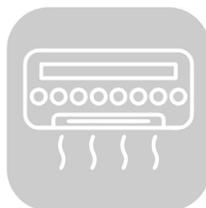


Desarrollo de un sistema SCADA con adquisición de temperaturas para comparación de eficiencia térmica de aires acondicionados

RESUMEN: En el presente trabajo se documenta el proceso de la instrumentación SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) y programación gráfica para determinar las temperaturas ambiente exterior e interior, para un proyecto de comparación de la eficiencia energética a través de un análisis que relaciona las temperaturas y el consumo de energía, entre un sistema de acondicionamiento de aire convencional (on/off) y uno con tecnología inverter. Debido a que muchos fabricantes de estos sistemas no se apegan a la normatividad nacional de eficiencia energética y presentan información engañosa respecto a su consumo real de energía (kWh). Se realizaron experimentos con sistemas de aire acondicionado convencionales e inverter, monitoreando las temperaturas interior y exterior mediante termopares y un sistema SCADA, durante marzo y abril, con condiciones ambientales medias y altas. Los perfiles de temperatura reflejaron variaciones relacionadas con la irradiación solar y la actividad en el laboratorio. Se observaron cambios bruscos en los sistemas convencionales durante períodos de ocupación y desocupación, mientras que los sistemas inverter mostraron una similitud entre las temperaturas interior y exterior, atribuida al ajuste del variador de frecuencia. Este estudio ofrece valiosa información para optimizar el control y la eficiencia energética de los sistemas de aire acondicionado.

PALABRAS CLAVE: Consumo de energía, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), Sensores tipo J, Gradiente de temperatura, Instrumentación.



Colaboración

Armando Campos Domínguez; Francisco López Huerta, FIEE Universidad Veracruzana; William Alejandro Castillo Toscano, FIMCN Universidad Veracruzana; Aldo Giovanni Vázquez Guzmán, MICRONA Universidad Veracruzana; Adrián Vidal Santo, FIMCN Universidad Veracruzana

Fecha de recepción: 20 de marzo de 2024

Fecha de aceptación: 03 de junio de 2024

ABSTRACT: This paper extensively discusses the process of implementing SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) instrumentation and graphical programming to effectively monitor indoor and outdoor ambient temperatures for an in-depth energy efficiency comparison project. The primary goal is to particularly analyze the temperature dynamics and discern any discrepancies in energy consumption between a traditional on/off air conditioning system and one equipped with advanced inverter technology. A significant issue highlighted throughout this research is the prevalence of ambiguous information provided by manufacturers regarding the actual energy consumption of their systems, often neglecting to adhere to national energy efficiency standards. The recorded temperature profiles vividly portrayed the fluctuations influenced by a multitude of factors, prominently including solar radiation variations and the dynamic activities within the laboratory environment. Of notable interest are the distinct temperature patterns observed between conventional and inverter systems. While conventional systems showcased pronounced temperature variations during both occupancy and vacancy periods, the inverter systems demonstrated a significantly more stable temperature profile. This stability can be attributed to the adaptive nature of frequency variable adjustments inherent to inverter technology. In conclusion, this comprehensive study offers invaluable insights into optimizing control strategies and effectively enhancing the energy efficiency of air conditioning systems.

KEYWORDS: Energy consumption, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), Type J sensors, Temperature gradient, Instrumentation.

INTRODUCCIÓN

El empleo de técnicas modernas de instrumentación, adquisición de datos y caracterización de gradientes de temperaturas, son

muy importantes para el monitoreo y control de la energía térmica y de la energía eléctrica de los aires acondicionados tipo convencionales on/off y tipo inverter [1]–[3]. Tales técnicas de adquisición de datos con equipos robustos y confiables son más precisas que el usar tarjetas DAQ con mayor incertidumbre en las mediciones y no se dispone en la actualidad de software de análisis a la medida en línea que permita realizar una mejor evaluación de los gradientes de temperaturas de los aires acondicionados y realizar a su vez una retroalimentación o en este caso una comparación de la eficiencia térmica y eléctrica.

Por lo anterior es importante el desarrollo de sistemas SCADA con software científico que permita analizar las mediciones de parámetros experimentales como las temperaturas del interior y exterior, consumo de energía, variación de la tensión, humedad relativa, de los aires acondicionados en cuestión [4]. Sin embargo, con este equipo SCADA, solo se acondicionaron sensores de temperatura, todo esto a través de la interfaz de programación en lenguaje gráfico (lenguaje-G) que se desarrolló para este fin.

