

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"EVALUACION DE LOS EFECTOS DEL ARRANQUE DE MOTORES DE  
GRAN POTENCIA EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES"

por

HERNANDO MERCHAN MANZANO

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN LA  
ESPECIALIZACION DE POTENCIA EN LA ESCUELA POLITECNICA NA-  
CIONAL

QUITO, MARZO DE 1983

Certifico que el presente trabajo ha sido elaborado en su totalidad por el señor HERNANDO MERCHAN MANZANO.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "ING. Luis Taco V.", is written over a light blue horizontal line.

Ing. Luis Taco V.  
DIRECTOR DE TESIS

A mis padres,  
que con su esfuerzo y sacrif  
ficio hicieron posible la  
culminación de mi carrera.

## P R O L O G O

El presente trabajo fue planteado como tema de la materia PROYECTOS para el año académico 1980-1981, por el ingeniero Luis Taco V. Profesor de la Escuela Politécnica Nacional; posteriormente y habiendo avanzado en el estudio del tema, se consideró la posibilidad de ampliarlo y profundizarlo en el desarrollo de una tesis.

Existen al momento trabajos que tratan sobre el arranque de las máquinas eléctricas; sin embargo, este trabajo pretende dar un enfoque práctico del arranque de los motores de gran potencia, particularmente los de inducción debido a su amplia utilización, considerándolos como parte integrante de un sistema eléctrico y analizando los efectos mutuos que suceden como consecuencia del arranque.

El autor deja constancia de su más sincero agradecimiento al Ing. Luis Taco V., Director de Tesis; haciendo extensivo su reconocimiento y gratitud al Ing. Carlos Durán Norritz, Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Cuenca, así como también a todo el personal del Centro de Cómputo de la Universidad de Cuenca, por la valiosa colaboración prestada en el desarrollo de la tesis.

Quito, Marzo de 1983.

## S U M A R I O

Se presenta un resumen sobre los distintos métodos de arranque de motores de inducción, analizando para cada caso la influencia sobre las características eléctricas y mecánicas de la máquina.

Se introduce un estudio particularizado para el cálculo aproximado de los efectos del arranque en un sistema simple generador-motor.

Mediante el uso de programas digitales, se evalúan:

- a) Los efectos que se producen debido al arranque de grandes motores en los sistemas eléctricos industriales, es decir, caídas de voltaje en las barras, flujos de potencia y pérdidas de potencia.
- b) Los efectos que se producen en las condiciones de funcionamiento de los mismos motores, esto es, tiempo de arranque, variaciones de torque, potencia al eje.

Se complementa el trabajo con una aplicación al estudio del arranque de un motor de 1.500 HP. de la fábrica de llantas ERCO de Cuenca y sus efectos en el sistema eléctrico industrial al cual está conectado.

## I N D I C E

Pág.

### CAPITULO I

#### ARRANQUE DE MOTORES DE GRAN POTENCIA EN SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES.

1.1	Torques e intensidades .....	1
1.2	Torque de arranque .....	4
1.3	Arranque directo .....	8
1.4	Arranque a voltaje reducido .....	10
1.5	Arranque con resistencia rotórica .....	16
1.6	Arranque estrella-triángulo .....	18

### CAPITULO II

#### EFFECTOS DEL ARRANQUE EN SISTEMAS DE GENERACION LOCAL

2.1	Comportamiento del voltaje del generador durante el arranque del motor. Caso particular .....	20
2.2	Métodos de cálculo para el voltaje mínimo y voltaje de restablecimiento en el generador .....	21
2.3	Comportamiento del voltaje en un sistema de distribución.....	29
2.4	Método de combinación de caídas de voltaje	32
2.5	Ejemplo .....	34

## CAPITULO III

## ESTUDIO DE CAIDAS DE VOLTAJE, TORQUES Y TIEMPO DE ACELERACION DURANTE EL ARRANQUE BAJO CARGA.

3.1	Estudio de la caída de voltaje en un sistema de potencia .....	38
3.1.1	La caída de voltaje instantánea .....	38
3.1.2	Requerimiento de datos .....	39
3.1.3	Procedimientos de solución y ejemplos ....	43
3.1.4	Diagrama de bloques del programa digital I para cálculo de caídas de voltaje en un sistema de potencia durante el arranque de un motor .....	53
3.1.5	Ejemplos de aplicación y resultados .....	54
3.2	Estudio del torque y tiempo de aceleración de un motor de gran potencia durante su proceso de arranque bajo carga .....	62
3.2.1	Torque y tiempo de aceleración .....	62
3.2.2	Determinación del tiempo de arranque .....	65
3.2.3	Curvas características del torque de carga	68
3.2.4	Diagrama equivalente y curvas características .....	70
3.2.5	Diagrama de bloques del programa digital II para el estudio torque-velocidad y tiempo de aceleración .....	73
3.2.6	Ejemplos de aplicación y resultados .....	74

	Pág.
CAPITULO IV	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	81
APENDICE A: Listado del programa digital I .....	85
APENDICE B: Listado del programa digital II .....	86
APENDICE C: Manual de uso de los programas .....	87
REFERENCIAS	98



## I N T R O D U C C I O N

En la medida en que se están aprovechando las fuentes de energía existentes en el país para transformarlas en energía eléctrica, paralelamente se presenta un acelerado incremento del sector industrial. El estudio concerniente al arranque de los motores eléctricos ayudaría al mejor aprovechamiento de la energía en este campo y consecuentemente, al mejor rendimiento de los mismos.

Los efectos debidos al arranque de los motores en los sistemas eléctricos, son varios y de diferentes características, sin embargo, todos están relacionados directamente con el elevado valor de corriente de arranque del motor y su consiguiente caída de voltaje en el sistema, pudiendo tratarse de un simple sistema generador-motor o también sistemas mayores en los que están involucrados un mayor número de equipos y cargas eléctricos.

Los motores que actualmente son utilizados en los sistemas industriales modernos han incrementado considerablemente su tamaño. El arranque de estos motores, especialmente cuando lo hacen a voltaje nominal, producirá una depresión transitoria de voltaje que puede reducir sustancialmente el torque de salida del motor, afectando directamente la normal operación de cualquier carga local conectada al sistema y, probablemente, a otras cargas servidas por barras lejanas al punto de arranque del motor.

Estos efectos no han tenido una considerable importancia dentro del estudio del funcionamiento de los Sistemas Eléctricos de Potencia, sin embargo, con el continuo incremento de la potencia de las máquinas rotativas utilizadas en los sistemas industriales, se vuelve necesario un profundo estudio de los efectos del arranque de estas máquinas ya que esta información, obtenida del estudio, servirá para una adecuada selección de las características de arranque de las máquinas a integrarse al sistema eléctrico y también para un adecuado diseño de los sistemas de protección, evitando así el riesgo de daño de los componentes del sistema y garantizando la continuidad de operación y calidad del mismo.

# C A P I T U L O I

## ARRANQUE DE MOTORES DE GRAN POTENCIA EN SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES

### 1.1. TORQUES E INTENSIDADES.-

El campo magnético giratorio generado en el estator corta las barras conductoras de corriente del rotor, produciendo en ellas un momento de giro (torque motor) que origina el movimiento rotativo. En las ranuras del estator formado de chapa magnética va introducido el devanado primario, el cual determina fundamentalmente los datos eléctricos del motor y genera el campo magnético de velocidad sincrónica.

Las ranuras ejecutadas en la periferia de las chapas magnéticas del rotor, alojan el devanado secundario que tiene forma de jaula y se fabrica generalmente de aluminio. La forma de construcción de la jaula ejerce decisiva influencia sobre el comportamiento del torque durante el proceso de arranque.

Las secciones de las barras de las jaulas de los rotores son muy diferentes, según tamaño del motor, clase y serie de fabricación. Cada forma de la sección de la barra da como resultado una condición diferente de corriente y consecuentemente, otra curva de torque motor. [5]

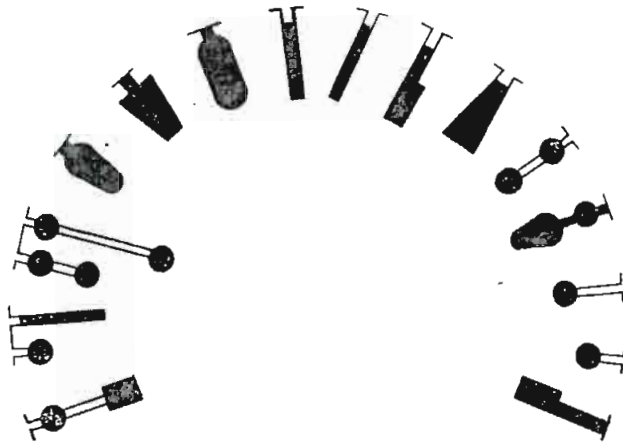


Fig. 1.1. Ejemplo de diferentes secciones de ranuras en los motores jaula de ardilla.

El torque que desarrolla un motor en su eje, presenta una magnitud muy variable para las velocidades comprendidas en tre cero y la velocidad sincrónica.

De acuerdo a la terminología establecida por la NEMA, se han clasificado varios diseños estandarizados de motores asín crónicos, que permiten seleccionar motores con diferentes características de arranque y operación.

CLASE A: Torque de arranque normal, corriente de arranque normal, bajo deslizamiento; este motor tiene un diseño de rotor de jaula simple de baja resistencia lo que asegura un buen régimen de operación a costa del arranque. El deslizamiento a plena carga es bajo y su eficiencia al ta. El torque máximo usualmente está sobre el 200% del tor

que de plena carga, y ocurre a bajos deslizamientos (menores al 20%). El torque de arranque varía alrededor del 20% del torque a plena carga en motores pequeños y alrededor del 100% en grandes motores. La corriente de arranque (500 a 800% de la corriente de plena carga en arranque en conexión directa) es la principal desventaja de este diseño.

CLASE B: Torque de arranque normal, baja corriente de arranque, bajo deslizamiento; este diseño tiene aproximadamente el mismo torque de arranque que el diseño clase A pero con el 75% de la corriente de arranque por lo que facilita el arranque a pleno voltaje de motores grandes. La corriente de arranque se reduce mediante el diseño de una alta reactancia de dispersión, manteniendo el torque de arranque, mediante el uso de un rotor doble jaula o barra profunda. Los valores de eficiencia y deslizamiento son satisfactorios.

CLASE C: Torque de arranque elevado, baja corriente de arranque. Este diseño usa un rotor de doble jaula, con resistencia rotórica más alta que el diseño clase B lo que resulta en un alto valor de torque de arranque con una menor corriente de arranque, pero disminuyendo la eficiencia y con mayor deslizamiento que los diseños A y B. Tiene aplicaciones típicas en compresores y bandas transportadoras.

CLASE D: Torque de arranque elevado, alto deslizamiento; este diseño

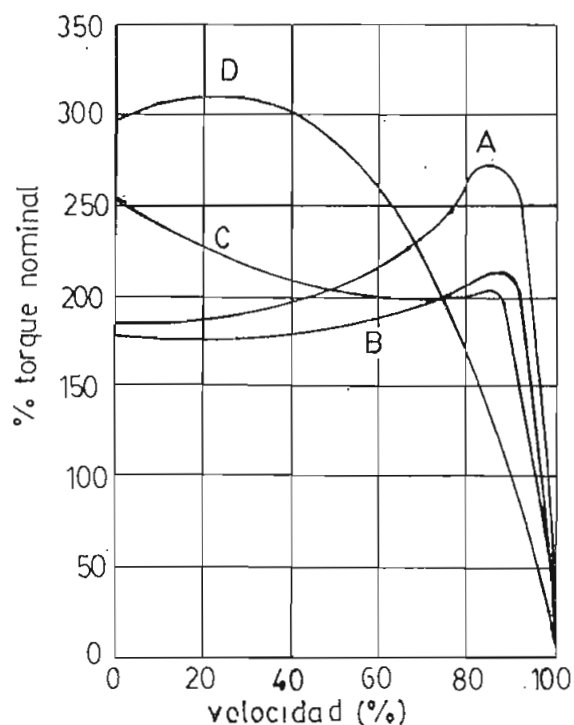


Fig. 1.2. Curvas características torque - velocidad de motores de inducción.

no posee jaula simple con alta resistencia rotórica (usualmente barras de latón) lo que produce un torque de arranque muy alto a pequeña corriente de arranque. Se tiene además que los valores de torque máximo suceden en deslizamientos entre el 50 y 100% y los valores de torque nominal, en deslizamientos entre el 7 y 11% lo cual hace que tenga un valor de eficiencia bajo.

## 1.2. TORQUE DE ARRANQUE.-

Para lograr que una máquina acelere desde su estado de reposo hasta su velocidad nominal, el torque producido debe exceder, en cualquier velocidad, al torque total absorbido

por la carga acoplada, más las pérdidas por fricción y ventilación propias de la máquina; el exceso de torque es aprovechado para vencer la inercia de las partes rotativas del acoplamiento mecánico. En el caso de un motor, el torque eléctrico producido por el mismo, cumplirá esta función.

Utilizando el circuito eléctrico que representa un motor asincrónico de inducción [1] se determinan las expresiones matemáticas de la corriente y el torque de arranque en función de sus parámetros eléctricos.

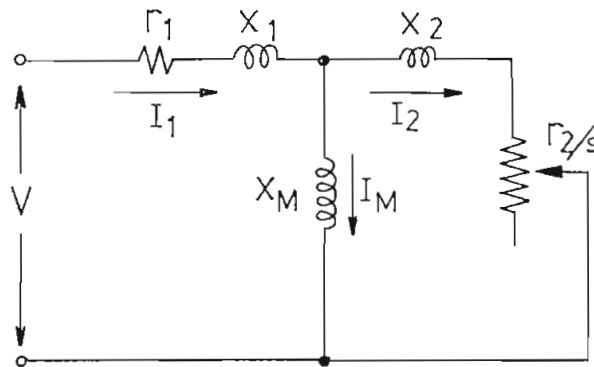


Fig. 1.3. Circuito equivalente de un motor de inducción.

$r_1$  = resistencia del estator.

$X_1$  = reactancia de dispersión del estator a frecuencia nominal.

$X_M$  = reactancia de magnetización.

$X_2$  = reactancia de dispersión del rotor a frecuencia nominal.

$r_2$  = resistencia del rotor.

$s$  = deslizamiento.

$I_1$  = corriente del estator.

$I_2$  = corriente del rotor.

$V$  = voltaje aplicado por fase.

La potencia mecánica desarrollada por el motor es:

$$P = q_1 I_2^2 \frac{1 - s}{s} r_2 \quad (\text{Ec. 1.2-1})$$

donde:  $q_1$  = número de fases del estator.

El torque electromagnético correspondiente a la potencia mecánica, se obtiene considerando que la potencia mecánica es igual al torque multiplicado por la velocidad angular del rotor.

$$P = \omega_r T \quad (\text{Ec. 1.2-2})$$

$$P = (1 - S)\omega_s T \quad (\text{Ec. 1.2-3})$$

donde la velocidad angular sincrónica esta dada por

$$\omega_s = \frac{4 \pi f}{P} \quad (\text{Ec. 1.2-4})$$

donde:  $f$  = frecuencia de la red.

$P$  = número de polos.

luego:



$$T = \frac{P}{(1-s)\omega_s} = \frac{q_1 I_2^2 \frac{1-s}{s} r_2}{(1-s)\omega_s}$$

$$T = \frac{1}{\omega_s} q_1 I_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (\text{Ec. 1.2-5})$$

El valor de la corriente del rotor referida al estator es ta dada por:

$$I_2 = \frac{V(1 - \frac{x_1}{x_M})}{\sqrt{(r_1 + \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + x_2)^2}} \quad [2] \quad (\text{Ec. 1.2-6})$$

En el instante del arranque, el rotor está estacionario y el deslizamiento es unitario. La expresión para el torque de arranque se obtiene haciendo  $s = 1$  en la ecuación 1.2-5.

$$T_{arr.} = \frac{1}{\omega_s} q_1 (I_{2arr})^2 r_2 \quad (\text{Ec. 1.2-7})$$

$$T_{arr.} = \frac{1}{\omega_s} q_1 \frac{[V(1 - \frac{x_1}{x_M})]^2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} r_2 \quad (\text{Ec. 1.2-8})$$

Esta ecuación muestra que el torque de arranque varía como el cuadrado del voltaje aplicado. El valor de la corriente de arranque se incrementa notablemente debido a que, pa ra un deslizamiento unitario, la resistencia del rotor  $r_2/s$  toma su mínimo valor.

Tanto el torque de arranque como la corriente de arranque pueden ser modificados a valores menores, reduciendo el va lor del voltaje aplicado, para lo cual, se cumplen las si guientes relaciones:

$$T'_{arr.} \cong T_{arr.} \left(\frac{V'}{V}\right)^2$$

$$I'_{arr.} \cong I_{arr.} \left(\frac{V'}{V}\right)$$

### 1.3. ARRANQUE DIRECTO.-

El método más simple y económico para el arranque de un motor es la conexión de sus devanados estatóricos directamente a la fuente de voltaje. Esta conexión, estando el motor en reposo, presupone que la corriente inicial de arranque (prescindiendo de la componente transitoria unidireccional que la conexión de un circuito inductivo a una red de alterna introduce, la cual se amortigua muy rápidamente) alcanza valores de tres a ocho veces la corriente nominal, produciéndose una caída de voltaje a los terminales del motor que depende del valor de la impedancia entre el motor y el punto más cercano de voltaje constante en el sistema. Esta caída de voltaje modifica las características de arranque del motor, por lo que se debe tener especial importancia en la etapa de diseño, conociendo el valor de la impedancia serie entre el motor y la fuente de voltaje. Pese a que el "golpe de corriente" (relación de la corriente de arranque a la nominal) excede con mucho a ciertos valores reglamentados, este método de arranque es admitido sin demasiados reparos en las fábricas que reciben energía en alta tensión y la estación transformadora es de su propiedad.

La figura 1.4. muestra las características de arranque de

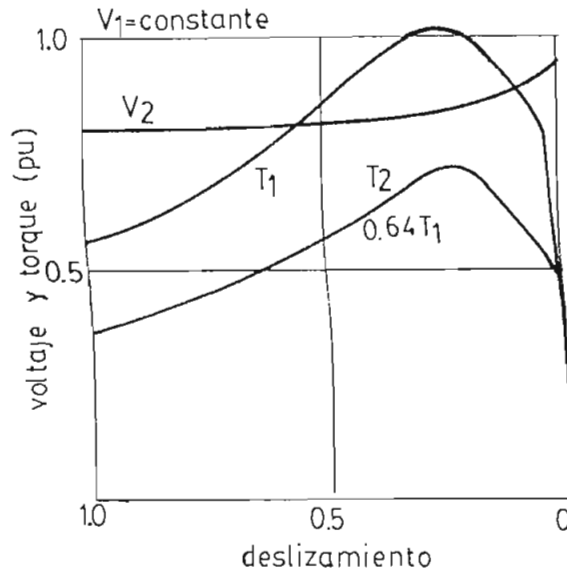


Fig. 1.4. Características torque-velocidad de un motor que arranca:  
1. conectado a una barra infinita.  
2. conectado a una fuente a través de una impedancia serie.

un motor en dos casos de conexión directa; para el primer caso, la impedancia serie entre la fuente y el motor es nula, por ejemplo el motor arranca conectado directamente a una "barra infinita";  $V_1$  se mantiene constante al igual que la curva característica de torque  $T_1$ . En el segundo caso una impedancia serie entre la fuente y el motor produce una caída de voltaje a 0.8 p.u. por lo que el torque de arranque disminuye a  $T_2 = (0.8)^2 T_1$ , es decir,  $T_2 = 0.64 T_1$ . Cuando la corriente del motor disminuye a su valor de régimen nominal el voltaje se recupera  $V_2 = 0.95$  p.u.

#### 1.4. ARRANQUE A VOLTAJE REDUCIDO.-

En los casos en que la capacidad de la fuente es limitada en comparación con la corriente de arranque del motor, la caída de voltaje en la línea será tan significativa que el motor que arranca, y otros conectados al sistema, no podrán desarrollar el suficiente torque para acelerar su carga, y como resultado, se producirán elevados valores de corrientes rotóricas y estatóricas activando los equipos de protección que desconectarían todo el sistema. Esta es una de las mayores causas por la que se requieren métodos para limitar las corrientes de arranque del motor.

Como se había visto anteriormente, un motor de inducción produce corrientes de arranque de hasta ocho veces el valor de su corriente nominal, cuando se arranca en conexión directa. En el instante del arranque, la corriente del rotor, y por lo tanto la del estator, está determinada por su impedancia de rotor bloqueado  $R_{bl} + jX_{bl}$ . Reduciendo el voltaje aplicado al estator a la mitad de su valor nominal, la corriente de arranque podría ser también reducida en la misma proporción.

Los motores de inducción pueden arrancarse a voltaje reducido mediante el uso de autotransformadores trifásicos, compensadores, conexión de resistores o reactores en serie con el estator, etc. Analicemos brevemente dos de los métodos más comunmente usados:

a) Arranque con inserción de resistencia estatórica

Este método de arranque a voltaje reducido requiere de una resistencia variable en cada fase del motor, resistencia que irá reduciéndose a medida que el motor se acelera. Veamos cuál es el valor del torque de arranque que se tendrá según la relación  $I_{arr}/I_{nom}$ . admitida para el sistema. [3]

El circuito de motor y reóstato de arranque está representado en la figura 1.5.

De la ecuación 1.2-5 sabemos que el torque electromagnético de un motor esta expresado por:

$$T = K \frac{I^2}{s}$$

el torque nominal correspondiente a la corriente y a la velocidad nominal del motor  $s_n$  será:

$$T_n = K \frac{I^2 n}{s_n}$$

y el torque de arranque, con la corriente de arranque  $I_a$  y el deslizamiento unitario:

$$T_a = K I_a^2$$

Si designamos  $a'$  la relación de corriente admitida por el sistema:

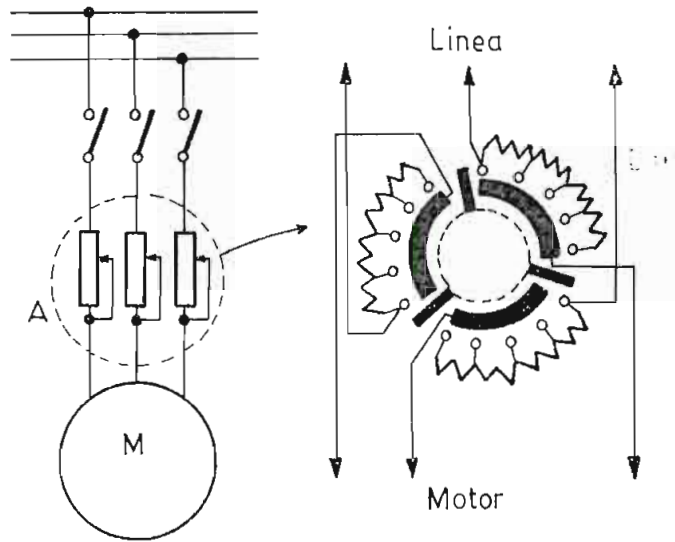


Fig. 1.5. Esquema básico de arranque por inserción de resistencias en el circuito del estator.

$$a' = \frac{I_a}{I_n}$$

la relación entre el torque nominal y el torque de arranque resulta ser:

$$\frac{T_a}{T_n} = s_n \frac{I_a^2}{I_n^2} = s_n (a')^2 \quad (\text{Ec. 1.4-1})$$

En el caso de arranque directo, sin reóstato alguno interpuesto, y teniendo una corriente de arranque del motor 6 veces la nominal, y el deslizamiento nominal a plena carga, 4%;

$$\frac{T_a}{T_n} = \left(\frac{I_a}{I_n}\right)^2 s_n$$

$$\frac{T_a}{T_n} = 6^2 \times 0.04 \Rightarrow T_a = 1.44 T_n$$

Si por imposición del sistema se tuviera que limitar la corriente de arranque a un valor igual a dos veces la nominal, la relación anterior se reducirá a:

$$\frac{T_a}{T_n} = s_n (a')^2 = 0.04 \times 2^2 \Rightarrow T_a = 0.16 T_n$$

Se puede concluir que este método se debe utilizar preferentemente en el arranque en vacío, debido a la notable reducción del torque de arranque que dificulta la aceleración de cualquier carga conectada al eje.

b) Arranque por autotransformador

Este método para reducir la tensión en el arranque utiliza un autotransformador intercalado entre la red y el motor como se indica en la Fig. 1.6. En la primera posición de arranque se aplica al motor la tensión reducida del autotransformador; los taps de éste varían del 50 al 80% del voltaje nominal con lo cual se puede obtener un torque adecuado para acelerar la carga, una vez el motor, en las proximidades de su velocidad de régimen, se le conecta a la plena tensión de la red, quedando el autotransformador fuera de servicio.

