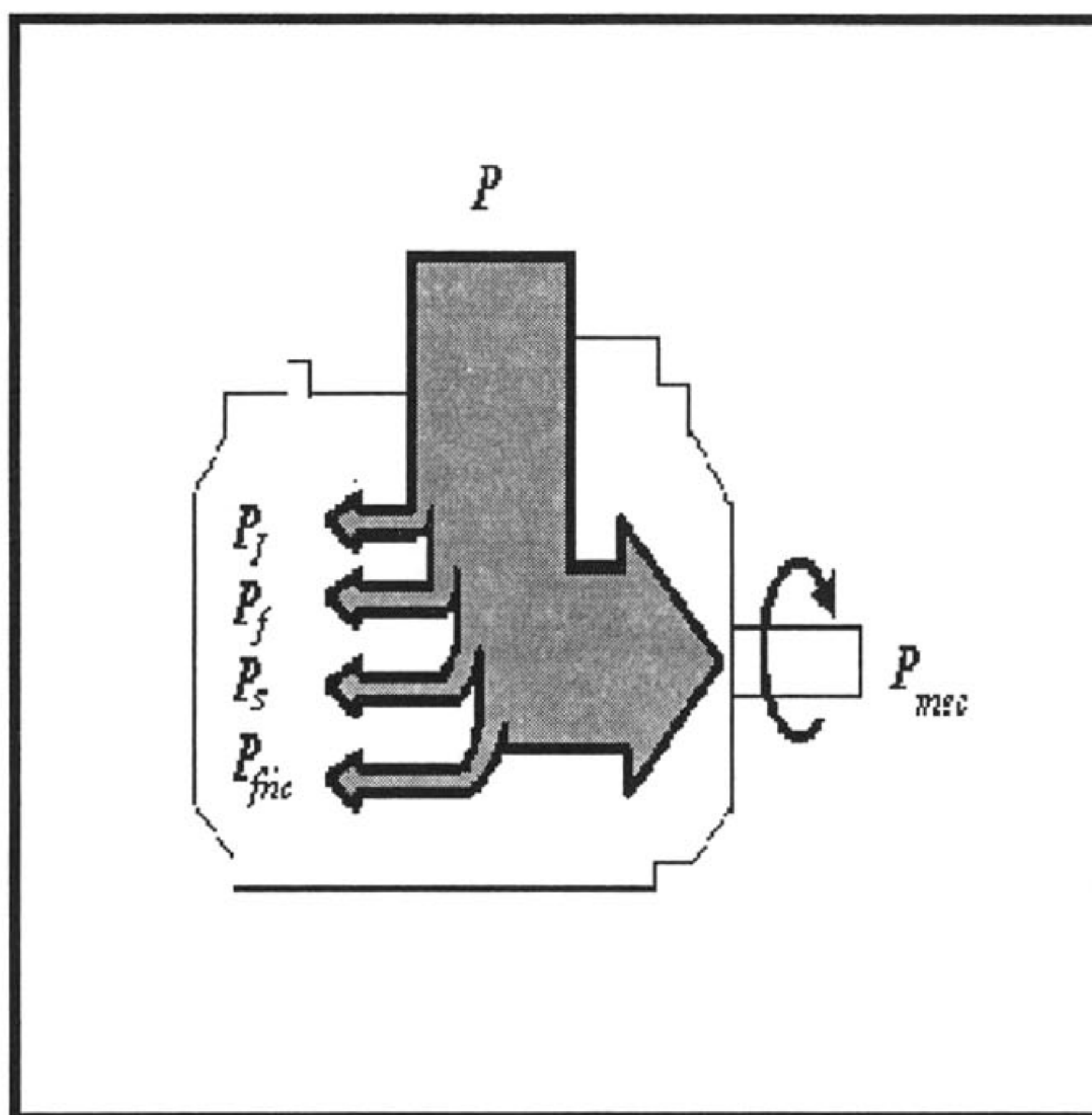


Control óptimo U/f para motores de inducción



□ John Jairo Martínez M. M.Sc.
Ingeniero Electricista
Universidad del Valle

□ José Miguel Ramírez S. Ph.D.
Profesor Titular.
EIEE, Universidad del Valle.

Grupo de Investigación en
Control industrial GICI.
<http://einstein.univalle.edu.co/~gici>

RESUMEN

En este artículo se presenta una metodología para encontrar la curva U/f óptima que minimiza el consumo de energía en motores de inducción que accionen cargas donde el par varía cuadráticamente con la velocidad, tales como bombas centrífugas y ventiladores; los resultados experimentales presentados aquí validan dicha metodología.

PALABRAS CLAVES

Control Óptimo, Motores de Inducción, Control U/f.

ABSTRACT

This article presents a methodology to find an optimal U/f curve that minimizes the energy consumption in induction motors that drive loads where the torque varies quadratically with the speed, such as centrifugal pumps and ventilators; the experimental results presented here validate this methodology.

Keywords:

optimal control, induction motors, U/f control.

1. INTRODUCCIÓN

Alrededor del 65% de las aplicaciones de los motores de inducción corresponden a bombas, ventiladores

y compresores; en la mayoría de estas aplicaciones, los motores operan significativamente por debajo de sus valores nominales de carga; el voltaje aplicado al estator, crea un campo magnético rotatorio que induce corrientes en el rotor, generándose par en el eje; si no se requiere el par nominal, el máximo campo magnético tampoco se requerirá; la corriente que produce el campo magnético adicional aumenta las pérdidas por efecto Joule en las resistencias, disminuyendo el rendimiento del motor.

En muchos complejos industriales, los motores de inducción son controlados mediante convertidores de frecuencia con la técnica de control U/f, la cual se basa en el mantenimiento de una relación voltios hertz (U/f) apropiada para la demanda de par exigido por la carga; estos accionamientos tienen flexibilidad de configuración para adaptarse a las necesidades de la carga pudiendo el usuario especificar la curva U/f deseada. Sin embargo, la mayoría de las veces no se conocen los criterios prácticos de ajuste de la curva U/f, lo que no permite explotar al máximo las posibilidades del accionamiento.

