

# Control de movimiento de una grúa viajera utilizando el control vectorial método indirecto de un motor de inducción

I. Torres-Rodríguez<sup>1</sup>

P. Huerta-González<sup>1</sup>

J. Rodríguez-Rivas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingeniería en Control y Automatización (ICA),  
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME),  
Instituto Politécnico Nacional (IPN),  
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos",  
Ed. 3, 1er piso, Col. Lindavista, México, DF,  
MÉXICO.

<sup>2</sup>Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI),  
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME),  
Instituto Politécnico Nacional (IPN),  
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos",  
Ed. Z4, 1er piso, Col. Lindavista, México, DF,  
MÉXICO.

Correo electrónico: ictorres@ipn.mx  
phuerta@ipn.mx  
jjrodriguezr@ipn.mx

Recibido el 13 de septiembre de 2007; aceptado el 2 de julio de 2009.

## 1. Resumen

En este artículo se desarrolla el control de una grúa viajera mediante el control vectorial indirecto de un motor de inducción, para realizar esto, se utiliza una red neuronal artificial desarrollada en [1] y [2], la cual proporciona el tiempo final de desplazamiento utilizado por un polinomio de Bézier y así determinar la señal de referencia suave de posición con la cual se limita la oscilación de la carga. Este artículo inicia describiendo el modelo dinámico de la grúa viajera con el fin de determinar la fuerza o par requerido por el actuador (motor de inducción) para lograr el movimiento deseado en términos de posición y de velocidad. Para desarrollar el control del motor de inducción, se usa el control vectorial indirecto, por lo que se requiere implementar el control de posición y de corriente, los cuales utilizan un controlador Proporcional-Derivativo (PD) y un Proporcional-Integral (PI) respectivamente.

**Palabras clave:** grúa viajera, motor de inducción, control vectorial indirecto, polinomio de Bézier.

## 2. Abstract (Crane motion control using an indirect vector control of an induction motor)

In this paper the simulation of a crane control system is shown. The control system is based on the well known indirect field oriented control or the indirect vector control of an induction motor. The reference position signal is generated using an artificial neural network developed in [1] y [2] that gives the final displaced time which permits to compute the position reference signal using the Bézier polynomial. The calculated signal must be smoothing in order to limit the load oscillation. The crane dynamic model that permits to compute the force or torque developed by the actuator (induction motor) getting the proper movement in terms of position and speed. The position and current control were done in the induction motor drive using a proportional-derivative (PD) and a proportional-integrate (PI) controllers respectively.

**Key words:** crane, induction motor, indirect vector control, Bezier polynomial.

## 3. Introducción

En la literatura se pueden encontrar algunos trabajos relacionados con el control de grúas viajeras. En algunos casos se aplica una ley de control por retroalimentación dinámica, asumiendo que todas las variables del sistema son conocidas, es decir que estas variables pueden ser medidas [3]. Sin embargo, la medición de algunas de estas variables constituye un problema de alta dificultad técnica. En [4] se diseña un control por modos deslizantes, donde se necesita que se conozcan todas las variables del sistema. El modelo de la grúa que se emplea en ese trabajo no toma en cuenta el momento de inercia del malacate, por lo que la descripción que hace de la dinámica de la grúa está limitada. En este trabajo, sí se toma en cuenta el momento de inercia del motor. Además el esquema de control propuesto en [4] deja una dinámica interna en el sistema, la cual podría causar inestabilidad. En [5] se propone un observador que, bajo el

conocimiento de la posición del carro, la longitud de la cuerda y su ángulo, estima las velocidades de estas variables. Sin embargo, el problema real que se enfrenta con la grúa viajera no es la estimación de las velocidades, sino más bien estimar el ángulo de balanceo y su velocidad, por lo tanto, la medición de estas variables representa un problema técnico complejo. En [6] se propone una trayectoria de velocidad óptima y se diseña un control de velocidad para el motor, con el propósito de seguir dicha trayectoria. Así mismo, se supone el conocimiento de todas las variables de estado y se tiene un mayor empleo de sensores, ya que son utilizados para las componentes de fuerza horizontal y vertical del cable de la grúa.

Para la operación satisfactoria de una grúa viajera es necesario que ésta siga una trayectoria determinada que permita evaluar la precisión con que funciona el lazo de control de posición, bajo la consideración de que la grúa debe transportar la carga a la posición deseada en el menor tiempo posible y con una oscilación de la carga que se mantenga dentro de un rango establecido. Esta consideración se hace ya que en algunas aplicaciones el inicio o paro repentino de una grúa viajera causa que la carga se balancee de una manera descontrolada, pudiendo el balanceo de la carga dañar a la carga transportada, a las cargas colocadas alrededor, a los elementos de la propia grúa o al personal de la planta. Por lo que se propone un polinomio de Bézier de quinto orden, para la planificación de la señal de referencias de posición de la grúa viajera obteniendo curvas suaves y continuas.

#### 4. Modelo de la grúa viajera

Una grúa viajera de dos grados de libertad es un equipo industrial cuyo fin es manipular una carga desde y hacia cualquier punto en un plano formado por los ejes vertical y horizontal. En otras palabras, una grúa viajera tiene las capacidades de levantar y desplazar transversalmente una carga.

Para realizar el estudio de movimiento de estas máquinas partimos de obtener un modelo que describa el movimiento de la misma, para lo cual obtenemos su modelo dinámico. Éste es un modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de un sistema físico, el cual nos puede servir para el diseño de sistemas así como para evaluar algunas de sus características, como son las vibraciones, los sobrevoltajes, etc, que llevan a movimientos erráticos o descontrolados.

En particular, en este trabajo la solución numérica del modelo dinámico permite obtener la información necesaria (posición y velocidad) que se envía hasta la etapa de control de la grúa viajera para cerrar su lazo de control, con esto se puede validar el desempeño del sistema con la implementación de un algoritmo de control a nivel de simulación. Este control genera la señal de referencia de voltaje o corriente necesaria para desarrollar el par electromagnético requerido. Conocer esta información

permite que las etapas de control, de potencia y el motor de inducción tengan un mejor desempeño y un desgaste menor.

#### 4.1. Descripción del método de Euler-Lagrange

Para conocer el modelo matemático del sistema de la grúa viajera se utiliza la formulación de Euler-Lagrange. Esta formulación se basa en los conceptos de coordenadas generalizadas y el lagrangiano [7], [8]. Las coordenadas generalizadas de un sistema, son un conjunto de coordenadas independientes que se necesitan para describir completamente el estado del sistema con relación a un marco inercial [8]. El número de coordenadas generalizadas necesario para describir el sistema es igual al número de sus grados de libertad [7], [8].

Por otra parte, el lagrangiano ( $L$ ) es la diferencia entre la energía cinética total ( $E_c$ ) y la energía potencial total ( $E_p$ ) de un cuerpo en movimiento en un punto dado de su trayectoria.

$$L = \sum E_c - \sum E_p \quad (1)$$

La acción o principio de Hamilton es la integral temporal del lagrangiano sobre una trayectoria. A cada trayectoria imaginable corresponde un valor numérico de acción [7].

$$I = \int_{t_1}^{t_2} L(q_i, \dot{q}_i) dt \quad (2)$$

donde:

$I$	acción o principio de Hamilton
$q_i, \dot{q}_i$	coordenadas generalizadas
$L$	lagrangiano

Las ecuaciones diferenciales que describen las posibles trayectorias de un sistema requieren que la acción esté en un valor mínimo (o máximo), con el objeto de que la diferencial funcional de la acción ( $\delta S$ ) se anule [7]:

$$\delta S = 0 \quad (3)$$

Esta condición da lugar a la formulación de Euler-Lagrange, la cual proporciona las ecuaciones de movimiento del sistema:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

donde  $\tau_i$  es el vector de fuerzas externas [8].

La formulación de Euler-Lagrange se utiliza como herramienta para la obtención del modelo dinámico de la grúa viajera.

#### 4.2 Modelo dinámico de la grúa viajera

Para realizar el estudio presentado en este trabajo se modeló la dinámica de la grúa considerando las siguientes premisas, con las cuales se reduce la complejidad del modelo:

1. El momento de inercia de la carga es ignorado.
2. La carga es considerada como una masa puntual.
3. El cable es considerado un elemento rígido y con masa despreciable.
4. El movimiento de la carga se supone restringido al plano vertical.

