

**FIELD ORIENTED VECTOR CONTROL OF AN INDUCTION MOTOR WITH
AN ADAPTABLE FUZZY LOGIC CONTROLLER APPLIED TO MACHINES
TOOL****CONTROL VECTORIAL POR CAMPO ORIENTADO DE UN MOTOR DE
INDUCCIÓN CON REGULADOR FUZZY ADAPTABLE APLICADO A LAS
MÁQUINAS HERRAMIENTA**

PhD. Aldo Pardo García, MSc. Jorge Luis Díaz Rodríguez

Universidad de Pamplona

Ciudadela Universitaria, Pamplona, Colombia

Tel: 57-7-568 5303, Fax: 57-7-5685303 Ext. 156

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

Abstract: This paper deals with the main characteristics of the indirect field oriented vector control are enunciated, with the power stage, taking into account the parameters variation. In addition, the application of such a application to the machines tools is analyzed by means of the computer simulation, with the objective to obtain a smooth and accurate speed regulation by means of the application adaptable a Fuzzy Logic Controller

Resumen: En este trabajo se enuncian las características fundamentales del control vectorial por campo orientado indirecto, con la etapa de potencia, tomando en cuenta la variación de parámetros. Además se analiza su aplicación a las máquinas herramientas mediante la simulación, con el objetivo de obtener una regulación suave y precisa de la velocidad mediante la aplicación un regulador Fuzzy adaptable.

Keywords: Induction Motor, Vector Control, Field Oriented Control, Adaptive Control, Fuzzy Logic, Fuzzy Logic Controllers, Machine Tools

1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de los motores eléctricos son utilizados en aplicaciones comunes, o sea, ellos operan en velocidades constantes sin cualquier tipo de control de par o velocidad. Sin embargo, el proceso de automatización industrial viene exigiendo, cada vez más, la aplicación de motores eléctricos en sistemas de accionamiento, o sea, en aplicaciones que exigen algún tipo de control del par, aceleración, velocidad o posición.

La aplicación de los motores eléctricos en sistemas de accionamientos puede ser considerada de bajo desempeño (accionamientos convencionales) o de alto desempeño (servomecanismos). Algunos aplicaciones típicas de estos últimos son las máquinas herramientas, robots industriales, sistemas de posicionamiento, líneas de transporte, manipuladores industriales, alimentadores de máquinas y esteras transportadoras

1. CONTROL VECTORIAL POR CAMPO ORIENTADO INDIRECTO.

En los esquemas de control indirecto no se va a medir la posición del vector espacial de flujo de rotor, ni a estimarla mediante un modelo de flujo, sino que se va a obtener a partir de la posición o velocidad del rotor y de las referencias de corriente proporcionadas por el control. Va a ser necesario por tanto un sensor de posición o de velocidad de una precisión relativamente elevada

El deslizamiento w_{sl} se va a estimar no a partir de variables realimentadas, sino a partir de las variables de referencia de flujo i_{ds}^{ref} y de par i_{qs}^{ref} .

Una vez obtenido el deslizamiento, la obtención del ángulo de desacoplo es inmediata. La figura 1 muestra el proceso de cálculo.

El cálculo del deslizamiento a partir de las referencias de corrientes, se obtiene:

$$\lambda_r(s) = \frac{L_m}{1 + \tau_r s} i_{ds}(s) \quad (1)$$

y dado la relación del deslizamiento

$$w_{sl} = \frac{L_m i_{qs}}{\tau_r \cdot \lambda_r} \quad (2)$$

donde se obtiene:

$$w_{sl} = \frac{L_m i_{qs}}{\tau_r \cdot \lambda_r} = \frac{1}{\tau_r} \frac{i_{qs}}{i_{ds}} (\tau_r s + 1) \quad (3)$$

