

**NOISE ANALYSIS OF THE CURRENT SENSORS IN FREQUENCY  
CONVERTERS WITH VECTOR CONTROL****ANALISIS DEL RUIDO DE LOS SENSORES DE CORRIENTE EN  
CONVERTIDORES DE FRECUENCIA CON CONTROL VECTORIAL**

**MSc. Armando A. Becerra Vargas\***, **MSc. Jorge Luis Díaz Rodríguez\*\***  
**MSc. Germán E. Gallego Rodríguez\***

\* **Universidad Francisco de Paula Santander**, Dpto. de Ing. Electrónica  
Av. Gran Colombia, Colsag, Norte de Santander, Colombia.

\*\* **Universidad de Pamplona**, Facultad de Ingenierías y Arquitectura  
Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.  
Tel.: 57-7-5685303 Ext. 164

E-mail: {jabecerr, gallego}@bari.ufps.edu.co; jdiazcu@unipamplona.edu.co

**Abstract:** En el presente artículo se hace un análisis del efecto producido por el ruido que introducen las sondas de medida de corriente de los convertidores de frecuencia con estrategia de control vectorial, en la respuesta del motor de inducción. El estudio tiene su fundamento en la caracterización de los sensores de corriente más comunes utilizados en la industria, el modelo matemático del motor de inducción y el modelo del convertidor con estrategia vectorial. La simulación pretende determinar el verdadero efecto que produce este tipo de perturbación en el comportamiento del conjunto Motor-Carga. El modelo del conjunto, incluyendo la señal de ruido, es desarrollado en Matlab® y Simulink®.

**Resumen:** In the present article there is done an analysis of the effect produced by the noise that there introduce the probes of measure of current of the convertors of frequency with strategy of vector control, in the response of the engine of induction. The study has his foundation in the characterization of the most common sensors of current used in the industry, the mathematical model of the engine of induction and the model of the convertor with vector strategy. The simulation tries to determine the real effect that produces this type of disturbance in the behavior of the joint Engine - load. The model of the set, including the sign of noise, is developed in Matlab® and Simulink®.

**Keywords:** Induction motor, Vector control, Direct Vector, Hall sensors, Rogowski coils.

## 1. INTRODUCCION

Debido a su robustez, las máquinas eléctricas de inducción son en la actualidad uno de los elementos más importantes en los accionamientos eléctricos modernos presentes en la industria. [1,3]. Inicialmente se desarrollaron los métodos escalares para controlar estas máquinas. La respuesta

transitoria obtenida con ellos es pobre, o sea insatisfactoria, debido a que este control no regula separadamente y de forma adecuada tanto el flujo como el par del motor. Por este motivo, no es aconsejable el empleo de los métodos de control escalar en los accionamientos a los que se les exige elevadas prestaciones dinámicas [1, 3, 9, 13]. No obstante, la evolución tecnológica a partir de los

ochenta pudo resolver esta dificultad mediante el desarrollo del control vectorial o del campo orientado, mejorando así el comportamiento transitorio de las máquinas de inducción, lo que permite aprovechar al máximo la capacidad de las mismas. Sin embargo, su comportamiento va empeorando a medida que se producen variaciones en los parámetros de la máquina; por este motivo, para obtener un buen comportamiento dinámico del accionamiento eléctrico es necesario que se realice una adaptación de sus parámetros [1].

En los años noventa, las investigaciones en el campo del control de los accionamientos eléctricos fueron concentradas hacia el desarrollo una nueva estrategia de control (DTC) que ofrece una respuesta muy rápida del par y un comportamiento dinámico muy alto, utilizando un modelo más sencillo que el que se necesita con el control de campo orientado.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Problema

El DTC [11] es considerado como un verdadero adelanto en el área de los controles industriales, pero surgen algunos inconvenientes que dan pie a nuevos desarrollos tecnológicos para convertidores de frecuencia. Como objeto de estudio, se tuvo en cuenta el siguiente inconveniente:

El "offset" en las corrientes de estator medidas por las sondas y sus circuitos analógicos empeora el comportamiento del accionamiento produciendo unas ondulaciones en el par de la misma frecuencia que la corriente de estator. Estas ondulaciones de baja frecuencia se reflejan en el eje del motor generando vibraciones y quizás a largo plazo estropean partes mecánicas del motor como los cojinetes y el sistema de transmisión si lo hubiera. No obstante, este problema no solo existe con el DTC, sino también en cualquier sistema de control vectorial que utilice sondas para medir las corrientes. [11, 13].

