

CONTROL VECTORIAL SIN SENSOR DE VELOCIDAD EN LA MÁQUINA DE SECADO - CMPC CELULOSA SANTA FE

Nelson Aros

Marcela Aros

Universidad de La Frontera, Departamento de Ingeniería Eléctrica

Av. Francisco Salazar 01145 (4811230), Temuco – Chile

Abstract

The current state of the drying machine is that it has a Rockwell drive system. This system requires the measurement of the speed of the machine, which uses encoder (drive external components to Rockwell). The operation is performed by the Vector Control Concept for induction machines, to have a dynamically variable speed drive acceptable.

The Vector Control requires determining the angular position around the time it used to measure the speed of the encoder. These elements have a measurement failure rate of no less under certain assumptions the delicate assembly. These failures, over time, impact on production causing unexpected arrests. Considering that the life of the encoder is 3 years, equivalent to 30,000 hours of continuous use, you can think of all the change in plant shutdowns. Before the exchange option, we studied the strategy of vector control invasive sensor. This study leads to the feasibility of the change of strategy, in particular to increase reliability and reduce costs for lost production.

Keywords: *vector control, measurement system, sensorless drive*

Resumen

Actualmente, la máquina de secado cuenta con un sistema de control para su accionamiento denominado Rockwell. Este sistema requiere la medición de la velocidad de la máquina para su funcionamiento, la cual utiliza varios sensores de velocidad o 'encoder' (componentes externos al accionamiento Rockwell). El accionamiento se realiza mediante del Concepto de Control Vectorial para Máquinas de Inducción, así se obtiene un accionamiento de velocidad variable dinámicamente aceptable.

El Control Vectorial requiere determinar la posición angular en todo el momento, sin embargo, los elementos de medida presentan una tasa de fallas alta bajo ciertas consideraciones, debido a su delicado montaje. Estas fallas impactan sobre la producción, ya que provocan detenciones inesperadas. Si se considera que la vida útil de los encoder es de 3 años, equivalente a 30.000 horas de uso continuo, se puede pensar en el cambio de todos ellos en las paradas de planta. Este trabajo presenta una alternativa de control vectorial sin sensores invasivos, de modo de evitar el cambio de los sensores en fallas; con el objetivo de incrementar la confiabilidad del accionamiento y reducir los costos de mantenimiento, además aumentar la productividad del proceso.

Palabras clave: *control vectorial; sistema de medición; sin sensores invasivos*

1. Introducción

Actualmente la máquina de secado de CMPC Celulosa, Planta Santa Fe – Nacimiento, cuenta con un sistema de accionamiento Rockwell; el cual requiere la medición en tiempo real de la velocidad de la máquina, para este fin utiliza varios transductores de velocidad (encoder, componentes externos al accionamiento Rockwell), que son muy sensibles.

El accionamiento se realiza mediante del Concepto de Control Vectorial para Máquina de Inducción, para tener un accionamiento de velocidad variable dinámicamente aceptable. Este control requiere la posición angular en todo el momento para orientar el vectorialmente las corrientes del estator -para ello utiliza la medición de la velocidad del encoder.

Estos elementos de medida presentan una tasa de fallas alta bajo ciertas consideraciones debido a su delicado montaje. Estas fallas, en el transcurso del tiempo, impactan sobre la producción provocando detenciones inesperadas (entre una a dos veces en el año). Si se considera que la vida útil de los encoder es de aproximadamente de 3 años, lo que equivale a 30.000 horas de uso continuo, se puede pensar en el cambio de todos ellos en las paradas de planta (anualmente).

Antes de realizar la opción de intercambio, se estudió el análisis de la estrategia de control vectorial sin sensor invasivos. Este estudio permitió analizar la factibilidad del cambio de estrategia; en lo específico incrementar la confiabilidad y reducir los costos por pérdida de producción.

De acuerdo, a los datos de planta, cada detención por falla del sensor es de 2 a 3 horas. La producción/día es de 2.670 [Ton]. El Precio de Venta es aprox. 900 [US\$/Ton]; con un Costo de Producción 300 [US\$/Ton]; esto implica que la Empresa margina una ganancia de 600 [US\$/Ton]. Así, el impacto del problema se puede plantear como: En CMPC CELULOSA en la máquina de secado produce como promedio mensual 2.670 [Ton/día], equivalente a una producción de 112 [Ton/h]; a consecuencia de una falla, de una parada de 3 horas por problemas de encoder ocasiona una pérdida de producción de US\$200.250 por cada detención.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

- Diseñar una estrategia de control vectorial sin sensor de velocidad, para la máquina de secado de Planta Santa Fe – Nacimiento; con el propósito de reducir los costos por pérdida de producción y por ende, un aumento en la disponibilidad y confiabilidad del accionamiento, como una contribución a los aumentos de producción proyectados para el futuro.

