, Buenas prácticas para reducir el consumo de energía, Residencial, 2024.
- [5] Carrier Air Conditioning Company, Manual de Aire acondicionado, 5ta Reimpresión, 1980.
- [6] Carlos González Sierra, Montaje y Mantenimiento de Instalaciones Frigoríficas.
- [7] Yunus A. Çengel, Transferencia de calor y masa, 3ra Edición, 2007.
- [8] Potschka J., Oliveira M., Mazzeletti A., Brazzola R., “Medición y Análisis de Variables Eléctricas Relacionadas a la Eficiencia Energética en Instalaciones de Educación Tecnológica”, 10° JIDeTEV, FIO – UNaM, 2020.
- [9] Analizador de RED Fluke 434-Fluke Corporation, P.O. Box 9090, Everett, WA 98206-9090 EE.UU. Fluke Industrial B.V., P.O. Box 90, 7600 AB, Almelo, Países Bajos.
- [10] HOBO, Trusted HOBO Temperature/Humidity Sensors and Data Loggers, Disponible en: <https://www.onsetcomp.com/>.
- [11] Jose Ramon Cancelo, Modelización del efecto temperatura en el consumo de electricidad: un ejercicio de búsqueda de especificación en relaciones dinámicas no lineales, Estadística Española, 1995.
- [12] R. Stagnitta, A. Gastón, R. Abalone, Modelo analítico para estimar el consumo energético para climatización de viviendas en régimen dinámico, ASADES2018, 2018.
- [13] María del Carmen Guerrero Delgado, Modelización y caracterización de consumos energéticos térmicos y eléctricos en edificios, Proyecto fin de carrera Ingeniería Industrial Universidad de Sevilla, 2015.
- [14] Fernando Y. Poy, Pablo D. Donolo, Propuesta para la detección del cambio de tipo de suministro eléctrico en edificios a partir de su perfil de carga, RPIC Estudiantil, 2023.