Teniendo en cuenta este problema, se puede plantear el siguiente interrogante: ¿es posible reducir al máximo los elementos analógicos que conforman el sistema de medida de corriente en los convertidores de frecuencia, sin que esto afecte su funcionamiento? La respuesta está presente en el estudio realizado, actualmente el control de velocidad de los motores de inducción se realiza de forma digital utilizando DSP o procesadores con

gran capacidad de memoria y alta potencia de cálculo, dado que su costo es proporcional a su desempeño y que además todas las señales sensadas son analógicas, siempre estará presente el sensor análogo. Los tipos más comunes de sensores, en los que se basa este estudio, son el sensor de efecto Hall y la bobina Rogowski.

### 2.2 Sensores

Un sensor convierte una señal física de un tipo en una señal física de otra naturaleza. Por ejemplo una termocupla produce un voltaje que está relacionado con la temperatura, así mismo en una resistencia metálica se aprovecha el fenómeno de variación de la resistencia con la temperatura para producir una señal de voltaje que sea proporcional a la temperatura. [12].

#### 2.2.1 El efecto Hall

El efecto Hall, descubierto por E. H. Hall en 1879, consiste en la aparición de una diferencia de potencial transversal en un conductor o semiconductor, por el que circula una corriente eléctrica, cuando hay un campo magnético aplicado en dirección perpendicular a esta. [5, 8].

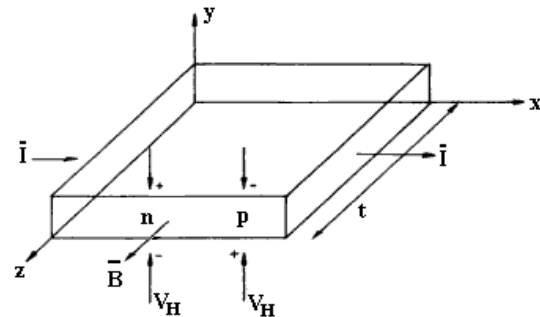


Fig. 1. Sentido de la tensión Hall en un semiconductor

En la fig. 1 se indica el sentido de la tensión obtenida para el caso de un semiconductor, este depende del tipo de portadores de corriente mayoritarios. La ec. 1 es para cálculo de tensión.

$$A_H = \frac{V_H \cdot t}{I \cdot B} \quad (1)$$

Donde:

- $A_H$  Representa el coeficiente Hall.
- $V_H$  Representa la tensión Hall, en voltios
- $t$  Grosor del material dado en mm.
- $I$  Corriente eléctrica del material, en amperios.
- $B$  Densidad de campo magnético dado en mT.

Actualmente el sensor de corriente más utilizado en la industria así como en los convertidores de frecuencia es el sensor de efecto Hall, dadas sus magnificas prestaciones, ya que puede medir incluso señales en DC. En la figura 2, se muestra un sensor de corriente de efecto Hall, utilizado en la mayoría de los convertidores de frecuencia comerciales.



Fig. 2. Sensor Hall de corriente tipo ventana

2.2.2 La bobina Rogowski

Este tipo de sensor es usado para medidas de baja frecuencia (menores de 60 Hz). El voltaje de salida de la bobina Rogowski es proporcional a la rata de cambio de la medida de corriente. Para obtener un voltaje proporcional a la medida de corriente, el voltaje de salida de la bobina tiene que ser integrado, normalmente se utiliza un integrador activo es decir un sistema basado en el amplificador operacional.

