

Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica
Conversión Electromecánica de la energía

Laboratorios 6 y 7
MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Raven Guillermo CI: 25.476.227
Profesor: Crespo Jorge

Caracas, 5 de noviembre de 2019

Índice

1. Objetivos	3
2. Lista de instrumentos	3
3. Condiciones de ensayo	3
4. Procedimiento	5
4.1. Características internas	5
4.1.1. Caídas internas	5
4.1.2. Curva de saturación ó vacío	5
4.2. Características externas	6
4.2.1. Característica de regulación y porcentaje de regulación	6
4.3. Motor independiente	6
4.3.1. Curva de velocidad en función de la corriente de armadura	6
4.3.2. Determinar el PRN %	6
4.4. Pérdidas en vacío	6
5. Diagramas	7
6. Cálculos preliminares	8
6.1. Características internas	8
6.1.1. Resistencia interna	8
7. Resultados	9
7.1. Características internas	9
7.1.1. Resistencia de campo	9
7.1.2. Resistencia de armadura y tensión en escobillas	10
7.1.3. Modelo Obtenido	12
7.1.4. Resistencia serie	12
7.1.5. Curva de vacío	12
7.2. Características externas (Funcionamiento como generador)	13
7.2.1. Curva característica de regulación	13
7.2.2. Porcentaje de regulación	14
7.2.3. Curva de carga	14
7.3. Características externas (Funcionamiento como motor)	15

1. Objetivos

- Estudiar los diferentes tipos de motores de corriente continua y sus aplicaciones en la industria.
- Modelar en régimen permanente una máquina de corriente continua.
- Determinar las curvas características más importantes de las máquinas de corriente continua.
- Estudiar los problemas asociados a la conmutación de una máquina de corriente continua.

2. Lista de instrumentos

Cuadro 1: Lista de instrumentos de medición y componentes

Instrumento	Alcance ó especificaciones
Reostato	(0-100) Ω ; 2.4 A
Reostato	(0-33) Ω ; 4.2 A
Voltímetros de bobina móvil y hierro móvil	(0-150) V/ (0-15) V/(0-30) V/(0-300) V
Multímetro fluke	-
Resistencia de shunt	40 A @ 60 mV
Tacometro	-
Amperímetro de bobina móvil y hierro móvil	(0-1.2) A/ (0-6) A/(0-30) A
Protecciones AC	25 A; 380 V
Protecciones DC	-
Carga lineal	(200,400,600,800,1K)W
Motor sincrónico	3.5 KVA
	120/208 V
	16,8/9,7 A
	1000 rpm
	I _{exc} 3 A
	V _{exc} 125 V
	f _p 0,9
Motor DC	115 V
	56A
	1000 rpm
	6,5 hp
	carga 100 %
Generador DC	3 KV
	125 V
	26,5 A
	1000 rpm

3. Condiciones de ensayo

Estas son las precauciones y normativas necesarias para realizar el laboratorio de forma segura y efectiva:

- **Respecto a la medición de la curva en vacío:** La máquina a la que se le hará la prueba deberá estar conectada como generador. Dado que tiene que girar a velocidad constante, se utilizara algún mecanismo externo que brinde tales características.
Este sera un motor sincrónico o una turbina. En el caso de emplearse un motor sincrónico el campo deberá activarse al alcanzar una velocidad constante.
- **Respecto a la medición de resistencias:** Se trabajara asegurándose que la corriente máxima alcanzada en I_f ó I_a sea menor o igual al 10 % de la corriente nominal. La resistencia obtenida mediante la pendiente de la recta debe ajustarse de acuerdo a la temperatura.
- **Respecto a la medición de la característica de regulación:** Se debe mantener U_c (tensión en los bornes) en su valor nominal y a velocidad nominal.
- **Respecto a la medición del porcentaje de regulación:** Se debe comenzar a medir la tensión en los bornes comenzando desde el valor a plena carga.
- **Respecto a la medición de la curva de carga:** Se debe medir a velocidad constante.
- **Respecto a la medición de la curva electromecánica de par:** Se deben mantener U_c constante y I_{exc} .
- **Respecto a la medición de la curva electromecánica de velocidad:** La tensión en los bornes (U_c) deberá mantenerse a su valor nominal y la corriente de excitación también.
- **Respecto a la medición del porcentaje de regulación de velocidad:** Se comenzara a medir desde la carga nominal (I_a nominal y N nominal).
- **Respecto a la medición de la curva de regulación de velocidad:** Sin importar si se utiliza el método de control por corriente de campo ó el método de ajuste de tensión en los terminales de armadura. Es necesario mantener en ambos el par constante, aunque en el primero la corriente de excitación es constante, en cambio en el segundo sera constante la tensión en los bornes.
- **Respecto a la medición de la curva de regulación de par:** Sin importar si se utiliza el método de control por corriente de campo ó el método de ajuste de tensión en los terminales de armadura. Es necesario mantener en ambos la velocidad constante, aunque en el primero la corriente de excitación es constante, en cambio en el segundo sera constante la tensión en los bornes.
- **Respecto a la vestimenta:** No usar franelas o camisas manga larga, llevar zapatos de goma y pantalones. No usar collares ni pulseras de metal.
- **Previo a las pruebas:** Hacer primero el montaje antes de energizar, al culminarlo preguntar al profesor si las conexiones son correctas para proceder con las pruebas.
- **Respecto a la comunicación:** Mantener informado sobre cualquier cambio en el montaje al compañero de laboratorio y por sobre todo informar si el circuito se encuentra energizado o no.
- **Respecto a las curvas observadas:** No aceptar como adecuada una curva que este llena de ruido, ya que se puede deber a que algún elemento puede estar actuando como antena, esto originara incertidumbre en los resultados.

