

## Optimización del Mantenimiento de Equipos de Climatización mediante Monitoreo en Tiempo Real y Análisis de Disponibilidad

<sup>1</sup>Simón Pérez Echavarría, <sup>1</sup>Fernando Jesús Guevara Carazas, <sup>1</sup>Alejandro Londoño Rodas

<sup>1</sup>Departamento de ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín  
spereze@unal.edu.co, fjguevarac@unal.edu.co, alondon0@unal.edu.co

### Resumen

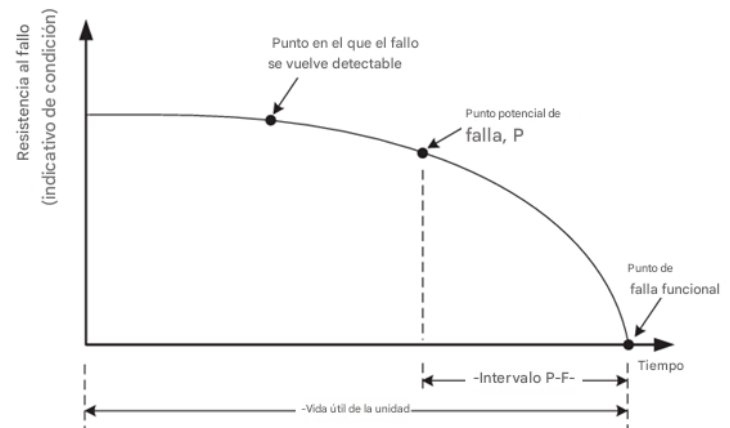
Este trabajo presenta un enfoque integral para la gestión del mantenimiento de equipos de climatización industrial basado en la recolección; el análisis de datos en tiempo real y la visualización de los datos de manera dinámica. A partir de variables recolectadas directamente de los equipos. Estas variables se utilizan para modificar la criticidad de los equipos, permitiendo modificar la programación de los equipos basado en su condición.

### Introducción

Los procesos de refrigeración y climatización industrial son importantes en una variedad de industrias, especialmente en la alimentaria, farmacéutica, química y manufacturera. Su objetivo principal es enfriar o conservar productos y espacios a temperaturas específicas para garantizar la calidad, seguridad y eficiencia operativa. El sistema HVAC desempeña un papel importante en el consumo energético general de los edificios y representa entre el 50% y el 60% de la energía utilizada en los edificios [1]. Adicionalmente, entre un 15% y 30% de las pérdidas de energía en los sistemas de refrigeración son debidas al desgaste, disminución en el desempeño, control inapropiado y malfuncionamiento [2]. Los sistemas modernos de monitoreo tienen la capacidad de registrar grandes cantidades de datos operativos de los equipos, para que estos sistemas mejoren la eficiencia y el rendimiento, los datos deben presentarse como una herramienta de decisión intuitiva para los operadores [3].

La curva P-F [13] indica el punto en el que se puede detectar la falla de un equipo que se está monitoreando. Este punto se indica como el punto de falla potencial, P, ver Fig 1. Desde el inicio de la vida

útil de un equipo hasta un cierto punto, la falla es indetectable porque todos los parámetros del equipo que se está monitoreando, como la temperatura, la vibración, el análisis del aceite lubricante, etc., indican que el equipo se encuentra en un estado de salud que no tiene fallas detectables. Sin embargo, la falla incipiente se vuelve detectable en un momento determinado cuando comienzan a producirse desviaciones. El tiempo desde el punto real de detección de la falla potencial hasta el punto de falla funcional se conoce como intervalo P-F. Es deseable que el intervalo P-F sea suficiente tanto para la toma de decisiones como para la actividad real de mantenimiento y extensión de la vida útil [4].



**Fig 1.** Curva PF típica. Ochella, S., Shafiee, M., & Sansom, C. (2021). Adopting machine learning and condition monitoring P-F curves in determining and prioritizing high-value assets for life extension.