El circuito equivalente de la bobina Rogowski y el integrador activo ideal se ilustra en la figura 3, donde  $R_0$ ,  $L_0$  y  $C_0$  representan; la resistencia en ohmios, la inductancia propia en mH y la capacitancia de la bobina en uF, respectivamente.  $R_a$  es el resistor de muestreo. El resistor  $R$ , el capacitor ideal  $C$  y el amplificador operacional  $A$  constituyen el integrador activo.  $R_L$  es el resistor de carga del integrador. [4, 7, 14].

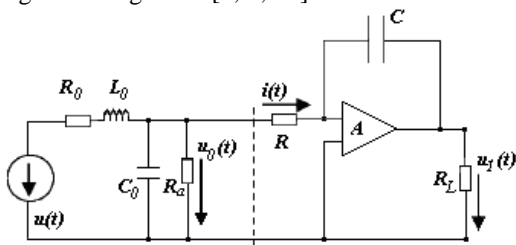


Fig. 3. Circuito equivalente de la bobina Rogowski con integrador ideal

A partir de este circuito equivalente se logra obtener la función de transferencia cuya simulación en matlab (diagrama de BODE) arroja el resultado mostrado en la figura 4.

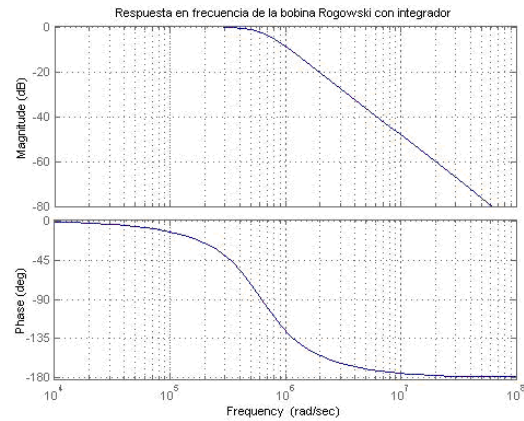


Fig. 4. Respuesta en frecuencia de la bobina Rogowski

3. MODELO MATEMATICO

3.1 El Motor de inducción

3.1.1 Modelo

En la figura 5 se muestra el modelo matemático del motor de inducción en coordenadas del estator, desarrollado en Simulink®. Este modelo contempla la parte eléctrica (ecuaciones eléctricas del motor) y la parte mecánica (sistema de primer orden). Allí se pueden apreciar los bloques que representan las transformadas de Clarke y Park.

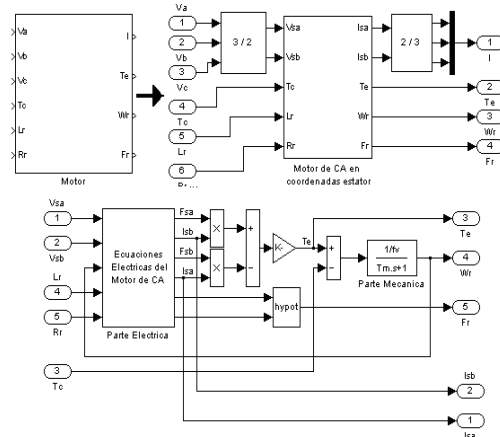
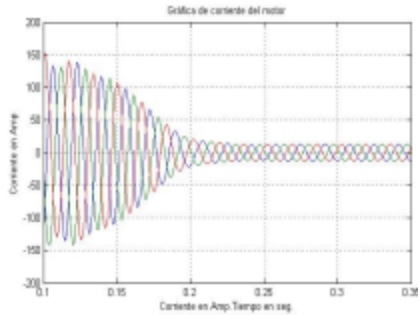