- **Respecto al numero de mediciones:** Realizar al menos 5 mediciones para condiciones distintas.
- **Respecto a la elección de componentes y las conexiones:** Evitar los componentes que puedan funcionar como antenas (como resistencias de shunt de tipo mariposa u algún otro que se encuentre muy expuesto) y cuidar los contactos de cada conexión.
- **Respecto a la manipulación:** En caso de maniobrar el circuito energizado manipular con la mano derecha, buscando mayores probabilidades de sobrevivir en caso de un accidente eléctrico.

4. Procedimiento

4.1. Características internas

4.1.1. Caídas internas

1. Lo primero sera, hallar las resistencias internas de campo y armadura por lo que se realizaran las conexiones como en la Figura 1.
2. Se conectara unicamente el lado de campo con una fuente DC (a una fracción del valor nominal).
3. Manteniendo la tensión V_f fija y variando el reostato en pasos equidistantes se tomara nota de los valores de tensión y corriente. Se tomaran al menos 4 mediciones.
4. Se desconectara la alimentación del lado de campo y se conectara la fuente del lado serie repitiendo así los pasos previos.
5. Se desconectara la alimentación del lado serie y se conectara la fuente del lado de armadura a tensión por debajo del valor nominal.
6. Manteniendo la tensión V_a fija y desplazando la cuchilla de arranque en pasos equidistantes se tomara nota de los valores de tensión en los bornes y la tensión en la resistencia de shunt. Se tomaran al menos 5 mediciones.
7. Se desconectara la alimentación del lado de armadura y se des-energizara el circuito.

4.1.2. Curva de saturación ó vacío

1. Se armara el esquema de conexiones conectando el motor DC como generador de acuerdo a la figura 2.
2. Se encenderá el generador sincrónico y solo cuando alcance una velocidad constante se accionara el campo mediante las protecciones DC.
3. Manteniendo la velocidad del eje a su valor nominal se variara el reostato del lado de campo de forma que los datos sean tomados en espacios apropiados que permitirán una exactitud de la curva graficada entre nula excitación y 125 % de la tensión nominal (U_{nom}), en la parte lineal de la curva con incrementos de 20 % de U_{nom} y pasos del 10 % de U_{nom} , alrededor del codo de saturación que suele estar entre el 80 % y el 110 % de la U_{nom} .
4. Se repetirá el proceso del punto previo; pero desde el ultimo punto alcanzado hasta el valor mínimo, respetando en lo posible que los pasos sean iguales.

4.2. Características externas

4.2.1. Característica de regulación y porcentaje de regulación

1. Se realiza la conexión de la Figura 3 de generador independiente.
2. Empleando el tacómetro se verifica velocidad nominal en el generador.
3. Se ajusta U_c inicialmente sin carga hasta alcanzar U_{nom} con I_{ext} , una vez alcanzado U_{nom} se registra el valor.
4. Se conecta carga al sistema, generando un cambio en los valores de U_c e I_a .
5. Se ajusta U_c con I_{ext} hasta alcanzar valores nominales. Se registra el valor de I_{ext} e I_a .
6. Se varía la carga y se repite hasta llegar a valores nominales.
7. Una vez registrado el último valor se verifica que se encuentre en U_{nom} e I_{anom} en caso que sean diferentes se ajustarán a valores nominales, una vez verificado se desconectará la carga de forma gradual hasta retirarla completamente, luego se registra el valor de U sin carga.

4.3. Motor independiente

4.3.1. Curva de velocidad en función de la corriente de armadura

1. Se realiza la conexión de la fig 4 de motor independiente.
2. Se realiza la medición de la curva electromecánica de velocidad manteniendo U_c constante e I_{ext} constante.
3. Se anotan las mediciones de I_a y de la velocidad.
4. Se varía R_s , por lo que varía I_a directamente. Se anotan los valores y se repite hasta tener varias mediciones.

4.3.2. Determinar el PRN %

1. Se toman las medidas a I_a nominal y N nominal con tensión de armadura e I_{exc} constante.
2. Se eleva la carga lineal hasta el valor nominal del motor. Se registran los datos
3. Se quita la carga y se toman los datos.

4.4. Pérdidas en vacío

1. Para calcular las pérdidas en el vacío se deben realizar medidas en dos velocidades distintas anotando los valores de corriente y tensión asociados.