La exigencia actual en la calidad de los aires acondicionados ha llevado a múltiples esquemas de mercadotecnia, eficiencia y costos de producción, hasta la implementación de estrategias técnico-económicas que regulen la calidad de estos [5]. Por ejemplo, en esta investigación a los climas convencional e inverter se le fueron realizadas algunas pruebas de mediciones en línea, mediante la adquisición de datos de temperaturas interior y exterior del recinto de análisis del laboratorio de sistemas energéticos, para el seguimiento o perfil de las temperaturas más importantes. La adquisición y análisis de datos de las temperaturas representa una herramienta de programación e instrumentación muy significativa para el monitoreo de la tendencia de dichas variables. Sin embargo, dicho análisis e interpretación de información no siempre es fácil, debido principalmente a la compleja distribución del comportamiento de los datos o de las herramientas de programación con software y también hasta de las mismas temperaturas dentro y fuera del recinto que fueron algunas veces irregulares [6]–[8].

Por ello en el presente trabajo se desarrolló una instrumentación y programación para monitorear las temperaturas de los aires acondicionados del recinto del laboratorio en primera instancia ya que a futuro se podrá realizar el análisis de diferentes marcas de aires acondicionados convencionales e inverter que conlleven una cantidad de información útil registrada ya sea en línea o fuera de línea para poder analizar los datos de temperaturas y correlacionarse con otros modelos en cuestión. Lo anterior es debido a que estudios recientes sugieren que el consumo eléctrico y eficiencia térmica o confort no es la real que presentan los fabricantes y esta investigación podría ser usada para dar seguimien-

to y detección de parámetros de muchos aires acondicionados que a simple vista no se pueden apreciar en la hoja de datos o de la mercadotecnia de la marca de distintos modelos sus consumos energéticos.

Debe ser breve, esclareciendo la naturaleza del problema de investigación estudiado con su correspondiente sustento teórico. Debe considerar la(s) hipótesis del trabajo, con citación bibliográfica específica (entre corchetes y en orden numérico); finalizando con los objetivos de la investigación. No debe representar más del 10% del documento total.

MATERIAL Y MÉTODOS

Materiales

Data sheet Termopares tipo J. IEC 60584-1

Termopar Tipo J, comúnmente llamado Hierro/Constantán, es uno de los pocos termopares que se pueden utilizar de forma segura en atmósferas reductoras y este fue el seleccionado para la medición de las temperaturas interior y exterior del recinto

Data sheet Power Supply NI PS-15

Fuente de Alimentación Industrial de Montaje DIN, 24 VDC a 28 VDC, 5 A, 120W. La PS-15 puede alimentar sus sistemas CompactDAQ y CompactRIO, controladores de CompactRIO Single-Board, Smart Cameras, PCs de Pantalla Táctil (TPC) y más. Esta fuente de alimentación industrial es la que proporciona energía para el proceso de adquisición de datos.

Data sheet CompactRIO

Controlador CompactRIO (Legado), 8 Ranuras, CPU 400 MHz, 128 MB DRAM, Almacenamiento 256 MB, FPGA de 2M de Compuertas—El cRIO-9074 es un controlador embebido, ideal para aplicaciones avanzadas de monitoreo y control. Este controlador robusto es el sistema principal donde se instrumentan los módulos para la adquisición de datos de diferentes variables.

Data sheet NI-9211. Módulo de entrada de temperatura de la serie C.

Este módulo consta de 4 Canales, 14 S/s/canal, ± 80 mV—El NI-9211 incluye filtros anti-aliasing, detección de termopares abiertos y compensación de unión fría para medidas de termopares de alta precisión. El NI-9211 cuenta con calibración rastreada por NIST y doble barrera de aislamiento de canal a tierra para seguridad, inmunidad a ruido y alto rango de voltaje de modo común.

Métodos

Existen instrumentos de medición tradicionales analógicos y digitales que se caracterizan por realizar una o varias funciones específicas que no pueden ser modificadas tan fácilmente. Los instrumentos virtuales (vi) tienen una combinación de hardware y elementos de software, usados por una computadora personal (PC), para cumplir la función de un instrumento tradicional.

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste en sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria e investigación proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.

