

## **CAPITULO 3. Control de velocidad de los motores de inducción.**

### **3.1 Introducción.**

Hasta la llegada de los modernos controladores de estado sólido, los motores de inducción no eran las máquinas adecuadas para aplicaciones que requerían considerable control de velocidad. El rango normal de operación de un motor de inducción típico está confinado a menos de 5% de deslizamiento y la variación de la velocidad en ese rango es más o menos directamente proporcional a la carga sobre el eje del motor. Aun si el deslizamiento fuera mayor, la eficiencia del motor sería muy pobre puesto que las pérdidas en el cobre del rotor son directamente proporcionales al deslizamiento del motor [9].

Existen sólo dos técnicas para controlar la velocidad de un motor de inducción, una de las cuales consiste en variar la velocidad sincrónica (velocidad de los campos magnéticos del rotor y del estator) puesto que la velocidad del rotor siempre permanece cerca de  $n_{\text{sinc}}$ . La otra técnica consiste en variar el deslizamiento del motor para una carga dada [9].

La velocidad sincrónica de un motor de inducción está dada por:

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120f_e}{P} \quad (3.1)$$

en donde  $f_e$  es la frecuencia de línea, y P, el número de polos.

Por tanto las únicas formas en que se puede variar la velocidad sincrónica de la máquina son: 1) cambiando la frecuencia eléctrica y 2) cambiando el número de polos de la máquina. El control del deslizamiento puede ser llevado a cabo bien sea variando la resistencia del rotor o variando el voltaje en las terminales del motor [9].

### **3.2 Cambio del número de polos.**

Existen dos métodos importantes para cambiar el número de polos en un motor de inducción:

1. El método de polos consecuentes.
2. Devanados de estator múltiples.

El primer método es antiguo (1897) y se basa en el hecho de que el número de polos en los devanados estatóricos de un motor de inducción se puede cambiar con facilidad en relación 2:1 con sólo efectuar simples cambios en la conexión de las bobinas. En la figura 3.1 se muestra el estator de un motor de dos polos adecuado para este método [9].

Al variar los polos, se produce un funcionamiento relativamente satisfactorio puesto se ha variado el número de polos tanto del estator como del rotor. Dichos motores polifásicos de jaula y monofásicos se denominan motores de inducción de velocidad múltiple. Estos motores poseen devanados estatóricos, específicamente diseñados para la variación de polos mediante los métodos de conmutación manual y/o automática, en que los diversos devanados estatóricos primarios se conectan en combinación serie paralelo. Los motores de inducción de velocidad múltiple son asequibles en combinaciones de velocidad síncrona doblada o cuatuplicada, mediante la variación de polos [5].

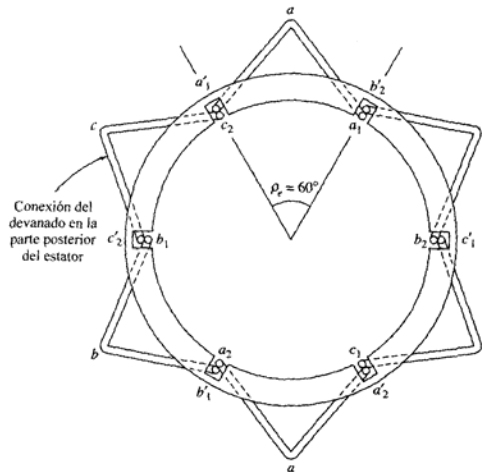


Figura 3.1. Devanado estatórico de dos polos para cambio de polos [9].

En la figura 3.2 se puede ver cómo en una configuración de dos polos, cuando la conexión en una de las dos bobinas se invierte, los dos son polos norte y el flujo magnético retorna al estator en puntos intermedios entre las dos bobinas. Los polos sur son llamados polos consecuentes y el devanado es ahora de cuatro polos [9].

Como método de control de velocidad sólo puede utilizarse para producir velocidades relativamente fijas (600, 900, 1200 ó 1800 r.p.m.) para un motor de inducción cuya velocidad varía sólo ligeramente (del 2 al 8%) desde vacío a plena carga.

La variación polar como método de control de la velocidad presenta las siguientes ventajas:

- (1) elevado rendimiento a cualquier ajuste de la velocidad,
- (2) buena regulación de la velocidad para cualquier ajuste de la misma,
- (3) simplicidad de control en la obtención de cualquier velocidad determinada mediante la conmutación manual o automática, y
- (4) reguladores de velocidad auxiliares asociados al motor relativamente baratos [5].

