

**DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE TRANSIENT PROCESSES IN THE
SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR****CARACTERISTICAS DINAMICAS EN LOS PROCESOS TRANSITORIOS DEL
MOTOR DE INDUCCION DE ROTOR JAULA DE ARDILLA**

Esp. Carlos A. Vera Romero, MSc. Jorge Luis Díaz R., PhD. Aldo Pardo García

Universidad de Pamplona

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel: 57-7-5685303 Ext. 144, Fax: 57-7-5685303.

E-mail: {carlosvera, jdiazcu, apardo13}@unipamplona.edu.co

Abstract: The present study for the obtaining of the transitory processes of an induction motor is eminently experimental, it contemplates the construction of a workbench for testing electric motors that includes the three phase type squirrel cage induction motor and direct current (DC) motor, to be used as load together with a variable source, some sensors for its respective measurements, and a data acquisition kit, you development a graphic interface by means of a software package developed in Matlab® Simulink®, what transforms it into a very powerful tool for the quick implementation of any working prototype.

Resumen: El presente estudio para la obtención de los procesos transitorios de un motor de inducción es eminentemente experimental, contempla la construcción de un banco de prueba de un motor de inducción (objeto de estudio) que incluye un motor de inducción trifásico tipo jaula ardilla y un motor de continua (CD), para ser usado como carga junto con una fuente variable, algunos sensores para su respectivas mediciones, y una tarjeta de adquisición de datos, se desarrollo una interfaz gráfica mediante un paquete de *software* desarrollado en Matlab® Simulink®, lo que la convierte en una herramienta muy poderosa para la implementación rápida de cualquier accionamiento prototipo.

Keywords : Induction Motor, Transient Process, DAQ.

1. INTRODUCCIÓN

Estudiar el funcionamiento en régimen estable ha sido durante años el objeto de estudio fundamental en las máquinas eléctricas, pero con bs cambios tecnológicos experimentados por la ingeniería eléctrica en los últimos años relacionados con el desarrollo de la electrónica de potencia y de las computadoras y de su incorporación a los sistemas eléctricos, ha hecho imprescindible el estudio del régimen transitorio en los motores de inducción jaula de ardilla para el accionamiento eléctrico

automatizado, debido a la amplia distribución y aceptación que tienen en la actualidad por sus características pues supera al motor de directa en robustez, menor relación peso - potencia, menor longitud axial, menor momento de inercia, mayor velocidad máxima, ausencia de mantenimiento, trabajo en cualquier ambiente de trabajo, menor ruido, etc. Esto ha hecho que el motor de inducción sea mu y difundido en aplicaciones industriales.

La energía total de un sistema, cualquiera que éste sea: mecánico, eléctrico, electromecánico, etc., no

puede variar bruscamente, ni es posible pasar de una forma de energía a otra forma de energía instantáneamente. Este principio en los circuitos eléctricos se expresa diciendo que no es posible pasar de un estado de régimen permanente a otro estado permanente de una manera instantánea o discontinua.

2. MODELO FÍSICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Descripción del motor de inducción

Un motor de inducción, (ver fig. 1); es simplemente un transformador eléctrico cuyo circuito magnético está separado, por medio de un entrehierro, en dos partes: una parte fija llamada estator y otra parte móvil llamada rotor (ver fig. 2).

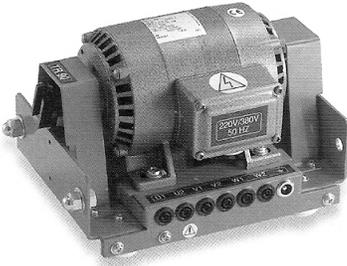


Fig. 1: Motor asíncrono tipo Jaula Ardilla

El estator está formado por un devanado (primario) situado en un núcleo de chapas magnéticas de acero ranuradas. El rotor al igual que el estator, también posee un núcleo de chapas magnéticas ranuradas en el cual se sitúa un devanado (secundario), pero éste, puede que no sea bobinado sino que contenga unas barras de cobre, bronce, o aluminio unidas en los extremos a unos anillos (rotor de jaula de ardilla) que las cortocircuiten. Entre el estator y el rotor existe una separación de aire que debe ser lo más reducida posible, sin que haya roce alguno, y que se denomina entrehierro. Cuando se suministra una corriente alterna, procedente de una red, al devanado primario, se induce una corriente de sentido opuesto en el devanado secundario, produciéndose flujo magnético en el entrehierro, siempre que éste último esté cerrado en cortocircuito o a través de una impedancia exterior.