2.2 Objetivos Específicos

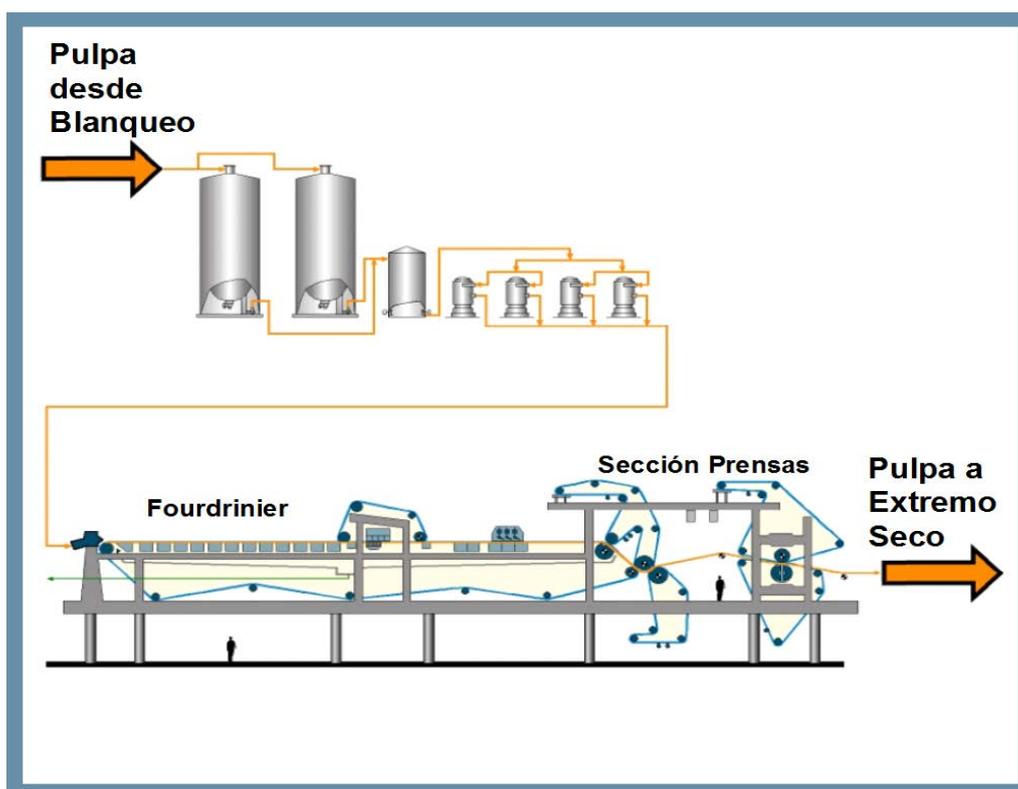
- Diseñar un modelo de inferencia para la máquina de inducción para el control vectorial sin sensor de velocidad.
- Evaluar vía simulación la propuesta del control vectorial sin sensores invasivos, y comparar con su análogo con sensor de velocidad.
- Evaluar el ritmo de producción con la propuesta de accionamiento sin sensores invasivos.

3. Caso de estudio

La industria CMPC CELULOSA - Planta Santa Fe, ubicada en la localidad de NACIMIENTO, dispone de dos líneas de producción, designadas como línea 1 y línea 2. La línea 2 fue puesta en servicio el año 2007, con una producción de 2.670 toneladas de celulosa por día.

El propósito del área de máquina es limpiar y clasificar la fibra para fabricar una hoja de celulosa, ver figura 1. Para esto se transporta la pulpa de celulosa al formador de hoja, de doble tela; posteriormente la hoja es prensada, con lo cual se logra una sequedad alta en la hoja; luego envía al secador Fläkt.

Figura 1: Esquema del proceso de la celulosa – Área Máquina Extremo Húmedo



La máquina de secado Fläkt -ver figura 2- tiene como función obtener una hoja de celulosa seca a un 90%ADT. Luego, la hoja es enviada al área de embalaje, donde es cortada para formar los fardos de celulosa.

El secador posee 26 máquinas de corriente alterna para llevar la hoja de celulosa continua a través de su interior para su secado. La alimentación eléctrica se obtiene desde un transformador de 13,2 KV/690V, con corriente nominal de 2 [KA], llegando a dos barras en paralelo, en cada una de estas barras se encuentra un puente rectificador trifásico; a partir de éstos se obtiene: una barra de tensión continua de 923 [Vdc] que alimenta a 14 variadores de frecuencia (modelo PowerFlex 700S) y otra de barra de tensión continua de 648 [Vdc] que alimenta 12 variadores de frecuencia (modelo PowerFlex 700), la salidas de estos variadores alimentan a los motores AC trifásico de 690 [V] y 400 [V], respectivamente. Cada uno de los motores tiene acoplado un encoder a su eje, cuya salida es de 1024 pulsos/revolución (incremental-decremental) y es alimentado con 12 [Vdc] desde el variador.

El sistema de control consta de un sistema maestro, dado a través del accionamiento del motor del polín de la tela inferior (Master), ver figura 3, y un control de razón para los polines accionados en la zona de formación de la hoja (prensa principal, ver figura 4) y para los

polines del secador y cortadora. Así, un variador maestro (de la tela inferior), recibe los datos de operación, en cuanto a la velocidad de trabajo de la máquina (velocidad de entrada, se mide en MPM - metros por minutos), este dato llega al motor e influye en la velocidad de trabajo del motor en RPM (revoluciones por minutos), entregada por el encoder al sistema de accionamiento (específicamente, entrega la posición del eje y la velocidad). Vía un control alimentado se controla la velocidad del conjunto de motores.