El ambiente de programación donde se realizó esta instrumentación y adquisición de datos es LabVIEW. LabVIEW, es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, que en conjunto aceleran la productividad. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

Clark et al. (1994) mencionan que LabVIEW es un lenguaje de programación gráfico, que se ejecuta a velocidades comparables con programas compilados en C; también mencionan que un instrumento virtual es un módulo de software, realizado gráficamente para que parezca un instrumento físico; tiene un panel frontal que sirve como interfaz interactiva para entradas y salidas, un diagrama de bloque que es donde se realiza la programación y determina la funcionalidad del instrumento virtual. Resaltan estos autores, como característica muy importante del LabVIEW que, por ser conceptualmente simple, los estudiantes se pueden concentrar en el contenido básico del experimento, no perdiendo gran tiempo en actividades menos importantes, como lo es la recolección de datos.

La programación en LabVIEW es 100% gráfica, es decir, permite programar y desarrollar una aplicación sin utilizar texto. Este tipo de programas son la base de la instrumentación virtual. La programación gráfica se basa en cuatro elementos básicos: Usos de iconos, cables, gráficos, controles e indicadores y como se dijo la programación es con base a un panel frontal y diagrama de bloques, como se muestra en las Figuras 1 y 2.

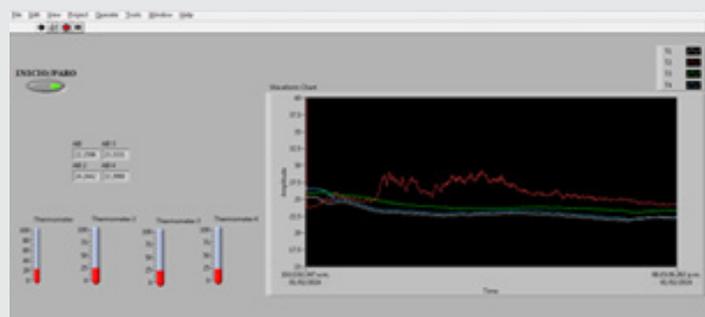


Figura 1 Panel frontal de adquisición de temperaturas.
Fuente: Elaboración propia.

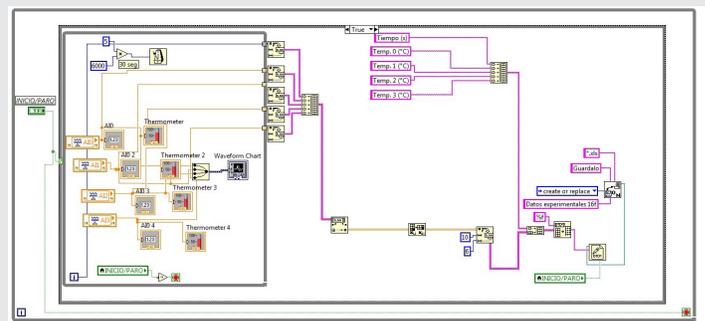


Figura 2 Diagrama de bloques que muestra la programación gráfica.
Fuente: Elaboración propia.

Temperaturas

La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente, tibio o frío que puede ser medida con un termómetro. Los termopares son unos de los sensores más comúnmente empleados en la medición de temperatura, ya que son relativamente económicos brindando exactitud y además pueden operar sobre un amplio rango de temperaturas.

Para la experimentación realizada en la comprobación de la funcionalidad de los termopares instalados y el monitoreo de las temperaturas en el programa en lenguaje G, se realizaron pruebas (una diaria con un horario de 11:40 a 19:40 hrs en promedio a intervalos de medición de 30 segundos), dichas pruebas fueron ejecutadas en el puerto de Veracruz, México en el laboratorio de Sistemas energéticos, tomando en cuenta que las temperaturas ambientales en el puerto en el mes de marzo y abril son medias y altas. En la Figura 3 se muestran los parámetros registrados para algunos días antes mencionados.

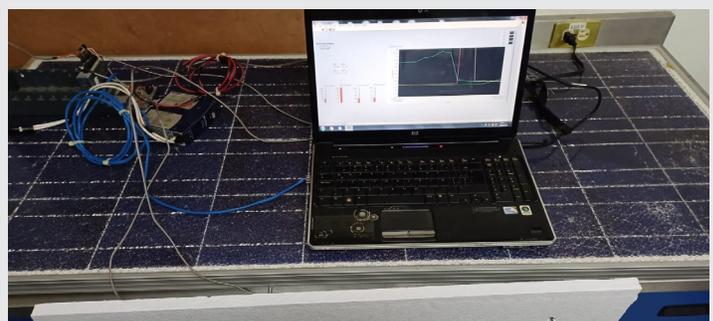


Figura 3 Dispositivos de instrumentación del sistema SCADA.
Fuente: Elaboración propia.