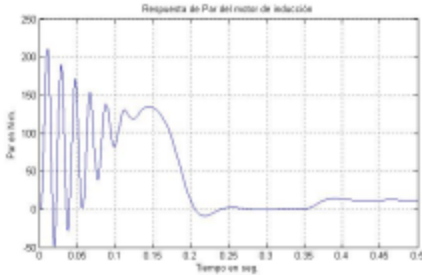
Fig. 5. Modelo matemático del motor en coordenadas del estator

3.1.2 Simulación

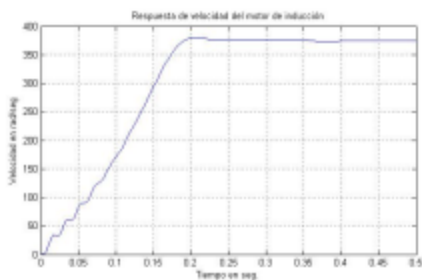
La simulación del motor con carga se realizó en Matlab® & Simulink®. Los resultados se muestran en la figura 6.



a. Corriente del estator del motor



b. Par desarrollado por el motor



c. Respuesta de velocidad del motor

Fig. 6. Simulaciones del motor de inducción en Simulink®

#### 4. ESTRATEGIA DE CONTROL

El modelo del sistema presentado, con estrategia Vector Directo, será utilizado para el análisis del comportamiento de los sensores de corriente así como la influencia del ruido en el mismo. En la figura 7 se muestra el sistema en diagrama de bloques, este modelo se utiliza para obtener la respuesta ideal del comportamiento del conjunto motor-carga-control.

En la figura 7, se observa que la corriente es tomada directamente del modelo, lo que hace que este parámetro sea ideal, ya que no involucra errores de sensado ni la participación del ruido en la medida de la corriente.

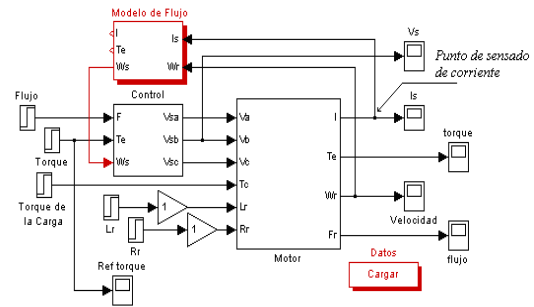
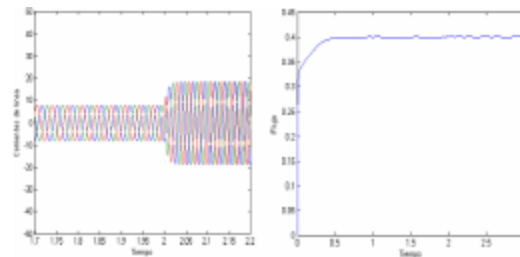
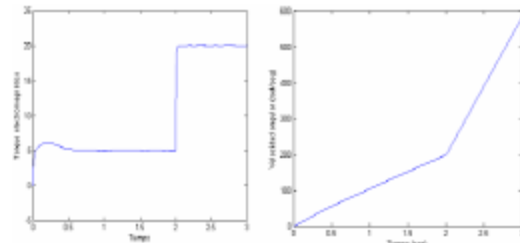


Fig. 7. Sistema de control con estrategia vectorial

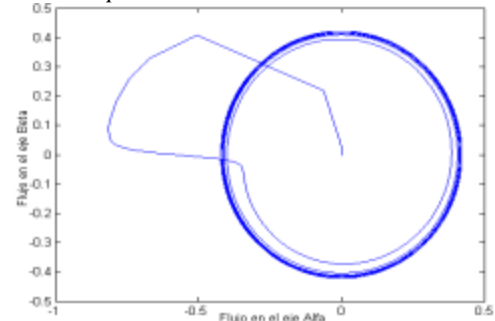
La simulación muestra el siguiente resultado:



a. Salida de corriente y flujo del motor



b. Respuesta Par - Velocidad del motor



c. Comportamiento de los flujos en cuadratura

Fig. 8. Comportamiento del sistema de control vectorial

#### 4.1 Señal de ruido

Para analizar el comportamiento del sistema, se introduce una señal de perturbación (ruido+ondulación), que permita modificar el comportamiento del motor. Esta perturbación se

simula con una serie de ruidos aleatorios (librerías de Simulink®) moduladas con una onda seno (ondulación) figura 9. En la figura 10, se muestra el resultado de esta simulación.

