

Estudio sobre el efecto de la temperatura de un motor eléctrico en su eficiencia

¿En qué medida la temperatura de un motor de corriente directa modelo XD-3420 se relaciona a su eficiencia?

Asignatura: Física

“Confirmando que soy el autor de este trabajo y que es la versión final. He citado debidamente las palabras o ideas de otras personas, se hayan expresado estas de forma escrita, oral o visual”

Número de palabras: 3740

Febrero 2022

Índice

Introducción	3
Marco teórico	5
I. Motor Eléctrico.....	5
II. Motor de corriente continua.....	5
III. Ley de conservación de energía.....	5
IV. Eficiencia.....	6
V. Escalas de temperatura.....	6
Diseño de investigación.....	7
I. Pregunta de Investigación.....	7
II. Hipótesis	7
III. Variables.....	7
Diseño experimental	8
I. Estructura base.....	8
II. Circuito.....	9
III. Experimentación y mediciones.....	10
Datos obtenidos.....	13
Análisis de datos.....	14
I. Trabajo.....	15
II. Potencia de salida.....	15
III. Potencia de entrada.....	16
IV. Eficiencia.....	17
Resultados finales.....	17
Conclusiones.....	19
Bibliografía	21
Anexos	23

Introducción

Los motores son una herramienta utilizada por el ser humano desde el siglo XIX, cuando Michael Faraday comenzó a estudiar los principios de la rotación magnética, de acuerdo a Russel (2000). Desde ese entonces, los motores eléctricos han evolucionado hasta convertirse en herramientas muy comunes hoy en día, de los cuales existen diversos tipos y modelos, con alternativas en sus diseños, materiales y tamaños. En base a Hughes y Drury (2013), hasta 1980, el motor de corriente directa o continua era la mejor opción cuando se necesitaba controlar su velocidad y torque, sin embargo su cuota de mercado fue reducida con la llegada de los motores a.c. No obstante, los motores de corriente directa siguen estando presentes en aplicaciones de control o automatización de procesos, permitiendo su desarrollo para una gran variedad de usos como molinos, prensas, tracción en rieles e inclusive robots, llegando así a competencias de robótica como la de FIRST.

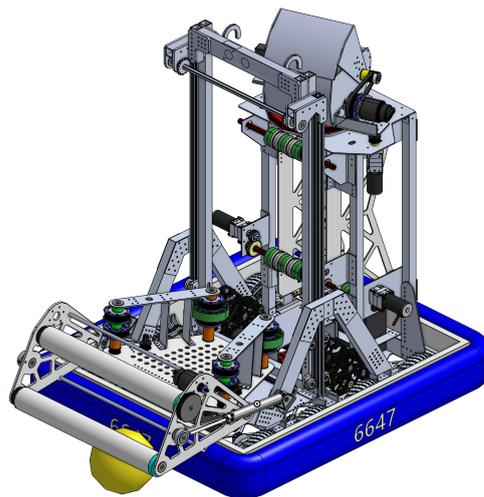


Figura 1: diseño del robot de competencia de VOLTEC Robotics 2020.

En lo personal, yo me uní al equipo de FIRST *VOLTEC Robotics* desde Agosto 2019 en el equipo de Ingeniería, y tuve la oportunidad de asistir antes de la Pandemia a dos competencias Offseason. En estas competencias de robótica, es muy común el uso de los motores eléctricos de corriente directa. Lo ideal es que en los partidos, los motores mantengan un porcentaje de eficiencia elevado para un mejor rendimiento, sin embargo, me dí cuenta de que el constante uso y la exigencia de los motores en las competencias lleva a que regularmente se calienten y en ocasiones más extremas se sobrecalienten. Por este motivo, me llegué a preguntar cual es la relación entre la eficiencia de un motor de corriente directa y la temperatura de su superficie, planteando así mi problema de investigación.

Tomando esto en consideración, el objetivo principal de esta monografía es diseñar y llevar a cabo un experimento con un motor eléctrico d.c modelo XD-3420 para entender la relación existente entre la temperatura del motor y su eficiencia. Con el fin de alcanzar el objetivo de la monografía, la pregunta de investigación establecida fue la siguiente: **¿En qué medida la temperatura de un motor de corriente directa modelo XD-3420 se relaciona a su eficiencia?**

Encontrar una respuesta a la problemática planteada resulta de gran importancia en una competencia de robótica, por ejemplo, donde el robot utiliza motores de corriente directa en sus mecanismos. Incluso se podrían hacer predicciones para determinar la eficiencia del motor mientras su superficie se calienta, lo cual puede resultar útil para hacer ajustes ya sea en la programación o diseño mecánico del robot. A una escala mayor, esta investigación permitiría entender el rendimiento de un motor de corriente continua y su comportamiento térmico, lo cual según Rasid y Chong (2019), resulta crucial, pues la temperatura de un motor podría dañar la insulación de los bobinados u otros componentes, reduciendo su duración de vida. Además en palabras de Guevara (2009), “El que un motor trabaje más frío, permite asegurar una larga vida útil, menores problemas de operación del proceso, menor tiempo de parada por reparaciones [...] y menor gasto innecesario de energía.”

Para llevar a cabo la monografía, se realizará un experimento en el cual se mida la eficiencia del motor, determinada por la potencia de salida y entrada, por lo que el motor levantará una pesa en una distancia constante varias veces y se medirá el tiempo que le tomó en levantar la carga, el voltaje y amperaje, probando diferentes temperaturas iniciales del motor. Sin embargo, el experimento será realizado en casa debido a la pandemia y el acceso limitado al laboratorio, pues fue hasta septiembre de 2021 que la presencialidad al campus fue aumentada a uno o dos días por semana. De cualquier manera, por medio del experimento se determinará la relación entre la temperatura y eficiencia del motor y usando el coeficiente de correlación, qué tan fuerte es la relación.

Marco Teórico

I. Motor Eléctrico

Con base en la Fundación Red de Energía (2011), el propósito de los motores eléctricos es convertir energía eléctrica en energía mecánica para mover accionamientos de diferentes tipos de máquinas. Un motor eléctrico está formado por dos elementos principales. Primero, el estator fijo, la parte externa del motor que no gira, la cual utiliza polos magnéticos como imanes para producir el movimiento del rotor, el cual es el segundo componente principal y se encuentra formado por un embobinado de alambres de cobre, siendo la parte del motor que gira a grandes velocidades. En un motor eléctrico, la corriente eléctrica circula por el embobinado de cobre y genera un campo magnético. Esto produce fuerzas de atracción y repulsión, resultando en el movimiento circular del rotor, al cual se le ensambla una extensión llamada flecha o eje para aprovechar el movimiento producido.

