

Reporte de Investigación
2007-10

Determinación Experimental de los Parámetros Eléctricos de una Máquina de Inducción de 180Watt

Responsables: Adriana Ríos
Antonieta Strauss
Rubén Terán

Supervisor: Francisco M. González-Longatt



Línea de Investigación:
Fuentes Alternas de Energía
y
Generación Distribuida



28-Feb-2007

Generalidades

Dentro de los intereses del *Grupo de Investigaciones Avanzadas en Energía Eléctrica (giaELEC)*, se encuentra el diseño preliminar de un aerogenerador de electricidad en aplicación de calificada micro o pequeño (<1kW). En tal sentido, ya se esta realizando un estudio preliminar de una turbina de viento, que se pretende, sea quien accione a un generador de electricidad.

Para dicha turbina eólica, giaELEC ha seleccionado un esquema de turbina de viento con caja convertidora, para accionar un generador de inducción directamente acoplado a la red de suministro [1].

Esto dio origen a un trabajo de investigación que está en proceso de desarrollo, el cual lleva por nombre: *“Evaluación del comportamiento de una Máquina de Inducción de rotor tipo Jaula de Ardilla como generador para ser empleado en un sistema de conversión de energía del viento”*. Para la realización de esta investigación, se cuenta con dos máquinas de inducción trifásicas, una de 180 Watt y otra de 1 HP, las cuales son candidatas a formar parte del proyecto.

El presente reporte de investigación tiene por finalidad determinar de manera experimental los parámetros eléctricos de una máquina de inducción trifásica (180 Watt) de rotor tipo jaula de ardilla simple. Estos parámetros serán posteriormente empleados en la modelación y simulación del sistema de conversión de energía del viento.

Máquina de 180 Watt

Para el presente reporte de investigación se considera una máquina de inducción, trifásica, de rotor tipo jaula de ardilla simple, cuyos datos de placa se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de placa de la máquina de inducción considerada

Parámetro	Valor
Voltaje	254Δ/440Y V
Corriente	1.25/0.72 A
Potencia	0.180 kW
Factor de potencia	cos φ = 0.65
Velocidad de giro	ω _m = 1700 rpm



Figura 1. Fotos de la placa con datos de la máquina de inducción de 180 Watt

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.



Figura 2. Foto con la vista lateral de la máquina de inducción de 180 Watt, 254/440V

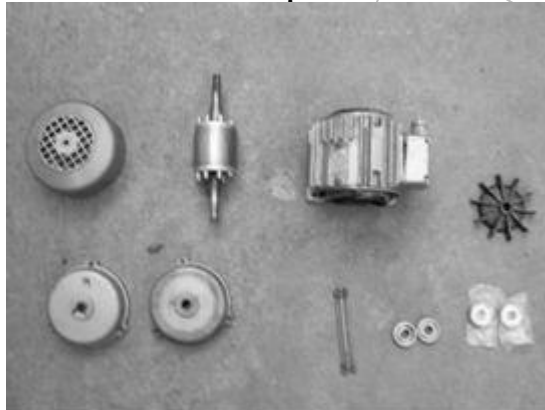


Figura 3. Foto con el despiece de la máquina de inducción de 180 Watt, 254/440V



(a) Estator



(b) Rotor

Figura 4. Foto con detalle partes de la máquina de inducción de 180 Watt, 254/440V

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Modelo Equivalente Circuitual de la Máquina de Inducción

La representación de una de las fases de una máquina de inducción trifásica de tipo jaula de ardilla simple, en operación balanceada, secuencia positiva y régimen estacionario, dada por el circuito equivalente de la Figura 5, permite dar una explicación, en forma representativa, del comportamiento de la máquina de inducción frente a los cambios que pueda presentar su carga. Para hallar los elementos que conforman dicho circuito equivalente, es conveniente someter el motor a una serie de pruebas, las cuales deben realizarse bajo ciertas condiciones, en vista de que la resistencia del rotor varía con la frecuencia del mismo y las resistencias en general se ven afectadas por las variaciones de temperatura [2]-[5].

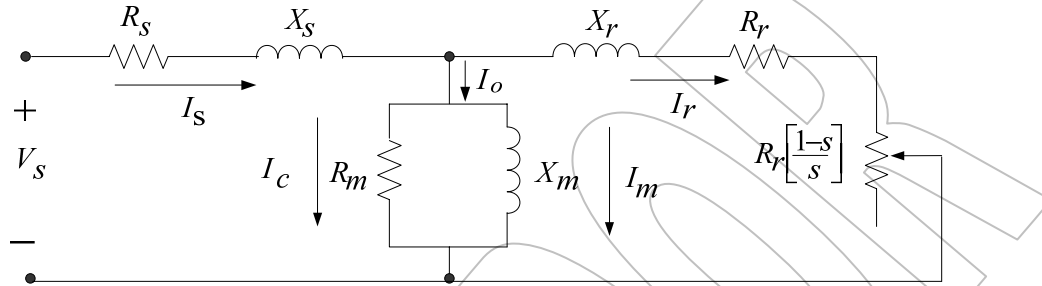


Figura 5. Circuito equivalente de la máquina de inducción

Donde:

- R_s : Resistencia del estator
- X_s : Reactancia del estator (representa el flujo de salida del estator)
- R_r : Resistencia del rotor
- X_r : Reactancia del rotor (representa el flujo de salida del rotor)
- R_m : Resistencia de magnetización.
- X_m : Reactancia de magnetización
- I_s : Corriente de carga (produce la fuerza magnetomotriz que compensa la corriente del rotor)
- I_m : Corriente de magnetización (crea el flujo en el entrehierro resultante)
- $R_r \left(\frac{1-s}{s} \right)$: representa la conversión electromecánica de la potencia

El cálculo de los parámetros del circuito equivalente se lleva a cabo a través de la aplicación de dos ensayos fundamentales, el *ensayo en vacío* y el *ensayo a rotor bloqueado*.

