

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN LAS MEDIDAS DE TEMPERATURA MEDIANTE TERMOGRAFÍA INFRARROJA

INFLUENCE OF WIND SPEED IN TEMPERATURE MEASURES THROUGH INFRARED THERMOGRAPHY

Eduardo Hernández^{(1)*}, Joel Recalde⁽¹⁾, Andrés Guananga⁽¹⁾

⁽¹⁾Escuela Superior de Chimborazo, edhernandez@esepoch.edu.ec, joel.recalde@esepoch.edu.ec, andresguananga@esepoch.edu.ec.

<https://doi.org/10.33789/talentos.7.1.119>

Resumen: La presente investigación tiene como propósito obtener un método que permita corregir la temperatura observada mediante termografía infrarroja en función de la velocidad del viento que incide sobre la superficie de un elemento, que se manifiesta incrementando su temperatura. Para realizar la termografía, es necesario tener una fuente de emisión de calor, el cual se consiguió aflojando de manera intencional el terminal de un breaker, y de este modo al momento de energizar el circuito se obtenga un aumento de temperatura con respecto al ambiente, posteriormente con la ayuda de un soplador se aplicó diferentes velocidades de viento en un área reducida del breaker, mismo que se logró con la restricción de aire a su entrada, y finalmente con la cámara termográfica se evidenció la disminución de temperatura sobre esta superficie. Para verificar que las mediciones de temperatura no tengan similitud entre las proporcionadas a diferentes velocidades del viento, se debe realizar una contrastación de hipótesis, para lo cual, se procede a realizar la prueba de normalidad. Adicionalmente, para obtener una aproximación de la temperatura real del objeto se debe multiplicar la velocidad del viento a la que está expuesto en km/h por 0,6 y este producto sumarle a la temperatura registrada por la cámara termográfica.

Palabras Clave: Calor, método, termografía y viento.

Abstract: The present investigation has like purpose to obtain a method that allows the temperature observed to be corrected by infrared thermography in function on the wind speed that affects the surface of the element, which manifests itself by increasing its temperature. To

Recibido: 05 de marzo de 2020,

Aceptado: 22 de junio de 2020

Publicado como artículo científico en Revista de Investigación Talentos VII (1), 12-21

perform the thermography is necessary to have a source of heat emission, which was achieved loosening intentionally the terminal of a breaker, and so at the time of energizing the circuit is obtained an increase in temperature with respect to the environment, subsequently, with the help of a blower, different wind speeds were applied in a reduced area of the breaker, same that was achieved with the restriction of the air at its entrance, and finally with the thermal imager the temperature decrease on this surface is evidenced. To verify that the temperature measurements do not have similarity between the proportions at different wind speeds, you must perform a hypothesis test, for which, proceed to perform the normality test. In addition, to obtain an approximation of the real temperature of the object, the wind speed at which it is exposed in km / h must be multiplied by 0.6 and this product must be added to the temperature recorded by the thermal imager.

Keywords: *Heat, method, thermography and wind.*

I. INTRODUCCIÓN

La termografía infrarroja hace referencia a la cuantificación de la energía radiante que emite todo objeto, que es invisible para los humanos, pues involucra longitudes de onda menores a la de la luz visible (Ramírez, Jiménez, Correa, Giraldo, & Fandiño, 2015). La cámara infrarroja recibe y cuantifica dicha radiación térmica, emitida y reflejada por los diferentes materiales y las transforma en imágenes digitales (Morales, Medina, Carnevali, & Orozco, 2011).

La termografía infrarroja es una de las técnicas de mantenimiento basado en la condición más rápidas, debido que se puede recolectar mucha información en poco tiempo (Hidalgo, 2003) y trae beneficios, puesto que, ayuda a la detección temprana de fallas, facilitando la realización de procedimientos o metodologías de inspección (Rodríguez & Muñoz, 2017).