Tras la recopilación de datos operativos de un equipo, es esencial llevar a cabo un proceso riguroso de limpieza y depuración para eliminar valores atípicos, inconsistencias y datos faltantes, asegurando que la información refleje fielmente las

condiciones reales de operación. Este paso es crítico para la construcción de un gemelo digital, el cual permite simular y predecir el comportamiento del equipo bajo diversas condiciones. El presente trabajo muestra el resultado del diseño de un dashboard técnico que facilite el monitoreo continuo de variables clave de los equipos de climatización. Este sistema integra la evaluación de la condición operativa del equipo para ajustar dinámicamente su criticidad, permitiendo una posible anticipación efectiva al intervalo P-F. De esta manera, se optimizan las estrategias de mantenimiento predictivo, posibilitando la ejecución de intervenciones antes de que las fallas progresen a niveles críticos, con el fin de maximizar la disponibilidad del equipo y prolongar su tiempo medio entre fallas (MTBF).

## Adquisición y preprocesamiento de datos

### Definición de variables fundamentales

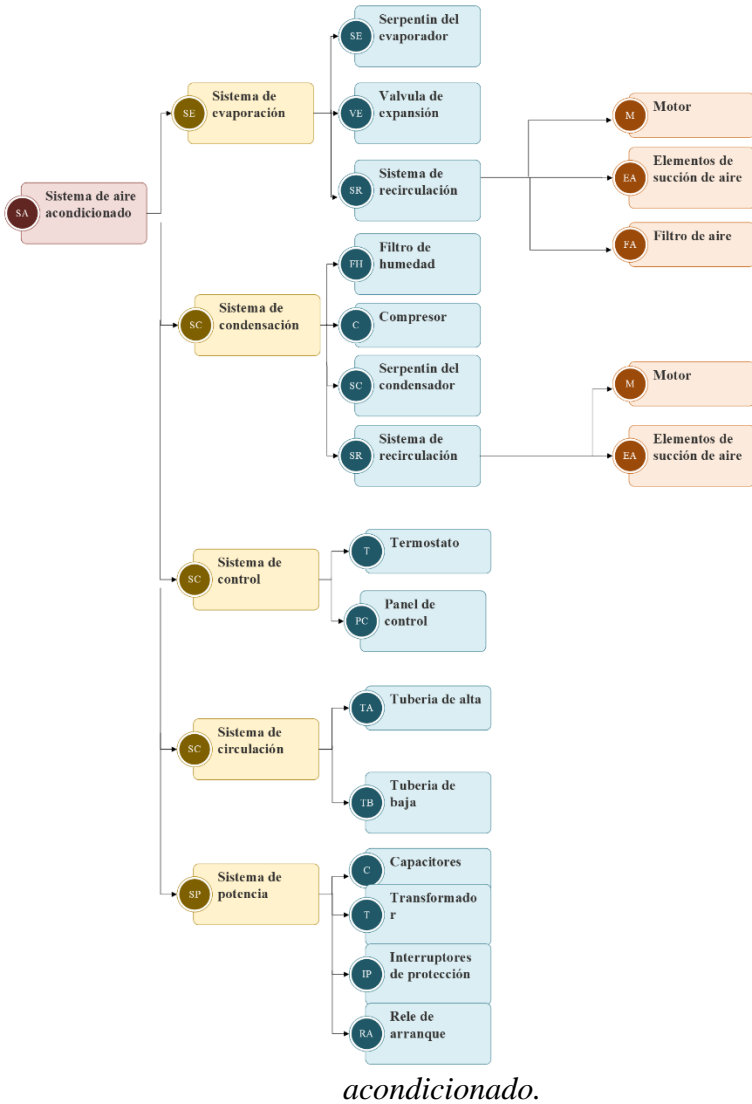
El desarrollo del dashboard requiere la construcción de una base de datos suficientemente representativa para realizar análisis significativos. Es esencial que los datos recopilados permitan identificar tendencias claras; de lo contrario, no aportarán información relevante para la toma de decisiones. Como paso inicial, se necesario definir los parámetros más críticos del sistema de climatización, priorizando aquellos con mayor impacto en su desempeño operativo. Además, es necesario garantizar que las variables seleccionadas tengan una correlación débil entre sí, ya que la existencia de correlaciones fuertes, ya sean positivas o negativas, genera redundancia en la información y puede comprometer la calidad del análisis [7].