Dicho flujo magnético determina un par de giro sobre el rotor transformando la energía eléctrica en energía mecánica. En los motores asíncronos trifásicos, se hacen circular corrientes alternas que generan un campo magnético sinusoidal que gira sincrónicamente (velocidad de sincronismo) con la frecuencia de la fuente de alimentación del motor.

El motor de inducción en vacío puede llegar a alcanzar velocidades casi iguales a la de sincronismo, pero en el momento en que se aplique carga, la velocidad se reduce a un valor inferior al de sincronismo, de ahí el nombre de motores asíncronos.

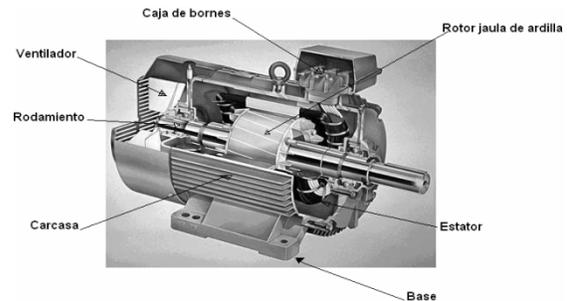


Fig. 2: Partes principales de un motor asíncrono trifásico con rotor de jaula de ardilla

Para fines de modelación, será considerado un motor de inducción trifásico, de P polos, conectado en estrella, constituido de un enrollado simétrico en el estator, o sea compuesto de tres enrollados idénticos desfasados geométricamente a 120 grados, y de un enrollado semejante en el rotor.

La teoría generalizada de máquinas eléctricas introduce una serie de consideraciones con el objetivo de simplificar el análisis y por consecuencia, la obtención de un modelo. Equivale a decir que las máquinas son consideradas ideales. Las hipótesis generalmente consideradas son:

- La saturación magnética es despreciada. Se considera valida la superposición de los flujos y todas las inductancias son consideradas independientes de la magnitud de las corrientes.
- Las fuerzas magnetomotrices y los flujos del entrehierro son representados por las componentes fundamentales de su distribución espacial que es considerada simétrica en relación al eje magnético de los enrollados.
- Las distorsiones del flujo introducidas por el efecto de las ranuras son ignoradas. Los enrollados se consideran constituidos de una distribución sinusoidal de conductores de diámetros despreciables.
- Las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas del material magnético se desprecian.

La hipótesis más restrictiva es, ciertamente, la desconsideración de saturación magnética. En muchos casos su efecto no puede ser despreciado.

Para estos casos, algunas técnicas pueden ser utilizadas para introducir en el modelo final el efecto de saturación magnética.

2.1 Ecuación mecánica

La ecuación mecánica relaciona las variables eléctricas del motor con la carga, según la segunda ley de Newton para el movimiento rotatorio. En términos de la velocidad mecánica se puede escribir:

$$J p w_m + B w_m + T_c = T_e \quad (1)$$

Expresando en términos de la velocidad angular eléctrica del rotor w_r , según $w_r = P/2 w_m$, obtenemos:

$$J p w_r + B w_r = \frac{P}{2} (T_e - T_c) \quad (2)$$

Donde P representa el número de polos del motor y p es el operador de Laplace.