Se muestra en la Tabla 1 un histórico de temperaturas promedio de los últimos 3 años para el periodo de primavera-verano en el puerto de Veracruz.

Tabla 1. Temperaturas promedio en los años 2020, 2021 y 2022 [10]

| AÑO | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2020 | 26.33 | 30.19 | 29.06 | 28.1 | 27.83 | 27.26 |
| 2021 | 25.35 | 28.75 | 29.12 | 27.83 | 27.17 | 27.27 |
| 2022 | 24.32 | 28.29 | 30.05 | 27.37 | 27.33 | 27.27 |

Fuente: Elaboración propia 2020.

Perfiles de temperatura

Un perfil de temperatura es la representación gráfica de la medida de la temperatura de un gas o un sólido en función del tiempo, realizado a través de un instrumento específico compuesto por sensores de temperaturas y uno o más registradores de datos, que tienen como finalidad mostrar un panorama real del comportamiento térmico de un proceso.

Se muestra que los perfiles de temperatura del interior tratan de mantener la temperatura deseada, mientras que la temperatura exterior es la que no se puede manipular ya que depende de las condiciones climatológicas de los días donde se realizaron las corridas experimentales [11], [12].

Instalación y conexión de la instrumentación

Cada uno de los termopares utilizados en este proyecto se colocaron de la siguiente manera: uno en medio de los dos aires acondicionados (convencional e inverter) y otro en la parte exterior del recinto de prueba a climatizar, de tal modo que nos permitiera monitorear las temperaturas en los puntos de mayor interés; el equipo CompactRIO 9074, su fuente de alimentación PS-15 y el módulo de acondicionamiento de termopares NI-9215 estuvieron en el interior interconectados, monitoreando las temperaturas cada medio minuto (30 segundos), estos equipos estuvieron ubicados en una esquina del recinto, junto a una computadora portátil donde se programó una interfaz virtual para registrar, graficar y monitorear las temperaturas tanto del interior como del exterior, todo esto con el fin de poder tener un perfil de temperatura de referencia entre la temperatura ambiente exterior y la temperatura deseada por el usuario con los equipos de aire acondicionado tipo convencional e inverter.

Los dispositivos empleados en la instrumentación para el sistema SCADA se presentan en la Tabla 2 y en la Figura 4.

Tabla 2 Dispositivos de la Instrumentación.

| Cantidad | Dispositivo |
|----------|--|
| 1 | Computadora Portátil. Procesador Intel(R) Core (TM) 2 Duo CPU T6500 @2.10GHz, Memoria RAM con 4GB Sistema operativo a 32 bits. |
| 1 | Chasis CompactRIO 9074. 8 slots integrados a 400 MHz en tiempo real y 2M en compuerta FPGA. |
| 1 | Fuente de poder NI PS-15. 24 VCD y 5 A. 120 VCA. National Instruments |
| 1 | Módulo NI-9211 para medición de termopares tipo J de cuatro canales. |
| 4 | Termopar tipo J; temperatura de 0 a 760 °C; longitud de cable, 2 m. |

Fuente: Elaboración propia 2020.

El panel frontal quedó de la siguiente manera: en el panel frontal al presionar el botón Inicio (1) se empiezan a registrar o almacenar los datos de las temperaturas

para 4 canales, pero solamente se usaron 2 para monitorear las temperaturas del interior y del exterior.

Se muestran los datos con leyendas AIO hasta la AI4 (2) con valores enteros de doble precisión y más abajo unos gráficos de bulbos de temperatura indicando también estos datos como indicadores (3).

Y del lado derecho se muestran las gráficas de la evolución de los perfiles de las temperaturas tanto interior como exterior (4).

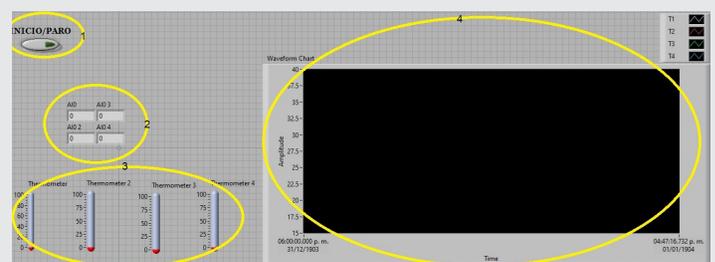


Figura 4 Panel frontal.

Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama de bloques de la Figura 5, se explica cómo se realizó la programación del lenguaje G.

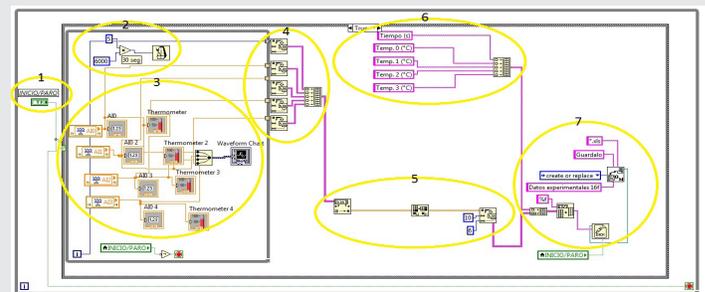


Figura 5 Diagrama de bloques.

Fuente: Elaboración propia

1. Con este botón de Inicio-Paro se realiza la adquisición y la detención de los datos.

2. En esta parte se ajustaron los valores para que se adquirieron los datos a 30 segundos 30,000 milisegundos.

3. Aquí se introdujeron los canales del CompactRIO 9074 y del módulo 9215 para las 4 señales de los termopares, con sus indicadores numéricos y gráficos para cada uno, luego con un icono de colector las 4 señales de los datos se envían para el icono de graficar Waveform Chart. Todos estos 3 pasos están dentro de un ciclo While donde Inició-Paro es quien los controla.

4. Tanto los datos del tiempo, con círculo número 2 y de las temperaturas en el círculo número 3, se convierten mediante un arreglo en una cadena de datos (string) y poderlos manipular en el círculo 5.

5. Habiendo manipulado la cadena de datos string se deben nuevamente convertir a números y presentarlos en 2 dimensiones. Posteriormente, esos números arreglados se convierten a cadena fraccionaria con ancho de 10 y dígitos de precisión 6.

6. Los elementos de texto Tiempo (s) y Temperatura 0 hasta Temperatura 3 (°C) serán los nombres de los datos que se almacenarán en un Tabla de excel y que se envían a una construcción de tipo arreglo.

7. De los datos en cadenas fraccionarias de círculo 5 y 6 se envían a un nuevo icono de arreglo para la elaboración de una matriz de datos, después a un icono para la creación de ese arreglo a datos en cadena de hoja de cálculo de excel; aquí se indica que se guarda el archivo en ese formato, esto ocurre al presionar el botón "paro".

Finalmente, al presionar paro en el panel frontal y esperar el último monitoreo de los 30 segundos quedará terminada la adquisición de datos de la prueba experimental en cuestión.

RESULTADOS

Una vez terminado el proceso de adquisición de datos de las corridas experimentales realizadas en varios días y para cada aire acondicionado tipo convencional e inverter, se usó el programa con el instrumento virtual (vi) explicado anteriormente para la comprobación de la funcionalidad de los termopares instalados y el monitoreo de las temperaturas con el sistema SCADA, se realizaron varias pruebas (una diaria con un horario de 11:30 hr a 19:40 hr aproximadamente), tomando en cuenta que las temperaturas ambientales en el puerto en el mes de marzo y abril son medias y altas. En las siguientes figuras mostramos algunos de los comportamientos de los perfiles de temperaturas registrados.

De la Figura 6 a la 9, se muestran los perfiles de temperatura de los sistemas de aire acondicionado on-off e inverter en operación durante la experimentación, con las temperaturas Interior (T1) y Exterior (T2) de diferentes fechas de marzo de 2023.

El perfil de temperatura exterior (línea roja) presenta un comportamiento relacionado con la distribución de la irradiación solar. Mientras que, el perfil de temperatura interior (línea negra) está relacionada con la dinámica del uso del laboratorio con respecto a número de estudiantes durante el periodo de medición número, de aperturas de puerta que incrementan la ganancia térmica en el interior, equipos electrónicos como laptop, video proyector y misceláneos que se usaron.

Las Figuras 6 y 7 presentan los parámetros de perfil de temperaturas del aire acondicionado on-off, Interior (T1) y Exterior (T2) de fecha 06 y 14 de marzo de 2023. Tales distribuciones de temperatura corresponden al periodo de utilización del aire acondicionado. La temperatura espacial interior fue de alrededor de 23 °C cuando en el equipo se estableció una temperatura de set-point de 18 °C. Se resalta el cambio del comportamiento en periodos de desocupación del laboratorio durante el cual el aire acondicionado se apagaba. Esto ocasionó un incremento abrupto en la temperatura es-

pacial interna. La Figura 6 presenta tal incremento justo antes de las 14 horas (como lo indica la flecha azul insertada en la Figura 6).