Sin embargo, en este reporte se muestra un tercer ensayo para la *obtención de la resistencia del estator*. La finalidad de cada una de las pruebas, los procedimientos y sus características serán tratados más adelante.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Ensayo para Determinar la Resistencia del Estator (R_s)

Para la realización del ensayo en vacío y a rotor bloqueado, es necesario el conocimiento previo del valor de la resistencia del estator (R_s). Para ello, se aplica el método del volt-amperímetro, este ensayo se realiza empleando corriente continua, ya que de esta manera no se induce voltaje en el circuito del rotor evitando que este gire y de igual forma que haya flujo resultante en el mismo; bajo estas condiciones la reactancia de la maquina es cero, quedando así el flujo de corriente limitado únicamente por la resistencia del estator, permitiendo de esta manera su cálculo [2]-[5].

Se empleó conexión delta en los arrollados de la maquina, ya que tiene la característica de que el voltaje de línea es igual al de fase, esto permitió calcular el valor preciso de la resistencia en cada fase de la máquina de inducción [2], [4], [5].

Diagrama de conexionado

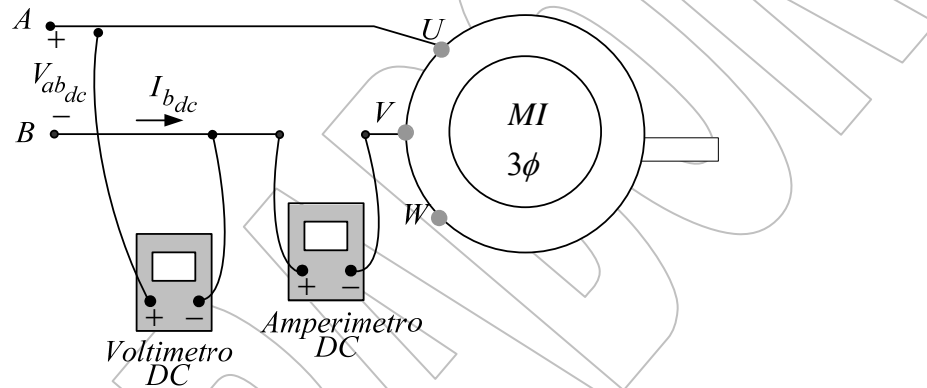


Figura 6. Diagrama del Montaje experimental para la medición de la resistencia del estator

Equipos de medición empleados

Los equipos que se utilizaron para la realización de este ensayo se observan en la Tabla 2:

Tabla 2. Datos de los instrumentos utilizados para obtener la resistencia del estator

Cantidad	Instrumentos	Modelo/Marca	Escala
1	Fuente de Voltaje DC variable	ME11D Banco de Medidas eléctricas	0-510 V
1	Multímetro.	Extech 285 Tru Rms Multimeter	200m-20MΩ 200m-750V 2m-10A
3	Cables	#16	

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.



Figura 7. Extech 285 Tru Rms Multimeter

Montaje realizado en el laboratorio:



Figura 8. Montaje para el ensayo de la medición de la resistencia del estator

Procedimiento [4], [6]:

- En el montaje de la figura 8, se tomaron dos de los tres terminales de la máquina de inducción y se ajustó la corriente de sus devanados a la nominal a través de la variación de la fuente de voltaje dc.
- Fue importante el hecho de que la corriente haya sido la nominal, pues de esta manera se simularon sus condiciones normales de operación a través del calentamiento típico de los devanados.
- Posteriormente, se anotó el valor del voltaje a la que se obtuvo la corriente nominal en la máquina.

Registro de valores obtenidos:

Tabla 3. Datos obtenidos en el ensayo de corriente continua

<i>Medición</i>	<i>Valor obtenido</i>
Voltaje	48 V
Corriente	1.25 A

Determinación de los parámetros a través de la aplicación de ecuaciones a partir del circuito equivalente:

- El esquema de la conexión para la realización de los cálculos de las bobinas del estator de la maquina de inducción de 180 Watt es el mostrado en la Figura 9:

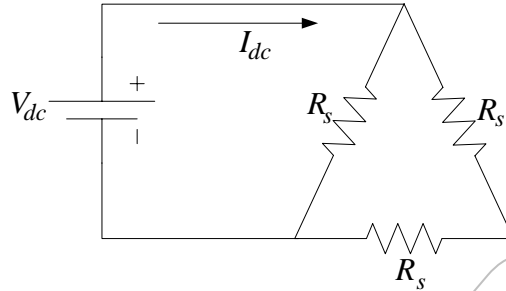


Figura 9. Conexión interna de las bobinas del estator (Alimentando una de las bobinas)