Figura 2: Esquema del proceso de la celulosa – Área Máquina Extremo Seco

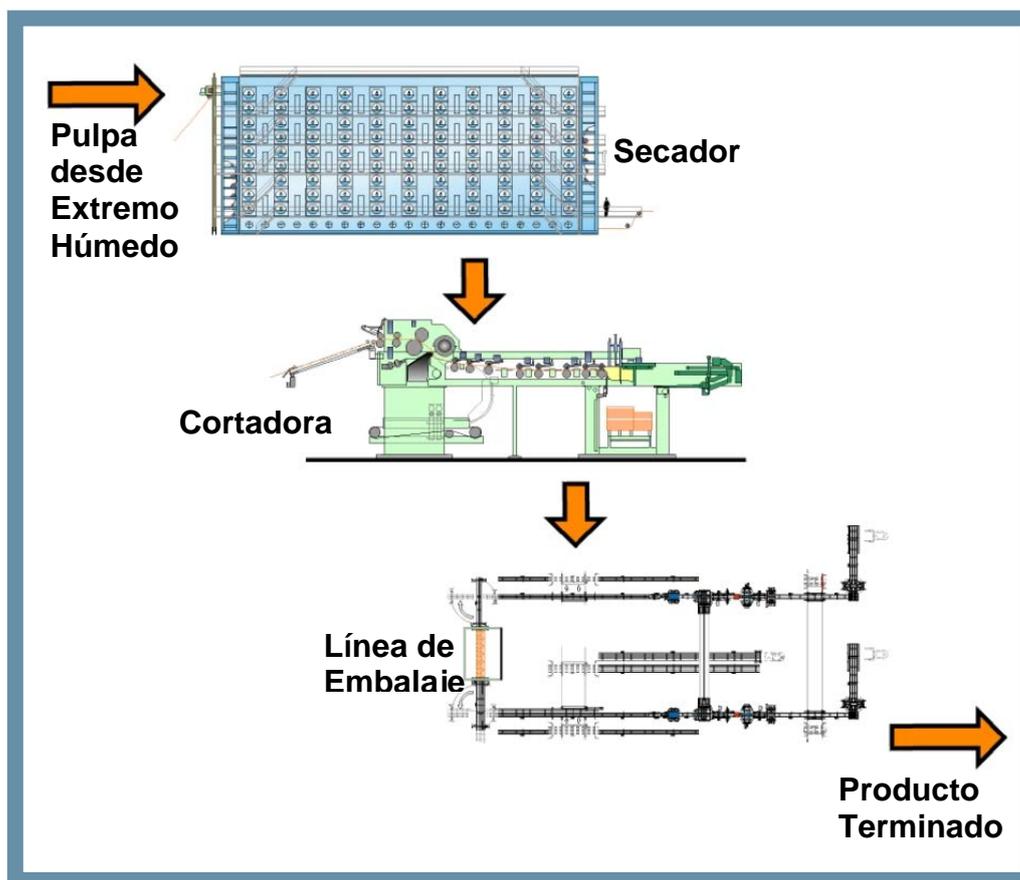
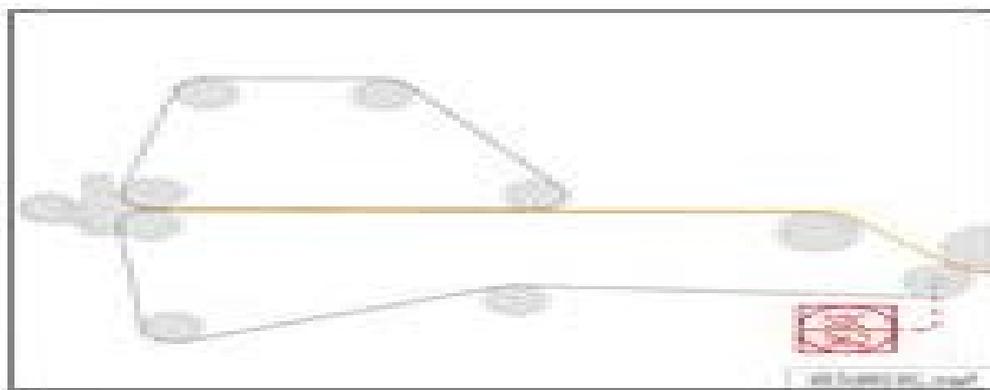
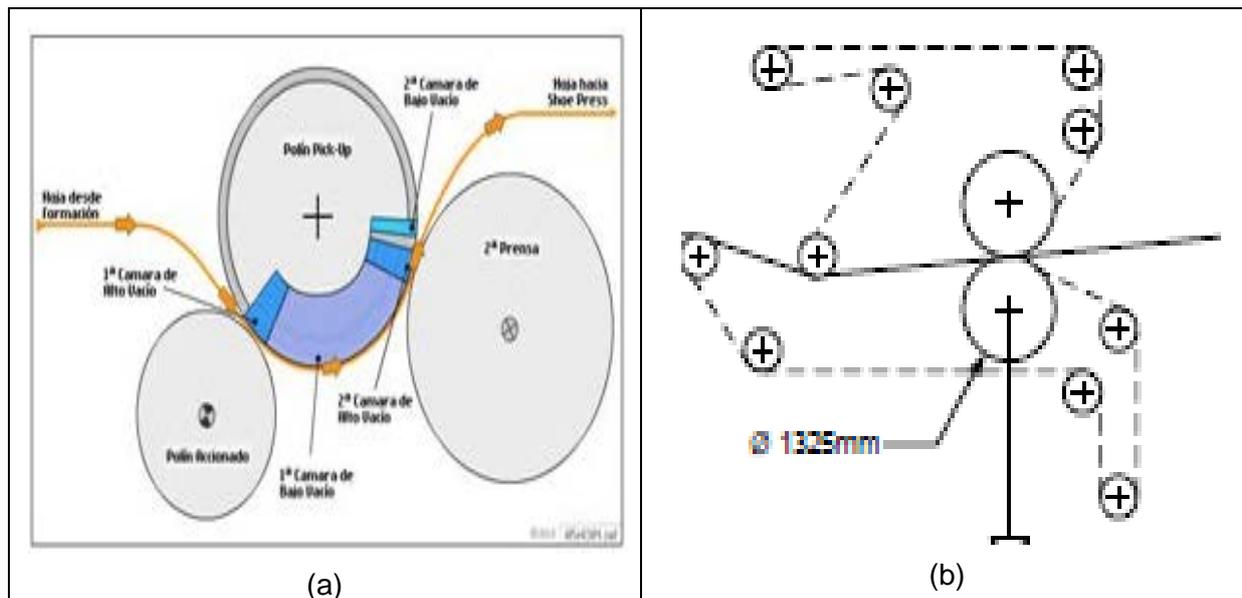