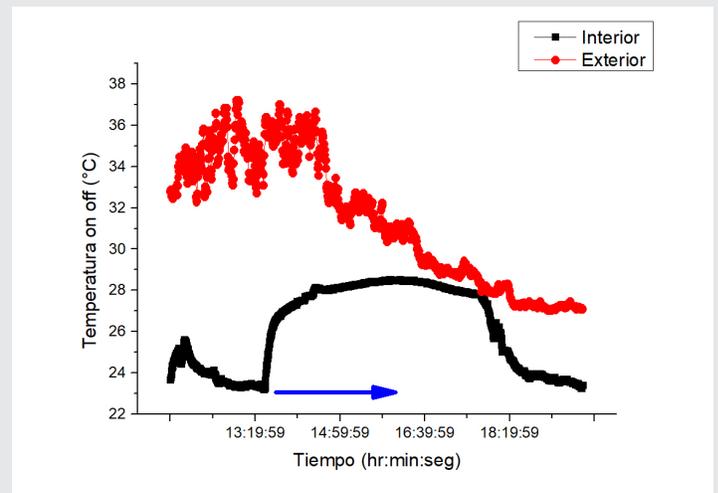


Figura 6 Parámetros de perfil de temperaturas aire acondicionado on-off, Interior (T1) y Exterior (T2) de fecha 06 de marzo. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la Figura 7, el perfil de temperatura espacial interior muestra un decremento abrupto después de las 16 horas (como lo indica la flecha azul insertada en la Fig. 7). Eso coincide con el encendido del aire acondicionado. Sin embargo, estos comportamientos preliminares resultan parciales debido al periodo de ocupación y desocupación del laboratorio. Por lo tanto, se requirió monitorear la temperatura en el laboratorio en periodos de aplicación homogéneos como se muestra en los siguientes resultados. Este tipo de estudio de monitoreo de temperatura es de utilidad para controlar sistemas de aire acondicionado on-off. Por ejemplo, las referencias [13], [14] analizan una estrategia óptima de control on-off para mejorar el proceso de utilización del aire acondicionado.

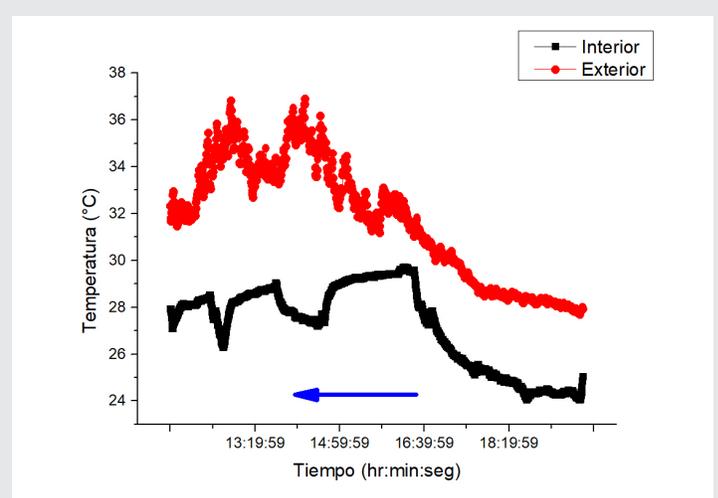


Figura 7 Parámetros de perfil de temperaturas aire acondicionado on-off, Interior (T1) y Exterior (T2) de fecha 14 de marzo. Fuente: Elaboración propia

Las Fig. 8 y 9 exhiben los parámetros que describen el perfil de temperaturas tanto del aire acondicionado inverter en el interior (T1) como en el exterior (T2), registrados el 05 y el 13 de marzo de 2023, respectivamente. Estos registros representan las condiciones de temperatura durante el uso del sistema de aire acondicionado. La temperatura espacial interior fue de alrededor de 25 °C cuando en el equipo se estableció una temperatura de set-point de 18 °C.

