

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

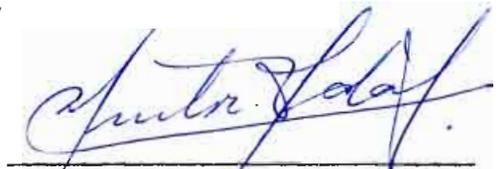
ANALISIS DIGITAL DE LA OPERACION DE UN
MOTOR TRIFASICO DE INDUCCION EN UN SISTEMA
RURAL DELTA-ABIERTO

Tesis previa a la obtención del Título
de Ingeniero Eléctrico, Especialización
Potencia.

VICENTE RENE RIOS CORDOVA

Quito, Marzo 1980

Certifico que el presente trabajo
ha sido realizado en su totalidad
por el señor Vicente René Ríos Cór-
dova.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Mentor Poveda", written over a horizontal line.

ING. MENTOR POVEDA
DIRECTOR DE TESIS

I N D I C E

Página

CAPITULO I

INTRODUCCION	1
--------------------	---

CAPITULO II

APROXIMACION TEORICA AL PROBLEMA

2.1	Análisis con componentes simétricas de la operación de un motor de inducción, con desbalance de voltaje	6
2.1.1	Voltaje y corriente desbalanceada	6
2.1.2	Suposiciones para la derivación de ecuaciones	7
2.1.3	Circuito equivalente	8
2.1.4	Sistema de ecuaciones	8
2.2	Aplicaciones de la conexión delta-abierta	17
2.2.1	Comparación entre las conexiones adelantada y atrasada	19
2.2.2	Nomenclatura	19
2.2.3	Utilización de los transformadores	20
2.3	Efectos de la aplicación de voltajes desbalanceados en un motor de inducción. Pérdidas y calentamiento	27

2.3.1	Efectos del calentamiento por desbalance de voltaje y corriente	27
2.3.2	Condiciones de desbalance	30
2.3.3	Distribución espacial del calor	32
2.3.4	Disipación de potencia	32
2.3.5	Ecuaciones	33
2.4	Reducción de la capacidad nominal del motor por desbalance de voltajes	35

CAPITULO III

MODELO DIGITAL PARA DETERMINACION DE CALENTAMIENTO Y
REDUCCION DE CAPACIDAD

3.1	Procedimiento y alcance	37
3.2	Diagrama de flujo	45
3.3	Verificación del modelo	48

CAPITULO IV

APLICACIONES DEL MODELO DIGITAL

4.1	Aplicación en problemas reales	60
CONCLUSIONES		70

ANEXO

MANUAL DE USO DEL PROGRAMA	75
1. Programa Principal	75
2. Subrutinas	77
3. Alcance	77
4. Lectura de datos	78
5. Codificación de datos	82
6. Resultados	83
LISTADO DEL PROGRAMA	85
BIBLIOGRAFIA	92

CAPITULO I

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

Por lo general en áreas rurales, es factible tener bancos de transformadores en delta-abierto/delta-abierto y Y-abierto/delta abierto, son usados como un medio económico de suministrar energía eléctrica a cargas monofásicas y trifásicas simultáneamente.

Desafortunadamente los voltajes secundarios de los sistemas delta-abierto son sujetos al desbalance de voltaje causados por la distribución desigual de cargas e impedancia desigual de los transformadores. La sección 14.34 de Nema Standard MG1-1972, define este desbalance como la relación de la máxima desviación de voltaje respecto al promedio de voltajes dividido para el promedio de voltajes^{1/}. Otra definición de voltaje desbalanceado es la que relaciona, el voltaje de secuencia negativa para el voltaje de se-

1/ Nota - Los números corresponden a las referencias bibliográficas.

cuencia positiva, y es el más fácil de implementar en el análisis con componentes simétricas. 2/

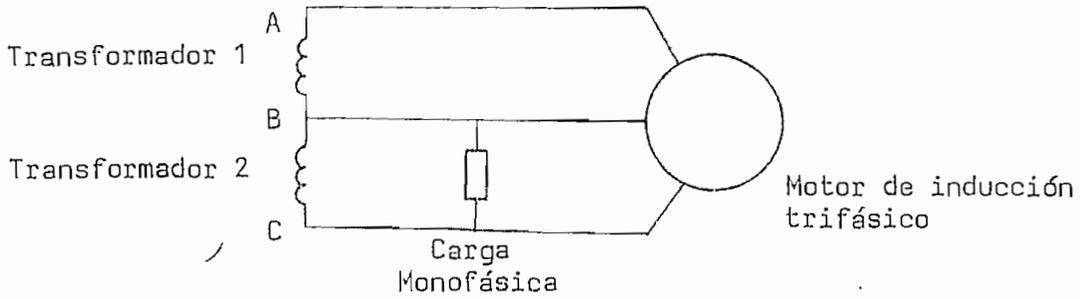
El voltaje desbalanceado es usualmente pequeño. Sin embargo puede resultar bastante importante cuando existe la presencia de desbalance en los voltajes aplicados a los terminales de un motor trifásico de inducción. Pues, afecta adversamente en su operación, reduce el torque de arranque, y existe una disminución en el torque de marcha. Produce un incremento en las pérdidas del motor, el cual origina un sobrecalentamiento de los devanados del estator, un pequeño desbalance de voltaje causa un desbalance de corriente apreciablemente mayor, el que origina un calentamiento desigual de los devanados. La capacidad de voltaje desbalanceado que un motor puede constantemente soportar sin interrupción o daño varía con el diseño del motor de inducción, con el tipo de aislamiento de las bobinas, paso del arrollamiento, tipo de rotor y ventilación; todos estos detalles pueden afectar en la temperatura del arrollamiento.

Para prevenir falla en los arrollamientos, la carga del motor podría ser reducida de su capacidad nominal hasta que la máxima temperatura del devanado no exce-

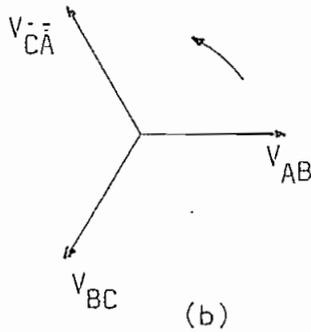
da las condiciones nominales. Una manera de predecir la temperatura de los devanados del estator es determinar la disipación de potencia; como una contribución de la circulación de corriente de secuencia positiva y negativa. ^{1/}

El propósito de esta tesis es desarrollar un programa digital, capaz de analizar sistemas de distribución delta-abierto, prediciendo pérdidas y calentamiento del motor, puede ser obtenido voltajes y corrientes a los terminales del motor; bajo condiciones de carga nominal. Determinar además, la reducción de la capacidad necesaria del motor para prevenir fallas. Es necesario un análisis a fondo del sistema delta-abierto y los métodos usados para predecir temperaturas en los arrollamientos y reducción de la capacidad nominal del motor; los cuales se basan en un estudio de las pérdidas producidas en el motor. Se ejecutaron pruebas de laboratorio para modelar y verificar el estudio digital.

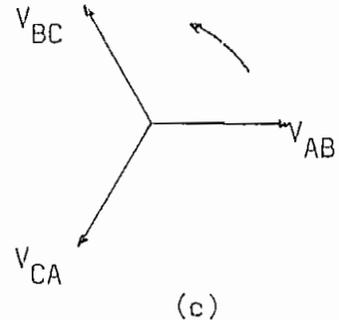
El sistema de distribución delta-abierto utilizado en el estudio es el siguiente:



(a)



(b)



(c)

Figura 1-1. Sistema de distribución delta-abierto. (a) Circuito del sistema. (b) Secuencia de fases en atraso. (c) Secuencia de fases en adelanto.

Se usan ambas conexiones delta-abierto en adelanto y atraso:

- 1) En la conexión delta-abierto adelantada, el voltaje del transformador que alimenta la carga monofásica está adelantado por 120° respecto al voltaje del otro transformador.

CAPITULO II

APROXIMACION TEORICA AL PROBLEMA

2.1 Análisis con componentes simétricas de la operación de un motor de inducción, con desbalance de voltaje

2.1.1 Voltaje y corriente desbalanceada

Los voltajes desbalanceados son producidos por una distribución desigual de cargas e impedancia desigual de los transformadores ^{1/}. Muy poco voltaje desbalanceado aplicado a la carga puede producir corrientes desbalanceadas apreciablemente mayor, esto es debido a que la impedancia de secuencia negativa de un motor trifásico es pequeña comparada con la impedancia de secuencia positiva. Por ejemplo, si la impedancia de secuencia negativa es el 15% de la impedancia de secuencia positiva, y el voltaje de secuencia negativa es 2.5% del voltaje de secuencia positiva, la corriente de secuencia negativa es el 16.7% de la corriente de secuencia positiva ^{2/}.

El voltaje desbalanceado puede ser definido de

varias maneras, ninguna de las cuales son aceptadas completamente. Una definición conveniente basada en la teoría de componentes simétricas, cuyo concepto ha simplificado grandemente los cálculos, es la que relaciona el voltaje de secuencia negativa, para el voltaje de secuencia positiva $\underline{2/}$ $\underline{3/}$. Esta definición se utilizará en el estudio teórico.

2.1.2 Suposiciones para la derivación de ecuaciones

- 1) La conexión entre los transformadores es considerada en atraso, defasada por 120° .
- 2) Los voltajes primarios son balanceados (o impedancia de la fuente es cero).
- 3) Los transformadores tienen idéntica relación de vueltas.
- 4) El motor trifásico es representado para conexión en delta, y además en circuitos de secuencia positiva y negativa.
- 5) Las cargas monofásicas son balanceadas y no fluye corriente por el neutro.

2.1.3 Circuito equivalente

Un circuito equivalente del sistema de distribución en delta-abierto que incluye secundarios de los transformadores, líneas de distribución y cables, cargas monofásicas y un motor de inducción trifásico, se muestra en la Figura 2-1.