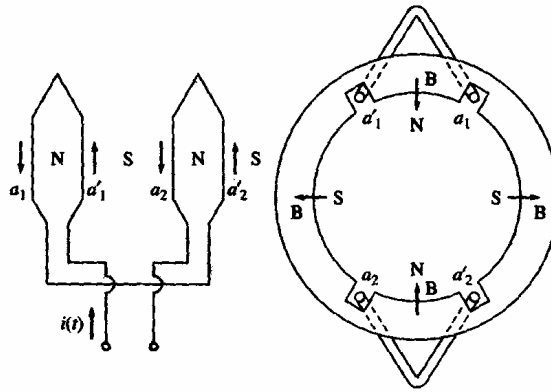


Figura 3.2. Devanado de 2 a 4 polos mediante polos consecuentes [9].

La variación polar se emplea, primordialmente, donde se desee obtener la versatilidad de dos o cuatro velocidades relativamente constantes que estén ampliamente separadas. Por ejemplo, en taladradoras para perforar materiales de diferente dureza y grosor [5].

Sus mayores inconvenientes son:

- (1) Se requiere un motor especial, que posea los devanados necesarios y las terminales llevados al exterior del estator para intercambio de polos;
- (2) No puede conseguirse un control gradual y continuo de la velocidad .

Un inconveniente del método de polos consecuentes es que las velocidades obtenidas están en relación 2:1, y no se pueden conseguir velocidades intermedias mediante los procedimientos de conmutación. Este inconveniente queda superado mediante la utilización de dos devanados independientes, cada cual creando un campo y un número de

polos total independientes. Por ejemplo, si hablamos de un motor trifásico de dos devanados, uno de ellos se bobina para cuatro polos, y el otro, para seis polos. De esta forma, el primer devanado producirá una velocidad elevada de 1800 r.p.m., mientras que el segundo, una baja de 1200 r.p.m. [5].

Cuando el principio del motor de inducción de velocidad múltiple, de doble devanado, se combina con el método de conexión de polos consecuentes, se obtiene un total de cuatro velocidades síncronas (1800, 1200, 900 y 600 r.p.m.) [5].

Los inconvenientes de dicho motor en comparación con el de polos subsecuentes son:

1. Mayor tamaño y peso para la misma potencia de salida (puesto que sólo se emplea un devanado al mismo tiempo).
2. Costo más elevado debido al mayor tamaño de la carcasa
3. Mayor reactancia de dispersión porque las ranuras necesarias para los dos devanados son más profundas.
4. Regulación más pobre de la velocidad debido a la mayor reactancia de cada devanado [5].

### **3.3 Control de la resistencia del secundario.**

La inserción de una resistencia rotórica suplementaria produce un incremento en el deslizamiento del rotor. Este método presenta las siguientes ventajas:

1. Variación de la velocidad sobre una amplia gama por debajo de la velocidad síncrona del motor.

2. Simplicidad de funcionamiento, tanto desde el punto de vista manual como automático.

3. Costos iniciales y de mantenimiento bajos para los reguladores manuales y automáticos [5].

Sin embargo, presenta los inconvenientes de:

1. Bajo rendimiento, debido al aumento de las pérdidas de la resistencia del rotor ( a grandes valores de deslizamiento, estas pérdidas son casi las totales, ver figura 3.3).