Para mayor facilidad, éste puede ser representado por el siguiente circuito equivalente:

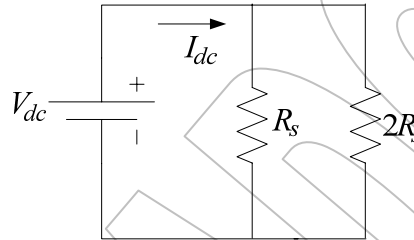


Figura 10. Circuito equivalente de las resistencias del estator

De este circuito equivalente resulta evidente:

$$\frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{2R_{sdc}R_{sdc}}{R_{sdc} + 2R_{sdc}} \quad \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{2R_{sdc}^2}{3R_{sdc}} \quad \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{2R_{sdc}}{3}$$

$$\frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{2R_{sdc}}{3} \quad R_{sdc} = 42.3960\Omega$$

El valor de la resistencia medida en corriente continua R_{sdc} , debió ser convertida a la correspondiente en corriente alterna R_s , representado por el efecto peculiar ó *skin*, en donde se suele aumentar en un 10 % de la resistencia dc [2].

$$R_s = 1.1R_{sdc} \quad R_s = 46.6356\Omega$$

Finalmente, y debido a que un principio se estableció la conexión del devanado en Δ , y a efectos del circuito equivalente, por ser representado en cada una de las fases de la maquina de inducción trifásica, los valores deben ser considerados en Y, se realiza la siguiente relación [2]:

$$R_s = \frac{R_{edc}}{3} \quad R_s = \frac{46.6356\Omega}{3}$$

Resultado obtenido.

La Tabla 4 muestra los valores de la variable obtenida con el ensayo en vacío de la maquina de inducción de 180 Watt.

Tabla 4. Parámetro obtenido del ensayo en corriente continúa

Variable	Valor
R_s	15.5452 Ω

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Ensayo en Vacío

El ensayo en vacío se realizó con la finalidad de obtener el valor de las pérdidas en el rotor, pérdidas magnéticas, corriente, resistencia y reactancia de magnetización de la maquina de de inducción de 180 Watt. Esta prueba consistió en hacer funcionar a la máquina sin ningún tipo de carga mecánica en el eje, es decir a rotor libre. Para esto se alimentó a frecuencia y tensión nominal en el estator y de esta manera, obtener mediciones más precisas de las corrientes de fase, tensión de línea y potencia activa de entrada [2], [4], [6].

Diagrama de conexionado:

Este esquema muestra una resistencia de 4Ω en la fase b de la maquina de inducción, al igual que la conexión de uno de los canales del osciloscopio en los terminales de dicha resistencia para la obtención de la señal de su caída de tensión. Esto se hizo debido a la carencia de un wattímetro y un miliamperímetro capaz de medir con suficiente calidas los valores de potencia y corriente respectivamente.

Más adelante se observará con más detalle la forma en la que se trabajó esta ligera variación del esquema tradicional del ensayo en vacío.

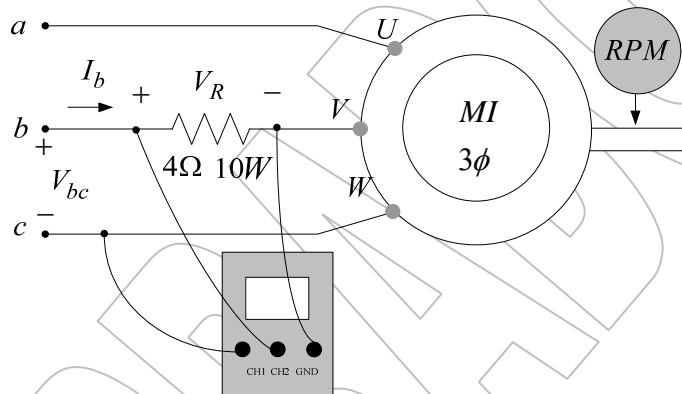


Figura 11. Montaje experimental para el ensayo en vacío.

Equipos de medición empleados:

Los equipos utilizados para la realización de este ensayo se observan en la Tabla 5:

Tabla 5. Datos de los instrumentos utilizados en el ensayo en vacío

Cantidad	Instrumento	Modelo/Marca	Escala
1	Fuente de Voltaje AC variable	ME11D Banco de Medidas eléctricas	0-380V
1	Multímetro	Extech 285 True Rms Mutimeter	200-2MΩ 200m-750V 2M-10A
1	Osciloscopio de 2 canales	Bk precision .Oscilloscope 2190	

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.



Figura 12. Osciloscopio BK Precision 2190 100Mhz

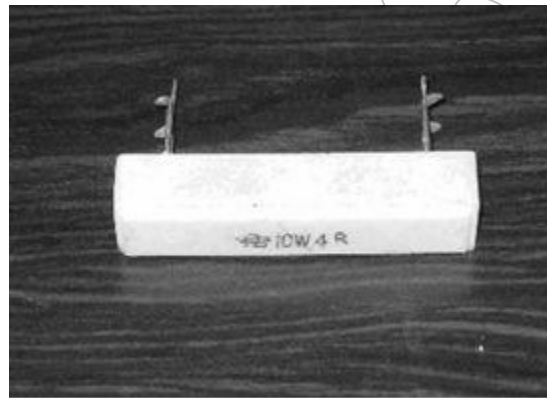


Figura 13. Resistencia de 4Ω, 10Watt

Montaje realizado en el laboratorio.