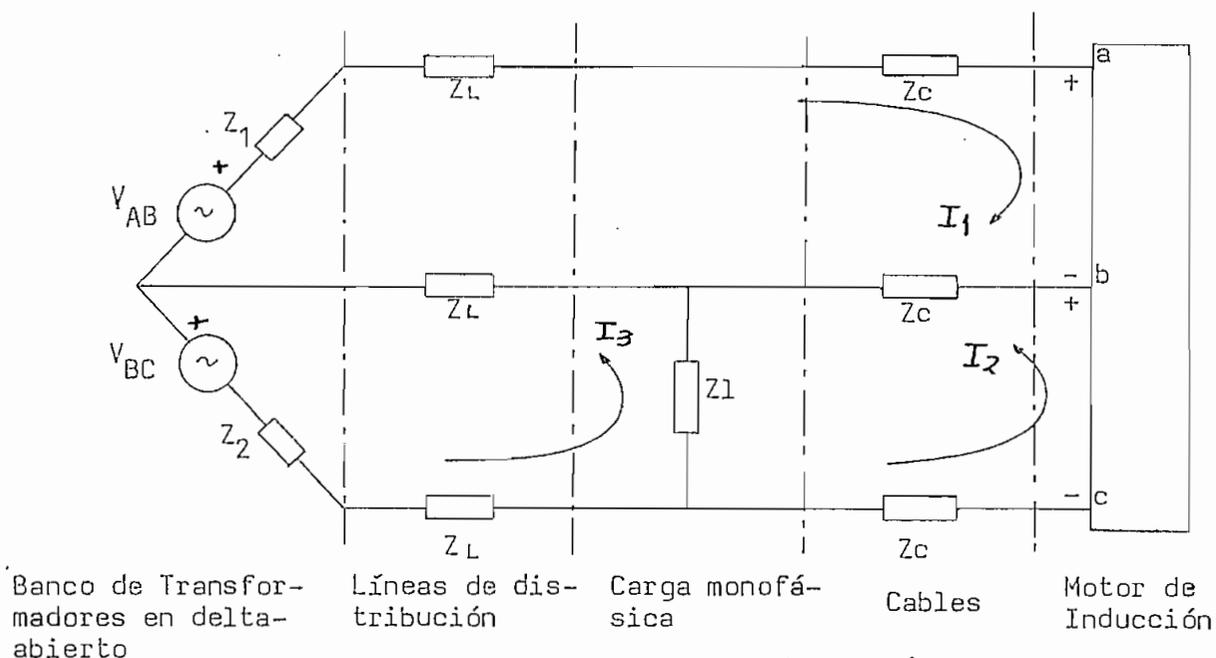


Figura 2-1. Modelo del sistema de distribución delta-abierto

2.1.4 Sistema de ecuaciones ^{1/}

Mediante las ecuaciones de voltaje de Kirchhoff se obtiene las ecuaciones para el circuito, los voltajes a

los terminales del motor pueden ser expresados como:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(Z_1 + 2Z_L + 2Z_c) & -Z_c & -Z_L \\ Z_c & (Z_1 + 2Z_c) - Z_L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{AB} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para simplicidad, (1) puede ser escrita:

$$\bar{V}_t = [Z] \bar{I} + \bar{V} \quad (2)$$

Cada fase del motor puede ser modelada en circuitos de secuencia positiva y negativa ^{5/}, mostrados en las Figuras 2-2 y 2-3. El circuito de secuencia cero no es considerado porque se asumió la conexión delta.

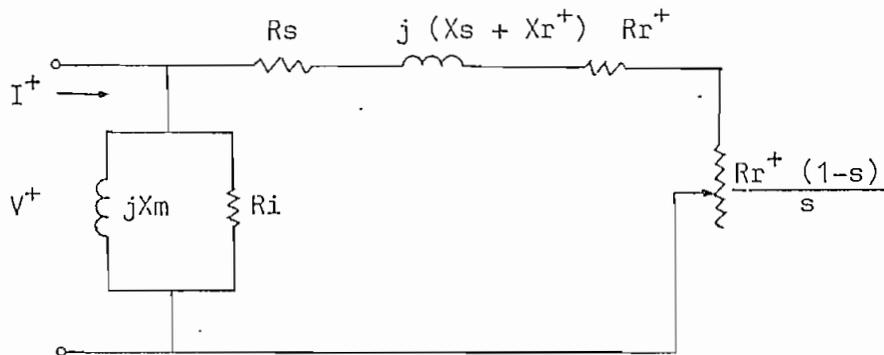


Figura 2-2. Modelo de secuencia positiva para una fase del motor de inducción.

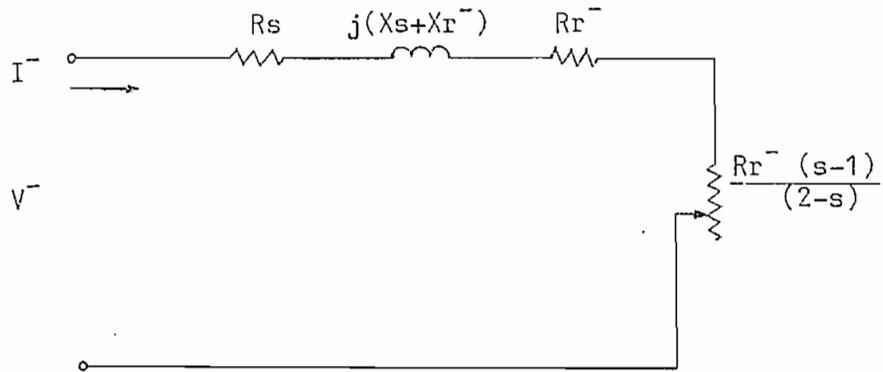


Figura 2-3. Modelo de secuencia negativa para una fase del motor de inducción.

Las Figuras 2-2 y 2-3 ilustran el balance de potencia para un motor de inducción operando bajo condiciones de desbalance. La impedancia de excitación es despreciable en el circuito de secuencia negativa, como la impedancia

$$Z_{\bar{r}} = R_{\bar{r}} / (2-s) + jX_{\bar{r}}$$

es mucho menor que la impedancia de excitación. Las pérdidas en el núcleo son esencialmente constantes para pequeños cambios en el voltaje de secuencia negativa. Entonces R_i y la reactancia de magnetización X_m , representan la impedancia de excitación

$$z = \frac{j R_i X_m}{(R_i + j X_m)}$$

R_i es determinado de las pérdidas en el núcleo del motor.

El modelo de secuencia positiva tiene la rama de excitación en los terminales, considerado como un modelo aproximado del real que tiene la rama en el centro. Esta aproximación ayuda en tener ecuaciones más simples de resolver. Es posible trasladar la rama de excitación porque la caída del voltaje en Z_s es pequeña, siendo

$$Z_s = R_s + jX_s$$

Si la máquina opera bajo condiciones de desbalance, tiene voltaje de secuencia negativa aplicado a sus terminales. Las corrientes de secuencia negativa causan un torque al eje negativo, así que, es necesario un pequeño incremento en I^+ para mantener potencia al eje constante. El % incrementado por pérdidas en el cobre, debido al incremento de I^+ es despreciable para un pequeño desbalance de voltaje.

La impedancia total de secuencia positiva, Z^+ ,

y secuencia negativa, Z^- , son derivadas de las Figuras 2-2 y 2-3 respectivamente, obteniendo:

$$Z^+ = \frac{\bar{z} [Rs + \frac{Rr}{s} + j(Xs + Xr^+)]}{z + Rs + \frac{Rr}{s} + j(Xs + Xr^+)} \quad (3)$$

En que z , es la impedancia de excitación, y

$$Z^- = Rs + \frac{Rr}{(2-s)} + j(Xs + Xr^-) \quad (4)$$

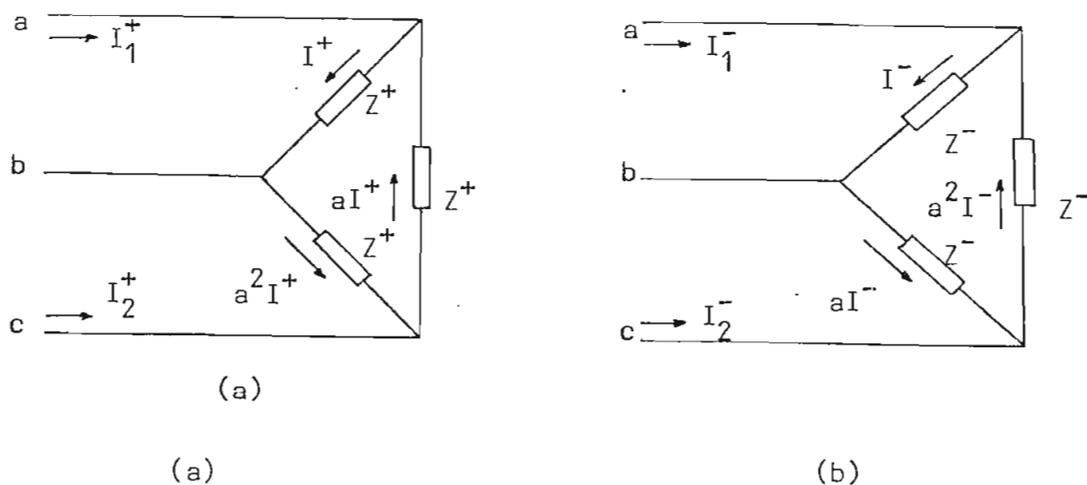


Figura 2-4. Modelos de secuencia trifásica de un motor de inducción. (a) Modelo de secuencia positiva. (b) Modelo de secuencia negativa.

De la Figura 2-4, los voltajes a los terminales del motor de secuencia positiva y negativa son:

$$\begin{bmatrix} V_{ab}^+ \\ V_{ab}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^+ & 0 \\ 0 & Z^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^+ \\ I^- \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$o, \quad \bar{V}_s = [Z_s] \bar{I}_s \quad (6)$$

La secuencia de fases asumida es V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} . Aplicando la transformación de componentes sinébricas, de componentes de fase a componentes de secuencia, los voltajes aplicados a los terminales del motor serán:

$$\begin{bmatrix} V_{ab}^+ \\ V_{ab}^- \\ V_{ab}^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde:

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

Las tensiones de secuencia cero, si se hallan presentes, no producirán campo resultante alguno, por lo que no afecta al par ni a la potencia mecánica de salida^{6/}.