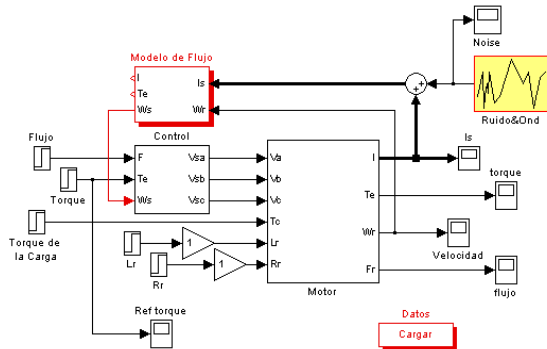
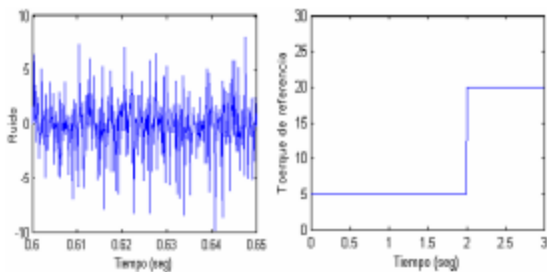
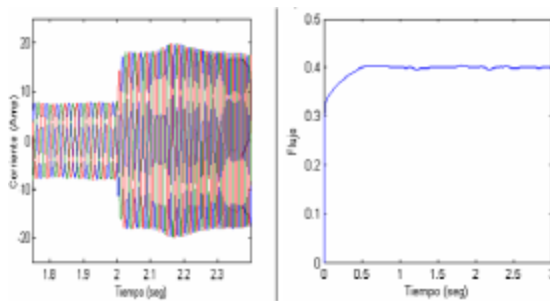


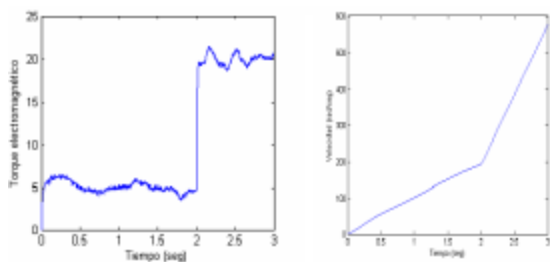
Fig. 9. Introducción de una señal perturbadora al sistema de control vectorial



a. Ruido de entrada y Par de referencia



b. Corriente de fase y flujo del motor



c. Respuesta de Par y velocidad del motor

Fig. 10. Comportamiento del motor ante una perturbación

## 5. VALIDACION DE LOS RESULTADOS

Para validar el concepto de ruido y ondulaciones en las sondas de medida de corriente, se realizaron unas prácticas de laboratorio, consistentes en un montaje de control de velocidad utilizando un sensor de efecto hall referencia CYHCS007 como el mostrado en la figura 2, una bobina Rogowski, un convertidor de frecuencia con estrategia de control del Par, un motor de inducción jaula de ardilla marca SIEMENS de 5 HP, 3580 rpm, 220/440 V, un archivo de Matlab para captura de datos utilizando la tarjeta de sonido como sistema de adquisición de datos y la instrumentación necesaria para la toma de corrientes en la línea entre el convertidor y el motor (fig. 11).