Figura 3: Polín maestro en la formación de hoja (Master)



Adicionalmente, a través del Programa Excecuive se accede a cada parámetro de los variadores (que representa la Herramienta HMI de los variadores).

Figura 4: prensas: (a) Prensa principal o Combi Press, y (b) Shoe Press



3.1 Revisión Bibliográfica

El trabajo tiene su objetivo de reducir los costos por pérdida de producción, y por ende aumentar la disponibilidad y confiabilidad del accionamiento, como una contribución a los aumentos de producción proyectados para el futuro en CMPC (Rockwell, 2010b). Además, en Rockwell (2010a) se encuentra la información estratégica del accionamiento de Máquina secado, conexión de los Drives a sus respectivos motores, los niveles de tensión que se encuentran en la máquina, del conexionado de los distintos motores, con sus respectivos polines y del sistema de control utilizado en el accionamiento de máquina.

En Weg (2007) presenta una guía para la aclaración de los principales aspectos relacionados con las aplicaciones de motores de inducción de baja tensión (hasta 690 [V] y hasta carcasas IEC 355/NEMA 587) con convertidores eléctricos de frecuencia, de manera didáctica y concisa. Particularmente, en Rockwell (2011) se encuentra información relacionada con el variador de frecuencia PowerFlex 700, su descripción, sus aplicaciones, característica de comportamiento (graficas torque/frecuencia, con y sin encoder), el software HMI, sus componentes, ventajas y desventajas. Además, en la página de Rockwell Automation se encuentran los manuales para usuario del drive PowerFlex 700 y PowerFlex 700S.

En Sixto (2004) se entrega las técnicas de control vectorial de motores de inducción tipo jaula de ardilla sin sensor de velocidad; en Garriga (2005) se encuentra información sobre el control de accionamientos integrados para máquinas alternas; y, en Navarro (2010) se encuentra diagrama de bloques de los variadores de frecuencia, los principios de funcionamiento, los tipos de carga, además una pauta para selección del variador en base a la corriente nominal del motor.

3.2 Metodología

El trabajo fue realizado en su primera etapa vía simulación, con el fin de validar la propuesta de cambio de tecnología en el accionamiento. Teniendo en cuenta el comportamiento dinámico que entregó Simulink/Matlab de los sistemas de control se puede confirmar la factibilidad de la eliminación del encoder a los respectivos motores del accionamiento; sugiriendo dejar esta propuesta como respaldo del sistema original.

Se desarrolló un simulador de la máquina principal -Motor de Inducción Trifásico- que permitió determinar vía simulación las características de funcionamiento del control vectorial con/sin sensores invasivos para determinar la velocidad de la máquina, en el proceso de la formación de la hoja de celulosa. Actualmente, se realizan pruebas en la máquina, dejando fuera los encoder de los motores desde el drive, de modo de analizar el comportamiento del modelo de inferencia. Esta prueba se realiza en la parada de área programada, siendo supervisada por personal de planta de CMPC CELULOSA tanto como del área de mantención como de operación.

En general, esta metodología se dividió en cuatro puntos relevantes, los cuales se presentan a continuación: (i) búsqueda de información relacionados con el proceso de formación de hoja de celulosa, específicamente en el accionamiento de la máquina N°2; (ii) recopilación de material bibliográfico enfocado a la búsqueda de los distintos tipos variadores que se encuentran en el accionamiento de la máquina, los programas que manejan éstos (RS LOGIX, EXECUTIVE) y las ventajas y desventajas del control en lazo cerrado con realimentación a través del encoder y sin el encoder; (iii) obtención de modo de operación de la máquina de secado, información necesaria como: la máxima velocidad, la mínima velocidad, la máxima producción, los tiempos de aceleración y los tiempos de desaceleración de la máquina, los voltajes, la frecuencia, el torque, el momento de inercia, voltaje de control, la temperatura máxima de la máquina de la línea N°2 de secado; y, (iv) finalmente con la información necesaria ya recopilada, se procedió a la construcción del simulador en ambiente Simulink/Matlab, validación del modelo, análisis del comportamiento dinámico del sistema de control propuesto.