2.2 Modelo del motor de inducción en varios sistemas de coordenadas

Escogiendo adecuadamente la velocidad del sistema de coordenadas arbitrario w , se puede obtener características particulares en el modelo del motor de inducción. Tres casos particulares son de gran interés:

- $w = 0$: Sistema de coordenadas fijo en el estator. Coincide con sistema de coordenadas estacionario o también como sistema de coordenadas $\alpha\beta$.
- $w = w_r$: sistema de coordenadas fijo en el rotor. Es poco utilizado en la literatura para motor de inducción. Sin embargo, es de mucha importancia para el motor sincrónico.
- $w = w^e$: es conocido como sistema de coordenadas sincrónico, por girar con la frecuencia sincrónica de las tensiones de alimentación.

A continuación se muestra el modelo del motor de inducción en el sistema de coordenadas arbitrario:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + p I_{qs} + w I_{ds} \quad (3)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p I_{ds} - w I_{qs} \quad (4)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + p I_{qr} + (w - w_r) I_{dr} \quad (5)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + p I_{dr} - (w - w_r) I_{qr} \quad (6)$$

$$I_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}, \quad I_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (7)$$

$$I_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs}, \quad I_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (8)$$

$$J p w_r = -B w_r + \frac{P}{2} (T_e - T_c) \quad (9)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{L_r} \frac{L_m}{L_r} (I_{dr} i_{qs} - I_{qr} i_{ds}) \quad (10)$$

$$w_m = \frac{2}{P} w_r \quad (11)$$

Donde λ representa las concatenaciones de flujo.

El sistema de coordenadas sincrónica es el más utilizado en estudio del motor de inducción por presentar la importante propiedad de representar las variables sinusoidales del sistema de coordenadas trifásico por valores constantes.

3. PROCESOS TRANSITORIOS EN MOTORES DE INDUCCIÓN

Se llama régimen transitorio, o solamente "transitorio", a aquella respuesta de un sistema eléctrico que se extingue en el tiempo, en contraposición al régimen permanente, que es la respuesta que permanece constante hasta que se varía bien el circuito o bien la excitación del mismo.

Los procesos transitorios tienen lugar cuando se pasa de un régimen establecido a otro. El proceso transitorio se manifiesta ante un cambio simétrico o asimétrico de las fases o de las amplitudes de las tensiones alternas de la red que alimenta el devanado del estator; también este proceso está dada al variar de súbito el par de carga, después de lo cual se altera el equilibrio de los momentos, aparece la aceleración y se establece un nuevo valor de la frecuencia de rotación. Ellos surgen a raíz del cambio de las tensiones de las redes eléctricas de las resistencias de los devanados o de la carga, del momento exterior de rotación aplicado al eje del motor, al arranque, la inversión de marcha, cortocircuito externo y a la desconexión de la red, etcétera. Los procesos transitorios pueden estar vinculados con las conmutaciones de explotación, así como con los cambios de emergencia de la tensión y de las resistencias que se manifiestan durante los cortocircuitos en las redes eléctricas o en los devanados de las máquinas mencionadas ya anteriormente.

En los sistemas electromecánicos, los regímenes transitorios eléctricos están asociados con circuitos eléctricos conteniendo inductancias y capacitancias, y los regímenes dinámicos con elementos mecánicos dotados de inercia y elasticidad. El cierre o apertura de un circuito, la puesta en marcha de un motor o el cambio de carga

del mismo, cualquier variación brusca de la resistencia, la autoinducción o la capacidad de una red, son causa de perturbaciones eléctricas o mecánicas, que da origen a un régimen transitorio.

El análisis de estos regímenes y la influencia en ellos de distintos parámetros mecánicos y eléctricos como por ejemplo, la tensión, resistencia, inductancia, par giratorio, etc., es necesario también para la elección adecuada de los procedimientos de control, (por ejemplo; los variadores de velocidad), y de cálculo de los circuitos, la magnitud del consumo de energía durante el arranque y el frenado en accionamientos de frecuentes puesta en marcha.

La máquina debe soportar sin deterioro los procesos transitorios esperados. La teoría debe garantizar la posibilidad de prever el transcurso de los procesos transitorios de explotación. El cálculo previo de un proceso transitorio de emergencia (por ejemplo, un cortocircuito inesperado), es necesario para el ajuste de las protecciones de las máquinas eléctricas que las desconecta de la red. El análisis de los procesos transitorios es un problema actual, pues a partir del análisis dinámico se obtienen criterios de diseño para la selección del tipo de motor y convertidor que accionarán la carga industrial.