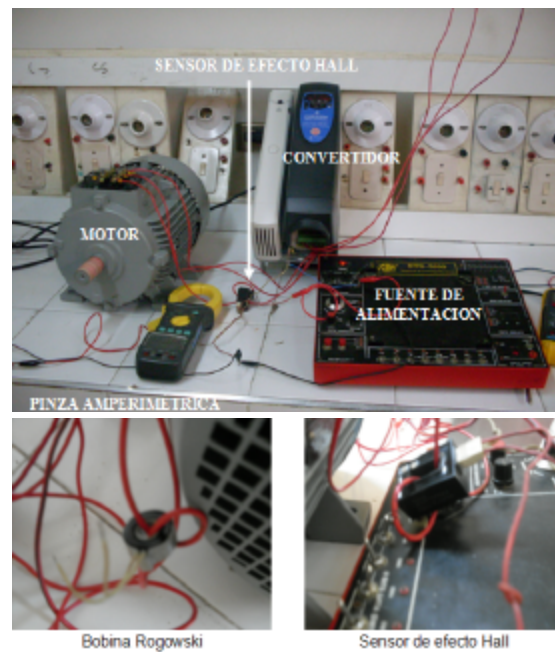
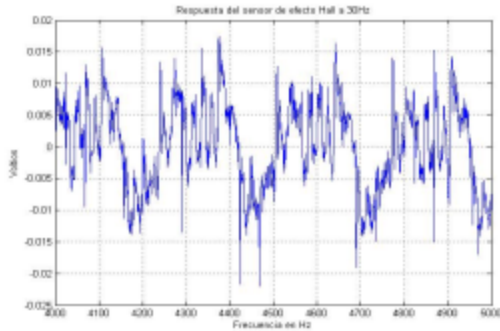


Fig. 11. Fotos del montaje de prueba

En la fig. 12 se muestran los resultados de la toma de corriente con el sensor de efecto Hall a través del analizador de potencia y con la adquisición de datos a través del computador portátil.



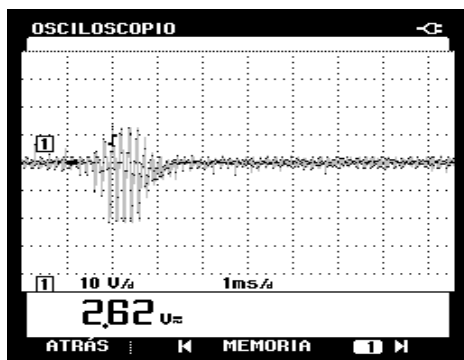
a. Señal de corriente con sensor Hall, tomada con el analizador digital.



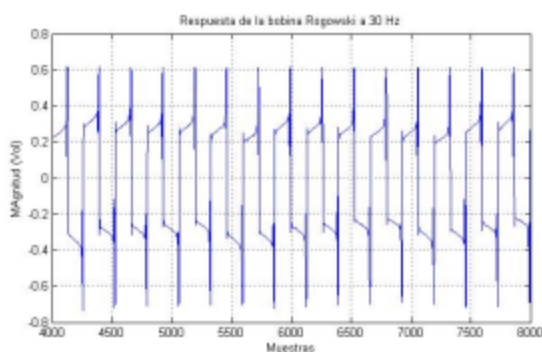
b. Señal de corriente con sensor Hall, tomada desde Matlab con el PC

Fig. 12. Toma de señal de corriente con sensor de efecto Hall

En la figura 13 se muestra el comportamiento de la bobina Rogowski por la misma prueba anterior.



a. Señal de corriente con bobina Rogowski, tomada con el analizador digital



b. Señal de corriente con sensor Hall, tomada desde Matlab con el PC

Fig. 13. Toma de señal de corriente con bobina Rogowski

## 6. CONCLUSIONES

Analizando los resultados obtenidos en la figura 10, se puede decir que:

- La rampa de velocidad no se ve afectada por la perturbación. Ya que el sistema mecánico es un sistema de primer orden que se comporta como un filtro mecánico pasa bajas.
- El flujo y la corriente presentan pequeñas deformaciones producidas por la fuente de ruido.
- La corriente presenta ondulaciones propias de las sondas de medida (sensores). Estas ondulaciones son muy perjudiciales ya que introducen vibraciones indeseadas en el conjunto motor-carga.
- El Par aquí si se ve seriamente afectado, estas fuertes ondulaciones del Par se ven reflejadas en el sistema mecánico. (eje, carga, anclaje, etc.), y pueden llegar a ser muy perjudiciales puesto que pueden destruir ejes, acoples, cojinetes e incluso la misma carga.