5. Diagramas

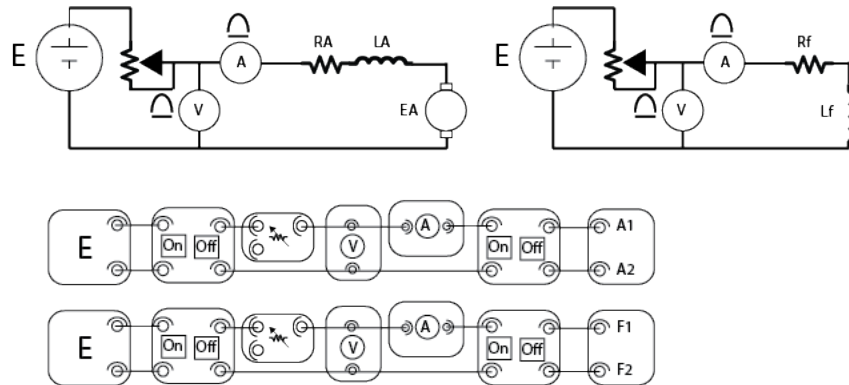


Figura 1: Diagrama de conexión pruebas de resistencias internas

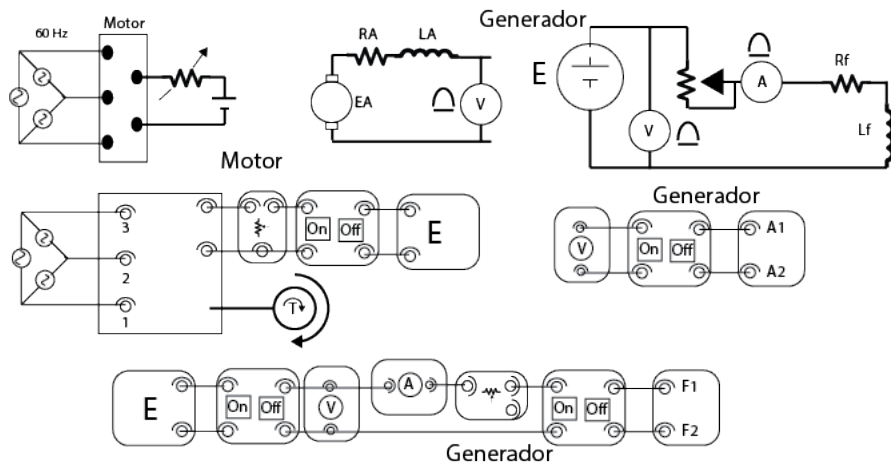


Figura 2: Diagrama de conexión pruebas de Prueba curva de vacío

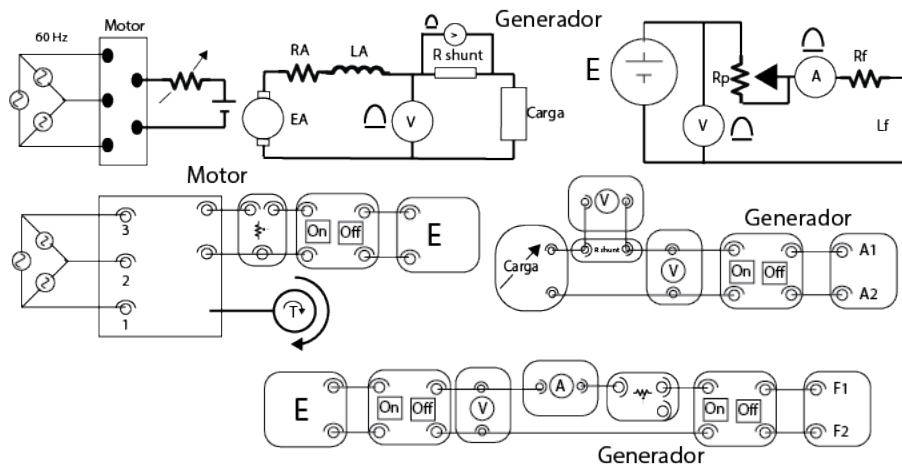


Figura 3: Diagrama de conexión de generador independiente

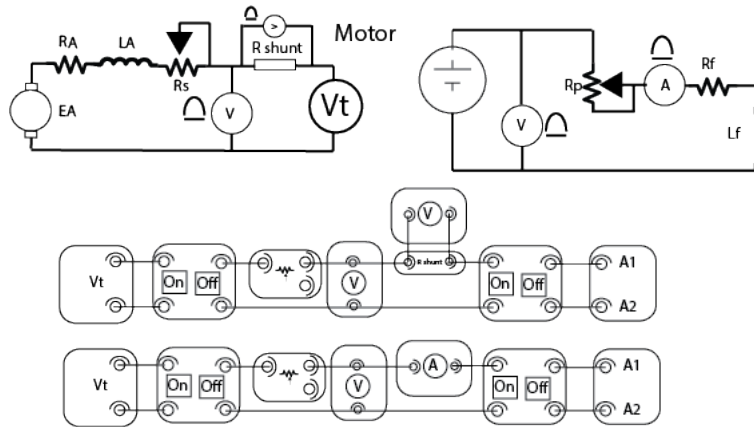


Figura 4: Diagrama de conexión de motor independiente

6. Cálculos preliminares

6.1. Características internas

6.1.1. Resistencia interna

De acuerdo al diagrama de la figura 1, se espera una curva característica de tensión vs corriente para el lado de campo con una forma similar al de la figura 5 y en el lado de armadura su forma se asemejara a la figura 6.