Los procesos transitorios se dividen en dos grupos: Electromagnéticos y Electromecánicos.

Se denominan electromagnéticos los procesos transitorios en el transcurso de los cuales la velocidad de rotación de la máquina se puede considerar constante; se consideran electromecánicos, los procesos transitorios relacionados con cambios considerables de la velocidad de rotación y de la energía cinética de las partes giratorias de la máquina. El análisis de los procesos transitorios en las máquinas asincrónicas resulta más cómodo efectuarlo en las formas de expresiones complejas con ayuda del sistema de ecuaciones de las tensiones, escritas en los ejes dq en el caso general, en el plano complejo que gira con una velocidad arbitraria \mathbf{W} .

Arranque. Durante el análisis del proceso de arranque, no consideramos los procesos transitorios electromagnéticos relacionados con el hecho de que, cuando se conecta cualquier circuito eléctrico de un mecanismo electromagnético bajo voltaje y durante la variación de su régimen de trabajo, las corrientes no alcanzan los valores estables instantáneamente, sino transcurrido cierto

tiempo, la magnitud de este tiempo es proporcional a la constante de tiempo electromagnética τ , la cual depende de la reactancia inductiva y de la resistencia del circuito. Durante el arranque de la máquina asincrónica el tiempo de su aceleración hasta la velocidad normal, es mucho mayor que la duración de los procesos transitorios electromagnéticos y por eso, la influencia de estos procesos en el arranque no es grande. Por consiguiente el proceso de arranque se puede analizar basándose en las dependencias obtenidas para el momento rotacional y para las corrientes en condiciones de trabajo del motor en el régimen estable con un deslizamiento dado. Para comprobar los procesos de arranque, y frenado, y para seleccionar la velocidad del motor a utilizar, se necesita conocer la curva del par resistente de la máquina accionada (par de carga), en dependencia de la velocidad de rotación.

Las formas básicas representativas de los pares resistentes se reproducen en la figura 3, izquierda, en la figura 3, derecha se muestra la correspondiente de la potencia necesaria.

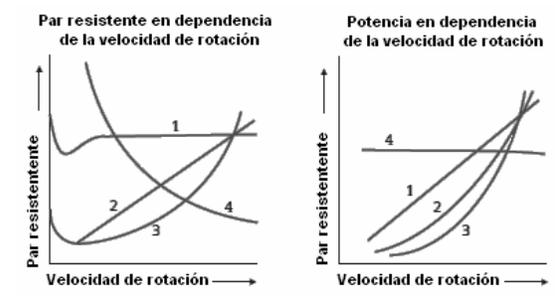


Fig. 3: Representación de las curvas características del par resistente de la carga.

1. Par resistente prácticamente constante, potencial proporcional a la velocidad de rotación.
2. El par resistente crece proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad de rotación, y la potencia con el cubo de la velocidad de rotación.
3. El par resistente crece proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad de rotación, y la potencia con el cubo de la velocidad de rotación.
4. El par resistente decrece en proporción inversa con la velocidad de rotación, permaneciendo constante la potencia.

Como anteriormente se mencionó, el motor debe desarrollar, durante el arranque, un momento de arranque lo suficientemente grande, éste debe ser

mayor que el momento estático de la carga en el eje, para que el rotor del motor pueda moverse y logre alcanzar la velocidad nominal de rotación.

La magnitud de la corriente de arranque debe ser limitada a un valor tal que no dañe el motor y no interfiera el régimen nominal de trabajo de la red eléctrica y el costo de los dispositivos de arranque deben ser pequeños.

$$I_{arr} = 4.0 \text{ a } 7.0 I_n$$

Este arranque sólo es posible cuando se provocan caídas de voltaje grandes en la red (mayores del 10 al 15%).