La impedancia de secuencia cero es infinita, la corriente de secuencia cero es 0, además el voltaje de secuencia cero puede ser eliminado de (7).

$$V_{ca} = - (V_{ab} + V_{bc})$$

Para obtener:

$$\begin{bmatrix} V_{ab}^+ \\ V_{ab}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - a^2)/3 & (a - a^2)/3 \\ (1 - a)/3 & (a^2 - a)/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Ecuación (8) puede ser escrita como:

$$\bar{V}_s = [A] \bar{V}_t \quad (9)$$

Sustituyendo (2) y (6) para \bar{V}_t y \bar{V}_s en (9) se tiene:

$$[Z_s] \bar{I}_s = [A][Z][\bar{I}] + [A] \bar{V} \quad (10)$$

Aplicando la ley de corrientes de Kirchoff para el circuito en la Figura 2-4 y el sumatorio de ambas secuencias positiva y negativa, las componentes de las corrientes de línea I_1 e I_2 (ver Figura 2) resulta las dos ecuaciones siguientes:

$$I_1 = (1 - a) I^+ + (1 - a^2) I^- \quad (11)$$

$$y \quad I_2 = (1 - a^2) I^+ + (a^2 - a) I^- \quad (12)$$

Una tercera ecuación es obtenida por aplicación de la ley de voltajes de Kirchohoff para tres lazos (Ver Figura 2).

$$V_{BC} = I_3 (2 Z_L + Z_2 + Z1) + I_1 Z_L - I_2 Z1 = 0$$

Sustituyendo (11) y (12) en esta ecuación para I_1 e I_2 y arreglando los términos tenemos:

$$I_3 = \frac{-Z_L (1-a) + Z1 (a-a^2)}{(Z_2 + 2Z_L + Z1)} I^+ + \frac{-Z_L (1-a^2) + Z1 (a^2-a)}{(Z_2 + 2Z_L + Z1)} I^- - \frac{V_{BC}}{(Z_2 + 2Z_L + Z1)} \quad (13)$$

Una forma matricial, de estas tres ecuaciones de corriente son:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-a) & (1-a^2) \\ (a-a^2) & (a^2-a) \\ \frac{-Z_L (1-a) + Z1 (a-a^2)}{(Z_2 + 2Z_L + Z1)} & \frac{-Z_L (1-a^2) + Z1 (a^2-a)}{(Z_2 + 2Z_L + Z1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^+ \\ I^- \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ - \frac{V_{BC}}{(Z_2 + 2Z_L + Z_1)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

o,

$$\bar{I} = [W] \bar{I}_s + \bar{I}t_2 \quad (15)$$

Poniendo (15) en (10) y despejando \bar{I}_s se obtiene un modelo de secuencias para las corrientes del motor.

$$\bar{I}_s = ([Z_s] - [A][Z][W])^{-1} ([A][Z] \bar{I}t_2 + [A] \bar{V}) \quad (16)$$

Con un conocimiento de los voltajes de entrada (V_{AB} y V_{BC}) y elementos del circuito (16) puede ser resuelto obteniendo un modelo de secuencias para las corrientes del motor. Las corrientes de línea a los terminales del motor pueden después ser calculadas por (15). El voltaje en componentes de secuencia a los terminales del motor \bar{V}_s es determinado reemplazando los valores de \bar{I}_s en (5). Los voltajes de línea a los terminales del motor (V_{ab} , V_{bc}) son luego calculados de (9) para obtener:

$$\bar{V}_t = [A]^{-1} \bar{V}_s \quad (17)$$

El voltaje de línea V_{ca} es obtenido mediante (17) por suma vectorial:

$$V_{ca} = - (V_{ab} + V_{bc}) \quad (18)$$

Conociendo los voltajes y corrientes en el motor en modelos de secuencia, permite el análisis y cálculo de las pérdidas en el motor.

2.2 Aplicaciones de la conexión delta-abierta

La aparición de cargas trifásicas en bombas de agua, aire acondicionado, etc., en sitios remotos en áreas rurales y suburbanas que eran previamente monofásicas, hace factible la implementación de un sistema trifásico en delta-abierta, que es económicamente atractivo para el servicio de energía eléctrica.

Un sistema monofásico, puede ser incrementado a servicio trifásico por simple adición de un conductor de fase, en Alta, y de un segundo transformador, para formar bancos de transformadores en delta-abierta/delta-abierta o Y-abierta/delta-abierta. Del mismo banco de transformadores se alimenta a cargas monofásicas por dos fases y trifásicas.

2.2.1 Comparación entre las conexiones adelantada y atrasada

Una comparación del tipo de conexión en los transformadores, se presenta en la Tabla 1. Los puntos en los que se basa la comparación son: la localización del banco de transformadores, utilización, voltaje de regulación, variación de voltaje y voltaje desbalanceado $\frac{4}{}$. Entre las conexiones más frecuentemente usadas en sistemas de distribución, donde el factor de potencia de la carga monofásica excede al de la carga trifásica, la conexión adelantada es preferida. Si los KVA de la carga monofásica son relativamente pequeños, tienen poca importancia en la conexión de los transformadores.

2.2.2 Nomenclatura

- K_1 = Carga monofásica, KVA.
- K_3 = Carga trifásica, KVA.
- K_A = Carga del transformador A, KVA.
- K_B = Carga del transformador B, KVA
- θ_1 = Angulo del factor de potencia para la carga monofásica, grados (positivo para atraso).
- θ_3 = Angulo del factor de potencia para la carga trifásica, grados (positivo para atrasado).

- ϕ_B = Angulo de la corriente de fase en el transformador B, grados.
- U = Factor de utilización del banco de transformadores, por unidad.
- r = Relación de carga monofásica para trifásica, K_1/K_3 , por unidad.
- β = Función de θ_1 , θ_3 y conexión del banco de transformadores, grados.

2.2.3 Utilización de los transformadores

La carga aplicada a un banco de transformadores en delta-abierto, es determinada por los KVA y el factor de potencia de las cargas monofásicas y trifásicas, además por la conexión usada en adelanto o atraso ^{4/}.

La ecuación (A1) da los KVA en el transformador que tiene conectada la carga monofásica, se utiliza el signo negativo para la conexión en atraso y el signo positivo para la conexión en adelanto. La ecuación (A2) nos da los KVA en el otro transformador.

$$K_B \phi_B = K_1 \theta_1 + \frac{K_3}{\sqrt{3}} \theta_3 \pm 30^\circ \quad (A1)$$

$$K_A = \frac{K_3}{\sqrt{3}} \quad (A2)$$

Por el defasaje existente entre las cargas monofásicas y trifásicas, normalmente la carga total del banco será menor que la suma algébrica de los KVA de la carga trifásica y monofásica. La mínima carga del banco de transformadores se puede obtener con cualquiera de las conexiones en adelanto y atraso, dependiendo del factor de potencia y la relación de la carga monofásica a la trifásica.

Para ilustrar la influencia de: el factor de potencia de la carga, los KVA de la carga, y la conexión de los transformadores en los KVA del banco, es conveniente definir un nuevo parámetro denominado factor de utilización del banco de transformadores. Este será definido como la relación de la suma algébrica de los KVA de la carga monofásica y trifásica para los KVA totales del banco en conexión delta-abierto. La ecuación correspondiente al factor de utilización es:

$$U = \frac{K_1 + K_3}{K_A + K_B} \quad (A3)$$

También por definición:

$$r = K_1/K_3 \quad (A4)$$

$$\beta = (\theta_3 - \theta_1 + 30^\circ) \text{ para la conexión adelantada} \quad (A5)$$

$$\beta = (\theta_3 - \theta_1 - 30^\circ) \text{ para la conexión atrasada}$$

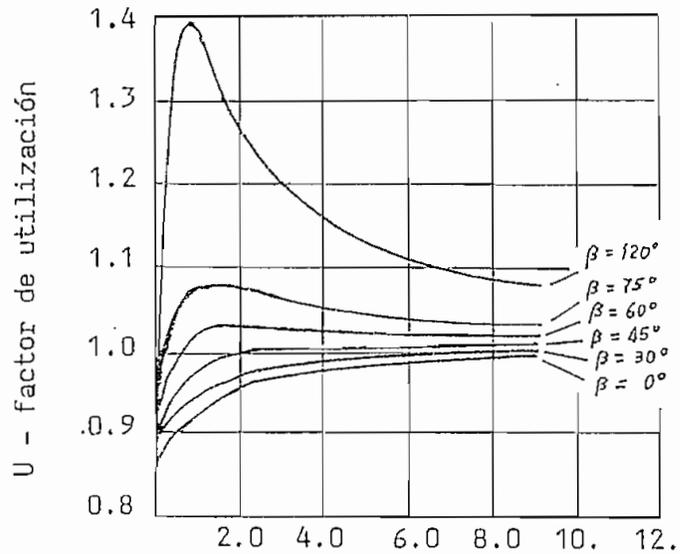
Por sustitución de las ecuaciones A1, A2, A4 y A5 en la ecuación A3 y reagrupando los términos, la expresión para el factor de utilización del banco se obtiene en la ecuación (A6).

$$U = \frac{r + 1}{\frac{1}{\sqrt{3}} + \left[r^2 + \frac{2r}{\sqrt{3}} \cos \beta + \frac{1}{\sqrt{3}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (A6)$$

De acuerdo con la expresión dada anteriormente se puede ver que involucra solamente dos variables r y β , el factor de utilización puede ser fácilmente grafizado como función de las dos variables como se indica en la Figura 2-6.

De la Figura 2-6 es evidente que la carga combinada monofásica y trifásica es superior a la carga trifásica balanceada en un banco delta-abierto desde el punto de vista de utilización. La máxima utilización del banco generalmente ocurrirá cuando los KVA monofásicos son iguales o mayores que los KVA trifásicos. También para máxima utilización es deseable que el ángulo β sea tan grande como sea posible. Normalmente la única forma de variar el ángulo es

a través de la conexión en adelanto o atraso.



r = relación de carga monofásica para trifásica, KVA.

Figura 2-6. Factor de utilización para conexión del banco en delta-abierto sirviendo a cargas monofásicas y trifásica.

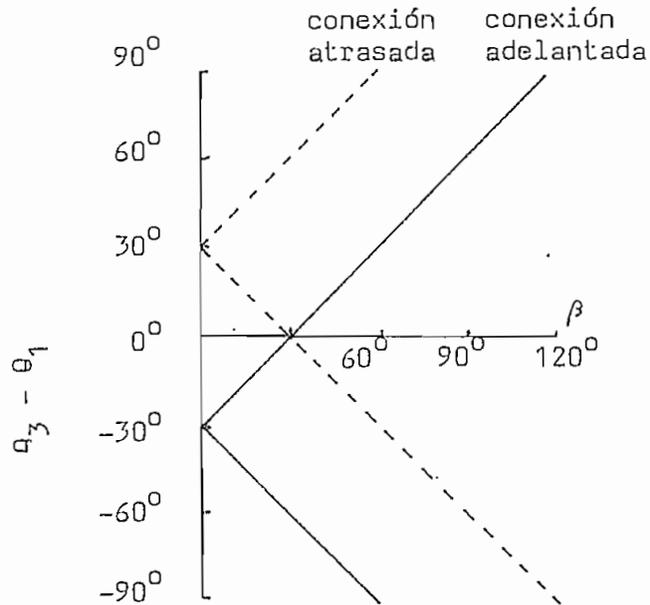


Figura 2-7. Relación entre ángulos para factor de potencia y β .

La Figura 2-7 muestra un gráfico de la diferencia en ángulos de fase, θ_3 , θ_1 en función de β para conexiones en adelanto y atraso. De esto se puede asegurar que la conexión da la misma utilización cuando los factores de potencia de la carga monofásica y trifásica son iguales. Cuando el factor de potencia trifásico es menor que el factor de potencia monofásico la conexión en adelanto da un β mucho más grande y por lo tanto una mejor utilización. Esta es la condición que generalmente se utiliza en sistemas de distribución. Sin embargo, si el factor de potencia ~~monofásico~~

trifásico

~~Fásico~~ es mayor, la conexión en atraso da mejor utilización.

La selección de la capacidad de un banco de transformadores requerida para una carga dada, puede ser determinada de las ecuaciones (A1) y (A2). Los KVA de las cargas K_A y K_B debe ser igual o menor que la máxima carga permisible en los transformadores A y B respectivamente. La conexión, en adelanto o atraso, puede ser determinada de la Figura 2-7. Cuando es posible ajustar la relación de la carga monofásica a la trifásica, la Figura 2-6 puede ser usada como una guía en la selección del valor óptimo.