Gracias a la termografía se pueden descubrir fallas en los equipos antes de que estas generen un paro imprevisto de la planta de producción, lo cual implica, desperdiciar mucho tiempo en reparación generando pérdidas económicas (Olarde, Roteró, & Cañón, 2011).

En instalaciones eléctricas, este método permite ejecutar inspecciones cuando el sistema está en funcionamiento, por lo que no es necesario que el sistema sea interrumpido para realizar las mediciones (Aznarán & Reyes, 2016).

Los modos de fallos de una instalación eléctrica que generan aumentos de temperatura mayores a los del medio natural en el que se encuentra operando producen pérdidas de potencia que se disipa en forma de calor (Hernández, Cajamarca, Redrobán, Valverde, & Guilcapi, 2017).

La inspección de tableros eléctricos con termografía infrarroja es el método ideal utilizado por técnicos, ingenieros y profesionales del mantenimiento, ya que esta técnica hace posible determinar gran cantidad de fallas en una extensa gama de maquinaria a un costo inicial razonable (Silva, Salazar, Ponce, & Herrera, 2017).

Para la termografía, es necesario conocer las características de la cámara utilizada, factores ambientales, materiales utilizados, así mismo conocer bien los principios de transferencia de calor para interpretar correctamente las mediciones (Balageas, 2007) y de este modo proceder a calibrar la cámara.

Cuando se realiza termografía es necesario evitar las corrientes de aire debido a que, como resultado del intercambio del calor por convección, el aire cercano a la superficie tiene la misma temperatura que el objeto medido, mientras que, si hay corrientes de aire, esta capa es sustituida por otra capa cuya temperatura todavía no se ha equilibrado con la del objeto (NFPA 70B, 2018). Esto ocasiona errores en las mediciones termográficas.

Según (FLIRSystems, 2010) un recalentamiento medido a una velocidad de viento de 5 m/s (18 km/h) será aproximadamente el doble que uno medido a 1 m/s (3,6 km/h) y un exceso de temperatura medido a 8 m/s (28,8 km/h) será 2,5 veces a uno medido a 1 m/s; sin embargo, es necesario conocer un método de cálculo claro que permita corregir la disminución de temperatura a cualquier velocidad del viento.

El objetivo de esta investigación es obtener un método que permita corregir la temperatura observada mediante termografía infrarroja en función de la velocidad del viento que incide sobre la superficie de un elemento que se encuentre desarrollando algún modo de falla que se manifieste incrementando su temperatura.

La relevancia es que, la disminución de la temperatura de la superficie de los elementos analizados como consecuencia de la velocidad del viento, afecta negativamente en la determinación de la severidad del modo de falla monitoreado, de tal manera que se puede establecer un problema como leve, cuando en realidad es grave, incrementando el riesgo de daño o incendios (NFPA 70B, 2018)

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La actual investigación se realizó en un módulo de pruebas, conformado por un circuito de potencia y este está constituido por tres resistencias óhmicas de alta potencia R1, R2 Y R3 de 27,7 Ω , 29,7 Ω y 27,8 Ω respectivamente, ver Fig. 1, conectadas en triángulo, montadas internamente en una caja de metal y enfriadas mediante un soplador de aire, al mismo tiempo estas resistencias son activadas mediante un circuito de control, que está montado internamente en un tablero sin tapa, teniendo una observación directa de sus elementos, haciendo que la recolección de datos sea confiable al momento de realizar la termografía, tenemos elementos tales como el breaker de protección, contactores y pulsadores que nos ayudan a la activación del circuito (Figuras 1 y 2) .

Este módulo tiene una alimentación trifásica de 120 V nominal en cada fase y con un ambiente aislado de viento al encontrarse en el interior del laboratorio.