4. Modelo dinámico de la máquina de inducción

El método vectorial es una manera simple pero precisa para formular matemáticamente las máquinas de corriente alterna, ya que permite visualizar los fenómenos físicos de las variables. En este caso, el devanado del estator de la máquina tiene los ejes magnéticos de sus fases distribuidos simétricamente desplazados 120° eléctricos entre sí, se asume que la distribución espacial del campo y de la fuerza magnetomotriz son ondas sinusoidales. Además, se considera una máquina magnéticamente lineal -no se consideran los efectos de saturación e histéresis-, el eje del rotor está dispuesto perpendicularmente al plano complejo generado por las corrientes del estator. Se definen los vectores espaciales de corriente, tensión y flujo, de la siguiente forma:

$$\vec{i} = 2/3 \cdot (i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c) \quad (1)$$

$$\vec{v} = 2/3 \cdot (v_a + a \cdot v_b + a^2 \cdot v_c) \quad (2)$$

$$\vec{\psi} = 2/3 \cdot (\psi_a + a \cdot \psi_b + a^2 \cdot \psi_c) \quad (3)$$

donde $a = \exp(j \frac{2\pi}{3})$ y $a^2 = \exp(-j \frac{2\pi}{3})$. Se denota para las ecuaciones del estator con el subíndice S y las ecuaciones del rotor con el subíndice R .

4.1. Modelo de la máquina referido a su propio sistema de coordenadas

Ecuación vectorial del estator
$$\vec{v}_S = R_S \cdot \vec{i}_S + \frac{d\vec{\psi}_S}{dt} \quad (4)$$

Ecuación vectorial del rotor,
devanados cortocircuitados $\vec{v}_R = 0 = R_R \cdot \vec{i}_R + \frac{d\vec{\psi}_R}{dt}$ (5)

4.2. Modelo de la máquina referida a un sistema de coordenadas rotatorias

Se denotan las ecuaciones del estator y rotor en un eje de coordenadas rotatorias como ST y RT , respectivamente; además se definen: la velocidad del eje del rotor: $\omega_R = d\gamma/dt$, siendo la posición del rotor respecto al estator: γ ; la velocidad del campo giratorio con respecto al estator: $\omega_s = d\theta/dt$ siendo la posición del campo giratorio respecto al estator: θ ; y la velocidad del campo giratorio con respecto al rotor: $\omega_2 = \omega_s - \omega_R$.

Desarrollando las ecuaciones (4) y (5) se obtienen las siguientes ecuaciones:

Ecuación vectorial del estator $\vec{v}_{ST} = R_S \cdot \vec{i}_{ST} + \frac{d\vec{\psi}_{ST}}{dt} + j \cdot \omega_s \cdot \vec{\psi}_{ST}$ (6)

Ecuación vectorial del rotor $\vec{v}_{RT} = R_R \cdot \vec{i}_{RT} + \frac{d\vec{\psi}_{RT}}{dt} + j(\omega_s - \omega_R) \cdot \vec{\psi}_{RT}$ (7)

donde, se definen para el modelo: tensión inducida por la variación de flujo con respecto al tiempo, en el estator: $d\vec{\psi}_{ST}/dt$; tensión de rotación, en el estator: $j\omega_s\vec{\psi}_{ST}$; tensión inducida por la variación de flujo con respecto al tiempo, en el rotor: $d\vec{\psi}_{RT}/dt$; tensión de rotación, en el rotor: $j\omega_2\vec{\psi}_{RT}$. Los enlaces de flujo son:

$$\vec{\psi}_{ST} = L_S \cdot \vec{i}_{ST} + L_H \cdot \vec{i}_{RT} \quad (8)$$

$$\vec{\psi}_{RT} = L_R \cdot \vec{i}_{RT} + L_H \cdot \vec{i}_{ST} \quad (9)$$

$$L_S = L_{\sigma S} + L_H \quad (10)$$

$$L_R = L_{\sigma R} + L_H \quad (11)$$

donde: L_S : la inductancia del estator; L_R : la inductancia del rotor; y L_H : la inductancia magnetizante. Además, $L_{\sigma S}$ corresponde a la inductancia de dispersión del estator; y $L_{\sigma R}$ a la inductancia de dispersión del rotor.

Finalmente, la ecuación mecánica del motor viene dada por:

$$\frac{J}{P} \cdot \frac{d\omega_R}{dt} = T_e - T_C \quad (12)$$

en donde: J : momento de inercia total del sistema; p : número de pares de polos; T_e : torque de eléctrico; y T_C : torque de carga.