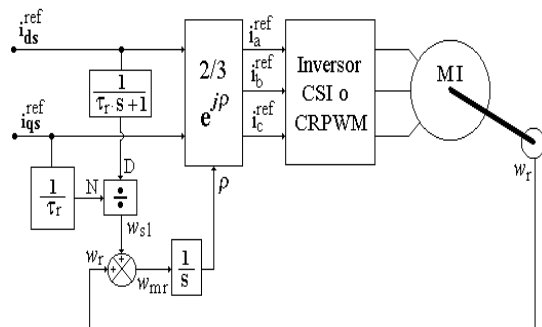


Fig 1: Obtención de la posición del vector espacial de flujo de rotor con control indirecto.

Los controles indirectos han alcanzado una gran difusión debido a su simplicidad, al necesitar solamente el sensor de velocidad o de posición. Sin embargo, el hecho de no realimentar otras variables, realizando la orientación del flujo de rotor en lazo abierto, les hace especialmente sensibles a errores en los parámetros del motor, principalmente la constante de tiempo del rotor τ_r .

Siendo notable, de forma general, el esfuerzo de investigación desarrollado en la identificación y adaptación de parámetros (Briz, F. *Control*, 1995, Cox, A., February 1991, Nuez Amador, M.V, 1998 y Vas, P, 1990).

El inversor va a ser el encargado de generar, a partir del voltaje suministrado por el rectificador, voltajes en general sinusoidales de amplitud y frecuencia variable. Evidentemente, en equipos de potencia, no es posible la utilización de semiconductores en zona de potencia lineal, sino que habrá de trabajar como interruptores. A la hora de diseñar el inversor se van a plantear dos problemas, aunque con una conexión evidente: *La elección de la etapa de potencia y la estrategia de control* (Bascopè, R.T and Perin, A.J, O, 1997, Bose, B.K.1986 y Nuez Amador, M.V, 1998)

La teoría de control en campo orientado definía un sistema de ejes dq , una de cuyas propiedades era que, al proyectar sobre los ejes dq , vectores espaciales de corrientes, voltajes y flujos, las componentes obtenidas eran magnitudes constantes en estado estable. El control con reguladores sincrónicos se basa en la utilización de este sistema de ejes para controlar el inversor. Esto va a eliminar el problema de la dependencia de su comportamiento con la frecuencia.

3. EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE PARÁMETROS.

El control por campo orientado indirecto es ventajoso frente al directo, por el hecho de que no necesita de la medición o estimación de la posición angular del flujo del rotor. Esto le asegura mayor simplicidad de implementación además, incluso menor costo.

La orientación del flujo del rotor se asegura por el cálculo de deslizamiento a partir de las componentes del par y flujo de la corriente del estator. Este cálculo involucra los parámetros de inductancia y resistencia del rotor que varían en función, principalmente, de la saturación del medio magnético y de la temperatura del rotor, respectivamente(Briz, F. *Control*, 1995, Wisconsin, Madison, 1996, Nuez Amador, M.V, 1998 y Vas, P, 1990). La dependencia de estos parámetros constituye la mayor deficiencia del control por el campo orientado indirecto. La búsqueda de soluciones para este problema es motivada por las ventajas que este método presenta sobre el directo, destacándose lo antes dicho y por el hecho de que el método directo también es dependiente de ciertos parámetros del motor.

Este análisis de los efectos de la variación de estos parámetros que introduce en el desempeño del control por campo orientado indirecto del motor de inducción. El análisis es conducido por la formulación de las respuestas del par y flujo cuando se supone que no hay conocimiento real de estos parámetros. Son considerados separadamente los casos con y sin regulación de velocidad. En ambos casos, el análisis es dividido en las situaciones de estado estable y de estado transitorio.