001893

TABLA 1

COMPARACION DE CONEXIONES EN ADELANTO Y ATRASO

	CONEXION ADELANTADA	CONEXION ATRASADA
Utilización	Es mejor cuando el factor de potencia monofásico es mayor que el factor de potencia trifásico.	Es mejor cuando el factor de potencia trifásico es mayor que el factor de potencia monofásico.
Regulación de Voltaje	Presenta una menor caída de voltaje para carga trifásica.	Presenta una menor caída de voltaje para carga monofásica.
Caída de Voltaje	Da mínima caída de voltaje cuando se arranca motores trifásicos a bajo factor de potencia (30%)	Se tiene una pequeña caída de voltaje cuando se arranca motores trifásicos a alto factor de potencia (60%).
Desbalance de Voltaje	Se tiene mínimo desbalance de voltaje cuando el factor de potencia trifásico es bajo y el factor de potencia monofásico es alto, especialmente si las líneas y cables son cortos. Si tiene mínimo desbalance de voltaje cuando se arranca motores trifásicos.	Se tiene mínimo desbalance de voltaje, cuando el factor de potencia monofásico es bajo y el factor de potencia trifásico es alto, especialmente si las líneas y cables son largos.

2.3 Efectos de la aplicación de voltajes desbalanceados en un motor de inducción. Pérdidas y calentamiento

2.3.1 Efectos del calentamiento por desbalance de voltaje y corriente

Cuando se aplican voltajes desbalanceados a un motor trifásico de inducción, los efectos del desbalance es equivalente a la superposición de voltajes de secuencia positiva y negativa.

Con los modelos de secuencias, presentados en las Figuras 2-2 y 2-3, se puede analizar el valor relativo de impedancias de secuencia positiva y negativa, con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} Z_s &= R_s + jX_s \\ Z_r &= R_r/s + jX_r \\ Z_{\bar{r}} &= R_{\bar{r}}(2 - s) + jX_{\bar{r}} \end{aligned}$$

Z_s es igual para ambos modelos de secuencia, el valor de R_r^+ , X_r^+ y $R_{\bar{r}}$, $X_{\bar{r}}$, no tienen mucha importancia porque sus valores no difieren mucho. El parámetro que más interviene en el valor de las impedancias es el deslizamiento

(s), su valor es generalmente cercano a cero y crece conforme a la carga del motor. Entonces se puede comprobar que $Z_{\bar{r}}^+$ es considerablemente mayor que $Z_{\bar{r}}$, además considerando el análisis presentado anteriormente en 2.1.4, para la rama de excitación, se puede asegurar que la impedancia de secuencia positiva tiene un valor relativo mucho mayor.

Para un pequeño valor de voltaje desbalanceado (V^- pequeño), y debido al pequeño valor de la impedancia de secuencia negativa, se presenta un gran desbalance en la corriente. La corriente de secuencia negativa produce un torque negativo, e incrementa las pérdidas en el cobre, que contribuyen al calentamiento 5/.

Un calentamiento excesivo de motores trifásicos, operando en condiciones desbalanceadas, puede ser atribuido a los siguientes factores:

- 1) La corriente de secuencia negativa produce un incremento total de las pérdidas en el cobre tanto en el estator como en el rotor, y una disminución en el torque neto producido por la corriente de secuencia negativa.

- 2) Las corrientes desbalanceadas producen una distribución desigual del calentamiento en el estator. Como consecuencia de la distribución desigual de cargas en líneas trifásicas, se tienen voltajes aplicados al motor también desiguales, éste desbalance en los voltajes produce corriente desiguales en los devanados del motor, originando un calentamiento desigual.

Las corrientes de secuencia negativa producen más calor por amperio que las corrientes de secuencia positiva, debido a:

- 1) La relación corriente del rotor a corriente del estator es más grande en las componentes de secuencia negativa. Esto se debe principalmente a que la rama de excitación tiene más influencia en las corrientes de secuencia positiva.
- 2) La resistencia del rotor es más grande para corrientes de secuencia positiva que para corriente de secuencia negativa. De las ecua-

ciones de $Z\bar{r}^+$ y $Z\bar{r}^-$, se tiene que la parte resistiva presenta un valor mucho mayor en el modelo de secuencia positiva (Figura 2-2), esto se debe a que, se tiene una resistencia a aproximadamente 2 veces la frecuencia suministrada en secuencia negativa y, a frecuencia de deslizamiento en secuencia positiva.

2.3.2 Condiciones de desbalance

Para definir completamente las condiciones de desbalance es necesario también considerar el ángulo de fase entre las componentes de secuencia. En cualquier fase del motor estas componentes de secuencia deben estar un tiempo defasado, o desplazados por un ángulo; para un grado dado de desbalance, las corrientes en los diferentes devanados, pueden diferir considerablemente en magnitud $\frac{7}{8}$. Hay dos condiciones extremas a ser consideradas, ilustradas en la Figura 2-8.

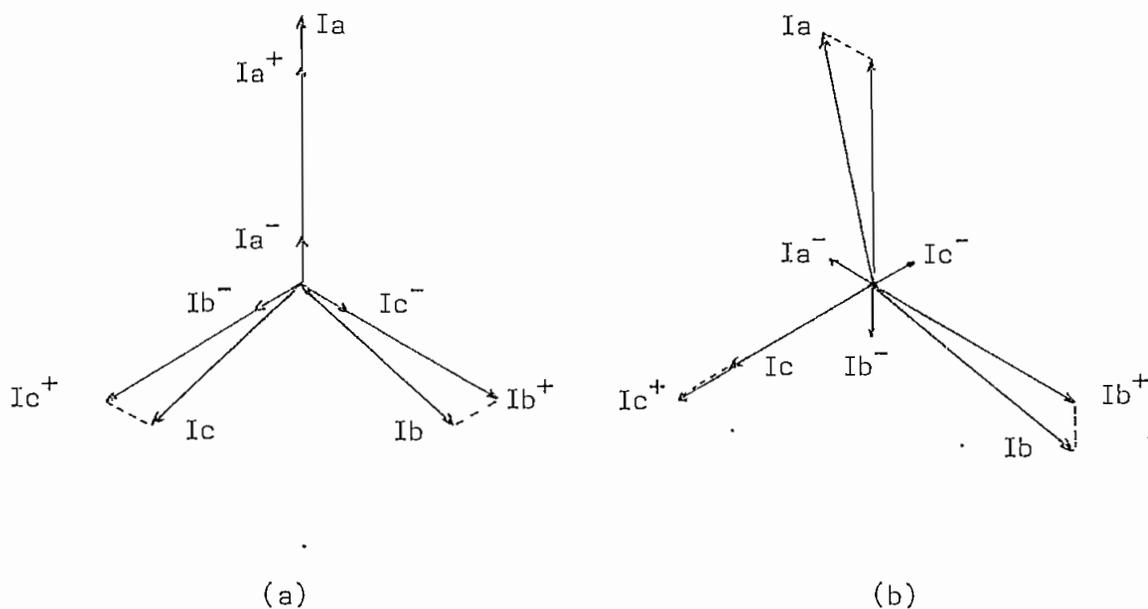


Figura 2-8. Condiciones de desbalance. (a) Peor condición. (b) Condición más favorable.

La peor condición de desbalance es cuando las corrientes de secuencia positiva y negativa están en fase; la corriente en una línea en estas condiciones es máxima, mientras que en las otras dos las corrientes son iguales pero pequeñas. La condición más favorable de desbalance ocurre cuando las corrientes de secuencia positiva y negativa son desplazadas 60 grados la una de las otras, en dos de las fases; la corriente en la línea será mínima, mientras que en las otras serán más grandes e iguales.

2.3.3 Distribución espacial del calor

La predicción de la distribución espacial del calor en un motor es un problema extremadamente difícil. La gran variedad de motores dificulta un análisis general, por requerir detalles constructivos del motor.

Un motor en funcionamiento, adquiere una impedancia térmica entre sus devanados, debido a la disipación de potencia ^{7/}. Si la impedancia térmica entre los devanados del estator es despreciable, las temperaturas de las tres fases son iguales y proporcionales al promedio de las potencias disipadas en los devanados del estator. Si la impedancia térmica es infinita se recalentará la fase que disipa más potencia. Ninguna teoría es completamente correcta. La presente determinación de la temperatura crítica se basa en estas dos teorías.

2.3.4 Disipación de potencia

Voltajes desbalanceados causan un incremento en las pérdidas del rotor ^{5/}. Estas pérdidas pueden ser calculadas por adición de potencias disipadas en R_r^+ y R_r^- para todas tres fases (ver Figuras 2-2 y 2-3). En muchos casos tales como máquinas que tienen rotores con barras profundas

o doble jaula de ardilla, estas pérdidas pueden resultar significativas al determinar la temperatura crítica 5/ 7/.

Ambas condiciones de desbalance presentadas en la Figura 2-8, son consideradas en el cálculo de la disipación de potencia, y se asume que las pérdidas en el cobre del rotor tiene un efecto despreciable en la operación del motor, por cuanto, en el rotor las pérdidas son producidas en su mayor parte por la corriente de secuencia negativa y presenta una gran impedancia 7/. Luego la disipación de potencia es considerada como un aporte sólo de R_s (resistencia de cada devanado del estator) 1/.

2.3.5 Ecuaciones

Las pérdidas en R_s pueden ser calculadas de la teoría de circuitos (ver Figuras 2-2 y 2-3) para las dos condiciones de desbalance consideradas (ver Figura 2-8).

Método optimista:

$$\text{perd} = ([I^+] - [I^-]) R_s \quad (19)$$

Método pesimista:

$$\text{Perd} = ([I^+] + [I^-]) R_s \quad (20)$$

Ambas ecuaciones (19) y (20) corresponden a las pérdidas en el cobre del estator en cada devanado.

Evidencias del pasado muestran que una subida de temperatura en los devanados de aproximadamente 10°C , reducen la vida del aislamiento a grandes rangos a la mitad. La subida de temperatura en los devanados ΔT sobre ambiente, es considerada directamente proporcional a la potencia disipada en el devanado. La constante de proporcionalidad K , es calculada dividiendo la temperatura crítica nominal del estator $\Delta T_{\text{nominal}}$ (sobre una supuesta temperatura ambiente de 40°C), para la potencia disipada por fase en el estator bajo condiciones nominales balanceadas, siendo:

$$\Delta T = K I_s^2 R_s \quad (21)$$

en que I_s = corriente total por R_s (ver Figuras 2-2 y 2-3)

$$y \quad K = \frac{\Delta T_{\text{nominal}}}{(I_{s_{\text{nominal}}})^2 R_s} \quad (22)$$

Se puede obtener temperaturas críticas para las dos condiciones de desbalance. Para proteger al motor, la máxima temperatura del devanado no podrá exceder la temperatura bajo condiciones nominales balanceadas, para lograr esto es necesario una reducción de la capacidad nominal del motor.