2. Pobre regulación de la velocidad [5].

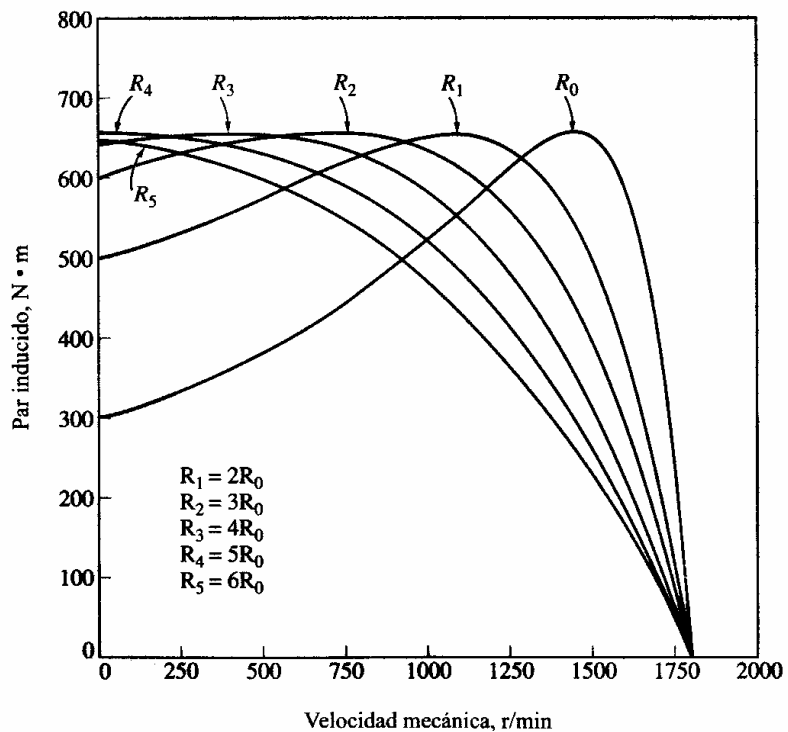


Figura 3.3. Control de velocidad mediante variación de la resistencia del rotor [9].

El motor de inducción de rotor bobinado se emplea mucho con control de la resistencia secundaria para cargas de naturaleza intermitente, requiriendo par de arranque elevado y aceleración y desaceleración relativamente rápidas, tales como, grúas de fundiciones, siderúrgicas y donde una elevada corriente de arranque ocasione serias perturbaciones de la línea [5].

Ya que la velocidad y el deslizamiento de un motor de inducción de rotor bobinado son proporcionales a la resistencia del rotor, el método de control de la velocidad mediante la variación de la resistencia secundaria del rotor se denomina a veces control del deslizamiento [5].

### **3.4 Control del voltaje de línea.**

El par del motor de inducción bajo condiciones de arranque y de marcha varía con el cuadrado del voltaje aplicado al primario del estator. Para una carga determinada, reduciendo el voltaje de línea se reducirá el par con el cuadrado de la reducción del voltaje de línea, y la reducción del par producirá un incremento del deslizamiento. Aunque reducir el voltaje de línea y el par como método de incrementar el deslizamiento servirá para controlar la velocidad hasta cierto grado en motores monofásicos de fase partida, particularmente, y en motores de inducción pequeños, en general, resulta el método menos satisfactorio de control de la velocidad para motores polifásicos, ya que el par máximo a la mitad del voltaje nominal es un cuarto del mismo a dicha tensión nominal. Por lo tanto, no es posible obtener el par nominal, ni siquiera la mitad del mismo, porque la velocidad del

motor disminuye rápidamente y éste se para antes de que pueda desarrollar el par nominal. Entonces, para que este método funcione, es necesario que el par de carga se reduzca considerablemente a medida que se reducen el voltaje y la velocidad en el estator; por lo que funcionará de forma aceptable en un motor parcialmente cargado [5].

Si una carga tiene una característica par-velocidad como la mostrada en la figura 3.4, la velocidad del motor puede ser controlada en un rango limitado, variando el voltaje de línea. Este método de control de velocidad se utiliza a veces para manejar pequeños motores de ventilación [9].

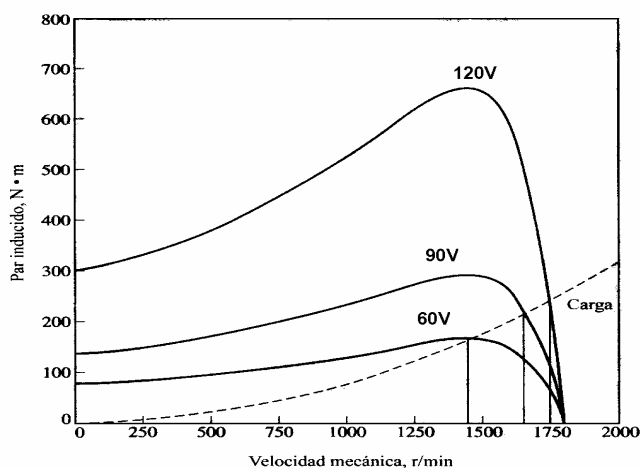


Figura 3.4. Control de velocidad por relación del voltaje de línea [9].

### 3.5 Control de la frecuencia de línea.

Si se cambia la frecuencia eléctrica aplicada al estator de un motor de inducción, la velocidad de rotación de sus campos magnéticos  $n_{\text{sinc}}$  cambiará en proporción directa al cambio de frecuencia eléctrica, y el punto de vacío sobre la curva característica par-velocidad cambiará con ella. La velocidad sincrónica del motor en condiciones nominales se conoce como velocidad base. Utilizando control de frecuencia variable, es posible ajustar



la velocidad del motor por encima o por debajo de la velocidad base, tal como se muestra en la figura 3.5; en donde la velocidad base es de 1800 r.p.m. [9].