En general, para la mayoría de los casos, el momento de inercia de la carga no debe ignorarse ya que al interactuar con su aceleración angular genera fenómenos que tienen gran repercusión en el comportamiento general del sistema. Sin embargo, dado que el objetivo de este trabajo es reducir la oscilación de la carga por medio del seguimiento de señales de referencia suaves por parte de la grúa, esta consideración es válida [9].

Por otra parte, la carga se puede considerar como de masa puntual siempre y cuando la carga tenga una distribución homogénea y simétrica de la masa y que el punto de levante (parte de la carga de donde es sujeta por la grúa) sea el adecuado, es decir que esté alineado con el eje vertical del centro de gravedad de la carga y ligeramente por encima de éste [9].

La masa del cable puede despreciarse debido a que generalmente ésta es muy pequeña con relación a la masa de la carga y la masa del carro de la grúa. La consideración de que el cable es rígido es realista para algunos materiales (muchos de ellos de uso actual en las grúas) cuya deformación elástica es pequeña. Por último, el movimiento se encuentra restringido al plano vertical ya que ése es el propósito de análisis de este trabajo.

La grúa viajera considerada en este trabajo es un sistema electromecánico de dos grados de libertad accionado por un motor eléctrico de inducción con el cual se controla la posición horizontal del carro (*trolley*). Esta posición ( $x$ ) coincide con el primer grado de libertad de la grúa, mientras que el segundo grado de libertad es el ángulo  $\theta$ , que es el ángulo de giro de la carga con relación al eje vertical (véase figura 1). Este último tiene que ser considerado con el propósito de determinar la posición de la carga y de lograr un control exacto de la misma, evitando la aparición de balanceos indeseables. Debido a que el sistema posee mayor número de grados de libertad que grados de libertad actuados, este sistema se considera subactuado.

Las variables que se utilizan para la obtención del modelo dinámico de la grúa viajera son:

- $x$  posición del carro (grúa)
- $\dot{x}$  velocidad del carro
- $\theta$  ángulo del cable con respecto al eje vertical
- $\dot{\theta}$  velocidad angular
- $u_1$  fuerza aplicada al carro

Por otra parte los parámetros del sistema son:

- $M_g$  masa de la plataforma (del carro)
- $m$  masa de la carga

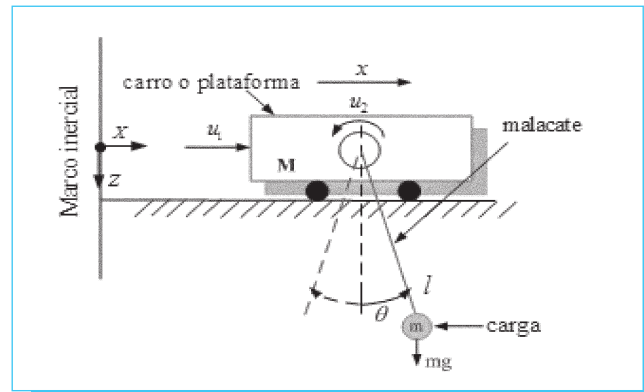


Fig. 1. Diagrama del sistema de la grúa viajera.

- $r$  radio de la rueda
- $l$  longitud del cable (malacate)

Para este caso elegimos como coordenadas generalizadas las variables  $x$  y  $\theta$ , las cuales coinciden con los grados de libertad del sistema. Estas coordenadas se utilizaron para el cálculo de la energía cinética y potencial, que fueron empleadas en la formulación de Euler-Lagrange.

Se denomina energía cinética a la energía que posee un cuerpo de masa  $m$  en movimiento. Para este caso, la energía cinética de la plataforma (carro)  $E_{c_g}$  es una función de la derivada de la posición  $x$  (figura 2), esto es

$$E_{c_g} = \frac{1}{2} M_g \dot{x}^2 \quad (5)$$

Por otra parte, para calcular la energía cinética del péndulo con relación al marco inercial (figura 2), se hace uso de la longitud y el ángulo del cable  $\theta$  para encontrar la posición ( $p_x$  y  $p_y$ ), esto es:

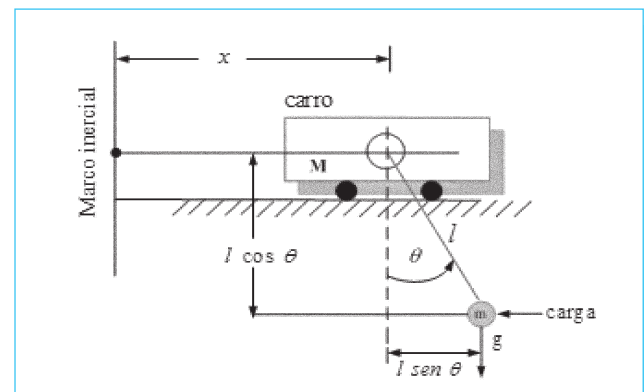


Fig. 2. Diagrama del sistema de la grúa viajera para calcular la energía cinética.

$$\begin{aligned} p_x &= x + l \operatorname{sen}\theta \\ p_y &= l \operatorname{cos}\theta \end{aligned} \quad (6)$$

Para encontrar las velocidades ( $v_x$  y  $v_y$ ), derivamos la ecuación (6) y obtenemos:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{d}{dt}(x + l \operatorname{sen}\theta) = \dot{x} + l \operatorname{cos}\theta \dot{\theta} \\ v_y &= \frac{d}{dt}(l \operatorname{cos}\theta) = -l \operatorname{sen}\theta \dot{\theta} \end{aligned} \quad (7)$$

Siendo el vector de velocidad del péndulo ( $v_p$ ) las velocidades en  $x$  e  $y$ :

$$v_p = \begin{bmatrix} \dot{x} + l \operatorname{cos}\theta \dot{\theta} \\ -l \operatorname{sen}\theta \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Calculando la norma del vector a partir de la ecuación (8) obtenemos la magnitud de la velocidad lineal resultante, la cual es:

$$v_p^2 = \dot{x}^2 + 2l \dot{x} \operatorname{cos}\theta \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2 \quad (9)$$

De aquí obtenemos que la energía cinética del péndulo  $E_{C_p}$ , es decir:

$$E_{C_p} = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2l \dot{x} \operatorname{cos}\theta \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2) \quad (10)$$

Por lo tanto, la energía cinética total del sistema es:

$$\begin{aligned} E_C &= E_{C_g} + E_{C_p} \\ E_C &= \frac{1}{2} M_g \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2l \dot{x} \operatorname{cos}\theta \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2) \end{aligned} \quad (11)$$

Por otra parte, la energía potencial del sistema se define como la energía almacenada en un sistema debida a la posición del mismo, cuando se trata de un campo potencial debido a la gravedad terrestre [10].

En este caso la energía potencial existente en el sistema  $E_p = E_{p_g} + E_{p_p}$  es debida únicamente a la gravedad. Dado que la fuerza de gravedad no influye en el desplazamiento de la plataforma, pues este desplazamiento es ortogonal a la fuerza de gravedad, el trabajo resultante entre ellos es cero. De este modo podemos proponer la posición vertical del marco inicial al centro de la plataforma generando con esto que la energía potencial de la misma ( $E_{p_g}$ ) sea cero.

Por otra parte, como el movimiento del péndulo posee una componente vertical, éste se ve afectado por la fuerza de gravedad, siendo su energía potencial de:

$$E_{p_g} = m g (l - l \operatorname{cos}\theta) \quad (12)$$

donde  $g$  es la gravedad.

Por lo tanto, considerando a  $E_c$  y a  $E_p$ , se calcula el lagrangiano (ecuación (1)) para determinar las ecuaciones de movimiento de la grúa viajera, el cual será:

$$\begin{aligned} L &= \sum E_c - \sum E_p \\ L &= \left[ \frac{1}{2} M_g \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2l \dot{x} \operatorname{cos}\theta \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Aplicando las ecuaciones de Euler-Lagrange a la ecuación (13), se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right] - \frac{\partial L}{\partial x} &= u_1 \\ \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right] - \frac{\partial L}{\partial \theta} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

donde  $u_1$  es la fuerza de control, es decir, es la fuerza que debe aplicar el motor de inducción para ocasionar el movimiento de la grúa.