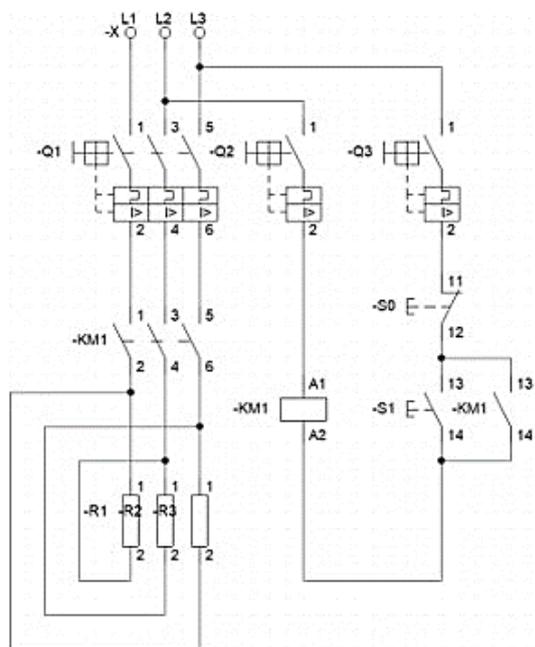


Figura 1. Diagrama eléctrico de control y de potencia del módulo de laboratorio

Para la selección de un calibre de conductor eficaz en el circuito eléctrico se utilizó la Tabla I que está en función de la intensidad.

TABLA I.

INTENSIDAD DE CORRIENTE ADMISIBLE PARA CONDUCTOR DE COBRE CON TEMPERATURA DE SERVICIO HASTA 60°C

Calibre (AWG)	Sección nominal (mm) ²	Intensidad de corriente (A)
14	2,08	15

Fuente: (Electrocables, 2018)

Para determinar la intensidad de corriente que atraviesa por los conductores se tomó en cuenta que sus cargas son desequilibradas con conexión triángulo. Por lo tanto, se tiene las siguientes ecuaciones:

$$V_{L-L} = \sqrt{3}V_F \quad (1)$$

Donde V_{L-L} es un voltaje compuesto o también llamado de voltaje de línea (voltaje entre dos fases) y V_F es el voltaje fase (valor nominal suministrado por la red). El V_{L-L} es el voltaje que alimenta a las resistencias (Boylestad, 2004).

En el cálculo de la intensidad de corriente se debe tener en cuenta el desfase que existe entre V_{L1-L2} , V_{L2-L3} y V_{L3-L1} que son de 30° , -90° y 150° respectivamente. El desfase del voltaje de línea es de 30° mayor respecto al voltaje de fase por esta razón no se empieza desde los 0° (los ángulos de desfase nos ayudan al cálculo de la intensidad) (Redondo & Domínguez, 2013) y por lo que las ecuaciones fueron las siguientes:

$$\overrightarrow{I_{L1-L2}} = \frac{\overrightarrow{V_{L1-L2}^{J30}}}{R_1} \quad (2)$$

$$\overrightarrow{I_{L2-L3}} = \frac{\overrightarrow{V_{L2-L3}^{-J90}}}{R_2} \quad (3)$$

$$\overrightarrow{I_{L3-L1}} = \frac{\overrightarrow{V_{L3-L1}^{J150}}}{R_3} \quad (4)$$

Donde $\overrightarrow{I_{L1-L2}}$, $\overrightarrow{I_{L2-L3}}$ y $\overrightarrow{I_{L3-L1}}$, corresponden a las intensidades de corriente de fase que pasa por cada resistencia (R_1 , R_2 y R_3 respectivamente), $\overrightarrow{V_{L1-L2}^{J30}}$ es el voltaje que existe entre L1 y L2 con 30° de desfase, $\overrightarrow{V_{L2-L3}^{-J90}}$ es el voltaje que existe entre L2 y L3 con -90° de desfase, $\overrightarrow{V_{L3-L1}^{J150}}$ es el voltaje

que existe entre L3 y L1 con 150° de desfase, $R_{1,2,3}$ son las resistencias del circuito de potencia (Figura 1) siendo su desfase de 0°.