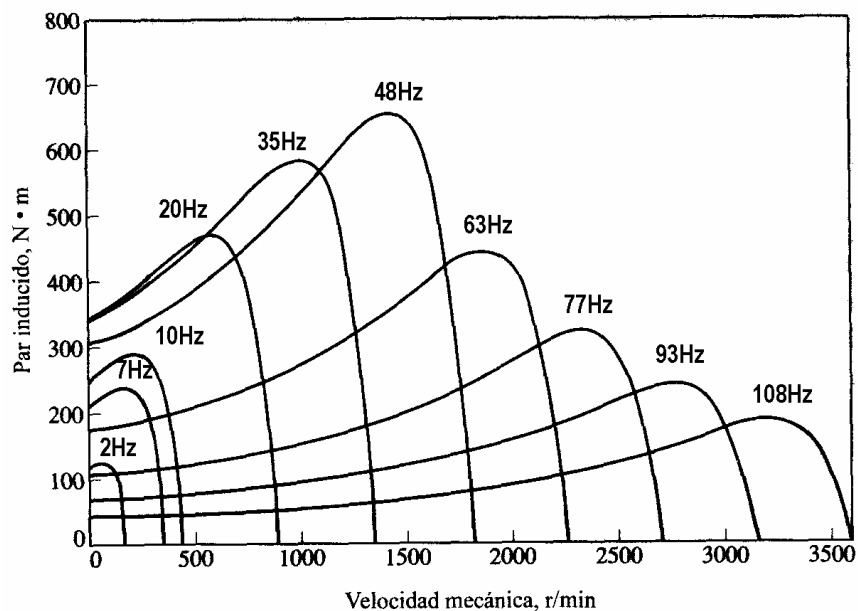


Figura 3.5. Curvas características par-velocidad para todas las frecuencias [9].

### 3.6 Control de la velocidad mediante relación voltaje/frecuencia.

Cuando se opera a velocidades inferiores a la velocidad base del motor es necesario reducir el voltaje aplicado a las terminales del estator para obtener una operación adecuada. El voltaje aplicado a las terminales del estator deberá disminuir linealmente con la disminución de la frecuencia en él. Este proceso se llama degradación (derating). Si esto no se hace, se saturará el acero del núcleo del motor de inducción y fluirán corrientes de magnetización excesivas en la máquina [9].

Para entender esto, recuérdese que el flujo en el núcleo de un motor de inducción se puede encontrar aplicando la ley de Faraday:

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.2)$$

Si se aplica un voltaje  $v(t) = V_M \text{sen} \omega t$  al núcleo, el flujo  $\phi$  resultante es:

$$\phi(t) = \frac{1}{N_p} \int v(t) dt = \frac{1}{N_p} \int V_M \text{sen} \omega t dt \quad (3.3)$$

$$\phi(t) = -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t \quad (3.4)$$

Nótese que la frecuencia eléctrica aparece en el denominador de esta expresión. Entonces, si la frecuencia eléctrica aplicada al estator disminuye en 10%, mientras que la magnitud del voltaje aplicado al estator permanece constante, el flujo en el núcleo del motor se incrementará cerca del 10%, al igual que la corriente de magnetización [9].

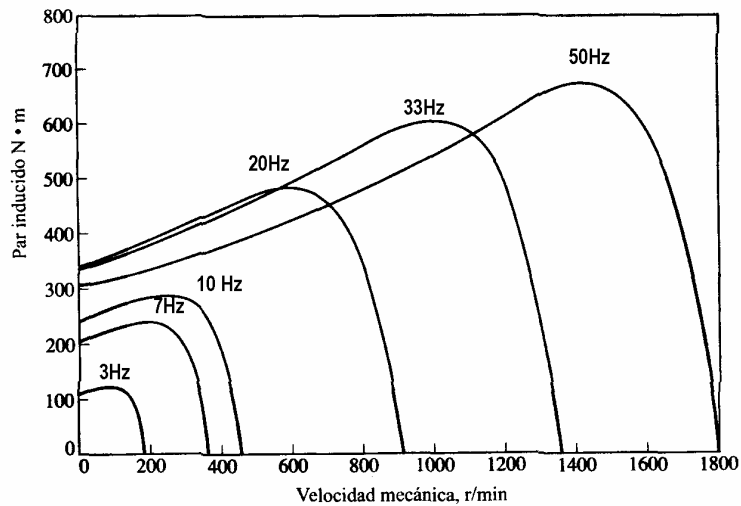


Figura 3.6. Curvas par-velocidad para velocidades por debajo de la velocidad base, suponiendo que el voltaje de línea disminuye linealmente con la frecuencia [9].