2.4 Reducción de la capacidad nominal del motor por desbalance de voltajes

Para proteger un motor con desbalance de voltajes, la máxima temperatura de sus devanados no podrá exceder la temperatura bajo condiciones nominales balanceadas. La máxima temperatura se calcula en base a la disipación de potencia, para las dos condiciones de desbalance ya establecidas. De igual forma se puede obtener límites de reducción de la capacidad nominal, haciendo disminuir la máxima temperatura obtenida de las dos condiciones de desbalance hasta un valor que esté dentro de los límites de seguridad. La potencia del motor debe ser disminuida hasta que la disipación de potencia en el estator sea la misma que para condiciones nominales balanceadas, teniendo:

$$P_{\text{máx.}} = P_{\text{nominal}} \quad (23)$$

Claramente, es necesaria una prueba de la peor condición posible para determinar, como una gran reducción de la capacidad nominal podría ser necesaria para un motor que opera con voltajes desbalanceados. Ningún método puede determinar la reducción exacta de la capacidad, pero ellos permiten determinar los límites que deben ser considerados.

CAPITULO III

MODELO DIGITAL PARA DETERMINACION DE CALENTAMIENTO Y REDUCCION DE CAPACIDAD

3.1 Procedimiento y alcance

Con el sistema de ecuaciones implementado en 2.1 y 2.3, y además con los métodos de reducción de capacidad nominal, ya discutidos, se implementó un programa digital. El programa determina voltajes a los terminales de la carga trifásica, corrientes en las líneas, porcentaje de voltaje desbalanceado en el sistema delta-abierto; predice el calentamiento de un motor, y determina los límites de reducción de capacidad nominal del motor.

El propósito de esta tesis es obtener un programa fácil de usar, y lo más general posible. La estructuración del programa y sus bases se desarrollan a continuación.

Un paso importante en el programa es resolver la ecuación (16), se puede disponer de todos los parámetros para su resolución a excepción de la impedancia monofásica

y el deslizamiento. Por lo general los datos para la carga monofásica son de su potencia total (KVA), y su factor de potencia (FP). Como resultado del desbalance de voltaje, el voltaje a través de la carga monofásica, no es posible obtenerlo sin antes realizar un análisis del sistema. Por lo tanto el valor exacto de Z_1 no puede ser calculado sin antes haber resuelto la ecuación (16). Se utilizó un proceso de iteraciones para ajustar el valor de Z_1 , en base al voltaje y potencia de la carga monofásica. La suposición inicial de Z_1 es calculada asumiendo el voltaje a través de la carga monofásica (V_1) como V_{AB} , teniendo:

$$Z_1 = \frac{|V_{AB}|^2}{KVA} \quad (24)$$

$$y \quad Z_1 = |Z_1| (FP) + j |Z_1| (1 - FP^2)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

Como la potencia monofásica viene dada en KVA luego la ecuación (24) hay que dividirla para 1.000. Cada suposición subsecuente es hecha resolviendo (16), determinando un nuevo valor de V_1 , y obteniendo una nueva suposición de la impedancia monofásica Z_1^{m+1} por:

$$|Z_1^{m+1}| = \frac{|V_1^m|^2}{KVA} \quad (26)$$

$$y \quad Z_1^{m+1} = |Z_1^{m+1}| (FP) + j |Z_1^{m+1}| (1-FP^2)^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

donde m es el número de iteraciones y $|Z_1^{m+1}|$ es la magnitud de Z_1 obtenida a la $(m+1)$ suposición. El voltaje a través de la carga monofásica se obtiene mediante:

$$V_1 = V_{bc} - Z_c (I_1 + 2I_2) \quad (28)$$

siendo, V_{bc} obtenido de (17), y las corrientes I_1 e I_2 de la ecuación (15). El lazo de iteración es ejecutado hasta obtener un error muy pequeño tolerable (ϵ_1).

$$|Z_1^m - Z_1^{m+1}| \leq \epsilon_1 \quad (29)$$

Además de conocer la impedancia monofásica, en la ecuación (16), también se requiere que el deslizamiento (s) del motor sea especificado. No siempre se puede conocer el valor del deslizamiento, cuando el motor es operado a carga diferente de la nominal o bajo condiciones desbalanceadas. Un valor inicial para el deslizamiento puede ser aquel cuando el motor opera bajo condiciones nominales, es decir a la velocidad especificada en los datos de la placa, por teoría de máquinas se tiene:

$$s = (N_s - N_r)/N_s \quad (30)$$

$$y \quad N_s = 120 f / \text{polos} \quad (31)$$

Un valor más confiable es dado por la potencia de salida del motor en caballos de fuerza (HP), para poder ajustar la potencia a los HP del motor es necesario incluir en el programa un segundo lazo de iteración. La potencia de salida del motor (P) es entonces determinada sumando la potencia de salida del motor del modelo de secuencia dado

$$P = 3 |I_r^+|^2 R_r^+ \left(\frac{1-s}{s} \right) + 3 |I_r^-|^2 R_r^- \left(\frac{s-1}{2-s} \right) \quad (32)$$

donde $|I_r^+|$ y $|I_r^-|$ son las magnitudes de las corrientes en la resistencia del rotor R_r^+ y R_r^- respectivamente (ver Figuras 2-2 y 2-3). Las corrientes en el rotor son determinadas a partir del modelo de secuencias del motor, teniendo:

$$I_r^+ = I^+ \frac{z}{z + R_s + R_r^+/s + j(X_s + X_r^+)} \quad (33)$$

$$y \quad I_r^- = I^- \quad (34)$$

La potencia calculada en (32) es comparada con la potencia de salida deseada en el motor (HP nominales). La comparación se realiza, pasando los HP a watios, median-

te la siguiente ecuación:

$$E = 746 (HP) - P \quad (35)$$

P es ajustada a HP, si el error (E) no excede una tolerancia especificada, en el caso contrario es necesario ajustar el deslizamiento de tal forma que el valor de E se haga cada vez más pequeño. La nueva suposición del deslizamiento s^{k+1} puede ser determinada por:

$$s^{k+1} = s^k - E / (\partial E / \partial s) \quad (36)$$

en que

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial s} = & 3 |I\bar{F}^+|^2 R\bar{F}^+ \left[-\frac{1}{s} - \frac{(1-s)}{s^2} \right] \\ & + 3 |I\bar{F}^-|^2 R\bar{F}^- \left[\frac{1}{(2-s)} - \frac{(s-1)}{(2-s)^2} \right] \end{aligned} \quad (37)$$

Las iteraciones continúan hasta que la potencia de salida calculada en el programa esté dentro de una tolerancia especificada de los HP deseados.

El programa es capaz de analizar ambas conexio-

nes delta-abierto en adelanto y atraso. La diferencia entre las dos conexiones es la secuencia de fase de los voltajes, en los terminales del banco de transformadores como se muestra en la Figura 1-1. El sistema de ecuaciones derivado en la sección 2.1, tiene una secuencia de fases V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} ; por lo tanto, el sistema está en conexión delta-abierto atrasada.

Para analizar una conexión en adelanto, la secuencia de fases puede ser cambiada a V_{AB} , V_{CA} , V_{BC} . El cambio puede realizarse en las ecuaciones (7) y (8), sin embargo tendría la misma forma si se define nuevamente el operador a , siendo:

$$a = 1 \angle 240^\circ$$

Un programa escrito para conexión atrasada, puede también ser usado para analizar una conexión adelantada simplemente cambiando el valor de a .

Después de estas modificaciones, (16) puede ser resuelta para cada conexión en adelanto y atraso, y para cargas específicas monofásicas y trifásicas. Luego se puede determinar condiciones del desbalance, los voltajes a

los terminales del motor se obtienen de (17) y (18), las corrientes en las líneas I_A , I_C son determinadas de (15) y la corriente I_B en su valor absoluto por la suma de I_1 e I_2 (Figura 2-1). El % de voltaje desbalanceado se define mediante:

$$\% V \text{ desb.} = \frac{V_{a\bar{b}}}{V_{a\bar{b}^\dagger}} \times 100 \quad (38)$$

Después, pueden ser estimados los efectos de los voltajes desbalanceados en la operación del motor. La potencia disipada en cada devanado del estator puede ser calculada en base a las condiciones del desbalance obtenidas en (19) y (20). Finalmente se puede predecir el calentamiento del motor en base a la ecuación (21).

Para obtener el valor reducido de capacidad nominal de la carga del motor HPr , un tercer lazo de iteración es usado en el programa. Los HP serán ajustados hasta que la disipación de potencia máxima del estator, predicha para cualquiera de los métodos de reducción de la capacidad nominal sea igual a la potencia disipada por fase en el estator con condiciones nominales inferiores balanceadas, para corriente y voltaje.

La suposición inicial para la reducción de capacidad nominal en caballos de fuerza HPr^0 , es los HP nominales del motor. La nueva estimación de la reducción de capacidad nominal para la carga del motor HPr^{k+1} es determinada para cada iteración por la siguiente expresión:

$$HP^{k+1} = HPr^k - HPr^k \frac{(P_{\text{máx.}} - P_{\text{nominal}})}{(P_{\text{máx.}} + P_{\text{nominal}})} \quad (39)$$

en que:

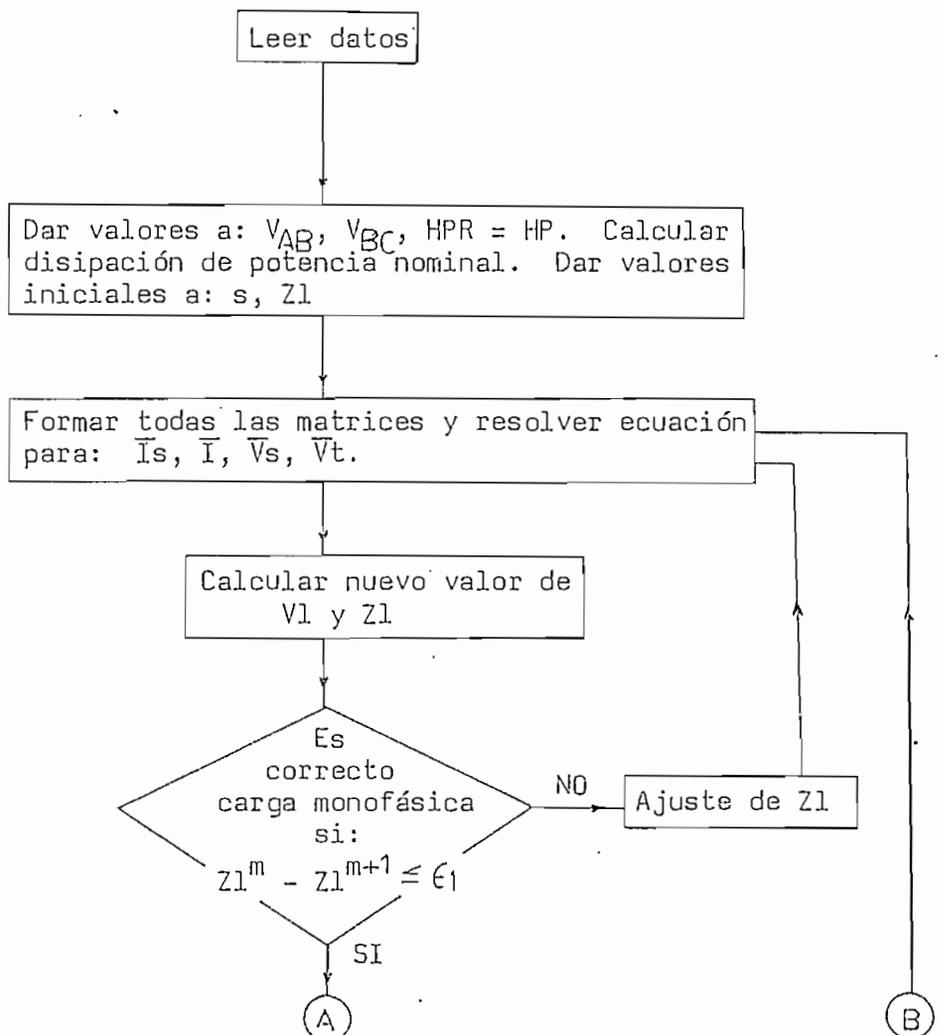
$$P_{\text{nominal}} = R_s (I_{s_{\text{nominal}}})^2 \quad (40)$$

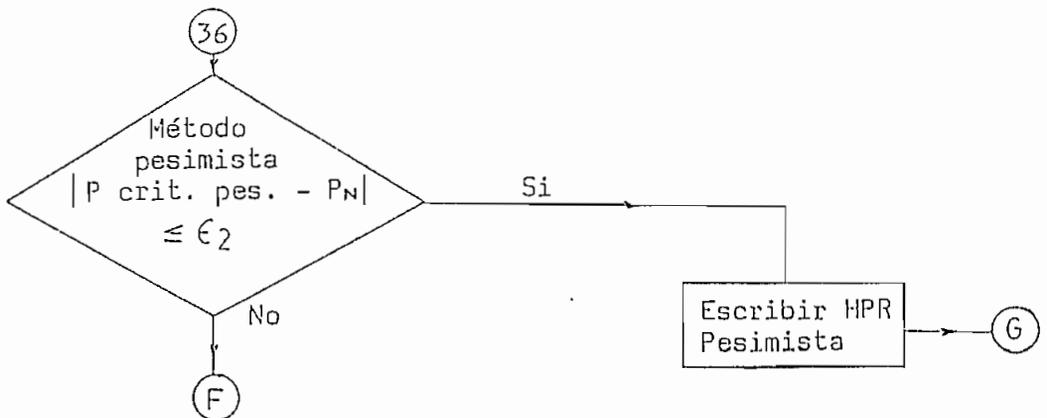
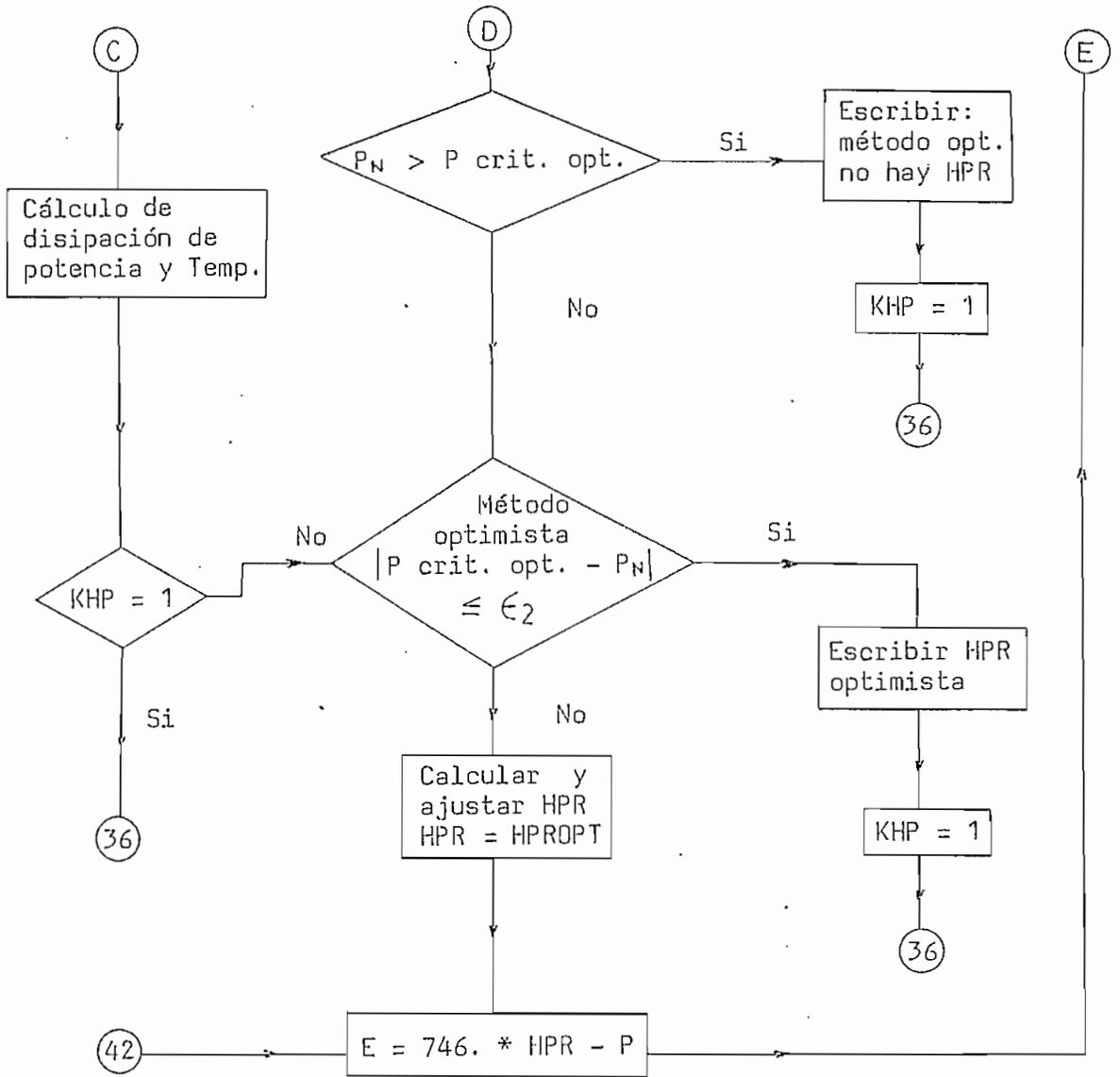
$I_{s_{\text{nominal}}}$ es la magnitud de la corriente R_s bajo condiciones nominales balanceadas se determina para el modelo de secuencia positiva (ver Figura 2-2). Cuando la disipación de potencia máxima ($P_{\text{máx.}}$) predecida del estator esté dentro de la tolerancia especificada para el calentamiento del estator bajo condiciones nominales, se realiza una salida del lazo de iteración para escribir los HPr . Este lazo de iteración es ejecutado por dos veces hasta obtener valores para ambos métodos de reducción de la capacidad nominal.

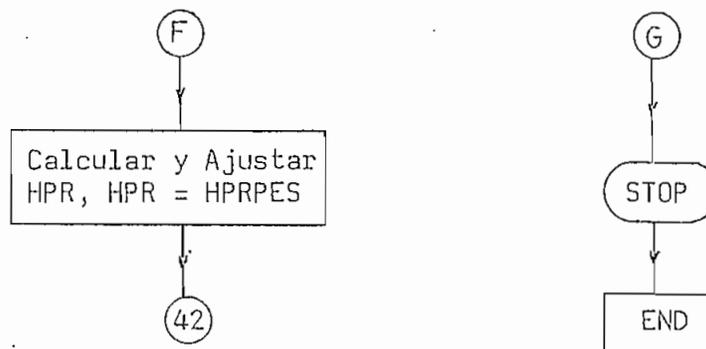
Los procedimientos sobre reducción de la capaci-

dad nominal, asumen el rendimiento de un motor de inducción como unitario. Para motores que tienen otro rendimiento diferente a la unidad, los límites de reducción de la capacidad nominal pueden ser determinados y luego multiplicar estos valores por el rendimiento. Un diagrama de flujo para el programa digital se muestra posteriormente.

3.2 Diagrama de flujo







3.3 Verificación del modelo

La verificación del modelo digital fue realizada mediante la implementación de un sistema delta-abierto en el laboratorio. Se usó dos transformadores de 1.5 KVA para formar un banco en atraso, los primarios fueron conectados en Y-abierto y alimentados a través de un variac trifásico por dos fases, teniendo una relación en los voltajes de 110/220 V. para cada transformador. El sistema sirve a cargas monofásicas y motor de inducción trifásico simultáneamente.

El motor tiene como datos de placa 1/3 HP, 60 Hz, 4 polos, 1.725 r.p.m., 2.4 A, 208 V, para conexión del estator en estrella, y su construcción es rotor en jaula de ardilla. Los parámetros del motor para los modelos de secuencias (ver Figuras 2-2 y 2-3) son obtenidos por teoría

de máquinas, en base a pruebas realizadas y orientadas a la conexión delta. Las pruebas usadas son: de rotor bloqueado, de vacío y doble frecuencia. El valor de los parámetros se obtuvo para el motor en delta; y son:

$$R_s = 20.83 \text{ ohm por fase}$$

$$R_i = 1102.5 \text{ ohm por fase}$$

$$R_{\bar{F}}^{\dagger} = 4.65 \text{ ohm por fase}$$

$$R_{\bar{F}} = 2.08 \text{ ohm por fase}$$

$$X_m = 141.78 \text{ ohm por fase}$$

$$X_s = 14.72 \text{ ohm por fase}$$

$$X_{\bar{F}}^{\dagger} = 14.72 \text{ ohm por fase}$$

$$X_{\bar{F}} = 14.07 \text{ ohm por fase}$$

Se consideró nula la impedancia de las líneas y cables, además la carga monofásica puede variar su valor desde cero hasta un valor requerido. Las impedancias de los transformadores se determinaron en base a pruebas, siendo:

$$Z_1 = 2.08 + j 0.943$$

$$Z_2 = 2.48 + j 0.78$$

Los voltajes a los terminales del banco delta-abierto sin carga, (V_{AB} , V_{BC}).