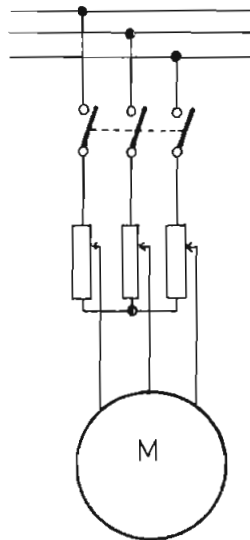


Fig. 1.6. Esquema del principio del arranque por autotransformador.

Designando por "r" la relación de transformación del auto transformador y a' la relación entre la corriente de arranque y la nominal, se tiene que la tensión aplicada por fase al motor, en el instante del arranque, será:

$$V_m = \frac{V_n}{r}$$

siendo  $V_n$  la tensión por fase de la red.

Y la corriente en el motor, en el arranque será:

$$I_m = r I_a$$

siendo  $I_a$  la máxima corriente de arranque admitida en la red, luego la relación de torque de arranque a torque nominal será:

$$\frac{T_a}{T_n} = \left(\frac{I_m}{I_n}\right)^2 s = \left(\frac{r I_a}{I_n}\right)^2 s = (ra')^2 s \quad (\text{Ec.1.4-2})$$

Se puede concluir que en el arranque por autotransformador, con la misma relación a' que en el arranque por resistencias, el torque de arranque es "r<sup>2</sup>" veces mayor, ya que siempre "r" es mayor que la unidad. Sin embargo esto no significa que se pueda elevar el torque de arranque eligiendo una alta relación de transformación, por cuanto a menor tensión aplicada, el torque motor disminuye en proporción cuadrática.

La fig. 1.7 muestra las características torque-deslizamien



to y corriente-deslizamiento de un motor de inducción tipo jaula durante el arranque por autotransformador en tres tiempos.

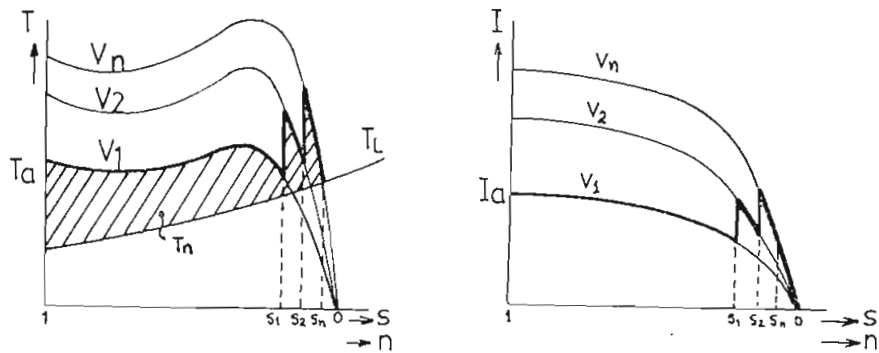


Fig. 1.7 Características  $T=f(s)$  e  $I=f(s)$  de un motor asíncrono en el arranque por autotransformador en tres tiempos.

Desde un punto de vista económico, el conjunto de aparatos de control y relés de tiempo que, aparte del autotransformador, se requieren en este método de arranque, hacen que el precio de este tipo de arranque sea elevado comparado con los arrancadores por resistencias, por lo que su empleo se justifica en motores de potencias superiores a los 100 HP.

### 1.5 ARRANQUE CON RESISTENCIA ROTORICA.

Cuando se requiere proveer un elevado valor de torque durante el período de arranque, manteniendo la corriente de la red en un mínimo valor, se dispone del método de arranque con resistencia rotórica que se basa en el incremento de la impedancia propia del motor al aumentar la resistencia del devanado rotórico. Este método es apto solamente para motores de rotor devanado, en los que los terminales de las bobinas del rotor están conectados a tres anillos colectores aislados del eje.

La Fig. 1.8 muestra un circuito elemental del arranque por inserción de resistencia al devanado rotórico. En la posición "cero" los devandos rotóricos están en circuito abierto, al girar el anillo de cortocircuito, en el sentido de las manecillas del reloj, al primer contacto el motor arranca con máxima resistencia del rotor y es acelerado moviendo el anillo, con lo cual se disminuye el valor de la resistencia del rotor; en la posición final, los devandos del rotor estarán completamente cortocircuitados.

La maniobra de arranque puede ser manual, como en la figura anterior, o automática utilizando contactores que, comandados por relés de tiempo, realizan la reducción de resistencia en secuencia precisa y escalonada. El valor de la resistencia de cada paso del reóstato está determinado por el valor de la corriente máxima de arranque permitida

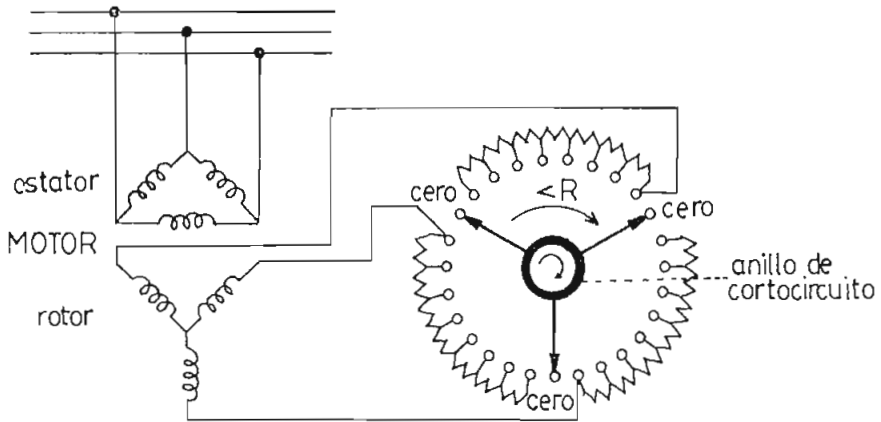


Fig. 1.8 Arrancador de motor con resistencia rotórica [4]

y el mínimo torque que debe desarrollar el motor durante el proceso de arranque.

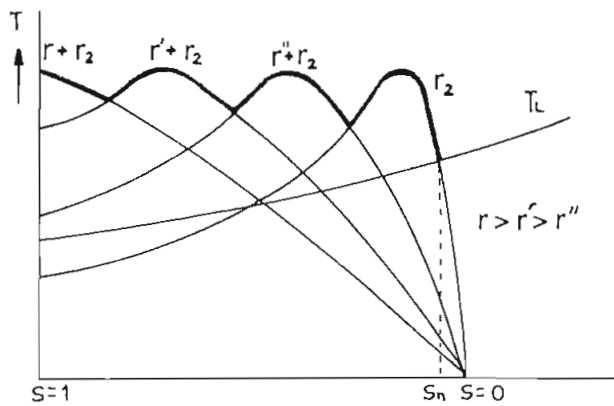


Fig. 1.9 Característica  $T=f(s)$  de un motor asincrónico de rotor devanado en el proceso de arranque por inserción de resistencia en el circuito rotórico.

La Fig. 1.9 muestra la variación del torque con la velocidad del motor durante el proceso de arranque en tres pasos de resistencia; el torque desarrollado por el motor corresponde a la línea de trazo grueso.

#### 1.6. ARRANQUE ESTRELLA - TRIANGULO

Este método de arranque es utilizado en motores de inducción tipo jaula que presenten sus seis terminales del devanado estático accesibles en una caja de bornes. En el instante del arranque, se conectan los tres devanados estáticos en "estrella" con lo cual se aplica al motor una tensión reducida igual a  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  del voltaje nominal, o sea, el 57.7% del voltaje disponible en la línea; cuando el motor alcanza valores de velocidad cercanos a los de régimen, se conmuta la conexión a "triángulo", aplicando así el voltaje nominal a los devanados estáticos. Como consecuencia de la reducción de voltaje, los valores de Torque de Arranque, Torque máximo y los otros valores de Torque-motor, así como la corriente de arranque, se encuentran comprendidos en el orden de 30% de los valores que rigen en caso de conexión directa [5].

Hay que observar que para un determinado motor, existe ya una característica de torque y corriente independiente de la dificultad del arranque, por lo que el arranque estrella-triángulo se recomienda cuando se requiere un torque de arranque relativamente bajo o que la corriente de arranque sea reducida por exigencia del sistema industrial.

El torque resistente o de carga, durante el tiempo de arranque en que se establece la conexión en "estrella", tiene que ser bastante menor que el torque motor para poder realizar una adecuada conmutación a "triángulo", realizándose ésta solo cuando el motor se encuentre en un régimen de velocidad cercano al de servicio.

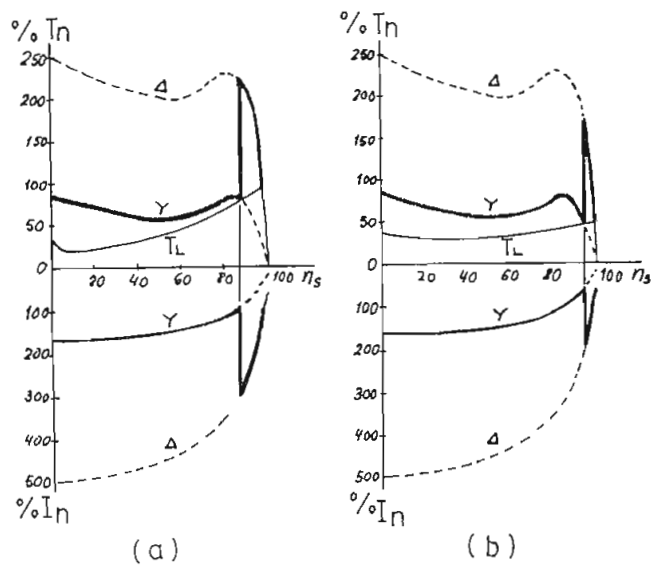


Fig. 1.10 a) Arranque desfavorable en estrella-triángulo  
b) Arranque correcto en estrella-triángulo

La Fig. 1.10(a) muestra un caso en que el arranque "estrella - triángulo" no es conveniente, debido a que, por ser demasiado elevado el torque resistente, la conmutación origina una cresta del valor de corriente inadmisiblemente elevada, perdiendo la justificación la conexión "estrella - triángulo".

## C A P I T U L O   I I

### EFFECTOS DEL ARRANQUE EN SISTEMAS DE GENERACION LOCAL

El desarrollo de este capítulo está basado en un estudio realizado por los ingenieros Abraham Gamarra y Oscar García, de la compañía "Petróleos del Perú" [12]. Se ha creído conveniente introducir este trabajo debido a su apreciable aporte tanto en consideraciones e información como en resultados que, no obstante ser aproximados, servirán de auxiliares en el siguiente capítulo, en el cual, el tema del arranque se trata con más profundidad y mayor alcance.

Se presenta, mediante la utilización de gráficos, el método de cálculo de los efectos del arranque de un motor de gran potencia en un simple sistema de generación local con capacidad limitada. Estos efectos son básicamente la magnitud y el tiempo de duración del voltaje mínimo y de restablecimiento que se tiene a los bornes del generador en el momento del arranque. El método de cálculo es bastante aproximado, ya que la naturaleza dinámica de la reactancia del generador y de su sistema de excitación hace que un cálculo exacto de estos efectos sea bastante complicado.

#### 2.1. COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE DEL GENERADOR DURANTE EL ARRANQUE DEL MOTOR. CASO PARTICULAR.

Cuando a un generador se le aplica repentinamente una sobrecarga (KVA de arranque del motor), el generador muestra

una reactancia de característica variable, desde la reactancia subtransitoria ( $X''_d$ ) a partir del tiempo cero, hasta la reactancia sincrónica ( $X_d$ ) en estado estable. Debido a que el período subtransitorio es muy pequeño, la caída de tensión inicial es función de la reactancia transitoria ( $X'_d$ ).

La figura 2.1. muestra una curva típica de voltaje vs. tiempo para la aplicación repentina de una carga de arranque de un motor;  $V_1$  es limitado por la reactancia transitoria  $X'_d$  y  $V_2$  por la reactancia  $X_d$ . Si el regulador de voltaje responde a la caída de tensión inicial e incrementa la excitación, el voltaje del generador alcanzará un valor de restablecimiento final.

La figura 2.2. muestra el comportamiento del voltaje en el generador con distintos tipos de regulación durante el arranque a pleno voltaje de un motor de inducción jaula de ardilla. Se asume, KVA arranque = 100% de la capacidad del generador.

## 2.2. METODOS DE CALCULO PARA EL VOLTAJE MINIMO Y VOLTAJE DE RESTABLECIMIENTO EN EL GENERADOR.

Las caídas de voltaje causadas por conexión de cargas, dependen de las características de los componentes usados en el sistema; por ejemplo, la impedancia de los transformadores, motores, etc. Algunos motores de gran potencia son

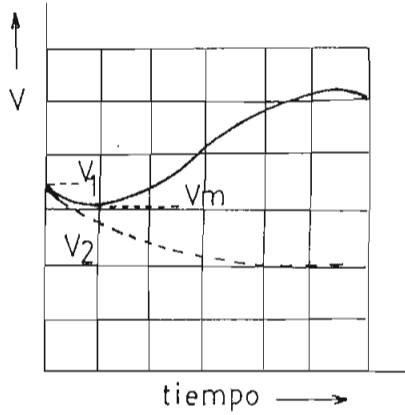


Fig. 2.1. Variación del voltaje debido al arranque de un motor.  
 -  $V_1$  es el inicial  
 -  $V_m$  es el mínimo  
 -  $V_2$  en estado estable con excitación constante.

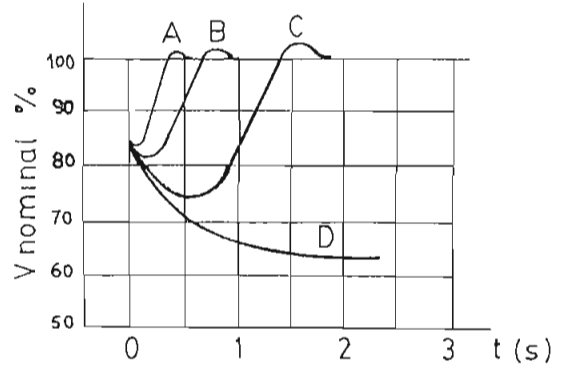


Fig. 2.2. Caída de voltaje en el generador según el tipo de regulador.  
 A: regulación extra alta  
 B: regulación de alta velocidad  
 C: regulación normal  
 D: manteniendo los KVA a rotor bloqueado.

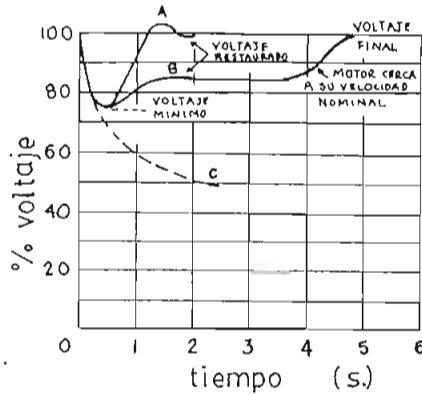


Fig. 2.3. Comportamiento típico del voltaje del generador debido al arranque de un motor en conexión directa.  
 KVA arranque motor = 100% capacidad del generador  
 A: sin carga inicial  
 B: 50% carga inicial al generador  
 C: sin regulador.



diseñados de manera que su propia corriente de arranque no produzca una reducción menor al 85%, en algunos casos al 75%, del valor normal de voltaje.

En la figura 2.4. podemos apreciar el comportamiento del voltaje durante el tiempo de arranque de un motor. En el período comprendido entre  $0 < t < 1s$ , la corriente de arranque toma valores de 3.2 pu. produciendo una reducción del voltaje al 80% mientras la velocidad empieza a incrementarse. Cuando el motor ha alcanzado su velocidad nominal el voltaje y la corriente también han tomado valores muy cercanos o iguales a sus valores nominales. El período total de arranque para este caso es de ocho segundos.

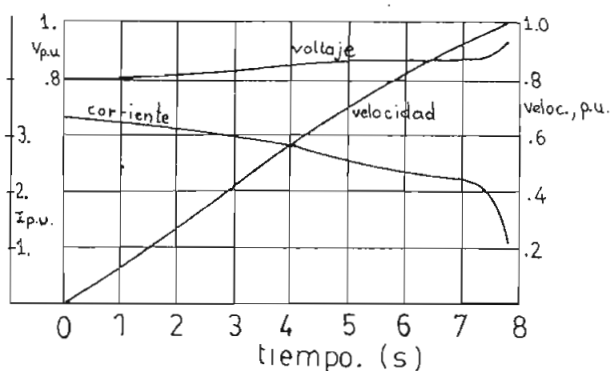


Fig. 2.4. Características de arranque de un motor.

El método a exponerse aproxima los voltajes mínimo y de restablecimiento debido al arranque de motores de inducción jaula de ardilla, para el cual adoptamos las siguientes premisas:

- a. El factor de potencia de la carga aplicada durante el arranque es menor a 0.4, valores típicos para al arranque en este tipo de motores.
- b. La impedancia del sistema entre el motor y el generador es despreciable, pero cuando toma valores significativos se podrá aumentar a la impedancia del motor.
- c. El generador está inicialmente sin carga.
- d. La máquina impulsora tiene la suficiente capacidad para mantener la velocidad del generador bajo las peores condiciones de carga impuestas (KVA de arranque).
- e. La caída de voltaje inicial hace que el regulador de voltaje dé una rápida señal para la excitación máxima del generador.
- f. Antes de aplicarse la carga, el generador está operando a voltaje nominal.

Las siguientes figuras muestran el voltaje inicial  $V_1$  y voltaje final en estado permanente  $V_2$  para varios valores de  $X'd$  y  $X_d$  respectivamente como una función de la relación de potencia de arranque a pleno voltaje  $KVA_a$ . sobre la capacidad del generador  $KVA_g$ .

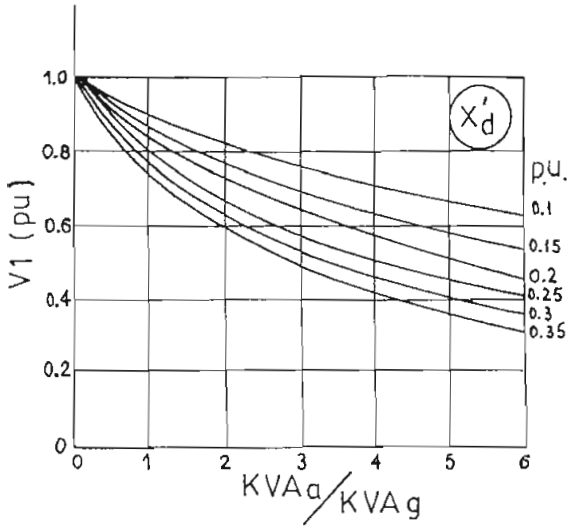


Fig. 2.5. Voltaje inicial.

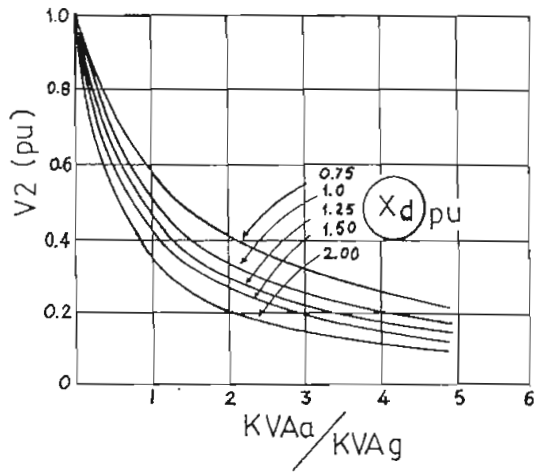


Fig. 2.6. Voltaje en estado estable.

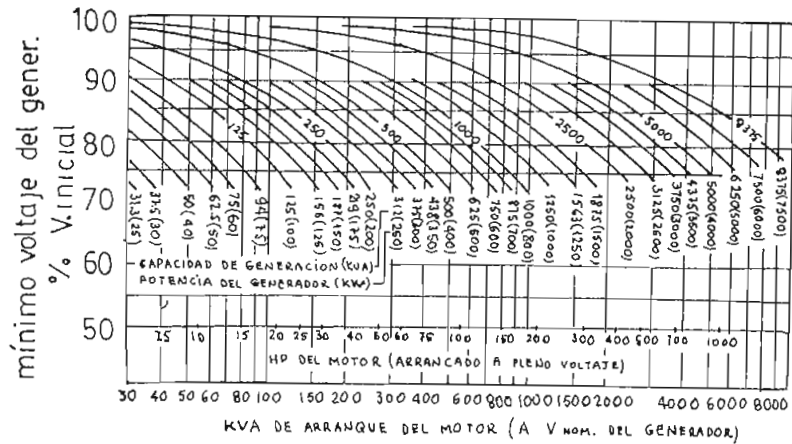


Fig. 2.7. Voltaje mínimo de un generador debido al arranque de un motor

- Nota:
- (1) La escala en HP está basada sobre la corriente de arranque a proximadamente 5.5 veces la nominal a plena carga.
  - (2) Si no hay carga inicial, el regulador de voltaje restaurará al 100% después de decaer a los valores dados por las curvas.
  - (3) Las características del generador asumidas, son las siguientes:

$$x'd = 0.25 \text{ p.u.} \quad \text{y} \quad x_d = 1.2 \text{ p.u.}$$



Los gráficos anteriores no consideran la acción del regulador. El voltaje de restablecimiento  $V_r$ , con sobreexcitación deberá ser función directa de la sobreexcitación  $E_c$ , a la excitación en vacío  $E_n$ .

$$V_r = (E_c/E_n)V_2 \leq 1.0 \text{ p.u.} \quad (\text{Ec. 2.2.1})$$

Si el valor calculado es mayor que 1.0 se asume que el regulador cumplirá con restaurar el voltaje al valor nominal, se tiene entonces que  $V_r = 1.0 \text{ p.u.}$

Consideremos la constante básica del generador  $T'_{d0}$ , que abarca la caída y recuperación de voltaje, como la constante de tiempo en segundos requerida por el voltaje a circuito abierto del generador para decaer al 36.8% del voltaje nominal, cuando el campo está cortado. Similarmente la constante de tiempo del sistema de excitación  $T_e$  indica el tiempo requerido por la excitatriz para incrementar su salida desde la condición sin carga a la máxima o tope.

La Tabla 2.1. indica algunos valores típicos de las máquinas síncronas.

