

Estimación Experimental de los Parámetros Eléctricos de una Máquina de Inducción Tipo Jaula de Ardilla

Francisco M. González-Longatt, Adriana Ríos, Antonieta Strauss, Rubén Terán

Resumen— En este artículo se presenta el cálculo de los parámetros eléctricos y mecánicos de una máquina de inducción de 1 HP, 220YY/440Y V. Considerando la normativa internacional se aplicaron ensayos a la máquina a fin de estimar los parámetros eléctricos. Se empleó el ensayo en vacío para determinar las pérdidas mecánicas y magnéticas, el ensayo a rotor bloqueado para determinar la resistencia total efectiva, resistencia del rotor y pérdidas en el cobre, y un ensayo volt-amperimétrico de corriente continua para determinar la resistencia del estator. Los ensayos provienen de las diversas consideraciones realizadas sobre el circuito clásico por fase, de la máquina de inducción trifásica de rotor tipo jaula de ardilla simple. Se incluyó el cálculo de la inercia de la máquina, para establecer todos los parámetros necesarios para acometer simulaciones con esta máquina. La metodología, los ensayos y sus resultados son mostrados en este artículo.

Palabras claves— Generador de inducción (GI), ensayos, parámetros eléctricos e inercia.

I. INTRODUCCIÓN

El bajo costo, simplicidad y robustez en el diseño, hacen al generador de inducción del tipo rotor de jaula de ardilla, una alternativa especialmente atractiva para las aplicaciones renovables y en particular para el aerogenerador de velocidad constante [1]-[5].

En los actuales momentos el Grupo de Investigaciones Avanzadas en Energía Eléctrica (giaELEC, <http://www.giaelec.org>) y al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada (UNEFA), Núcleo Maracay; llevan adelante una línea de investigación Fuentes Alternas de Energía y Generación Distribuida, y en la cual se desarrolla el Proyecto EOLO, que persigue el diseño e implementación de un prototipo de aerogenerador basado en turbina de viento a velocidad constante e impulsando un generador de inducción de rotor de jaula de ardilla conectado directamente a la red.

En función de ello, el diseño preliminar, apunta al uso de una máquina de inducción de 1 HP, 220YY/440Y V, la cual

requiere que sea caracterizado su comportamiento, por ello debe ser cuidadosamente examinada.

El conocimiento exacto y real de los parámetros eléctricos y mecánicos de una máquina de inducción es necesario para poder emprender el análisis de su desempeño [3]. En particular, los parámetros permiten que se puedan emprender simulaciones y permitir la observación de su desempeño bajo diferentes consideraciones y de esta manera [6].

En este artículo se presenta una descripción detallada de los procedimientos que se llevaron a cabo para la estimación de los parámetros de la máquina de inducción de 1 HP, 220YY/440Y V, donde los datos de placa son mostrados en la Tabla 1, y una vista general es mostrada en la Fig. 1.

TABLA I

DATOS DE PLACA DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN CONSIDERADA

Parámetro	Valor
Voltaje, U_n	220YY/440Y V
Corriente, I_s	3.75/1.75 A
Potencia, P_n	0.746 kW
Factor de potencia, $\cos \phi$	0.87
Velocidad de giro, ω_n	1660 rpm
Frecuencia, f	60 Hz
Rendimiento, η	64.2%
Corriente de arranque	3.7*I _n
Torque nominal, T_n	4.29 N.m
Torque de arranque, T_a	8.1 N.m



(a) Vista lateral y superior



(b) Partes y piezas de la máquina

FIG. 1. Detalles de la máquina de inducción 1HP, 220YY/440Y V considerada

Los parámetros eléctricos estimados experimentalmente en este artículo son los mínimos necesarios para efectuar la simulación en régimen estacionario y transitorio de la

Manuscrito recibido el 20 de Febrero de 2008.

F.G.L. A.R y A.S está con la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Carretera Tapa Tapa – Mariara, Sector Boca de Río, Maracay, Estado Aragua, Venezuela, Tlf. +58-414-5869605, +58-414-9462087,+58-416-6226710, E-mail: fglongatt@ieec.org, adrianacrh1985@yahoo.es, antoniettastrauss@yahoo.es, rteran@thor.uc.edu.ve

máquina: resistencia y reactancias (estator y rotor). Para ello se procedió a realizar los conocidos ensayos [7]-[9]: (i) ensayo en vacío y (ii) ensayo a rotor bloqueado. Pero además el método del volt-amperímetro; fue empleado para determinar la resistencia del estator de la máquina. Se ha incluido en este artículo de manera ilustrativa, el cálculo de la constante de inercia del rotor de la máquina. Una discusión de la metodología y los resultados sobre la máquina considerada son presentados en este artículo.