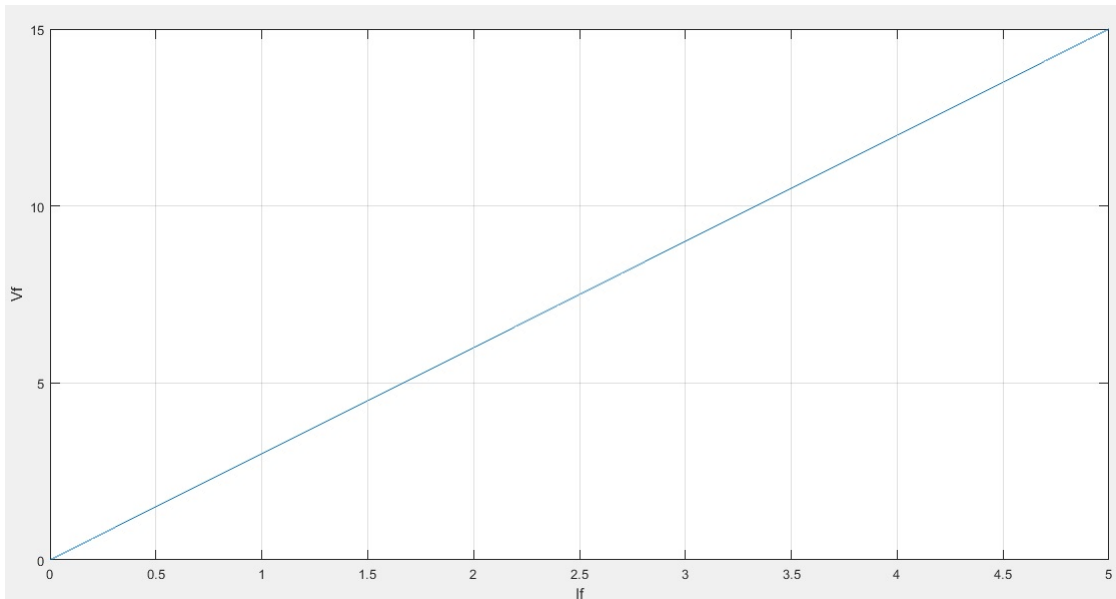


Figura 5: Curva característica esperada V vs I_f

La pendiente de la curva previa proporcionara el valor de la resistencia de campo.

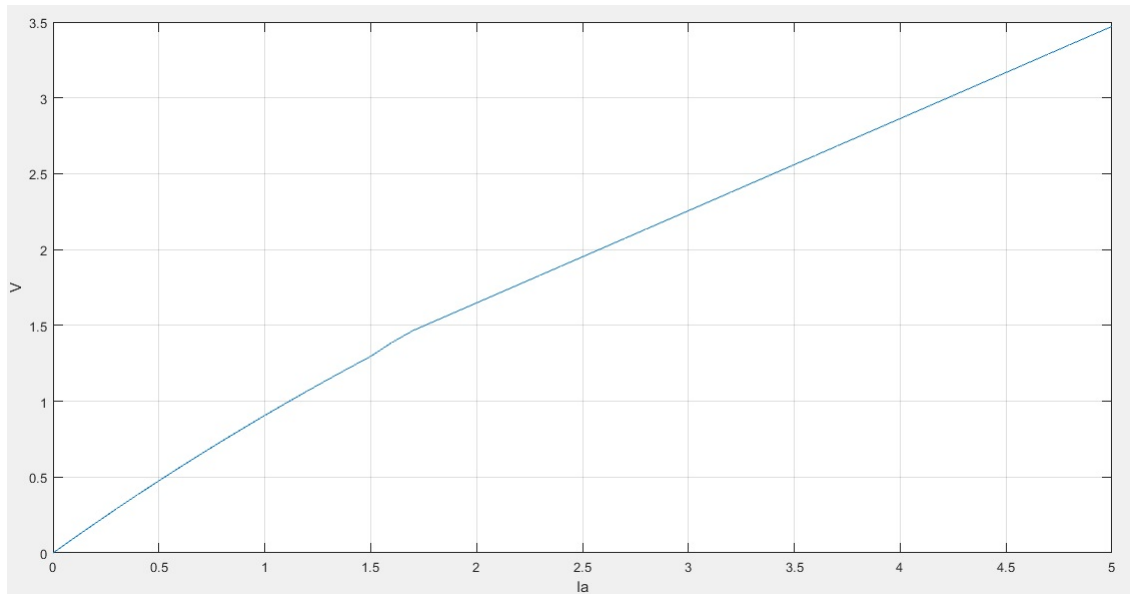


Figura 6: Curva característica esperada V vs I_a

Como se puede observar en la figura 6 a diferencia de la figura 5 no es una recta completamente. Al inicio de la curva se espera un comportamiento no lineal debido a la resistencia de las escobillas; Aunque desde cierto punto se vuelve lineal debido a que el ya mencionado efecto es despreciable, por lo que la pendiente de la zona lineal corresponde con el valor de la resistencia de armadura.