El diagrama FAST proporciona una representación gráfica de cómo las funciones están vinculadas o trabajan juntas en un sistema (producto o proceso) para entregar los bienes o servicios previstos. Al centrarse en las funciones, los equipos y las personas pueden centrarse en lo que es realmente importante y no verse limitados por las características físicas de los productos o procesos, lo que conduce a una mejor definición del problema y a un camino más claro

hacia una solución [5]. Este método descompone el sistema en subsistemas y, finalmente, en componentes individuales. En la Fig. 2 se presenta el diagrama FAST, que permite definir las variables clave para evaluar el estado operativo del sistema:

- **Temperatura del termostato:** Es una variable que refleja el desempeño global del sistema, permitiendo identificar desviaciones en su funcionamiento.
- **Presión de alta y presión de baja:** Estas variables son fundamentales para evaluar el comportamiento del ciclo de refrigeración. Además, se utilizan para calcular parámetros críticos como el sobrecalentamiento y el subenfriamiento. El **sobrecalentamiento** se refiere a la diferencia de temperatura entre el refrigerante en estado gaseoso y su temperatura de evaporación, mientras que el **subenfriamiento** es la diferencia de temperatura entre el refrigerante líquido y su temperatura de condensación. Estos parámetros son esenciales para garantizar un rendimiento eficiente del sistema.
- **Consumo eléctrico:** Es necesario medir el consumo eléctrico en las tres fases del motor de la unidad condensadora. Esto asegura que ninguna de las fases esté desfasada, ya que un desfase podría causar un desgaste prematuro de las bobinas del motor. Este desgaste puede activar el protector térmico embebido en el compresor, lo que eventualmente requeriría reemplazar todo el sistema, ya que dicha protección no es reparable de manera independiente.
- **Registros de mantenimiento:** Cada actividad de mantenimiento debe estar asociada a una orden de trabajo que detalle claramente el tiempo requerido para su ejecución. Estos registros son esenciales para calcular indicadores clave como el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR), los cuales son indicadores fundamentales para evaluar la confiabilidad y la disponibilidad del sistema.

Fig 2. Diagrama FAST del sistema de aire



**Metodología para el proceso de medición**

Para la adquisición y gestión de los datos, se emplea un CMMS (Computerized Maintenance Management System). Este sistema de gestión computarizada de mantenimiento permite programar actividades de mantenimiento preventivo y correctivo, así como registrar tiempos de intervención y las variables medidas por el equipo de mantenimiento. Para organizar y centralizar los datos

necesarios, se implementa una API de comunicación que integra el CMMS con Google Sheets, lo que facilita la estructuración y análisis de la información recopilada.

Debido al gran número de activos gestionados, se identifican los equipos más críticos, definidos como aquellos cuya falla puede detener la producción o que operan de manera continua las 24 horas del día, los 7 días de la semana. Para estos equipos críticos, se lleva un registro diario de la temperatura del termostato, lo cual permite un monitoreo continuo de su condición operativa y la detección temprana de posibles anomalías.