Cortocircuitos. Para estos procesos transitorios se emplea el modelo matemático expresado por el sistema de ecuaciones diferenciales teniendo en cuenta que el voltaje de alimentación se anula instantáneamente en dependencia del tipo de cortocircuito ocurrido. Las condiciones iniciales se toman a partir del estado estable obtenido del proceso de arranque directo del accionamiento. Es interesante, al igual que en los casos anteriores, realizar la simulación de estos procesos teniendo en cuenta las variaciones del momento de carga, el momento de inercia equivalente en el eje del motor y las resistencias del rotor de la máquina para cada tipo de cortocircuito.

El experimento se realiza bloqueando el rotor e impidiendo que gire $N_2 = 0$, $s = 1$, $R_2' = 0$ y se aplica al estator una tensión desde 0 hasta que la corriente sea la nominal ($I_{icc} = I_{IN}$). Ver fig. 4 y 5.



Fig. 4: Esquema en cortocircuito

Analizando las diferentes características en cada tipo de cortocircuito se pueden obtener criterios para la selección, coordinación y cálculo de las protecciones del motor.

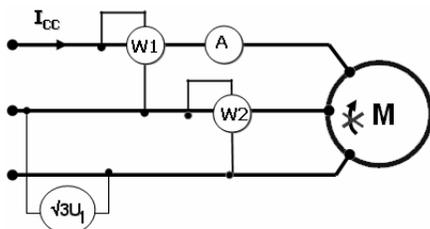


Fig. 5: Conexión en cortocircuito del motor jaula ardilla

Desconexión de la red Supongamos que antes de ser desconectada la máquina funcionaba en el régimen establecido con una velocidad angular del rotor ω_r y una frecuencia de la red ω_1 . Cuando $t = 0$ tiene lugar la desconexión simultánea de todas las fases del devanado del estator de la red y la corriente del estator del régimen estable precedente $I_1(t = 0)$ con suma rapidez (durante el tiempo que arde el arco entre los contactos, que desconectan la red del devanado del estator) se reducen a cero. Considerando que en este intervalo de tiempo el devanado en jaula del rotor es superconductor, y aplicándole al mismo el principio de constancia de los flujos concatenados, llegamos a la conclusión de que el flujo concatenado del rotor después de que desaparece la corriente del estator permanece igual que en el régimen estable precedente para $t = 0$.

El sentido físico del mismo será más comprensible si se emplea el sistema de ejes dq que giran con una velocidad del rotor $\omega = \omega_r$. En los ejes del rotor el fasor de I_r se amortigua con una constante de tiempo quedando inmóvil con relación al rotor. El fasor resultante I_r corresponde al sistema de corrientes amortiguadas aperiódicamente en las fases del rotor.

La tensión varía con una velocidad angular del rotor igual a ω_r , y su amplitud se amortigua con la constante de tiempo. Los motores de inducción en funcionamiento poseen una cierta cantidad de energía electromagnética almacenada, que está determinada principalmente por las dimensiones del entrehierro. Cuanto mayor es este, mayor es la cantidad de energía electromagnética almacenada.

Cambio brusco de la carga. Al examinar el funcionamiento del motor eléctrico que pone en movimiento un mecanismo de producción, es necesario, ante todo, revelar la correspondencia que existe entre las propiedades mecánicas del motor y la característica del mecanismo en cuestión o sea conocer el proceso tecnológico.

El trabajo durante los regímenes transitorios (en los casos de arranque, frenado y regulación de la velocidad) también depende del carácter del cambio del momento de rotación del motor y del par resistente del mecanismo al variar la velocidad. Por lo tanto, a fin de proyectar correctamente y de explotar económicamente el accionamiento eléctrico conviene estudiar dichas características.

La dependencia entre la velocidad de rotación y el par resistente del mecanismo $w = f(T_{res})$ se le denomina característica mecánica del mecanismo de producción.