Desarrollando las ecuaciones (14) se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} &= \frac{1}{2} M_g \frac{\partial}{\partial \dot{x}} (\dot{x}^2) + \frac{1}{2} m \frac{\partial}{\partial \dot{x}} (\dot{x}^2) + ml (\operatorname{cos}\theta \dot{\theta}) \frac{\partial}{\partial \dot{x}} (\dot{x}) \\ &= M_g \dot{x} + m \dot{x} + ml \operatorname{cos}\theta \dot{\theta} \end{aligned} \quad (15)$$

Ahora se obtiene la derivada temporal de la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right] &= (M_g + m) \frac{d}{dt} (\dot{x}) + ml \frac{d}{dt} (\operatorname{cos}\theta \dot{\theta}) \\ &= (M_g + m) \ddot{x} + ml (\operatorname{cos}\theta \ddot{\theta} - \operatorname{sen}\theta \dot{\theta}^2) \end{aligned} \quad (16)$$

Aplicando las ecuaciones de Lagrange a la ecuación (13):

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta} &= \frac{1}{2} m \left[ 2l \dot{x} \operatorname{cos}\theta \frac{d\dot{\theta}}{d\theta} + l^2 \frac{d\dot{\theta}^2}{d\theta} \right] \\ &= ml \dot{x} \operatorname{cos}\theta + ml^2 \dot{\theta} \end{aligned} \quad (17)$$

Obteniendo la derivada de la ecuación anterior, se llega a la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \theta} \right] &= ml \frac{d(\dot{x} \operatorname{cos}\theta)}{dt} + ml^2 \frac{d\dot{\theta}}{dt} \\ &= ml(\ddot{x} \operatorname{cos}\theta + \dot{x} \operatorname{sen}\theta \dot{\theta}) + ml^2 \ddot{\theta} \end{aligned} \quad (18)$$

Asimismo, se obtiene la  $\frac{\partial L}{\partial \theta}$  de la ecuación (14):

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta} &= \frac{ml \dot{x} \dot{\theta} d(\operatorname{cos}\theta)}{d\theta} + mgl \frac{d(\operatorname{cos}\theta)}{d\theta} \\ &= -ml \dot{x} \dot{\theta} \operatorname{sen}\theta - mgl \operatorname{sen}\theta \end{aligned} \quad (19)$$

Por lo tanto, las ecuaciones dinámicas que describen el movimiento de la grúa viajera son:

$$u_1 = (M_g + m) \ddot{x} + ml(\cos\theta \ddot{\theta} - \sin\theta \dot{\theta}^2)$$

$$0 = ml(\ddot{x} \cos\theta - \dot{x} \sin\theta \dot{\theta}) + ml^2 \ddot{\theta} + ml \sin\theta (\dot{x} \dot{\theta} - g) \quad (20)$$

Despejando a  $\ddot{x}$  y  $\ddot{\theta}$  de las ecuaciones (20); que corresponden a la aceleración de la grúa y a la aceleración del cable que sostiene a la carga respectivamente, se obtiene:

$$\ddot{x} = \frac{u_1 + ml(\cos\theta \dot{\theta} - \sin\theta \dot{\theta}^2)}{M_g + m} \quad (21)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(\ddot{x} \cos\theta - \dot{x} \sin\theta \dot{\theta}) - \dot{x} \dot{\theta} \sin\theta - g \sin\theta}{l}$$

La ecuación (21) se utiliza para la simulación de la grúa aplicando el método de control vectorial indirecto que se describe en la sección 6.

### 5. Control de la grúa viajera

Para realizar el control de la grúa viajera se ocupa el esquema mostrado en la figura 3, donde se tienen todos los elementos que intervienen en el control.

A continuación se realiza una descripción general de cada uno de los bloques:

- **Bloque de entradas.** Aquí el operario solamente tiene que establecer los siguientes datos: la distancia en metros que la grúa recorrerá, la masa en kilogramos que la grúa tiene que cargar durante su recorrido y la longitud en metros del cable o malacate.
- **Red neuronal artificial** [1] y [2]. Esta red es de aprendizaje supervisado que emplea un ciclo de propagación-adaptación, la cual se entrena usando el algoritmo de retropropagación de Levenberg-Marquardt ocupando los datos de entrada anteriores

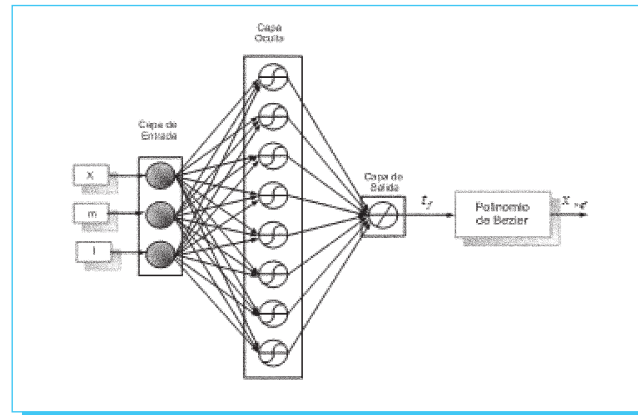


Fig. 4. Arquitectura de la red neuronal de realimentación.

para obtener el tiempo final ( $t_f$ ) de desplazamiento. En la figura 4, se muestra en forma general el patrón de entradas y salida de la red neuronal artificial, donde  $x$  es la posición (metros),  $m$  la masa de la carga (kilogramos),  $l$  la longitud del cable (metros) y  $t_f$  el tiempo final de desplazamiento (segundos). Así la red neuronal tiene tres entradas y una salida. El número de capas ocultas es de uno y el número de neuronas en esta capa es de ocho.

- **Polinomio de Bézier.** Se ocupa un polinomio de quinto grado, en el cual se tiene que establecer un tiempo inicial que se tomó como 0 s y un tiempo final que es proporcionado por la red neuronal artificial. Por lo tanto, con el polinomio de Bézier se obtiene la trayectoria de posición de referencia.
- **Controladores.** Se realiza el control vectorial indirecto del motor de inducción, por lo que se requiere del control de posición, necesiándose saber la posición de referencia y la posición real

de la grúa para obtener la acción de control  $T_{em}^*$  (par electromagnético de referencia). Asimismo se realiza el control de corriente, obteniéndose el voltaje trifásico de referencia ( $v_a^*$ ,  $v_b^*$  y  $v_c^*$ ) que es la acción de control del controlador de corriente.

- **Motor de inducción y caja de engranes.** El motor es alimentado por el inversor y dependiendo de las condiciones de la grúa, tiene que proporcionar la velocidad y el par requeridos por ésta. Sin embargo se necesita una caja de engranes para aumentar el par y disminuir la velocidad, lo cual depende del comportamiento de la grúa.

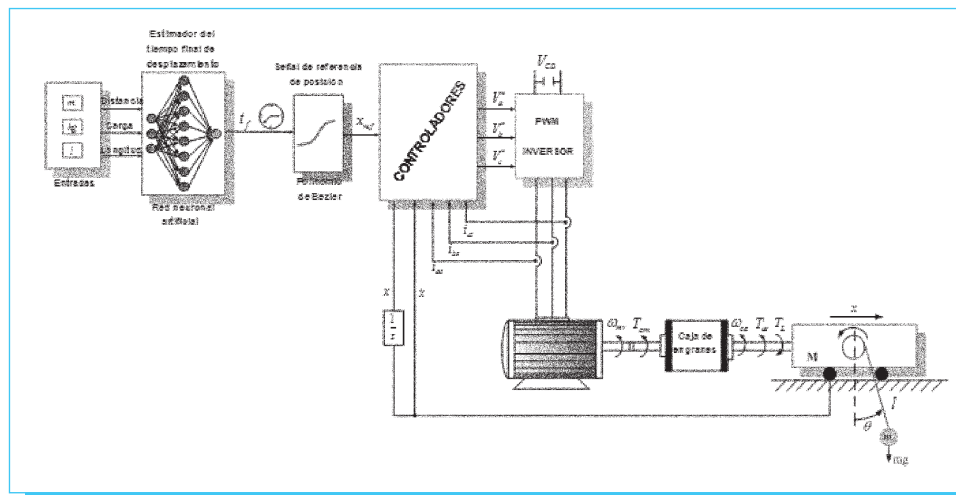


Fig. 3. Esquema general de control de la grúa viajera.