Para el ensayo en vacío se utilizó la siguiente configuración:



Figura 14. Montaje para el ensayo en vacío

Procedimiento:

- Antes que todo, se verificó que la conexión de los arrollados de la máquina se encontraran en Δ (esta conexión resultó más sencilla a la hora de tomar las mediciones, puesto que tiene la característica de que las tensiones de fase son exactamente las mismas a las tensiones de línea y basta solo con dividir la corriente de línea entre $\sqrt{3}$ para obtener su valor de fase), y de esta manera establecer el voltaje nominal en 254 V, según los datos de placa mostrados en la tabla 1 [2], [4].
- Posteriormente, se seleccionó una resistencia de que fue incluida en la fase b de la máquina (ver Figura 11). Para la selección de la misma fue tomada lo potencia a la cual esta trabaja para evitar

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

así el daño de la misma. Para esta experiencia se obtuvo la potencia de la resistencia que se debía de colocar en la fase *b* para obtener la señal a la salida de la resistencia, para eso se utilizó la expresión $P = I_0^2 R$, tomando como dato la corriente nominal de la máquina (1.25 A), por medio de esta ecuación se deduce que la potencia de dicha resistencia sería mayor a 1.5625Watt (asumiendo que la resistencia es de 1Ω), por lo tanto se buscó en el laboratorio una resistencia capaz de aguantar una potencia de trabajo mayor a la mencionada, por esto se escogió una de 10Watt y 4Ω para la realización del ensayo.

- Más adelante, se establecieron las características que se iban a observar en cada uno de los canales del osciloscopio, teniendo así que el canal 2 (CH2) mostraría la señal de voltaje de línea V_{bc} (por estar conectado entre las fases *b* y *c*) de alimentación a la máquina, mientras que el canal 1 (CH1), la onda de la caída de tensión en la resistencia (V_R), y a través de la aplicación de la Ley de Ohm, se obtendría el valor de la corriente de línea (I_b).
- Una vez establecidas estas condiciones, se inició la alimentación de la máquina de inducción, la cual se realizó punto por punto, es decir, se fue aumentando muy lentamente procurando tomar valores cada 10%, 15%, 20%, 25%, 30% y así sucesivamente hasta llegar al voltaje nominal, posteriormente, se tomaron dos valores de un 5% y 10% por encima del mismo. Estos porcentajes se seleccionaron así para obtener mayor precisión a la hora de realizar el trazado de la curva de vacío
- La mediciones con el osciloscopio se realizaron de la siguiente manera:
 - Se seleccionó el canal dos para observar la forma de onda de la tensión de alimentación a la máquina de inducción, y se contó el número de divisiones verticales contenidas en la misma a partir de la referencia del monitor del osciloscopio, para posteriormente multiplicarlo por el valor del volt/div seleccionado y dividirlo entre $\sqrt{2}$ para obtener el valor RMS (esto se debe a que el osciloscopio muestra valores pico). En cuanto al canal uno, la medición de la caída de voltaje se hizo de la forma antes mencionada, sin embargo dicho valor fue sometido a la Ley de Ohm a través de la resistencia de 4Ω para obtener así la corriente de vacío (I_b).
 - Adicionalmente, se midió el desfase entre las señales de ambos canales para obtener su ángulo γ , a través de la aplicación de la ecuación de potencia, los valores para los diferentes cambios de voltaje de alimentación. Dicho desfase se obtuvo a través de la aplicación de una regla de tres simple, donde se asumió que los 180° correspondían al ancho total (número de divisiones horizontales en la pantalla del osciloscopio) de una de las gráficas, cualquiera de ellas que se haya tomado como referencia, en este caso fue la del canal 1, y la cantidad de divisiones entre el inicio de una gráfica y otra, sería el valor x del ángulo que se buscaba.

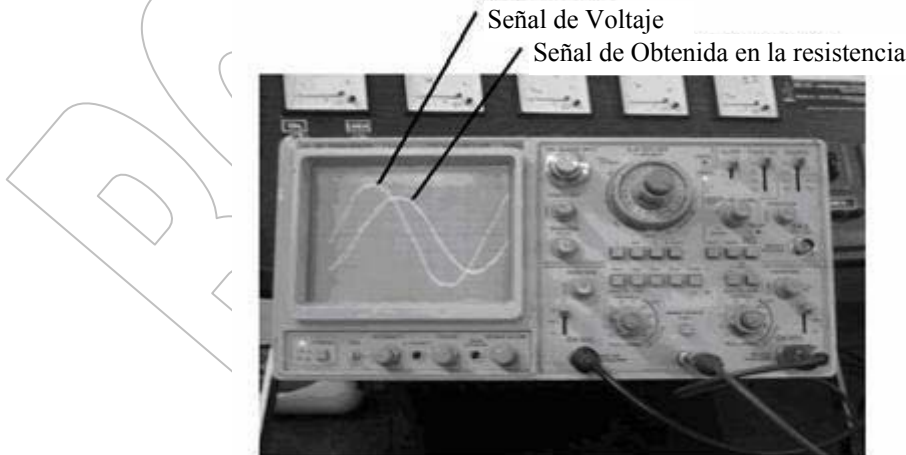


Figura 15. Señales obtenidas del osciloscopio en el ensayo en vacío

Debido a que los valores de tensión obtenidos con los canales del osciloscopio fueron de fase, y a efectos del cálculo de potencia se debe trabajar con valores de línea, se hizo una corrección del ángulo de 30° , esto se sustenta en el siguiente diagrama fasorial [7]:

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

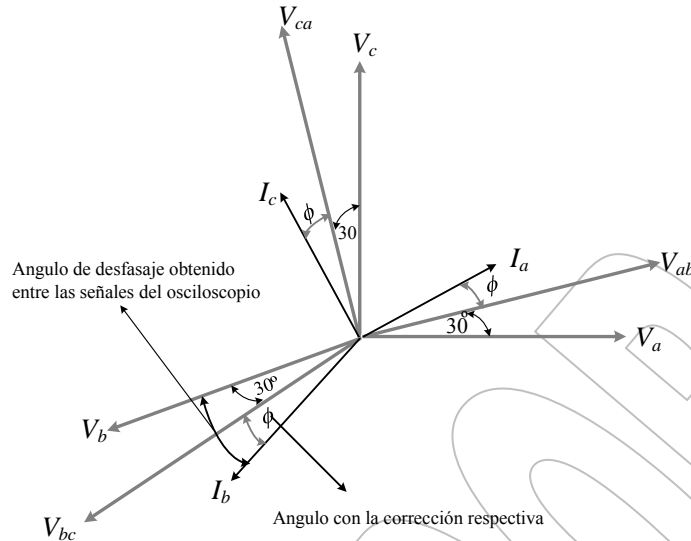


Figura 16. Diagrama fasorial de los voltajes de fase, línea y corriente de línea para una secuencia abc
De acuerdo al diagrama fasorial, se observa que el ángulo corregido (ϕ), es el que corresponde al del factor de potencia; es decir entre V_b e I_b ; dicho ángulo será utilizado más adelante para obtener la potencias para cada una de las mediciones realizadas en este ensayo.

Registro de valores medidos:

Los datos obtenidos en cada una de las mediciones se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 6. Datos del ensayo de vacío

V_o [V]	23	30	45	49.498	77.78	106.07	120.21	141.12	182	202	232	254	272	303
I_o [A]	0.0867	0.1254	0.1325	0.1414	0.2121	0.282	0.3359	0.353	0.4951	0.565	0.636	0.7071	0.8485	1.314
P_o [W]	0.8483	2.5533	4.0352	5.3142	16.098	35.240	47.572	58.815	106.16	124.4	160.83	195.77	251.56	373.67

Tabla 7. Mediciones de Ensayo de Vacío y las pérdidas magnéticas mas las de vacío

V_o [V]	23	30	45	49.498	77.78	106.07	120.21	141.12	182	202	232	254	272	303
I_o [A]	0.0867	0.1254	0.1325	0.1414	0.2121	0.282	0.3359	0.353	0.4951	0.565	0.636	0.7071	0.8485	1.314
P_o [W]	0.8483	2.5533	4.0352	5.3142	16.098	35.240	47.572	58.815	106.16	124.4	160.83	195.77	251.56	373.67
$P_{mag}+P_{roce}$ [W]	0.4977	1.8199	3.2165	4.3818	14	31.5321	42.3105	53.004	94.73	109.515	141.97	172.45	217.9915	313.976

Determinación de los parámetros a través de la aplicación de ecuaciones a partir del circuito equivalente:
Con los valores de la tensión de línea (corregida con el ángulo de 30°), corriente de línea (I_b) y el ángulo de desfase (ϕ), se aplicó la siguiente ecuación para la hallar la potencia en vacío [7]:

$$P_o = \sqrt{3}V_o I_o \cos \phi$$

En el ensayo en vacío, el deslizamiento es aproximadamente igual a cero, y por lo tanto la potencia de la resistencia R_r/s se hace mucho mayor que la reactancia del rotor X_r , y su resistencia R_r (la correspondiente a las pérdidas en el cobre del rotor). Esta condición genera una reducción del circuito equivalente de la Figura 5, la cual se muestra a continuación [4]:

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

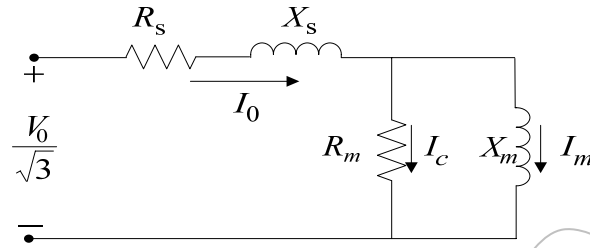


Figura 17. Circuito reducido del equivalente por el ensayo en vacío

Una vez calculada la potencia, y en unión a los valores obtenidos de manera directa en el ensayo, se calcularon las pérdidas magnéticas (P_{mag}) más las de roce (P_{roce}). Esto nace a partir de que las pérdidas en el cobre del estator vienen representadas por [2], [4]:

$$P_{pce} = 3I^2R$$

Donde P_{pce} corresponde a las pérdidas en el cobre por parte estator.