$$V_{AB} = 206 \angle 0^\circ \quad a = 1 \angle 120^\circ$$

$$V_{BC} = 204 \angle -127^\circ$$

La potencia de entrada del motor se consideró 250 wattios, menos pérdidas, se tiene una potencia nominal o potencia al eje del motor de 0.131 HP, en lugar de 1/3 HP, se obtuvo resultados para varios valores de carga monofásica, mostrados en la siguiente tabla:

Carga monofásica (FP = 1)		Voltajes a los terminales del motor (V)			Corriente en las líneas (A)		
I (A)	P (Wat)	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}	I _A	I _B	I _C
0	0	202	199	178	1.77	2.82	2.18
0.7	135.8	200	196	175	1.78	2.90	2.45
1.2	230.4	198	194	173	1.80	3.14	2.80
2.1	394.8	197	191	169	1.83	3.62	3.54

TABLA 3-1. Resultados experimentales

El mismo sistema fue analizado en el programa digital y los resultados comparados y mostrados en las Figuras 3-1 y 3-2. El voltaje desbalanceado en Figura 3-3, fue calculado usando la definición dada en la sección 14.34 de Nema

Standard M61-1972, para el tipo de conexión usada tiene la siguiente forma:

$$V \text{ desb. (\%)} = \frac{\left(\frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \right) - V_{ca}}{(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) / 3} \times 100 \quad (41)$$

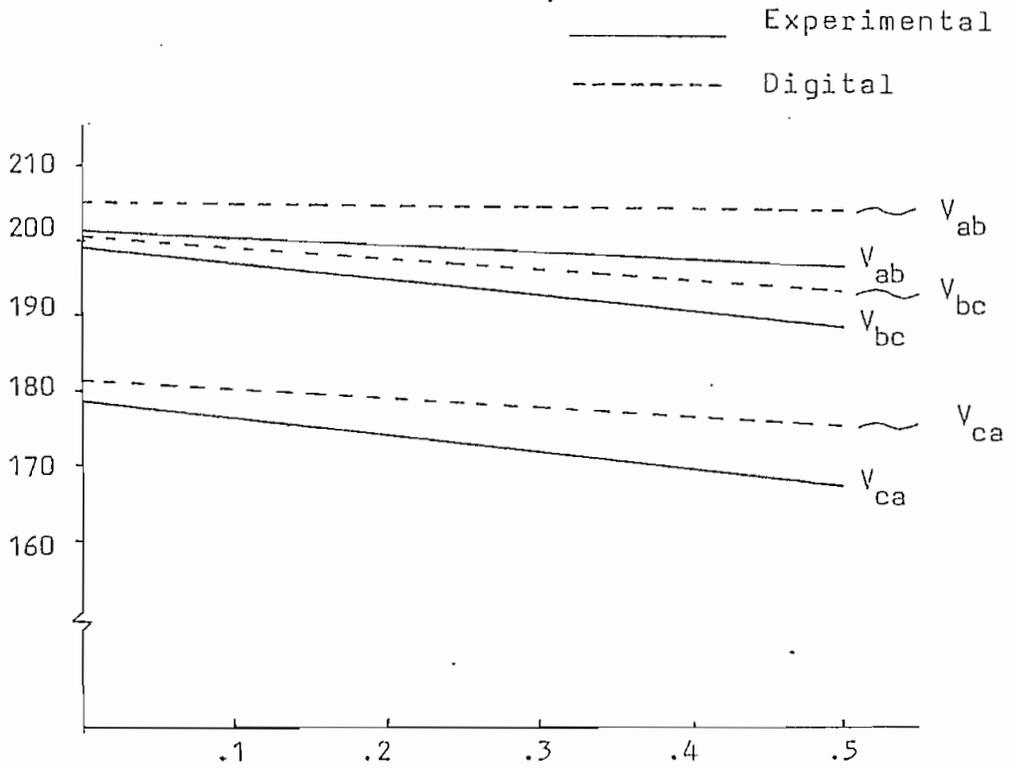


Figura 3-1. Voltajes en los terminales del motor (V) - Carga monofásica en KVA.

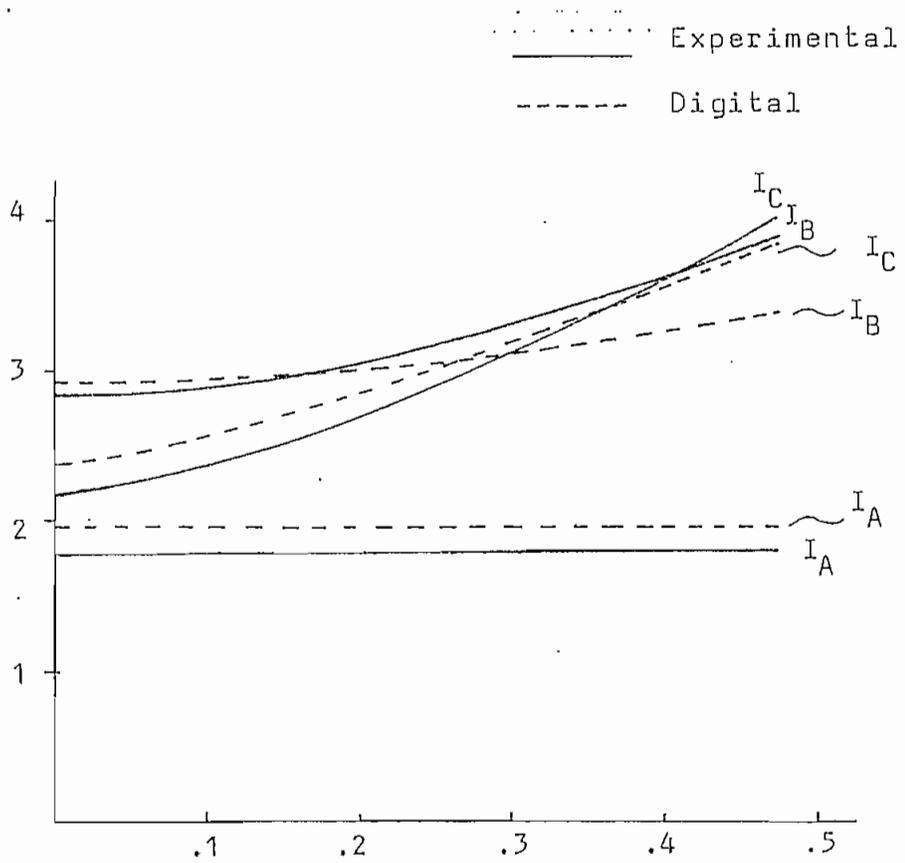


Figura 3-2. Corrientes en las líneas (A) - Carga monofásica en KVA.

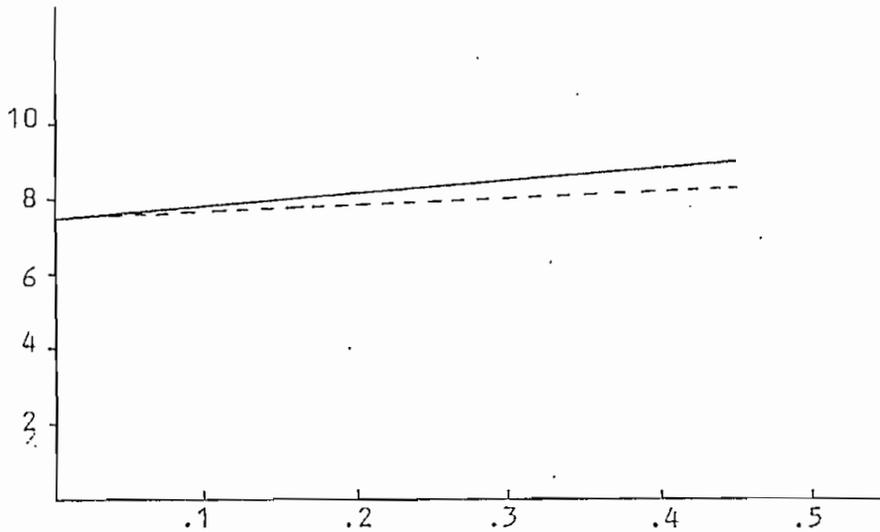


Figura 3-3. Voltaje desbalanceado en el motor (%) - Carga monofásica en KVA.

Los resultados del programa digital fueron obtenidos solamente cambiando el valor de la carga monofásica, se usó 0.15, 0.30 y 0.45 KVA.

Comparando los voltajes a los terminales del motor en la Figura 3-1, primeramente, se puede observar un gran desbalance de voltaje que resulta bastante conveniente para la comprobación del modelo digital. Este desbalance obtenido en el motor es debido a la distribución desigual de cargas en el sistema de distribución, y además en su mayor parte, en nuestro caso, es debido a los voltajes

de alimentación del banco delta-abierto (V_{AB} y V_{BC}), pues, sus valores son diferentes en módulo y además el defasaje entre los dos voltajes no es 120 grados ($V_{AB} = 206 \angle 0^\circ$; $V_{BC} = 204 \angle -127^\circ$; en vacío). En los datos del sistema se puede observar que los transformadores que forman el banco no son iguales, (Z_1 es diferente a Z_2). También, el desbalance es provocado por el voltaje de la red y sobre todo como los primarios del banco están conectados en Y-abierto, se tiene voltajes aplicados diferentes, que al ser inducidos en los secundarios provocan también valores diferentes de los voltajes (V_{AB} , V_{BC} , V_{CA}), tanto en magnitud como en ángulo.

En las Figuras 3-1 y 3-2 los resultados obtenidos en el computador están un tanto desplazados hacia arriba esto es debido a muchos factores: el sistema digital utilizado resulta lo más general posible y por lo tanto no considera pérdidas en el rotor, considera el rendimiento del motor unitario. Como el sistema experimental es de poca potencia se tiene pequeñas caídas de tensión en los instrumentos de medida y en los conductores (considerado impedancia cero). La conexión del motor utilizado en el experimento fue en estrella y los parámetros obtenidos de las pruebas se determinó su equivalente para la conexión del motor en delta.

La diferencia en los valores obtenidos en el computador para la corriente de línea I_B (Figura 3-2) es debido a los voltajes terminales del motor (Figura 3-1), pues, a más de tener sus valores desplazados hacia arriba no se tiene curvas paralelas y con un desplazamiento similar, esto es debido a pequeños errores en los datos, en la determinación de parámetros en base a pruebas realizadas y también a que resulta bastante difícil determinar experimentalmente el ángulo de un voltaje (para V_{BC}). El ángulo fue determinado gráficamente en base al modelo de los tres voltajes (V_{AB} , V_{BC} , V_{CA}).

El porcentaje de voltaje desbalanceado en el motor (Figura 3-3) es obtenido para ambas curvas mediante el método práctico representado en la ecuación (41). En el modelo digital se ha implementado el método de componentes simétricas para la obtención del desbalance de voltaje, una comparación de estos dos métodos es hecha en la Figura 3-4.