## 6. Control vectorial indirecto

Para realizar el control del motor de inducción se utiliza el control vectorial indirecto (CVI) [2], cuyo esquema se muestra en la figura 5. Dentro del bloque CVI, se establecen las ecuaciones que determinan el control vectorial indirecto, donde se realiza lo siguiente:

1. Regulación de la corriente  $q$  del estator en el marco de referencia síncrono ( $i_{qs}^{e*}$ ), para controlar el par desarrollado y la velocidad de deslizamiento  $\omega_e - \omega_r$ , siendo  $\omega_e$  y  $\omega_r$  la velocidad angular del estator y del rotor, respectivamente.
2. Regulación de la corriente  $d$  del estator en el marco de referencia síncrono ( $i_{ds}^{e*}$ ) para el control del flujo del rotor.

Si se proporcionan niveles deseados del flujo del rotor,  $\Psi_{dr}^{e*}$ , el valor deseado de  $i_{ds}^{e*}$  se obtiene con la ecuación siguiente:

$$i_{ds}^{e*} = \Psi_{dr}^{e*} \frac{r'_r + L'_r P}{r'_r L_m} \quad (22)$$

donde  $r'_r$ ,  $L'_r$  y  $L_m$  son la resistencia del rotor y las inductancias de magnetización del rotor y mutua respectivamente.

A partir del par de referencia ( $T_{em}^*$ ), se puede calcular el valor de la corriente de referencia  $i_{qs}^{e*}$  de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$i_{qs}^{e*} = \frac{2}{3} \frac{2}{P} \frac{L'_r}{L_m} \frac{T_{em}^*}{\lambda_{dr}^{e*}} \quad (23)$$

Cuando el flujo del rotor se orienta apropiadamente, la corriente  $d$  del rotor en el marco de referencia síncrono ( $i_{dr}^{e*}$ ) es cero y  $\Psi_{dr}^{e*} = L_m i_{ds}^{e*}$ ; así, la velocidad de deslizamiento ( $\omega_2^*$ ) también pueden escribirse como:

$$\omega_2^* = \omega_e - \omega_r = \frac{r'_r}{L'_r} \frac{i_{qs}^{e*}}{i_{ds}^{e*}} \quad (24)$$

Las condiciones anteriores aseguran el desacoplamiento de las ecuaciones de voltaje del rotor [10].

Del mismo bloque CVI de la figura 5, se obtiene el ángulo del flujo del rotor,  $\rho$ , que es la suma del ángulo de posición del rotor,  $\theta_r$ , y del ángulo de deslizamiento,  $\theta_2$ , obtenido de la integración de la velocidad de deslizamiento. Si las salidas ortogonales de la forma  $\cos \theta_r$  y  $\sin \theta_r$  son proporcionadas por el encoder, los valores de  $\cos \rho$  y  $\sin \rho$  pueden generarse de las identidades trigonométricas siguientes:

$$\begin{aligned} \cos \rho &= \cos(\theta_r + \theta_2) = \cos \theta_r \cos \theta_2 - \sin \theta_r \sin \theta_2 \\ \sin \rho &= \sin(\theta_r + \theta_2) = \sin \theta_r \cos \theta_2 + \cos \theta_r \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (25)$$

### 6.1. Controlador de posición

Un controlador de posición es aquel que permite controlar el desplazamiento del sistema de un punto a otro siguiendo una trayectoria especificada. Para el control de la grúa viajera, se debe llevar la carga de un punto a otro siguiendo una trayectoria suave prescrita con precisión y seguridad.

Uno de los aspectos más importantes de todo esquema de control es la sintonización o ajuste de su o sus controladores. Sin embargo, en muchos casos prácticos, no basta ajustar la ganancia del sistema para cumplir con las especificaciones dadas. Con frecuencia, aumentar el valor de la ganancia mejora el funcionamiento estacionario, pero afecta la estabilidad. En tal caso es necesario rediseñar el sistema (modificando la estructura o incorporando elementos o componentes adicionales)

para alterar el funcionamiento global, de manera que el sistema se comporte de la forma deseada.

Para el diseño del controlador de posición que se utiliza en este trabajo, se utilizan las ecuaciones básicas de fuerza y par de la grúa viajera, las cuales son:

$$u_L = Ma \quad (26)$$

donde  $u_L$  es la fuerza de la grúa, que se toma como la fuerza de la carga,  $M$  es la masa total de la grúa ( $M_g + m$ ) y  $a = \ddot{x}$  es la aceleración de la grúa.

Para obtener el par de la grúa o de la carga, se considera el radio ( $r$ ) de las ruedas de la grúa, siendo el par,  $T_L = u_L r$ , ahora, tomando en cuenta la ecuación (26), se obtiene que:

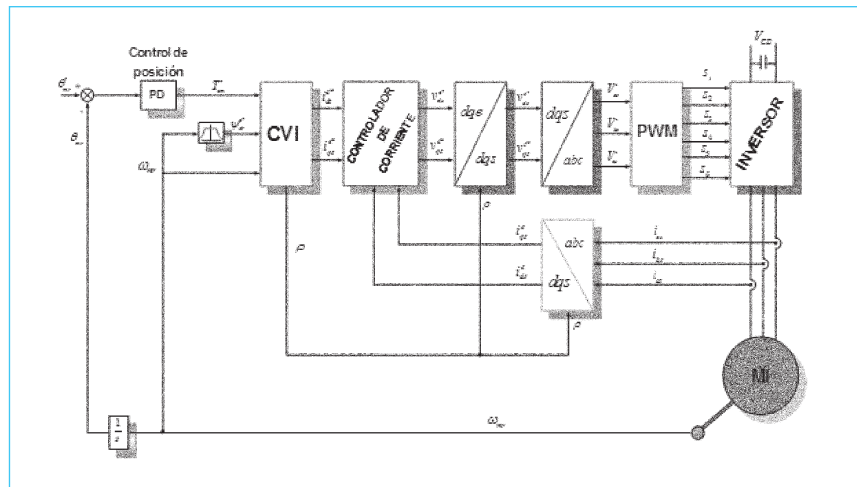


Fig. 5. Control vectorial indirecto del motor de inducción para la grúa viajera.

$$T_L = Mr a \tag{27}$$

Despejando la aceleración de la ecuación (27) se llega a la siguiente ecuación:

$$a = \frac{T_L}{Mr} \tag{28}$$

Con base en la ecuación (28) se establece el diagrama de bloques del lazo de control de posición que se muestra en la figura 6.

Por la naturaleza de la planta, en este caso no es posible cancelar polos y obtener una función de transferencia equivalente en lazo abierto. Según la referencia [11], para obtener un desempeño satisfactorio en un sistema de fase mínima, el margen de fase debe estar entre 30° y 60°, si se toma en cuenta esta consideración se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$1 = \left| \frac{k_{p(pos)} + sk_{d(pos)}}{Mrs^2} \right| \tag{29}$$

$$60^\circ = \angle \left[ \frac{k_{p(pos)} + sk_{d(pos)}}{Mrs^2} \right] \tag{30}$$

En las ecuaciones anteriores se sustituye  $s = j\omega_c$ , donde  $\omega_c$  es la frecuencia de corte, para analizarlas en el dominio de la frecuencia, y desarrollando las ecuaciones se obtiene:

$$k_{d(pos)} = \frac{Mr\omega_c \tan 60^\circ}{\sqrt{1 + \tan^2 60^\circ}} \tag{31}$$

$$k_{p(pos)} = \frac{Mr\omega_c^2}{\sqrt{1 + \tan^2 60^\circ}} \tag{32}$$

De esta forma, de las ecuaciones (31) y (32) se obtienen las constantes proporcional y derivativa  $k_{p(pos)}$  y  $k_{d(pos)}$  del control de posición.