Para fines de control se descompone las ecuaciones anteriores en coordenadas (X, Y) -en orientación al campo del rotor-, así se obtiene el siguiente modelo:

Ecuación vectorial del estator
respecto al eje X $v_{SX} = R_S \cdot i_{SX} + \frac{d\psi_{SX}}{dt} - \omega_s \psi_{SY}$ (13)

Ecuación vectorial del estator respecto al eje Y $v_{SY} = R_S \cdot i_{SY} + \frac{d\psi_{SY}}{dt} + \omega_S \psi_{SX}$ (14)

Ecuación vectorial del rotor respecto al eje X $0 = R_R \cdot i_{RX} + \frac{d\psi_{RX}}{dt} - (\omega_S - \omega_R) \psi_{RY}$ (15)

Ecuación vectorial del rotor respecto al eje Y $0 = R_R \cdot i_{RY} + \frac{d\psi_{RY}}{dt} + (\omega_S - \omega_R) \psi_{RX}$ (16)

Orientando el eje de referencia X con el flujo del rotor, se obtiene: $\bar{\psi}_{RT} = \psi_{RX} + j\psi_{RY}$, en donde $\psi_{RY} = 0$. De cual resultan las componentes de la corriente del rotor:

$$i_{RX} = \frac{\psi_{RX}}{L_R} - \frac{L_H}{L_R} \cdot i_{SX} \text{ e } i_{RY} = -\frac{L_H \cdot i_{SY}}{L_R}. \text{ Reemplazando en la ecuación (8), se obtiene:}$$

$$\bar{\psi}_{ST} = \bar{i}_{ST} \cdot L_S \left(1 - \frac{L_H^2}{L_R \cdot L_S} \right) + L_H \frac{\psi_{RX}}{L_R} \quad (17)$$

Introduciendo el coeficiente de dispersión total, $\sigma = 1 - \frac{L_H^2}{L_S \cdot L_R}$, se obtiene vectorialmente:

$$\bar{\psi}_{ST} = \bar{i}_{ST} \cdot L_S \cdot \sigma + L_H \frac{\bar{\psi}_{RT}}{L_R} \quad (18)$$

Así, se obtiene para el vector del enlace de flujo del rotor: $\bar{\psi}'_{RT} = L_H \frac{\bar{\psi}_{RT}}{L_R}$, y para el vector del enlace de flujo del estator: $\bar{\psi}_{ST} = \bar{i}_{ST} \cdot L_S \cdot \sigma + \bar{\psi}'_{RT}$.

Definido una corriente magnetizante ficticia, \bar{i}_m , proporcional al flujo del rotor $\bar{\psi}_{RT}$ en zona lineal, es decir se tiene $\bar{\psi}'_{RT} = \bar{i}_m \cdot L_H$; así $\bar{\psi}_{ST} = L_S \cdot \bar{i}_{ST} + L_H \cdot \bar{i}_{RT} = \bar{i}_{ST} \cdot L_S \cdot \sigma + \bar{i}_m \cdot L_H$.

$$\bar{i}_m \cdot L_H = L_S(1 - \sigma) \cdot \bar{i}_{ST} + L_H \cdot \bar{i}_{RT} \quad (19)$$

Considerando $L_H = L_S(1 - \sigma)$, se obtiene al reemplazar en (19) la siguiente relación:

$$\bar{i}_m \cdot L_S(1 - \sigma) = L_S(1 - \sigma) \cdot \bar{i}_{ST} + L_H \cdot \bar{i}_{RT}, \text{ esto implica: } \bar{i}_m = \bar{i}_{ST} + \frac{L_R}{L_H} \cdot \bar{i}_{RT}. \text{ Así, se puede definir}$$

$$\bar{i}'_{RT} = \bar{i}_{RT} \frac{L_R}{L_H}$$

Para el torque electromagnético desarrollado por el motor se tienen las siguientes expresiones:

$$T_e = \frac{3}{2} \text{Im}(\bar{\psi}_{ST}^* \cdot \bar{i}_{ST}) = -\frac{3}{2} \text{Im}(\bar{\psi}_{RT}^* \cdot \bar{i}_{RT}) \quad (20)$$

Además se define $\tau_s = L_s/R_s$: como constante de tiempo del estator; y $\tau_r = L_r/R_r$: como constante de tiempo del rotor. Finalmente, el modelo fenomenológico de la máquina de inducción referido a un sistema de referencia con orientación de campo queda dado por:

$$\tau_s \sigma \frac{di_{SX}}{dt} + i_{SX} = \frac{v_{SX}}{R_s} + \omega_s \tau_s i_{SY} \sigma - (1 - \sigma) \tau_s \frac{di_m}{dt} \quad (21)$$

$$\tau_s \sigma \frac{di_{SY}}{dt} + i_{SY} = \frac{v_{SY}}{R_s} - \omega_s \tau_s i_{SX} \sigma - (1 - \sigma) \omega_s \tau_s i_m \quad (22)$$

$$\tau_r \frac{di_m}{dt} + i_m = i_{SX} \quad (23)$$

$$\omega_s = \frac{i_{SY}}{i_m \cdot \tau_r} + \omega_m \quad (24)$$

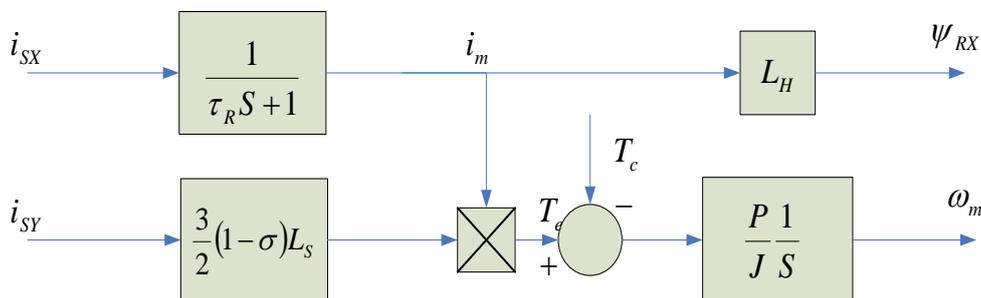
$$\frac{J}{P} \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3}{2} (1 - \sigma) \cdot L_s \cdot i_m \cdot i_{SY} - T_c \quad (25)$$