Cuando el voltaje aplicado a un motor de inducción varía linealmente con la frecuencia por debajo de la velocidad base, el flujo en el motor permanece aproximadamente constante [9].

La figura 3.6 muestra una familia de curvas características par-velocidad del motor de inducción para velocidades menores que la velocidad base suponiendo que la magnitud del voltaje del estator varía linealmente con la frecuencia [9].

Cuando la frecuencia eléctrica aplicada al motor excede la frecuencia nominal del motor, el voltaje del estator es mantenido constante en el valor nominal. Cuando mayor sea la frecuencia eléctrica sobre la velocidad base, mayor será el denominador de la ecuación 3.4. Puesto que el término del numerador se mantiene constante cuando se opera sobre la frecuencia nominal, disminuyen el flujo resultante en la máquina y el par máximo.

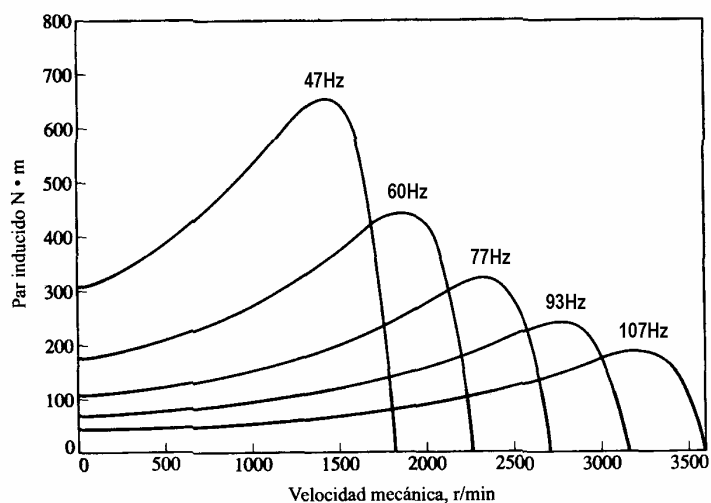


Figura 3.7. Familia de curvas características par-velocidad para velocidades por encima de la velocidad base y voltaje constante.

La figura 3.7 muestra una familia de curvas características par-velocidad del motor de inducción a velocidades por encima de la nominal, si el voltaje del estator se mantiene constante[9].

### 3.7 Técnicas de control para motores de inducción trifásicos.

#### 3.7.1 Concatenación.

Un motor de inducción de rotor devanado y uno de jaula de ardilla se acoplan mecánicamente al mismo eje y a la misma carga, y se conectan eléctricamente de forma que el segundo elemento reciba entrada de la excitación del estator desde el rotor en circuito abierto del primero. Si el primer motor tiene  $P_1$  polos, y el segundo tiene  $P_2$ , la velocidad síncrona de los dos motores a la frecuencia  $f_1$  es [5]:

$$S_1 = \frac{120f_1}{P_1} \quad \text{y} \quad S_2 = \frac{120f_1}{P_2} \quad (3.5)$$

y la velocidad para los dos motores concatenados en cascada directa:

$$S = \frac{120f_1}{P_1 + P_2} \quad (3.6)$$

La concatenación, como método de control de velocidad, posee la ventaja de variaciones de la velocidad más amplias y suaves de los motores de inducción por encima y

por debajo de las velocidades síncronas, en comparación con la variación polar y el control de la resistencia secundaria. Los inconvenientes, sin embargo, son:

1. Bajo rendimiento durante el funcionamiento en cascada.
2. Pobre regulación de la velocidad con resistencia de rotor añadida.
3. Bajo par de arranque y de vacío [5].

### 3.7.2 El sistema de Leblanc.

Este sistema es análogo a la concatenación de motores de rotor bobinado en cascada dual, con la sustitución de un motor de rotor bobinado por un convertidor de frecuencia de inducción y del control de la resistencia secundaria variable por un transformador regulable trifásico (variac) [5].