En el control óptimo de motores de inducción uno de los problemas que se ha considerado es el de maximizar el rendimiento (Ramírez, 1998); éste se obtiene minimizando la energía consumida por la máquina en un intervalo de tiempo dado.

La mejora del rendimiento de los accionamientos para bombas y ventiladores se ha tratado de tiempo atrás; D.A. Jarc et. J.D. Robechek (1982), muestran como el uso de un accionamiento a velocidad variable para controlar flujo, a cambio de velocidad constante y válvula de estrangulación, permite mejoras en el consumo de energía; la mejora se obtiene en el aumento del rendimiento de la bomba; para la mejora del rendimiento del motor en régimen estacionario varios autores han buscado los puntos de operación óptimos por diferentes técnicas; D.S. Kirschen et. al. (1985) propusieron un método heurístico para variar el flujo en línea, buscando disminuir la potencia total de entrada para controles de tipo vectorial; P. Famouri et. al (1991) utilizan las ideas de Kirschen para obtener el deslizamiento óptimo para un control U/f; M.H. Park et. S.K. Sul (1984) obtienen, experimentalmente, los deslizamientos óptimos para diferentes puntos de operación en controles U/f; otros autores han atacado el problema de manera analítica; A. Kusko et. D. Galler (1983) calculan el deslizamiento óptimo que minimiza las pérdidas por efecto Joule de la máquina; S.I. Seleme Jr. et. C. Canudas de Wit (1992) consideran adicionalmente la energía magnética almacenada en las inductancias; García et. al. (1992) consideraron adicionalmente las pérdidas en el núcleo.

La mayoría de los algoritmos heurísticos fueron validados en bancos de prueba de laboratorio; estos algoritmos resultan relativamente complejos para su

aplicación en un accionamiento industrial comercial con control U/f; aunque algunos de los resultados teóricos son relativamente simples de implementar, no se conocen reportes de su aplicación en accionamientos industriales comerciales.

A continuación se presenta un resultado sencillo que permite calcular una curva óptima U/f que mejore el rendimiento del motor cuando éste acciona bombas centrífugas o ventiladores, donde el par varía con el cuadrado de la velocidad; en la sección 2 se revisa brevemente la técnica de control U/f; posteriormente, se aplica la condición de flujo óptimo obtenida por S.I. Seleme Jr. et. C. Canudas de Wit (1992), adaptado a bombas y ventiladores; en la sección 4, se presentan resultados experimentales realizados en el Laboratorio de Accionamientos Eléctricos de la Universidad del Valle; finalmente, se presentarán las conclusiones de este trabajo.

2. TECNICA DE CONTROL VOLTIOS HERTZ

La técnica de control Voltios/Hertz (U/f) se basa en un modelo estático del motor en el que se considera despreciable la resistencia de estator R_s , y se asumen voltajes de estator sinusoidales y simétricos.

Cuando un motor hace parte de un accionamiento de velocidad variable, la magnitud RMS del voltaje de estator U_s y su frecuencia w_a pueden diferir de sus valores nominales U_{s0} , w_{a0} ; entonces el par normalizado en estado estable está dado por la expresión (Leonard, 1985):

$$y = y_{p0} \left(\frac{U_s / w_a}{U_{s0} / w_{a0}} \right)^2 \frac{2}{S / S_p + S_p / S} \quad (1)$$

Donde y_{p0} es el par máximo al voltaje y frecuencia nominales; S/S_p es el valor normalizado del deslizamiento (S_p es el deslizamiento para el cual el par es máximo), dado por:

$$\frac{S}{S_p} = \frac{\sigma \cdot w_s \cdot L_r}{R_r} \quad (2)$$

Donde σ es el factor de dispersión del motor, L_r la inductancia en el rotor, R_r la resistencia de rotor y w_s la frecuencia en el rotor o frecuencia de deslizamiento. Considerando la resistencia de estator R_s despreciable, la magnitud del flujo del estator se puede escribir como (Vas, 1992):

$$\|\Phi_s\| = k \frac{U_s}{w_a} \quad (3)$$

Donde k es una constante de proporción; sustituyendo la ecuación (3) en (1), se pudo observar que el par varía

con el cuadrado del flujo; por tanto el par se puede expresar:

$$y = k_1 \|\Phi_s\|^2 \frac{1}{k_2 w_s + \frac{1}{k_2 w_s}} \quad (4)$$

k_1 y k_2 son constantes.

Esta ecuación sugiere dos formas posibles de control:

1. Mantener el flujo constante y usar el deslizamiento para variar el par y la velocidad.
2. Mantener el deslizamiento constante, usando el flujo para variar el par y la velocidad.

La primera es la forma clásica del control U/f; la segunda permite adecuar el estado magnético de la máquina con el punto de operación de par y velocidad, lo que mejora su rendimiento; es esta estrategia la que se discutirá con más detalle en la siguiente sección. Aparte de lo anterior, hay que considerar que la relación U/f tiene otras restricciones, por ejemplo, a baja velocidad debe compensarse la caída de tensión en R_s para mantener el flujo deseado debido a que la resistencia de estator se porta dominante frente a la inductancia magnetizante; por otro lado, el flujo debe reducirse a alta velocidad debido a que los actuadores (inversores) tienen un límite de tensión posible a suministrar.

La figura 1 muestra un diagrama de bloques de la técnica de control U/f donde el bloque "función generador" debe considerar los casos mencionados. La idea básica es, por tanto, imponer la magnitud de la tensión U_s y la frecuencia w_a apropiados para imponer una velocidad deseada vía la frecuencia de

deslizamiento, y un flujo apropiado vía la magnitud de la tensión.

La técnica de control Voltios/Hertz, es una técnica sencilla y muy simple de implementar; aprovechando dicha característica se tratará, en la siguiente sección, de encontrar la relación de voltaje y frecuencia a aplicar para obtener el mejor rendimiento del motor cuando éste acciona una bomba centrífuga o un ventilador.