Esto implica que la potencia de entrada debe ser igual a:

$$P_o = P_{pce} + P_{mag} + P_{roce}$$

$$P_o = 3I^2R + P_{mag} + P_{roce}$$

Despejando $P_{mag} + P_{roce}$, se obtiene:

$$P_{mag} + P_{roce} = P_o - 3I_0^2R_s$$

Luego del cálculo de los valores de las pérdidas en vacío con la ecuación anterior, para cada una de las mediciones, se trazó la gráfica $P_{mag} + P_{roce}$ vs V_o^2 , obteniendo la siguiente curva:

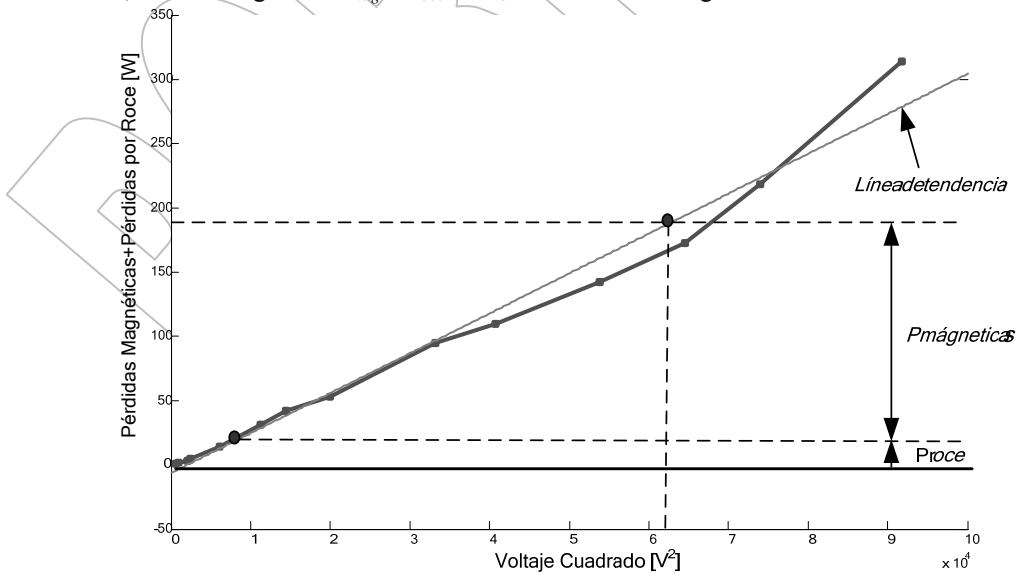


Figura 18. Gráfica de las pérdidas magnéticas y las de vacío versus V_o^2

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Al extrapolar la curva, se buscó el punto en el eje de coordenadas donde se obtuvo un voltaje igual a cero; ese valor correspondía a las pérdidas por roce. Para obtener las pérdidas magnéticas, se ubicó el voltaje nominal de la máquina al cuadrado en el eje de las abscisas y se interceptó con la curva, obteniendo así, el punto de corte en el eje de las ordenadas. Este valor representa las pérdidas totales, de las que se sustrajo el valor de las pérdidas por roce y de esta manera se obtuvieron las pérdidas magnéticas [2], [4].

$$P_{roce} = 0.46774W \quad P_{mag} = 193.7023W$$

Con las pérdidas magnéticas, el voltaje nominal y la corriente a este nivel de voltaje, se calculó el factor de potencia de la rama en paralelo del circuito equivalente de la maquina [2]:

$$FP = \frac{P_{mag}}{\sqrt{3}V_0I_0} = \frac{193.7023}{\sqrt{3} * 254 * 0.7071} = 0.6227 \quad \phi = 51.4885^\circ$$

Para la resistencia de magnetización, se tomó el voltaje nominal de línea de la máquina y la corriente obtenida para ese valor [2]:

$$R_m = \frac{\left(\frac{V_0}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{P_{mag}}{3}} \quad R_m = \frac{\left(\frac{254}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{197.7023}{3}} \quad R_m = 333.0678\Omega$$

La corriente de magnetización se obtuvo con la corriente alcanzada al someter la máquina al voltaje nominal y el ángulo correspondiente al factor de potencia [2]:

$$I_m = I_0 \text{sen} \phi$$

$$I_m = 0.7071 \text{sen}(51.4885) \quad I_m = 0.5533A$$

Para la reactancia de magnetización de la rama en paralelo del circuito equivalente se tomó el valor obtenido anteriormente de la corriente de magnetización y el voltaje nominal de línea (este es dividido entre $\sqrt{3}$ en la ecuación para transformarla en tensión de fase y de esta manera corresponder al circuito equivalente por fase que se ha tratado desde un principio en este reporte) [2]:

$$X_m = \frac{V_0}{\sqrt{3} I_m} \quad X_m = \frac{254}{\sqrt{3} * 0.7071} \quad X_m = 265.0406\Omega$$

Resultados obtenidos.

La tabla 8 muestra los valores de las variables obtenidas con el ensayo en vacío de la maquina de inducción de 180 Watt

Tabla 8. Parámetros obtenidos del ensayo en vacío.

Variable	Valor
R_m	333.0678 Ω
X_m	265.0406 Ω

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Ensayo a Rotor Bloqueado

Este Ensayo permitió la obtención de los parámetros de la rama serie de la maquina de inducción de 180 watt. Esta prueba fue la última en llevarse a cabo, puesto que se necesitó del valor de la resistencia del estator para obtener R_r , X_r y X_s [2]. Para su debida realización fue necesario bloquear el rotor de la máquina de inducción para impedir su movimiento, bajo esta condición, el deslizamiento es uno y la resistencia de carga será cero, lo cual indica que la máquina se comporta como un transformador cortocircuitando el secundario del mismo [3], [6].