Cuando el motor de inducción de rotor bobinado alcanza una velocidad síncrona (cero deslizamiento), el rotor del convertidor de frecuencia se conduce a velocidad síncrona en un sentido de rotación opuesto a su campo magnético giratorio [5].

Análogamente, cuando el rotor alcanza un valor inferior a la velocidad síncrona, se produce un campo magnético que gira a una velocidad que es la diferencia entre la velocidad síncrona,  $S$ , y la velocidad del motor de rotor devanado,  $S(1-s)$ . De esta forma, a un deslizamiento  $s$ , la frecuencia del motor  $f_2$  iguala a  $sf_1$  y la frecuencia del campo giratorio del convertidor de frecuencia a este deslizamiento  $s$  es la diferencia entre la frecuencia de línea  $f_1$  y la frecuencia del inducido  $f_1(1-s)$  o

$$f_2 = f_1 - f_1(1 - s) = sf_1 \quad (3.7)$$

El significado de esta ecuación es que la frecuencia del convertidor de frecuencia es siempre la misma que la frecuencia del rotor devanado. En el sistema Leblanc la velocidad del motor es proporcional al voltaje exterior secundario (ajustado por el autotransformador variable que alimenta al convertidor de frecuencia por medio de los anillos colectores) y a la posición de la escobilla que controla la fase del voltaje secundario con respecto al voltaje inducido en el rotor devanado mediante su flujo de excitación primario [5].

El sistema Leblanc, es por tanto, un método de control de voltaje exterior mucho más eficaz para motores de elevados valores nominales de potencia.

### **3.7.3 El sistema de control de Kramer.**

Basado en el principio de Leblanc, este método difiere en que el transformador variable va conectado a los anillos colectores del motor bobinado en vez de a la línea. Como en el caso del sistema de Leblanc, la frecuencia del rotor bobinado  $f_2$  es también la frecuencia del voltaje en el conmutador. Decalando la posición de fase de las escobillas se alterará el factor de potencia del motor de rotor devanado, e incrementado el voltaje aplicado al rotor del convertidor se incrementará la velocidad. Se pueden conseguir velocidades superiores e inferiores a la síncrona. Además, el convertidor de frecuencia también actúa como motor al convertir la potencia que se le suministra a través del autotransformador en potencia mecánica disponible en el eje [5].

Las mayores aplicaciones de los sistemas de Leblanc y de Kramer son para grandes motores de rotor bobinado de 500 CV hasta unos 3000 CV. Las ventajas de devolver la energía al sistema, además de las bajas pérdidas en línea del convertidor y el autotransformador (el aparato eléctrico de mayor rendimiento desarrollado hasta el

momento), combinado con la ventaja de corrección del factor de potencia, hace que el sistema de Kramer sea particularmente útil en aplicaciones de control de la velocidad de elevada potencia. Su mayor inconveniente reside en su elevado costo inicial [5].

#### **3.7.4 Sistema de Scherbius.**

Este sistema, fruto del sistema de Leblanc y análogo al de Kramer, es totalmente de ca y emplea un convertidor de frecuencia variable directamente acoplado al motor de rotor bobinado. La salida de las tres escobillas del convertidor de frecuencia variable va a un convertidor de regulación de frecuencia acoplado a un motor de inducción de jaula cuyo estator se conecta a la fuente de alimentación de ca polifásica. Las escobillas del convertidor de regulación de frecuencia ( $sf_1$ ) están conectadas directamente a los anillos colectores de la máquina de rotor bobinado ( $f_2=sf_1$ ) y también a la excitación del transformador de control de velocidad [5].

Los inconvenientes son, que no tiene ajuste del factor de potencia y requiere máquinas especiales no comerciales. Como en los sistemas anteriores de control de deslizamiento de tensión exterior la energía se devuelve a la línea (regeneración) [5].

### **3.8 Control de velocidad por procedimientos mecánicos.**

Estos motores se construyen en grupos montados que accionan dispositivos mecánicos variadores de velocidad, de engranajes, poleas cilíndricas y cónicas e incluso bombas hidráulicas para producir una salida de velocidad variable [5].

### 3.9 Control de la velocidad de los motores monofásicos de c.a.

El método principal de control de velocidad empleado para motores monofásicos de inducción es el control del voltaje de línea. Este método se presta más a los motores monofásicos debido a la forma en que el rotor de un motor de inducción monofásico desarrolla el par en comparación con el motor de inducción asíncrono polifásico. Este último tiende a mantener la excitación del rotor a medida que disminuye el voltaje en el estator. El resultado es que el voltaje en el estator debe reducirse considerablemente antes de que tengan lugar cambios apreciables en el deslizamiento. Esto, a su vez, reduce el par aún más considerablemente (puesto que el par es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado en el estator) y reduce en sumo grado el valor de potencia eficaz del motor de inducción polifásico de rotor devanado, o de jaula de ardilla [5].

