

DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS NO CRÍTICOS EN SISTEMAS DE AIRE ACONDICIONADO BASADOS EN UNA MONITORIZACIÓN A LARGO PLAZO

Belén Llopis-Mengual^{1*}, David P. Yuill², y Emilio Navarro-Peris¹

1: Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería Energética (IUIIE), Universitat Politècnica de València (UPV), Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain

e-mail: belen.llopis@iie.upv.es

2: Durham School of Architectural Engineering and Construction, University of Nebraska – Lincoln, 1110 S. 67th Street, Omaha, NE, 68182, USA

Resumen: *El presente estudio se centra en la detección de fallos no críticos en sistemas de aire acondicionado, como la carga insuficiente debida a fugas a lo largo del tiempo o un caudal inadecuado de aire en la unidad exterior (condensador) debido a suciedad u hojas que pueden bloquear la salida de aire. Se realiza con datos de campo de sistemas de aire acondicionado residenciales de Estados Unidos. Mientras que las metodologías existentes de detección y diagnóstico de fallos se centran en medidas experimentales realizadas en laboratorio, esta investigación utiliza datos de campo monitorizados durante un largo plazo para detectar y evaluar la evolución de los fallos a lo largo del tiempo. La metodología empleada para detectar fugas se basa en un sensor de carga virtual de refrigerante (Virtual Refrigerant Charge, VRC). La metodología requiere añadir un paso previo de procesamiento de datos y detección del estado estacionario. Adicionalmente, el análisis realizado en este trabajo introduce indicadores clave de degradación del rendimiento a lo largo del tiempo, ofreciendo una visión de la degradación del sistema durante los periodos de mal funcionamiento. Este enfoque puede ayudar a detectar fallos con mayor antelación para realizar su mantenimiento y reparación a tiempo.*

Palabras clave: fallos no críticos, fugas, detección de fallos y diagnóstico, aire acondicionado, datos de campo

1. INTRODUCCIÓN

En los sistemas de aire acondicionado pueden existir fallos que hagan que la unidad continúe funcionando pero no de manera óptima. Por ello, es necesario desarrollar métodos de detección para realizar un mantenimiento adecuado antes de que se conviertan en fallos mayores. Hoy en día, cada vez se están incorporando más digitalización a estos sistemas, permitiendo una monitorización de las unidades almacenando datos en la nube que de manera telemática se pueden procesar y utilizar para realizar mantenimientos predictivos. Algunos ejemplos de ello son los trabajos que utilizan datos del termostato, que la mayoría de unidades de aire acondicionado residenciales incorporan, como los trabajos realizados en [1], [2], que utilizan datos de unidades que incorporan un termostato *smart* para analizar cambios en la capacidad que indiquen la aparición de fallos. Sin embargo, los datos que incorporan los termostatos pueden ser insuficientes para detectar y diagnosticar el tipo de fallos que puede haber, por lo que este trabajo pretende utilizar un dispositivo que monitoriza algunas variables del ciclo de refrigeración de las unidades y lo almacena en la nube, permitiendo un análisis más extenso para aplicar métodos de detección y diagnóstico en las unidades monitorizadas. Esto, además de la detección de fallos, permite un análisis de cuánto se degrada la unidad desde que se da el fallo y no se repara con el tiempo, de lo cual no se disponen datos de campo para analizarlo.

2. METODOLOGÍA

Este estudio analiza los datos monitorizados con el dispositivo SENTREE de la empresa AlertLabs [3] en unidades de aire acondicionado residenciales en Estados Unidos. Este dispositivo tiene los siguientes sensores: dos de presión localizados en la succión del compresor (P_{suc}) y en la línea de líquido (salida del condensador, P_{LL}); dos de temperatura en la succión del compresor (T_{suc}) y en la línea de líquido (T_{LL}), y uno de corriente eléctrica de la unidad. Además, registra la temperatura ambiente exterior (T_{amb}) que hay donde está localizada la unidad. El objetivo es detectar si a lo largo de los meses en los que se ha monitorizado su funcionamiento, han sufrido fallos no críticos (*soft faults*) que hayan permitido que la unidad siga funcionando, pero no lo haga de manera óptima. Algunos de estos fallos pueden ser fugas de refrigerante o ensuciamiento o fallo mecánico en la unidad exterior que hagan que el condensador tenga un caudal inadecuado de aire.