### 6.2. Controlador de corriente

La función principal del esquema de control de corriente (figura 7) en un inversor con PWM, es forzar a las corrientes en una carga trifásica de CA a que sigan a las señales de referencia [2].

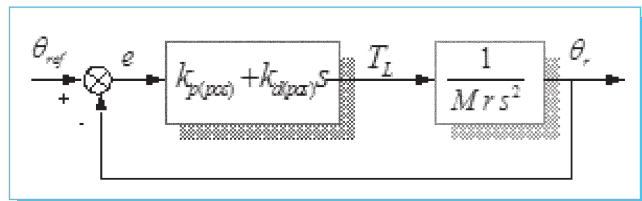


Fig. 6. Diagrama de bloques del control de posición.

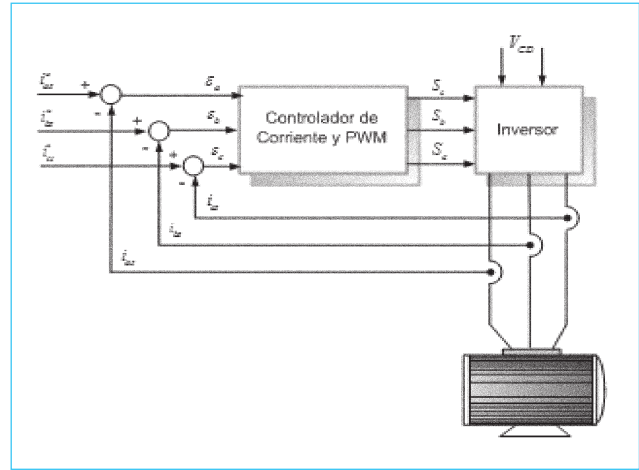


Fig. 7. Control de corriente.

Lo cual se realiza comparando los valores instantáneos de las corrientes de fase de referencia  $i_{as}^*, i_{bs}^*, i_{cs}^*$  con las corrientes de fase medidas en el motor  $i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$  con el controlador de corriente se obtiene el voltaje trifásico de referencia, que es utilizado por el PWM para generar los estados de conmutación  $S_1, \dots, S_6$  para los dispositivos de potencia del inversor, los cuales tienden a disminuir los errores de las corrientes  $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$ . En general, el controlador de corriente realiza la compensación del error (decrecimiento de  $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$ ) y posteriormente con el PWM la determinación de los estados de conmutación  $S_a, S_b$  y  $S_c$ .

En la figura 7 se muestra el bloque del controlador de corriente y en la figura 8 se muestra la estructura interna de este controlador, en el cual, las corrientes  $i_{ds}^{e*}$  e  $i_{qs}^{e*}$  se toman como señales de referencia del controlador vectorial indirecto, y las corrientes reales  $i_{ds}^e$  e  $i_{qs}^e$  se obtienen realizando una transformación trifásica a bifásica estacionaria y de bifásica estacionaria a bifásica síncrona.

Para el diseño del controlador de corriente se usaron las ecuaciones de voltaje del rotor en el marco de referencia del

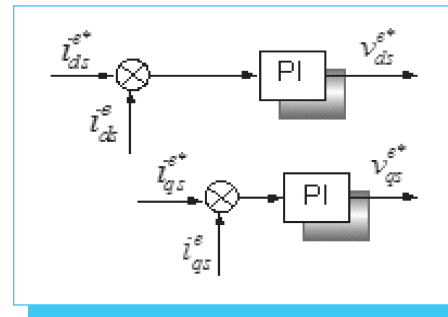


Fig. 8. Controlador de corriente.

flujo del rotor, las ecuaciones del flujo del rotor, del estator y las ecuaciones de corriente, obteniéndose:

$$v_{ds}^e = [R_s + \sigma L_s s] i_{ds}^e \quad (33)$$

$$v_{qs}^e = [R_s + \sigma L_s s] i_{qs}^e \quad (34)$$

donde,  $R_s$  y  $L_s$  son la resistencia e inductancia del estator respectivamente;  $\sigma$  es el coeficiente de dispersión total;  $v_{ds}^e$  y  $v_{qs}^e$  son el voltaje del estator del eje  $d$  y  $q$  en el marco de referencia estacionario respectivamente.

De acuerdo con las ecuaciones (33) y (34), se obtienen los diagramas de bloques que se muestran en la figura 9. El PI es suficiente para obtener una función de transferencia en lazo abierto con la cual se alcanza la referencia sin error en estado permanente, el sobreimpulso y el tiempo de asentamiento.

Desarrollando la función de transferencia y si  $\frac{k_{i(corr)}}{k_{p(corr)}} = \frac{R_s}{\sigma L_s}$ ,

las constantes proporcional e integral del controlador de corriente son:

$$k_{p(corr)} = \omega_c \sigma L_s \quad (35)$$

$$k_{i(corr)} = \omega_c R_s \quad (36)$$

### 7. Resultados de la simulación

Las especificaciones de la grúa que se propone para el desarrollo de este trabajo son:

- masa máxima de la carga: 1 500 kg
- desplazamiento máximo: 200 m
- masa de la grúa: 500 kg
- longitud máximo del cable (malacate): 3 m
- radio de las ruedas: 10 cm

Con base en las especificaciones de la grúa viajera, se utilizó como elemento motriz un motor de inducción tipo jaula de

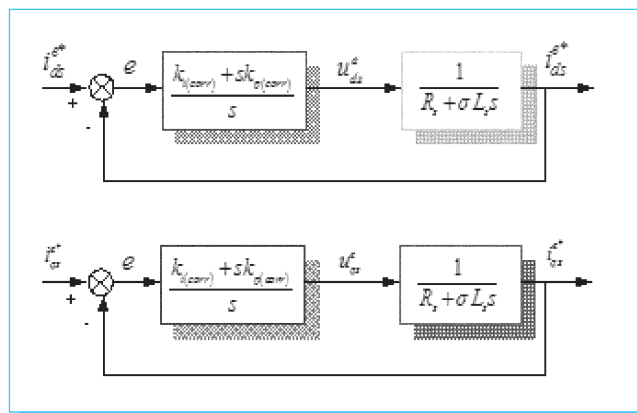


Fig. 9. Diagrama de bloques de los controles de corrientes.

Tabla 1. Parámetros del motor de inducción: 5 HP.

$r_s = 0.1062 \Omega$	$X_m = 5.834 \Omega$	$X_{lr} = 0.2145 \Omega$
$r'_s = 0.0764 \Omega$	$X'_{ls} = 0.2145 \Omega$	$J = 2.8 \text{ kgm}^2$

ardilla de 5 HP, trifásico, 60 Hz, 4 polos, 220 V, cuyos parámetros se muestran en la tabla 1.

La velocidad nominal del motor de inducción es de 1780 r/min a un deslizamiento de 0.0248, y la corriente nominal es de 11 A.

Se seleccionó una caja de engrane de 3:1, ya que el par nominal es de 20.373 Nm y su velocidad nominal de 188.495 rad/s; obteniéndose de ella un par de 407.46 Nm y una velocidad de 62.83 rad/s, cuyos valores se ajustan a los requerimientos de la grúa viajera debido a la carga máxima a transportar y a la distancia de desplazamiento.

Para verificar la operación de la grúa viajera con el motor de inducción, utilizando el control vectorial indirecto y usando la red neuronal artificial (desarrollada en [1] y [2]) para calcular el tiempo del polinomio de Bézier de la señal de referencia de posición predefinida, se consideraron diferentes condiciones de operación de la grúa, tanto para variaciones de masa como de distancia.