4. SISTEMAS FUZZY TIPO TAKAGI-SUGENO.

En el sistema fuzzy T-S el consecuente de las reglas de producción, en lugar de un término lingüístico, es una función numérica. Estas reglas de producción tienen la forma general:

$$r_1 : IF (x \text{ es } A^1) THEN (w^1 = g_1(x)) \quad (3)$$

N

$$r_q : IF (x \text{ es } A^q) THEN (w^q = g_q(x)) \quad (4)$$

La regla i -ésima calcula directamente la salida asociada, $w^i(x)$, al conjunto de entrada fuzzy multivariable A^i . (Un ejemplo común de $w^i(x)$ es cuando representa un mapeo lineal, es decir, $w^i = w_0^i + w_1^i x_1 + \dots + w_n^i x_n$). La regla i -ésima expresa que, el grado de pertenencia de la salida del sistema a la salida asociada i -ésima, es igual al grado de pertenencia de a entrada al conjunto fuzzy multivariable de entrada A^i correspondiente. A la salida se obtiene entonces un conjunto fuzzy discreto (Cox, A., February 1991, Preiss, E, Mar. 1991., Wang, .Li-Xin. , 1994). Para obtener la salida de la base de reglas, se emplea el algoritmo de defuzzificación del centro de gravedad, y para una entrada *singleton*, se obtiene:

$$y(x) = \frac{\sum_{i=1}^q \mu_{A^i} w^i}{\sum_{i=1}^q \mu_{A^i}} \quad (5)$$

Un sistema fuzzy adaptativo es un sistema fuzzy equipado con un algoritmo de aprendizaje (Passino, K.M, USA 1998 y Li-Xin. , 1994). Una ventaja de un sistema de control fuzzy es su capacidad de incorporar información de los operadores humanos, esto es especialmente importante en sistemas con alto grado de incertidumbre

Sea $f(x)$ una función suave arbitraria definida en el conjunto compacto X . Si se expresa $f(x)$ en términos del sistema fuzzy se tiene:

$$f(x) = z^T A^* \zeta + d(x) \quad (6)$$

donde $d(x)$ es el error de aproximación que se comete cuando $f(x)$ se representa con el sistema

fuzzy y A^* es la matriz que minimiza tal error. Para alterar la base de reglas, se escogen a los elementos de la matriz A como los parámetros ajustables del “estimador” fuzzy. En estas condiciones, los elementos de la matriz A^* están dados por la expresión:

$$A^* = \arg \min \left[\sup_{x \in S_x} |z^T A \zeta - f(x)| \right] \quad (7)$$

Para realizar el Fuzzy adaptable se usa un estimador fuzzy, constituido por un sistema fuzzy Takagi-Sugeno. Está constituido por 6 reglas,

$$\begin{aligned} r_1 : IF e \text{ es bajo} AND \zeta \text{ es baja} THEN w^1 = g_1(x) \\ r_2 : IF e \text{ es medio} AND \zeta \text{ es baja} THEN w^2 = g_2(x) \\ r_3 : IF e \text{ es alto} AND \zeta \text{ es baja} THEN w^3 = g_3(x) \\ r_4 : IF e \text{ es bajo} AND \zeta \text{ es alta} THEN w^4 = g_4(x) \\ r_5 : IF e \text{ es medio} AND \zeta \text{ es alta} THEN w^5 = g_5(x) \\ r_6 : IF e \text{ es alto} AND \zeta \text{ es alta} THEN w^6 = g_6(x) \end{aligned} \quad (8)$$

5. MÁQUINAS HERRAMIENTAS.

Se considera control numérico todo dispositivo capaz de dirigir posicionamiento de un órgano mecánico móvil, en el que las ordenes relativas a los desplazamientos del móvil son elaborados en forma totalmente automática a partir de informaciones numérica definidas, bien manualmente (funcionamiento semiautomático) o por intermedio de un programa (funcionamiento automático)

(Quesada, A.M. Vázquez. R.F, 1990).

El primer intento para dotar a una máquina herramienta de algún tipo de control fue el desarrollo por Jacquara Loom, que en 1801 ideó una máquina textil que permite realizar distintos tipos de tejidos sin más que variar un programa facilitando a la máquina mediante tarjetas

perforadas.