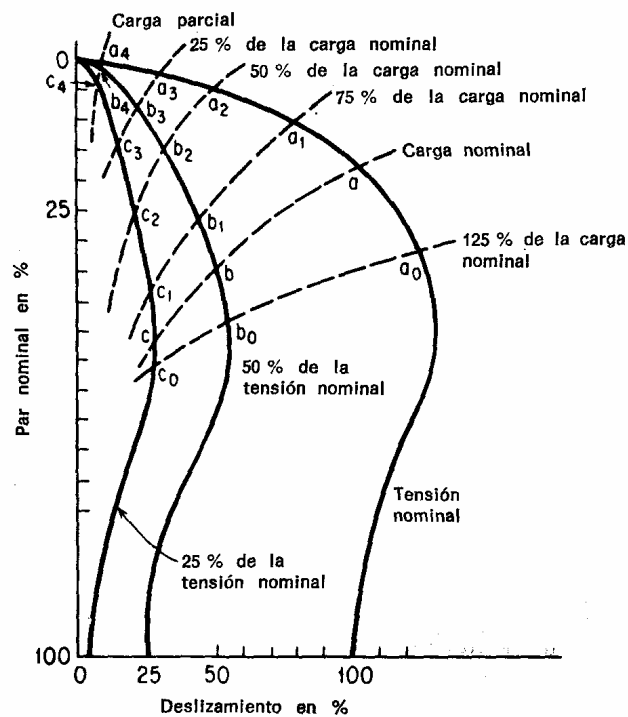


Figura 3.8. Curvas par-deslizamiento para motores de inducción monofásicos con variación del voltaje primario [5].



Puesto que el par desarrollado por un motor de inducción monofásico es originado mediante dos campos magnéticos en oposición, el deslizamiento rotórico de un motor monofásico es mas sensible a la variación de la excitación que el de uno polifásico [5].

También, ya que el par de un motor de inducción varía con el cuadrado del voltaje aplicado en el estator (ver figura 3.8), la curva par-deslizamiento al 50% del voltaje nominal es el 25% de la correspondiente al voltaje nominal, aproximadamente a todos los valores desde el arranque al paro en marcha. A medida que aumenta la carga desde carga parcial hasta nominal, el efecto de una reducción del voltaje, desde el voltaje nominal al 25% de la misma, es el de producir una mayor disminución de la velocidad al variar el voltaje, hasta aproximadamente la carga nominal [5].

### 3.9.1 Devanado de tomas y reactancia serie.

Existen algunos métodos para controlar la velocidad de motores monofásicos mediante la reducción del voltaje de línea, ya sea por conmutación manual o automática. Por ejemplo, el método de devanado de tomas indica que la velocidad más elevada se obtiene cuando todo el voltaje de alimentación queda aplicado a la sección más pequeña del devanado principal. La velocidad más baja se obtiene cuando el voltaje de alimentación se aplica al devanado completo. La explicación de dicha relación reside en la ecuación [5]:

$$E_{ef} = k\phi Nf \quad (3.8)$$

que indica que el flujo de excitación,  $\phi$ , a una determinada frecuencia (f), depende de  $E_{ef}/N$ , o sea volts estatóricos efectivos por espira (N). A medida que disminuye el número

de vueltas en el estator a las que queda aplicada la misma tensión, aumenta el flujo de excitación. En un motor de inducción, la componente de corriente rotórica en fase con el flujo de excitación ( $I_r \cos \theta$ ), así como el par ( $T$ ), son función del flujo de excitación:

$$T = k\phi I_r \cos \theta \quad (3.9)$$

Por tanto, para una carga determinada se produce más par y menor deslizamiento con una mayor relación de volt por espira. La velocidad, es por tanto mayor cuando se emplea el menor número de espiras para una tensión determinada aplicada al estator de c.a. En la figura 3.9, cuando está abierto el contacto H y se cierran los contactos M (velocidad media) o L (baja velocidad), la velocidad del motor disminuye proporcionalmente con la disminución del par desarrollado. El devanado principal de tomas se bobina de tal forma que incluso la sección pequeña (de elevada velocidad) queda uniformemente distribuida alrededor del estator y el devanado se proyecta para soportar el voltaje nominal sin sobrecalentamiento [5].