3. CARACTERISTICA U/F OPTIMA

Seleme Jr. y Canudas de Wit (1992), obtuvieron la magnitud del flujo de rotor, con la cual se alcanza la condición de operación a mínima energía:

$$\|\Phi_r\| = \beta \cdot \sqrt{|y|} \quad (5)$$

Donde β es una constante; note que esta condición exige variar la magnitud del flujo de la máquina en función del par generado; considerando la resistencia de estator despreciable y la reactancia magnetizante muy grande respecto a la reactancia de dispersión, el flujo de estator se puede aproximar a:

$$\|\Phi_s\| \approx \frac{L_m}{L_r} \|\Phi_r\| \quad (6)$$

de (1), (5) y (6) se observa que el motor opera a deslizamiento normalizado S/S_p constante, lo que significa, frecuencia de deslizamiento w_s constante. Si el par es constante, de acuerdo con la ecuación (5) el flujo debe ser constante y por ende, la relación U/f

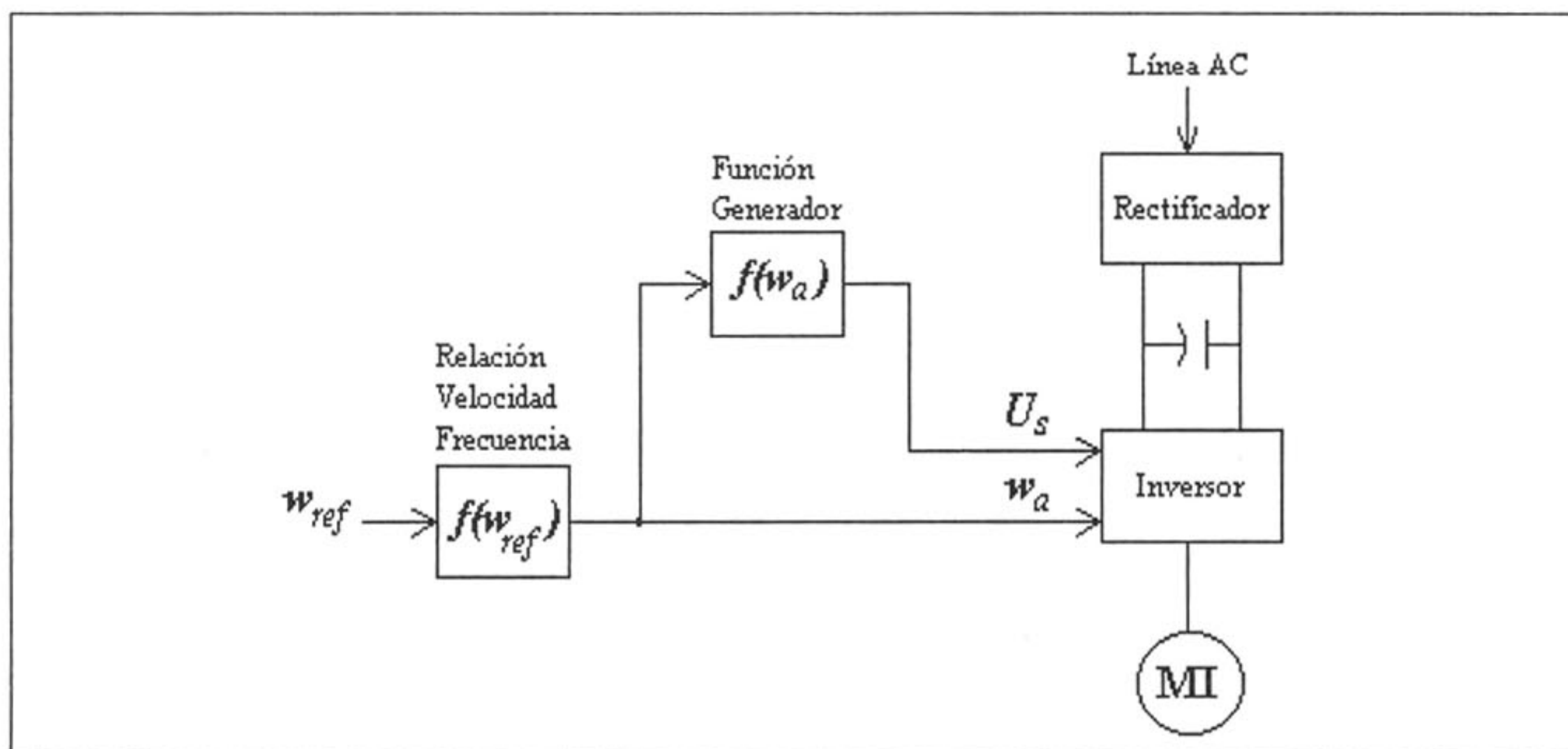


Figura 1. Diagrama de Bloques del Control U/f.

pero si el par varía con el cuadrado de la velocidad como es el caso de bombas centrífugas y ventiladores, el flujo de estator será:

$$\|\Phi_s^*\| = k \cdot \frac{U_s}{w_a} = \beta \sqrt{k_3 w^2} = \beta \sqrt{k_3} w = k_4 w \quad (7)$$

por tanto, el flujo del estator debe variar proporcionalmente con la velocidad, de modo que el voltaje de estator que se debe aplicar al motor para obtener flujo óptimo es:

$$U_s^* = k_5 |w| w_a \quad (8)$$

por otro lado:

$$w = w_a - w_s \quad (9)$$

donde v es el número de pares de polos, entonces:

$$U_s^* = k_5 (w_a^2 - w_s w_a) \quad (10)$$

Donde la frecuencia de deslizamiento permanece constante en su valor nominal w_{s0} en todo el rango de velocidad.

En general, el motor de inducción presenta su máxima eficiencia entre el 75% y el 100% del par nominal; se puede por tanto, especificar k_5 para el punto nominal de la máquina:

$$k_5 = \frac{U_{s0}}{w_{a0}^2 - w_{s0} \cdot w_{a0}} \quad (11)$$

4. VALIDACION EXPERIMENTAL

4.1. Descripción banco de pruebas

El banco de pruebas utilizado para la evaluación experimental consta de los siguientes equipos:

Un convertidor de frecuencia industrial de 6 HP que proporciona una tensión trifásica de magnitud y frecuencia variable de acuerdo con una característica determinada (U/f Lineal o U/f parabólica).

Un motor de inducción trifásico jaula de ardilla, con los siguientes datos de placa: 1/4 HP, 2870 r.p.m., 220 V., 50 Hz., Conectado en estrella con neutro aislado. $R = 9.88\Omega$, $R_r = 8.78\Omega$, $L_s = 0.898H$, $L_r = 0.917H$, $L_m = 0.860H$.