II. ENSAYOS Y RESULTADOS

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 2, 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 [8]-[15].

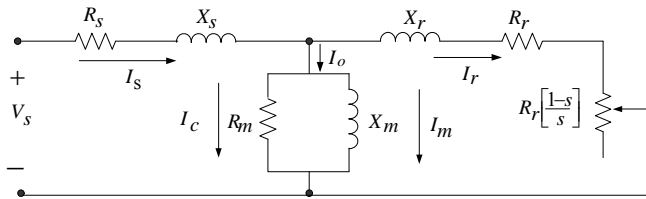


FIG 2. Circuito equivalente de la máquina de inducción

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.

A. Ensayo para la medición de la Resistencia del Estator

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 [8]-[15].

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 [8], [10], [13].

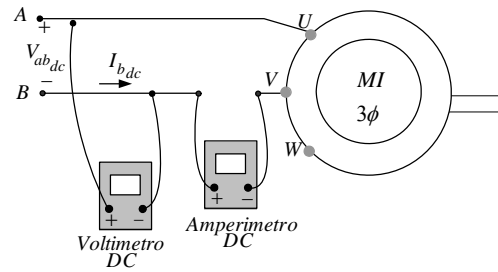


FIG.3. Esquema de conexión para la medición de las variables en el ensayo de corriente continua

El esquema de la conexión para la realización de las mediciones de la resistencia del estator es mostrado en la Fig. 3, mientras que en la Fig. 4 se muestra el circuito equivalente para los cálculos de las bobinas del estator de la máquina de inducción de 1HP.

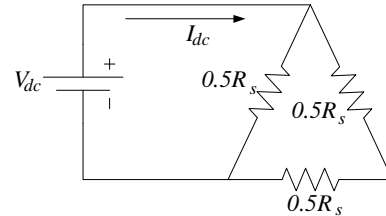


FIG 4. Conexión interna de las bobinas del estator (Alimentando una de las bobinas)

De este circuito equivalente resulta evidente:

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

TABLA 2

VALORES MEDIDOS EN EL ENSAYO A CORRIENTE CONTINUA						
$V_{dc}[V]$	7.6	12.2	14.1	15.454	20	17
$I_{dc}[A]$	1.31	2.17	2.5	3.5	3.5	3.5

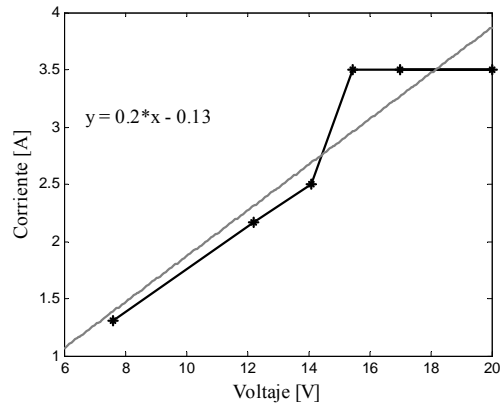


FIG. 5. Gráfica Corriente I_{dc} , versus Voltaje V_{dc} de los valores obtenidos en el ensayo de corriente continua

En la curva de la Figura 5, se muestra la pendiente de la gráfica que representa el inverso de la resistencia promedio del estator, siendo esta $R_{sdc} = 1/0.2 = 5$, pero en vista de que la configuración de los devanados del estator están en YY, como se presentó en la Figura 4, $R_{sdc} = 2.5 \Omega$. Ahora bien, por el efecto peculiar, $R_{sdc} = 2.5 \times 1.1 = 2.75 \Omega$.

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*, como se vio anteriormente, en donde se suele aumentar la resistencia de un 10% a un 20%.

La elección de este porcentaje depende únicamente del tamaño de los conductores del arrollado del estator, ya que si un conductor tiene mucho diámetro, entonces el efecto peculiar es muy pronunciado, y viceversa. En este caso, se decidió asumir en 10% debido a que la máquina, si se compara con las existentes comercialmente, posee una potencia pequeña al igual que la corriente, y esto se traduce en que el tamaño de sus conductores no presenta un efecto peculiar considerable [9].