2.1. Detección de estado estacionario

El sistema de monitorización funciona tomando datos cada 60 segundos cuando el compresor está apagado, y cada 15 segundos cuando arranca. Como las unidades tienen muchos encendidos y apagados durante el día, es necesario detectar el estado estacionario para poder analizar las medidas con el tiempo sin las que se toman cuando el compresor está apagado o durante los transitorios. Para ello, los criterios que se han seguido son los siguientes:

-Para distinguir el estado del compresor ON/OFF: el dispositivo monitoriza la corriente eléctrica, y por tanto es un buen indicador para ver cuándo el compresor está encendido o apagado. Sin embargo, cuando está apagado, esta corriente registrada no es cero, sino que existe una corriente eléctrica, aunque baja, por lo que se han utilizado las medidas de las dos primeras semanas disponibles para calcular el primer cuartil de la corriente y si a partir de ahí, se encuentran en ese cuartil, ese estado será OFF, y si está por encima, se considera que está ON.

-Cuando el compresor está ON, se debe detectar cuándo un punto está en transitorio o estacionario. Para ello, para cada medida se calcula la media y la desviación estándar de las medidas tomadas durante los 5 minutos anteriores. Esto se hace para P_{suc} , P_{LL} , T_{suc} y T_{LL} . Se establecen umbrales para las medias y las desviaciones estándar, diferentes según sean temperatura o presión. Los umbrales utilizados son 1.1°C para la media de temperatura y 40 kPa para la media de presión. En el caso de la desviación estándar, se usan 0.5°C para la temperatura y 25 kPa para la presión. De esta manera, para saber si una medida está en estado estacionario o no, se considerará que si simultáneamente para los 4 sensores, la diferencia en valor absoluto de la medida y la media del periodo anterior es menor que el umbral para la media dado y, además, la desviación estándar del periodo es menor al umbral para la desviación estándar dado, ese punto se encuentra en estado estacionario.

2.2. Detección de fugas de refrigerante

Para la detección de fugas de refrigerante, se utiliza el *Virtual Refrigerant Charge Sensor* (VRC), desarrollado en [4]. Se trata de una correlación del nivel de carga de refrigerante que tiene una unidad de aire acondicionado con respecto a la que debería tener. En este caso, se ha adaptado la expresión para que el nivel de carga se dé en tanto por uno, y se encuentra en la Ecuación 1:

$$VRC = \frac{1}{K_{CH}} \left((SC - SC_{rat}) - \frac{K_{SH}}{K_{SC}} (SH - SH_{rat}) \right) + 1 \quad (1)$$

En esta expresión, VRC indica el nivel de carga (siendo el valor de VRC=1 la carga que le corresponde), SC es el subenfriamiento (diferencia entre la temperatura de condensación (T_c) y la de la línea de líquido (T_{LL})), SH es el sobrecalentamiento (diferencia entre la temperatura de succión (T_{suc}) y de evaporación (T_e)). SC_{rat} y SH_{rat} se refieren a los valores de SC y SH, respectivamente, que la unidad tiene dadas unas condiciones. En este estudio, se han obtenido como la media de los valores en estacionario durante las dos primeras semanas monitorizadas. Las constantes de la expresión K_{SH}/K_{SC} hacen referencia a la desviación del SC y SH con las condiciones exteriores. Como no se dispone de información para obtenerlas, se utilizan las sugeridas en [4] para utilizar por defecto, que son $K_{SH}/K_{SC}=1/2.5=0.4$. En el caso de la constante K_{CH} , ésta se define según la Ecuación 2:

$$K_{CH} = \frac{SC_{rat}}{(1-\alpha_0) \cdot X_{hs, rat}} \quad (2)$$

En la que α_0 es la proporción de carga de refrigerante necesaria para tener líquido saturado a la salida del condensador en las condiciones *rated* (subíndice *rat*). Es decir, esto indica qué porcentaje ha de disminuir la carga hasta que el subenfriamiento sea 0. $X_{hs, rat}$ se refiere a la proporción de carga de refrigerante que hay en el lado de alta presión de la unidad con respecto al total. Para estas constantes se han utilizado también los valores por defecto de $\alpha_0=0.75$ y $X_{hs, rat}=0.73$, y se ha calculado K_{CH} acorde a ellos.