El primer intento serio para obtener un verdadero control numérico lo motivó la necesidad de fabricar hélices de helicóptero de diferentes configuraciones y fue realizado por la compañía Parsons que ya fabricaba diversos equipos para la defensa.

A. 5. ARQUITECTURA GENERAL DE UN CONTROL NUMÉRICO

Entrando en la propia arquitectura de los equipos de control, podemos distinguir cuatro subconjuntos funcionales:

1. Unidad de entrada- salida de datos.
2. Unidad de memorización e interpretación de órdenes.
3. Unidad de cálculo.
4. Unidad de enlace y servomecanismo.

Estos se muestra en la siguiente figura.

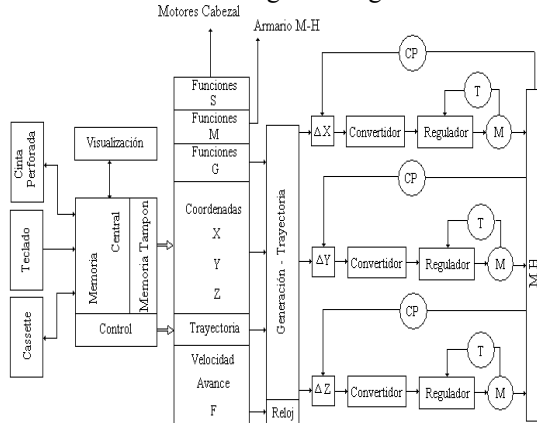


Fig 2: Diagrama general de la Máquina Herramienta.

A la hora de diseñar físicamente el sistema de control, el elemento fundamental va a ser el procesador digital. Las características de éste van a condicionar, probablemente más que cualquier otro factor, las prestaciones finales obtenidas.

Entre las distintas opciones existentes, los PC, los microcontroladores y los DSP (Bose, B.K.1986, Leonhard, W, 1985, Nuez Amador, M.V, 1998 y Preiss, E, Mar. 1991), el tipo de procesador a utilizar es lo que introduce una diferencia importante desde el punto de vista económico, matizando que a menudo la frontera entre los dos últimos no está claramente definida.

En general, podríamos decir que los microcontroladores presentan la ventaja de un hardware mejor adaptado al control de proceso, incorporando dentro del chip prácticamente todos los periféricos necesarios- conversores A/D – D/A ,

puertos, temporizadores, memoria, etc. Existen además modelos adaptados a distintas aplicaciones, con *hardware* específico, como pueden ser sistemas de modulación PWM trifásicos. Sin embargo, el hecho de trabajar con un máximo de 16 bit en formato entero los hace inadecuados en aplicaciones donde se necesita una potencia de cálculo elevada. El escalado de variables necesario al no disponer de coma flotante complica el proceso de desarrollo de los programas y puede provocar serios problemas de sobrepasamiento *-overflow-* o de potencia de precisión al cambiar parámetros del proceso o del control.

Frente al microcontrolador, el DSP presenta la ventaja de su potencia de cálculo. Aunque, en general, el control de proceso no es el campo en el que se obtiene mayor rendimiento de sus características (modos de direccionamiento especiales, instrucciones en paralelo...) la constante disminución de su precio hace que sean cada vez más utilizados. Presentan el inconveniente, frente a los microcontroladores, de un hardware menos adaptado al control de procesos. Esto va a implicar el uso de más elementos externos, lo que implica el diseño y a menudo reduce las prestaciones (sobrecarga de buses externos, problemas de sincronización).