7. Resultados

7.1. Características internas

7.1.1. Resistencia de campo

Se realizaron las siguientes mediciones:

Cuadro 2: Valores obtenidos por método de voltímetro-amperímetro para R_f

Tensión [V]	Corriente [A]
$6,0 \pm 0,1$	$0,12 \pm 0,02$
$7,0 \pm 0,1$	$0,14 \pm 0,02$
$8,0 \pm 0,1$	$0,16 \pm 0,02$
$8,5 \pm 0,1$	$0,18 \pm 0,02$
$9,0 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,02$

Utilizando los valores del cuadro 2 se linealizó mediante mínimos cuadrados y se obtuvo lo siguiente:

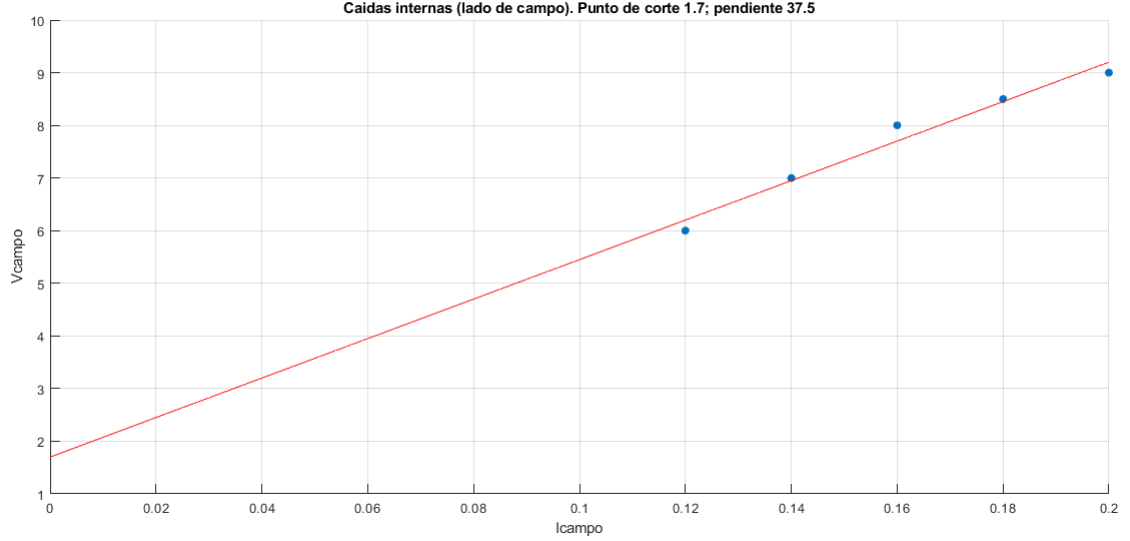


Figura 7: Recta obtenida por regresión lineal que corresponde con la resistencia de campo

Para calcular la incertidumbre asociada a la pendiente hallada se determino la desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - m \cdot x_i - b)^2}{N - 2}} \quad (1)$$

Donde:

N: numero de datos

b: Punto de corte obtenido

m: Pendiente obtenida

y_i : Datos del eje y

x_i : Datos del eje x

Utilizando la desviación se calcula incertidumbre de la pendiente mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta m = \sigma \sqrt{\frac{N}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}} \quad (2)$$

Por lo tanto la resistencia de campo medida sera: $R_{f(\text{medida})} = 37,50 \pm 0,29 \Omega$. No obstante se requiere ajustar el valor respecto a la temperatura empleando la siguiente expresión:

$$R_f = R_{(\text{medida})} \frac{T_r + T_k}{T_m + T_k} \quad (3)$$

donde:

T_k : 234.5 °C (cobre).

T_m : Temperatura a la cual se midió la resistencia, 25 °C.

T_r : Es la temperatura de referencia en °C (75 °C).

Entonces: $R_{f(\text{ajustada})} = 44,73 \pm 0,29 \Omega$.

7.1.2. Resistencia de armadura y tensión en escobillas

Se realizaron las siguientes mediciones:

Cuadro 3: Valores obtenidos por método de voltímetro-amperímetro para Ra

Tensión [V]	Corriente [A]
$0,869 \pm 0,001$	$2,5 \pm 0,5$
$1,356 \pm 0,001$	$4,0 \pm 0,5$
$1,563 \pm 0,001$	$5,0 \pm 0,5$
$1,751 \pm 0,001$	$5,5 \pm 0,5$
$2,220 \pm 0,001$	$7,5 \pm 0,5$
$2,737 \pm 0,001$	$10,0 \pm 0,5$

Empleando los valores del cuadro 3 se linealizó mediante mínimos cuadrados y se obtuvo lo siguiente:

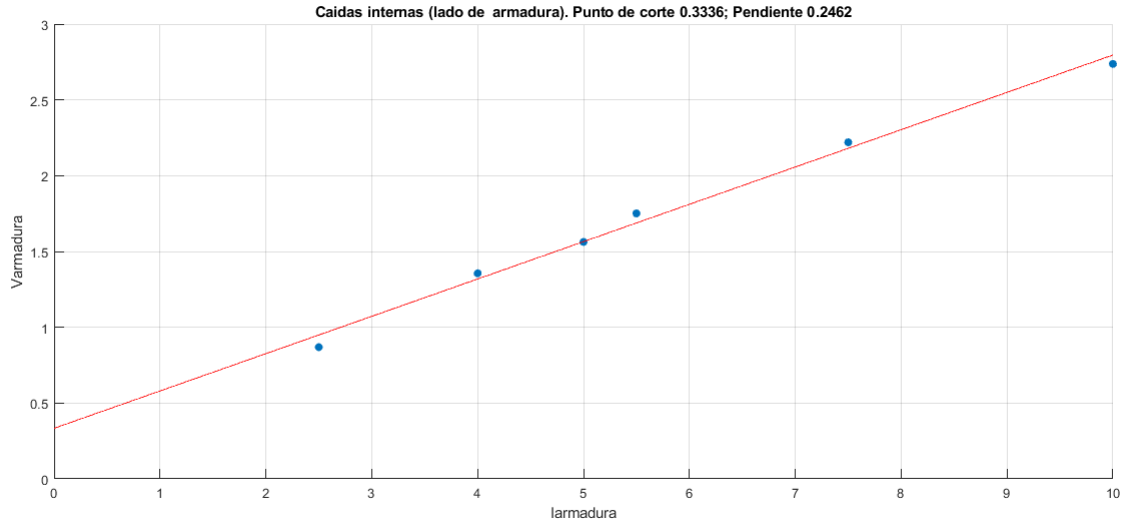


Figura 8: Recta obtenida por regresión lineal que corresponde con la resistencia de armadura y tensión en escobillas

Utilizando los datos obtenidos de la recta que corresponden con la resistencia de armadura y las ecuaciones 1 y 2 se obtuvo que la resistencia de armadura medida es igual a: $R_{a(medida)} = 0,2462 \pm 0,0081 \Omega$. No obstante se requiere ajustar el valor respecto a la temperatura usando la ecuación 3, de esta forma la resistencia de armadura real será: $R_{a(ajustada)} = 0,2936 \pm 0,0081 \Omega$.

Por otro lado la tensión en las escobillas corresponde con el punto de corte con el eje y, la incertidumbre del mismo se calcula con:

$$\Delta V_{esc} = \sigma \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}} \quad (4)$$

Entonces dicha tensión será: $V_{esc} = 0,3336 \pm 0,0195$ V. De acuerdo con IEC 34-2 e IEEE Std 113-1985 las escobillas del motor deben ser del tipo metal-grafito, con shunt debido a su tensión reducida.

7.1.3. Modelo Obtenido

7.1.4. Resistencia serie

Se realizaron las siguientes mediciones:

Cuadro 4: Valores obtenidos por método de voltímetro-amperímetro para R_s

Tensión [mV]	Corriente [A]
$7,3 \pm 0,1$	$0,44 \pm 0,02$
$8,5 \pm 0,1$	$0,52 \pm 0,02$
$9,0 \pm 0,1$	$0,54 \pm 0,02$
$10,0 \pm 0,1$	$0,60 \pm 0,02$
$11,4 \pm 0,1$	$0,70 \pm 0,02$
$13,6 \pm 0,1$	$1,00 \pm 0,02$

Utilizando los valores del cuadro 4 se linealizó mediante mínimos cuadrados y se obtuvo lo siguiente:

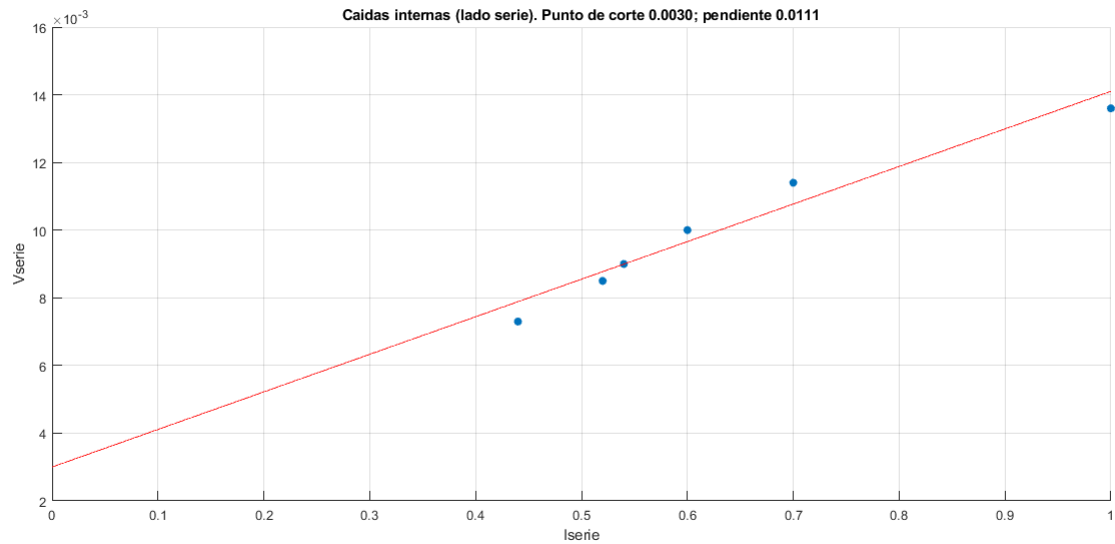


Figura 9: Recta obtenida por regresión lineal que corresponde con la resistencia serie