2.3. Detección de caudal de aire inadecuado en condensador

Para la detección de un caudal de aire inadecuado en el condensador debido a una obstrucción del aire que pasa por el intercambiador exterior por presencia de hojas o suciedad, o de algún fallo mecánico del ventilador que haga que haya menos caudal de aire trasegándose por el condensador, se utiliza la diferencia de temperaturas entre la de condensación y la ambiente ($T_c - T_{amb}$). En el caso de no tener fallo de este tipo y tener una velocidad fija del ventilador por el condensador, este parámetro se debe mantener constante. Sin embargo, en caso de que haya algún fallo que provoque un caudal inadecuado de aire, T_c aumentará y la diferencia con la T_{amb} se hará mayor, observándose que ($T_c - T_{amb}$) aumenta y haciendo visible así el fallo.

2.4. Indicadores de la degradación de la unidad

Además de detectar los fallos de fugas y caudal de aire inadecuado en el condensador, en este estudio se proporcionan indicadores de cuánto se degrada la unidad con el tiempo cuando se dan estos fallos. En caso del fallo de fugas, el principal parámetro que haga que el rendimiento de la unidad disminuya y empeore el COP (*Coefficient of Performance*) es la temperatura de evaporación (T_e), que irá disminuyendo con el tiempo. En caso de que haya caudal de aire inadecuado por el condensador, lo hará la temperatura de condensación (T_c), que aumentará y bajará el COP. Por tanto, para estimar cuánto se desvían T_e o T_c de los valores que deberían tener en función de T_{amb} , se utiliza la correlación de la Ecuación 3, cuyos coeficientes se obtienen para el periodo sin fallos de la unidad:

$$T_{cor} = k_0 + k_1 \cdot T_{amb} + k_2 \cdot T_{amb}^2 \quad (3)$$

De esta manera, cuando se dé un fallo, se producirá una degradación en T_c o T_e , que se define como la diferencia entre la T que se mide bajo el fallo y la T correlacionada con T_{amb} que tendría en caso de no darse el fallo (Ecuación 4):

$$deg_T = T_{medido} - T_{cor} \quad (4)$$

Como no se disponen medidas de flujo másico de refrigerante, no se puede obtener la capacidad del evaporador para obtener el COP. Por ello, se establece un *COP carnot* con T_e y T_c , de los que sí se disponen medidas (Ecuación 5) para medir el rendimiento de la unidad:

$$COP\ carnot = \frac{T_e}{T_c - T_e} \quad (5)$$

De manera similar a lo definido para las temperaturas, se utiliza una correlación con T_{amb} para tener *COP carnot*, cuyos coeficientes se obtienen con las medidas del periodo en el que no se manifiestan fallos (Ecuación 6):

$$COP\ carnot_{cor} = k'_0 + k'_1 \cdot T_{amb} + k'_2 \cdot T_{amb}^2 \quad (6)$$

Así, se puede obtener una degradación del sistema (deg_COP) como la variación porcentual del COP_{carnot} medido y el obtenido con las medidas cuando se tiene un fallo, siendo éste un indicador de lo que se degrada el rendimiento del sistema en caso de aparecer estos fallos (Ecuación 7):

$$deg_COP(\%) = \frac{COP_{carnot_{medido}} - COP_{carnot_{cor}}}{COP_{carnot_{medido}}} \quad (7)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Detección de estado estacionario

La Figura 1 muestra un ejemplo de cómo se detecta el estado estacionario en las unidades monitorizadas. En ella, se observan todas las medidas tomadas de P_{LL} , P_{suc} , T_{LL} y T_{suc} en una unidad durante un periodo de 4 horas, en las que ocurren 4 encendidos y apagados de la unidad. Se observa cómo, utilizando la metodología seguida, tras los arranques se distinguen unos minutos iniciales en los que se produce un transitorio y luego la unidad entra en estacionario, siendo éstas las medidas que se utilizarán para aplicar las metodologías de detección de fallos.