II. Motor de corriente continua

“En estos motores el estator está formado por polos principales activados por corrientes directas.” (p.15). Además, de acuerdo a Ikimi (2020), los motores DC trabajan de acuerdo al principio de Faraday de electromagnetismo que establece que un conductor de corriente experimenta una fuerza si se encuentra en un campo magnético. Los motores DC, también pueden o no tener escobillas de carbón o grafito que permiten conducir la corriente y darle dirección cuando el motor rota. En este experimento se utilizó un motor DC con escobillas debido a su precio más accesible.

III. Ley de conservación de energía

La transferencia del calor en un motor, se puede explicar a través del teorema del trabajo o la energía, el cual establece que “La energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma de una forma a la otra (primera ley de termodinámica) y en este proceso hay entropía (segunda ley de termodinámica) o pérdida de energía, normalmente en forma de calor.” (Badii, Guillen, Abreu, 2016, p.141). En un motor eléctrico, de acuerdo a la Fundación Red de Energía (2011), este principio se presenta en la transformación de energía eléctrica a mecánica, donde “una parte de la energía eléctrica tomada de la red se convierte en calor, constituyendo las pérdidas del motor” (p.19).

IV. Eficiencia

De acuerdo a Enercom (2021), la eficiencia indica el porcentaje de la razón entre el trabajo mecánico obtenido y la energía empleada, siendo lo restante la pérdida de energía disipada como calor, el cual puede ser transferido a la superficie del motor. Además, con base en Medinger (2000), la transferencia del calor en el motor depende de diversos factores como su masa, el tamaño del marco u otros métodos de enfriamiento, incluso establece que la eficiencia podría afectar la temperatura del motor.

Las fórmulas de eficiencia que se utilizará en esta investigación son:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Potencia de salida (Watts)} = \frac{W}{t} \quad (2)$$

$$\text{Potencia de entrada (Watts)} = V \times I \quad (3)$$

Fórmula 2:

W = Trabajo, en joules (J)

T = Tiempo, en segundos (s)

Fórmula 3:

V = Voltaje, en volts (V)

I = Corriente eléctrica, en amperes (A)

V. Escalas de temperatura

$$T_K = T_C + 273 \quad (4)$$

T_K = temperatura en Kelvins

T_C = temperatura en grados Celsius

Diseño de la Investigación

I. Pregunta de Investigación

¿En qué medida la temperatura de un motor de corriente directa modelo XD-3420 se relaciona a su eficiencia?

II. Hipótesis

Hipótesis (H_1): Si la temperatura de un motor de corriente directa de modelo XD-3420 incrementa, entonces su porcentaje de eficiencia será reducido.

Hipótesis nula (H_0): Si la temperatura de un motor de corriente directa de modelo XD-3420 incrementa, entonces su porcentaje de eficiencia no será reducido.

Hipótesis alternativa (H_A): Si la temperatura de un motor de corriente directa de modelo XD-3420 incrementa, entonces su porcentaje de eficiencia también incrementará.

III. Variables

La **variable independiente** en el experimento será la temperatura inicial de la superficie del motor. Esta es definida conceptualmente como “una medida del promedio de la energía interna en un sistema” (Schlager, 2002), la cual operacionalmente, se medirá por medio de un termómetro infrarrojo.

La **variable dependiente**, por otro lado, será la eficiencia, la cual definida conceptualmente de acuerdo a Enercom (2021), indica el porcentaje de la razón entre el trabajo mecánico obtenido y la energía empleada, siendo lo restante la pérdida de energía disipada como calor.

Las **variables de control** serán principalmente el peso de una carga que levantará el motor y la distancia que será levantada.

Diseño experimental

I. Estructura base

Con el objetivo de resolver la pregunta de investigación planteada, se diseñó una práctica experimental para probar la variación de la eficiencia dependiendo de la temperatura de un motor eléctrico de corriente directa al levantar una carga. Para la preparación del experimento, se diseñó y construyó un marco de madera como el de la figura 1 para permitir que el motor levantara la carga a una altura fija del piso y mantener una experimentación con el mayor control posible. Todas las distancias del experimento fueron medidas con un flexómetro de marca Trupper con un error de lectura ± 0.001 m.

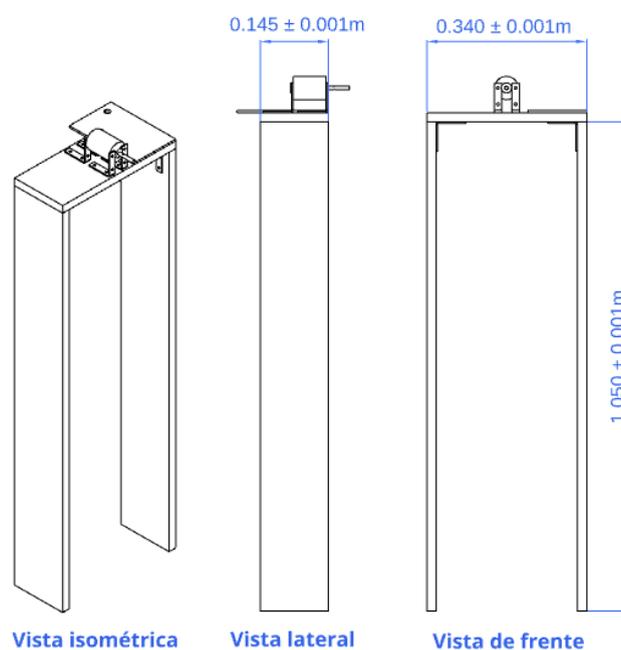


Figura 1: diseño de la estructura que soportó el motor con sus dimensiones en metros.

Se usaron tres tablas de madera con un grosor de 0.020 ± 0.001 m, las cuales fueron sujetadas por dieciséis tornillos y cuatro brackets de aluminio como mostrado en la figura 2C. Sobre esta estructura se fijó el motor atornillándolo a la madera con otros cuatro brackets, como se ve en la figura 2A. Finalmente, se pegó a la base una tabla de madera con un grosor de 0.005 ± 0.001 m y un agujero de 0.005 ± 0.001 m de diámetro, en el que más tarde se colocó un interruptor, mostrado en la figura 2B.