Al tener cargas desequilibradas con conexión triángulo, el cálculo de la intensidad de corriente de cada línea se obtuvo aplicando la Primera Ley de Kirchhoff (Pinzón & Roa, 2016), por lo que las ecuaciones fueron las siguientes:

$$\vec{I}_{L1} = \vec{I}_{L1-L2} - \vec{I}_{L3-L1} \quad (5)$$

$$\vec{I}_{L2} = \vec{I}_{L2-L3} - \vec{I}_{L1-L2} \quad (6)$$

$$\vec{I}_{L3} = \vec{I}_{L3-L1} - \vec{I}_{L2-L3} \quad (7)$$

Donde $\vec{I}_{L1,L2,L3}$ son las intensidades de corriente de línea.

Por lo tanto, de acuerdo a las ecuaciones dadas se obtuvo los siguientes resultados (Tabla II y III).

TABLA II.

DETERMINACIÓN DE INTENSIDAD DE CORRIENTE DE FASE			
Líneas de alimentación	Resistencia [Ω]	Voltaje de alimentación [V]	Corriente eléctrica [A]
L1 - L2	27,7	207,85 ^{j30}	7,5 ^{j30}
L2 - L3	29,7	207,85 ^{-j90}	7 ^{-j90}

Con las especificaciones de la Tabla I se seleccionó un calibre de conductor el cual soporta una intensidad de corriente mayor a la obtenida en los cálculos con el fin evitar el calentamiento del mismo (Tabla III).

TABLA III.

DETERMINACIÓN DEL CALIBRE DE CONDUCTOR EN FUNCIÓN DE INTENSIDAD DE CORRIENTE DE LÍNEA

Línea de alimentación	Corriente eléctrica (A)	Calibre de conductor (AWG)
L1	12,98 ^{j0,04}	14
L2	12,56 ^{-j121,16}	14
L3	12,54 ^{j121,1}	14

Estos conductores tienen su respectivo recubrimiento aislante de color azul, que al tener una alta emisividad ayuda a tener mediciones termográficas eficaces para tomar los datos (Cañada & Royo, 2008).

La cámara que se empleó en la toma de datos fue una SATIR, modelo HotFind-VR con una resolución de 160 x 120 pixeles y distancia de enfoque 20° x 15° enfoque mínimo de 0,1m, misma que se encuentra montada sobre un soporte para evitar que los termogramas sean de mala calidad ocasionando una baja visibilidad del mismo.

Para simular el viento natural que puede producirse a campo abierto se utilizó un soplador de aire de marca ELECTRIC BLOWER de 3600 rpm alimentado a 120 V / 1,5 A con una frecuencia de 60Hz (Figura 2).

Para la medición de los parámetros eléctricos de las cargas óhmicas (R1, R2 Y R3) se utilizó un multímetro digital de marca TRUPER modelo MUT-105 con un rango de medición hasta 20 A.



Fig. 2. Módulo de pruebas

Para la medida de la velocidad de viento y factores ambientales en el laboratorio se utilizó un anemómetro marca EXTECH INSTRUMENTS 45170 4-en-1 meter measures (Velocidad de aire, humedad relativa, temperatura y nivel de luz).

Para realizar el análisis del diagnóstico termográfico, es necesario tener una fuente de emisión de calor, el cual para este caso es el terminal flojo de un breaker del módulo de laboratorio, este modo de falla también puede presentarse en una instalación eléctrica, debido a condiciones de operación inapropiadas del elemento, por deterioro del terminal o final de su vida útil.

Para la toma de mediciones, uno de los conductores conectados al terminal del breaker se aflojó de manera intencional, para que de este modo al momento de energizar el circuito se obtenga un aumento de temperatura

con respecto al ambiente, en un área reducida del breaker. (Figura 3), posteriormente se aplicó diferentes velocidades de viento con la ayuda del soplador.