En cada uno de los casos se graficaron las siguientes variables del motor de inducción:

- posición angular,  $\theta_{mr}$  en rad
- velocidad mecánica del rotor,  $\omega_{mr}$  en rad/s
- par electromagnético o desarrollado por el motor,  $T_{em}$  en Nm
- corriente trifásica,  $i_a, i_b$  y  $i_c$  en A

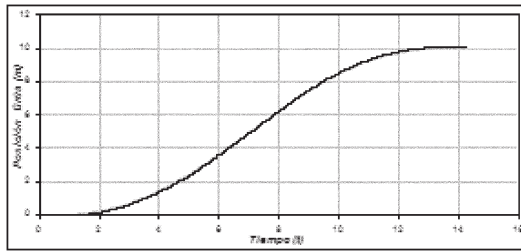
Con respecto a la grúa viajera se obtuvieron las gráficas de las variables siguientes:

- Posición lineal,  $x$  en m
- Velocidad lineal,  $x$  en m/s
- Fuerza aplicada,  $u_r$  en N

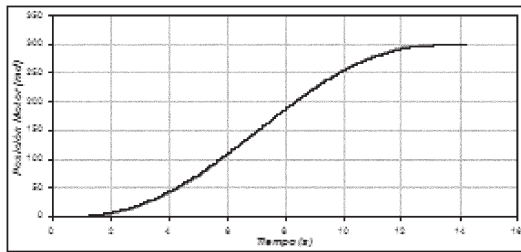
#### 7.1. Operación de la grúa con una masa de 250 kg, distancia de 10 m y longitud de 3 m

En la figura 10 (a), se observa que la grúa tiene que desplazarse una distancia de 10 m en 14.3 s, como se puede observar, la posición real de la grúa sigue a la posición de referencia, la cual no debe tener cambios bruscos ya que la carga puede oscilar. En la figura 10 (b) se muestra la posición en radianes del motor de inducción que está en función de la posición lineal que se debe desplazar la grúa. En ésta se observa que la posición máxima es de 300 rad en 14.3 s. Esto quiere decir, que la caja de engranes proporciona una posición angular de 100 rad en los 14.3 s.





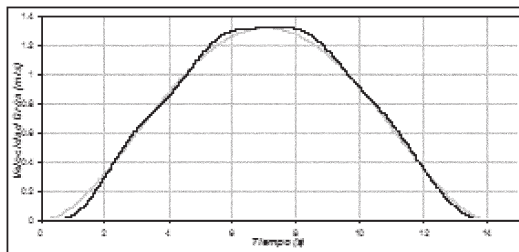
a) Posición de la grúa viajera.



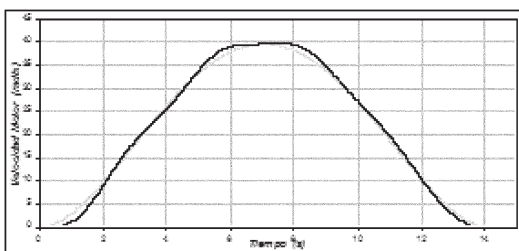
b) Posición del motor de inudcción.

**Fig. 10.** Posición de la grúa y del motor para una masa de 250 kg, distancia de 10 m y longitud de 3 m.

En la figura 11 (a), se muestra la velocidad con la cual se desplaza la grúa viajera para cubrir la distancia de 10 m en 14.3 s. En ésta



a) Velocidad de la grúa viajera.



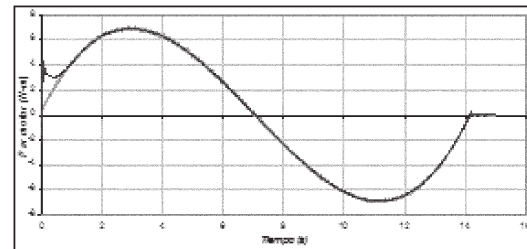
b) Velocidad mecánica del rotor.

**Fig. 11.** Velocidad de la grúa y del motor para una masa de 250 kg, distancia de 10 m y longitud de 3 m.

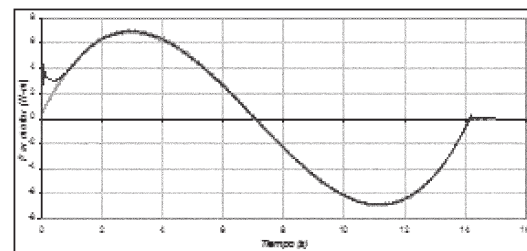
se observa que la velocidad se va incrementando hasta llegar a su valor máximo de 1.3 m/s en 7 s, y después va disminuyendo hasta llegar a la posición de 10 m con una velocidad nula. Para que la grúa tenga esta velocidad, el motor de inducción genera una velocidad máxima de 39.56 rad/s (figura 11 (b)). Esto significa que la caja de engranes tiene una velocidad de 13.1 rad/s.

En la gráfica de la fuerza aplicada a la grúa viajera (figura 12), se distinguen cuatro etapas: La primera comprendida entre 0 s y 3.57 s, se observa que la fuerza se va incrementando hasta 213.8 N, en esta etapa la fuerza necesaria es grande, ya que se debe vencer la inercia. La segunda etapa entre 3.57 s y 7.14 s, la fuerza sigue siendo positiva, pero en menor medida que la etapa anterior, ya que la grúa tiene que seguir moviéndose. En la tercera etapa, entre 7.14 s y 10.73 s, si bien el desplazamiento y velocidad son positivos, la fuerza aplicada a la grúa es negativa, ya que se empieza la etapa de frenado, en esta etapa la fuerza que se aplica es de -213.8 N. Por último, en la etapa comprendida entre 10.73 s y 14.3 s la grúa se desacelera y se detiene.

En el caso de la gráfica del par desarrollado por el motor (figura 13), el cual es entregado a la caja de engranes, se observan las mismas etapas que en la gráfica de la fuerza aplicada a la grúa. En la primera



**Fig. 12.** Fuerza aplicada a la grúa viajera para una masa de 250 kg, distancia de 10 m y longitud de 3 m.



**Fig. 13.** Par desarrollado por el motor de inducción para una masa de 250 kg, distancia de 10 m y longitud de 3 m.

etapa el par desarrollado se incrementa para vencer la inercia llegando hasta un valor de 6.84 N-m. En la segunda etapa, el par se mantiene positivo, pero es menor que en la primera, ya que como se mencionó anteriormente, la grúa no opone tanta resistencia al movimiento. En la tercera etapa, el par desarrollado es negativo, ocasionado por el frenado, en esta etapa el motor funciona como generador llegando a un valor de -6.84 N-m. En la última etapa el motor se desacelera completamente para detener a la grúa.

En la gráfica de la corriente trifásica del estator (figura 14), se muestra que la corriente máxima se produce cuando se tiene el par máximo en 3.57 s. Conforme el par disminuye, la corriente también disminuye, y al presentarse el par negativo, ésta se incrementa pero como la máquina está desacelerando se invierte la secuencia de las corrientes.

### 7.2 Operación de la grúa con una masa de 800 kg, distancia de 100 m y longitud de 3 m

Como se observa en la figura 15 (a), la grúa tiene que desplazarse una distancia de 100 m en 42.7 s, y en la figura 15 (b) la posición en radianes del motor de inducción está en función de la posición lineal que se debe desplazar la grúa; como se ve, la posición real de la grúa sigue a la posición de referencia, la cual no debe tener cambios bruscos ya que la carga puede oscilar.

La velocidad con la cual se desplaza la grúa viajera para cubrir la distancia 100 m en 42.7 s se muestra en la figura 15 (c). Se observa que la velocidad se va incrementando hasta llegar a su valor máximo de 4.47 m/s en 22 s, y después se va disminuyendo hasta llegar a la posición de 100 m con una velocidad nula; la velocidad mecánica del rotor sigue el mismo comportamiento (véase figura 15 (d)).