Un generador de corriente directa de excitación independiente, 1/4 HP, 3000 r.p.m., 220 V D.C.

Un Emulador de Carga Mecánica (MLU 188, marca Feedback), el cual controla la corriente entregada por el generador de corriente continua, de modo que se controla el par en el eje.

Un tacogenerador 2Vd.c./1000rev/min., instalado en el eje del generador de corriente continua.

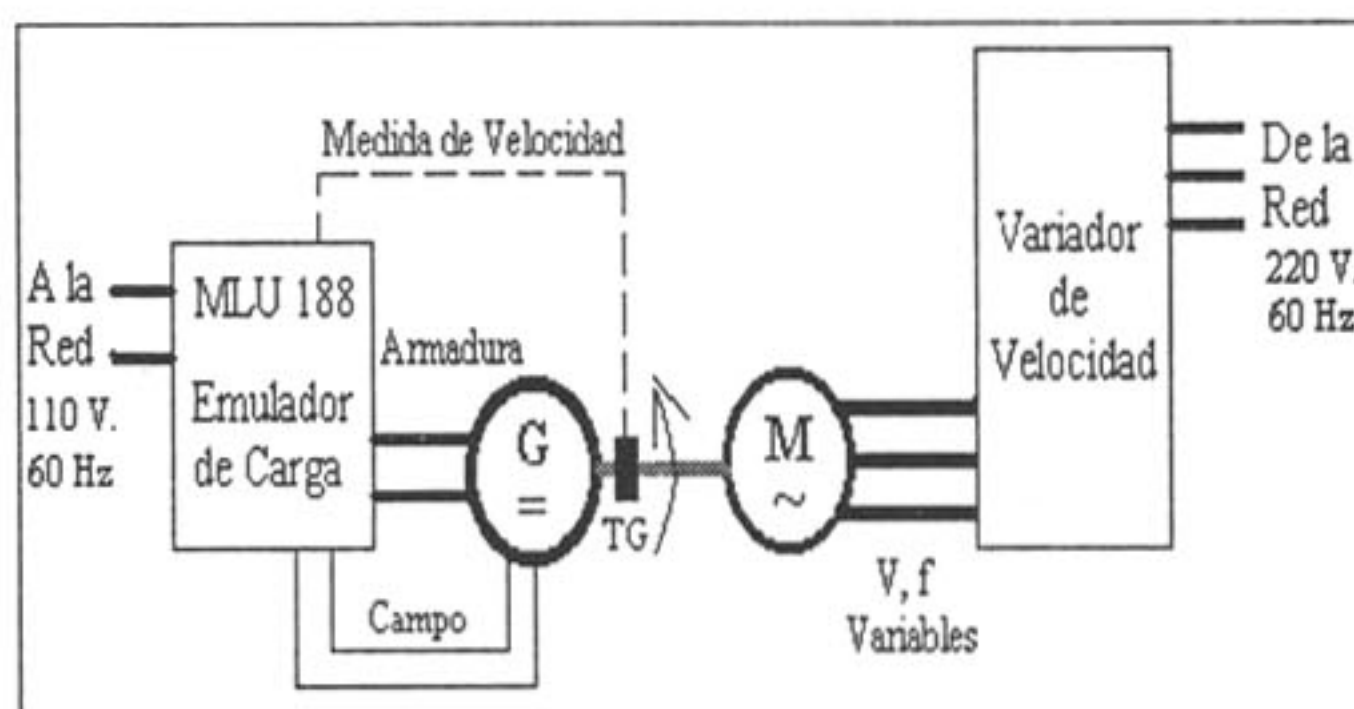


Figura 2. Diagrama de Conexión del Banco de Pruebas

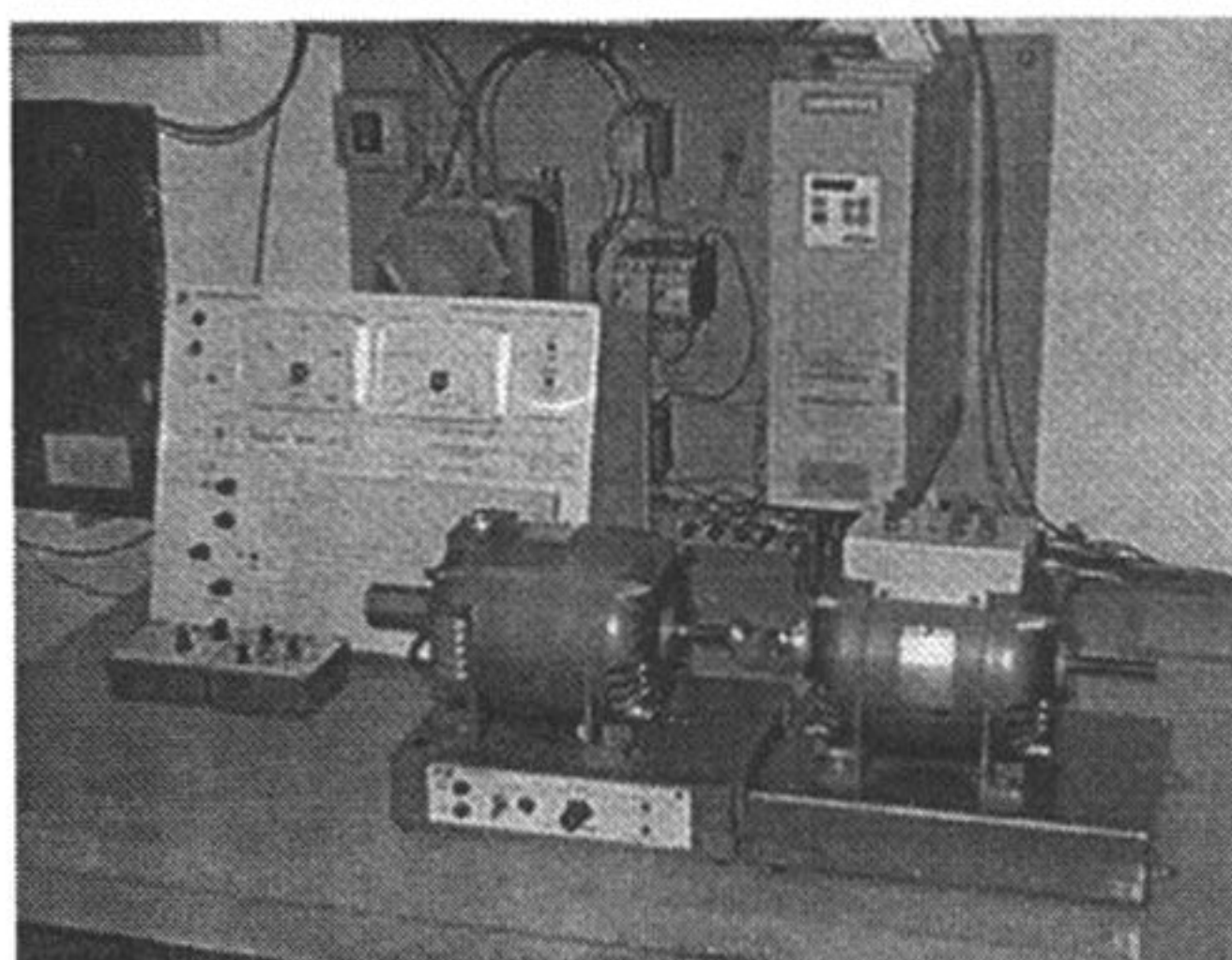


Figura 3. Banco de Pruebas del Laboratorio de Accionamientos - Universidad del Valle

PAR - Nm	VELOCIDAD - r.p.m.
0.650	2870
0.450	2391
0.290	1913
0.175	1489

TABLA 1. Puntos de la Curva Par Velocidad de la Carga Emula