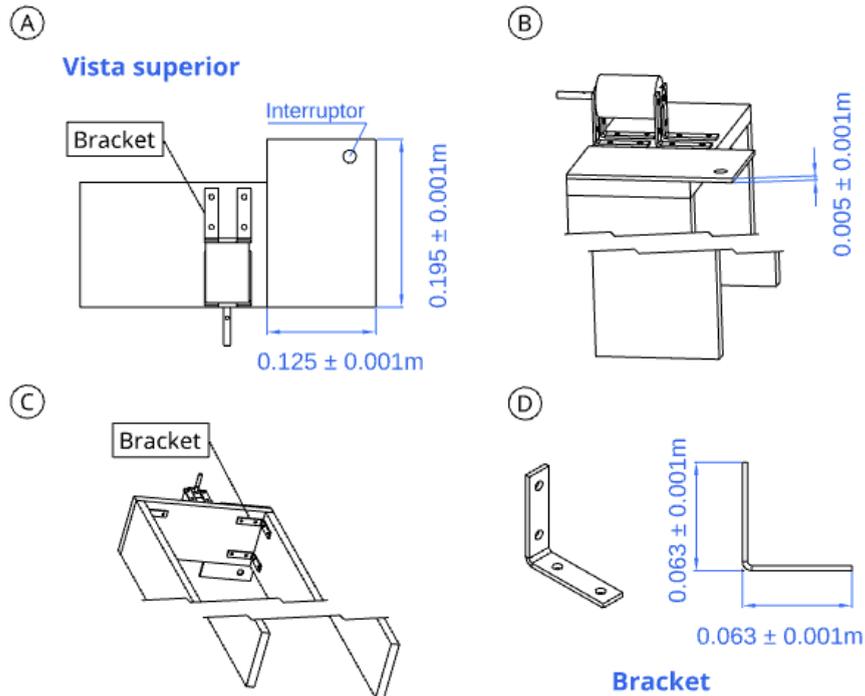


Figura 2: detalles y medidas de la estructura.

II. Circuito

Con la estructura terminada, se preparó el circuito mostrado en la figura 3A y B, que conectó el motor de modelo XD-3420 a la corriente eléctrica usando un adaptador de corriente alterna a continua (100-240VAC a 12.0V) modelo WKY-1203000, el cual correspondía al voltaje requerido por el motor. Además, se agregó un interruptor para controlar el encendido del motor y trabajar con mayor seguridad. Adicionalmente, se conectaron dos multímetros, uno de marca AstroAI modelo Am33D con un error de lectura de $\pm 0.01\text{V}$ para medir el voltaje y el otro de marca Steren modelo MUL-050 con un error de lectura de $\pm 0.01\text{A}$ que midió los amperes. Aunque se esperaba que la potencia de entrada no varíe y sea constante, era necesario obtener estas mediciones para conseguir resultados más exactos.

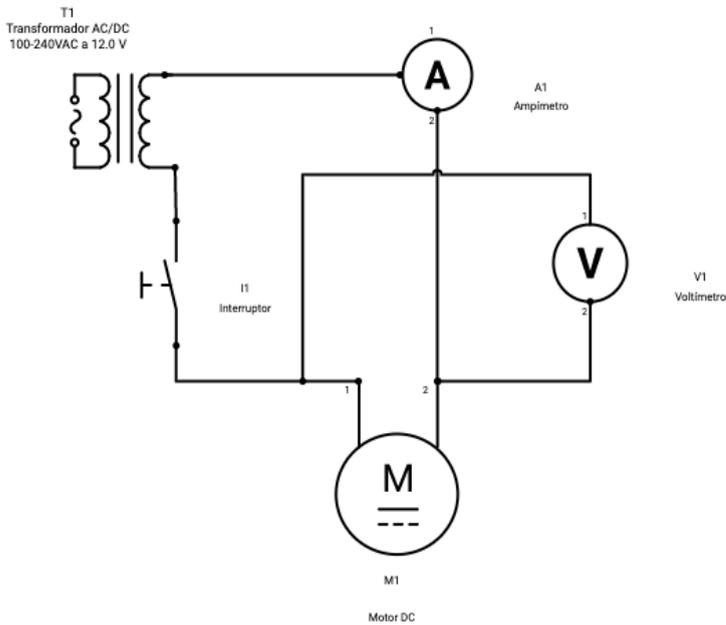


Figura 3A: diagrama del circuito.

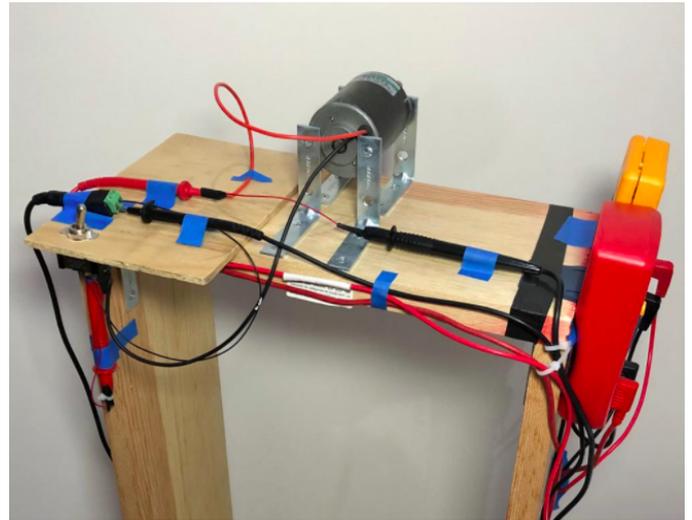


Figura 3B: circuito eléctrico en la experimentación.

Finalmente, se encendió el circuito para hacer una prueba del motor sin levantar ninguna carga, comprobando el funcionamiento correcto del circuito y que la medición proporcionada por los multímetros fue la adecuada, iniciando en cero cuando el interruptor estaba apagado y aumentando una vez prendido, previniendo errores sistemáticos y evitando el error cero de calibración.

III. Experimentación y mediciones

Una vez terminada la prueba sin peso, se dejó que el motor se enfriara completamente y se colocó la estructura sobre dos burós de $0.510 \pm 0.001\text{m}$ de alto, sujetándolos con dos clamps a dos pesas colocadas sobre los burós para que la estructura se mantuviera fija, como mostrado en la figura 4A. Esto permitió tener una mayor altura desde el piso hasta una marca en la estructura, que fue la referencia de la altura máxima a la que se elevó la carga, como mostrado en la figura 4B. Esta marca se colocó a $1.415 \pm 0.001\text{m}$ del suelo. Después se amarró un hilo de monofilamento a la flecha del motor, el cual estaba amarrado por el otro extremo a la carga que levantó el motor: una pesa de $2.004 \pm 0.001\text{kg}$, medición confirmada por una báscula marca IBN de modelo B-5P. Además, se instaló un tripié con un celular iPhone 8 para grabar el movimiento de la pesa, los multímetros y un cronómetro colocado junto a la estructura, como mostrado en la figura 4C.