Para la gráfica de la fuerza aplicada a la grúa viajera (figura 15 (e)) que es similar al par desarrollado por el motor de la figura 15 (f), se

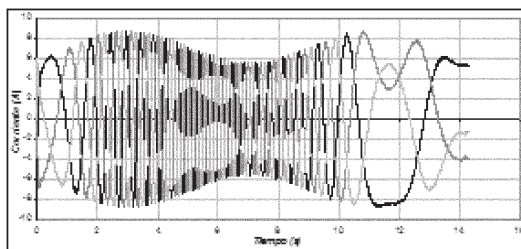
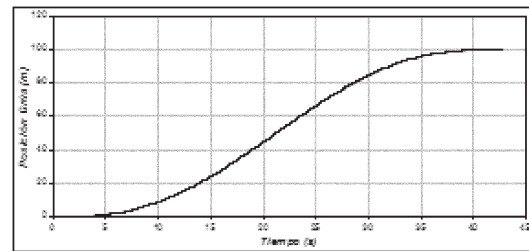
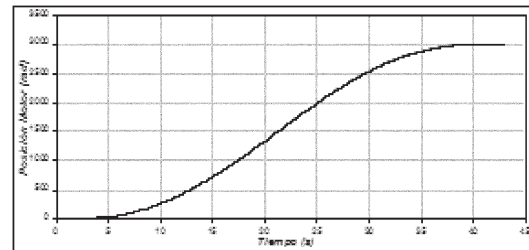


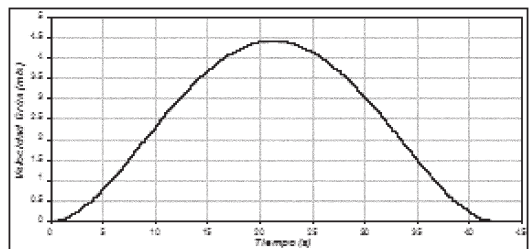
Fig. 14. Corrientes trifásicas del estator para una masa de 250 kg, distancia de 10 m y longitud de 3 m.



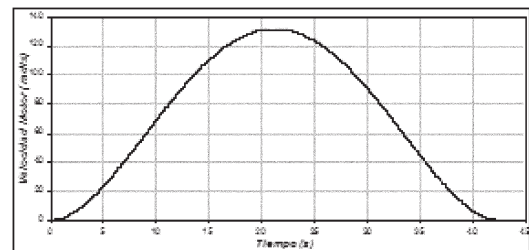
a) Posición de la grúa viajera.



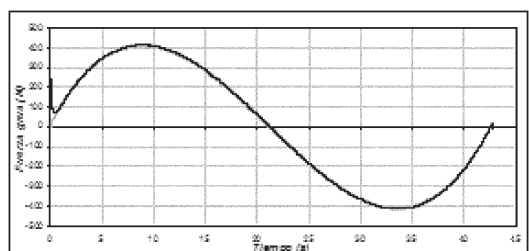
b) Posición del motor de inducción.



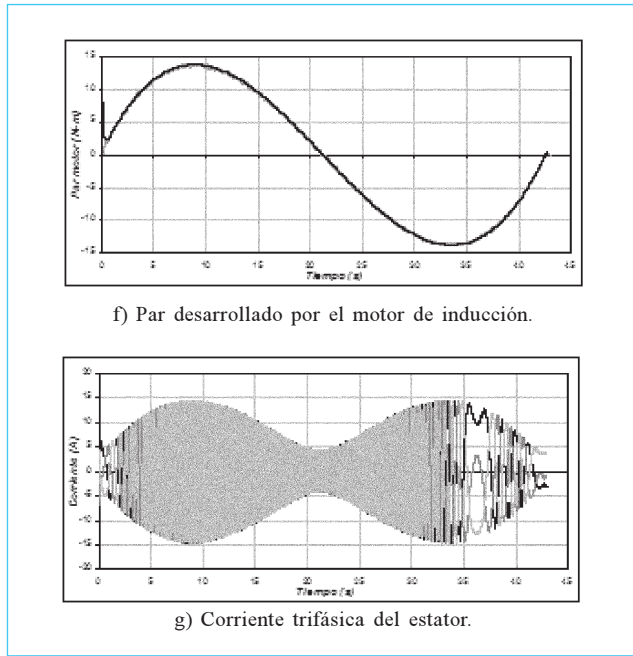
c) Velocidad de la grúa viajera.



d) Velocidad mecánica del rotor.



e) Fuerza aplicada a la grúa.



**Fig. 15.** Operación de la grúa viajera con una masa de 800 kg, distancia de 100 m y longitud de 3 m.

distinguen cuatro etapas: La primera etapa comprendida entre 0 s y 8.95 s se observa que la fuerza se va incrementando hasta 416.73 N, en esta etapa la fuerza necesaria es grande, ya que la inercia debe ser vencida. La segunda etapa entre 8.95 s y 21.3 s, la fuerza sigue siendo positiva, pero menor que en la etapa anterior, ya que la grúa tiene que seguir su movimiento. En la tercera etapa, entre 21.3 s y 33.7 s aunque la velocidad y el desplazamiento son positivos, la fuerza aplicada a la grúa es negativa, ya que empieza la etapa de frenado, en esta etapa la fuerza que se aplica es de -416.7 N. Por último, en la etapa comprendida entre 33.7 s y 42.7 s la grúa se desacelera y se detiene.

En la figura 15 (g), se observa la corriente trifásica del estator tiene su valor máximo cuando se produce el par máximo en 8.95 s. Conforme el par disminuye, la corriente también disminuye. Al presentarse el par negativo, la corriente se incrementa pero como la máquina está desacelerando se invierte la secuencia de las corrientes.

## 8. Conclusiones

En este artículo se desarrolló el control de posición y velocidad de una grúa viajera. Como parte de este trabajo se desarrolló el modelo dinámico de una grúa viajera y se tomó de la literatura el modelo del motor de inducción, así como del control

vectorial indirecto del mismo. Con base en los resultados de las simulaciones se puede observar, que el uso del polinomio de Bézier para la planificación de trayectorias de la grúa viajera, reduce los pares de control útiles necesarios para realizar el desplazamiento de la grúa y a su vez reduce la oscilación de la carga a valores establecidos.

De acuerdo a la sintonización realizada del controlador de posición, los valores  $k_{p(pos)}$  y  $k_{d(pos)}$  quedan en función de variables propias del sistema ( $M$  y  $r$ ). Al presentarse algún cambio en estas variables, se presenta un ajuste de las constantes del controlador, ocasionando que la acción de control ( $T_{em}^*$ ) se modifique. Lo mismo sucede con el controlador de corriente que utiliza un PI, en el cual las ganancias  $k_{p(corr)}$  y  $k_{i(corr)}$  quedan en función de los parámetros propios del motor de inducción. Con el desempeño apropiado de estos controladores, como se observa en los resultados obtenidos, el motor de inducción responde apropiadamente a las variaciones de carga y a las distancias que tiene que recorrer la grúa.

## 9. Referencias

- [1] Torres-Rodríguez, Ivone C., "Control de un Eje para una Grúa Viajera". Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica, SEPI-ESIME-IPN, 2006.
- [2] Huerta-González, P. F., Rodríguez-Rivas J. J. y Torres Rodríguez, I. C. "Estimación de la resistencia del rotor usando una red neuronal artificial en el control vectorial indirecto del motor de inducción", June 2008, *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 6, No. 2.
- [3] C. Cheng and C. Chen., "Controller design for an overhead crane system with uncertainty". *Control Eng. Practice*, 1996.
- [4] B. Vikramaditya y R. Rajamani. *Nonlinear control of a trolley crane system*. American Control Conference. Chicago, Illinois. 2000.
- [5] O. Bornard, F. Celle-Couenne y G. Gules. "Observabilité et observateurs, in Systèmes non linéaires". Ed. Masson. Paris 1993.
- [6] J. Hmalainen, A. Marttinen, L. Baharova y J. Virkkunen, "Optimal path planning for a trolley crane: fast and smooth transfer of load". *IEE proceeding, Control Theory Applications*, Vol. 142, No. 1, 1995.
- [7] Katsuhiko, Ogata, *Dinámica de sistemas*. Prentice-Hall, Hispanoamericana, SA. México, 1992.
- [8] Craig, J., *Introduction to robotics*. Addison-Wesley. New York 2004.
- [9] González-Inda y Carlos Paul, "Diseño, construcción y control en tiempo real de una grúa viajera de 2 grados de libertad", Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Sección de Mecatrónica. 2001.
- [10] Bimal, K., Bose. *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall, N.J., 2002.
- [11] Moham, Ned. "Advanced Electric Drives. Analysis", *Control and Modeling Using Simulink*. USA: MNPERE Minneapolis. 2001.

# Indicaciones para los investigadores que deseen publicar en la revista Científica

La revista *Científica* ESIME es una publicación trimestral editada por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), que presenta trabajos de investigación o propuestas originales en el área de la Ingeniería Electromecánica y sus ciencias afines.