Diagrama de conexionado:

Para este ensayo se utilizo la siguiente configuración:

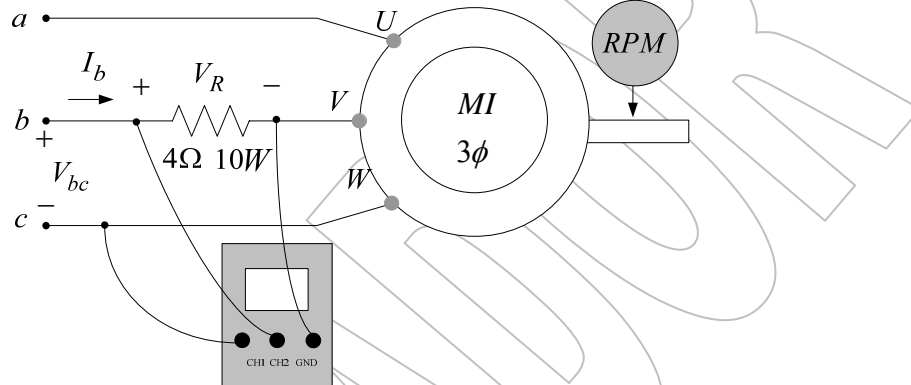


Figura 19. Montaje experimental para el ensayo a rotor bloqueado

Para las debidas mediciones se utilizó el mismo osciloscopio que en el ensayo en vacío, las conexiones de sus canales fueron análogas a las anteriores.

Equipos de medición empleados:

Los equipos utilizados para la realización de este ensayo se observan en la Tabla 4:

Tabla 9. Datos de los instrumentos utilizados en el ensayo a rotor bloqueado

Cantidad	Instrumento	Modelo/Marca	Escala
1	Fuente de Voltaje AC variable	ME11D Banco de Medidas eléctricas	0-380V
1	Multímetro	Extech 285 True Rms Mutimeter	200-2MΩ 200m-750V 2M-10A
1	Osciloscopio de 2 canales	Bk Precision Oscilloscope 2190	

Procedimiento.

- En cuanto a las condiciones iniciales del ensayo en vacío, incluyendo las características especiales que se le dieron al montaje por incluir el osciloscopio para las mediciones de tensión y posteriormente, el cálculo de la corriente de línea y potencia nominal, el ensayo en corto fue exactamente el mismo, la diferencia se basó en primer lugar, que el rotor estaba bloqueado, y en segundo que el aumento de la tensión de alimentación en la maquina de inducción se hizo de manera paulatina, con la discrepancia de que no se tomaron valores punto por punto, debido a que el rotor estaba bloqueado y esto, lamentablemente, causa daños en el mismo. Por tal razón, cuando se obtuvo la corriente nominal, se tomaron rápidamente las respectivas mediciones de tensión y las entregadas por el osciloscopio para las de potencia absorbida y corriente, y de esta manera evitar el calentamiento excesivo de los devanados de la maquina [2], [3].

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Registro de valores medidos:

Tabla 10. Datos de las mediciones del ensayo a rotor bloqueado

Parámetro	Variable	Valor
Corriente	I_{cc}	1.25A
Voltaje	V_{cc}	115V
Potencia	P_{cc}	101.27W

A rotor bloqueado, el deslizamiento es igual a uno y por lo tanto, la resistencia de carga será cero, lo cual indica que la máquina se comporta como un transformador cortocircuitando el secundario del mismo, esto dio origen a la reducción del circuito equivalente de la figura 3, que se muestra inmediatamente:

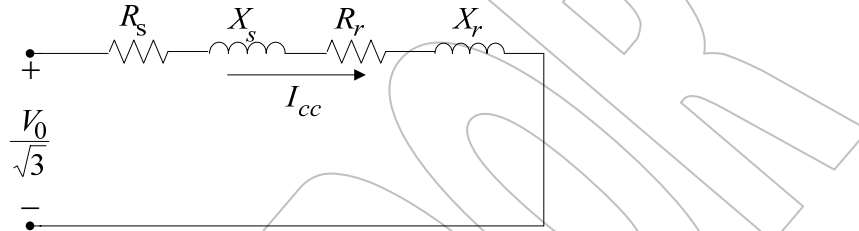


Figura 20. Circuito equivalente reducido del maquina de inducción de 180 Watt para el ensayo a rotor bloqueado

Determinación de los parámetros a través de la aplicación de ecuaciones a partir del circuito equivalente: A partir de la Figura 20 se emplearon las siguientes relaciones matemáticas con los valores de las resistencias del estator y rotor a través del uso de los datos obtenidos experimentalmente en este ensayo, para obtener el valor de las reactancias de magnetización [2].

$$P_{cc} = 3I_{cc}^2 (R_s + R_r) \quad 101.27 = 3(1.25)^2 (15.5452 + R_r) \quad R_r = 6.0591\Omega$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} = \sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_s + X_r)^2} \quad Z_{cc} = \frac{115/\sqrt{3}}{5.5} = \sqrt{(15.5452 + 6.0591)^2 + (X_s + X_r)^2}$$

$$X_s + X_r = 48.5241\Omega$$

Tomando en cuenta que la máquina posee un torque normal de arranque y corriente normal de arranque, se consideró que este maquina de 180 watt correspondía a la clase A [4], [5].

$$X_e = \frac{1}{2} (X_s + X_r) \quad X_s = 24.2620\Omega$$

$$X_r = \frac{1}{2} (X_s + X_r) \quad X_r = 24.2620\Omega$$

Resultados obtenidos.