Figura 4A: uso de clamps para fijar la estructura

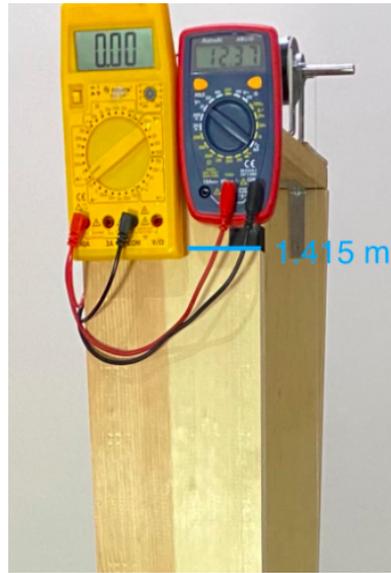


Figura 4B: marca en la estructura

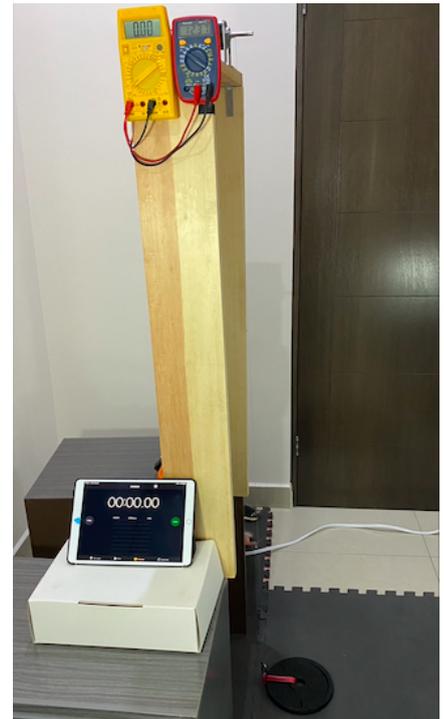


Figura 4C: arreglo final del experimento

Para cada prueba, se tomó la temperatura inicial del motor con un termómetro infrarrojo marca Bing Zun de escala Celsius con un error de lectura de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ por lo que se utilizó la fórmula 4 para realizar conversiones a la escala Kelvin y después se inició el cronómetro. Luego se colocó la punta de la pesa justo debajo de la flecha del motor y se encendió el circuito, permitiendo que el motor levantara la pesa y al superar la altura de referencia se apagó el circuito para que la pesa regresara nuevamente al suelo. Este levantamiento del peso se repitió diez veces seguidas, tomando a su vez la temperatura final después de los diez intentos, grabando todo el proceso para después analizar los videos cuadro por cuadro y obtener los datos brutos del voltaje y amperaje del motor al levantar la carga, así como el tiempo que le tomó a la pesa en llegar a la marca de referencia.

Sin embargo, para evitar un error de reacción y mejorar la exactitud del experimento, en lugar de usar el cronómetro de la figura 4C, se utilizó el software *Tracker* para obtener el tiempo que le tomó a la pesa en llegar a la marca. Para determinar la posición inicial, se tomó en cuenta el cuadro antes de que empezara el movimiento, como mostrado en la figura 5.

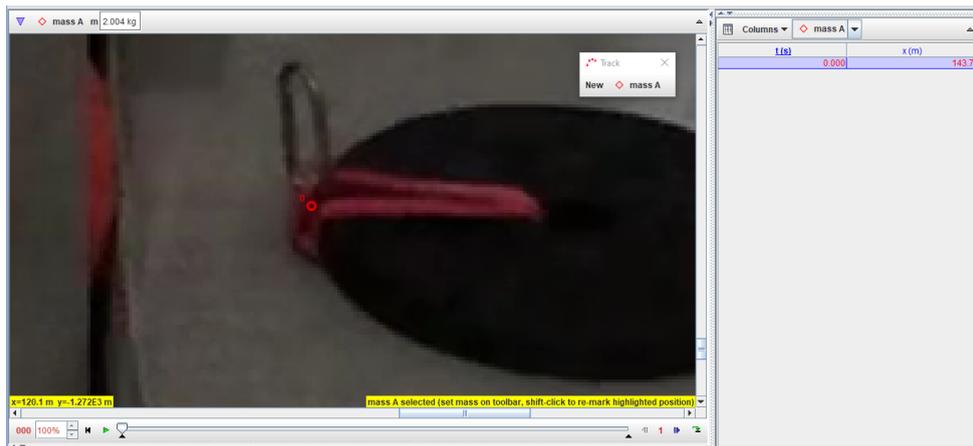


Figura 5: Posición inicial mostrada en *Tracker* (Acercamiento a la pesa colocada en el piso).

El tiempo final fue tomado cuando la punta de la pesa alcanzaba la parte inferior de la marca, como en la figura 6 A y B. Por este motivo, fue importante que la marca no estuviera colocada en la parte superior de la estructura, pues al estar más abajo, se garantizaba que la pesa levantada superara la marca en cada intento.

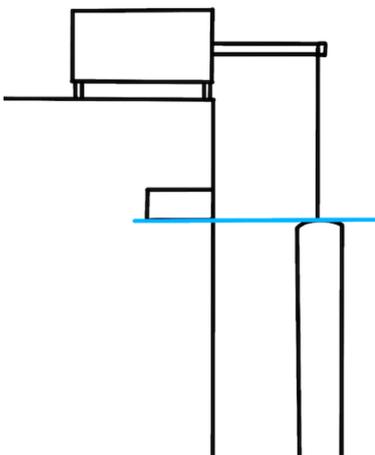


Figura 6A: uso de la marca para identificar la posición final.

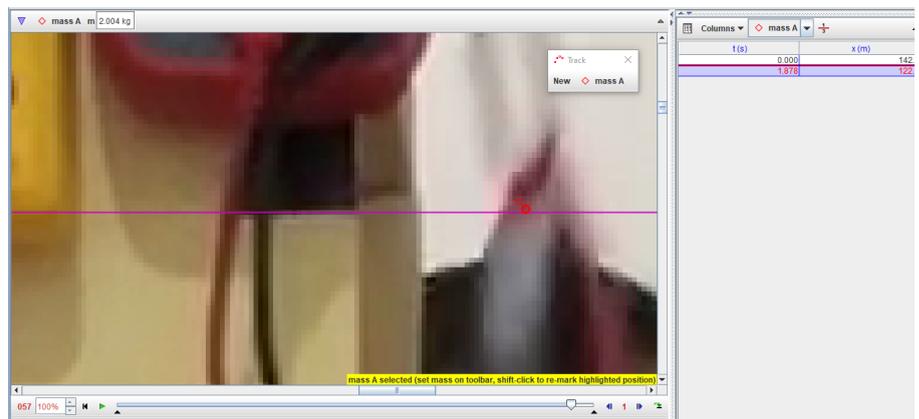


Figura 6B: ejemplo de la posición final en *Tracker* (Acercamiento a la marca en la estructura).

Para lograr un cambio en la temperatura inicial del motor, después de cada prueba se dejó que el motor se enfríe nuevamente. Luego, sin ninguna carga amarrada, se dejó encendido el circuito por diferentes cantidades de tiempo, dejando que el motor se caliente y llegue a distintas temperaturas. La temperatura mínima del motor fue 302.2 ± 0.1 K y después de mantener el motor encendido por diferentes tiempos, la temperatura máxima alcanzada por el motor tendía a ser 313.7 ± 0.1 K después de 2100 ± 0.01 s. En la siguiente tabla se muestran las temperaturas alcanzadas que fueron probadas en el experimento.