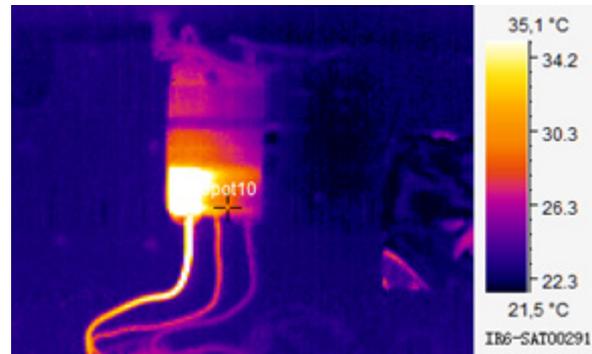


Fig. 3. Termograma del terminal flojo sin velocidad de viento

Para la variación de la velocidad del viento se logró restringiendo la entrada de aire en el soplador y con la ayuda de la cámara termográfica se determinó qué velocidad de viento afecta al punto caliente.

Las mediciones de la temperatura del terminal flojo del breaker se efectuaron con la cámara termográfica luego de que se estabilizara, puesto que, al variar la velocidad del viento, transcurre un tiempo hasta que la temperatura alcanza un valor cuasi constante (Figura 3).



Fig. 4. Termograma del terminal flojo con velocidad de 16 km/h

Para la determinación del efecto del soplador sobre el punto caliente de igual manera

se observó con la cámara termográfica luego de un tiempo necesario para que la temperatura disminuya hasta estabilizarse (Figura 4). Se repitió el mismo paso para cada velocidad de viento del soplador.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las mediciones de temperatura efectuadas con distintas velocidades del viento se encuentran plasmadas en la Tabla IV.

TABLA IV.

MEDICIONES DE TEMPERATURA EN °C A DISTINTA VELOCIDAD DEL VIENTO

N°	0 km/h	7 km/h	8 km/h	9 km/h	10 km/h	13 km/h	16 km/h
1	29,4	28,7	27,3	27,0	25,9	23,6	21,8
2	29,3	28,4	27,5	26,5	25,4	23,7	21,7
3	28,7	28,6	27,2	25,9	25,4	23,6	21,5
4	29,0	28,3	27,4	25,4	25,5	23,5	21,1
5	28,7	28,0	27,6	24,4	25,3	23,3	20,9
6	29,4	27,9	27,3	24,6	25,1	23,3	20,7
7	29,9	28,1	27,7	24,8	25,0	23,4	20,2
8	30,3	27,9	27,3	23,9	24,7	23,2	20,0
9	28,3	28,0	27,1	24,4	24,9	23,2	19,3
10	28,9	27,8	27,2	25,5	24,5	23,1	18,8
11	27,8	27,8	27,5	25,6	24,4	23,3	18,2
12	28,4	27,9	27,4	25,9	24,5	23,2	17,3
13	29,0	28,2	27,5	26,3	24,3	23,0	19,4
14	30,1	28,0	27,5	26,4	24,2	23,1	19,9
15	29,8	28,4	27,4	26,2	23,8	23,0	20,9

En la Tabla V se indica la estadística descriptiva de las mediciones de temperatura, obtenidas con distinta velocidad del viento. Los correspondientes histogramas de frecuencia de ilustran en la Figura 5.

Las mediciones de temperatura presentan poca dispersión, puesto que, la máxima

desviación estándar es de 1,3195600, correspondiente a la velocidad del viento de 16 km/h; en tanto que la media de las temperaturas, disminuyen a medida que se incrementa la velocidad del viento.

TABLA V.