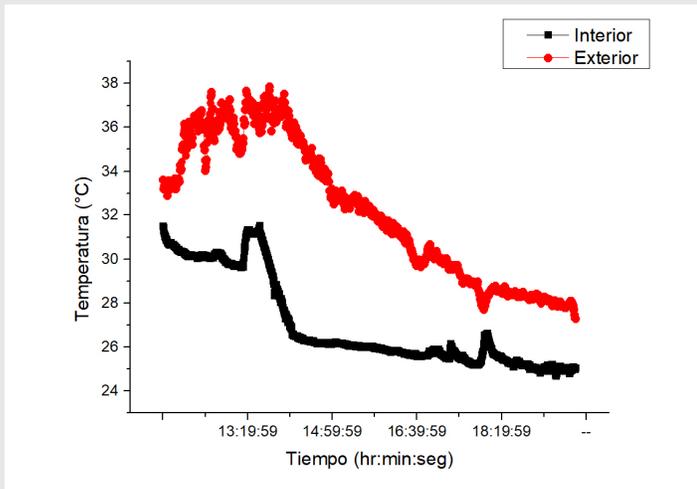


Figura 8 Parámetros de perfil de temperaturas aire acondicionado inverter, Interior (T1) y Exterior (T2) de fecha 13 de marzo. Fuente: Elaboración propia.

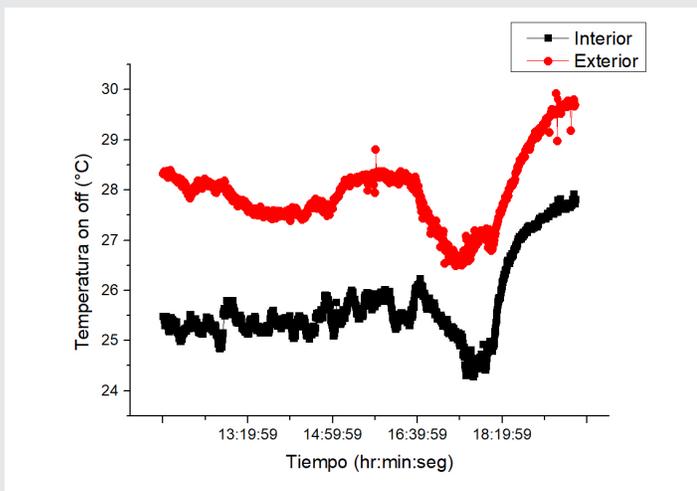


Figura 9 Parámetros de perfil de temperaturas aire acondicionado inverter, Interior (T1) y Exterior (T2) de fecha 5 de marzo 2024. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la distribución de temperaturas interior, como se muestra en la Figura 8, se asemeja a la registrada en el exterior, un fenómeno que también se refleja en la Fig. 9. Esta similitud en el comportamiento se atribuye al ajuste característico del variador de frecuencia del sistema de aire acondicionado inverter [15].

CONCLUSIONES

En este artículo se implementó un sistema SCADA con una instrumentación y programación para el muestreo en línea de temperaturas dentro y fuera de un recinto. Los resultados mostraron que las temperaturas tanto la interior como la exterior pueden proporcionar información sobre la evolución del proceso del confort de la temperatura dentro del inmueble, incluidos los efectos de la temperatura exterior y la posible aparición de no linealidades dentro de la temperatura interior y en algunas ocasiones a mecanismos como la falta de energía eléctrica, o apertura de puerta, etc., debido a los cambios en el perfil de enfriamiento o confort del recinto que se tenía en las pruebas.

Si bien los resultados del procesamiento de los datos de los perfiles de temperaturas se centraron en los gradientes dentro y fuera del mismo, la forma de estos perfiles tiene un enfoque para la adquisición de los datos de las temperaturas de equipos tipo mini Split tipo inverter y tipo convencional y que esta investigación se puede utilizar para complementar la evolución de los equipos de otras marcas y modelos.

En este trabajo nos hemos centrado principalmente en la instrumentación y la programación en lenguaje G para monitorear las temperaturas dentro y fuera de un recinto para tener un confort de temperatura deseada, todo esto usando equipos y software apropiados. Sin embargo, se reconoce que para algunos de ellos se necesita saber si son compatibles o si se requiere de cierto grado de capacitación.

Como se indicó, previamente en la introducción, la aplicación de estos sistemas de adquisición de datos es más confiable, y logran monitorear, almacenar, graficar, etc., los datos de temperaturas como se explicó en las secciones anteriores.

Los resultados de todas las pruebas en línea deberían conducir a una caracterización más completa de los equipos de aires acondicionados tipo inverter y tipo convencional, pero esto es ideal para otro tipo de investigación más profunda.