B. 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 1 HP.

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 [8], [9], [13].

En la Fig. 6 se muestra el esquema muestra el esquema para la medición de las variables asociadas a este ensayo.

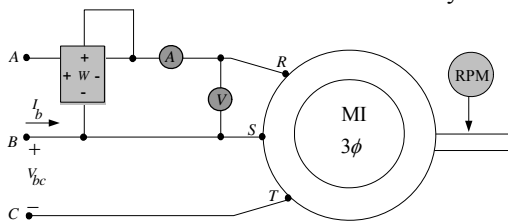


FIG. 6. Esquema de conexión para la medición de las variables en el ensayo en vacío

En el ensayo se inició la alimentación de la máquina de inducción y se fue aumentando muy lentamente procurando medir los valores de voltaje, corriente, potencia y velocidad, cada 10%, 15%, 20%, 25%, 30% de la tensión de alimentación y así sucesivamente hasta llegar al voltaje nominal; posteriormente, se tomó un valor por encima del mismo para obtener un mejor trazado de la curva de vacío. Este procedimiento se realizó tres veces con la finalidad de efectuar un análisis estadístico que asegure una representatividad de los resultados.

Por otra parte, 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:

$$P_{cu} = 3I^2R \tag{1}$$

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

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

$$P_o = P_{cu} + P_{mag} + P_{roce} \tag{2}$$

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

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

$$P_{mag} + P_{roce} = P_o - 3I_o^2R_s \tag{4}$$

A continuación se presenta la Tabla 3, en la que se incluyen los valores de las pérdidas calculadas a través de la

relación anterior para los datos obtenidos en el ensayo en vacío.

TABLA 3
VALORES DE LAS PÉRDIDAS PARA LAS MEDICIONES DEL ENSAYO EN VACÍO

$V_o [V]$	$I_o [A]$	$P_o [W]$	$W_o [r.p.m]$	$P_{mag}+P_{roce} [W]$
35	0.44	20	1732	18.403
55	0.50	25	1776	22.938
75	0.63	31	1783	27.726
90	0.74	38	1783	33.482
110	0.90	45	1793	38.318
125	1.05	50	1792	40.904
140	1.18	58	1784	46.513
150	1.28	58	1793	44.483
165	1.44	72	1795	54.893
175	1.54	82	1795	62.434
200	1.91	103	1793	72.903
210	2.08	120	1796	84.307
220	2.44	143	1797	93.883
235	3.00	162	1794	87.75

Ahora bien, luego del cálculo de los valores de las pérdidas en vacío con la ecuación anterior para cada una de las mediciones, se trazó la grafica $P_{mag}+P_{roce}$ versus V_o^2 , que lleva por nombre *Curva de magnetización*, que se muestra en la Fig. 7.

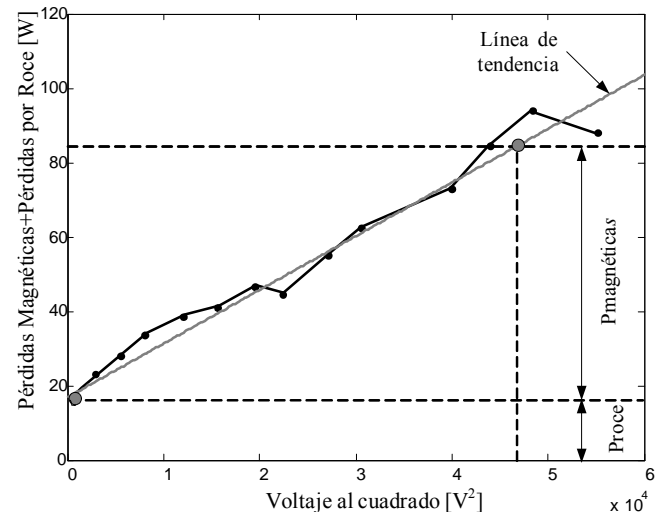


FIG 7. Curva de magnetización

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. $P_{mag} + P_{roce} = 86.73W$ y $P_{roce} = 16.85W$, por lo tanto $P_{mag} = 69.88W$.

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 máquina, resultando $FP = 0.07516$, $\phi = 85.69$.

Para la resistencia de magnetización, se tomó el voltaje nominal de línea de la máquina y la corriente obtenida para ese valor, resultando $R_m = 692.62 \Omega$.