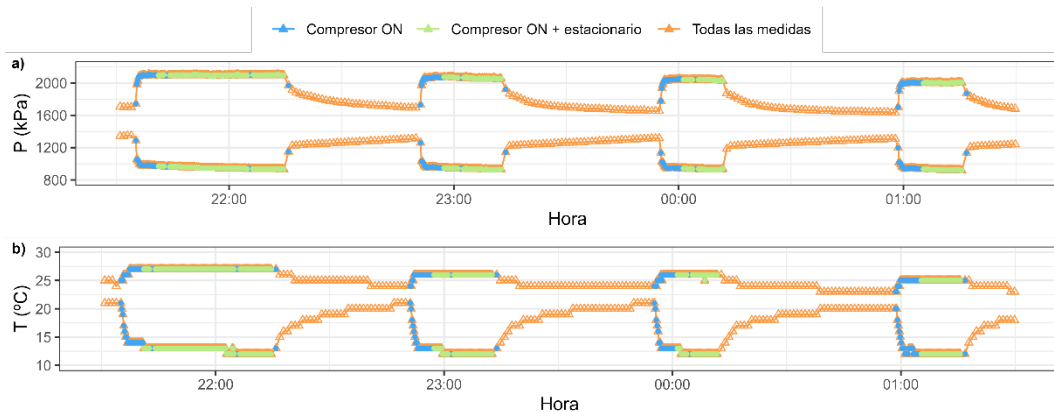


Figura 1. Ejemplo de la detección del estado estacionario en a) las presiones de succión (P_{suc}) y de la línea de líquido (P_{LL}) y b) en las temperaturas de succión (T_{suc}) y de la línea de líquido (T_{LL}).

3.2. Caso 1: Fugas de refrigerante

El Caso 1 corresponde a una unidad monitorizada entre abril y septiembre de 2022 en Odessa, Florida (EE. UU.). La Figura 2 muestra medias diarias de los resultados en a) de VRC de $T_c - T_{amb}$. Además, en la Figura 2b) se observan las medias diarias de las medidas de T_c , T_e y T_{amb} y en c) del SC y SH. Se observa así que a finales de mayo se produce una disminución de VRC, lo que parece manifestar fugas de refrigerante. La principal variable que pone esto de manifiesto es el SH, como se observa en c). Este parámetro lo controla la válvula de expansión termostática, y está fijado en torno a 10K. Sin embargo, al darse una fuga, la válvula empieza a abrir hasta que llega a su apertura máxima, dejando de controlar el SH y por tanto aumentando éste con el tiempo a medida que disminuye la carga de refrigerante en el sistema. Se observa en la Figura 2b), además, cómo T_e disminuye a partir de esta fecha. La diferencia $T_c - T_{amb}$ se mantiene constante durante el período, aunque disminuye hacia al final debido a que la falta de carga empieza a hacer que la T_c disminuya.