Dentro de los DSP en coma flotante, las diferencias entre distintos fabricantes en cuanto al hardware que incorporan, el juego de instrucciones y modos de direccionamiento es relativamente pequeño. un pequeño repaso en el campo del control de motores que utilizan DSP en coma flotante pudiera ser el DSP TMS320C30 de *Texas Instruments*, el DSP 56001 de *Motorola*, el DSP ADSP2101 de *Analog Devices* en el cual se basa el cálculo del algoritmo del control vectorial para nuestra aplicación. En este caso el fabricante aconseja incorporar un microcontrolador o coprocesador, el ADMC 201. De esta manera el Hardware del sistema diseñado queda como se muestra en la figura 3.

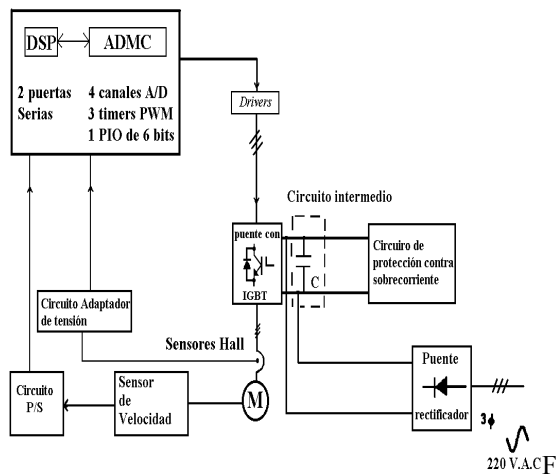


fig. 3: Hardware del Sistema de Control

Los accionamientos de alto desempeño, usando motores de CD, son usualmente implementados con “chopper” de alta frecuencia, con reglamentación de corriente, para controlar la corriente de armadura. Y análogo para motores de inducción con inversores por PWM, de alta frecuencia, con reglamentación de corriente (Bascopé, R.T and Perin, A.J, O, 1997, Briz, F. *Control*, 1995, Leonhard, W, 1985, Nuez Amador, M.V, 1998 y Díaz Rodríguez, J. L. , 2000).

Este inversor posee las ventajas de dos inversores como fuente de tensión en cuanto a su desempeño dinámico y las ventajas del inversor como fuente de corriente en cuanto a su robustez. Otra ventaja de este inversor es la simplificación del control cuando se eliminan las ecuaciones correspondiente a las tensiones de alimentación de la máquina. Por otra parte el control de los motores eléctricos con fuente de alimentación variable, utilizando los interruptores semiconductoras que operan a alta frecuencia ofrecen una serie de ventajas: la reducción de peso y el volumen del sistema de potencia, el aumento de la limite de frecuencia del control (velocidad de respuesta), la disminución de generación de armónicos de baja frecuencia. En el caso del motor de inducción una frecuencia de 4 kHz es suficiente, aunque se aconseja trabajar con mayor de 20 kHz para evitar los ruidos audibles.

Para vencer las limitaciones de los interruptores de potencia descritos anteriormente, contando con sus ventajas: capacidad de corriente de colector(característica del transistor bipolar) y el control por tensión aplicada entre el gate – emisor (característica del MOSFET), surgió un dispositivo híbrido que se denomina IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Este dispositivo pertenece a la familia de dispositivos bi- MOS, siendo

actualmente el más avanzado en tecnología disponible y el más utilizado comercialmente por las características indicadas a seguir.

B. 6.RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.

Para la elaboración del programa, se determinó que el modelo motor se expresaría en coordenadas sincrónicas, ya que las variables son componentes de CD. Por otra parte se escogieron como variables a controlar las componentes en los ejes d y q de la corriente del estator, debido a que son las causantes del flujo del rotor y el par electromagnético, respectivamente. Además, para el esquema en lazo cerrado, se ha tomado como referencia la velocidad, que es medible mediante el encoder que esta acoplado directamente al eje del motor, tal como se ha dicho anteriormente, el objetivo fundamental del sistema de control del motor va a ser, por una parte, mantener constante la velocidad de funcionamiento del motor ante variaciones en la carga, y por otra parte, obtener la máxima rapidez de respuesta en los transientes entre dos puntos de funcionamiento, cumpliendo ciertos requisitos preestablecidos en cuanto al tipo de respuesta (sobreoscilación máxima, tiempos de respuesta).