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, $I_m = 2.4331 A$.

Para la reactancia de magnetización de la rama en paralelo del circuito equivalente se tomó el valor obtenido anteriormente de la corriente de magnetización (I_m) y el voltaje nominal de línea resultando $X_m = 52.204 \Omega$.

C. Ensayo a Rotor Bloqueado

Este ensayo permite la obtención de los parámetros de la rama serie de la máquina de inducción de 1 HP. Esta prueba será la última en llevarse a cabo, puesto que se necesitará del valor de la resistencia del estator para obtener R_r , X_r y X_s [7], [11].

Para su realización es 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 comportará como un transformador cortocircuitando el secundario del mismo.

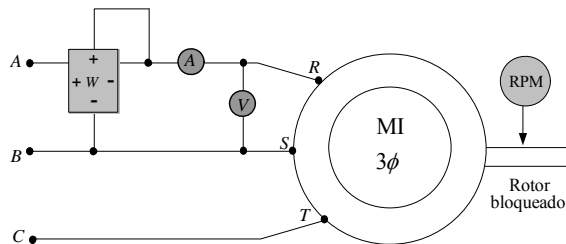


FIG. 8. Esquema de conexión para la medición de las variables en el ensayo de rotor bloqueado

El esquema de este ensayo es semejante al empleado en el ensayo en vacío, la diferencia se basa en que el rotor se bloqueó y se tomó solo una medición del voltaje y la potencia al momento en que la corriente alcanzó el valor nominal especificado en los datos de placa de la máquina.

Estas mediciones se tomaron con mucha rapidez, debido a que este ensayo puede deteriorar la máquina por el calentamiento excesivo de sus devanados, y los resultados son mostrados en la Tabla 4.

TABLA 4
VALORES MEDIDOS EN EL ENSAYO A ROTOR BLOQUEADO

Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
46.0	3.5	210.0

Considerando los datos de placa de la máquina de inducción de 1 HP, 220/440V (Tabla 1), se tiene que el torque de arranque de 1.88 veces el torque nominal, y la corriente de arranque de $3.7I_n$, al igual que un deslizamiento del 7%.

Tomando como base la clasificación NEMA, se observa que la máquina considerada clase D, debido a que los valores de corriente y torque de arranque entran dentro del rango establecido; además de un deslizamiento alto.

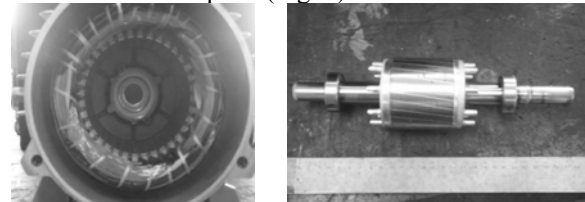
Ahora bien, la distribución empírica para las reactancias del estator y rotor de las máquinas de inducción trifásicas jaula de ardilla para este caso es el correspondiente de la Clase NEMA D, responde a una fracción de $X_s = X_r = 0.5$. Por tal razón, resulta $R_r = 2.9643 \Omega$, y $X_s = X_r = 2.5 \Omega$.

Es importante destacar, que para la obtención de estos parámetros, no se tomaron en cuenta las consideraciones en cuanto a la temperatura establecidas en el estándar 112-1996 de la IEEE [12], ya que la máquina no se sometió a funcionamiento extremos, lo cual implica que la temperatura de trabajo no se excedió a un nivel muy alto para proteger los devanados que conforman esta máquina

D. Calculo de la Inercia del rotor

La inercia del rotor es un parámetro que debe ser tomado en cuenta ya que es determinante en el comportamiento en régimen transitorio de la máquina de inducción [8]-[10]. Para su cálculo, basta con considerar al rotor jaula de ardilla simple como un cilindro sólido, permitiendo así establecer la analogía y de esta manera obtener de manera directa, con la medición de su peso y radio, el valor de esta importante variable.

Para el calculo de la inercia en la máquina de 1 HP, 220/440 V, para lo que se procedió a desarmar para poder medir y pesar el rotor de la máquina (Fig. 9).



a) Estator

b) Rotor

FIG 9. Foto con detalle de las partes de la máquina de inducción de 1 HP, 220/440V

Los valores medidos son el diámetro del rotor ($d = 2r$) 75mm, y el peso del rotor (P) 2.5 Kg, de tal modo que la inercia (J), se calcula a partir de la masa del rotor (M) mediante la expresión:

$$J = \frac{1}{2} Mr^2 \quad (5)$$

Finalmente la inercia del rotor resulta $J = 0.0001792 \text{ kg.m}^2$.