Tiempo t s \pm 0.01s	0.00	180.00	300.00	480.00	900.00	1200.00	1500.00	2100.00
Temperatura T K \pm 0.1K	302.2	304.3	306.5	307.4	309.5	310.5	313.0	313.7

Tabla 1: Temperatura alcanzada por el motor después del tiempo en que se mantuvo encendido el circuito con sus errores de lectura.

Datos obtenidos

Una vez realizada la experimentación, se obtuvieron los datos brutos de diez intentos para cada cantidad de temperatura inicial del motor. La siguiente tabla es una muestra¹ de los resultados obtenidos cuando la temperatura inicial del motor fue de $313.7 \pm 0.1K$.

Temperatura inicial del motor $T_i = 313.7 \pm 0.1K$			
Temperatura final del motor después de los 10 intentos $T_f = 312.2 \pm 0.1K$			
Medición	Tiempo t	Voltaje v	Corriente eléctrica I
	s \pm 0.001s	V \pm 0.01V	A \pm 0.01A
x_1	1.878	10.71	3.28
x_2	1.959	10.56	3.32
x_3	2.101	10.66	3.46
x_4	2.096	10.60	3.47
x_5	2.060	10.68	3.68
x_6	2.097	10.53	3.33
x_7	2.210	10.54	3.29
x_8	2.082	10.55	3.29
x_9	2.029	10.55	3.26
x_{10}	2.090	10.70	3.31
Promedio	2.06 ± 0.09	10.61 ± 0.07	3.4 ± 0.1

Tabla 2: Datos obtenidos cuando la temperatura inicial del motor fue de $313.7 \pm 0.1K$ con sus errores de lectura.

¹ Tablas de cada temperatura en **Anexo 1**.

Análisis de datos

Para cada prueba, se calcularon los promedios de los resultados obtenidos de los diez intentos utilizando la fórmula 4:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (5)$$

$$e = \sqrt{\frac{(\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + \dots + (\Delta x_N)^2}{N-1}} \quad (6)$$

Además, se utilizó las fórmulas 5 y 6 para calcular el error aleatorio como en el siguiente ejemplo:

$$e = \sqrt{\frac{(1.878-2.060)^2 + (1.959-2.060)^2 + (2.101-2.060)^2 + (2.096-2.060)^2 + \dots + (2.210-2.060)^2 + (2.082-2.060)^2 + (2.029-2.060)^2 + (2.090-2.060)^2}{10-1}}$$

$$e = 0.089 = 0.09$$

Temperatura inicial T_i	Temperatura final T_f	Tiempo promedio \bar{t}	Voltaje promedio \bar{v}	Corriente eléctrica promedio \bar{I}
K \pm 0.1K	K \pm 0.1K	s	V	A
302.2	302.4	1.91 \pm 0.09	10.72 \pm 0.05	3.25 \pm 0.07
304.3	304.5	1.89 \pm 0.07	10.64 \pm 0.05	3.5 \pm 0.1
306.5	306.7	1.95 \pm 0.09	10.64 \pm 0.06	3.32 \pm 0.09
307.4	307.5	2.0 \pm 0.1	10.62 \pm 0.08	3.24 \pm 0.04
309.5	309.6	2.02 \pm 0.09	10.61 \pm 0.04	3.28 \pm 0.06
310.5	310.4	2.04 \pm 0.09	10.57 \pm 0.03	3.25 \pm 0.05
313.0	312.05	2.05 \pm 0.09	10.57 \pm 0.09	3.30 \pm 0.06
313.7	312.2	2.06 \pm 0.09	10.61 \pm 0.07	3.4 \pm 0.1

Tabla 3: Resultados de los promedios obtenidos para cada temperatura inicial.

De acuerdo a la fórmula 1, para medir la eficiencia, es necesario obtener la potencia de salida del motor al levantar la carga y la potencia de entrada para obtener la razón entre estas variables, por lo que se realizaron los siguientes cálculos:

I. Trabajo

Utilizando las mediciones de la masa y la distancia, es posible encontrar el trabajo realizado para levantar la carga con la fórmula 5. Con las mediciones obtenidas y asumiendo un valor de la gravedad de $9.81ms^{-2}$ para calcular la fuerza, el trabajo realizado por el motor en la pesa sería el siguiente:

$$W = |F| |\Delta y| \text{Cos}\theta \quad (5)$$

$$W = |(2.004kg \pm 0.001kg)(9.81ms^{-2})| \times |1.415m \pm 0.001m| \times \text{Cos}(180^\circ)$$

$$W = - (19.62N) \times (1.415m)$$

$$W \pm \Delta W = - 27.7623 \pm (27.7623)\left(\frac{0.001}{2.004} + \frac{0.001}{1.415}\right)J$$

$$W \pm \Delta W = - 27.76 \pm 0.03 J$$

Por lo tanto, de acuerdo a la tercera ley de Newton, el trabajo realizado por el motor para levantar la carga es de $27.76 \pm 0.03 J$.

II. Potencia de salida

Con los resultados promedio del tiempo que le tomó al motor levantar la pesa y el trabajo, se calculó la potencia de salida del motor usando la fórmula 2 para cada temperatura inicial probada como en el siguiente ejemplo:

$$P = \frac{W}{t}$$

$$P = \frac{27.76 \pm 0.03 J}{1.91 \pm 0.08 s}$$

$$P \pm \Delta P = 14.534... \pm 14.534... \left(\frac{0.03}{27.76} + \frac{0.08}{1.91}\right)W$$

$$P \pm \Delta P = 14.5 \pm 0.6 W$$

Temperatura inicial T_i	Tiempo promedio \bar{t}	Potencia P
$K \pm 0.1K$	s	W
302.2	1.91 ± 0.09	14.5 ± 0.6
304.3	1.89 ± 0.07	14.7 ± 0.6
306.5	1.95 ± 0.09	14.2 ± 0.7
307.4	2.0 ± 0.1	14 ± 1
309.5	2.02 ± 0.09	13.8 ± 0.6
310.5	2.04 ± 0.09	13.6 ± 0.6
313.0	2.05 ± 0.09	13.5 ± 0.6
313.7	2.06 ± 0.09	13.5 ± 0.6

Tabla 4: Potencia de salida del motor para cada temperatura.