Cuando no se dispone de valores reales de  $T'_{d0}$  y  $T_e$ , es posible determinar aproximadamente estos valores de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

CONSTANTES TÍPICAS DE MÁQUINAS SINCRÓNICAS  
TRIFÁSICAS

	Turbo- generadores			Generador. hidráulico			Condensad. sincrón.			Motores sincrón.		
	Low	Avg.	High	Low	Avg.	High	Low	Avg.	High	Low	Avg.	High
Reactances in per unit												
$x_d$	0.95	1.10	1.45	0.60	1.15	1.45	1.50	1.80	2.20	0.80	1.20	1.50
$x_q$	0.92	1.08	1.42	0.40	0.75	1.00	0.95	1.15	1.40	0.60	0.90	1.10
$x_d'$	0.12	0.23	0.28	0.20	0.37	0.50	0.30	0.40	0.60	0.25	0.35	0.45
$x_q'$	0.12	0.23	0.28	0.40	0.75	1.00	0.95	1.15	1.40	0.60	0.90	1.10
$x_d''$	0.07	0.12	0.17	0.13	0.24	0.35	0.18	0.25	0.38	0.20	0.30	0.40
$x_q''$	0.10	0.15	0.20	0.23	0.34	0.45	0.23	0.30	0.43	0.30	0.40	0.50
$x_p$	0.07	0.14	0.21	0.17	0.32	0.40	0.23	0.34	0.45			
$x_2$	0.07	0.12	0.17	0.13	0.24	0.35	0.17	0.24	0.37	0.25	0.35	0.45
$x_0^*$	0.01		0.10	0.02		0.21	0.03		0.15	0.04		0.27
Resistances in per unit												
$r_a$ (d-c.)	0.0015		0.005	0.003		0.020	0.002		0.015			
$r$ (a-c.)	0.003		0.008	0.003		0.015	0.004		0.010			
$r_2$	0.025		0.045	0.012		0.20	0.025		0.07			
Time constants in seconds												
$T_{d0}'$	2.8	5.6	9.2	1.5	5.6	9.5	6.0	9.0	11.5			
$T_d'$	0.4	1.1	1.8	0.5	1.8	3.3	1.2	2.0	2.8			
$T_d'' = T_q''$	0.02	0.035	0.05	0.01	0.035	0.05	0.02	0.035	0.05			
$T_a$	0.04	0.16	0.35	0.03	0.15	0.25	0.1	0.17	0.3			

Tabla 2.1. (Tomada de: Kimbark Edward "Power System Stability", Vol 3; Cap. XII).

- $T'_{d0} = 1.0 + 1.15 (KVA/1000) (RPM/1000) \quad [seg]$   
para un generador de polos salientes. (Ec. 2.2-2)
- $T'_{d0} = 2.0 + 0.15 (KVA/1000) \quad [seg] \quad (Ec. 2.2-3)$   
para un generador de rotor circular.
- $T_e$ , de acuerdo con el sistema de excitación,  
= 1.5 seg. para excitatriz de c.c. con regulador me  
cánico.  
= 1.0 seg. para excitatriz de c.c. con regulador de  
respuesta rápida.

= 0.4 seg. para excitatriz de escobillas pequeñas con regulador estático.

= 0.2 seg. para sistema de excitación estático.

El voltaje mínimo ( $V_m$ ) puede ser determinado por la figura 2.8. en la cual  $K_m$  es la relación  $V_m/V_2$  y está representada para diferentes valores de la relación  $V_1/V_2$  obtenidas de las figuras 2.5 y 2.6 como una función de la relación  $T_e/T'_{do}$ .

El tiempo en el que ocurre el mínimo voltaje ( $T_m$ ) puede ser determinado mediante la figura 2.9 en la que  $T_m/T_e = K_t$  está representada en función de  $V_1/V_2$ . El tiempo  $T_r$  necesario para alcanzar el voltaje de restablecimiento (o nominal) y el tiempo  $T_m$  pueden ser obtenidos aproximadamente de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$T_m = K_t \times T_e \quad [\text{seg}] \quad (\text{Ec. 2.2-4})$$

$$T_r = 1.5 T'_{do} \times T_m \quad [\text{seg}] \quad (\text{Ec. 2.2-5})$$

Usando las figuras 2.5 y 2.9 podemos encontrar una aproximación del voltaje mínimo y de restauración en una curva de voltaje vs. tiempo similar a la figura 2.1.

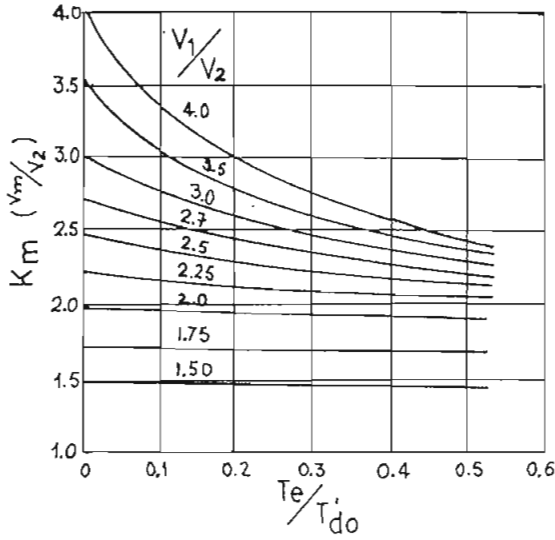


Fig. 2.8 Voltaje mínimo ( $V_m$ ) con la acción del regulador

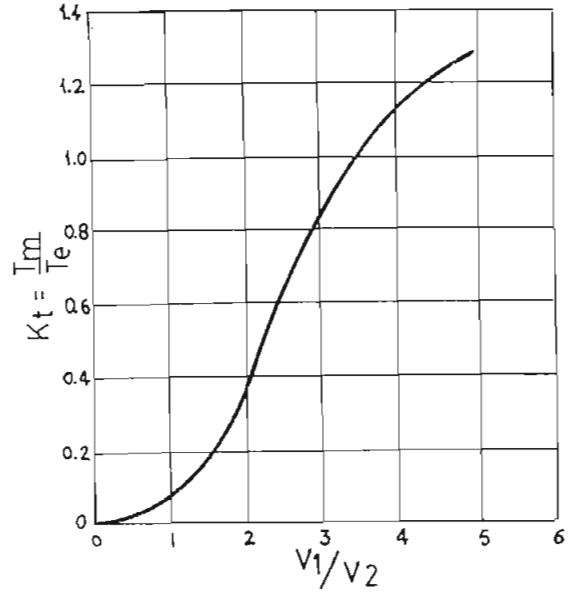


Fig. 2.9 Factor  $K_t$  del tiempo de ocurrencia del mínimo voltaje.

### 2.3. COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCION.-

En la generalidad de los casos, la alimentación de los motores a ser arrancados, se realiza a través de transformadores, cables, etc. que provocan caídas de voltaje adicionales a la que se produce en la reactancia del generador. Es de anotar que el regulador de voltaje del generador no contramesta este efecto por lo que solamente se restablecerá cuando el motor haya alcanzado su velocidad de régimen.

En la figura 2.10 se muestran los valores de caída de voltaje en un banco de transformadores, debidas al arranque de motores.

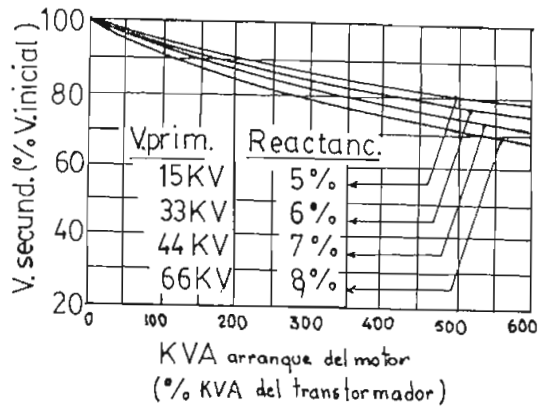


Fig. 2.10. Caída de voltaje al secundario del transformador.

Las caídas de tensión que se producen en transformadores y conductores eléctricos pueden ser tan significativas como las que se producen en el generador. Las caídas de voltaje en los transformadores pueden estimarse en la figura anterior, la cual sirve para el evento de arranque de un motor jaula de ardilla - o síncrono - conectado al secundario de un transformador.

Caída de Voltaje en cables y líneas aéreas:

Para estimar las caídas de tensión que se producen durante el arranque de motores en redes aéreas y cables subterráneos previamente se tomarán en consideración los siguientes valores:

- a) Longitud del circuito (m), L
- b) Voltaje inicial al final del circuito, Vi



c) KVA de arranque del motor a este voltaje, KVAa.

Con estos valores podemos obtener el factor de carga M

$$M = 3.28 \frac{KVAa \times L}{(Vi)^2} \quad (\text{Ec. 2.3-1})$$

La figura 2.11 nos provee datos para tres tipos de circuitos típicos, cable trifásico, cable monofásico y línea aérea. Si se tienen dos circuitos en paralelo, la caída total será igual a la de un circuito simple con la mitad de la longitud efectiva de cada circuito.

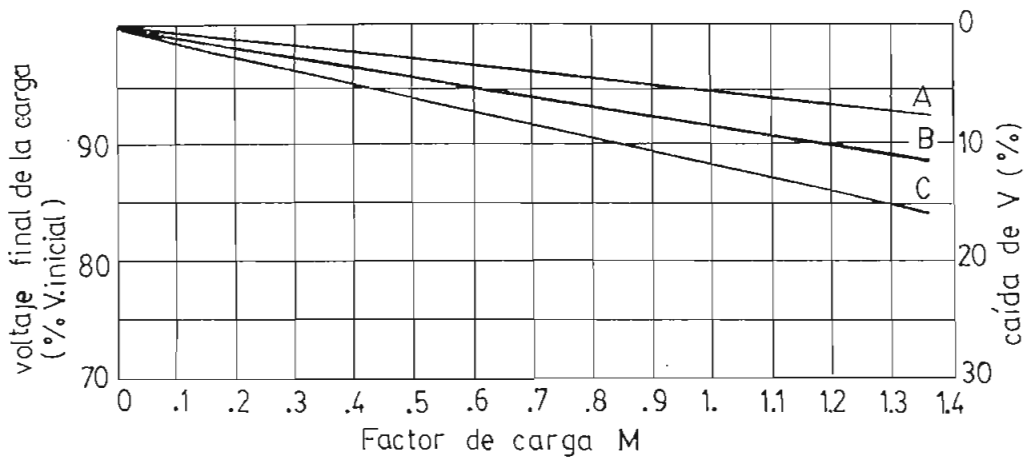


Fig. 2.11. Variación de la caída de voltaje con el factor M para líneas y cables.

A: Cable trifásico (4/0 AWG - 15 KV)

B: Cable monofásico (4/0 AWG - 150 mm de distancia)

C: Línea aérea (4/0 AWG - 15 KV)

La caída de voltaje en una línea depende del calibre y separación del conductor, por lo que, para los diferentes casos que se ilustran en la figura 2.11 la caída de tensión puede ser diferente, para lo cual la figura 2.12 muestra -

la caída de voltaje para un rango de configuraciones del circuito.

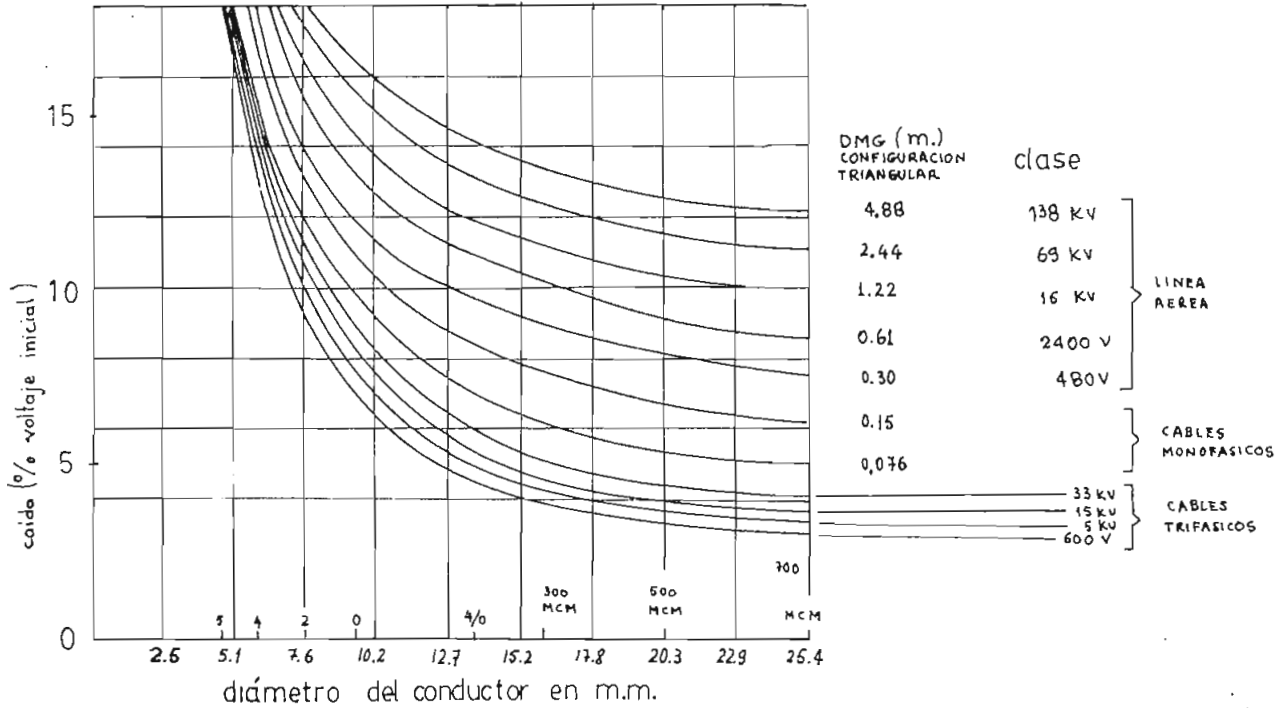


Fig. 2.12. Caídas de voltaje en líneas y cables con factor de carga  $M = 1$ .

La figura 2.12 se aplica para la condición de factor de carga  $M = 1$ . Los valores de caída de voltaje para otros valores de  $M$  pueden ser encontrados multiplicando el valor de  $M$  por los encontrados en esta figura.

#### 2.4. METODO DE COMBINACION DE CAIDAS DE VOLTAJE.-

Debido a que la adición de las distintas impedancias en serie que conforman la conexión generador-motor, tiende a disminuir la corriente del sistema, resulta un tanto inexacto

sumar las diferentes caídas de voltaje en cada elemento - del circuito calculadas o estimadas por separado, por lo que se sugiere considerar los siguientes pasos para tener un resultado más exacto.

1. Determinar la caída de voltaje en el elemento más cercano al motor, despreciando la caída en los otros elementos.

2. Multiplicar los KVA del motor por la relación:

$$\frac{\text{Voltaje final de la carga}}{\text{Voltaje inicial}}$$

3. Usando el nuevo valor de los KVA de arranque del motor, determinar la caída de voltaje en el siguiente elemento del circuito.

4. Multiplicar:

$$\text{KVAa.} \times \frac{\text{V. final de la carga}}{\text{V. inicial}} \times \frac{\text{V. final al siguiente elem.}}{\text{V. inicial al siguiente elem.}}$$

5. Continuar el proceso hasta completar todos los elementos en serie del circuito.

6. Multiplicar el voltaje inicial del motor por el producto de las relaciones voltaje final a voltaje inicial, de todos los elementos del circuito. Este resultado es el voltaje final en la carga.

Observaciones:

- a) Si el motor es alimentado por varios generadores similares en paralelo, para el cálculo de la caída de voltaje deberán considerarse como uno solo, con la capacidad total y el factor de eficiencia individual de cada máquina.
- b) Los bancos de transformadores pueden también ser agrupados si, alimentados desde la misma barra primaria, tienen igual reactancia y el mismo ajuste de tap.
- c) Para combinar la caída de voltaje de varias fuentes con características diferentes se sugiere que la carga de arranque del motor, previamente sea dividida en forma equitativa y luego determinar las caídas de voltaje correspondientes.

2.5. EJEMPLO

Cálculo de la caída de voltaje a los bornes del generador debido al arranque de un motor.

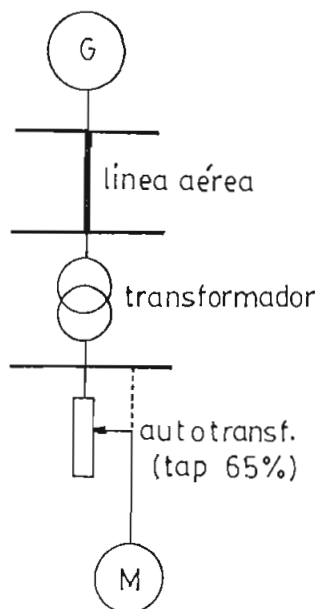
a) Datos

G: Turbogenerador 3600 RPM

5000 KVA,  $V_n = 6900$  Volt.

Ajuste del regulador de voltaje = 6700 Volts.

$X'_d = 0.2$  p.u.



$$X_d = 1.1 \text{ p.u.}$$

$$T'_{do} = 2.0 + 0.15 \left( \frac{5000}{1000} \right) = 2.75 \text{ seg.}$$

$$T_e = 0.2 \text{ seg.}$$

$$\frac{E_c}{E_n} = 2.75 \text{ p.u.}$$

- Línea: - conductor de cobre 4/0 AWG  
- configuración triángulo DMG=0.91m  
- longitud = 1524 m.

Transformador: trifásico, 2000KVA, 6600/2400V.

Motor: 1000 KVA, 2400 V.

$KVA_{arranque} = 500\%$  a voltaje nominal.

$T_{arranque} = 65\%$  a voltaje nominal.

b) Condiciones:

- Arranque a voltaje reducido con autotransformador (TAP 65%)
- Voltaje en la barra del generador: 6700 V (ajuste del regulador).
- El generador sin carga inicial.

c) Cálculos:

- KVA de arranque del motor a voltaje reducido.

$KVA_a = 5 \times 1000 \times 0.65 = 3250 \text{ KVA}$ , que se aplican al secundario del transformador, es decir el 163% de su capacidad.

- En la figura 2.10, el voltaje secundario del transforma-

dor  $V_s = 92\%$ .

- KVA aplicados a la línea de transmisión:

$$KVA = KVA_a \times \frac{V_{\text{secund.}}}{V_{\text{inicial}}} = 3250 \times 0,92 = 2990 \text{ KVA.}$$

- El factor de carga M, será:

$$M = 3.28 \times \frac{2990 \text{ KVA} \times 1524 \text{ m}}{(6700)^2} = 0.33$$

de la figura 2.12, para  $M = 1$ , se tiene una caída de tensión en la línea de 11.5 %, luego,  $\Delta V = 0.33 \times 11,5 = 3,79\%$  lo que indica que el voltaje decaerá al 96.21% del voltaje inicial.

- KVA aplicados al generador.

$$\begin{aligned} KVA &= KVA_a \text{ a voltaje nominal} \times \frac{V_{\text{final de la línea}}}{V_{\text{inicial de línea}}} \times \frac{V_{\text{secund}}}{V_{\text{inicial}}} \\ &= \left( 3250 \times \frac{6900 \times \frac{2400}{6600}}{2400} \right) \times 0.9621 \times 0.92 = 3007.44 \text{ KVA} \end{aligned}$$

$$\text{luego: } \frac{KVA_a}{KVA_g} = \frac{3007.44}{5000} = 0.6$$

En la figura 2.5.  $V_1 = 0.9 \text{ p.u.} \cong 90\%$

En la figura 2.6.  $V_2 = 0.63 \text{ p.u.} \cong 63\%$

el voltaje de restablecimiento será:  $V_r = \frac{E_c}{E_n} V_2$

$V_r = 2.75 \times 0.63 = 1.73 \text{ p.u.}$ , asumimos 1.0 p.u., lo que indica que el regulador restablecerá el voltaje al 100%.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{0.9}{0.63} = 1.43 \quad \text{y} \quad \frac{T_e}{T'_{d0}} = \frac{0.2}{2.75} = 0.072$$

En la figura 2.8,  $K_m = \frac{V_m}{V_2} = 1.42$ , luego:

$$V_m = 1.42 \times 0.63 = 0.895 \text{ p.u.}$$

lo que indica que al momento del arranque, el voltaje a los bornes del generador, decae al 89.5% del voltaje inicial.

- En la figura 2.9,  $K_t = \frac{T_m}{T_e} = 0.17$ , luego,  $T_m = 0.17 \times 0.2 = 0.034$  seg., que es el tiempo en que ocurre el mínimo voltaje.

$$T_r = 1.5 \times T'_{d0} \times T_m = 1.5 \times 2.75 \times 0.034 = 0.14 \text{ seg.}, \text{ que}$$

es el tiempo requerido para alcanzar el voltaje de restablecimiento.

## C A P I T U L O   I I I

### ESTUDIO DE CAIDAS DE VOLTAJE, TORQUES Y TIEMPO DE ACELERACION DURANTE EL ARRANQUE BAJO CARGA

#### 3.1 ESTUDIO DE LA CAIDA DE VOLTAJE EN UN SISTEMA DE POTENCIA.

##### 3.1.1 La Caída de Voltaje Instantánea

Una finalidad del estudio del efecto de la caída de voltaje durante el arranque del motor, es considerar si la máxima caída instantánea que ocurre, "deja" los voltajes de las barras del sistema en niveles aceptables. Se requiere, por lo tanto, un análisis del sistema de potencia, en el instante de tiempo que correspondería al peor de los casos, es decir, cuando la corriente de arranque del motor alcanza su máximo valor. Adicionalmente se pueden estudiar los flujos de potencia y pérdidas de potencia, resultados que permitirán conocer el comportamiento del sistema antes, durante y después del arranque de un motor de gran potencia.

Con una modelación apropiada del sistema, este tipo de estudio se lo puede realizar mediante varios métodos de cálculo, sean éstos manuales o con el uso del computador digital.



### 3.1.2 Requerimiento de Datos

Los datos a obtenerse para el estudio de la caída de voltaje son básicamente los mismos que se requieren para un estudio de flujos de carga o cortocircuito. Se presenta un resumen de los componentes del sistema de potencia para los que se requiere información de sus parámetros y constantes, aunque una información detallada se encontrará en las referencias [8] y [9]:

#### 3.1.2.1 Impedancias del Generador

Estos valores son muy significativos y deben tener la mayor exactitud posible. Generalmente se los obtiene de los representantes locales o fabricantes del generador. Sin embargo, cuando no es posible obtener valores exactos se dispone de tablas y curvas características de las impedancias de generadores en amplios rangos de potencia.

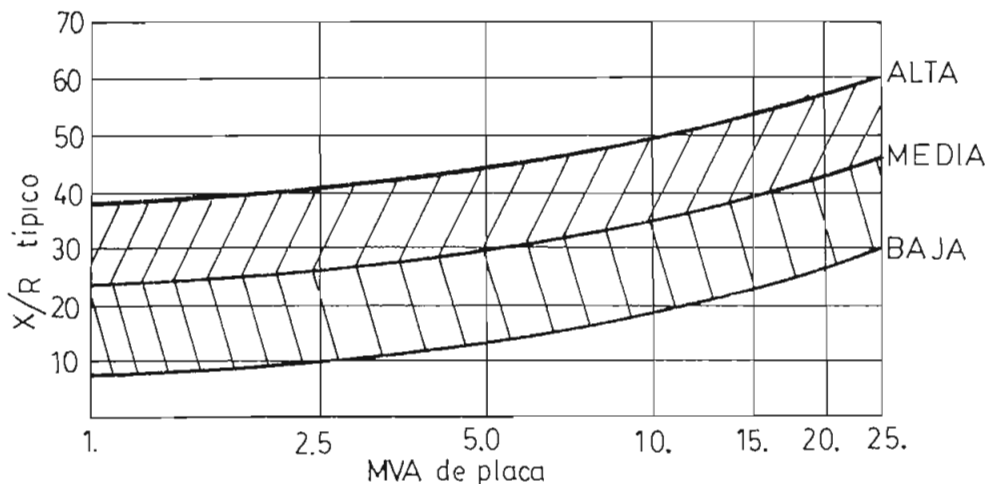


Fig. 3.1. Relaciones X/R características para generadores y máquinas sincrónicas. (Tomado de ANSI C.30.010.1972). Curvas para máquinas de baja, media y alta tensión

### 3.1.2.2. Transformadores

Los valores de reactancia de los transformadores generalmente vienen dados por el fabricante, en porcentaje o "p.u." en la base de potencia y tensión nominal del transformador. Se puede también utilizar valores estandarizados de impedancias y de relaciones  $X/R$  tomados de tablas y curvas características.