Assumiendo una correcta sintonización del modelo del motor y por tanto un desacoplo efectivo entre las ramas de flujo y de par, el control de la velocidad se va a realizar mediante el regulador fuzzy adaptable, mientras no se entre en la región de debilitamiento de campo, únicamente a través de la corriente de par i_{sq} , tal como se muestra en la siguiente figura.

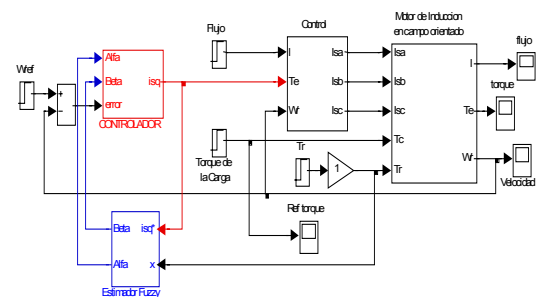


Fig 4: Esquema de simulación del control por campo orientado con regulador fuzzy adaptable

En la figura 5 la respuesta de la velocidad es de primer orden y es estable sin oscilaciones ninguna gracia a la perfecta sintonía del regulador fuzzy adaptable, donde esta respuesta responde igual a la referencia con el mínimo error, de forma semejante el flujo y el par, aunque este último contiene armónicos, tal como se esperaba, por lo habíamos

detallado anteriormente.

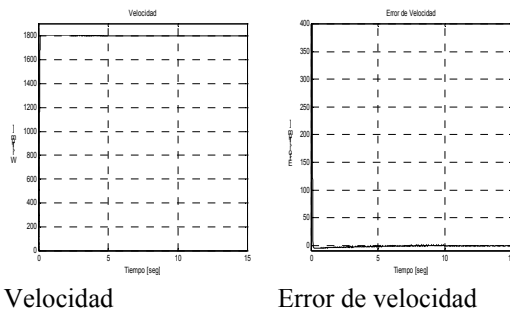


Fig 5: Resultados de la simulación para una velocidad de referencia de 1800 rpm.

El interés en la adaptación de parámetros del motor de inducción surge del interés en asegurar el desempeño del control por campo orientado, independientemente de las variaciones ocurridas en los parámetros del motor. Así, el comportamiento deseado para el motor de inducción es el obtenido cuando está bajo la orientación del campo. Esta es la operación que debe ser reflejada por el control adaptable.

De esta manera el controlador Fuzzy adaptable se encarga de la estimación de la variación de la constante de tiempo del rotor τ_r , debido a que su variación afecta la respuesta del par y flujo y la inercia del motor, etc., por lo tanto varíe el comportamiento dinámico del sistema.

El controlador Fuzzy adaptable tiene la capacidad del auto ajuste automático de sus parámetros tal como la ganancia, mediante la modificación de su base de reglas.

El estimador Fuzzy va estar condicionado por la precisión de τ_r , tal como se muestra en la figura 6, donde el controlador Fuzzy adapta la velocidad de forma igual la referencia con variaciones de τ_r de 50% por arriba y por debajo de su valor nominal. Las respuestas de flujo y del par se mantuvieron igual al caso anterior, lo que prueba el buen ajuste del regulador Fuzzy adaptable y su superioridad a los controladores convencionales ante la variación de parámetros, aunque en algunas ocasiones los controladores convencionales superan los controladores Fuzzy adaptables y Fuzzy convencionales por la rapidez de respuesta, razón por su implementación física donde se requiere la utilización de sistemas de gran potencia de cálculo como es el caso de los DSPs.