III. Potencia de entrada

Para calcular la potencia de entrada, se utilizó la fórmula 3 como en el siguiente ejemplo.

$$P = V \times I$$

$$P = (10.72 \pm 0.05 V) \times (3.25 \pm 0.07 A)$$

$$P = 34.84 \pm 34.84 \left(\frac{0.05}{10.72} + \frac{0.07}{3.25} \right)$$

$$P = 34.8 \pm 0.9 W$$

Temperatura inicial T_i	Voltaje promedio \bar{v}	Corriente eléctrica promedio \bar{I}	Potencia P (W)
$K \pm 0.1K$	V	A	W
302.2	10.72 ± 0.05	3.25 ± 0.07	34.8 ± 0.9
304.3	10.64 ± 0.05	3.5 ± 0.1	37 ± 1
306.5	10.64 ± 0.06	3.32 ± 0.09	35 ± 1
307.4	10.62 ± 0.08	3.24 ± 0.04	34.4 ± 0.7
309.5	10.61 ± 0.04	3.28 ± 0.06	34.8 ± 0.8
310.5	10.57 ± 0.03	3.25 ± 0.05	34.4 ± 0.6
313.0	10.57 ± 0.09	3.30 ± 0.06	35 ± 1
313.7	10.61 ± 0.07	3.4 ± 0.1	36 ± 1

Tabla 5: Potencia de entrada del motor para cada temperatura.

IV. Eficiencia

Finalmente, con las potencias de entrada y salida, es posible obtener la eficiencia del motor con la fórmula 1.

$$E = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} \times 100\%$$

$$E = \frac{14.5 \pm 0.6 W}{34.8 \pm 0.9 W} \times 100\%$$

$$E = 41.67... \pm 41.67... \left(\frac{0.6}{14.5} + \frac{0.9}{34.8} \right) \%$$

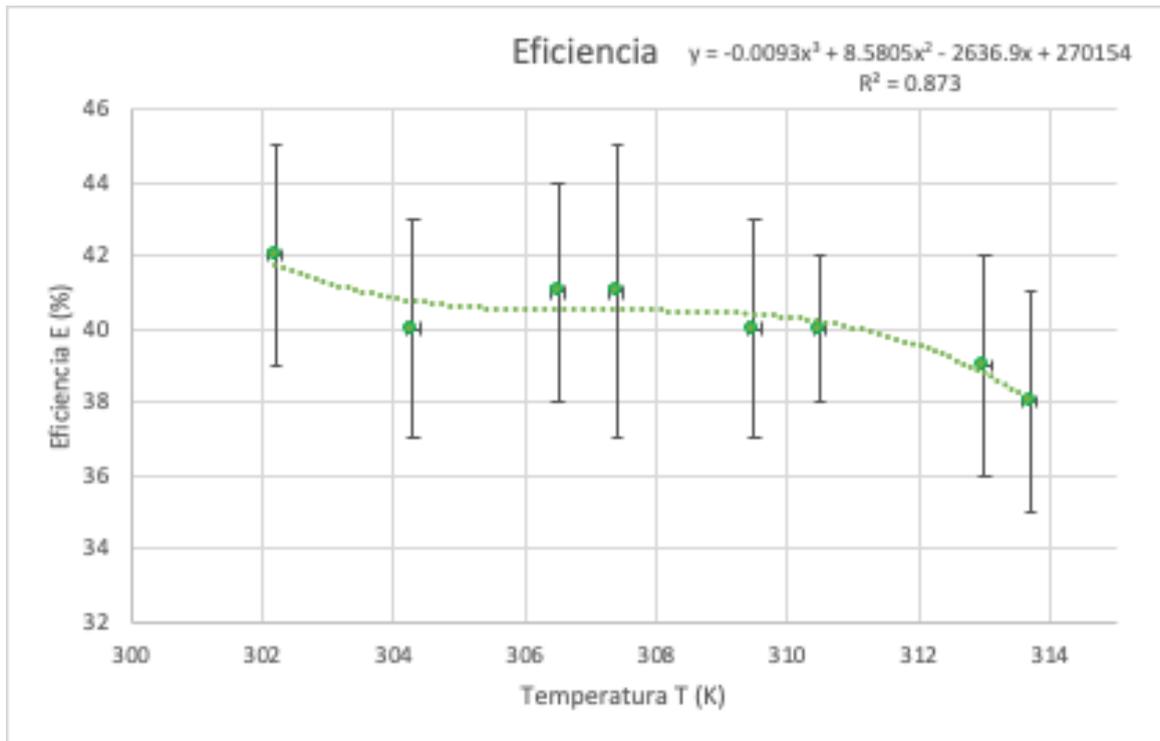
$$E = 42 \pm 3 \%$$

Temperatura inicial T_i	Eficiencia E
$T \pm 0.1K$	%
302.2	42 ± 3
304.3	40 ± 3
306.5	41 ± 3
307.4	41 ± 4
309.5	40 ± 3
310.5	40 ± 2
313.0	39 ± 3
313.7	38 ± 3

Tabla 6: Se muestra la eficiencia del motor al levantar una carga, obtenida en relación a la temperatura.

Resultados finales

En base a la tabla 6, es posible identificar una eficiencia mínima de $38 \pm 3 \%$ y una máxima de $42 \pm 3 \%$. Este bajo porcentaje indica diversas pérdidas del motor, las cuales ocurren cuando la energía eléctrica del motor es transformada en otros tipos de energía en lugar de energía mecánica. Algunas pérdidas podrían deberse al ruido o la fricción generada por las escobillas del motor de corriente directa, resultando en la transferencia de la energía eléctrica a calor. Inclusive, en la tabla 3 puede apreciarse un incremento de la temperatura inicial a la temperatura final del motor en los primeros cinco intentos.



Gráfica 1: Eficiencia en comparación con la temperatura del motor con una línea de tendencia $y = -0.0093x^3 + 8.5805x^2 - 2636.9x + 270154$ y el coeficiente de correlación.

Por otro lado, se puede ver que a medida que la temperatura inicial fue aumentando, el porcentaje de eficiencia se fue reduciendo hasta en un 5%. Sin embargo, este cambio no fue constante, pues al graficar la línea de tendencia, se puede identificar un modelo polinómico de grado 3, como mostrado en la gráfica 1, donde el primer intervalo de $302.2 \pm 0.1\text{K}$ a $304.3 \pm 0.1\text{K}$ tiene una razón de cambio negativa. De $304.3 \pm 0.1\text{K}$ a $310.5 \pm 0.1\text{K}$ hay una razón de cambio promedio de 0 debido a que la eficiencia en este rango de temperatura se mantuvo con un valor casi constante (aumenta en 1% y decrece en 1%), y finalmente, de $310.5 \pm 0.1\text{K}$ a $313.7 \pm 0.1\text{K}$, cuando la temperatura se aproximaba a la temperatura máxima alcanzable por el motor, se puede ver nuevamente un decrecimiento en la eficiencia. A su vez, siguiendo este modelo cúbico de tendencia, el coeficiente de Pearson muestra un valor de 0.873, lo cual indica una correlación fuerte entre ambas variables.