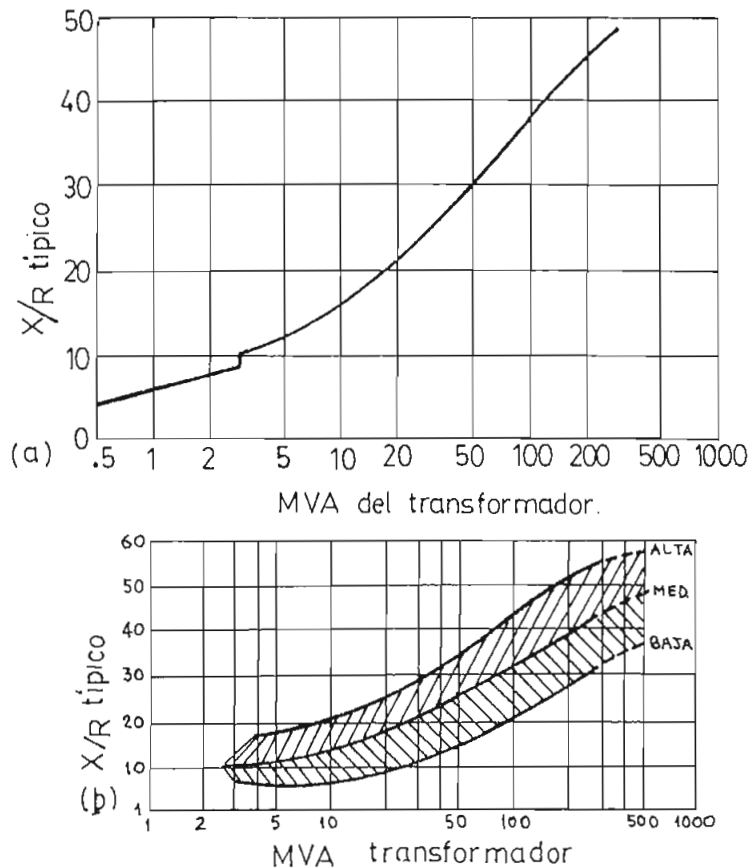


Fig. 3.2. Relaciones  $X/R$  características para transformadores de potencia: a. (Tomado de IEEE Std. 320-1972) b. (Tomado de ANSI C.30.010-1972)

### 3.1.2.3. Otros componentes.

Los elementos del sistema, tales como cables, serán especificados por el calibre y longitud del conductor, material del mismo y si se usa blindaje o ducto magnético. En

general, todos los elementos del sistema se los identificará con valores de R y X con el fin de calcular la impedancia equivalente del sistema.

#### 3.1.2.4 Características de carga.

Las cargas eléctricas del sistema se detallarán incluyendo: tipo (corriente constante, impedancia constante o KVA constante), factor de potencia, factor de carga, o cualquier otro dato. Para el motor a ser arrancado se considerará las características exactas de arranque.

#### 3.1.2.5 Datos del motor y su carga mecánica.

Aparte de la información básica requerida para el estudio de la caída de voltaje, se requiere de otras consideraciones para un estudio detallado de torque-velocidad y tiempo de aceleración (tema a tratarse posteriormente). Aquí se incluye el  $WR^2$  (constante de inercia) del motor y la carga, las características torque-velocidad del motor y la carga, y para mayor exactitud, se usarán también las características corriente-velocidad y corriente-factor de potencia del motor y las constantes del circuito equivalente.

#### 3.1.2.6 Asunciones de simplificación.

Además del uso de valores de impedancia normalizados, es

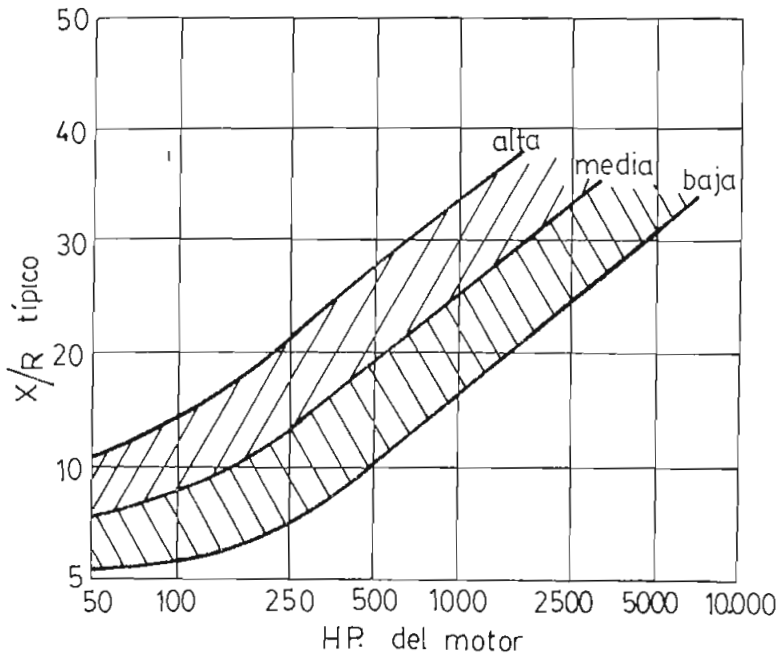


Fig. 3.3 Relaciones X/R características para motores de inducción de gran potencia. (Tomado de ANSI C.30.010-1972)

frecuente el uso de valores típicos o establecidos para o tras variables cuando las características exactas del motor y/o la carga son desconocidas.

a) Conversión de HP. a KVA.: para los motores de inducción, es bastante razonable considerar que 1 HP = 1 KVA, con siderando que en la ecuación

$$HP = \frac{0.746 \times KVA}{(eficienc.)(fact.potencia)} \quad (Ec.3.1-1)$$

la relación  $0.746/(efic.)(fact. de potencia)$ , es aproximadamente igual a UNO en la mayoría de los motores.

b) Corriente de Excitación.: ("inrush current"): un factor adecuado para la corriente de excitación en el arranque, se obtiene al considerar que la corriente de rotor bloqueado es igual a SEIS veces la corriente de plena carga con pleno voltaje aplicado a los terminales del motor.

c) Factor de Potencia de arranque: el factor de potencia de un motor durante el arranque, determina el nivel de corriente reactiva que se absorberá del sistema, así como también influye en gran parte en la máxima caída de voltaje que se produce. Valores generalizados permiten resumir lo siguiente:

1. Factor de potencia para motores de menos de 1000HP= 0.20
2. Factor de potencia para motores de 1000 HP o más = 0.15

### 3.1.3 Procedimientos de Solución y Ejemplos

Básicamente existen dos maneras de resolver el estudio de la caída de voltaje en un sistema como consecuencia del arranque de un motor.

1. Método de la Impedancia.- Este método consiste en la reducción del sistema a un simple circuito divisor de voltaje, en el cual, el voltaje

en cualquier punto (barra) del circuito se encuentra multiplicando el voltaje conocido (barra de la fuente) por la relación entre la impedancia en este punto y la impedancia total del circuito [7]

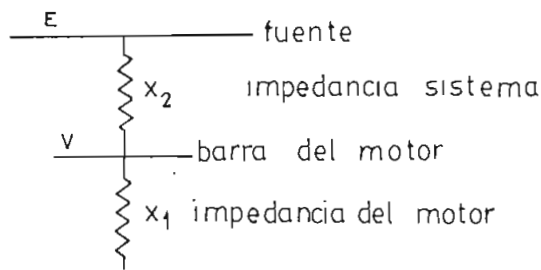


Fig. 3.4 Diagrama de impedancias simplificado.

$$V = E \frac{X_1}{X_1 + X_2} \cong E \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{Ec.3.1-2})$$

la impedancia de rotor bloqueado de un motor trifásico es

$$Z_{LR} = \frac{V_n(f-f)}{\sqrt{3}(I_{LR})} \quad [\Omega] \quad (\text{Ec.3.1-3})$$

donde  $I_{LR}$  es la corriente de rotor bloqueado a voltaje nominal.

Este valor en pu. es igual al inverso de la relación de corrientes, en el arranque, expresado en la base de los KVA del motor.

$$Z_{LR} = \frac{1}{I_{LR}/I_{pc}} \text{ p.u. (en la base de KVA nominales)} \quad (\text{Ec.3.1-4})$$

donde  $I_{pc}$  es la corriente de plena carga a voltaje nominal.

Debido a que el motor en arranque se lo puede representar como una impedancia constante, éste es un método muy conveniente y aceptable para el cálculo de la caída de voltaje. Cuando se requiere de resultados más exactos, las impedancias del sistema se las puede representar en forma compleja, en lugar de una simple reactancia.

EJEMPLO 1: Se necesita conocer la caída de tensión que se produce en un sistema simple, como consecuencia del arranque de un motor de inducción de 1250HP, conectado a través de un transformador de 3000KVA. Se tiene como dato que la Potencia de Cortocircuito de la barra a la que se conecta el motor es de 52 MVA.

Escogemos por facilidad de trabajo  $MVA_{Base} = 1$

- La impedancia equivalente en p.u. antes de la barra del motor es: [14]

$$Z_{eq} = \frac{MVA_B}{MVA_{cc}} = \frac{1}{52} = 0.0192 \text{ p.u.}$$

- La impedancia del transformador en la nueva base:

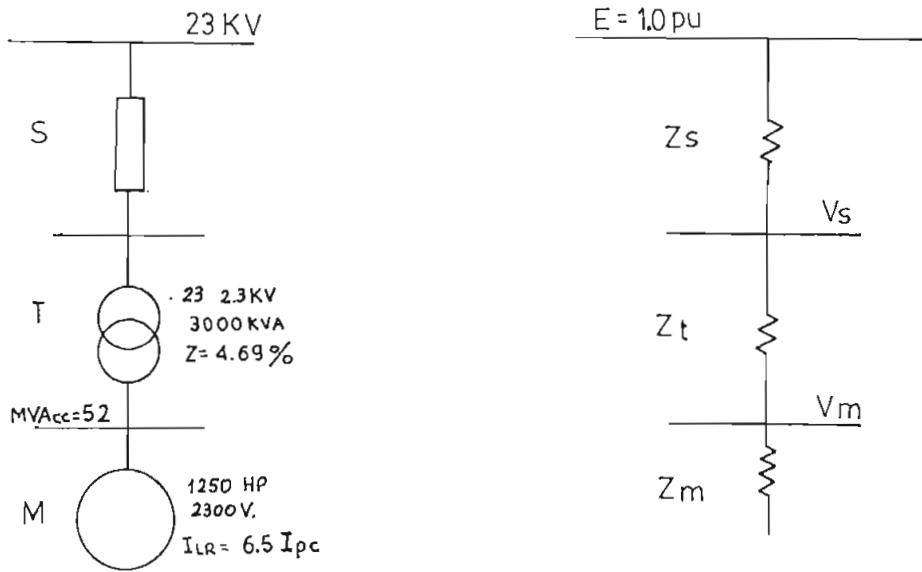


Fig. 3.5 Diagramas unifilar y de impedancias del sistema.

$$Z_t = 0.0469 \times \frac{1 \text{ MVA}}{3 \text{ MVA}} = 0.0156 \text{ p.u.}$$

- La impedancia del sistema:

$$Z_s = Z_{eq} - Z_t = 0.0192 - 0.0156 = 0.0036 \text{ p.u.}$$

- La impedancia de rotor bloqueado del motor, en su propia base será:

$$Z_m = \frac{1}{I_{LR}/I_{pc}} = \frac{1}{6.5} = 0.154 \text{ p.u. en la base de 1.25MVA.}$$

y en la nueva base:

$$Z_m = 0.154 \times \frac{1 \text{ MVA}}{1.25 \text{ MVA}} = 0.123 \text{ p.u.}$$



Aplicando las ecuaciones del divisor de tensión; el voltaje a los terminales del motor será:

$$V_m = \frac{Z_m}{Z_m + Z_t + Z_s} = \frac{0.123}{0.123 + 0.0156 + 0.0036} = \frac{0.123}{0.1422}$$

$$V_m = 0.866 \text{ p.u.}$$

y el voltaje en la barra del sistema será:

$$V_s = \frac{0.123 + 0.0156}{0.123 + 0.0156 + 0.0036} = \frac{0.1386}{0.1422} =$$

$$V_s = 0.9747 \text{ p.u.} \quad V_s = 97.47\%$$

lo que indica que el arranque del motor ha provocado en el sistema, una caída de tensión del 2.53%.

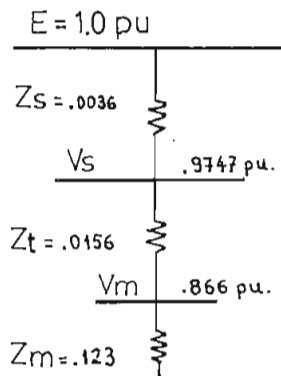


Fig. 3.6 Diagrama de impedancias y voltajes de barra del sistema.

EJEMPLO 2: Se requiere conocer la caída de tensión en una barra de un sistema de 69KV, causada por el arranque de un motor de 1500 HP, 2300V. El motor se alimenta a través de un transformador de 7500KVA. La potencia de cortocircuito de la barra del sistema es de 32.145 pu. en una base de 20 MVA.  $\Rightarrow MVA_{cc} = 643$

(Los datos son proporcionados por la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur y la Fábrica de llantas ERCO de Cuenca.)

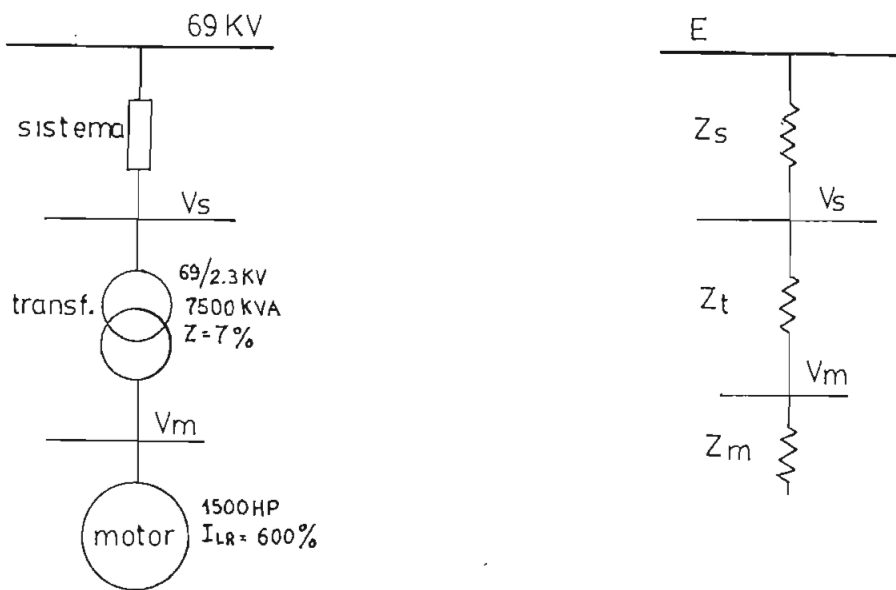


Fig. 3.7 Diagramas unifilar y de impedancias del sistema.

- La impedancia equivalente del sistema, en la base de 7.5 MVA que es la potencia de transformador será:

$$Z_s = \frac{MVA_B}{MVA_{cc}} = \frac{7.5}{643} = 0.012 \text{ p.u}$$

y  $Z_t = 0.07$  pu. en su propia base, 7.5 MVA.

- La potencia de cortocircuito en la barra del motor será:

$$MVA_{cc} = \frac{7.5 \text{ MVA}}{0.07+0.012} = 91.46 \text{ MVA}_{cc}$$

La impedancia equivalente antes de la barra del motor en una nueva base de 1 MVA, será:

$$Z_{eq} = \frac{1 \text{ MVA}}{91.46 \text{ MVA}} = 0.011 \text{ p.u.}$$

La impedancia del transformador en esta nueva base, será:

$$Z_t = 0.07 \times \frac{1}{7.5} = 0.009 \text{ p.u.}$$

por lo que la impedancia del sistema

$$Z_s = 0.011 - 0.009 = 0.002 \text{ p.u.}$$

- La impedancia de rotor bloqueado en la propia base del motor es:

$$Z_m = \frac{1}{6} = 0.167 \text{ p.u. en la base de 1.5 MVA}$$

y en la nueva base será:

$$Z_m = 0.167 \times \frac{1}{1.5} = 0.111 \text{ p.u.}$$

Aplicando las ecuaciones de divisor de tensión

$$V_m = \frac{0.111}{0.111+0.009+0.002} = 0.91 \text{ p.u.}$$

y el voltaje en la barra del sistema será:

$$V_s = \frac{0.111+0.009}{0.111+0.009+0.002} = 0.984 \text{ p.u.} \Rightarrow V_s = 98.4\%$$

lo que indica que el arranque del motor produce en el sistema una caída del 1.6% en el nivel de tensión.

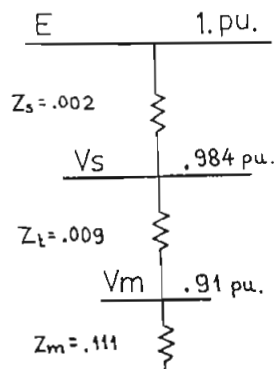


Fig. 3.6. Diagrama de impedancias y voltajes de barra.

2. Método de Solución por "Flujos de Carga".- El método estudiado en la sección anterior tiene limitaciones en cuanto a la exactitud de los re

sultados y al tamaño y configuración del sistema. Cuando el sistema industrial se vuelve más complejo, es decir, si involucra un mayor número de barras y, consecuentemente, un mayor número de elementos tales como líneas y transformadores y además, presenta cargas adicionales, se requiere de un método de solución más adecuado, que puede ser implementado en una computadora digital.

Se presenta el método de solución de "Flujos de Carga" (Gauss-Seidel) [15]. La fórmula iterativa correspondiente a este método es:

$$V_i^k = \frac{1}{Y_{ii}} \left( \frac{P_i - jQ_i}{(V_i^{k-1})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^k - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^{k-1} \right)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$V_i$  = voltaje en la barra  $i$

$P_i, Q_i$  = potencia real y reactiva que representa la carga en la barra  $i$ .

$Y_{ii}$  = admitancia de barra

$Y_{ij}$  = admitancia entre barras  $i$  y  $j$

$n$  = número de barras del sistema

- se emplea un "factor de aceleración"  $\alpha$

$$V_{i(ac)}^k = V_{i(ac)}^{k-1} + \alpha(V_i^k - V_{i(ac)}^{k-1})$$

Se supone valores iniciales de tensión para todas las barras a excepción de la flotante, cuya tensión está especificada como dato del problema, al igual que las potencias activa y reactiva de las barras con carga y la admitancia de los elementos.

Se aplica la fórmula iterativa hasta que se satisfaga algún criterio de convergencia y se determina las tensiones en las barras del sistema.

Una vez determinadas las tensiones  $V_i$ , se calculan los flujos de potencia  $S_{ij}$  y  $S_{ji}$ , entre las barras  $i$  y  $j$

$$S_{ij} = P_{ij+j} - Q_{ij} = V_i(V_i^* - V_j^*)Y_{ij}^* + V_iV_i^* \frac{Y'_{ij}}{2}$$

$$S_{ji} = P_{ji+j} - Q_{ji} = V_j(V_j^* - V_i^*)Y_{ij}^* + V_jV_j^* \frac{Y'_{ij}}{2}$$

donde  $Y'_{ij}$  = admitancia a tierra de los elementos del sistema.

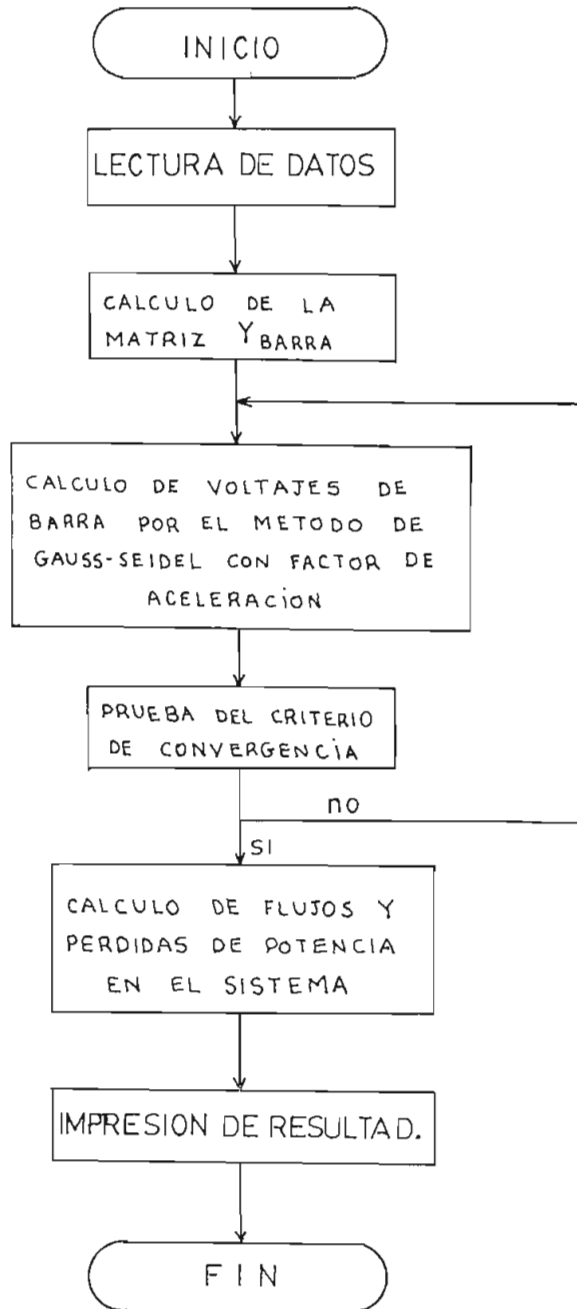
Conocidos los flujos de potencia, es posible determinar la potencia compleja en la barra flotante y las pérdidas de potencia.

$$P_{pij} = P_{ij} + P_{ji}$$

$$Q_{pij} = Q_{ij} + Q_{ji}$$

El motor en arranque se representa como un elemento de carga constante, y el sistema puede ser analizado antes, du-

3.1.4 Diagrama de Bloques del Programa Digital I para cálculo de caídas de voltaje en un Sistema de Potencia durante el arranque de un motor.



rante y después del arranque.

- antes: el motor desconectado, su potencia es nula
- durante: se considera la potencia de arranque del motor que está en proporción directa con el valor de la corriente de arranque (ver Fig. 2.7), considerando además el factor de potencia de arranque que determina la potencia activa y reactiva absorbida por el motor en este instante.
- después: se considera la potencia nominal del motor con su respectivo factor de potencia.

### 3.1.5 Ejemplos de Aplicación y Resultados.

Ejemplo 1.- El ejemplo a desarrollarse considera un supuesto sistema de potencia industrial en el que se arranca un motor de inducción de 1000HP. Los datos y configuración del sistema se tomaron de la referencia 16 con la finalidad de comparar resultados, probando así el programa digital implementado.

Se elige una potencia base de  $MVA_B = 100$

$$Z_{eq} = \frac{100 \text{ MVA}_B}{10000 \text{ MVA}_{CC}} = j0.01 \text{ p.u.}$$

$$Z_{T1} = j0.06 \times \frac{100 \text{ MVA}_B}{10 \text{ MVA}} = j0.6 \text{ p.u.}$$



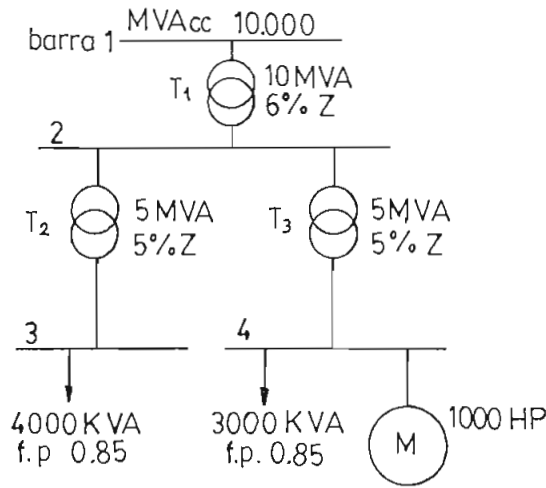


Fig. 3.9 Diagrama unifilar del sistema.

$$Z_{12} = j0.01 + j0.6 = j0.61 \text{ p.u.}$$

De las curvas de la Fig. 3.2-b se toma una relación  $X/R = 10$ . y se tiene impedancia en forma compleja

$$Z_{12} = 0.061 + j0.61 \text{ p.u.}$$

- Los transformadores  $T_2$  y  $T_3$  son de características iguales y representan las impedancias  $Z_{23}$  y  $Z_{24}$  respectivamente.

$$Z_{23} = Z_{24} = j0.05 \times \frac{100\text{MVA}}{5\text{MVA}} = j 1.0 \text{ p.u.}$$

en forma compleja, con  $X/R = 10$

$$Z_{23} = Z_{24} = 0.1 + j1.0 \text{ p.u.}$$

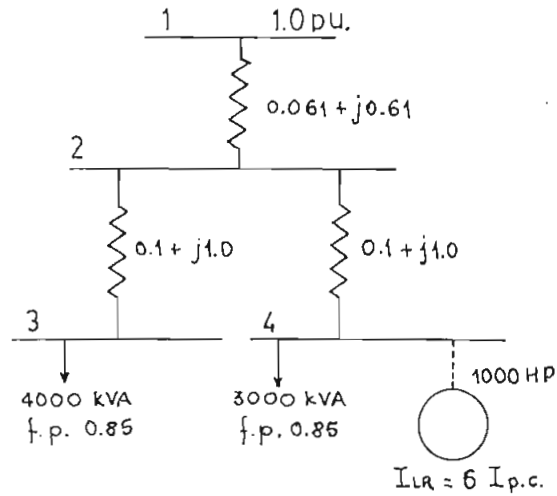


Fig. 3.10 Diagrama de impedancias del sistema.