Los distintos mecanismos de producción poseen distintas características mecánicas. No obstante pueden adquirirse algunas deducciones de generalización, si se hace uso de la fórmula empírica siguiente para la característica mecánica del mecanismo de producción:

$$T_{res} = T_0 + (T_{res,n} - T_0) \cdot \left(\frac{w}{w_n} \right)^x$$

Donde:

T_{res} , Es el par resistente del mecanismo de producción a velocidad w .

T_0 , El par resistente de rozamiento en las partes móviles del mecanismo.

$T_{res,n}$, Es el par resistente del mecanismo de producción a velocidad nominal.

x , Es el factor que caracteriza el cambio del par resistente al variar la velocidad.

La ecuación citada anteriormente permite clasificar las características mecánicas de los mecanismos de producción.

Variación brusca de la tensión. La variación de la tensión de alimentación del motor asincrónico conlleva a la variación del par de excitación (T_{exc}) y el deslizamiento crítico (S_{crit}) se mantiene constante. En los casos de sistemas magnéticos no saturados el par crítico (T_{crit} ó T_{max}) varía proporcionalmente al cuadrado de la tensión.

Al disminuir la tensión disminuye el par de carga (T_c) de la característica mecánica. Además al disminuir la velocidad disminuye el par máximo (T_{max}), disminuyendo además la velocidad disminuye la eficiencia y la potencia de la instalación.

Métodos empleados para variar la tensión en el circuito del estator:

- Autotransformador
- Rectificador estático de tensión (RET)

Frenado contracorriente. El frenado por contracorriente al igual que la inversión de sentido de giro del motor asincrónico se realiza conmutando dos fases del estator.

En el segundo cuadrante la velocidad es positiva y el momento negativo, a esto puede llegarse de dos

formas, una de ellas con la máquina trabajando como generador y recibiendo energía mecánica de la carga y entregándola, en forma eléctrica, a la red y la otra se consigue cuando, tanto la fuente de alimentación como la carga mecánica, entregan energía a la máquina y esta energía se disipa en las resistencias internas en forma de calor. A esta condición de operación se le denomina frenado por contracorriente

Frenado dinámico. El frenado dinámico, se practica con más frecuencia al conmutar en marcha el devanado del estator de la fuente de corriente alterna a la fuente de corriente continua. Durante el frenado dinámico, el motor asincrónico se desconecta de la red trifásica y se conectan las fases del estator a una fuente de corriente directa, y esta conexión se hace en dependencia del momento de frenado deseado.

Teniendo en cuenta que el voltaje de alimentación de la fases en el momento de frenado sería: $U_a = U_c = 2/3 U_{cd}$, $U_b = U_c = -1/3 U_{cd}$, en dependencia del tipo de conexión del estator adoptado en el frenado y tomando las condiciones iniciales a partir del estado estable, obtenido del proceso de arranque directo del motor, donde U_{cd} es la magnitud del voltaje de la corriente directa aplicado durante el frenado dinámico. Las características respectivas del frenado dinámico se obtienen cuando se introducen la resistencia R en el circuito del motor. La limitación de la magnitud de la corriente continua requiere la introducción de la resistencia adicional R_f .

Frenado recuperativo. El frenado recuperativo de la máquina asincrónica es posible si su velocidad de rotación resulta mayor que la sincrónica. Construyendo una característica mecánica del motor en régimen generador y determinando de esta el momento máximo y el deslizamiento crítico, calculando la constante electromecánica del tiempo para el caso dado y prefijando los límites de la variación del deslizamiento, puede construirse análogamente al caso precedente la curva de la dependencia entre la velocidad y el tiempo y determinarse el tiempo de frenado. Si no se tiene en cuenta el tiempo de la conmutación de los dispositivos de mando, puede considerarse que el tiempo del frenado por etapas es substancialmente menor que durante el frenado por una etapa, a costa de aumentar el par de frenado efectivo.