III. PARAMETROS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos y mediciones han permitido estimar los parámetros eléctricos y mecánicos básicos de una máquina de inducción trifásica de simple jaula de ardilla, 1 HP, 220YY/440Y V, 60 Hz. En la Tabla 5 se compilan los parámetros estimados.

TABLA 5
PARÁMETROS DE LA MÁQUINA DE 1 HP, 220/440V, 60 HZ

Parámetro	Variable	Valor
Resistencia del estator	R_s	2.75Ω
Reactancia del Estator	X_s	2.5Ω
Resistencia del rotor	R_r	2.9643Ω
Reactancia del rotor	X_r	2.5Ω
Resistencia de magnetización	R_m	692.62Ω
Reactancia de magnetización	X_m	52.204Ω

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se han determinados mediante ensayos experimentales los parámetros eléctricos de una máquina de inducción de simple jaula de ardilla, de 1 HP, 220/440V, 60 Hz. Además se ha calculado la inercia de la misma.

Lo novedoso de este artículo ha resultado en presentar en forma detallada, ordenada y sistematizada la metodología empleada en los ensayos, la cual ha sido apegada a la norma IEEE std. 112-1996. Se han considerado: (i) el ensayo de rotor bloqueado, (ii) ensayo de vacío, y (iii) ensayo de corriente continua para estimar la resistencia del estator.

Finalmente, se ha determinado la inercia del rotor de la máquina, mediante la aplicación de consideraciones teóricas basados en la geométrica, y el peso del rotor.

Este artículo, ha permitido lograr los parámetros eléctricos y mecánicos de la máquina de inducción, a fin de poder acometer a futuro simulaciones del comportamiento y desempeño de la unidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al *Grupo de Investigaciones Avanzadas en Energía Eléctrica*, giaELEC (<http://www.giaelec.org>), quienes son los propietarios de la máquina de 1HP, 220/440V, y facilitaron la misma para acometer los ensayos efectuados en este artículo, y llevan adelante el Proyecto EOLO.

Además se desea agradecer al personal técnico del Laboratorio de Maquinas Eléctrica, de la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Núcleo Maracay, por colaborar en el desarrollo de las mediciones efectuadas en este proyecto

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Gonzalez-Longatt, O. Amaya, M. Cooz, L. Duran. "**Dynamic Behavior of Constant Speed WT based on Induction Generator Directly connect to Grid**". 6th World Wind Energy Conference and Exhibition (WVEC 2007). October 2-4, 2007. Mar del Plata Argentina
- [2] J. Simões, Renewable Energy System. **Design and Analysis with Induction Generators**. CRC Press. 2004.
- [3] Thomas Ackermann, **Wind Power in Power Systems**. John Wiley & Sons, Ltd Stockholm,
- [4] Sweden, 2005.
- [5] J. G. Slootweg. "**Wind Power. Modeling and Impact on Power System Dynamics**". PhD Thesis. University of Delft. Netherland. December, 2003.
- [6] 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**", Trabajo Especial de Grado para optar por el título de Ingeniero Electricista en la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, Maracay, Venezuela. Marzo 2007.
- [7] A. Ríos, A. Strauss, R. Teran, F. Gonzalez-Longatt "**Determinación Experimental de los Parámetros Eléctricos de una Máquina de Inducción de 180Watt**". Reporte de Investigación 2007-10, Venezuela Febrero, 2007. Disponible en: <http://www.giaelec.org/ReportesInv/RPT2007-10.pdf>
- [8] Chapman, S. J. "**Máquinas eléctricas**". Editorial McGraw Hill-Interamericana, Cuarta Edición. México 2005.
- [9] Fitzgerald, A. E., C. Kmgley, Jr., y S. D. Umans. "**Electric Machinery**". 5th ed. New York . McGraw Hill, 1990.
- [10] 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>.
- [11] Frailes Mora, "**Máquinas Eléctricas**". Editorial McGraw Hill – Interamericana, 2003.
- [12] ANSI/IEE std. 112-1996: **Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators del IEEE**. Piscaway. EE.UU, 1996.