VALORES ESTADÍSTICOS DE LAS MEDICIONES

Velocidad del viento [km/h]	Mínimo [°C]	Máximo [°C]	Media [°C]	Desviación estándar
0	27,80	30,30	29,13	0,7057586
7	27,80	28,70	28,13	0,2870208
8	27,10	27,70	27,39	0,1624221
9	23,90	27,00	25,52	0,9182281
10	23,80	25,90	24,86	0,5803940
13	23,00	23,70	23,30	0,2203893
16	17,30	21,80	20,11	1,3195600

Para verificar que las mediciones de temperatura no tengan similitud entre las proporcionadas a diferentes velocidades del viento, se debe realizar una contrastación de hipótesis; para lo cual, en primer lugar, se procede a realizar la prueba de normalidad mediante el método de Shapiro-Wilk, cuyos resultados se encuentran en la Tabla VI.

TABLA VI.

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE NORMALIDAD

Velocidad del viento [km/h]	W	P-valor
0	0,98073	0,9742
7	0,90706	0,1220
8	0,96936	0,8485
9	0,95632	0,6287
10	0,97808	0,9547
13	0,93863	0,3655
16	0,94821	0,4967

En virtud de que para los casos analizados el p-valor de la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla VI) son mayores a 0,05, se concluye que los datos se distribuyen normalmente con

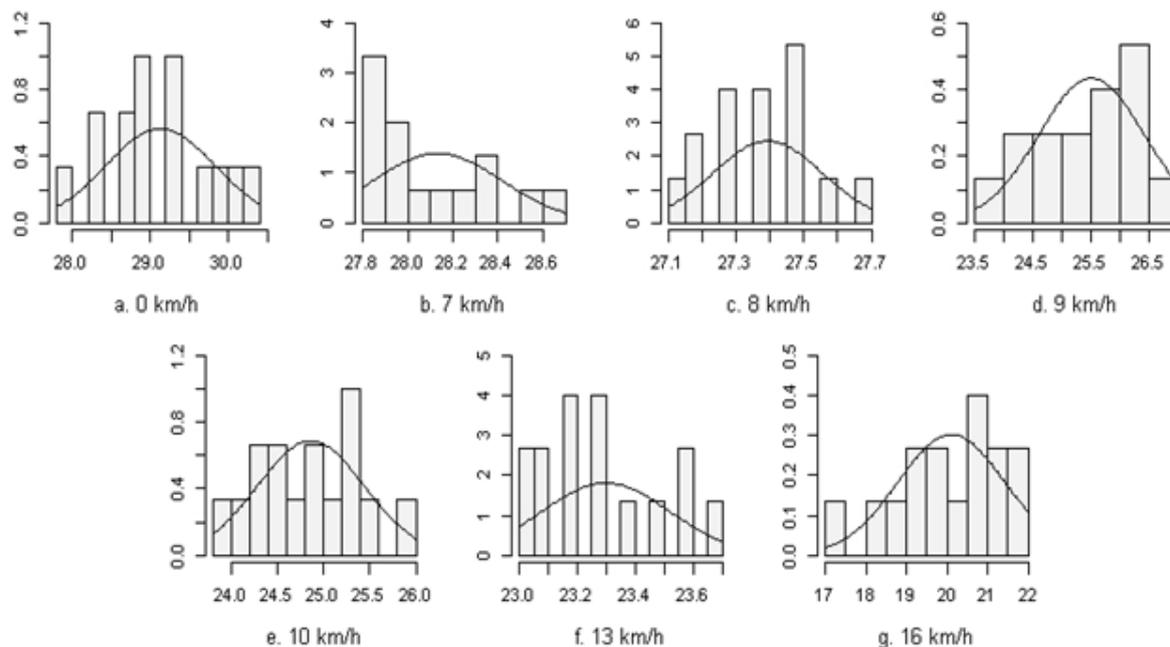


Fig. 5. Histograma de frecuencias de las mediciones

una confianza del 95%; motivo por el cual, se selecciona el estadístico paramétrico de t-student para la contrastación de hipótesis, en donde la H_0 corresponde a la igualdad de las muestras, que indica que la velocidad del viento no afecta a la temperatura del elemento analizado.