Empleando los datos obtenidos de la recta que corresponden con la resistencia serie y las ecuaciones 1 y 2 se obtuvo que la resistencia en serie es igual a: $R_s = 11,05 \pm 0,35 \text{ m}\Omega$. No obstante se requiere ajustar el valor respecto a la temperatura usando la ecuación 3, de esta forma la resistencia serie real sera: $R_{s(ajustada)} = 13,18 \pm 0,35 \text{ m}\Omega$.

7.1.5. Curva de vacío

Se realizaron mediciones de corriente y tensión a una velocidad constante de $1140 \pm 2 \text{ rpm}$.

Cuadro 5: Mediciones de tensión de vacío y corriente de campo

Elevando		Reduciendo	
U_0 [V]	I_{exc} [A]	U_0 [V]	I_{exc} [A]
60 ± 1	$0,54 \pm 0,02$	109 ± 1	$0,8 \pm 0,1$
74 ± 1	$0,66 \pm 0,02$	90 ± 1	$0,7 \pm 0,1$
89 ± 1	$0,82 \pm 0,02$	80 ± 1	$0,62 \pm 0,02$
107 ± 1	$1,00 \pm 0,02$	73 ± 1	$0,54 \pm 0,02$
132 ± 1	$1,3 \pm 0,1$	-	-

Con los valores obtenidos en el cuadro 5 se empleó la función $\text{polyfit}(x,y,n)$ (n es el orden del polinomio) de Matlab con el fin de obtener un polinomio que se ajuste a los datos. Y se evaluó el polinomio mediante $\text{polyval}()$, para posteriormente obtener las siguientes curvas:

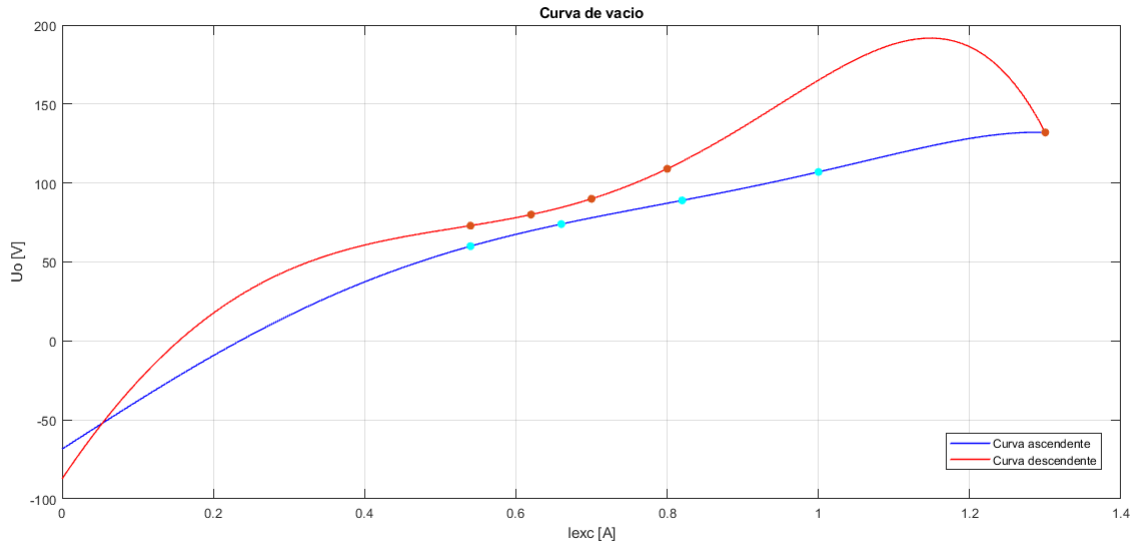


Figura 10: Curvas de vacío experimentales

7.2. Características externas (Funcionamiento como generador)

7.2.1. Curva característica de regulación

Se agregó carga al generador y se ajustó el reostato del lado de campo, con el fin de mantener la velocidad nominal. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 6: Mediciones del efecto de la carga en la corriente de excitación

$N_{nominal} = 1000 \pm 2$ [rpm]	
I_{exc} [A]	I_a [A]
$1,2 \pm 0,1$	0 (sin carga)
$1,3 \pm 0,1$	$8,0 \pm 0,5$
$1,3 \pm 0,1$	$16,0 \pm 0,5$
$1,1 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,5$ (disminuyendo la carga)

Utilizando los datos obtenidos en el cuadro 6, a excepción punto obtenido al disminuir la carga es posible hallar un polinomio que se ajuste a los datos mediante matlab. En la Figura 11 se observa el comportamiento del campo respecto a distintas cargas.