## RESULTADOS

a) Antes del arranque.- En esta parte del ejemplo se ha corrido el programa de "flujos de carga" sin considerar la carga impuesta por el motor, sino únicamente, las cargas conectadas a las barras 3 y 4 que están funcionando permanentemente. Estos valores se introducen en forma compleja en la base impuesta de 100MVA.

El valor en p.u. del voltaje en cada barra del sistema se representa en la siguiente figura:

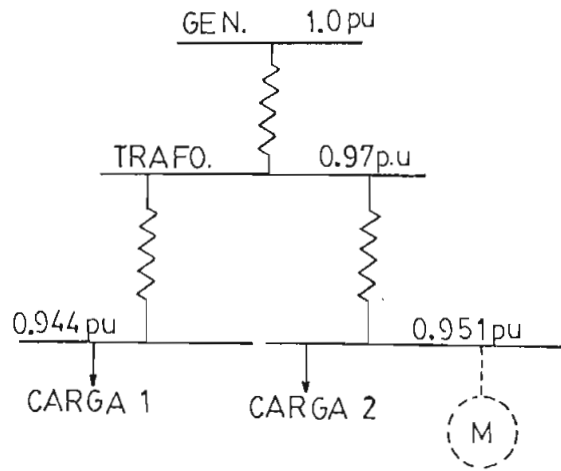


Fig. 3.11 Diagrama de voltajes de barra antes del arranque del motor

Resultados adicionales de ángulo de voltaje, potencia neta en las barras, flujos de potencia y pérdidas totales en el sistema, están indicados en la hoja de resultados que se obtuvo en la computadora.

- b) En el instante del arranque.- en esta parte del ejemplo se asume que el sistema industrial está conectado directamente a un generador de 12MVA. Durante el arranque del motor, la influencia del comportamiento transitorio de la máquina llega a tener importancia por lo que se requiere incluir la reactancia transitoria del generador, en serie con las demás impedancias del sistema

$$X_D' = 15\% \text{ en su propia base, } 12 \text{ MVA}$$



\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

12 BARRA # NOMBRE VOLTAJE POTENCIA NETA  
13 MAGNITUD(FU) ANGULO F(FU) G(FU)  
14 \*\*\*\*\*

15 1 GEN INT 1.054400 0.000000 0.044900 0.440700

16 FLUJOS Y PERDIDAS EN F.U.  
17 \*\*\*\*\*

18 DE BARRA A BARRA F. DE FLUJO G. DE FLUJO F. DE PERDIDAS G. DE PERDIDAS

19 GEN INT GEN BOR. 0.066900 0.110300 0.000000 0.010000

20 \*\*\*\*\*

21 BARRA # NOMBRE VOLTAJE POTENCIA NETA  
22 MAGNITUD(FU) ANGULO F(FU) G(FU)  
23 \*\*\*\*\*

24 2 GEN BOR. 0.229000 4.000000 0.000000 0.000000

25 FLUJOS Y PERDIDAS EN F.U.  
26 \*\*\*\*\*

27 DE BARRA A BARRA F. DE FLUJO G. DE FLUJO F. DE PERDIDAS G. DE PERDIDAS

28 GEN BOR. GEN INT. 0.066000 0.021400 0.000000 0.023600  
29 GEN BOR. TRAFIO 0.066000 0.071600 0.000000 0.007100

30 BARRA # NOMBRE VOLTAJE POTENCIA NETA  
31 MAGNITUD(FU) ANGULO F(FU) G(FU)  
32 \*\*\*\*\*

33 1 TRAFIO 0.045400 7.397000 0.000000 0.000000

34 FLUJOS Y PERDIDAS EN F.U.  
35 \*\*\*\*\*

36 DE BARRA A BARRA F. DE FLUJO G. DE FLUJO F. DE PERDIDAS G. DE PERDIDAS

37 TRAFIO GEN BOR. -0.066000 -0.002500 0.000000 0.000000  
38 TRAFIO CARGA 1 0.023000 0.023600 0.000000 0.000000  
39 TRAFIO CARGA 2 0.031700 0.057000 0.000000 0.000000

40 \*\*\*\*\*

41 BARRA # NOMBRE VOLTAJE POTENCIA NETA  
42 MAGNITUD(FU) ANGULO F(FU) G(FU)  
43 \*\*\*\*\*

44 1 CARGA 1 0.025000 0.025000 0.024000 0.024000

45 FLUJOS Y PERDIDAS EN F.U.  
46 \*\*\*\*\*

47 DE BARRA A BARRA F. DE FLUJO G. DE FLUJO F. DE PERDIDAS G. DE PERDIDAS

48 CARGA 1 TRAFIO -0.034000 -0.021000 0.000200 0.002000

49 \*\*\*\*\*

50 BARRA # NOMBRE VOLTAJE POTENCIA NETA  
51 MAGNITUD(FU) ANGULO F(FU) G(FU)  
52 \*\*\*\*\*

53 5 CARGA 2 0.220000 0.554000 0.031400 -0.053400

54 FLUJOS Y PERDIDAS EN F.U.  
55 \*\*\*\*\*

56 DE BARRA A BARRA F. DE FLUJO G. DE FLUJO F. DE PERDIDAS G. DE PERDIDAS

57 CARGA 2 TRAFIO 0.031400 0.053400 0.000000 0.000000

58 PERDIDAS TOTALES. F= 0.001700 G= 0.016000

59 ITERACIONES. 25

60 \*\*\*\*\*

61 \*\*\*\*\*

62 \*\*\*\*\*

$$X'_d = j0.15 \times \frac{100}{12} = j1.25 \text{ p.u. en la base de 100MVA.}$$

La Fig. 3.12 presenta el diagrama de impedancias del sistema y los valores de voltaje de barras en p.u., para el instante de arranque del motor de 1000HP. Como en el caso anterior, los resultados adicionales se presentan en la hoja de resultados de la computadora.

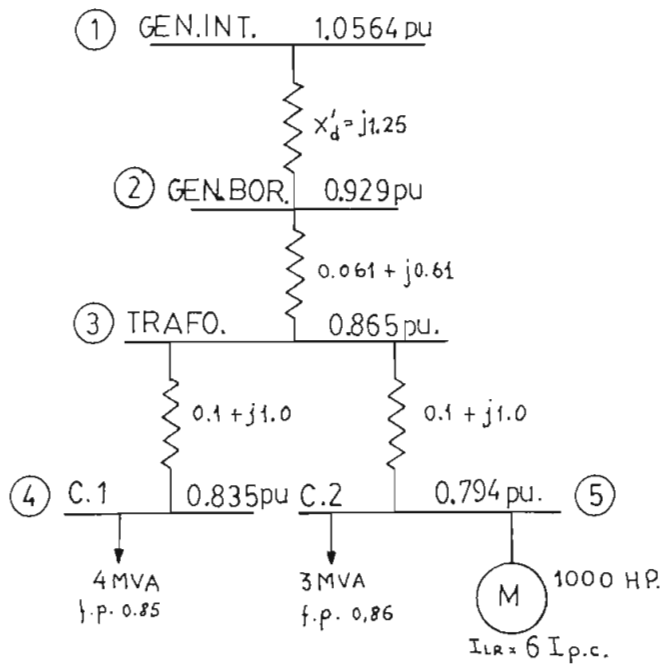


Fig. 3.12

c) Después del arranque.- Como complemento del estudio, se presenta una hoja adicional de resultados obtenida en la computadora, que indica el comportamiento del sistema después que el motor ha completado su período de arranque.



Ejemplo 2.- Estudio de la caída de tensión en una barra de 69KV del sistema de la Empresa Eléctrica Cuenca, por efecto de arranque de un motor de 1500HP conectado al sistema industrial de la Compañía Ecuatoriana del Caucho ERCO.

a) Antecedentes.-

- La Compañía ERCO requiere la conexión de un nuevo motor de gran potencia, adicional a los ya existentes, para satisfacer las crecientes necesidades de producción de la empresa.
- La EMPRESA ELECTRICA REGIONAL CENTRO SUR , EERCS, requiere a su vez, conocer el valor de la caída de tensión que se tendrá en la barra de 69KV que alimenta al sistema eléctrico de ERCO, a fin de tomar las medidas pertinentes para mantener la calidad del servicio.
- Este ejemplo pretende dar una utilización práctica y real al trabajo desarrollado en el presente capítulo. Los resultados que se obtienen del estudio, de ninguna manera son determinantes, quedando sujetos a revisión y consideración por parte de la EERCS o ERCO, si el caso lo requiere.
- Los datos utilizados en el ejemplo han sido proporcionados por EERCS y por la Compañía ERCO.



b) Representación del sistema.-

La configuración del sistema de la Compañía ERCO, conectado a la barra de 69KV, se indica en el diagrama unifilar de la fig. 3.13.

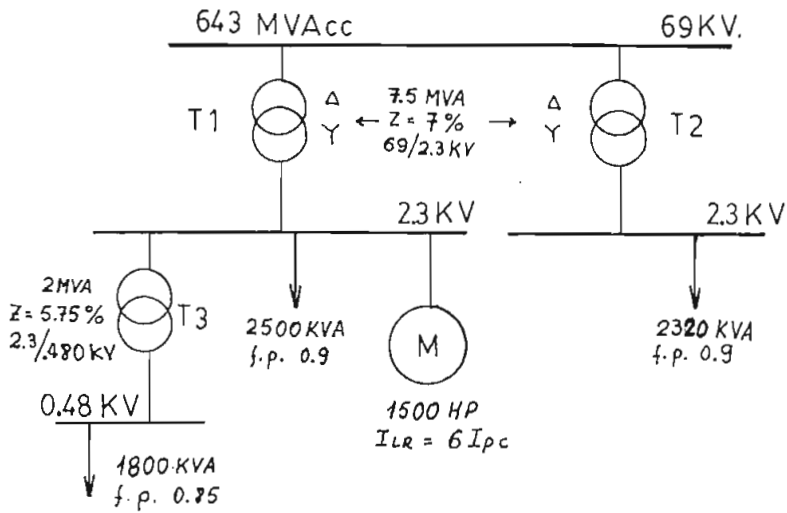


Fig. 3.13 Diagrama unifilar del sistema ERCO.

- Para la representación del diagrama de impedancias simplificado, se toma como base una potencia de 100 MVA.

$$Z_{T1} = Z_{T2} = j0.07 \times \frac{100}{7.5} = j0.93 \text{ p.u.}$$

$$Z_{T3} = j0.0575 \times \frac{100}{2} = j2.88 \text{ p.u.}$$

De las curvas de la Fig. 3.2 se toma una relación X/R=15,

por lo que la forma compleja de las impedancias será:

$$Z_{T_1} = Z_{T_2} = 0.062 + j0.93 \text{ p.u.}$$

$$Z_{T_3} = 0.192 + j2.88 \text{ p.u.}$$

- La impedancia equivalente del sistema antes de la barra de 69KV. será:

$$Z_s = \frac{100 \text{ MVA}}{643 \text{ MVA}_{CC}} = j0.156 \text{ p.u.}$$

c) Resultados.-

Antes del arranque del motor se asume que la barra de 69KV. tiene un voltaje de 1.0 p.u. En el instante de conexión del motor, se analizará a qué valor en pu. disminuye el voltaje en esta barra y en las restantes del sistema. Resultados complementarios de potencias netas, flujos y pérdidas se presentan en la hoja de resultados que se obtuvieron en la computadora.

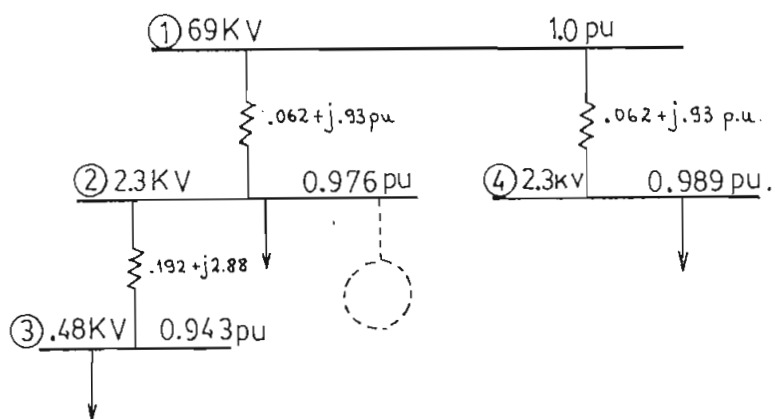


Fig. 3.14 Diagrama de impedancias simplificado y voltajes en las barras antes del arranque.

RESULTADOS  
\*\*\*\*\*  
EJECU. DE TABLAS ORIGEN DE ARRANQUE  
\*\*\*\*\*

BUSCADA #	BUSCADA	VOLTAJE MAGNETUD (PU)		POTENCIA NETA (PU)	
		ARRANQUE	ARRANQUE	P (PU)	Q (PU)
1	69 KV.	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000

FLUJOS Y PERDIDAS EN F.U.  
\*\*\*\*\*

DE BUSCADA A BUSCADA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
69 KV. - 2.3 KV.	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
69 KV. - 2.3 KV.	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

BUSCADA #	BUSCADA	VOLTAJE MAGNETUD (PU)		POTENCIA NETA (PU)	
		ARRANQUE	ARRANQUE	P (PU)	Q (PU)
2	2.3 KV.	0.976598	-1.986990	-0.022500	-0.010890

FLUJOS Y PERDIDAS EN F.U.  
\*\*\*\*\*

DE BUSCADA A BUSCADA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
2.3 KV. - 69 KV.	-0.000000	-0.000000	0.000000	0.000000
2.3 KV. - 415 KV.	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

BUSCADA #	BUSCADA	VOLTAJE MAGNETUD (PU)		POTENCIA NETA (PU)	
		ARRANQUE	ARRANQUE	P (PU)	Q (PU)
3	415 KV.	0.983345	-4.814101	-0.005300	-0.009480

FLUJOS Y PERDIDAS EN F.U.  
\*\*\*\*\*

DE BUSCADA A BUSCADA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
415 KV. - 2.3 KV.	-0.000000	-0.000000	0.000000	0.000000

BUSCADA #	BUSCADA	VOLTAJE MAGNETUD (PU)		POTENCIA NETA (PU)	
		ARRANQUE	ARRANQUE	P (PU)	Q (PU)
4	2.3 KV.	0.989098	-1.089591	-0.020890	-0.010310

FLUJOS Y PERDIDAS EN F.U.  
\*\*\*\*\*

DE BUSCADA A BUSCADA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
2.3 KV. - 69 KV.	-0.000000	-0.000000	0.000000	0.000000

PERDIDAS INFERIAS: P= 0.000000 Q= 0.000000

\*\*\*\*\*

**RESULTADOS**  
**ERRO. VOLTAJES DURANTE EL ARRANQUE=1500HP**

BARRA #	NOMBRE	VOLTAJE MAGNITUD (PU)	ANGULO	POTENCIA P (PU)	NETA Q (PU)
1	SISTEMA	1.000000	0.000000	0.084509	0.114360

FLUJOS Y PERDIDAS EN P.U.					
DE BARRA	A BARRA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
SISTEMA	69 KV.	0.084509	0.114360	0.000000	0.003117

BARRA #	NOMBRE	VOLTAJE MAGNITUD (PU)	ANGULO	POTENCIA P (PU)	NETA Q (PU)
2	69 KV.	0.988353	-0.759721	0.000000	0.000000

FLUJOS Y PERDIDAS EN P.U.					
DE BARRA	A BARRA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
69 KV.	SISTEMA	-0.084509	-0.111243	0.000000	0.003117
69 KV.	2.3 KV.	0.063321	0.100734	0.000899	0.013478
69 KV.	2.3 KV.	0.010929	0.010623	0.000035	0.000524

BARRA #	NOMBRE	VOLTAJE MAGNITUD (PU)	ANGULO	POTENCIA P (PU)	NETA Q (PU)
3	2.3 KV.	0.891147	-4.185163	-0.047000	-0.076500

FLUJOS Y PERDIDAS EN P.U.					
DE BARRA	A BARRA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
2.3 KV.	69 KV.	-0.062423	-0.087254	0.000899	0.013478
2.3 KV.	.48 KV.	0.015350	0.010773	0.000085	0.001275

BARRA #	NOMBRE	VOLTAJE MAGNITUD (PU)	ANGULO	POTENCIA P (PU)	NETA Q (PU)
4	.48 KV.	0.854375	-7.350781	-0.015300	-0.009480

FLUJOS Y PERDIDAS EN P.U.					
DE BARRA	A BARRA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
.48 KV.	2.3 KV.	-0.015285	-0.009498	0.000085	0.001275

BARRA #	NOMBRE	VOLTAJE MAGNITUD (PU)	ANGULO	POTENCIA P (PU)	NETA Q (PU)
5	2.3 KV.	0.977229	-1.875373	-0.020800	-0.010110

FLUJOS Y PERDIDAS EN P.U.					
DE BARRA	A BARRA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
2.3 KV.	69 KV.	-0.020894	-0.010099	0.000035	0.000524

PERDIDAS TOTALES: P= 0.001619 Q= 0.018395

ITERACIONES: 8

**RESULTADOS**  
**ERCD.VOLTAJES LUEGO DEL ARRANQUE=1500HP.**  
 \*\*\*\*\*

BARRA #	NOMBRE	VOLTAJE		POTENCIA NETA	
		MAGNITUD (PU)	ANGULO	P (PU)	Q (PU)
1	W2101	1.000000	0.000000	0.072504	-0.041987

FLUJOS Y PERDIDAS EN P.U.					
DE BARRA	A BARRA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
69 KV.	2.3 KV.	0.051576	-0.031371	0.000226	0.003389
69 KV.	2.3 KV.	0.020929	-0.010616	0.000034	0.000512

BARRA #	NOMBRE	VOLTAJE		POTENCIA NETA	
		MAGNITUD (PU)	ANGULO	P (PU)	Q (PU)
2	2.3 KV.	0.968721	-2.722938	-0.036000	-0.017420

FLUJOS Y PERDIDAS EN P.U.					
DE BARRA	A BARRA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
2.3 KV.	69 KV.	-0.051350	-0.027932	0.000226	0.003389
2.3 KV.	2.3 KV.	0.015390	0.010526	0.000071	0.001057

BARRA #	NOMBRE	VOLTAJE		POTENCIA NETA	
		MAGNITUD (PU)	ANGULO	P (PU)	Q (PU)
3	2.3 KV.	0.935397	-5.398693	-0.015300	-0.009480

FLUJOS Y PERDIDAS EN P.U.					
DE BARRA	A BARRA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
2.3 KV.	2.3 KV.	-0.013319	-0.009459	0.000071	0.001057

BARRA #	NOMBRE	VOLTAJE		POTENCIA NETA	
		MAGNITUD (PU)	ANGULO	P (PU)	Q (PU)
4	2.3 KV.	0.989008	-1.089511	-0.020880	-0.010110

FLUJOS Y PERDIDAS EN P.U.					
DE BARRA	A BARRA	P. DE FLUJO	Q. DE FLUJO	P. DE PERDIDAS	Q. DE PERDIDAS
2.3 KV.	69 KV.	-0.020894	-0.010103	0.000034	0.000512

PERDIDAS LINEAS: P= 0.000533 Q= 0.004968

PERDIDAS: S

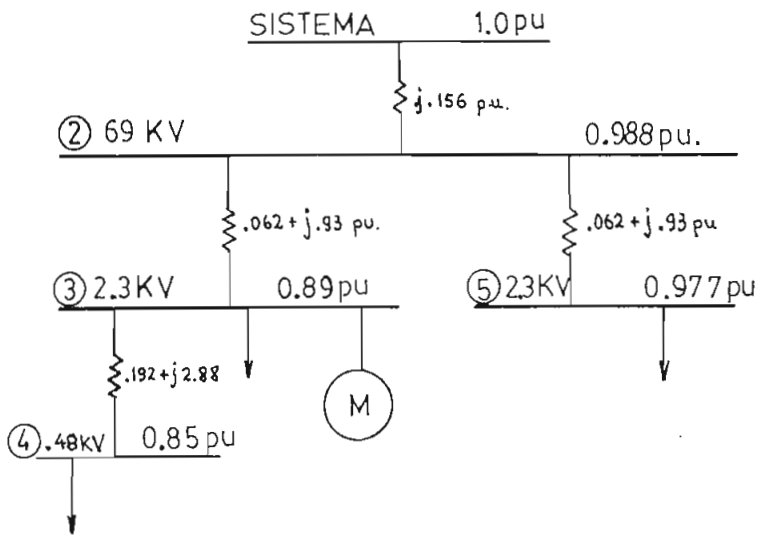


Fig. 3.15 Voltajes de barra en el arranque del motor.

### 3.2 ESTUDIO DEL TORQUE Y TIEMPO DE ACELERACION DE UN MOTOR DE GRAN POTENCIA DURANTE SU PROCESO DE ARRANQUE BAJO CARGA.

#### 3.2.1 Torque y Tiempo de Aceleración.

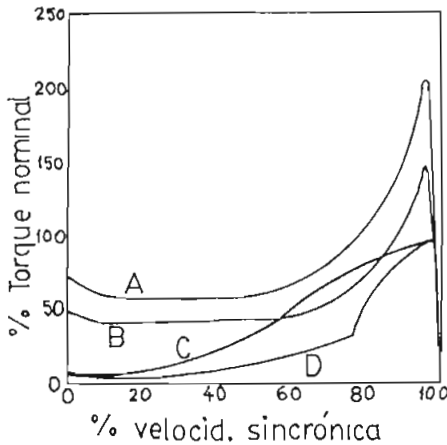
Probablemente el estudio más exacto de las condiciones de arranque de un motor, es el que se refiere al análisis de tallado del torque-velocidad y tiempo de aceleración. Desde un tiempo cero que representa el instante de conexión del motor y, en intervalos de tiempo durante el proceso de arranque hasta cuando el motor llega a su velocidad nominal, se pueden examinar los valores de deslizamiento, velocidad, voltaje terminal, torque, potencia de salida, co

rriente, etc.

Este estudio se justifica en base a que bajo ciertas circunstancias, aun cuando se arranca en conexión directa, - existe la posibilidad de que el motor no pueda romper su inercia o pueda trabarse en algun valor de velocidad antes de completar su período de arranque.

Durante los últimos diez años, ciertas aplicaciones industriales han requerido un estudio más exacto de las características velocidad - corriente y particularmente de la característica velocidad-torque, durante el período de aceleración. Por ejemplo, instalaciones de bombas que entregan agua a una caldera deben operar en condiciones satisfactorias aun cuando el voltaje aplicado disminuya a valores tan críticos como el 70 ó 75% del voltaje nominal. Los compresores axiales presentan similares problemas, por lo que el motor debe tener en cualquier momento, un torque suficiente para asegurar una aceleración positiva y operar en eventuales condiciones de voltaje reducido.

La figura 3.16 muestra las curvas típicas velocidad-torque de un motor de inducción y dos ejemplos de requerimiento de torque de carga. Considerando la aceleración para cada instante, desde el reposo a la velocidad de plena carga, con el 100% de voltaje nominal aplicado, el motor se acelera satisfactoriamente para cualquiera de las dos cargas aplicadas; con el 85% del voltaje aplicado, el motor acelerará el compresor axial hasta el 60% de la velocidad



- A: Torque motor a 100% Vn.
- B: Torque motor a 85% Vn.
- C: Torque de compresor axial
- D: Torque de bomba centrífuga.