El objetivo del experimento es comparar el desempeño energético de diferentes curvas U/f; se comparan la curva U/f óptima (CME) con la curva parabólica que propone el fabricante del equipo utilizado (PF), además de la curva U/f lineal o clásica (LF), dadas por las siguientes relaciones:

CME: $U_s = 0.092 (f_a^2 - 2.16 f_a)$
(Obtenida de acuerdo al procedimiento descrito en la sección anterior).

PF: $U_s = 0.0499 f_a^2 + 1.9162 f_a$
(Obtenida mediante Regresión polinomial de orden 2, a partir de datos medidos).

LF: $U_s = 4.4 f_a$
(Obtenida mediante Regresión lineal, a partir de datos medidos).

Donde U_s es la magnitud RMS del voltaje de línea a línea en Voltios y f_a es la frecuencia aplicada en Hertz. Las curvas se ilustran en la siguiente figura.

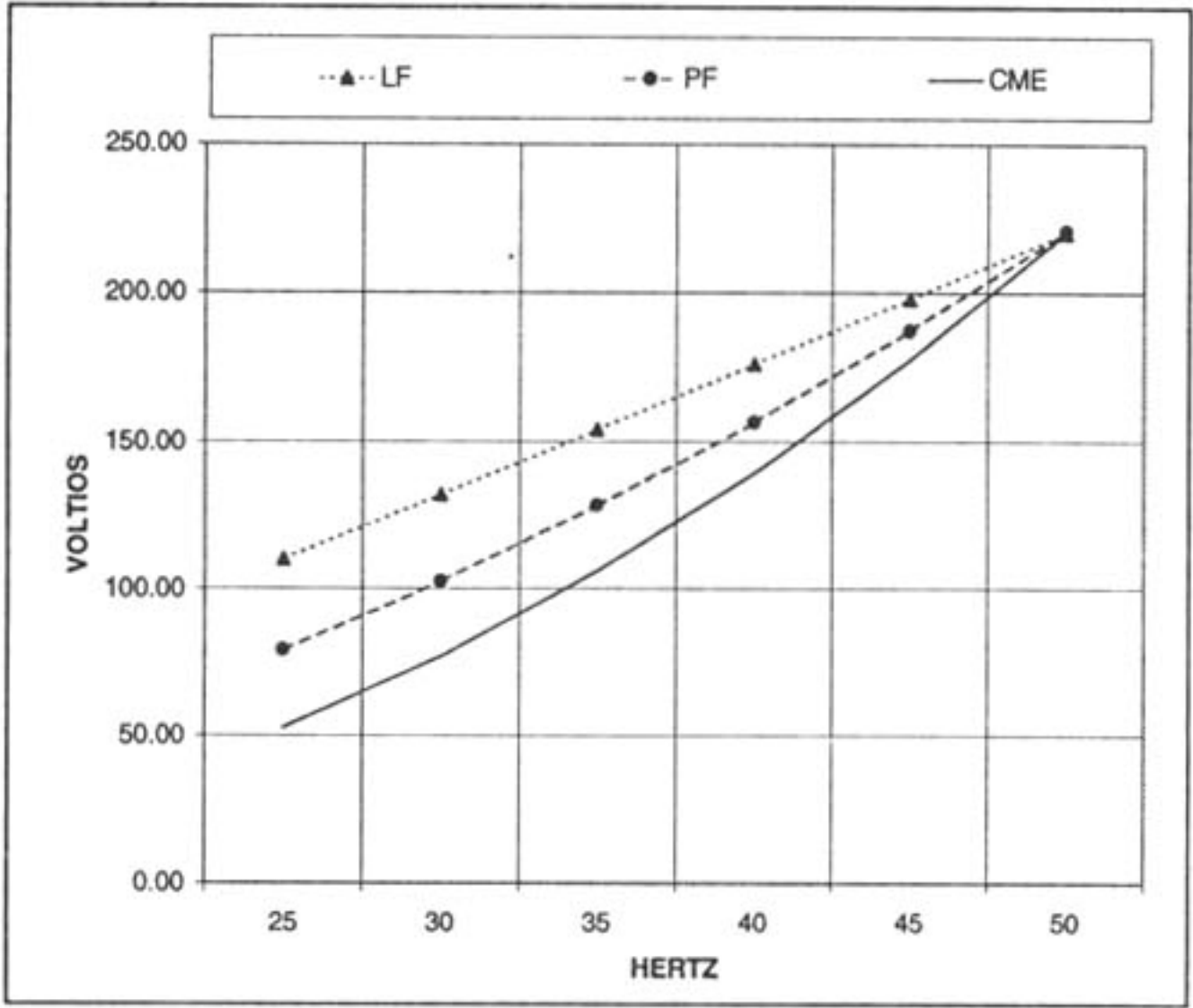


Figura 4. Voltaje frente a frecuencia a aplicar.