5. Control vectorial en la máquina de inducción

El modelo del motor se encuentra que las variables de control están fuertemente acopladas, lo que implica que el cambio en una de ellas afecta a la otra y en definitiva la respuesta que se persigue no se logra. La descripción vectorial realiza su trabajo desacoplándolas y permite diseñar un esquema de control tal que el comportamiento de éste sea similar al accionamiento de la máquina de corriente continua.

Considerando que la máquina es alimentada por corriente, esto quiere decir que las ecuaciones (21) y (22) no son necesarias, pues ya se conocen las componentes de la corriente en el estator; entonces a partir de las ecuaciones (23) a la (25) se obtiene el diagrama de bloques de la máquina de inducción que muestra la figura 5.

Figura 5. Diagrama de bloques de la máquina de inducción

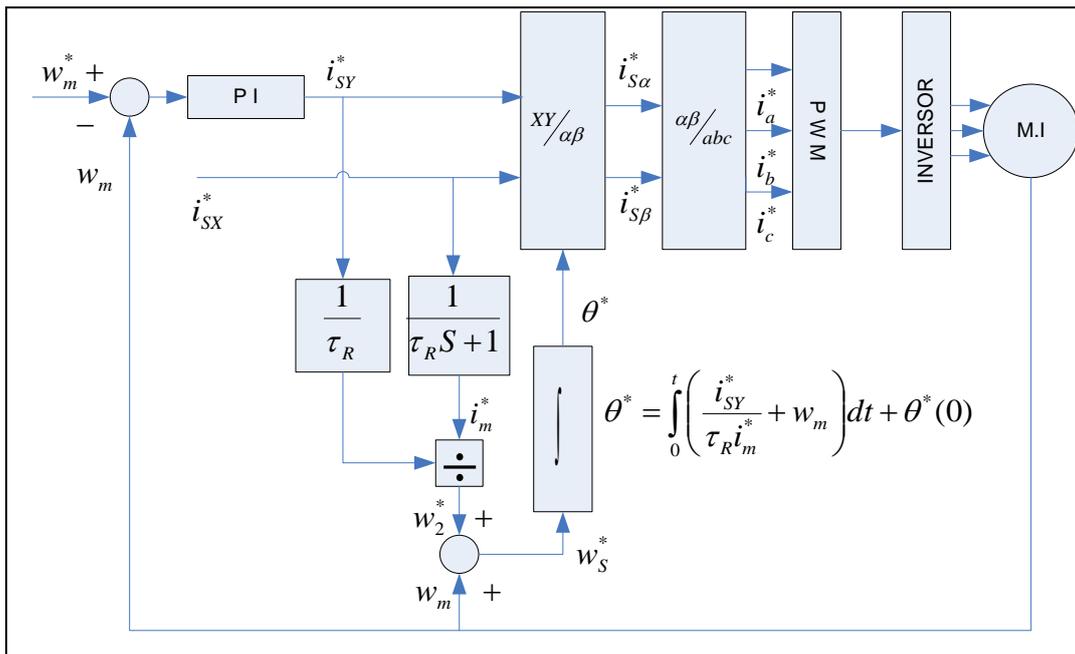


De acuerdo al diagrama de bloques la corriente del estator en el eje X controla la componente de flujo del rotor, y la corriente del estator en el eje Y controla la componente de torque. Este diagrama de bloques constituye la base del control vectorial.

5.1. Control vectorial indirecto

El control vectorial es lejos la técnica de control más avanzada y de mayor calidad dinámica para máquinas eléctricas alternas. La idea principal es controlar la máquina de inducción de igual forma que una máquina de corriente continua; es decir controlar separadamente el flujo y el torque del motor. La figura 6 muestra el diagrama en bloques que ilustra la idea principal del control vectorial. Una labor importante es identificar la posición del flujo para poder expresar al vector de corriente con respecto al eje X rotatorio, orientado en la dirección de flujo, conocido también como el método del flujo orientado.