Fig. 3.16 Curvas típicas velocidad-torque.  
(tomado de [11].)

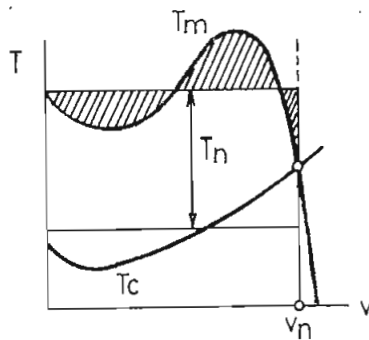
de operación, en este punto el motor se frena o se traba debido a que el torque motor es menor al torque necesario para acelerar la carga, provocando el consiguiente sobrecalentamiento del motor; sin embargo, con el mismo voltaje reducido se acelera satisfactoriamente la bomba centrífuga pero sin llegarse a la velocidad nominal, sino a un valor muy cercano en el que la capacidad de entrega de agua de la bomba será menor.

Por otra parte, el tiempo de arranque o tiempo de aceleración, se define como el tiempo que tarda un motor en llegar a sus valores nominales de régimen y depende de los siguientes factores: a) de la carga conectada al eje de la máquina; b) de la inercia de las masas giratorias, y c) de la característica torque-deslizamiento.



### 3.2.2. Determinación del Tiempo de Arranque

Para determinar el tiempo de arranque de un motor acoplado a una carga mecánica se requiere conocer las curvas características torque-velocidad, tanto del motor como de la carga, con las cuales se determina el torque neto de aceleración para uno o varios rangos de velocidad comprendidos en el proceso de arranque. La Fig. 3.17 expone un método sencillo para determinar, en forma aproximada, el torque neto de aceleración. Se obtiene por comparación de áreas el valor medio de torque motor y torque de carga y el torque neto acelerante será la diferencia de estos valores.



$T_m$ : torque motor  
 $T_c$ : torque de carga  
 $T_n$ : torque neto de aceleración  
 $v_n$ : velocidad nominal.

Fig. 3.17.- Determinación del torque neto de aceleración.

Las ecuaciones siguientes [5], [10] pueden ser aplicadas tanto para las máquinas de inducción como para las máquinas síncronas, debido a que su comportamiento durante el

período de arranque es más o menos similar.

El torque que acelera un eje en rotación es:

$$T_n = J_0 \alpha \quad (\text{Ec. 3.2-1})$$

donde:  $J_0$ : momento de inercia

$\alpha$ : aceleración angular

$$J_0 = \frac{wk^2}{g} \quad (\text{Ec. 3.2-2})$$

donde:  $wk^2$ : constante de inercia de la masa giratoria

$g$ : aceleración de la gravedad.

La velocidad angular  $\omega$  para un tiempo  $t$ , se expresa

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha(\theta - \theta_0) \quad (\text{Ec. 3.2-3})$$

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 \quad (\text{Ec. 3.2-4})$$

donde:  $\theta$ : ángulo de giro.

$$\Delta\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2 \quad (\text{Ec. 3.2-5a})$$

de la ecuación 3.2-3 se tiene

$$\Delta\theta = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\alpha} \quad (\text{Ec. 3.2-5b})$$

de las ecuaciones 3.2-5a y 3.2-5b se tiene que,

$$t = \frac{\omega - \omega_0}{\alpha}$$

de la ecuación 3.2-1 y 3.2-2

$$\alpha = \frac{g}{wk^2} T_n \quad [\text{rd/seg}^2]$$

luego

$$t = \frac{wk^2(\omega - \omega_0)}{g T_n} \quad [\text{seg.}] \quad (\text{Ec. 3.2-6})$$

la velocidad angular se puede expresar en RPM por lo que, haciendo la correspondiente conversión de rd/seg:

$$1 \text{ Revolución} = 2\pi \text{ rad.}$$

$$\frac{\text{rd}}{\text{seg}} = \frac{2\pi}{60}(\text{RPM})$$

luego, la expresión de tiempo de aceleración será:

$$t = \frac{wk^2(\text{RPM} - \text{RPM}_0)(2\pi)}{60 g T_n} \quad [\text{seg}] \quad (\text{Ec. 3.2-7})$$

De esta expresión deducida para calcular el tiempo aproximado de arranque, se pueden hacer las siguientes indicaciones:

a) El factor  $wk^2$  representa la suma de las constantes de inercia de las partes giratorias de las máquinas (motor y carga), es decir, considera una sola máquina simple o equivalente con un régimen igual a la suma de las máquinas funcionando juntas durante el período de arranque.

$wk^2$ , físicamente representa el peso de las partes giratorias multiplicado por el cuadrado del radio de giro.

- b) El factor  $(RPM-RPM_0)$  representa el rango de velocidad para el cual se desea determinar el tiempo necesario - para acelerar el motor o el sistema motor-carga, desde una velocidad  $RPM_0$  a una velocidad mayor RPM.
- c) Como se vió anteriormente, el factor  $T_n$  representa el torque neto acelerante que dispone el motor para acelerar su carga en el rango de velocidad correspondiente.

Para propósitos de cálculo, se dan dos expresiones prácticas del tiempo de aceleración, considerando los sistemas de unidades.

$$t(\text{seg}) = \frac{wk^2(RPM-RPM_0)}{93.54 T_n}$$

$wk^2 [N-m^2]$   
 $g = 9,8 \text{ m/sg}^2$   
 $T_n = [N-m]$

$$t(\text{seg}) = \frac{wk^2(RPM-RPM_0)}{9.55 T_n}$$

$wk^2 [Kg-m^2]$   
 $g = 9.8 \text{ m/sg}^2$   
 $T_n = [N-m]$

### 3.2.3 Curvas características del Torque de Carga

La característica torque-velocidad o característica mecánica de una carga, determina en gran manera las condiciones de funcionamiento de un motor; entre ellas el proceso de arranque y, particularmente en este estudio, sirve para determinar el tiempo de aceleración del motor.

Generalmente esta característica es suministrada por el fabricante de la carga debido a su importancia para elegir las características mecánicas y eléctricas del motor al cual será acoplada. La Fig. 3.18 muestra las curvas características torque-velocidad de algunos tipos comunes de cargas mecánicas que pueden ser utilizadas como referencia.

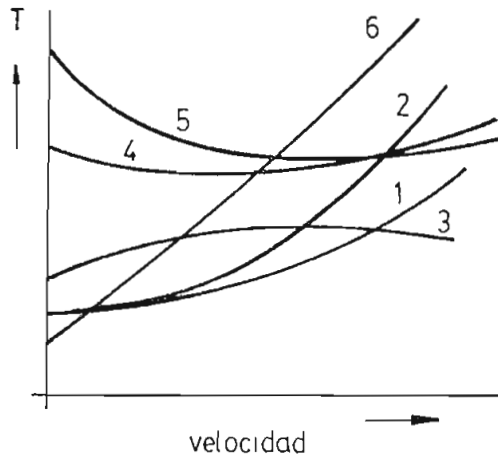


Fig. 3.18 Característica mecánica de distintos tipos de carga.

1. Bomba centrífuga, válvula cerrada
2. Bomba centrífuga, válvula abierta
3. Compresor de pistón con arranque en vacío. Máquina herramienta.
4. Tren de laminación
5. Compresor de pistón con arranque en carga. Laminador de caucho.

6. Calandra.

3.2.4 Diagrama Equivalente y Curvas Características

Para propósitos de simplificación en el cálculo de corriente y torque instantáneo en el proceso de arranque, se dispone del diagrama equivalente de Thevenin [13] de la máquina de inducción. En base a la representación del motor de inducción de la fig. 1.3. y aplicando el teorema de Thevenin para la transformación del circuito, se tiene:

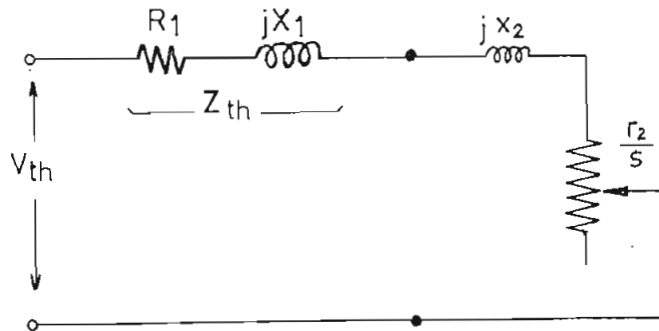


Fig. 3.19 Diagrama equivalente de Thevenin para la máquina de inducción.

donde:

$$Z_{th} = R_1 + jX_1 = (r_1 + jx_1) \text{ en paralelo con } (jx_M)$$

$$R_1 + jX_1 = \frac{(r_1 + jx_1)(jx_M)}{r_1 + j(x_1 + x_M)} \quad (\text{Ec. 3.2-8})$$

y

$$V_{th} = V \frac{jX_M}{r_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (\text{Ec. 3.2-9})$$

del diagrama y las expresiones anteriores se deduce que la corriente del motor esta dada por.

$$I = \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_1 + \frac{r_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (\text{Ec. 3.2-10})$$

y el valor de torque instantáneo del motor será:

$$T = \frac{1}{\omega s} q_1 \frac{(V_{th})^2}{(R_1 + \frac{r_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2} \frac{r_2}{s} \quad (\text{Ec. 3.2-11})$$

Las expresiones para la corriente y torque de arranque instantáneos se obtienen haciendo  $s=1$

Estas ecuaciones se utilizarán en el estudio del torque velocidad y tiempo de aceleración durante el proceso de arranque del motor; además de los datos del motor requeridos para la aplicación de estas ecuaciones, es necesario considerar las curvas características de corriente y factor de potencia  $\dot{V}_s$ . velocidad, que definen el comportamiento del motor en el período de arranque.

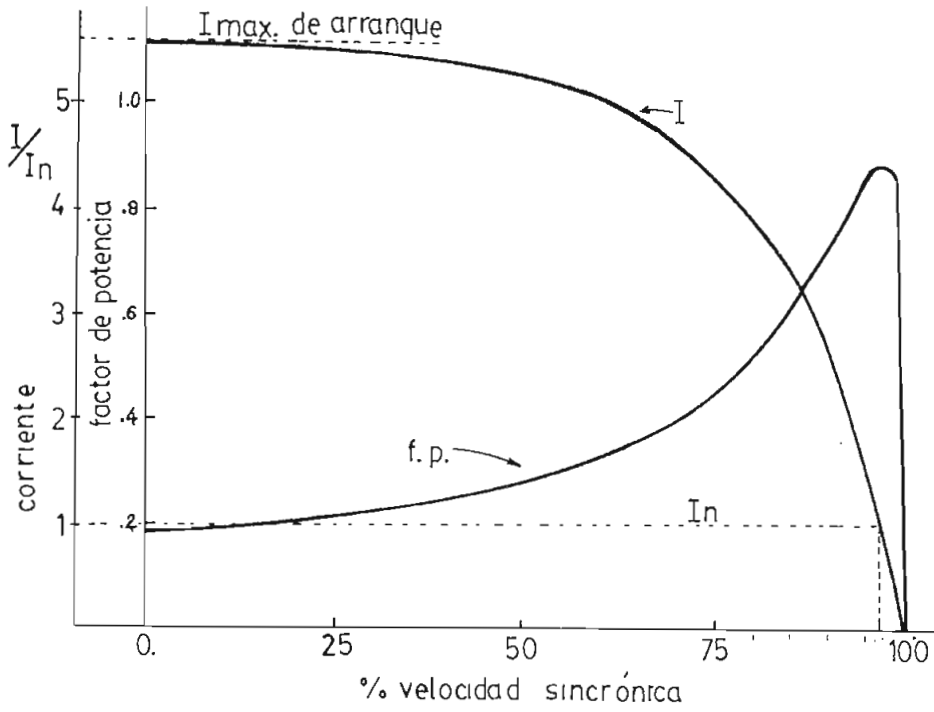
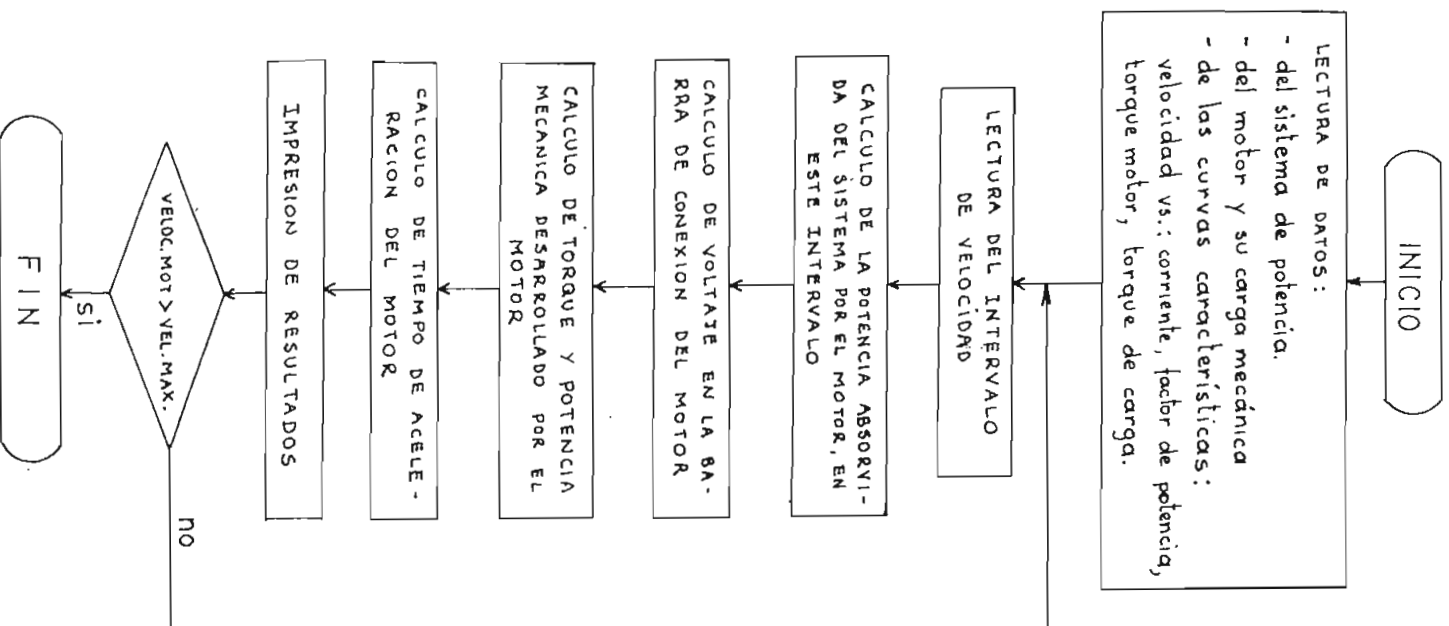


Fig. 3.20 Característica corriente-velocidad y factor de potencia-velocidad utilizadas en el estudio del arranque [7]



3.2.5 Diagrama de Bloques del Programa Digital II para el estudio Torque-Velocidad y Tiempo de Aceleración.



### 3.2.6 Ejemplos de Aplicación y Resultados.

Ejemplo 1. Este ejemplo de estudio "torque-velocidad y tiempo de aceleración", se refiere al motor y sistema del ejemplo 1 desarrollado en la sección 3.1.5.

a) Datos del sistema.- Son los utilizados en el ejemplo 1 de la sección 3.1.5.

b) Datos de placa del motor.-

- Motor trifásico de inducción 1000HP

- Diseño NEMA tipo A

-  $V_N = 4000 \text{ V}$                        $I_N = 123 \text{ A}$

- RPM= 1775                       $f = 60 \text{ Hz}$

c) Datos de resistencia y reactancia.

$$r_1 = 0.325\Omega$$

$$r_2 = 0.351\Omega$$

$$x_1 = 1.25\Omega$$

$$x_2 = 1.25\Omega$$

$$x_M = 20.7\Omega$$

Estos valores se pueden obtener para un motor de inducción mediante las pruebas de vacío y rotor bloqueado [2] pero debido a la indisponibilidad de realizar pruebas en un motor de esta potencia se utilizaron valores referenciales para este tipo de motores [1]

De los datos anteriores y de las ecuaciones 3.2-8 y 3.2-9, se tiene que:

$$Z_{th} = R_1 + jX_1 = 0.2889 + j 1.183 \Omega$$

$$V_{th} = 2177.7 \text{ Volts.}$$

d) Curvas características corriente y factor de potencia vs. velocidad.- Los datos de corriente y factor de potencia que se disponen en la respectiva curva característica del motor se obtienen linealizando la curva en segmentos escogidos adecuadamente, en distintos rangos de velocidad. El programa digital admite cinco rectas de la curva característica linealizada, y mediante una ecuación de la recta, tomará valores de corriente y factor de potencia correspondientes a cada intervalo de velocidad.

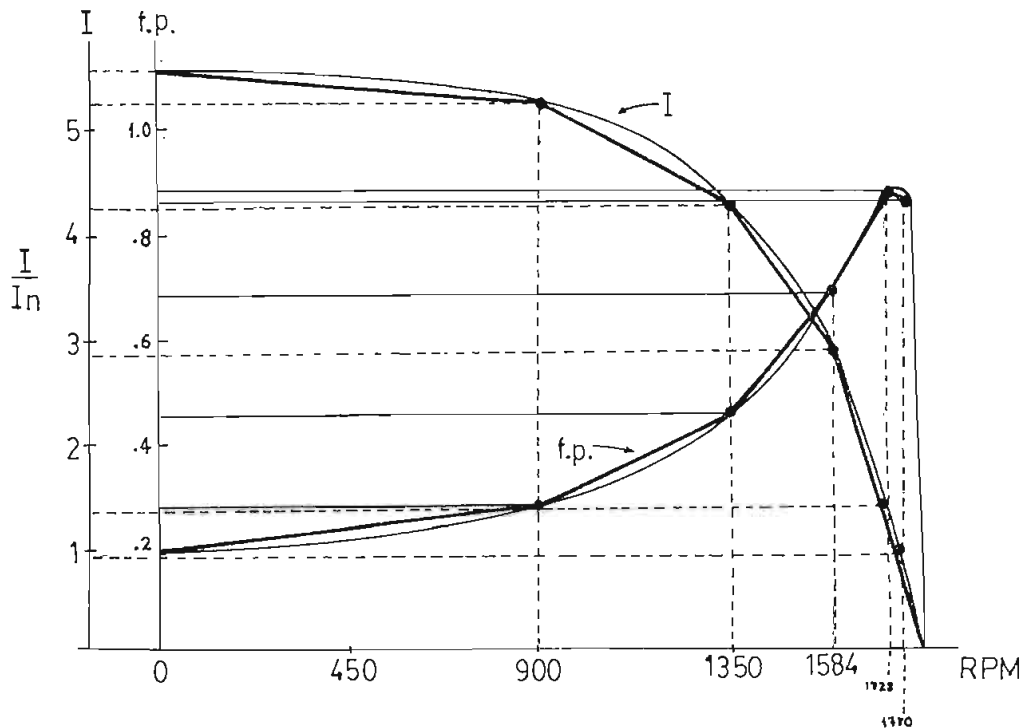


Fig. 3.21 Curvas características  $I=f(v)$  y  $f.p. = f(v)$  linealizadas.

e) Curvas características de torque motor y torque de carga vs. velocidad.-

Los datos obtenidos de estas curvas, además de las constantes de inercia del motor y la carga, servirán para determinar el torque neto acelerante y por consiguiente el tiempo de aceleración para cada intervalo de velocidad. (ver ecuación 3.2.7)

- Las constantes de inercia del motor y la carga son:

$$wk^2 \text{ motor} = 270 \text{ lb-pie}^2 = 111,64 \text{ Nt-m}^2$$

$$wk^2 \text{ carga} = 810 \text{ lb-pie}^2 = 334,33 \text{ Nt-m}^2$$

$$\Sigma(wk^2) = 1080 \text{ lb-pie}^2 = 445,97 \text{ Nt-m}^2$$

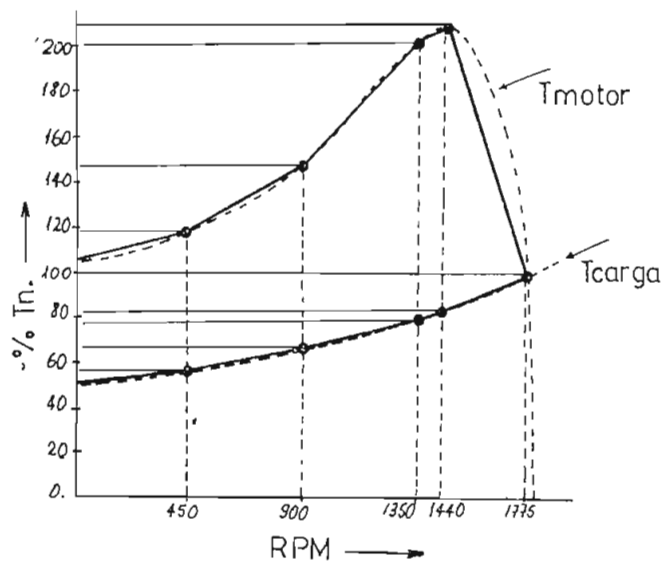


Fig. 3.22 Curvas características linealizadas del torque motor y torque de carga = f(v)

e) Datos adicionales:

VELOCIDAD DE SINCRONISMO	1800 RPM
INTERVALO DE VELOCIDAD	9 RPM
BARRA DEL MOTOR EN EL SISTEMA	5 (ver Fig.3.12)

f) Los resultados del estudio se presentan en la hoja de resultados que se obtuvo en la computadora.





Ejemplo 2. Estudio torque-velocidad y tiempo de aceleración del motor de 1500 HP del sistema industrial de la Compañía ERCO.

a) Datos del sistema.- son los utilizados en el ejemplo 2 de la sección 3.1.5.

b) Datos del motor.-

- Motor trifásico de inducción tipo jaula 1500HP

- Polos = 4                      f = 60Hz                      RPM = 1775

$V_N = 2300V$                        $I_N = 210 A.$

Aislamiento                      Clase F

Protección                      Clase IP55

Utilización                      Clase B

Curva de Torque KL4

$T_{max}$                       220%

(según normas VDE) [5]

- Constante de inercia del rotor  $245 N \cdot m^2$

- Resistencia  $r_1 = 0.098\Omega$                        $r_2 = 0.086\Omega$

- Reactancia  $x_1 = 0.81\Omega$                        $x_2 = 0.81\Omega$                        $x_M = 18.\Omega$

$$Z_{th} = R_1 + jX_1 = 0.09 + j 0.78 \Omega$$

$$V_{th} = 0.96 \times \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1270 \text{ Volts.}$$

- Constante de inercia de la carga mecánica acoplada =  $545 Nt \cdot m^2$

$$- \sum wk^2 = 245 + 545 = 790 Nt \cdot m^2$$



b) Curvas características de corriente y factor de potencia, torque motor y torque de carga, vs. velocidad.