TABLA VII.
RESULTADOS DE LA PRUEBA T-STUDENT

Comparación	T	DT	P-valor
0 – 7	5,0834	18,508	7,14e-05
7 – 8	8,6904	22,133	1,38e-08
8 – 9	6,4404	14,516	1,30e-05
9 – 10	2,3531	23,647	0,02728
10 – 13	9,7319	17,955	1,39e-08
13 – 16	9,2253	14,780	1,61e-07

En la Tabla VII se indican los resultados de la prueba de t-studet, en el que se observa que, para los datos de temperatura correspondientes a temperaturas consecutivas, el p-valor es menor a 0,05; por lo tanto, se rechaza la H_0 y se concluye que las muestras son diferentes con el 95% de confianza; por consecuencia, para cada velocidad del viento le corresponde

un único valor de temperatura. Este comportamiento también se puede apreciar en la Figura 6.

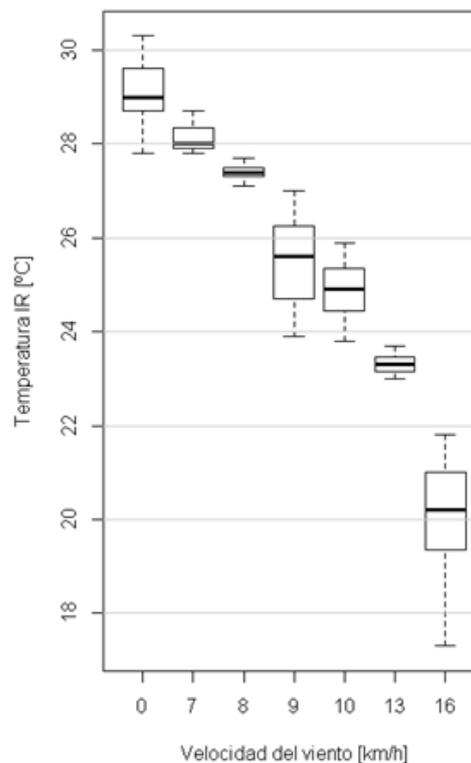


Fig. 6. Diagrama de cajas de las muestras de temperatura a diferentes velocidades del viento

Al graficar las medias de las temperaturas en

función de la velocidad del viento (Tabla V) se obtienen los puntos trazados en la Figura 7; mismos que se asemejan a una línea recta.

Mediante el método de los mínimos cuadrados se determina que la pendiente de la recta y la intersección con el eje de las ordenadas son $-0,5724$ y $30,6450$, respectivamente, consiguiendo como resultado la siguiente ecuación:

$$T = -0,5724 V + 30,6450 \quad (8)$$

Donde, T es la temperatura observada mediante termografía infrarroja en $^{\circ}\text{C}$ y V es la velocidad del viento en km/h .

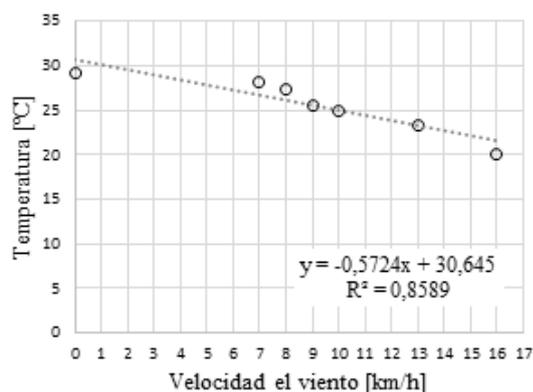


Fig. 7. Gráfica de la temperatura en función de la velocidad del viento

Para la validación del ajuste de la ecuación (8) con los datos experimentales, se plantean las siguientes hipótesis:

H0: La temperatura no es función directa de la velocidad del viento.

H1: La temperatura es función directa de la velocidad del viento.