**Manejo de valores faltantes**

En la Tabla 1 (a) se presenta la estructura de las temperaturas registradas. Sin embargo, debido a limitaciones logísticas, existen zonas donde el acceso del personal no es posible de manera diaria, lo que genera valores faltantes en los registros de algunos equipos. Para gestionar estos valores faltantes, se emplea un método de media móvil, donde el dato ausente se calcula como el promedio entre el valor registrado inmediatamente anterior y el valor inmediatamente siguiente, esta metodología se puede apreciar de mejor manera en la Tabla 1 (b). Este enfoque permite mantener la coherencia en la serie temporal de datos y evita alterar de manera significativa la tasa de cambio de la variable, asegurando así la confiabilidad de los análisis posteriores.

Fecha	Equipo	Temperatura
08/10/2024	Equipo 1	22
08/10/2024	Equipo 2	20
08/10/2024	Equipo 3	23.5
09/10/2024	Equipo 1	21
09/10/2024	Equipo 2	
09/10/2024	Equipo 3	24
10/10/2024	Equipo 1	22
10/10/2024	Equipo 2	23
10/10/2024	Equipo 3	23

Tabla 1 (a). Estructura de datos originales de temperaturas de termostato.

Fecha	Equipo	Temperatura
08/10/2024	Equipo 1	22

08/10/2024	Equipo 2	20
08/10/2024	Equipo 3	23.5
09/10/2024	Equipo 1	21
09/10/2024	Equipo 2	<u>20 + 23</u> 2
09/10/2024	Equipo 3	24
10/10/2024	Equipo 1	22
10/10/2024	Equipo 2	23
10/10/2024	Equipo 3	23

**Tabla 1 (b).** Estructura de datos después de manejar valores ausentes de temperaturas de termostato.

### Manejo de valores atípicos

En la etapa final del procesamiento de datos, es necesario manejar los valores atípicos, definidos como aquellos que se desvían significativamente de la tendencia general de los datos. Para identificar estos valores, se utiliza el rango intercuartílico (IQR, por sus siglas en inglés), una medida estadística que representa la dispersión en un conjunto de datos al calcular la diferencia entre el tercer cuartil (Q3) y el primer cuartil (Q1). El rango intercuartílico se calcula como se detalla en la ecuación (1).

$$IQR = Q3 - Q1 \quad \text{ecuación (1)}$$

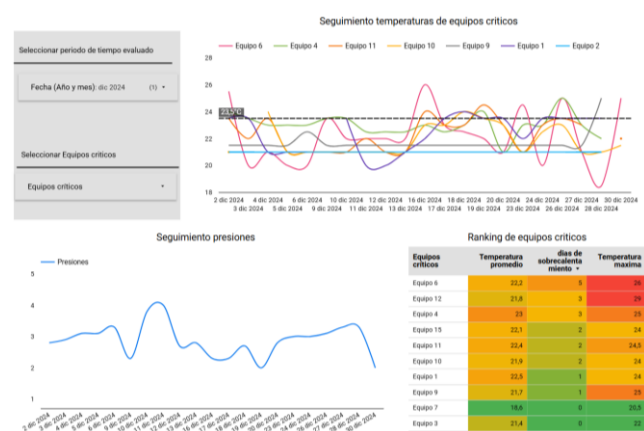
A partir del IQR, se establecen los límites conocidos como bigotes superior e inferior. Por recomendación, el bigote superior se define como  $Q3 + 1.5 * IQR$ , mientras que el bigote inferior se establece como  $Q1 - 1.5 * IQR$ . Cualquier dato que se encuentre por debajo del bigote inferior o por encima del bigote superior se clasifica como un valor atípico.

Es importante señalar que, al identificar valores atípicos, estos no deben ser descartados de inmediato. Antes de eliminarlos del análisis, se debe realizar una verificación de las condiciones del equipo. Los valores fuera de lo normal pueden representar una señal de alerta sobre un posible problema operativo, por lo que su análisis debe ser considerado cuidadosamente dentro del contexto del sistema.