Conclusiones

A continuación se presentarán las conclusiones para responder a la pregunta de investigación y cumplir el objetivo de determinar la relación entre la temperatura del motor de corriente directa y su eficiencia, así como comentar las limitaciones y recomendaciones del trabajo:

De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible concluir que la hipótesis de investigación fue parcialmente correcta debido a que sí hubo un decrecimiento en el porcentaje de la eficiencia conforme la temperatura fue aumentando, sin embargo este comportamiento no fue constante, pues de acuerdo a la ecuación de tendencia $y = -0.0093x^3 + 8.5805x^2 - 2636.9x + 270154$, hubieron 3 patrones de comportamiento distintos. Primero, a medida que la temperatura del motor incrementa, la eficiencia al levantar la carga se reduce inicialmente, luego se mantiene casi constante y se vuelve a reducir al llegar a su temperatura máxima. Por lo tanto, el objetivo de investigación fue cumplido, pues se logró identificar el tipo de relación entre la temperatura de un motor de corriente directa y su eficiencia.

Sin embargo, a lo largo del experimento hubieron limitaciones y errores que afectan los resultados obtenidos. Primero, la temperatura mínima del motor dependió de la temperatura ambiente al no poder controlar esa variable y la temperatura máxima fue la obtenida después de realizar varias pruebas. Segundo, el experimento se vió limitado por los errores de lectura de los instrumentos, principalmente por el termómetro y los multímetros con errores de $\pm 0.1K$, $\pm 0.01A$ y $\pm 0.01V$, lo cual afectó la precisión de los datos registrados. De igual manera, hubo un error sistemático que afectó la exactitud al momento de obtener el tiempo que le tomó al motor en levantar la carga, producido por el ángulo de la cámara. Por último, los tiempos obtenidos fueron bastante cortos (cerca de dos segundos), por lo cual al momento de analizar los videos y debido a la capacidad de la cámara, se incrementó el error aleatorio al definir el momento en que la pesa cruzó la marca.

Por lo tanto, para mejorar la precisión y exactitud del experimento, sugeriría utilizar herramientas que manejen una escala más precisa. Además con acceso a equipo de la prepa, se podría diseñar un circuito más avanzado con sensores que determinen más exactamente el tiempo inicial y final en que la pesa fue levantada $1.415 \pm 0.001m$. Por otro lado, este

trabajo abre una oportunidad a nuevos estudios que evalúen diferentes variables del rendimiento del motor en relación a su temperatura. Por ejemplo, otro factor importante en los mecanismos de un robot de competencia es el torque, sobre todo en el chasis y *shooter*, por lo que se podría estudiar el posible efecto de la temperatura de un motor de corriente directa en el torque, midiendo la velocidad angular y potencia con un tacómetro y dos multímetros.

Finalmente, al llevar a cabo la investigación, tuve que enfrentar diversos retos como conseguir todos los materiales por mi cuenta debido a la pandemia de 2020, por lo cual la escala de los instrumentos no es tan precisa. Además, en un inicio utilicé un motor diferente, pero este presentó muchas fallas, por lo que tuve que buscar y comprar otro. No obstante y a pesar de los desafíos, este trabajo no solo me dió la oportunidad de estudiar un concepto de mi interés, si no que me ayudó a confirmar mi interés por la ingeniería. Además, es notable resaltar que esta investigación, al mostrar la relación entre la temperatura de un motor de corriente directa y su eficiencia, señala a su vez la importancia de utilizar técnicas de enfriamiento en un motor para reducir aunque sea mínimamente la pérdida de eficiencia.

Bibliografía

Hughes, A y Drury, B. (2013). *Electric Motors and Drives : Fundamentals, Types and Applications: Vol. 4th ed.* Newnes. Recuperado de:
<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=516215&lang=es&site=eds-live&scope=site>.

Badii, M. H., Guillen, A., & Abreu, J. L. (2016). Energías Renovables y Conservación de Energía. (Spanish). *Revista Daena (International Journal of Good Conscience)*, 11(1), 141–155. Recuperado de:
<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edo&AN=116281297&lang=es&site=eds-live&scope=site>.

C H Chong and M A H Rasid (2019) Improvement of heat transfer for DC motor windings. Retrieved from:
<https://0-iopscience-iop-org.biblioteca-ils.tec.mx/article/10.1088/1757-899X/788/1/012097/pdf>

Russell, C. (2000). *Michael Faraday : Physics and Faith.* Oxford University Press. Recuperado de:
https://0-eds-a-ebscohost-com.biblioteca-ils.tec.mx/eds/ebookviewer/ebook?sid=7ec609c0-41ff-4dca-87d0-ffbcc267d6e5%40sdc-v-sessmgr02&ppid=pp_113&vid=1&format=EB

Contents. (2002). In N. Schlager (Ed.), *Science of Everyday Things* (Vol. 1, p. iii). Gale. Recuperado de:
https://link.gale.com/apps/doc/CX3408600005/GVRL?u=itesm_mo&sid=GVRL&xid=de789d99

Enercom (2021). Energy Efficient Motors. Recuperado de:
<https://www.energydepot.com/RPUcom/library/MISC003.asp#:~:text=Thus%2C%20a%20motor%20that%20is,a%20rise%20in%20motor%20temperature>.

Fundación Red de Energía. (2011). Manual técnico: Motores eléctricos. Recuperado de:
<http://www.bun-ca.org/publicaciones/manuales/UltimaVersion/Motores30Junio11.pdf>

Guevara, C. (2009). Efecto de la temperatura en la eficiencia de motores industriales. Recuperado de:
<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1247&ni=efecto-de-la-temperatura-en-la-eficiencia-de-motores-industriales>

Ikimi, O. (2020). Understanding DC Motor Operation Modes and Speed Regulation Techniques. Recuperado de:
<https://www.allaboutcircuits.com/news/a-basic-guide-to-dc-motors-types-of-motors-operation-modes-and-their-applications/#:~:text=DC%20motors%20operate%20on%20Faraday's,placed%20in%20a%20magnetic%20field>.

Medinger, H. (2000). The hot topic of motor temperature. Recuperado de:
<https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21826824/the-hot-topic-of-motor-temperature>

Anexos

Anexo 1: Tablas de las diferentes temperaturas

Temperatura inicial del motor $T_i = 302.2 \pm 0.1\text{K}$			
Temperatura final del motor después de los 10 intentos $T_f = 302.4 \pm 0.1\text{K}$			
Medición	Tiempo t	Voltaje v	Corriente eléctrica I
	$s \pm 0.001s$	$V \pm 0.01V$	$A \pm 0.01A$
x_1	1.950	10.75	3.19
x_2	1.790	10.76	3.21
x_3	1.840	10.76	3.23
x_4	1.930	10.74	3.2
x_5	1.940	10.7	3.2
x_6	1.870	10.71	3.37
x_7	2.040	10.7	3.29
x_8	2.000	10.66	3.37
x_9	1.800	10.64	3.27
x_{10}	1.920	10.81	3.16
Promedio	1.91 ± 0.09	10.72 ± 0.05	3.25 ± 0.07

Tabla 7: Datos obtenidos cuando la temperatura inicial del motor fue $302.2 \pm 0.1\text{K}$