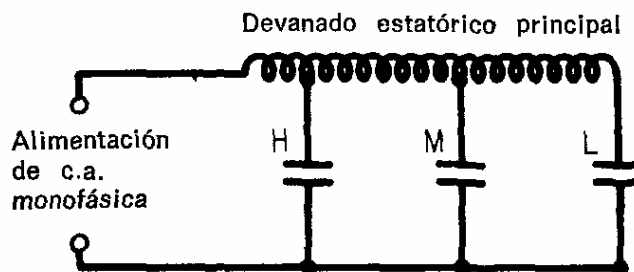


Figura 3.9. Devanado principal de tomas [5].

El método de utilizar una bobina de reactancia externa de tomas, en serie, posibilita una caída de voltaje tal que, para una carga determinada, toda la bobina producirá una mayor caída de voltaje (figura 3.10).

La velocidad más elevada, obtenida por el cierre de los contactos H, se consigue sin el empleo de la bobina y la velocidad más baja se consigue con el empleo total de la bobina. Este método presenta la ventaja de ser adaptable a cualquier motor monofásico, sin embargo, presenta el inconveniente de una pobre regulación de velocidad ya que al aumentar la carga, aumenta la corriente de carga y disminuyen la caída de voltaje en la bobina y la velocidad del motor [5].

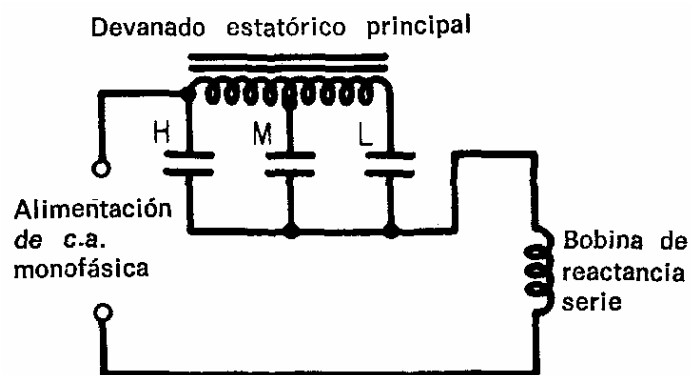


Figura 3.10. Control por reactancia en serie [5].

### 3.9.2 Reactor saturable y amplificador magnético.

Al traducirse en un incremento de la velocidad un aumento del voltaje de línea, la salida ca de los reactores saturables y amplificadores magnéticos puede utilizarse efectivamente como dispositivo de control de la velocidad [5].

Los devanados de reactancia, arrollados en los ramales exteriores del núcleo, pueden conectarse uno con respecto al otro en serie o en paralelo y el devanado de control

de cd de saturación lleva excitación independiente. Cuando el voltaje de control de cd es nulo, el núcleo de hierro no está saturado y el reactor se comporta como una bobina de reactancia ordinaria que tiene una elevada inductancia propia y una caída de voltaje de gran impedancia [5].

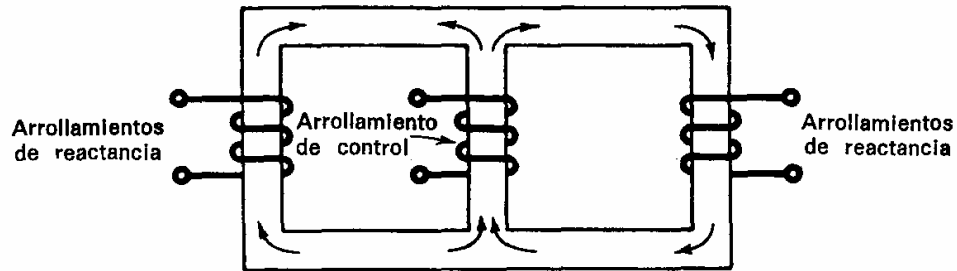


Figura 3.11. Relaciones de flujo instantáneas entre los devanados de control y de reactancia [5].

El voltaje de ca del motor por tanto es pequeño cuando el voltaje de control de cd es pequeño o nulo. Cuando el voltaje de control aumenta en bornes de la bobina de control altamente inductiva, saturando el núcleo; la reactancia inductiva y la impedancia del estator disminuyen produciendo mayor tensión de salida de ca en el motor. Al aumento de la excitación de cd del devanado de control corresponde un aumento de salida de ca del reactor [5].