### Visualización de datos y modificación de la criticidad basada en condición

Una vez preprocesados los datos necesarios, estos se integran con una herramienta de visualización de datos; en este caso, se utiliza Looker Studio. La vinculación permite crear registros de las variables monitoreadas a lo largo del tiempo y organizar la criticidad de los equipos en función de dichas variables. Por ejemplo, en la Fig. 4 se presenta el parámetro de temperatura para los equipos críticos, donde se muestra una tabla que ajusta dinámicamente la criticidad del equipo en función de ciertos criterios predefinidos.

Entre estos criterios se incluyen el número de días consecutivos en los que se ha detectado sobrecalentamiento elevado (definido como temperaturas superiores a  $23.5^{\circ}\text{C}$ ), la temperatura promedio durante el periodo evaluado y el pico máximo de temperatura alcanzado. La medición del sobrecalentamiento en los sistemas HVAC&R (Calefacción, Ventilación, Aire Acondicionado y Refrigeración) es clave para detectar fallas potenciales, ya que proporciona información sobre el estado y eficiencia del sistema de refrigeración. Estos indicadores permiten una evaluación de la condición operativa del sistema y proporcionan información clave para priorizar acciones de mantenimiento antes de que ocurra una falla crítica.



**Fig 3.** Dashboard [Sección de seguimiento de temperaturas].



Ranking de equipos criticos

Equipos criticos	Temperatura promedio	dias de sobrecalentamiento	Temperatura maxima
Equipo 6	22,2	5	26
Equipo 12	21,8	3	29
Equipo 4	23	3	25
Equipo 15	22,1	2	24
Equipo 11	22,4	2	24,5
Equipo 10	21,9	2	24
Equipo 1	22,5	1	24
Equipo 9	21,7	1	25
Equipo 7	18,6	0	20,5
Equipo 3	21,4	0	22

Fig 4. Tabla de seguimiento a la criticidad en base a la condición del equipo.

Con los tiempos de mantenimiento registrados, se calculan indicadores clave como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y el Tiempo Medio Para Reparar (MTTR). A partir de estas dos métricas, se puede determinar la **disponibilidad** del equipo, una medida fundamental en mantenimiento que refleja el porcentaje de tiempo en que un equipo se encuentra operativo y disponible para cumplir con su función. La disponibilidad se calcula utilizando la ecuación (2).

$$Disponibilidad = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

ecuación (2)

Donde:

**MTBF (Mean Time Between Failures)** representa el promedio de tiempo entre dos fallas consecutivas del equipo, indicando su confiabilidad.

**MTTR (Mean Time to Repair)** es el tiempo promedio requerido para restaurar el equipo a su estado operativo tras una falla, reflejando la eficiencia del proceso de mantenimiento.

Como se observa en la Fig. 6, la disponibilidad del equipo ha mostrado una tendencia al alza, lo

que indica una mejora en la confiabilidad operativa y en la capacidad del sistema para realizar intervenciones de mantenimiento de manera eficiente.

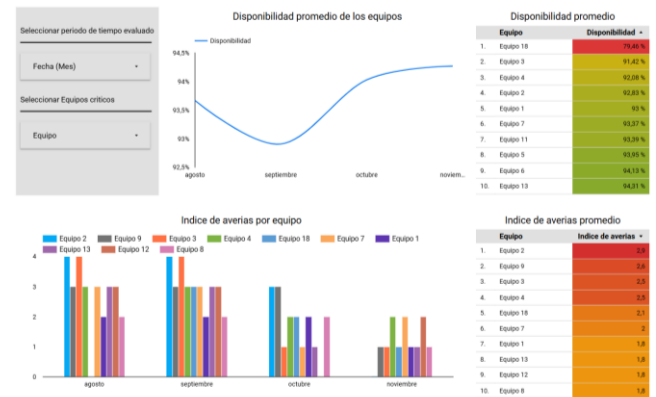


Fig 5. Dashboard [Sección de seguimiento de disponibilidad].