La implementación de controladores de Par, Velocidad y Flujo para motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla, es necesaria dados los diferentes procesos industriales donde éstos intervienen. La dinámica del motor de inducción es muy compleja, por lo que llevar su comportamiento dinámico a sistemas simples para control es una prioridad de la ingeniería moderna de control.

Se asume el modelo matemático del motor en coordenadas del estator, con un estudio separado de las ecuaciones eléctricas y mecánicas y la interpretación de las transformaciones  $[\alpha\beta0]$  y  $[dq0]$ . Para esta implementación se utilizó como herramienta de análisis y simulación, Matlab® y Simulink® de la Mathworks Inc.

Una conclusión relevante en el desarrollo del presente trabajo es la importancia que se le debe dar a los métodos de medición de corriente utilizando la bobina Rogowski, ya que se ha demostrado la linealidad y eficacia que presenta a la hora de medir corrientes. [4], [5] y [7]. También se pudo concluir que la medida de voltaje no representa ningún riesgo para el buen funcionamiento del sistema de control y que la mayoría de los fabricantes de estos equipos, utiliza el archiconocido divisor de voltaje resistivo.

**REFERENCIAS**

- [1]. P. M. Álvarez. Convertidores de frecuencia controladores de motores y SSR, pag. 89 a 92, Marcombo. 1998. ISBN: 8426712681
- [2]. A. Pardo y J. L. Diaz. Aplicaciones de los convertidores de Frecuencia, estrategias PWM. Primera edición 2004. ISBN: 598-33-6768-0. Pamplona Norte de Santander. Colombia.
- [3]. I. Barbi. Teoría Fundamental del Motor de Inducción.
- [4]. C. R. Hewson, W F Ray and J Metcalfe. "Optimising high frequency integrator operation of rogowski current transducers". IEEE Transaction on power electronics measurements Ltda. 164 Lower Regent Street, Beeston Nottingham, UK.
- [5]. F. García, Instrumentación aplicada a la ingeniería; Transductores y medidas mecánicas, E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos, UPM 1987.
- [6]. I. Takahashi and T. Noguchi. A new quick response and high efficiency control strategy of and induction motor. IEEE Trans. Industry appl., 22:820-827, 1986.
- [7]. J. D. Douglass, J. B. Greenly, D. A. Hammer, B. R. Kusse, R. D. McBride and S. A. Pikus. "Desing and use of small Rogowski coils for use with large, fast current pulses" Laboratory for plasma studies, 369 Upson Hall, Cornell University Ithaca, NY 14853, USA.
- [8]. J. Quevedo Ruiz. "Medida de corriente eléctrica con efecto Hall". Bogotá D.C. Colombia, Marzo De 2007. Dirección de contacto: jrqueve\_\_@gmail.com
- [9]. W. Leonhard. Control of electrical drives. Springer-Verlag Berlín Heidelberg New York. segunda revision. 1996. ISBN: 3-540-59380-2
- [10]. M. Bertoluzzo, G. Buja, and R. Menis. Analytical formulation of the direct control of induction motors drives. IEEE – Int. symp. Industrial Electronics, pages 14 – 20, Bled, Slovenia, 1999.
- [11]. Moustafa Azab, Mohamed Ahmed. Estudio y realización del control directo del par (DTC) para accionamientos de motores de inducción con inversores de diferentes topologías. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Catalunya, septiembre, 2002.
- [12]. Andrickson Mora, José A. y Chacón Rugeles, Rafael. Instrumentación Electrónica. Universidad Nacional Experimental del Táchira, 2005.
- [13]. Mujal Rosas, Ramón Ma. Motor asíncrono trifásico con rotor de chapas en espiral. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Catalunya, abril, 2004.