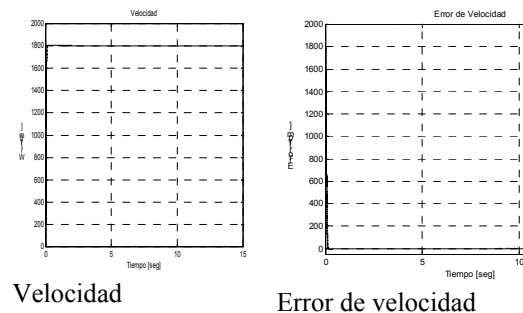


Fig 6: Resultados de la simulación para una variación de la constante de tiempo rotórica

C. 7.CONCLUSIONES

1. Fue descrita la estructura general de una máquina herramienta que emplea el CNC, los mínimos requerimientos para el control de este tipo de máquinas. También fue presentado los esquemas del control con la selección del DSP2101 y el microcontrolador ADMC201, el inversor PWM con los *drivers*, los interruptores de potencia IGBT, etc. Los requerimientos del sistema a controlar para ser un sistema de uso universal.
2. El análisis anterior fue hecho para la máquina herramienta descrita anteriormente, en la cual se sustituyó el motor de CD, por un motor de jaula de ardilla de igual potencia. Trayendo consigo un grupo de ventajas debido al aumento de la precisión y a la superioridad de los motores de inducción sobre los de motores de CD. Ya que hoy en día las máquinas herramientas son una parte impredecible de una fábrica moderna para cumplir con las exigencias y la competencia del mercado.
4. Un motor de inducción con variador de velocidad vectorial basado en el esquema indirecto y un controlador Fuzzy adaptable cumple perfectamente con las exigencias del sistema a controlar, tal como se muestra en la simulación presentada anteriormente. Donde se hizo un estudio de los posible casos que pueden suceder en el proceso a controlar como el funcionamiento a velocidades bajas o el funcionamientos con velocidades por encima de la nominal, casos que en la producción no son de este manera debido a que las máquinas herramientas casi

siempre operan a velocidades nominales, y la variación de la constante de tiempo del rotor. En este caso el controlador Fuzzy adaptable mantuvo la velocidad igual a la referencia, compensando así las variaciones presentadas en el sistema.

REFERENCIAS

- Aparicio, J.L. 1987, Criterios de Diseño de Convertidores Estáticos para Accionamientos Regulados en Corriente Alterna con Motores de Inducción. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo.
- Bascope, R.T and Perin, A.J, O, 1997. transistor IGBT aplicado em eletrônica de potência, Brazil
- Bose, B.K.1986.. Power Electronics and AC drives, Prentice-Hall, NJ.
- Briz, F. Control, 1995 Vectorial del Motor de Inducción con Identificación y Adaptación a los Parámetros de la carga. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo.
- Cox, A., February 1991 Adaptive Fuzzy systems, IEEE Spectrum.
- Wisconsin, Madison, 1996.,Field Orientation and High Performance Motion Control, WEMPEC, University of Wisconsin-Madison, Summary of Publications1981-1988,
- Leonhard, W, 1985. Control of Electrical Drives. Spring-Verlag.
- Nuez Amador, M.V, 1998. Simulación y control del Motor de Inducción por Campo Orientado. Tesis de Doctorado, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de la Habana.
- Passino, K.M, USA 1998. Adaptive Fuzzy Control.
- Preiss, E, Mar. 1991. "A 16 bit application-specific microcontroller for three-phase inverter control". Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM), pp. 69-73.
- Quesada, A.M. Vázquez. R.F, 1990. Datos de los certificados técnicos de las máquinas herramientas. Parte 1.
- Díaz Rodríguez, J. L. , 2000, Control por campo orientado del motor de inducción con adaptación de parámetros por modelo de referencia, Tesis de Maestría, UCLV.
- Vas, P, 1990. Vector Control of AC Machines. Oxford University Press.
- Wang, Li-Xin. , 1994. Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis. PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.