Disponibilidad promedio de los equipos

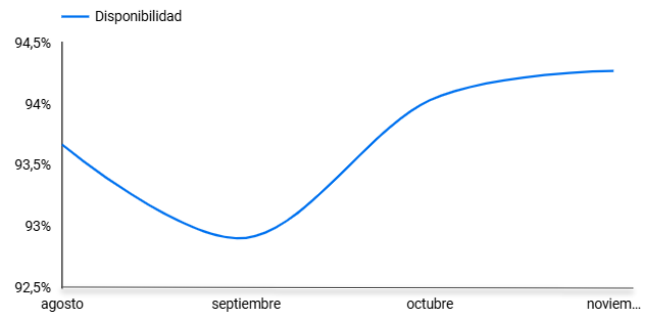


Fig 6. Histórico de disponibilidad de los equipos.

Conclusiones

Un enfoque integral para la gestión del mantenimiento de equipos de climatización industrial, basado en la recolección y análisis de datos de los sistemas, permite mejorar la eficiencia operativa y optimizar la planificación del mantenimiento.

El diagrama FAST facilita la definición de variables críticas, evitando redundancias y asegurando datos de calidad. El tratamiento de datos, mediante promedios móviles e identificación de valores atípicos, mejora la precisión del análisis. La integración de un CMMS con herramientas de

visualización optimiza la gestión de activos y la trazabilidad del mantenimiento.

## Bibliografía

- [1] Friedrich S. Energy efficiency in buildings in EU countries. CESifo DICE Rep 2013;11(2):57–9.
- [2] S. Wang, Q. Zhou and F. Xiao, “A system-level fault detection and diagnosis strategy for HVAC systems involving sensor faults,” *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 4, pp. 477–490, 2010.
- [3] Green, D., Kane, T., Kidwell, S., Lindahl, P., Donnal, J., & Leeb, S. (2020). NILM dashboard: Actionable feedback for condition-based maintenance. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 23(5), 3-10. <https://doi.org/10.1109/mim.2020.9153467>
- [4] Ochella, S., Shafiee, M., & Sansom, C. (2021b). Adopting machine learning and condition monitoring P-F curves in determining and prioritizing high-value assets for life extension. *Expert Systems With Applications*, 176, 114897. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114897>
- [5] Borza, J. (2011). FAST diagrams: The foundation for creating effective function models. *General dynamics land systems*.
- [6] Mesa, M. V. C., Patino-Rodriguez, C. E., Carazas, F. J. G., Gunawan, I., & Droguett, E. L. (2021). Asset management strategies using ]reliability, availability, and maintainability (RAM) analysis. *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 43(11). <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03222-y>
- [7] García, S., Ramírez-Gallego, S., Luengo, J. *et al.* Big data preprocessing: methods and prospects. *Big Data Anal* 1, 9 (2016). <https://doi.org/10.1186/s41044-016-0014-0>
- [8] Alasadi, S. A., & Bhaya, W. S. (2017). Review of data preprocessing techniques in data mining. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(16), 4102-4107.
- [9] Singh, V., Mathur, J., & Bhatia, A. (2022). A comprehensive review: Fault detection, diagnostics, prognostics, and fault modeling in HVAC systems. *International Journal of Refrigeration*, 144, 283-295.
- [10] Campos-López, O., Tolentino-Eslava, G., Toledo-Velázquez, M., & Tolentino-Eslava, R. (2019). Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos. *Científica*, 23(1), 51-59.
- [11] Sikos, L., & Klemeš, J. (2010). Reliability, availability and maintenance optimisation of heat exchanger networks. *Applied Thermal Engineering*, 30(1), 63-69.
- [12] Qiu, Q., Cui, L., & Gao, H. (2017). Availability and maintenance modelling for systems subject to multiple failure modes. *Computers & Industrial Engineering*, 108, 192-198.
- [13] Flores Escobar, C. F., & Paguay Guachilema, V. H. (2022). Determinación de la curva de densidad de probabilidades del intervalo PF del desgaste del rodamiento 6202 y su variación en función de la carga.