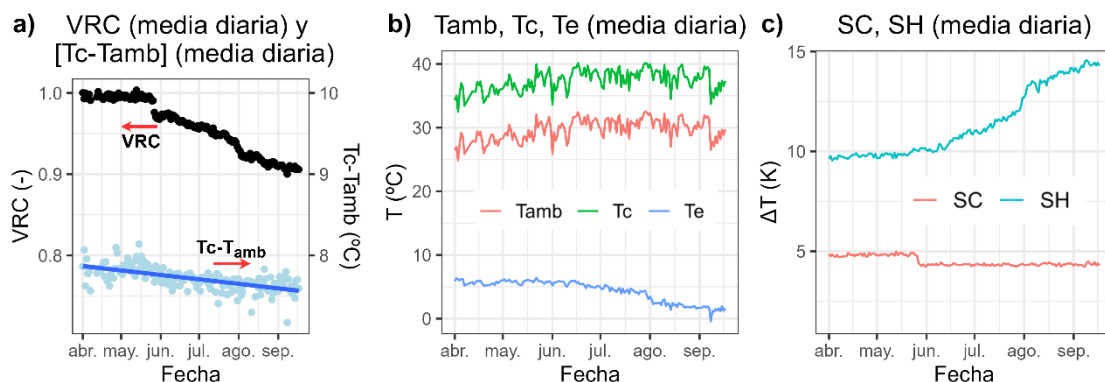


Figura 2. Medias diarias de la unidad del caso 1 de a) VRC y $T_c - T_{amb}$, c) T_{amb} , T_e , T_c y d) SC y SH.

La Figura 3 muestra los parámetros definidos para medir la degradación. Así, en a) se muestra T_e correlacionada con T_{amb} y la medida, y en b) la degradación de ésta con el tiempo. De esta manera, se observa que T_e va disminuyendo en 0.043°C al día con respecto a la que debería tener, resultando tras 3 meses de fugas en una T_e unos 4°C por debajo de la que debería tener la unidad en caso de no fugar. En términos de COP_{carnot} , la Figura 3c) muestra el medido y el correlacionado con T_{amb} , y en d) la degradación de éste con el tiempo. La fuga de refrigerante supone una degradación de 0.148% al día, que tras 3 meses sin detectarse, supone una disminución del 15% .

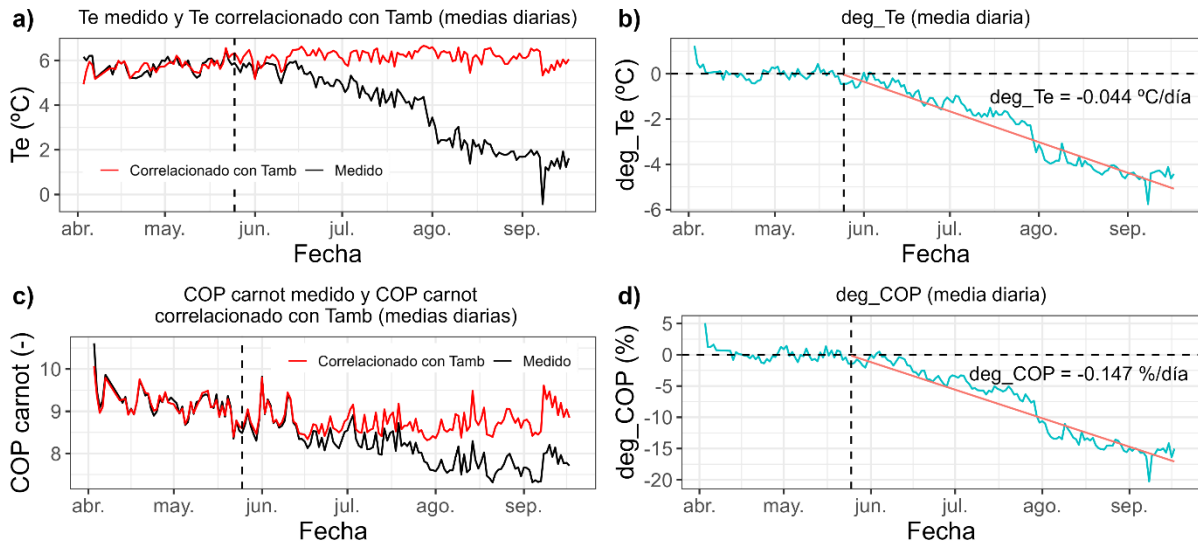


Figura 3. Resultados de los indicadores de degradación de la unidad del caso 1. a) Comparación de T_e medido y el correlacionado con T_{amb} , b) degradación de T_e con el tiempo tras la manifestación del fallo, c) comparación de COP_{carnot} con el correlacionado con T_{amb} , y d) degradación del COP_{carnot} tras la manifestación del fallo.