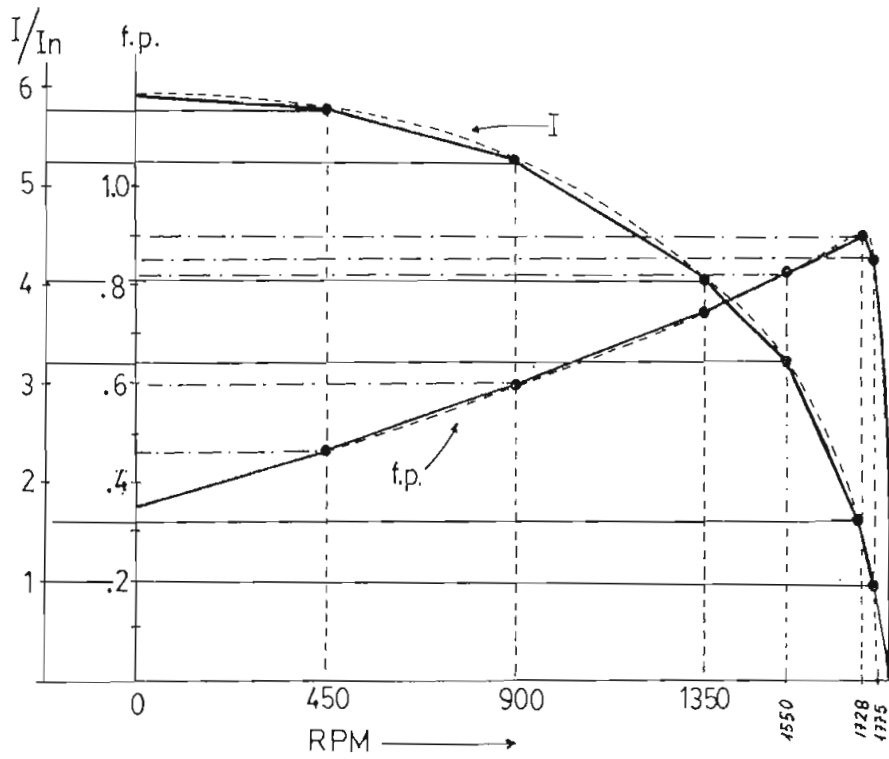


Fig. 3.23 Características I, f.p, linealizadas

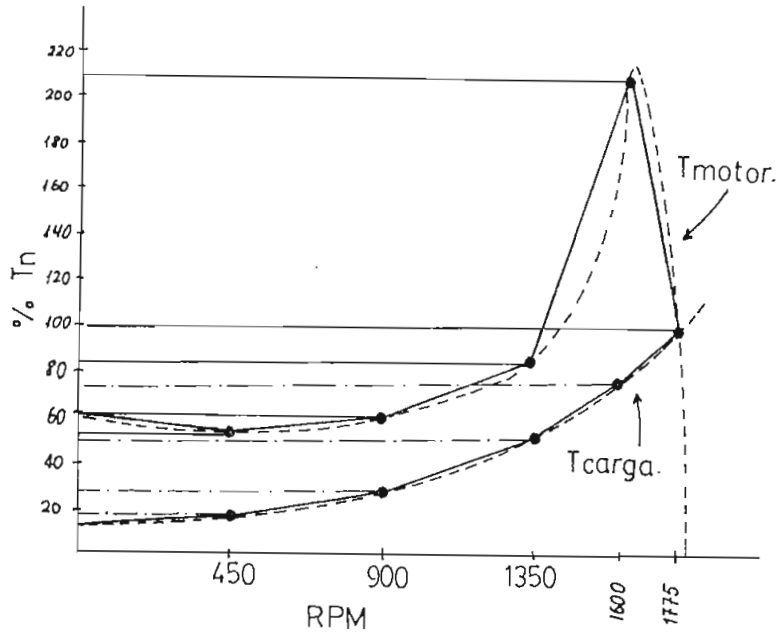


Fig. 3.24 Características Torque motor y torque de carga, linealizadas.

c) Datos adicionales:

Velocidad de sincronismo 1800 RPM

Intervalo de Velocidad 9 RPM

Barra del motor 3 (Ver Fig. 3.15)

d) Resultados, en la siguiente hoja de salida de la computadora.

ERCO. ESTUDIO DEL ARRANQUE DEL MOTOR DE 1500 HP.

\*\*\*\*\*

T (SEG)	RPM	DEVLZ	HP	TM-(NW-M)	V(FU)	I(A)	F.P.
0.0000	0.00	1.00000	0.0	601.4	0.832	948.0	0.352
0.0584	9.00	0.99500	0.8	628.8	0.848	946.0	0.355
0.1168	18.00	0.99000	1.6	637.3	0.845	944.0	0.357
0.1752	27.00	0.98500	2.4	632.3	0.846	942.0	0.360
0.2336	36.00	0.98000	3.2	635.9	0.847	940.0	0.362
0.2920	45.00	0.97500	4.0	639.9	0.847	938.0	0.365
0.3504	54.00	0.97000	4.8	643.8	0.848	936.0	0.367
0.4088	63.00	0.96500	5.7	647.8	0.848	934.0	0.370
0.4672	72.00	0.96000	6.5	651.8	0.849	932.0	0.372
0.5256	81.00	0.95500	7.4	655.9	0.849	930.0	0.375
0.5840	90.00	0.95000	8.3	660.0	0.849	928.0	0.377
0.6424	99.00	0.94500	9.2	664.2	0.850	926.0	0.380
0.7008	108.00	0.94000	10.1	668.4	0.850	924.0	0.382
0.7592	117.00	0.93500	11.0	672.7	0.851	922.0	0.385
0.8176	126.00	0.93000	11.9	677.0	0.851	920.0	0.387
0.8760	135.00	0.92500	12.8	681.3	0.852	918.0	0.390
0.9344	144.00	0.92000	13.8	685.7	0.852	916.0	0.392
0.9928	153.00	0.91500	14.7	690.2	0.853	914.0	0.395
1.0512	162.00	0.91000	15.7	694.7	0.853	912.0	0.397
1.1096	171.00	0.90500	16.7	699.2	0.854	910.0	0.400
1.1680	180.00	0.90000	17.7	703.8	0.854	908.0	0.402
1.2264	189.00	0.89500	18.7	708.5	0.855	906.0	0.405
1.2848	198.00	0.89000	19.7	713.2	0.855	904.0	0.407
1.3432	207.00	0.88500	20.7	718.0	0.856	902.0	0.410
1.4016	216.00	0.88000	21.8	722.8	0.856	900.0	0.412
1.4600	225.00	0.87500	22.8	727.6	0.856	898.0	0.415
1.5184	234.00	0.87000	23.9	732.6	0.857	896.0	0.417
1.5768	243.00	0.86500	25.0	737.6	0.857	894.0	0.420
1.6352	252.00	0.86000	26.1	742.6	0.858	892.0	0.422
1.6936	261.00	0.85500	27.2	747.7	0.858	890.0	0.425
1.7520	270.00	0.85000	28.3	752.9	0.859	888.0	0.427
1.8104	279.00	0.84500	29.5	758.1	0.859	886.0	0.430
1.8688	288.00	0.84000	30.6	763.4	0.860	884.0	0.432
1.9272	297.00	0.83500	31.8	768.7	0.860	882.0	0.435
2.0000	306.00	0.83000	33.0	774.1	0.861	880.0	0.438
2.0728	315.00	0.82500	34.2	779.6	0.861	878.0	0.440
2.1456	324.00	0.82000	35.5	785.1	0.862	876.0	0.442
2.2184	333.00	0.81500	36.7	790.8	0.862	874.0	0.445
2.2912	342.00	0.81000	38.0	796.4	0.863	872.0	0.447
2.3640	351.00	0.80500	39.2	802.2	0.863	870.0	0.450
2.4368	360.00	0.80000	40.5	808.0	0.864	868.0	0.452
2.5096	369.00	0.79500	41.8	813.9	0.864	866.0	0.455
2.5824	378.00	0.79000	43.2	819.9	0.865	864.0	0.457
2.6552	387.00	0.78500	44.5	825.9	0.865	862.0	0.460
2.7280	396.00	0.78000	45.9	832.1	0.866	860.0	0.462
2.8008	405.00	0.77500	47.3	838.3	0.866	858.0	0.465
2.8736	414.00	0.77000	48.7	844.6	0.866	856.0	0.467
2.9464	423.00	0.76500	50.1	850.9	0.867	854.0	0.470
3.0192	432.00	0.76000	51.6	857.4	0.867	852.0	0.472

\*\*\*\*\*

T (SEG)	RPM	DEVLZ	HP	TM-(NW-M)	V(FU)	I(A)	F.P.
3.0920	441.00	0.75500	53.1	863.9	0.868	850.0	0.475
3.1648	450.00	0.75000	54.6	870.5	0.868	848.0	0.477
3.2376	459.00	0.74500	56.1	877.2	0.869	846.0	0.480
3.3104	468.00	0.74000	57.6	884.0	0.869	844.0	0.482
3.3832	477.00	0.73500	59.2	890.9	0.870	842.0	0.485
3.4560	486.00	0.73000	60.8	897.9	0.870	840.0	0.487
3.5288	495.00	0.72500	62.4	905.0	0.871	838.0	0.490
3.6016	504.00	0.72000	64.0	912.2	0.871	836.0	0.492
3.6744	513.00	0.71500	65.7	919.5	0.872	834.0	0.495
3.7472	522.00	0.71000	67.4	926.8	0.872	832.0	0.497
3.8200	531.00	0.70500	69.1	934.3	0.873	830.0	0.500
3.8928	540.00	0.70000	70.8	941.9	0.873	828.0	0.502
3.9656	549.00	0.69500	72.6	949.6	0.874	826.0	0.505
4.0384	558.00	0.69000	74.4	957.4	0.874	824.0	0.507
4.1112	567.00	0.68500	76.2	965.3	0.875	822.0	0.510
4.1840	576.00	0.68000	78.0	973.4	0.875	820.0	0.512
4.2568	585.00	0.67500	79.9	981.5	0.876	818.0	0.515
4.3296	594.00	0.67000	81.8	989.8	0.876	816.0	0.517
4.4024	603.00	0.66500	83.8	998.2	0.877	814.0	0.520
4.4752	612.00	0.66000	85.7	1006.7	0.877	812.0	0.522
4.5480	621.00	0.65500	87.7	1015.4	0.878	810.0	0.525
4.6208	630.00	0.65000	89.8	1024.2	0.878	808.0	0.527
4.6936	639.00	0.64500	91.9	1033.1	0.879	806.0	0.530
4.7664	648.00	0.64000	94.0	1042.1	0.879	804.0	0.532
4.8392	657.00	0.63500	96.1	1051.3	0.880	802.0	0.535
4.9120	666.00	0.63000	98.3	1060.7	0.880	800.0	0.537
4.9848	675.00	0.62500	100.5	1070.1	0.881	798.0	0.540
5.0576	684.00	0.62000	102.7	1079.8	0.881	796.0	0.542
5.1304	693.00	0.61500	105.0	1089.6	0.882	794.0	0.545
5.2032	702.00	0.61000	107.3	1099.5	0.882	792.0	0.547
5.2760	711.00	0.60500	109.7	1109.6	0.883	790.0	0.550
5.3488	720.00	0.60000	112.1	1119.9	0.883	788.0	0.552
5.4216	729.00	0.59500	114.6	1130.3	0.884	786.0	0.555
5.4944	738.00	0.59000	117.1	1140.9	0.884	784.0	0.557
5.5672	747.00	0.58500	119.6	1151.7	0.885	782.0	0.560
5.6400	756.00	0.58000	122.2	1162.7	0.885	780.0	0.563
5.7128	765.00	0.57500	124.8	1173.8	0.886	778.0	0.565
5.7856	774.00	0.57000	127.5	1185.2	0.886	776.0	0.567
5.8584	783.00	0.56500	130.2	1196.7	0.887	774.0	0.570
5.9312	792.00	0.56000	133.0	1208.4	0.887	772.0	0.572
6.0040	801.00	0.55500	135.9	1220.4	0.888	770.0	0.575
6.0768	810.00	0.55000	138.7	1232.5	0.888	768.0	0.577
6.1496	819.00	0.54500	141.7	1244.9	0.889	766.0	0.580
6.2224	828.00	0.54000	144.7	1257.5	0.889	764.0	0.582
6.2952	837.00	0.53500	147.7	1270.3	0.890	762.0	0.585
6.3680	846.00	0.53000	150.8	1283.4	0.890	760.0	0.587
6.4408	855.00	0.52500	154.0	1296.7	0.891	758.0	0.590
6.5136	864.00	0.52000	157.2	1310.2	0.891	756.0	0.592
6.5864	873.00	0.51500	160.5	1324.0	0.892	754.0	0.595
6.6592	882.00	0.51000	163.9	1338.1	0.892	752.0	0.597

## C A P I T U L O    I V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo al objetivo planteado para el desarrollo de este trabajo, el cual aborda el comportamiento mutuo entre un sistema eléctrico y un motor de gran potencia, como consecuencia del arranque de éste en el sistema, se puede resumir lo siguiente:

1. Con el fin de mantener la calidad del servicio, se exige por parte de las empresas eléctricas que, durante el arranque de un motor, la caída de tensión en el sistema eléctrico, no exceda un determinado valor (2% para el caso de la Empresa Eléctrica Cuenca), por lo cual, los dos métodos de cálculo, manual y digital, presentados en la sección 3.1.3 permitirán conocer el nivel al que disminuye el voltaje en una barra determinada del sistema, en el evento del arranque de un motor de gran potencia.
2. Comparando los resultados que se obtuvieron en el ejemplo "1" de las secciones 3.1.5 y 3.2.6, con los que presenta la referencia 16, de la que se tomó el ejemplo, se concluye que los programas digitales implementados funcionan satisfactoriamente.

3. Del estudio de la caída de tensión, debida al arranque del motor de 1500 HP de la compañía ERCO, el nivel de voltaje que se obtuvo en la barra de 69 KV del sistema de la Empresa Eléctrica Cuenca, fue el siguiente:

Por el método manual (sec.3.1.3, ejemplo 2, fig. 3.6)  $V_s = 0.984$  pu., por el método digital (sec. 3.1.5, ejemplo 2, fig. 3.15)  $V_s = 0.988$  pu.; lo que permite concluir que el primero constituye una buena aproximación, si se considera que es un método bastante sencillo y no requiere el uso del computador digital. Sin embargo, el método digital permite conocer con mayor exactitud el voltaje en las barras del sistema, así como también la demanda total de potencia del sistema, incluidas las pérdidas que se producen en el mismo. Estos valores de potencia toman importancia mas bien en el estado del sistema posterior al arranque del motor, es decir cuando está operando con sus valores de régimen nominal. Para el mismo ejemplo del sistema de la compañía ERCO, los resultados que se tienen de la computadora, en el análisis luego del arranque del motor, son los siguientes:

- Demanda total de potencia a la barra de 69 KV,

$$P = 7.25 \text{ MW} \quad Q = 4.199 \text{ MVar}$$

- Pérdidas totales en el sistema,

$$P = 0.0331 \text{ MW} \quad Q = 0.4968 \text{ MVar.}$$

Se ha visto que el arranque del motor de 1500 HP de la compañía ERCO, no produce depresión de voltaje menor al 98%, que es el límite aceptado en la barra de 69 KV. de la E.E. Cuenca, por lo cual es factible su conexión al sistema.

4. En el método digital, es posible también el estudio de factibilidad del arranque simultáneo de dos o más motores en un sistema industrial.

5. La segunda parte del objetivo de la tesis, cuyo tema trata sobre el comportamiento del motor durante su proceso de arranque, analizado como parte del sistema eléctrico industrial, permite disponer de una tabla completa de los valores más importantes del motor, por ejemplo: el tiempo de arranque, el torque y potencia desarrollados, el voltaje a los bornes, etc. Del ejemplo "2" de la sección 3.2.6, que analiza el comportamiento del motor de 1500 HP, que arranca en el sistema industrial ERCO, se pueden destacar los siguientes valores obtenidos de la hoja de resultados de la computadora:

- Tiempo de arranque hasta la velocidad nominal 13 seg.
- Torque de arranque = 601.4 N-m
- Torque máximo = 7355 N-m, a deslizamiento  $s = 0.05$
- Torque nominal = 4914 N-m, a deslizamiento  $s = 0.02$
- Potencia nominal = 1414 HP.

- La recuperación del voltaje a los bornes del motor a la velocidad nominal, está en el orden de 0.98 pu.
  
- 6. El estudio del arranque, desarrollado en el capítulo II, presta utilidad tanto en las áreas marginales, en las que son comunes los sistemas simples "generador-motor", así como también en las industrias que, servidas normalmente de un sistema de potencia, disponen de generadores auxiliares para casos de emergencia.
  
- 7. En general, con el trabajo presentado en el desarrollo de la tesis, el personal técnico de una industria, estará en posibilidades de elegir el método de arranque más adecuado, a fin de obtener resultados más técnicos y económicos.
  
- 8. Para la utilización práctica de este trabajo, se recomienda que los datos a obtenerse, tanto del sistema como del motor y su carga mecánica, sean propios y exactos, antes de remitirse al uso de los valores de tablas y curvas características.





```

27 READ(5,4)ALFAR,ALFAI,DELTAR,DELTAI,ITER
28 WRITE(3,53)
29 WRITE(3,4)ALFAR,ALFAI,DELTAR,DELTAI,ITER
30 DO 5 J=1,NBF
31 WRITE(6,6)J
32 READ(5,7)NOM1(I),NOM2(I),VUR(I),VI(I)
33 5 CONTINUE
34 DO 8 J=1,NBF
35 VUR(I)=VUR(I)
36 VVI(I)=VI(I)
37 8 CONTINUE
38 DO 9 I=ND,NS
39 WRITE(6,2)I
40 READ(5,22)NOM1(I),NOM2(I),VUR(I),VVI(I),P(I),Q(I)
41 9 CONTINUE
42 IF (ABS(VU.EU.0))GO TO 25
43 DO 26 J=ND,I
44 WRITE(6,24)J
45 READ(5,23)NOM1(I),NOM2(I),VUR(I),VVI(I),OMN(I),OMX(I),P(I)
46 25 CONTINUE
47 26 CONTINUE
48 1 FORMAT('H',2X,'M',3X,'NOM1',2X,'NOM2',2X,'NBF',2X,'I',1X,1X,1X,1X)
49 27 FORMAT('I',3X,'AL',2X,'A',2X,'A',2X,'A',2X,'A',2X,'A',2X)
50 28 FORMAT('ALFAR',2X,'ALFAI',2X,'DELTAR',2X,'DELTAI',2X,'ITERACIONES',
51 2X,'I',1X,1X,1X,1X,1X,1X,1X)
52 29 FORMAT(1X,F4.2,3X,F4.2,3X,F6.5,3X,F6.5,3X,1X)
53 30 FORMAT('NOM1:',12X,'NOMBRE',5X,'V.REAL',7X,'V.IMAG',2X,'I',1X)
54 31 1X,1X,1X)
55 32 FORMAT(1X,2X,I,3X,F10.0,3X,F10.0)
56 33 FORMAT('NOM1:',12X,'NOMBRE',5X,'VUR',10X,'VVI',10X,'P.NEIA',7X,'O.',
57 3X,'NBF',2X,'I',1X,1X,1X,1X,1X,1X,1X)
58 22 FORMAT(1X,'M',3X,F10.0,3X,F10.0,3X,F10.0,3X,F10.0)
59 23 FORMAT('NOM1:',12X,'NOMBRE',5X,'VULTAJE',6X,'ANGULO',7X,'Q.MIN',8X
60 3X,'R.MAX',8X,'P.NEIA',2X,'I',1X,1X,1X,1X,1X,1X,1X)
61 34 1X,1X,1X,1X,1X)
62 25 FORMAT(1X,2X,I,3X,F10.0,3X,F10.0,3X,F10.0,3X,F10.0,3X,F10.0)
63 35 NOM1(I)='M',5X,'N',2X,'NOME',2X,'NBF',2X,'I',21X,'(='))
64 36 FORMAT(1X,'ALFAR',2X,'ALFAI',2X,'DELTAR',2X,'DELTAI',2X,'ITERACION
65 3X,'I',2X,'(='))
66 37 I=I+1,NS
67 38 WRITE(6,3)I
68 39 FORMAT('M',2X,'A',4X,'R-SER.',7X,'X-SER.',7X,'R-SHUNT',2X,'I',1X,1X)
69 40 1X,1X,1X,1X,1X,1X,1X)
70 READ(5,1)N1,I,N2,N3,I,J,XES(I,J),REC(I,J)
71 ZN=(N1-N2).I**2.+XES(I,J)**2.
72 IF(I,J)N1-N2,X(I,J)ZN
73 IF(I,J)N1-N2,X(I,J)ZN
74 BLV(I,J)=N1-X(I,J)
75 REC(I,J)=N1-I,J
76 REC(I,J)=N1-I,J
77 REC(I,J)=N1-I,J

```



```

118 921 Q(I)=DPRX(I)
119 901 CONTINUE
120 941 Y=(GB(I,I)**2.)+(BB(I,I)**2.)
121 R=BB(I,I)/Y
122 X=BB(I,I)/Y
123 E=(VVR(I)**2.)+(VVI(I)**2.)
124 VNR(I)=R*(P(I)*VVR(I)/E)+(Q(I)*VVI(I)/E)*X*(P(I)
125 4*VVI(I)/E)-(Q(I)*VVR(I)/E)
126 VNI(I)=R*(P(I)*VVI(I)/E)-(Q(I)*VVR(I)/E)*X*(P(I)
127 1*VVR(I)/E)+(Q(I)*VVI(I)/E)
128 KK=T-1
129 DO 40 J=1, KK
130 VNR(J)=VNR(I)+R*(BB(I,J)*VNI(J))-(GB(I,J)*VVR(J)))-X*(GB(I
131 J)*VVI(J))+(BB(I,J)*VNR(J))
132 VNI(J)=VNI(I)+R*(BB(I,J)*VNR(J))
133 X(I,J)=VNI(J)+(BB(I,J)*VNR(J))
134 X(J,I)=VNI(J)+(BB(I,J)*VNR(J))
135 40 CONTINUE
136 IJ=I+1
137 DO 45 J=I,J, N
138 VNR(J)=VNR(I)+R*(BB(I,J)*VNI(J))-(GB(I,J)*VVR(J)))-X*(GB(I
139 I,J)*VVI(J))+(BB(I,J)*VNR(J))
140 VNI(J)=VNI(I)+R*(BB(I,J)*VNR(J))
141 X(I,J)=VNI(J)+(BB(I,J)*VNR(J))
142 X(J,I)=VNI(J)+(BB(I,J)*VNR(J))
143 45 CONTINUE
144 VNR(I)=VNR(I)+R*(BB(I,I)*VNI(I))-(GB(I,I)*VVR(I)))-X*(GB(I
145 I,I)*VVI(I))+(BB(I,I)*VNR(I))
146 VNI(I)=VNI(I)+R*(BB(I,I)*VNR(I))
147 J=(I+1)*N
148 DO 60 I=J, N
149 VNR(I)=VNR(I)+R*(BB(I,I)*VNI(I))-(GB(I,I)*VVR(I)))-X*(GB(I
150 I,I)*VVI(I))+(BB(I,I)*VNR(I))
151 VNI(I)=VNI(I)+R*(BB(I,I)*VNR(I))
152 X(I,I)=VNI(I)+(BB(I,I)*VNR(I))
153 60 CONTINUE
154 40 CONTINUE
155 X=K1/4
156 I=K1*(6)-IITER+60 TO 150
157 B=0,
158 DO 100 I=RB, N
159 B=B+R*(X(I)
160 CONTINUE
161 R=I-R-NBF
162 I=(B, RB, RB)/60 TO 171

```



```

208      WRITE(3,162)I,NUM1(I),NUM2(I),V(I),ANS(I),P(I),Q(I)
209 162  FORMAT(/4X,12.5X,2A4,6X,F10.6,2X,F10.6,6X,F10.6,2X,F10.6)
210      WRITE(3,163)
211      DO 165 J=1,N
212      IF(GE(I,J).EQ.0.AND.BE(I,J).EQ.0)GO TO 165
213      WRITE(3,164)NDM1(I),NDM2(I),NDM1(J),NDM2(J),PF(I,J),QF(I,J),PP(I,J
214      1),QF(I,J)
215 165  CONTINUE
216 163  FORMAT(/10X,25HFLUJOS Y PERDIDAS EN P.U./10X,25('*')/4X,8HDE BARR
217      1A,2X,7HA BARRA,5X,11HP. DE FLUJO,4X,11HQ. DE FLUJO,7X,14HP. DE PER
218      1DIDAS,2X,14HQ. DE PERDIDAS/)
219 164  FORMAT(4X,2A4,2X,2A4,5X,F10.6,5X,F10.6,11X,F10.6,6X,F10.6)
220 160  CONTINUE
221      WRITE(3,166)PTP,QTP,KI
222 166  FORMAT(////10X,20HPERDIDAS TOTALES: P=,F10.6,5X,2HQ=,F10.6//10X,
223      112HITERACIONES:,I4)
224      GO TO 192.
225 190  WRITE(3,191)KI
226 191  FORMAT(/10X,35HEL SISTEMA NO CONVERGE,ITERACIONES=,I4)
227      DO 300 I=1,N
228      WRITE(3,301)DVR(I),DVI(I)
229 301  FORMAT(/10X,E10.4,5X,E10.4)
300  CONTINUE
192  CONTINUE
      STOP
      END