La técnica propuesta sigue las mismas hipótesis de simplificación de la técnica U/f clásica pues ésta también se concibe como una técnica basada en el control de la magnitud de la tensión y la frecuencia aplicada; por ello, los valores de tensión a muy baja velocidad y de saturación a alta velocidad no se consideran aquí; en estas regiones de operación la curva se definiría con los mismos criterios utilizados en el control U/f clásico.

4.2. Resultados de laboratorio

A pesar de que muchos convertidores de frecuencia poseen facilidad de configuración, el poseído por el laboratorio no cuenta con esto, en su lugar trae una curva preestablecida para uso con bombas (PF); debido a lo anterior, el experimento se ejecutó manteniendo frecuencia de deslizamiento constante en su valor nominal (condición de mínima energía); lo cual se logró determinando el valor de par y velocidad a los cuales iba a trabajar el accionamiento (punto de operación); con los valores de velocidad y de frecuencia de deslizamiento dados se calcula el valor de la frecuencia a aplicar luego se manipula la magnitud de la tensión hasta que la velocidad de la máquina alcance el valor previamente establecido; a este voltaje se le denominó CME aplicado. La siguiente tabla muestra la diferencia entre la curva CME teórica y la que verdaderamente se aplicó además del comportamiento del voltaje y la frecuencia con las otras técnicas (ver tabla 2). Obsérvese que la tensión que se debe aplicar por debajo de la velocidad nominal debe hacerse mayor a la curva CME teórica debido principalmente a que el modelo no considera la caída de tensión en R_s ni tampoco las pérdidas mecánicas, las pérdidas en el núcleo y las debidas a armónicos, particularmente

importante en un motor de pequeña potencia como el utilizado; en motores de mayor potencia de uso industrial, la diferencia entre las curvas experimental y teórica será menor.

VELOCIDAD	PAR	VOLTAJE (V)				FRECUENCIA (Hz)		
		LF	PF	CME Teórico	CME Aplicado	LF	PF	CME
1489	0.175	114.2	87.3	62.3	83.9	25.97	27.01	27.12
1913	0.289	146.2	123.2	100.0	118.9	33.23	33.97	34.07
2391	0.451	182.3	168.2	153.8	165.0	41.45	41.81	41.98
2870	0.650	220.0	220.0	220.0	220.0	50.00	50.00	50.00

Tabla 2. Comportamiento de los Voltajes y frecuencias

A continuación se presentan los resultados obtenidos con la curva CME aplicada frente a la técnica propuesta por el fabricante del equipo utilizado (PF) y la técnica U/f clásica (LF).