3.2. Caso 2: Caudal de aire inadecuado en el condensador

El Caso 2 corresponde a una unidad monitorizada entre mayo y agosto de 2022 en Keller, Texas (EE. UU.).

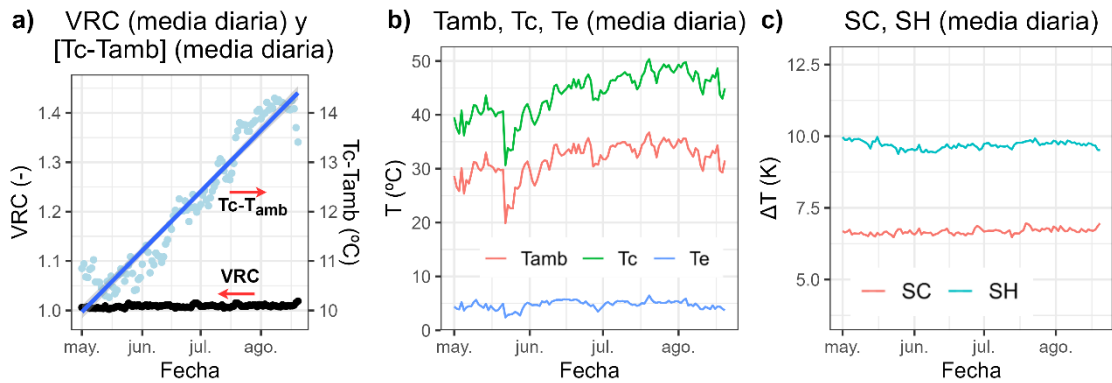


Figura 4. Medias diarias de la unidad del caso 2 de a) VRC y $T_c - T_{amb}$, b) T_{amb} , T_e , T_c y c) SC y SH.

La Figura 4 muestra en a) los resultados de medias diarias con el VRC, que se mantienen en 1 durante el período monitorizado, lo cual parece indicar que no se manifiestan fugas. También se muestran los resultados de la media diaria de la diferencia entre $T_c - T_{amb}$, que va aumentando con el tiempo. Durante el primer periodo monitorizado se mantiene constante, pero a mediados de junio comienza a aumentar, indicando que deben existir restricciones al paso del aire o fallos en el ventilador que hagan que el caudal de aire por el condensador no sea suficiente, aumentando T_c con el tiempo. En la Figura 4b) se observan las medias diarias de T_c , T_{amb} y T_e , y se observa cómo T_c aumenta su diferencia con T_{amb} con el tiempo y T_e se mantiene constante. En la Figura 4c) se muestran las medias diarias de SC y SH, que se mantienen constantes con el tiempo, lo cual parece indicar que no existe otro fallo además de un caudal de aire inadecuado por el condensador. La Figura 5 muestra los parámetros definidos para medir la degradación. En la Figura 5a) se muestra T_c correlacionada

con T_{amb} y la medida, y en b) la degradación de ésta con el tiempo. De esta manera, se observa que T_c va aumentando en 0.060°C al día con respecto a la que debería tener, resultando tras 2 meses de restricciones de aire en el condensador en una T_c unos 3.6°C por encima de la que debería tener la unidad en caso de no tenerlas. En términos de COP_{carnot} , la Figura 5c) muestra el medido y el correlacionado con T_{amb} , y en d) la degradación de éste con el tiempo. Las restricciones de aire hacen que éste se degrade un 0.202% al día, y tras 2 meses sin detectarse, supone una disminución del 12% con respecto al que tendría sin este fallo.