Finalmente, dada la complejidad del comportamiento de los perfiles de temperaturas y las formas del comportamiento de los días, que no siempre fueron los mismos al igual que se alternó la operación de los equipos de aire acondicionado (on-off e inverter), se entiende que el análisis de temperaturas en línea si es posible con la implementación de este trabajo experimental, pero debe usarse sólo como un indicador rápido de la dinámica de las temperaturas y las determinaciones resultantes (perfiles de temperaturas) debe complementarse fuera de línea para poder tener y dar un criterio de la eficiencia térmica para los equipos de aire acondicionado bajo pruebas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al Laboratorio Sistemas Energéticos de la Facultad de Ingeniería Región Veracruz de la Universidad Veracruzana, por dejarnos usar sus instalaciones, así como a la Dirección de Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales del Programa Educativo Ingeniería Mecánica Eléctrica, también al cuerpo académico UV-541 por el apoyo brindado en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Rizzardi, S. Sicari, and A. Coen-Porisini, "Towards rapid modeling and prototyping of indoor and outdoor monitoring applications," *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 41, no. November 2023, p. 100951, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.suscom.2023.100951.
- [2] Y. Zhang et al., "Experimental study and performance evaluation of an air source heat pump (ASHP) system with a frost-free evaporator," *J. Clean. Prod.*, vol. 448, p. 141469, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141469.
- [3] F. D. Agbajor and M. C. Mewomo, "Green building research in South Africa: A scoping review and future roadmaps," *Energy Built Environ.*, vol. 5, no. 2, pp. 316–335, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.enbenv.2022.11.001.
- [4] L. O. Aghenta and M. T. Iqbal, "Low-Cost, Open Source IoT-Based SCADA System Design Using Thinger.IO and ESP32 Thing," *Electronics*, vol. 8, no. 8, p. 822, Jul. 2019, doi: 10.3390/electronics8080822.
- [5] P. He, P. Liu, Y. (Lucy) Qiu, and L. Liu, "The weather affects air conditioner purchases to fill the energy efficiency gap," *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–8, 2022, doi: 10.1038/s41467-022-33531-2.
- [6] S. Chen, G. Zhang, X. Xia, S. Setunge, and L. Shi, "A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings," *Energy Build.*, vol. 216, p. 109944, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109944.
- [7] T. C. Quevedo, M. S. Geraldi, A. P. Melo, and R. Lamberts, "Benchmarking energy consumption in universities: A review," *J. Build. Eng.*, vol. 82, p. 108185, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.job.2023.108185.
- [8] A. Nita, Y. Sunityoso, A. R. Tiara, and A. A. Kim, "Exploring decision making factors in public buildings' energy efficiency projects," *Energy Build.*, vol. 298, p. 113563, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113563.
- [9] D. L. Clark, R. H. Cockrum, E. T. Ibrahim, and R. F. Smith, "Simulation and emulation of biomedical instrumentation systems using object-oriented-programming," in *Proceedings of WESCON '94*, 1994, no. c, pp. 420–425, doi: 10.1109/WESCON.1994.403561.
- [10] NASA, "Prediction Of Worldwide Energy Resources," 2024. <https://power.larc.nasa.gov/> (accessed Feb. 20, 2024).
- [11] J. Yang, Y. Yang, D. Sun, C. Jin, and X. Xiao, "Influence of urban morphological characteristics on thermal environment," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 72, no. March, p. 103045, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103045.
- [12] M. Zhang, S. Tan, C. Zhang, and E. Chen, "Machine learning in modelling the urban thermal field variance index and assessing the impacts of urban land expansion on seasonal thermal environment," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 106, p. 105345, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105345.
- [13] M. Al-Azba, Z. Cen, Y. Remond, and S. Ahzi, "An Optimal Air-Conditioner On-Off Control Scheme under Extremely Hot Weather Conditions," *Energies*, vol. 13, no. 5, p. 1021, Feb. 2020, doi: 10.3390/en13051021.
- [14] D. Hu, C. Qiu, D. Lu, J. Wang, H. Huang, and H. Xue, "An intelligent thermal comfort control strategy for air conditioning of fuel cell vehicles," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 248, p. 123286, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123286.
- [15] A. Esmael Nezhad, A. Rahimnejad, and S. A. Gadsden, "Home energy management system for smart buildings with inverter-based air conditioning system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 133, no. June, p. 107230, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107230.