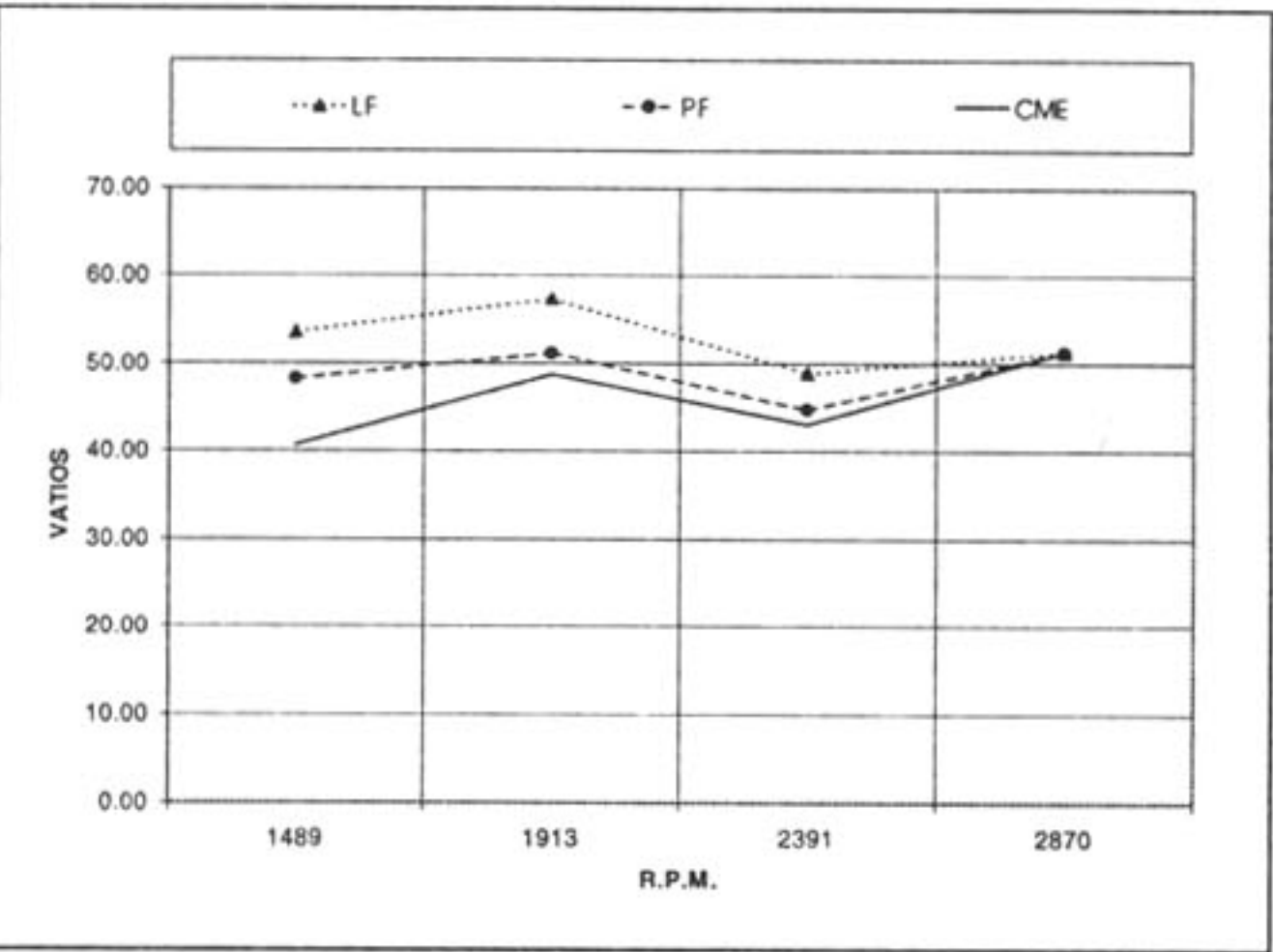


Figura 5. Pérdidas frente a la Velocidad

Obsérvese que las menores pérdidas corresponden a la técnica CME aplicada; al 80% de la velocidad nominal, 2296 rpm, el CME gana casi 2 vatios respecto a la PF, un poco más de un punto porcentual de eficiencia mientras que con respecto a la LF, CME gana casi 6 vatios, lo que equivale a casi cuatro puntos porcentuales de eficiencia como se ilustra en la siguiente figura:

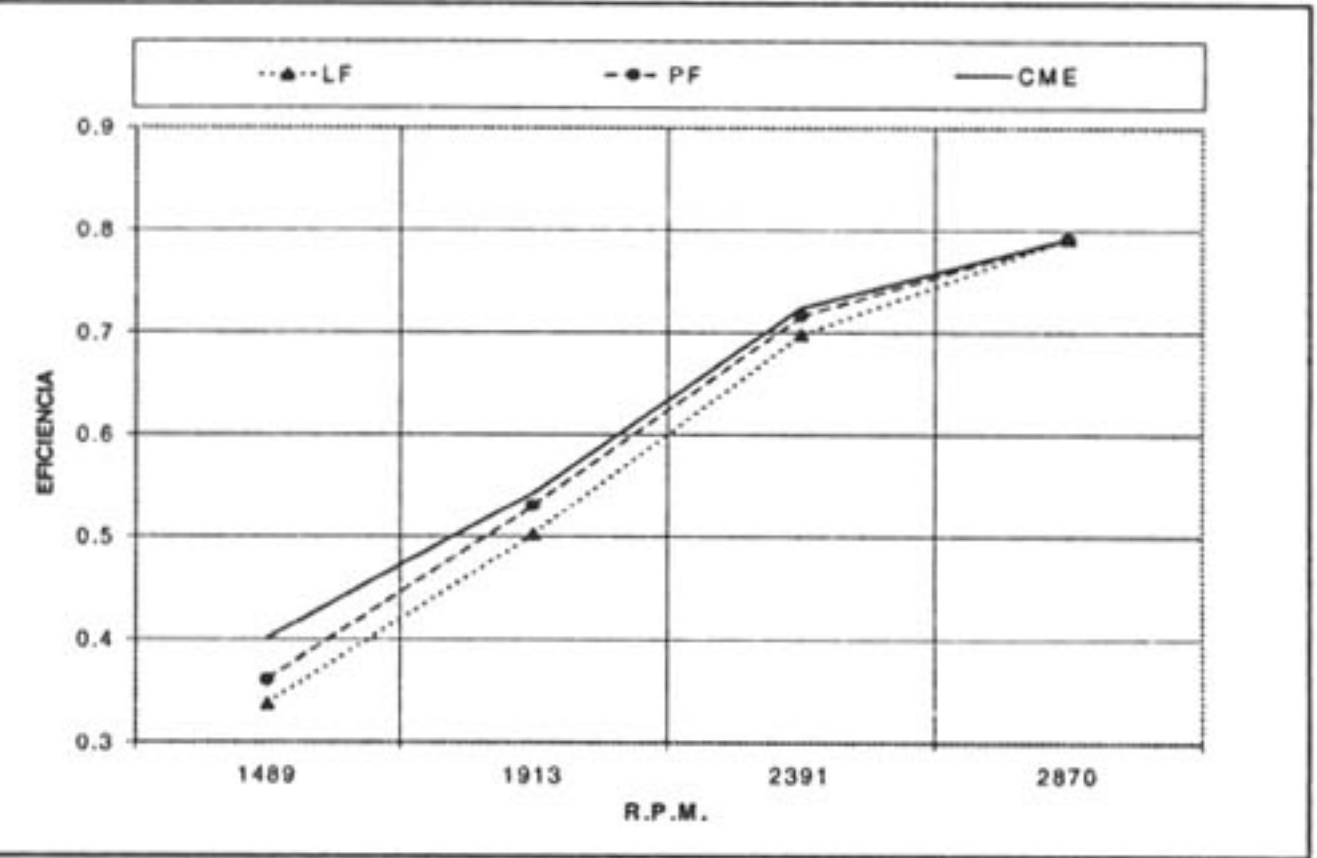


Figura 6. Eficiencia frente a Velocidad

Obsérvese también que a baja velocidad, cuando el motor opera mas lejos de su punto nominal, se obtiene una disminución en las pérdidas del 24% lo que da mejoras de 6 puntos porcentuales en la eficiencia. La técnica CME también aporta al mejoramiento del factor de potencia, como se observa en la siguiente figura:

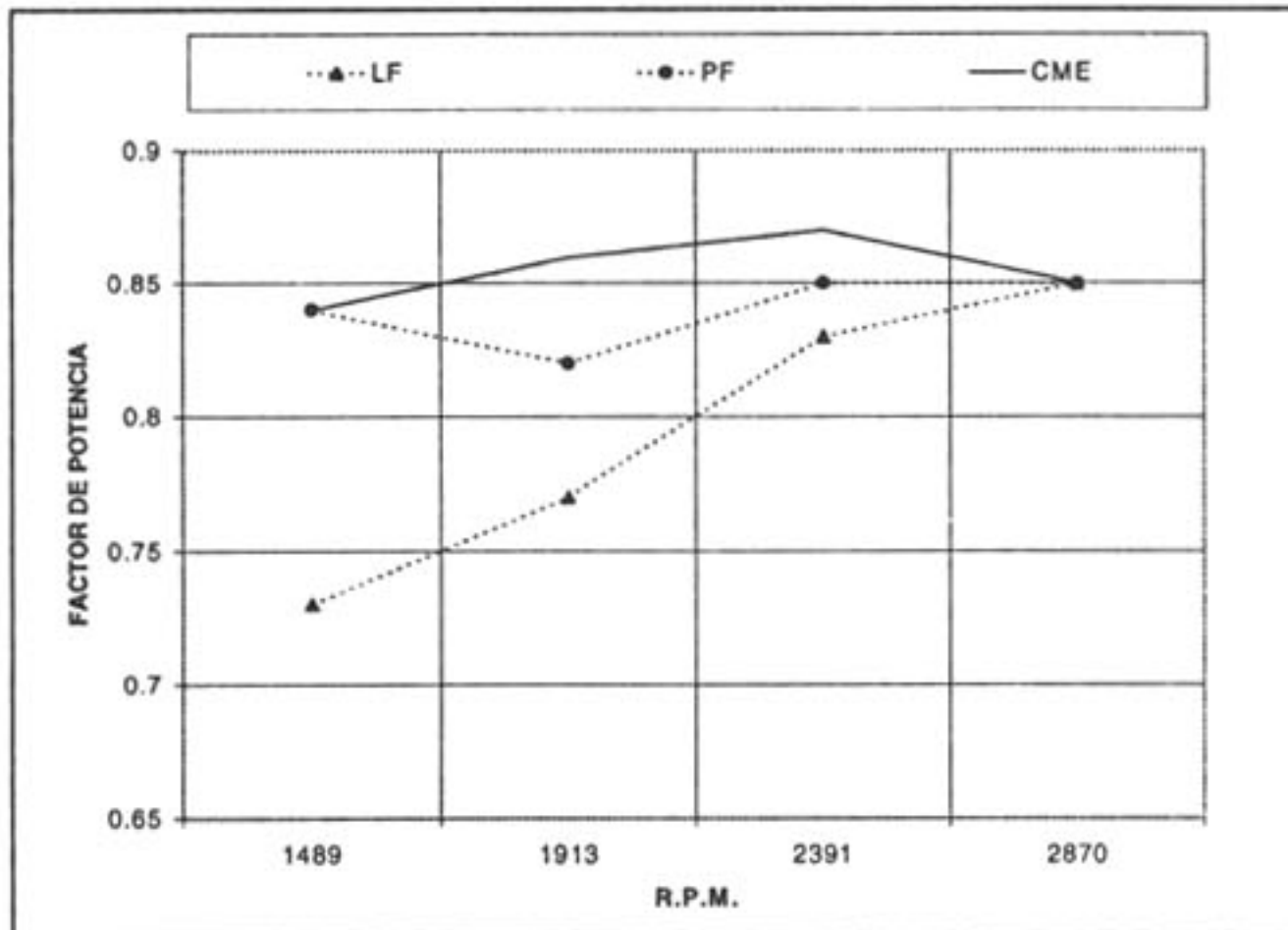


Figura 7. Factor de Potencia frente a la Velocidad

El factor de potencia obtenido con el CME se eleva un poco entre el 70 y 80% de la velocidad nominal y siempre está por encima de las técnicas anteriores.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología para seleccionar curvas U/f que mejoren la eficiencia en un accionamiento para bombas y ventiladores; debido a la sencillez del método éste es fácil de configurar en dichos accionamientos industriales sin pasar por extensos o dispendiosos experimentos.

Se lograron ahorros de energía hasta de 12 vatios (24% del total de pérdidas), con mejora del factor de potencia hasta de 10 puntos porcentuales.

En el presente, se trabaja en la aplicación de la técnica U/f óptima en un accionamiento industrial de mayor potencia en la industria petrolera.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] FAMOURI, F.; Cathey, J.J. (1991). "Loss minimization control of an induction motor drive," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 27, No.1, pp.32-37.
- [2.] GARCIA, G. et. al. (1992). "An efficient controller for an adjustable speed induction motor drive". IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol.41, No.5, pp.533-539.

- [3.] KIRSCHEN, D.S.; Novotny, D.W et Suwanwisoot, W. (1984). "Minimizing induction motor losses by excitation control in variable frequency drives," IEEE Trans. on Industry Applications, vol.20, No.5, pp.1244-1250.
- [4.] KUSKO, A.; Galler, D. (1983). "Control means for minimization of losses in ac and dc motor drives", IEEE Trans. On Industry Applications, vol.19, No.4, pp.561-564.
- [5.] LEONARD, W. (1985). "Control of Electrical Drives", Springer- Verlag, New York.
- [6.] RAMÍREZ, J.M. (1998). "Contribution a la Commande Optimale des Machines Asynchrones", Tesis de Doctorado, Institut National Polytechnique de Grenoble, p.p.17-27, Grenoble.
- [7.] SELEME Jr. S.I. et Canudas de Wit, C. (1992). Minimum energy operation conditions of induction motors under torque regulation. Workshop on Motion Control for Intelligent Automation, p.p. 127-133, Perugia, Italy.
- [8.] VAS, P. (1992). "Electrical Machines and Drives", Clarendon Press, Oxford, 808 p.

AUTORES

John Jairo Martínez Molina, Nacido en Cali, Colombia, 1972, Ingeniero Electricista, Universidad del Valle, 1997, Magister en Automática, Universidad del Valle, 2000.

Áreas de interés: Control de Motores y Control Óptimo.

Cali, Colombia.

jjmartin27@LatinMail.com



José Miguel Ramírez Scarpetta.

Nacido en Cali, Colombia, 1961. Ingeniero Electricista (1986), Magister en sistemas de Generación de Energía (1989) de la Universidad del Valle, Cali, Colombia; DEA (1994) y Doctor (1998) en Automática-Productiva del Instituto Nacional Politécnico de

Grenoble, Grenoble, Francia. Profesor Titular desde 1988 de la Escuela en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Ha sido consultor de empresas del sector eléctrico nacional (1992-1993, 1998, 1999) en sistemas de excitación para generadores sincrónicos. Sus áreas de interés en investigación incluyen el control óptimo y no-lineal, con su aplicación a sistemas electromecánicos.

jomiram@eiee.univalle.edu.co