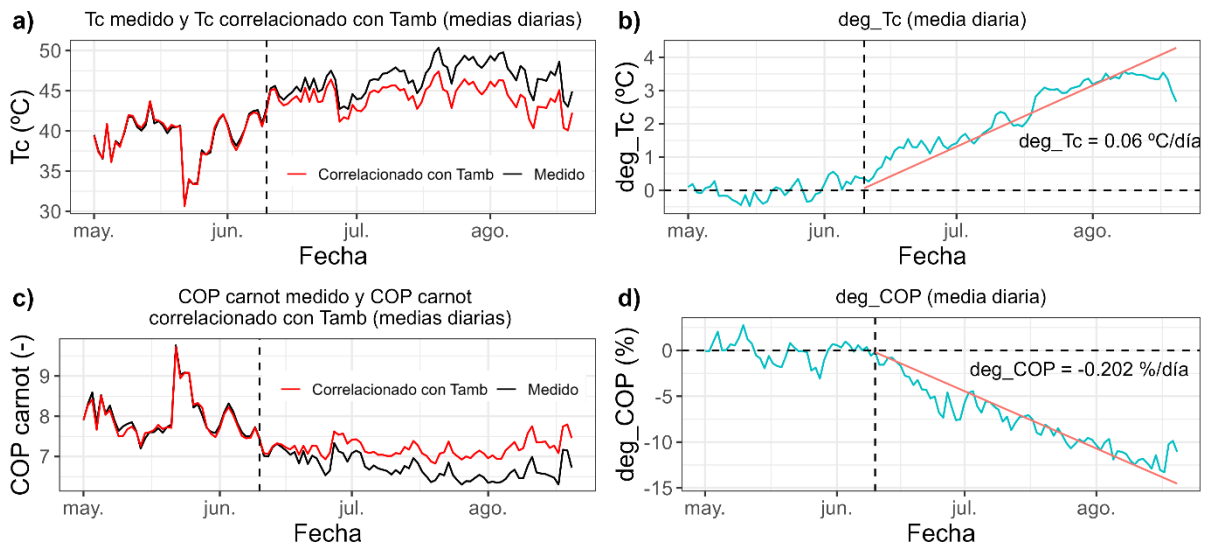


Figura 5. Resultados de los indicadores de degradación de la unidad del caso 2. a) Comparación de T_c medido y el correlacionado con T_{amb} , b) degradación de T_c con el tiempo tras la manifestación del fallo, c) comparación de COP_{carnot} con el correlacionado con T_{amb} , y d) degradación del COP_{carnot} tras la manifestación del fallo.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra cómo, a partir de la monitorización durante un largo período de sistemas de aire acondicionado residenciales, se pueden detectar fallos no críticos como fugas de refrigerante o restricciones de aire en el condensador. Se muestran métodos para poder detectarlos de manera relativamente temprana, antes de que escalen y se conviertan en fallos críticos que hagan que el sistema no pueda funcionar más. Además, se dan indicadores de la degradación del sistema, mostrando que un fallo de fugas durante tres meses puede hacer que el COP se degrade un 15% , y un fallo de restricciones de aire por el condensador, después de dos meses sin detectar, disminuya un 12% .

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa AlertLabs por compartir los datos de las unidades de aire acondicionado monitorizadas. B. Llopis-Mengual agradece la financiación del Ministerio de Universidades para la ayuda FPU con referencia FPU19/04012 y para una estancia de investigación (EST23/00752).

REFERENCIAS

- [1] F. Guo and B. Rasmussen, "Performance benchmarking of residential air conditioning systems using smart thermostat data," *Appl Therm Eng*, vol. 225, no. December 2022, p. 120195, May 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120195.
- [2] F. Guo and B. Rasmussen, "Predictive maintenance for residential air conditioning systems with smart thermostat data using modified Mann-Kendall tests," *Appl Therm Eng*, vol. 222, no. November 2022, p. 119955, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119955.
- [3] AlertLabs, "SENTREE - Remote A/C Monitoring System." [Online]. Available: <https://www.alertlabs.com/products/sentree-ac-monitoring-system>
- [4] H. Li and J. E. Braun, "Development, evaluation, and demonstration of a virtual refrigerant charge sensor," *HVAC and R Research*, vol. 15, no. 1, pp. 117–136, 2009, doi: 10.1080/10789669.2009.10390828.