```

00 TOTAL ERRORS FOR THIS COMPILATION



```

84 6 CONTINUE
85 DO 10 I=1,N
86 DO 20 J=1,M
87 IF (I.NE.J)GO TO 11
88 DO 15 K=1,N
89 BR(I,J)=BR(I,J)+BR(I,K)+BR(I,K)
90 BR(I,J)=BR(I,J)+BR(I,K)+BR(I,K)
91 15 CONTINUE
92 IF (I.EQ.J)GO TO 20
93 BR(I,J)=(-1.)+BR(I,J)
94 BR(I,J)=(-1.)+BR(I,J)
95 20 CONTINUE
96 10 CONTINUE
97 WRITE(5,111)
98 111 FORMAT('CONTOS DEL MOTOR: ',5X,'T.BASE(A)-V.BASE(V) /
99 102. ',1) 1* 1* 1*
100 READ(5,112)I1,IBASE,UBASE
101 112 FORMAT(17.0,12.0X,17.0,5X,17.0)
102 WRITE(6,113)
103 113 FORMAT('CONSTANTE DE INERCIJA',2X,'VEL.SINC.'/1 1',10X,'I
104 114 114,110,0,0,0,12X,F6.0)
105 WRITE(6,115)
106 115 FORMAT('V. MAX. INTERVALU (DM) /1 1* 1* 1*
107 READ(5,116)MMA,DM
108 116 FORMAT(1X,F6.0,5X,F5.0)
109 WRITE(6,117)
110 117 FORMAT(5X,'RESISTENCIA',3X,'REACTANCIA / EST',5X,'ROT',10X,'EST',
111 11X,'ROT' /1 1* 1***1 1* 1*
112 DO 122 I=1,6
113 122 I=1,6
114 122 I=1,6
115 122 I=1,6
116 122 I=1,6
117 122 I=1,6
118 122 I=1,6
119 122 I=1,6
120 122 I=1,6
121 122 I=1,6
122 122 I=1,6
123 122 I=1,6
124 122 I=1,6
125 122 I=1,6
126 122 I=1,6
127 122 I=1,6
128 122 I=1,6
129 122 I=1,6
130 122 I=1,6
131 122 I=1,6
132 122 I=1,6
133 122 I=1,6
134 122 I=1,6
135 122 I=1,6
136 122 I=1,6
137 122 I=1,6
138 122 I=1,6
139 122 I=1,6
140 122 I=1,6
141 122 I=1,6
142 122 I=1,6
143 122 I=1,6
144 122 I=1,6
145 122 I=1,6
146 122 I=1,6
147 122 I=1,6
148 122 I=1,6
149 122 I=1,6
150 122 I=1,6
151 122 I=1,6
152 122 I=1,6
153 122 I=1,6
154 122 I=1,6
155 122 I=1,6
156 122 I=1,6
157 122 I=1,6
158 122 I=1,6
159 122 I=1,6
160 122 I=1,6
161 122 I=1,6
162 122 I=1,6
163 122 I=1,6
164 122 I=1,6
165 122 I=1,6
166 122 I=1,6
167 122 I=1,6
168 122 I=1,6
169 122 I=1,6
170 122 I=1,6
171 122 I=1,6
172 122 I=1,6
173 122 I=1,6
174 122 I=1,6
175 122 I=1,6
176 122 I=1,6
177 122 I=1,6
178 122 I=1,6
179 122 I=1,6
180 122 I=1,6
181 122 I=1,6
182 122 I=1,6
183 122 I=1,6
184 122 I=1,6
185 122 I=1,6
186 122 I=1,6
187 122 I=1,6
188 122 I=1,6
189 122 I=1,6
190 122 I=1,6
191 122 I=1,6
192 122 I=1,6
193 122 I=1,6
194 122 I=1,6
195 122 I=1,6
196 122 I=1,6
197 122 I=1,6
198 122 I=1,6
199 122 I=1,6
200 122 I=1,6

```

```

89      READ(5,125)M(I),I(1),FL(I)
90      125  FORMAT(1X,F8.0,3X,F8.0,3X,F8.0)
91      IKU=IKU+1
92      126  CONTINUE
93      WRITE(3,130)NM1,NM2,NM3,NM4,NM5,NM6,NM7,NM8,NM9,NM10,NM11,NM12
94      WRITE(3,1020)
95      C     SE CALCULA EL VOLTAJE REAL A LOS BORNES DEL MOTOR
96      VU=SQRT((VUJ(I11)**2.)+(VUR(I11)**2.))
97      FHP=0.
98      TIMEPU=0.
99      PR=F(I11)
100     BR=B(I11)
101     VWDR=0.
102     KOP=0
103     1030 IF(WM.BT.WMAX)GO TO 1050
104     KOP=KOP+1
105     IF(KOP-50)503,501,501
106     501 KOP=0
107     WRITE(3,502)
108     502  FORMAT(1H1)
109     WRITE(3,1020)
110     503  W1=VWDR
111     VWDR=VWDR+DW
112     W2=VWDR
113     W3=W1
114     TB=1
115     GO TO 1006
116     1007 TOR=TB
117     W4=W2
118     TR=0
119     GO TO 1006
120     C     SE CALCULA EL TIEMPO DE ACELERACION PARA CADA INTERVALO DE VELOCIDAD
121     1008 TOR=(TOR+TU)/2
122     FAC=(.010691)*CUIN*DW/TOR
123     TOR=0.
124     SS=(W3-W1)/WS
125     W4=W2
126     IF(WM.LE.W1(2))GO TO 1010
127     IF(WM.LE.W1(3))GO TO 1011
128     IF(WM.LE.W1(4))GO TO 1012
129     IF(WM.LE.W1(5))GO TO 1013
130     GO TO 1014
131     1010 J=2
132     J=1
133     GO TO 1015
134     1011 J=3
135     J=2
136     GO TO 1015
137     1012 J=4
138     J=3
139     GO TO 1015

```



```

138 1013 I=5
139 J=4
140 80 TO 1015
141 1014 I=6
142 J=5
143 1015 CONTINUE
144 AB=BM-WI(J)
145 AC=MI(I)-MI(J)
146 RU=C(I)-C(J)
147 RV=PC(I)-PC(J)
148 CUR=C(J)*(AB*BU/AC)
149 PAP=PC(J)+(AB*BU/AC)
150 PAP=PAP/100.
151 80 TO 3710
152 IF (WR.LE.W(2))GO TO 1000
153 IF (WR.LE.W(3))GO TO 1001
154 IF (WR.LE.W(4))GO TO 1002
155 IF (WR.LE.W(5))GO TO 1003
156 101 TO 1004
157 1000 I=2
158 J=1
159 80 TO 1005
160 1001 I=5
161 J=2
162 80 TO 1005
163 1002 I=4
164 J=3
165 80 TO 1005
166 1003 I=5
167 J=4
168 80 TO 1005
169 1004 I=5
170 J=5
171 CURTIME
172 AD=AP-W(J)
173 AE=AI(W(J))
174 RE=I(I)-I(J)
175 RS=TI(I)-TI(J)
176 IOR=I(J)*(ADR*RE/AE)
177 IOL=I(J)*(ADR*RS/AE)
178 IOR=I(I)-IOR
179 IOL=I(I)-IOL
180 IF (IOL.EQ.2)GO TO 1007
181 IF (IOR.EQ.1)GO TO 1008
182 FORN01(2)X,3204/2)X,480('0')
183 FORN01(6)X,1)X(NEG),7X,'RPH',8X,'DESLZ',8X,'HP',5X,'TH-(NU-H)',
184 16X,'V(P)',5X,'I(A)',6X,'F',7.5X,94('0')//
185 FORN01(5)X,F7.4,5X,F7.2,5X,F7.5,5X,F7.1,5X,F5.3,5X,F6.1,5X,
186 1P(,5)
187 CURP=CUR/B03E
188 FR=VOR*URP*F0F

```

```

187 ZOP=SQRT(1.-(0.4P**2-6P))
188 UM=UO*CURP*NSP
189 P(1:1)=PH-FH
190 Q(1:1)=QR-QM
191 KI=0
192 VWR(1)=VWR(1)
193 VVI(1)=VVI(1)
194 DO 3,70 J=2,N
195 A(J)=0.
196 1/0 CONTINUE
197 1/1 CONTINUE
198 DO 50 J=2,N
199 IF (ABS(1.-E0.1.)GT 10.70
200 F=(65(1,1)**2.)+(5B(1,1)**2.)
201 K=BR(1,1)/Y
202 X=BR(1,1)/Y
203 E=(VWR(1)**2.)+(VVI(1)**2.)
204 VNR(1)=R*((P(1)*VWR(1)/E)+(Q(1)*VVI(1)/E))*X*((P(1)
205 1.*VVI(1)/E)-(0(1)*VWR(1)/E),
206 VNI(1)=R*((P(1)*VVI(1)/E)-(0(1)*VWR(1)/E))*X*((P(1)
207 1.*VWR(1)/E)+(0(1)*VVI(1)/E))
208 DO 40 J=1,N
209 IF (J.EQ.1)GO TO 40
210 VNR(J)=VNR(1)+R*((BR(1,J)*VVI(J))-(5B(1,J)*VWR(J)))-X*((6H
211 1(1,J)*VVI(J))+(6H(1,J)*VWR(J)))
212 VNI(J)=VNI(1)+X*((5B(1,J)*VWR(J))+(6B(1,J)*VVI(J)))-R*((6B
213 1(1,J)*VVI(J))+(6B(1,J)*VWR(J)))
214 40 CONTINUE
215 DOR(1)=ABS(VNR(1)-VWR(1))
216 DVI(1)=ABS(VNI(1)-VVI(1))
217 IF (DOR(1).LE.PEL TOR.600.DVI(1).LE.DELTA)GO TO 50
218 60 TO 70
219 50 VVI(1)=VNR(1)
220 VNI(1)=VNI(1)
221 A(1)=1.
222 60 TO 70
223 60 CONTINUE
224 VWR(1)=VNR(1)
225 VVI(1)=VVI(1)
226 70 CONTINUE
227 50 CONTINUE
228 K1=K1+1
229 IF (K1.GT.399)GO TO 190
230 B=0.
231 60-180 J=2,N
232 B=B+A(1)
233 180 CONTINUE
234 NH=N-1
235 IF (B.NE.NN)GO TO
236 90-SQRT(VNR(1))
237 90=VNR(VNR(1))
238

```

```
      C      SE CALCULA EL TORQUE Y LA POTENCIA DE SALIDA PARA CADA INTERVALO
234      DND=((R1+R2/SS)**2.)+(X1+X2)**2.)
235      TORQUE=(28.64789)*(VOL**2.)*R2/(WS*SS*DND)
236      IF(SS.EQ.0.)COR=0.
237      IF(SS.EQ.0.)TORQUE=0.
238      IF(SS.EQ.0.)PHP=0.
239      WRITE(3,1021)TIEMPO,W1,SS,PHP,TORQUE,VO,COR,FAP
240      PHP=TORQUE*WM*(.00014035)
241      TIEMPO=TIEMPO+TIAC
242      GO TO 1030
243      190 WRITE(3,191)KI
244      191 FORMAT(/10X,35HEL SISTEMA NO CONVERGE,ITERACIONES=,I4)
245      DO 300 I=1,N
246      WRITE(3,301)DVR(I),DVI(I)
247      301 FORMAT(/10X,E10.4,5X,E10.4)
248      300 CONTINUE
249      1050 CONTINUE
250      STOP
251      END
```

000 TOTAL ERRORS FOR THIS COMPILATION

## A P E N D I C E C

### C.1 MANUAL DE USO DEL PROGRAMA DIGITAL "ARRAN"

#### C.1.1 Objetivo

Este programa se utiliza para el cálculo de las caídas de voltaje, flujos de potencia, y pérdidas de potencia, en un sistema eléctrico industrial, en el que se arrancan motores de gran potencia.

#### C.1.2 Descripción

El programa digital "ARRAN" está escrito en lenguaje FORTRAN IV. Fue diseñado y elaborado para el computador IBM SISTEMA-34 del Centro de Cómputo de la Universidad de Cuenca.

Este programa permite el análisis del comportamiento de un sistema: antes, durante y después del suceso de arranque. El sistema puede tener un número máximo de 30 barras.

#### C.1.3 Método de solución

Se utiliza el algoritmo de solución para Flujos de Carga de GAUSS-SEIDEL, con factor de aceleración.

#### C.1.4 Nomenclatura

a) Variables de entrada.-

SIMBOLO	DESCRIPCION
KESC	Indicador de escritura de datos inicia <u>l</u> es [1 ó 0]
N	Número de barras del sistema
M	Número de elementos del sistema
NBVC	Número de barras de Voltaje Controlado
NBF	Número de barras flotantes
ALFAR, ALFAI	Factores de aceleración real e imagina <u>r</u> io.
DELTAR, DELTAI	Límites de error (desviación) de volta <u>j</u> es para convergencia.
ITER	Número máximo de iteraciones
VVR(I), VVI(I)	Valores iniciales real e imaginario de voltaje en las barras de carga. [pu.]
VR(I), VI(I)	Voltaje real e imaginario en la barra flotante [pu.]
P(I), Q(I)	Potencia activa y reactiva neta en cada barra [pu.]
NOM1(I), NOM2(I)	Nombre de las barras
QMN(I), QMX(I)	Límites mínimo y máximo de potencia re <u>l</u> activa en barras de voltaje controlado [pu.]

SIMBOLO	DESCRIPCION
RES (I,J), XES (I,J)	Resistencia y Reactancia serie de los <u>e</u> elementos del sistema. [pu.]
BEC(I,J)	Suceptancia paralelo de los elementos - del sistema [pu.]

b) Variables de salida.-

SIMBOLO	DESCRIPCION
GB(I,J), BE(I,J)	Conductancia y suceptancia de la matriz (Y) Admitancia de barra [pu.]
V(I)	Módulo de voltaje en cada barra. [pu.]
ANG(I)	Angulo de voltaje en cada barra.[grados]
P(I), Q(I)	Potencia activa y reactiva neta en cada barra [pu.]
PF(I,J), QF(I,J)	Potencia de flujo activa y reactiva en los elementos. [pu.]
PP(I,J), QP(I,J)	Potencia de pérdidas activa y reactiva en los elementos [pu.]
PTP, QTP	Pérdidas de potencia activa y reactiva en el sistema. [pu.]

C.1.5 Forma de Proporcionar los datos.

Comentario: Los datos del programa se proporcionan directamente mediante el uso de un terminal del centro

de cómputo, equipado con pantalla, en la cual, luego de dar la sentencia adecuada, presenta - primero un resumen explicativo de símbolo y descripción de las siguientes variables:

En Pantalla: N, M, NBF, NBVC, ALFAR, ALFAI, DELTAR, DELTAI, ITER, VVR(I), VVI(I), Q.NETA, P.NETA, VOLTAJE, ANGULO, QMIN, QMAX.

En Pantalla: SI DESEA IMPRESION DE MATRIZ "Y-BARRA" Y DATOS INICIALES, ESCRIBA "1" EN EL CAMPO SIGUIENTE:  
|I1|

En Pantalla:

CASO: (título del estudio)

\*\*\*\*\*

N	M	NBVC	NBF
I2  **	I2  **	I2  **	I2

ALFAR	ALFAI	DELTAR	DELTAI	ITERACIONES
F4.2  *	F4.2  *	F6.5  *	F6.5  *	I4

	NOMBRE	V.REAL	V.IMAG
BARRA 1		*  F10.0	*  F10.0

	NOMBRE	VVR	VVI	P.NETA	Q.NETA
BARRA 2		*  F10.0	*  F10.0	*  F10.0	*  F10.0

BARRA 3		*		*		*		*	
.									
.									
.									
.									
BARRA N		*	F10.0	*	F10.0	*	F10.0	*	F10.0

#### DATOS DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA

	DE BARRA #		A BARRA #	R.SERIE	X.SERIE	B.SHUNT
1	I2	*	I2	*  F10.0	*  F10.0	*  F10.0
2	I2	*	I2	*  F10.0	*  F10.0	*  F10.0
3	I2	*	I2	*  F10.0	*  F10.0	*  F10.0
.						
.						
.						
.						
M	I2	*	I2	*  F10.0	*  F10.0	* F10.0

### C.2 MANUAL DE USO DEL PROGRAMA DIGITAL "DRRAN"

#### C.2.1 Objetivo

Este programa se utiliza para el análisis del comportamiento de un motor de gran potencia, durante su proceso de arranque, en un sistema eléctrico industrial.



### C.2.2 Descripción

El programa digital DRRAN está escrito en lenguaje FORTRAN IV. Fue diseñado y elaborado para el computador IBM SISTEMA-34 del Centro de Cómputo de la Universidad de Cuenca.

La caída de voltaje en el sistema, consecuencia del elevado valor de corriente de arranque del motor, provoca variaciones en las características eléctricas y mecánicas del motor. El programa calcula, considerando la caída de tensión a los bornes del motor, los valores de torque y potencia desarrollados por la máquina, en intervalos de velocidad previamente determinados. Se complementa este análisis, con el cálculo del tiempo de aceleración del motor, considerando la característica mecánica de su carga acoplada.

### C.2.3 Método de Solución

Para cada intervalo de velocidad, se calcula la caída de tensión en los bornes del motor, mediante las ecuaciones de flujos de carga, con el algoritmo de solución de Gauss Seidel. Con los valores de tensión en los bornes del motor, se calcula el torque instantáneo y la potencia mecánica desarrollados por el motor.

Con las características de torque-motor y torque de carga y con las ecuaciones deducidas para el cálculo del tiempo

de aceleración para un eje en rotación, se obtiene el tiempo total de arranque del motor.

#### C.2.4 Restricciones.

- El programa digital trabaja para un sistema con un número máximo de 10 barras.
- Sirve exclusivamente para el análisis de motores de inducción trifásicos.
- Las curvas características que se introducen como datos, deben ser previamente linealizadas.

#### C.2.5 Nomenclatura.

a) Variables de entrada.-

SIMBOLO	DESCRIPCION
N	. Número de barras
M	Número de elementos
DELTAR, DELTAI	Límites de error (desviación) de voltajes para convergencia.
GE(I,J), BE(I,J)	Conductancia y susceptancia serie de los elementos [pu.]
BEC(I,J)	Susceptancia paralelo de los elementos [pu.]
VVR(I), VVI(I)	Voltajes iniciales real e imaginario de las barras de carga [pu.]

SIMBOLO	DESCRIPCION
VR(1), VI(1)	Voltaje real e imaginario de la barra flotante. [pu.]
P(I), Q(I)	Potencias netas activa y reactiva en las barras [pu.]
III	Designación de la barra en la que arranca el motor.
BASE	Valor de la I de base. [Amp.]
VBASE	Valor del voltaje equivalente de Thevenin del motor [volts.]
COIN	Constante de inercia del motor y la carga [Nt.m <sup>2</sup> ]
WS	Velocidad sincrónica del motor [RPM]
WMAX	Velocidad máxima de cálculo. [RPM]
DW	Intervalo de crecimiento de la velocidad. [RPM]
R1, X1	Resistencia y reactancia del estator (referida al equivalente de Thevenin) [ $\Omega$ ]
R2, X2	Resistencia y reactancia del rotor referida al estator. [ $\Omega$ ]
W(J), T(J), TL(J)	Valores de velocidad, torque motor y torque de carga que definen los puntos de las curvas características velocidad-torque. [RPM] y [Nt-m]
WI(J), C(J), FP(J)	Valores de velocidad, corriente y factor de potencia que definen los puntos de las curvas características velocidad



DATOS DE LA BARRA FLOTANTE

V.REAL	V.IMAG
F8.0   *	F8.0

DATOS DE LA BARRA DE CARGA

	V.REAL	V.IMAG.	P(PU)	Q(P.U)
BARRA 2	F8.0   *	F8.0   *	F8.0   *	F8.0
BARRA 3	F8.0   *	F8.0   *	F8.0   *	F8.0
.				
.				
.				
BARRA N	F8.0   *	F8.0   *	F8.0   *	F8.0

DATOS DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA

	DE BARRA	A BARRA	G-SERIE	B-SERIE	B-SHUNT
1	I2   *	I2   *	F8.0   *	F8.0   *	F8.0
2	I2   *	I2   *	F8.0   *	F8.0   *	F8.0
.					
.					
.					
.					
M	I2   *	I2   *	F8.0   *	F8.0   *	F8.0

DATOS DEL MOTOR

BARRA	I.BASE	V.BASE
I2   *	F7.0   *	F7.0

CONSTANTE DE INERCIA	VELOCIDAD SINCRONISMO
F10.0	F6.0
VELOC. MAXIMA	INTERVALO (DW)
F6.0	F5.0
RESISTENCIA	REACTANCIA
R1            R2            X1            X2	
F8.0  *  F8.0  ***  F8.0  *  F8.0	

PUNTOS DE LAS CURVAS "VELOCIDAD-CORRIENTE" Y "VELOCIDAD-FACTOR DE POTENCIA"

	VELOCIDAD		CORRIENTE		F.P.
PUNTO 0	F8.0	*	F8.0	*	F8.0
PUNTO 1	F8.0	*	F8.0	*	F8.0
PUNTO 2	F8.0	*	F8.0	*	F8.0
PUNTO 3	F8.0	*	F8.0	*	F8.0
PUNTO 4	F8.0	*	F8.0	*	F8.0
PUNTO 5	F8.0	*	F8.0	*	F8.0

PUNTOS DE LAS CURVAS "VELOCIDAD TORQUE"

	VELOCIDAD		T. MOTOR		T.CARGA
PUNTO 0	F8.0	*	F8.0	*	F8.0
PUNTO 1	F8.0	*	F8.0	*	F8.0
PUNTO 2	F8.0	*	F8.0	*	F8.0
PUNTO 3	F8.0	*	F8.0	*	F8.0
PUNTO 4	F8.0	*	F8.0	*	F8.0
PUNTO 5	F8.0	*	F8.0	*	F8.0

## REFERENCIAS

1. FITZGERAL A., KINGSLEY CHARLES JR, KUSKO ALEXANDER, "Electric Machinery", 3a. Ed., McGraw Hill Book Company, New York, 1971.
2. MATSCH LEANDER, "Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas", 1a. Ed., Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., México, 1972.
3. CORTES MANUEL, "Curso Moderno de Máquinas Eléctricas rotativas"; 1a. Ed.; Editores Técnicos Asociados, S. A., Barcelona, 1974.
4. KOSOW IRVING L, "Electric Machinery and Control", 1a. Ed., Prentice Hall, New York, 1964.
5. MOTORES ELECTRICOS, "Métodos de arranque de motores trifásicos", SIEMENS S.A., 1980.
6. IEEE STD No.141, "Electric Power Distribution for Industrial Plants" 4a. Ed., 1969
7. IEEE STD No.399, "Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis".
8. ANSI Standard C.37.010-1972, American National Standards Institute, New York.
9. "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", Westinghouse Electric Corp., Pittsburgh, PA, 1964.

10. TABLAS TECNICAS, "Magnitudes, relaciones y unidades mecánicas", SIEMENS S.A., Munich, 1980
11. HORRELL R.F., WOOD W.E., "A Method of Determining Induction Motor Speed - Torque - Current Curves from Reduced Voltage Test", AIEE Transactions, Vol.73, June 1954, pp. 670-674.
12. GAMARRA ABRAHAM Ing., GARCIA OSCAR Ing., "Efectos transitorios en sistemas de generación local durante el arranque de motores eléctricos", PETROLEOS DEL PERU.
13. POVEDA MENTOR Ing., "Apuntes de Clase de Máquinas Eléctricas", E.P.N., Quito, 1980.
14. STEVENSON WILLIAM D., "Análisis de Circuitos Eléctricos de Potencia", 2da. Ed., Cap. 8, Mc.Graw Hill de México, S.A., México, 1977.
15. STAGG and EL-ABIAD, "Computer Methods in Power System Analysis", Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1971.
16. WILLIAMS JACK JR., GRIFFITH SHAN M., "Evaluating the Effects of Motor Starting on Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-14, No.4, pág. 297, July-August. 1978.