Tabla 11. Parámetros obtenidos del ensayo a rotor bloqueado

Variable	Valor
X_e	24.2620Ω
R_r	6.0591 Ω
X_r	24.2620Ω

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Parámetros Obtenidos de los Ensayos

Tabla 12. Parámetros característicos de la máquina de inducción de 180W

<i>Parámetro</i>	<i>Variable</i>	<i>Valor</i>
Resistencia del estator	R_s	15.5452Ω
Reactancia del Estator	X_s	24.2620Ω
Resistencia del rotor	R_r	6.0591 Ω
Reactancia del rotor	X_r	24.2620Ω
Resistencia de magnetización	R_m	333.0678Ω
Reactancia de magnetización	X_m	265.0406Ω

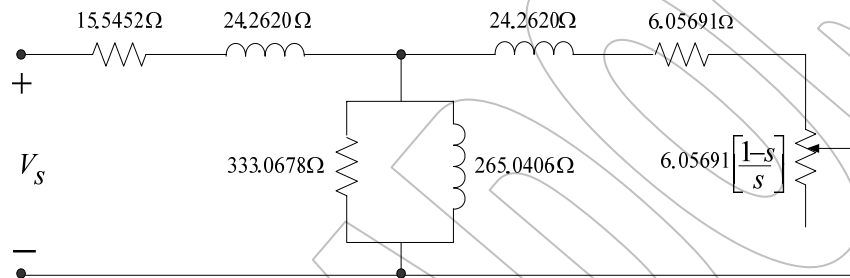


Figura 21. Circuito equivalente con los parámetros obtenidos de los ensayos

Una vez realizados los ensayos de la máquina de inducción se ha cumplido con el objetivo principal al determinar todos los parámetros que conforman al circuito equivalente. Estos valores han sido comparados con un documento del IEEE, el cual presenta los valores típicos que debe tener un pequeño maquina de inducción industrial, no obstante, dicho documento no especifica la potencia nominal que debe tener esa maquina ni cualquier otro dato de placa, en base a esta comparación se hacen los siguientes comentarios: Al hacer el cambio en por unidad del circuito equivalente de la maquina de 180 Watt, y obtener el porcentaje de variación entre los datos del artículo y dicho circuito, se obtuvieron valores realmente apreciables, ya que el mínimo porcentaje de variación fue el de la reactancia del estator, en un 32%, mientras que el valor más alto se obtuvo con la reactancia de magnetización con un 77%. Estos valores son justificables frente al hecho mencionado anteriormente de que la comparación no está siendo realizada con una maquina con características definidas, por lo que no son del todo precisos. Por otra parte, también se debe tomar en consideración los errores típicos que se presentan a la hora de hacer cualquier prueba en el laboratorio, tales errores fueron instrumentales como la calibración y la precisión de los equipos de medición, entre otros [8], [9].

Finalmente, estos valores serán utilizados para caracterizar la operación de la maquina de inducción de 180 Watt por medio de la simulación de las distintas curvas características, mediante el uso de una herramienta computacional como lo es Matlab™ Simulink™ y de esta manera definir la operación simétrica balanceada en régimen estacionario de la máquina.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Referencias Documentales

- [1] Ríos H., Adriana C.; Strauss L., Antonieta D. "Evaluación del comportamiento de una máquina de inducción de rotor tipo jaula de ardilla como generador para ser empleado en un sistema de conversión de energía del viento", *Anteproyecto de Trabajo Especial de Grado para optar por el título de Ingeniero Electricista en la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada*, Maracay, Venezuela. Noviembre 2006.
- [2] Frailes Mora, "Máquinas Eléctricas". Editorial McGraw Hill – Interamericana, 2003.
- [3] 112-1996: *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators* del IEEE.
- [4] Chapman, S. J. "Máquinas eléctricas". Editorial McGraw Hill-Interamericana, Cuarta Edición. México 2005.
- [5] Fitzgerald, A. E., C. Kmglsley, Jr., y S. D. Umans. "Electric Machinery". 5th ed. New York . McGraw Hill, 1990.
- [6] J.M. Aller, Principios de Básicos de la Máquina de Inducción. Apuntes del Curso de Conversión de Energía Eléctrica III. Universidad Simón Bolívar (documento electrónico). Disponible en: <http://prof.usb.ve/jaller/docencia.html>.
- [7] Sadiku, Alexander. Fundamentos de circuitos eléctricos. Editorial Mc Graw Hill, México, 2000.
- [8] Transaction on Power Systems *Standard load models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation*. IEEE. Vol. 10, N° 3. Agosto 1995.
- [9] Rodríguez, Pedro. *Introducción a las mediciones eléctricas. Uso de testers, multímetros y osciloscopios.*

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.