Inversión de marcha. Este proceso transitorio ocurre al invertir el sentido de giro al motor, cuando se necesita por alguna razón que el motor

gire en sentido contrario. Para lograr esto se cambian las conexiones de dos fases del estator y la otra fase se mantiene, mientras el motor está funcionando, con lo que se produce la inversión del campo rotatorio del estator; en este caso debido a la inercia de la respuesta el rotor gira en sentido contrario al del campo magnético del estator, con un deslizamiento mayor que la unidad ($s > 1$). Debe de tenerse en cuenta que en este proceso la corriente adquiere un valor máximo mientras dure este, por lo que debe de limitarse de alguna forma para que no dañe los devanados de la máquina. En el caso de motores de jaula de ardilla, debe de utilizarse para este fin motores de doble jaula o de ranuras profundas. Es importante conocer el valor de corriente máxima que puede alcanzar el motor que depende decisivamente del estado de carga del motor.

4 DISEÑO DE LA INTERFAZ MATLAB® SIMULINK®

GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*) es un conjunto de herramientas que extiende por completo el soporte de MATLAB, diseñadas para crear GUIs (Graphical User Interfaces) fácil y rápido dando soporte en el diseño y presentación de los controles de la interfaz, reduciendo la tarea al grado de seleccionar, tirar, arrastrar y personalizar propiedades. En la interfaz gráfica diseñada se permite visualizar unas cuantas variables como corrientes, voltaje, par, velocidad las cual con conocimientos previos de motores de inducción podemos ser capaces de dar un excelente diagnóstico de la máquina que se está trabajando. Como se aprecia en las figuras 6 y 7.

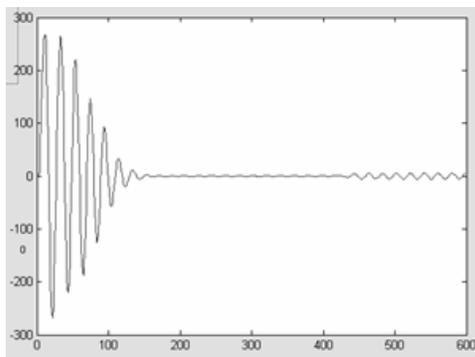


Fig. 6: Corriente debido a la fase a del rotor

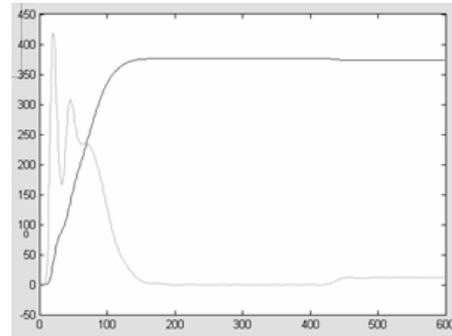


Fig. 7: Gráfica obtenida con la interfaz donde muestra la velocidad vs par (torque).

5. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PCI-6023E DE NATIONAL INSTRUMENTS

En el instante de diseñar un sistema de adquisición de datos a través de un puerto del computador, el objetivo es hacer más sencilla y económica la realización de las experiencias de laboratorio asistidas por computador. Para dicha experiencia en el laboratorio se escogió la valoración de las características dinámicas en los procesos transitorios del motor de inducción tipo jaula de ardilla. La PCI-6023E es una placa de alto rendimiento con multifunción analógica, digital y temporizadores para ordenadores con bus PCI. Incluye funciones de entrada analógica, entrada y salida digital, y temporizadores de entrada/salida.

La placa PCI-6023E presenta 16 canales de entrada analógica (ó 8 diferenciales) configurables por software, un conector de 68 pines que puede proporcionar una alimentación suplementaria de 5V y ocho líneas de entrada / salida digital (DIO) que permiten recibir o enviar señales TTL, así como controlar estados de dispositivos externos. Esta tarjeta utiliza el sistema de control de tiempo de National Instruments DAQ-STC para las funciones relacionadas con el tiempo, con una resolución de temporización máxima de 50 ns. DAQ-STC hace posible aplicaciones, como por ejemplo la generación de pulsos, el tiempo de muestreo, y el cambio de frecuencia de muestreo.