Los artículos se reciben en la Coordinación Editorial de manera personal con una copia del archivo digital del trabajo y una copia impresa en el Edificio 5, Primer Piso, Oficina de la revista *Científica*, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la ESIME Zacatenco, Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CP. 07738, México, DF; o por medio de correo electrónico: [revistacientifipn@yahoo.com.mx](mailto:revistacientifipn@yahoo.com.mx). Para aclaraciones se puede comunicar al teléfono 5729 6000 extensión 54518.

Los trabajos recibidos son revisados por el Comité Editorial quienes designan a un Editor Asociado de acuerdo a la disciplina que cubren los artículos. El Editor Asociado selecciona dos árbitros o más para que evalúen el escrito, quien recibe las observaciones de éstos e informa al Comité sobre los resultados de la revisión. Los trabajos pueden ser aceptados para su publicación, aceptados si se realizan modificaciones necesarias o rechazados. Los trabajos deben ser investigaciones o propuestas originales inéditas, sin excepción, sobre las áreas mencionadas.

## Estructura de los artículos

Dentro del artículo la numeración comienza a partir del 'Resumen' o el 'Abstract', según sea el caso. Ésta continúa de acuerdo a los siguientes elementos: 1. Resumen, 2. Abstract, 3. Introducción, 4. Desarrollo, 5. Conclusiones y 6. Referencias.

## Título

El título debe ser lo más corto posible (sin utilizar abreviaciones de preferencia) y no exceder de tres líneas.

## Datos del autor

Éstos muestran el o los nombres de los autores, la dirección de la institución a la cual pertenecen, el teléfono, fax y correo electrónico.

## Resumen

Debe contener 200 palabras como máximo. Consiste en una pequeña descripción de la investigación y una breve información de los resultados del trabajo que permite a los lectores identificar con rapidez los aspectos fundamentales del artículo y discernir la relevancia de éste.

## Abstract

Se incluye un resumen en inglés si el artículo está en español o viceversa. Éste aparece inmediatamente después del resumen en inglés o español, según sea el caso.

## Introducción

Expresa los antecedentes, límites, alcances y relevancia del problema. Plantea las premisas del mismo, y expresa el objetivo del trabajo. Se sugiere no extenderla como si fuera una exposición analítica.

## Desarrollo

Se refiere al desarrollo del tema que puede ser teórico, experimental, teórico-experimental o la descripción de un nuevo diseño. Es la parte medular y está compuesta por el planteamiento del problema y análisis del mismo, mencionando los materiales, métodos y técnicas. Las subdivisiones de este apartado se dejan al criterio del autor.

## Conclusiones

Establece la respuesta global del problema, son los objetivos alcanzados, las hipótesis comprobadas, modificadas o rechazadas.

## Referencias

Es la lista de fuentes bibliográficas: libros, artículos, manuales, memorias, etcétera. Deben aparecer en el orden en el cual se mencionan dentro del artículo con las siguientes especificaciones:

### Libros:

- [1] Autor, *Título*, número de edición, Editorial, Ciudad, año de publicación.  
[2] Autor, 'Capítulo del libro', *Título*, número de edición, Editorial, Ciudad, año de publicación, páginas.

### Ejemplo:

- [1] Kays, W.M. & Crawford, M.E., *Convection Heat and Mass Transfer*, 2ª ed., McGraw-Hill, New York, 1993.

### Revistas:

- [1] Autor, «Título del artículo», *Revista*, volumen (número), año, páginas.

### Ejemplo:

- [1] Lara, J.C., Hernández, D.G. y Alonso-Vanegas, M.A., «Desarrollo de un aparato estereotáctico con arco centrado», *Arch Neurocién.* **10**(3), 2005, pp. 196-202.

## Anexos

Los agradecimientos, simbología, notación y otros anexos, se consideran dentro del cuerpo del artículo y se dejan a consideración del autor. Se debe indicar si el trabajo ha sido previamente presentado en alguna institución científica o realizado con la ayuda de una subvención o fondo especial.

## Consideraciones sobre el formato general

Para obtener la mejor calidad al realizar la edición de los manuscritos en el formato de la revista, se recomienda que: *a*) el texto se capture en un procesador de textos (*word*); *b*) el tipo de letra del texto sea *Times* de 10 puntos, en una página con márgenes superior e inferior y derecho de 2.5 cm, margen izquierdo de 3 cm a dos columnas con espaciado de 0.77 cm entre ellas; *c*) las ecuaciones y fórmulas numeradas para mayor claridad, acrónimos y abreviaciones deben definirse la primera vez que sean usados en el texto; *d*) los pies de las figuras deben estar debajo de éstas con la indicación 'Fig. 1'; además, el título de los ejes de las figuras a menudo es causa de confusión, por lo que se sugiere usar palabras en lugar de símbolos. Los encabezados de las tablas deben estar arriba de éstas; *e*) las figuras y tablas en el documento deben entregarse en archivos por separado (.tif, .jpeg), es importante que al pasar cualquier imagen por un escáner debe hacerlo con una resolución de 300 ppp (puntos por pulgada). De antemano gracias.

# Information for Authors Submitting Papers to Científica Journal

The manuscript must be prepared in following a Camera Ready format with all its section numbered starting with the abstract, as shown below:

1. **Abstract**
2. **Resumen (Spanish abstract if it is possible).**
3. **Body of the manuscript**
4. **Reference list**
5. **Acknowledgements if any**
6. **Reference list**
7. **Appendix if any**

## Title

Must be concise and no longer than 3 lines using capital and lower case letters.

## Authors Name and Affiliations

The authors name must be written below the title using a one column format starting with the given name followed by one or two family names, if two family names applies. Below the authors names must be written the affiliation including the address quality, fax, telephone number or email.

## Abstract

The abstract with about 200 words must give a brief description about the research including some comments about the experimental or simulation results and conclusion.

## Resumen (Spanish abstract)

It is desirable that, if it is possible, a Spanish abstract be provided.

## Body of the Manuscript

The body of the manuscript must include an introduction in which the relevance of the research must be explained. A review of related research works by either, the same or another authors must be included.

The body of the manuscript also must include the theoretical aspects of the research, as well as experimental or simulation results is any, together with a Conclusions Section.

## Format

All manuscripts must be written in letter size paper, only by one side, with the following requirements. *a)* It is recommended that, if possible, the text be written using a word processor. *b)* The text must be written in two columns with a separation between them of 0.77cm, using a 10 points Times font or similar, with lower, upper and right margins equal to 2.5 cm and left margin equal to 3.0 cm. *c)* All the equations must be numbered and written using an equations editor. *d)* All symbols or abbreviations must be defined the first time that they be used in the text. *e)* All figures must be inserted in the manuscript. *f)* All figures must be numbered and its captions must be inserted below them. It is strongly recommended to use, when it be possible, words instead of symbols in the graphic axis. The table captions must be inserted above the corresponding table. *g)* All pictures and scanned figures must be high quality pictures for proper reproduction.

## References

References must appear in the format given below. For multiple authors all family names and given names initials must be given. Titles of the journals must be all in lower case except the first letter of each word. All references must be cited by number in brackets, in the order that they appear in the text.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
**Científica:** LA REVISTA MEXICANA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA  
Unidad Profesional Adolfo López Mateos  
Edificio 5, Primer Piso, Oficina de la revista *Científica*,  
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,  
Col. Lindavista, CP. 07738, Tel. 5729 6000 ext. 54518, Fax 55860758  
email: [revistacientifpn@yahoo.com.mx](mailto:revistacientifpn@yahoo.com.mx)





**El Instituto Politécnico Nacional  
y la Escuela Superior de Ingeniería  
Mecánica y Eléctrica  
publican**



# Científica

LA REVISTA MEXICANA DE  
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA



**Suscripciones  
y venta de  
ejemplares:**

**Edificio 5, primer piso,  
Oficina de la revista Científica,  
Sección de Posgrado e  
Investigación de la  
ESIME Zacatenco,  
Unidad Profesional  
Adolfo López Mateos,  
Col. Lindavista,  
CP 07738,  
México, DF.**

**Tel. 5729 6000  
ext. 54518  
correo electrónico:  
revistacientifipn@yahoo.com.mx**