Considerando que el coeficiente de correlación r de Pearson es de $-0,9268$, que es mayor a $0,875$ para un conjunto de siete

datos, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que sostiene que la temperatura es función directa de la velocidad del viento con una confianza del 99 % (Triola, 2018).

Como el coeficiente de correlación r de Pearson y consecuentemente la pendiente son negativos, la relación directa es decreciente.

Cabe recordar que la ecuación (8) se generó con los datos experimentales creados a partir de la temperatura media de $29,13^{\circ}\text{C}$ (ver Tabla 5), misma que corresponde a la temperatura de partida antes de aplicar las distintas velocidades del viento; por consiguiente, para calcular la variación de temperatura, provocada por cualquier variación de velocidad del viento, es válida la siguiente expresión:

$$\Delta T = -0,5724 \Delta V \quad (9)$$

De esta expresión se deduce que para cada km/h de velocidad del viento, la temperatura real se reducirá aproximadamente un $0,6^{\circ}\text{C}$.

IV. CONCLUSIONES

A cada valor de velocidad del viento le corresponde un único valor de temperatura que varían con una relación inversamente proporcional.

Para obtener una aproximación de la temperatura real de un objeto se debe multiplicar la velocidad del viento a la que está expuesto en km/h por $0,6$ y este producto sumarle a la temperatura registrada por la cámara termográfica.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aznarán, I., & Reyes, G. (2016). Aplicación de la termografía infrarroja en tableros eléctricos de distribución para mejorar la seguridad y calidad de la energía eléctrica. Perú.
- Balageas, D. (2007). Termografía infrarroja un técnica multifacética para la evaluación no destructiva. *Asociación Argentina de Ensayos no Destructivos Estructurales*, 14.
- Boylestad, R. (2004). *Introducción al análisis de circuitos*. México: PEARSON.
- Cañada, M., & Royo, R. (2008). *Termografía Infrarroja*. Fundación confemetal.
- Electrocables. (2018). *Catálogo de productos - Selección de calibre de conductor de cobre*. Electrocables.
- FLIRSystems. (2010). Manual de usuario FLIR T series. *FLIR Systems*, 100.
- Hernández, E., Cajamarca, J., Redrobán, C., Valverde, V., & Guilcapi, J. (2017). Estudio de las pérdidas de energía en conductores eléctricos mediante termografía infrarroja. *1er Congreso Internacional de Ingeniería, Facultad de Mecánica*, 7.
- Hidalgo, J. (2003). La importancia de la correlación de las tecnologías predictivas en el diagnóstico de motores eléctricos. *1er Congreso Mexicano de Confiabilidad y Mantenimiento*, 9.
- Morales, M., Medina, E., Carnevali, Á., & Orozco, E. (2011). Termografía infrarroja y el estudio de riesgos de lesiones músculo esqueléticas. *Ingeniería Industrial*, 14.
- NFPA 70B, A. (2018). *Práctica recomendada para el mantenimiento de equipos eléctricos*.
- Olarte, W., Rotero, M., & Cañón, B. (2011). Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo. *Scientia et Technica Año XVI*, 4.
- Pinzón, B., & Roa, D. (2016). *Electrotecnia Basica para técnicos*. ITSA.
- Ramírez, L., Jiménez, K., Correa, A., Giraldo, J., & Fandiño, H. (2015). Protocolo de adquisición de imágenes diagnósticas por termografía infrarroja. *Investigación*, 18.
- Redondo, J., & Domínguez, M. (2013). *Electrotecnia*. Cano Pina, SL.
- Rodriguez, D., & Muñoz, C. (2017). Aplicación de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo de un tunel de viento de baja velocidad. Bogotá D.C.
- Silva, A., Salazar, M., Ponce, J., & Herrera, G. (2017). Procedimiento para inspección de tableros eléctricos con termografía infrarroja. *Revista de Tecnología e Innovación*, 12.
- Triola, M. (2018). *Estadística*. Pearson.