La adquisición de las señales se realiza mediante dos de los canales de entrada analógica (ACH) de la tarjeta, configurados en la modalidad de entrada referenciada a masa y en un rango de entrada unipolar de 0 a +10V. Solo se seleccionan las opciones del programa de adquisición sólo del emisor o del receptor, el muestreo se realiza en un solo canal, si la opción seleccionada es "adquirir

ambas señales”, se efectúa el muestreo de los dos canales al mismo tiempo, este recurso de adquisición multicanal crea un fichero que guarda en los índices pares los correspondientes a la señal del emisor, y en los impares los del receptor.

Tabla 1. Rangos de entrada según la ganancia para la placa PCI-6023E.

Ganancia	Rango de entrada	Resolución
0.5	-10 a +10 V	4.88 mV
1.0	-5 a +5 V	2.44 mV
10.0	-500 a +500 mV	244.14 μ V
100.0	-50 a +50 mV	24.41 μ V

*El valor de 1 LSB del convertidor A/D de 12 bits; es decir, el incremento de voltaje correspondiente al cambio de una unidad en el convertidor A/D.

CONCLUSIONES

Se obtuvo el modelo del motor de inducción a partir de sus características físicas. A lo largo de este desarrollo, se introdujo varias aproximaciones con el objetivo de facilitar la obtención del modelo y también de simplificar el modelo final. Se demostró que el modelo físico obtenido es de difícil tratamiento analítico, pues posee inductancias variables en el tiempo. Se obtuvo el modelo físico completo del motor de inducción siendo de gran importancia para la obtención de los demás modelos. Se expusieron los diferentes procesos transitorios, su concepto y clasificación. Además, las principales causas que lo provocan, dentro de las cuales se analizan el arranque, cortocircuito, frenado recuperativo, desconexión de la red, cambio brusco de la carga, inversión de marcha, etc. Se introdujeron los conceptos de sistema de coordenadas y cambio de variables o transformación de coordenadas. De una forma particular, se representa el sistema de coordenadas arbitrario. Con esto, se logró obtener un modelo equivalente más simplificado.

El método de analizar los procesos transitorios a través de su simulación, permite predecir posibles averías en los motores producto de los procesos transitorios, por lo tanto, constituyen un eslabón importante para conformar un laboratorio, en el cual se puedan observar estos fenómenos lo más cercano posible a la realidad de forma virtual. Los algoritmos planteados son aplicables a cualquier motor de inducción, basta con cambiar sus parámetros. Se obtuvo un banco de trabajo para el desarrollo de prácticas en la enseñanza de máquinas eléctricas para la obtención y más adelante el posible control mediante una tarjeta de adquisición de datos.

REFERENCIAS

- Barbi, I., *Introdução ao Estudo do Motor de Indução*, Universidade Federal de Santa Catarina, 1988.
- Díaz R., J. L. Electric Motor Transient Processes. Revista Colombiana de Tecnología de Avanzada. ISSN: 1692-7257 Volumen 1 - 2006
- Fitzgerald, A.E., Kingsley y Umans. *Electric Machinery*. 5th Edition. New York: McGraw Hill, 1990.
- Holtz, J. *The Representation of AC Machine Dynamics by Complex Signal Flow Graphs*. University of Wuppertal, Germany, 2002.
- Kovacs, K. P., *Transient Phenomena in Electrical Machines*, Akademi Kradó, Budapest, 1986.
- Pardo, A; Díaz, J. L. *Fundamentos en Sistemas de Control Automático*. Universidad de Pamplona. 2004.
- Reginatto, R.; Rico, J. E., *Modelagem do motor de Indução*, Nota Técnica de Laboratório – LCMI, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.
- Vera R., C. A. *Características dinámicas en los procesos transitorios del motor de inducción rotor jaula de ardilla*. Trabajo de Maestría. Universidad de Pamplona, 2007.

Referencias de páginas WEB visitadas:

- Nacional Instruments.
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/10967>. Acceso: Julio 2007
- Real-Time Windows Target 3. User's Guide.
http://www.mathworks.fr/access/helpdesk/help/pdf_doc/rtwin/rtwin_target_ug.pdf. Acceso: Agosto 2007