Figura 6. Diagrama de control vectorial indirecto de la máquina de inducción



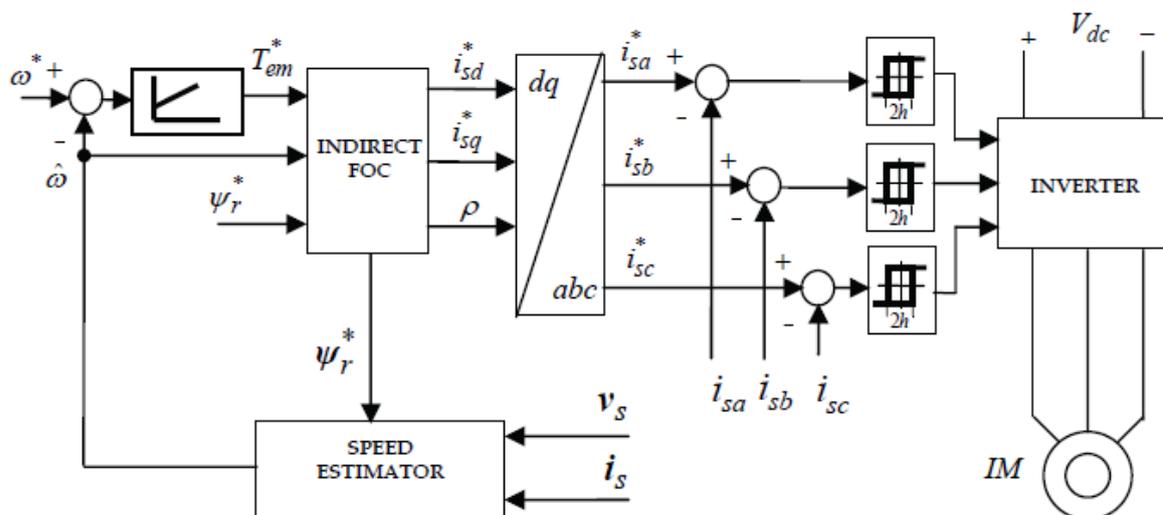
De la expresión $\omega_s = d\theta/dt$, se obtiene la siguiente ecuación: $\theta = \int_0^t \omega_s \cdot dt + \theta(0)$. Para mantener la orientación correcta se debe cumplir que $\theta = \theta^*$, donde θ^* es el ángulo del vector \vec{i}_s^* -la corriente actual de la máquina- donde:

$$\theta^* = \int_0^t \left(\frac{i_{SY}^*}{\tau_R i_m^*} + w_m \right) dt + \theta^*(0) \quad (26)$$

5.2. Control vectorial sin sensores invasivos

La figura 7 muestra el diagrama en bloques que ilustra la idea principal del control vectorial sin sensores de velocidad. Como la idea fundamental del control vectorial es identificar la posición del flujo para poder expresar al vector de corriente con respecto al eje X rotatorio, orientado en la dirección de flujo; pues bien en este esquema se requiere un modelo de inferencia de modo que mediante las mediciones de corrientes y voltajes se pueda inferir la velocidad de la máquina y considerar el control orientado por campo –FOC indirecto- dado anteriormente para controlar la velocidad de la máquina. Básicamente, se cambia el sensor de velocidad por un modelo de inferencia, cuyas entradas son el vector de corriente y el vector de tensión.

Figura 7. Diagrama de control vectorial indirecto sin sensores invasivos



6. Conclusiones

El trabajo permite la implementación del sistema de control vectorial en motores de inducción sin sensores invasivos –propuesta presentada a la empresa-, además de contar con los recursos tecnológicos necesarios para el desarrollo de nuevas investigaciones en el campo del control de motores de inducción como también en labores de docencia, y permitir un trabajo cooperativo con la industria.

Se programó y comprobó un algoritmo de control de velocidad usando el método indirecto de control vectorial, validando de forma práctica la sensibilidad que posee la constante de tiempo del rotor τ_R , ya que se ve afectada por la temperatura, efecto skin, frecuencias armónicas y saturación de la inductancia magnetizante entre otras.

Desde el punto de vista investigativo, la experiencia adquirida en la puesta en marcha de este sistema, permite contar con una valiosa herramienta para trabajos futuros basados en esta técnica, tanto desde el punto de vista de hardware y software, así como en técnicas de simulación. Desde el punto de vista académico, el trabajo permitió adquirir conocimientos y habilidades en el manejo de herramientas de simulación y programación relacionadas con microcontroladores, y el uso de dispositivos electrónicos de potencia.

Referencias

- Garriga, P., (2005). Control de accionamientos integrados, *Copyright © 2005 Rockwell Automation, Inc.*
- Navarro, S., (2010). Accionamiento y ahorro de energía. *Publication # IACS-SP011A-EN-E Copyright © 2005 Rockwell Automation, Inc.*
- ROCKWELL AUTOMATION, (2010a). *Juegos de planos del accionamiento de la máquina, planos de conexión de los drive al RS view 32 y al Rs loxig.*
- ROCKWELL AUTOMATION, (2010b). CMPC Celulosa lleva a cabo actualización de su proceso de control y distribución en un plazo récord con el apoyo de Rockwell Automation. *Automation Today, Agosto, 2010, año 12, N° 33, pp. 20.*

ROCKWELL AUTOMATION, (2011). PowerFlex Low Voltage AC Drives Selection Guide: Powerful performance, Flexible control. October 2011.

Sixto, J. (2004). *Control vectorial del motor de inducción en bajas velocidades. Tesis M. Sc. del Instituto Politécnico Nacional, México, DF.*

Weg, (2007). Equipamientos Eléctricos S.A., Guía Técnica - Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nelson Hernán Aros Oñate.

Phone: + 56 45 325520 Ext. 5547

Fax: + + 56 45 325550

E-mail: naros@ufro.cl