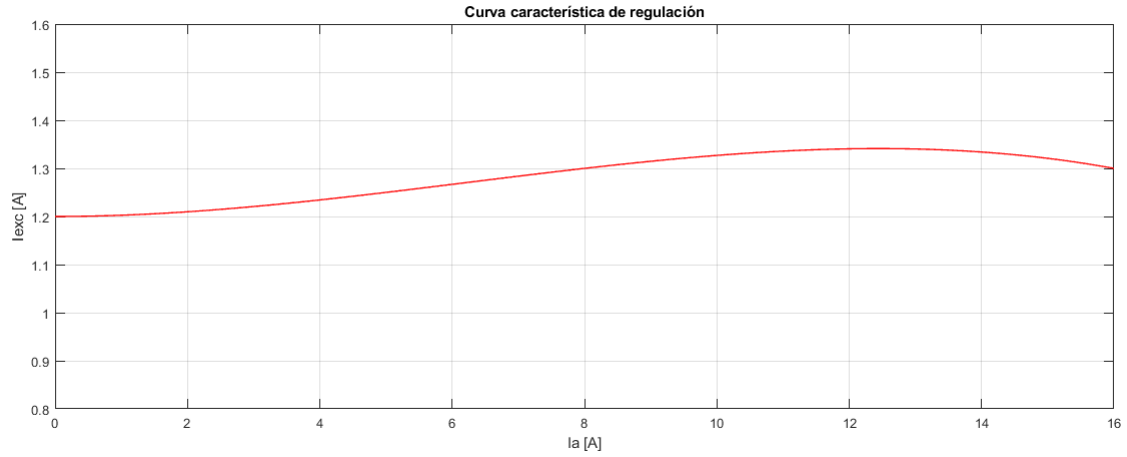


Figura 11: Curvas característica de regulación experimental

7.2.2. Porcentaje de regulación

Se midió la tensión a plena carga y luego sin carga. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 7: Mediciones para el porcentaje de regulación

U_{pc} [V]	U_{sc} [V]
125 ± 1	132 ± 1

Se sabe que el porcentaje de regulación de un generador DC viene dado por:

$$\%Reg = \frac{V_{sc} - V_{pc}}{V_{pc}} 100 \% \quad (5)$$

$$\Delta \%Reg = \frac{100}{V_{pc}} \Delta V_{sc} + \frac{V_{sc}}{V_{pc}^2} \Delta V_{pc} \quad (6)$$

Por medio de las dos ecuaciones previas se obtiene que la regulación es: $\%Reg = 5.6 \pm 0.8$

7.2.3. Curva de carga

Se midió la capacidad del generador para mantener la tensión nominal a distintas cargas (Ver cuadro 8).

Cuadro 8: Mediciones del efecto de carga en la tensión del generador

$U_c = U_{nominal} = 124 \pm 1$	
U_c [V]	I_a [A]
120 ± 1	$3,0 \pm 0,5$
119 ± 1	$7,5 \pm 0,5$
118 ± 1	$11,0 \pm 0,5$
117 ± 1	$15,0 \pm 0,5$
116 ± 1	$18,0 \pm 0,5$

Con los datos obtenidos en el cuadro 8, se halló la curva presente en la Figura 12. Dicha curva demuestra el efecto de la regulación para distintas cargas.

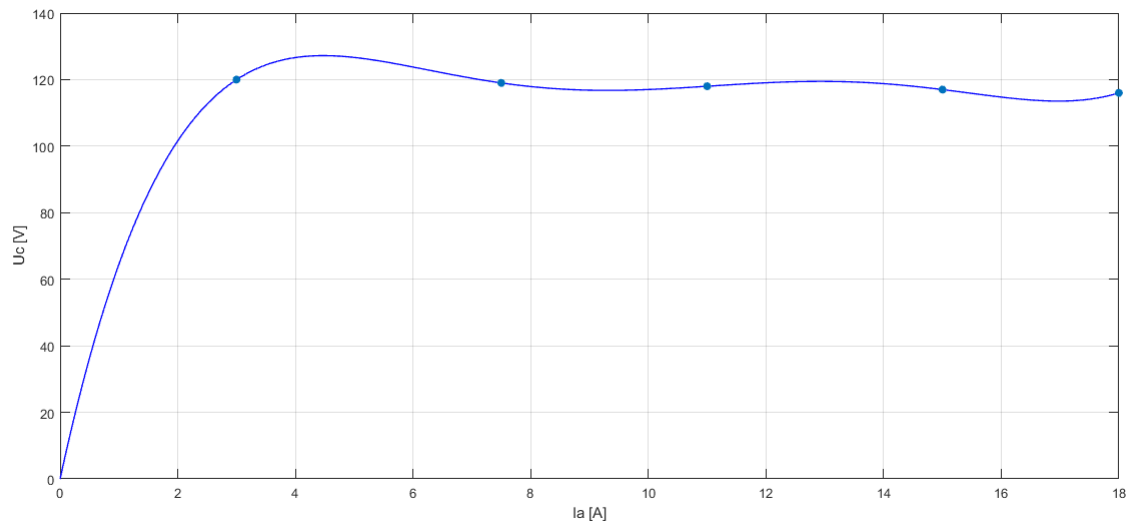


Figura 12: Curvas de carga experimental

7.3. Características externas (Funcionamiento como motor)