Temperatura inicial del motor $T_i = 304.3 \pm 0.1\text{K}$			
Temperatura final del motor después de los 10 intentos $T_f = 304.5 \pm 0.1\text{K}$			
Medición	Tiempo t	Voltaje v	Corriente eléctrica I
	$s \pm 0.001s$	$V \pm 0.01V$	$A \pm 0.01A$
x_1	1.821	10.62	3.36
x_2	1.943	10.64	3.51
x_3	2.021	10.63	3.63
x_4	1.909	10.63	3.61
x_5	1.840	10.62	3.41
x_6	1.939	10.62	3.55
x_7	1.923	10.76	3.24
x_8	1.932	10.61	3.49
x_9	1.821	10.69	3.39
x_{10}	1.798	10.61	3.32
Promedio	1.89 ± 0.07	10.64 ± 0.05	3.5 ± 0.1

Tabla 8: Datos obtenidos cuando la temperatura inicial del motor fue $304.3 \pm 0.1\text{K}$

Temperatura inicial del motor $T_i = 306.5 \pm 0.1\text{K}$			
Temperatura final del motor después de los 10 intentos $T_f = 306.7 \pm 0.1\text{K}$			
Medición	Tiempo t	Voltaje v	Corriente eléctrica I
	$s \pm 0.001s$	$V \pm 0.01V$	$A \pm 0.01A$
x_1	1.893	10.71	3.25
x_2	2.025	10.63	3.32
x_3	1.866	10.63	3.33
x_4	1.949	10.60	3.4
x_5	1.900	10.6	3.45
x_6	1.947	10.55	3.31
x_7	1.892	10.59	3.49
x_8	2.010	10.69	3.23
x_9	1.882	10.68	3.23
x_{10}	2.154	10.72	3.21
Promedio	1.95 ± 0.09	10.64 ± 0.06	3.32 ± 0.09

Tabla 9: Datos obtenidos cuando la temperatura inicial del motor fue $306.5 \pm 0.1\text{K}$

Temperatura inicial del motor $T_i = 307.4 \pm 0.1\text{K}$			
Temperatura final del motor después de los 10 intentos $T_f = 307.5 \pm 0.1\text{K}$			
Medición	Tiempo t	Voltaje v	Corriente eléctrica I
	$s \pm 0.001s$	$V \pm 0.01V$	$A \pm 0.01A$
x_1	2.017	10.51	3.25
x_2	1.980	10.51	3.3
x_3	2.027	10.58	3.3
x_4	1.914	10.58	3.22
x_5	1.801	10.63	3.26
x_6	1.902	10.55	3.2
x_7	2.030	10.68	3.29
x_8	2.167	10.68	3.2
x_9	2.068	10.7	3.21
x_{10}	2.098	10.74	3.21
Promedio	2.0 ± 0.1	10.62 ± 0.08	3.24 ± 0.04

Tabla 10: Datos obtenidos cuando la temperatura inicial del motor fue $307.4 \pm 0.1\text{K}$.

Temperatura inicial del motor $T_i = 309.5 \pm 0.1\text{K}$			
Temperatura final del motor después de los 10 intentos $T_f = 309.6 \pm 0.1\text{K}$			
Medición	Tiempo t	Voltaje v	Corriente eléctrica I
	$s \pm 0.001s$	$V \pm 0.01V$	$A \pm 0.01A$
x_1	2.090	10.56	3.35
x_2	1.849	10.69	3.38
x_3	2.101	10.63	3.32
x_4	2.050	10.60	3.21
x_5	2.003	10.64	3.24
x_6	2.130	10.55	3.3
x_7	1.920	10.56	3.25
x_8	1.959	10.63	3.28
x_9	2.087	10.63	3.29
x_{10}	1.990	10.64	3.19
Promedio	2.02 ± 0.09	10.61 ± 0.04	3.28 ± 0.06

Tabla 11: Datos obtenidos cuando la temperatura inicial del motor fue $309.5 \pm 0.1\text{K}$

Temperatura inicial del motor $T_i = 310.5 \pm 0.1\text{K}$			
Temperatura final del motor después de los 10 intentos $T_f = 310.4 \pm 0.1\text{K}$			
Medición	Tiempo t	Voltaje v	Corriente eléctrica I
	$s \pm 0.001s$	$V \pm 0.01V$	$A \pm 0.01A$
x_1	2.109	10.6	3.27
x_2	2.122	10.56	3.3
x_3	1.905	10.56	3.25
x_4	1.937	10.57	3.22
x_5	1.946	10.52	3.27
x_6	2.040	10.56	3.32
x_7	2.002	10.6	3.28
x_8	2.083	10.63	3.22
x_9	2.100	10.56	3.23
x_{10}	2.194	10.53	3.15
Promedio	2.04 ± 0.09	10.57 ± 0.03	3.25 ± 0.05

Tabla 12: Datos obtenidos cuando la temperatura inicial del motor fue $310.5 \pm 0.1\text{K}$

Temperatura inicial del motor $T_i = 313.0 \pm 0.1\text{K}$			
Temperatura final del motor después de los 10 intentos $T_f = 312.0 \pm 0.1\text{K}$			
Medición	Tiempo t	Voltaje v	Corriente eléctrica I
	$s \pm 0.001s$	$V \pm 0.01V$	$A \pm 0.01A$
x_1	2.081	10.63	3.32
x_2	2.021	10.59	3.34
x_3	1.938	10.63	3.25
x_4	2.020	10.56	3.45
x_5	2.220	10.5	3.29
x_6	2.000	10.55	3.29
x_7	1.938	10.56	3.27
x_8	2.140	10.65	3.24
x_9	2.152	10.63	3.29
x_{10}	2.020	10.35	3.23
Promedio	2.05 ± 0.09	10.57 ± 0.09	3.30 ± 0.06

Tabla 13: Datos obtenidos cuando la temperatura inicial del motor fue $313.0 \pm 0.1\text{K}$

Temperatura inicial del motor $T_i = 313.7 \pm 0.1\text{K}$			
Temperatura final del motor después de los 10 intentos $T_f = 312.2 \pm 0.1\text{K}$			
Medición	Tiempo t	Voltaje v	Corriente eléctrica I
	$s \pm 0.001s$	$V \pm 0.01V$	$A \pm 0.01A$
x_1	1.878	10.71	3.28
x_2	1.959	10.56	3.32
x_3	2.101	10.66	3.46
x_4	2.096	10.60	3.47
x_5	2.060	10.68	3.68
x_6	2.097	10.53	3.33
x_7	2.210	10.54	3.29
x_8	2.082	10.55	3.29
x_9	2.029	10.55	3.26
x_{10}	2.090	10.70	3.31
Promedio	2.06 ± 0.09	10.61 ± 0.07	3.4 ± 0.1

Tabla 14: Datos obtenidos cuando la temperatura inicial del motor fue $313.7 \pm 0.1\text{K}$