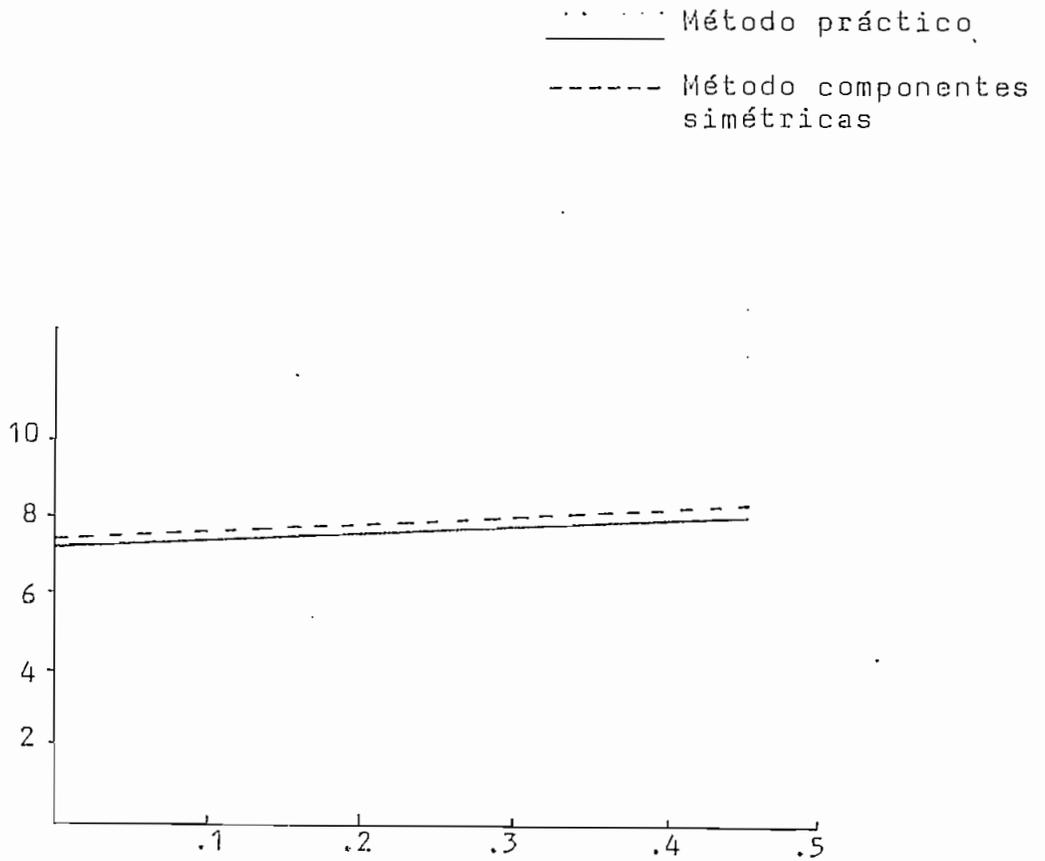


Figura 3-4. Voltaje desbalanceado en el motor (%) - Carga monofásica en KVA; para resultados digitales.

Datos y resultados del sistema obtenidos en el computador para los tres valores de cargas monofásicas son presentados a continuación.

CAPITULO IV

APLICACIONES DEL MODELO DIGITAL

4.1 Aplicación en problemas reales

Utilizando el modelo digital, teóricamente puede ser resuelto un sistema de distribución delta-abierto para conexión en adelante o atraso. Un sistema utilizado en áreas rurales y suburbanas es aquel formado por un transformador de 37.5 y uno de 5 KVA, cada transformador tiene una relación de voltajes nominal de 7.200 a 120/240 voltios, el primario del banco de transformadores por lo general en conectado en Y-abierto, para un voltaje fase-fase nominal de 12.470 voltios.

El sistema delta-abierto, al igual que el modelo estudiado sirve a una carga trifásica (motor), y a una carga monofásica. El motor trifásico de inducción tiene los siguientes datos de placa: 10 HP, 60 Hz, 4 polos, 1745 r.p.m., 23 A., y 220 V.

El rotor es de doble jaula de ardilla, siendo la

clase de aislamiento B, las constantes al igual que los datos de placa son referidos a $\frac{9}{}$, teniendo:

$$R_s = 0.459 \text{ ohm por fase}$$

$$R_i = 359.0 \text{ ohm por fase}$$

$$R_r^{\dagger} = 0.564 \text{ ohm por fase}$$

$$R_r^{\bar{}} = 1.521 \text{ ohm por fase}$$

$$X_m = 42.9 \text{ ohm por fase}$$

$$X_s = 1.5 \text{ ohm por fase}$$

$$X_r^{\dagger} = 2.28 \text{ ohm por fase}$$

$$X_r^{\bar{}} = 1.446 \text{ ohm por fase}$$

La carga monofásica es de 20 KVA con un factor de potencia de 0.9. Considerando el circuito secundario de una longitud de 150 pies para líneas y cables, formado por dos conductores de 300 MCM para carga monofásica y juntamente con un conductor # 4 AWG, sirven a la carga trifásica.

Las impedancias de los transformadores fueron tomadas de la referencia $\frac{2}{}$, siendo su valor, al igual que para líneas y cables de:

$$Z_1 = 0.2448 + j 0.1798$$

$$Z_2 = 0.021 + j 0.037$$

$$Z_L = 0.0334 + j 0.0217 = Z_c$$

Como el voltaje nominal del motor es de 220 V, se consideró un voltaje terminal en los secundarios del banco de transformadores de 230 V. en vacío.

Con los datos ya presentados, se corrió el programa digital para conexión en adelanto y atraso, simplemente cambiando el valor del índice "a".

$a = - 0.5 - j \quad 0.866$ para conexión en adelanto

$a = - 0.5 + j \quad 0.866$ para conexión en atraso

Datos y resultados del computador son obtenidos y presentados a continuación.

De los resultados presentados se obtiene: voltajes en los terminales del motor, corrientes en las líneas, para las dos condiciones de desbalance; y, predice; disipación de potencia por fase y temperatura en los bobinados del estator. Todos estos resultados son obtenidos a potencia nominal. Bajo condiciones nominales balanceadas, la disipación de potencia como calor en cada uno de los devanados del estator es 80.94 wátios a 120°C (sobre una temperatura ambiente de 40°C).

Para prevenir futuras fallas en el aislamiento, la carga del motor debe ser reducida de su capacidad nominal a un valor entre 9.6 y 8.7 HP para conexión en adelanto, y entre 9.66 a 8.57 para la conexión del motor en atraso. Se puede observar que los límites de reducción de la capacidad nominal dependen directamente del efecto producido por el porcentaje de voltaje desbalanceado, así pues, entre más grande es el porcentaje de voltaje desbalanceado, mayor será el distanciamiento entre los límites.

El análisis de ambas conexiones en adelanto y atraso, permite realizar un análisis del sistema y determinar la conexión más conveniente. En los resultados se tie-

ne que la conexión en adelanto presenta un menor porcentaje de voltaje desbalanceado, siendo por lo tanto, más eficiente.

En la Tabla 4-1 son presentados los resultados del problema de aplicación para conexión en adelanto y atraso, permitiendo hacer una comparación con la parte teórica presentada en 2.2.1 y resumido en la Tabla 1, para ambas conexiones. Analizando la regulación de voltaje se puede justificar que presenta una menor caída de voltaje para carga trifásica en conexión adelantada ($V_{bc} = 215.07$ V.), en cambio en la conexión atrasada se tiene un tanto menor ($V_{ca} = 213.41$ V.). Además se tiene una menor caída de voltaje para carga monofásica en conexión atrasada ($V_{bc} = 115.55$) y mayor para la adelantada ($V_{bc} = 115.07$).

Para poder analizar la utilización de los transformadores, así como el desbalance de voltaje en la carga, refiriéndonos a la Tabla 1, es necesario conocer los KVA de la carga trifásica y su factor de potencia, los de la carga monofásica ya son conocidos. Usando la nomenclatura 2.2.2 se tiene:

$$K_3 = \sqrt{3} I_A V_{ab} = \frac{HP + P_{\text{máx.}}}{\cos \theta_3} \quad (A7)$$

siendo I_A , V_{ab} , $P_{\text{máx.}}$ (máx. disipación potencia) resultados del sistema, para conexión en adelanto y atraso.

	I (A)	Vab (V)	P máx. (W)	K3 (KVA)	Cos θ_3	θ_3
conexión en adelanto	25.9	217.48	103.52	9.75	0.7757	39.13
conexión en atraso	25.99	217.6	107.79	9.79	0.773	39.37

Una vez conocido el factor de potencia de las cargas se puede comprobar el desbalance de voltaje en el motor trifásico. Se tiene mínimo desbalance de voltaje en conexión adelantada (0.8%) cuando el factor de potencia trifásico (0.77) es bajo y el factor de potencia monofásico es alto (0.9). En cambio se puede comprobar que para la conexión atrasada con los mismos factor de potencia se tiene un mayor desbalance de voltaje (1.1%).

El factor de utilización (U) de los transformadores (A y B), es calculado mediante la ecuación (A3), el valor de las cargas a los transformadores K_A y K_B es calcu-

do por las ecuaciones A2 y A1 respectivamente, teniendo:

	K_A (KVA)	K_B (KVA)	U
conexión en adelanto	5.62	24.39	0.9913
conexión en atraso	5.65	25.45	0.9579

siendo $K_1 = 20$ KVA y 0.9 el factor de potencia. Se tiene una mejor utilización de los transformadores en conexión adelantada (0.9913), cuando el factor de potencia monofásico (0.9) es mayor que el factor de potencia trifásico (0.77).

El análisis y comparación de las conexiones en adelanto y atraso ha permitido verificar el modelo digital y comprobar que cumple efectivamente con las conclusiones teóricas presentadas. Los resultados del ejemplo de aplicación han sido satisfactorios y justificados.

		CONEXION EN ADELANTO	CONEXION EN ATRASO
Voltajes en los terminales del motor (V)	Vab	217.48	217.6
	Vbc	215.07	215.55
	Vca	217.79	213.41
Corrientes en las líneas (A)	IA	25.9	25.99
	IB	115.4	113.39
	IC	112.44	114.27
Voltaje desbalanceado en el motor (%)		0.8	1.1
Disipación de potencia (W/fase)	Met. optimista	89.23	87.51
	Met. pesimista	103.52	107.79
Temperatura en el estator (°C)	Met. optimista	132.29	129.74
	Met. pesimista	153.48	159.81
HP reducidos (HP) (reducción de la capacidad nominal)	Met. optimista	9.6	9.66
	Met. pesimista	8.7	8.57

TABLA 4-1. Resultados del problema de aplicación para conexión en adelanto y atraso.

- Disipación de potencia nominal/fase = 80.94 W.

- Calentamiento nominal del motor sobre 40°C de temperatura ambiente = 120°C.

CONCLUSIONES

Este trabajo de Tesis permite obtener las bases necesarias para analizar un sistema de distribución delta-abierto, predice calentamiento del motor y determina límites de reducción de capacidad nominal. Distintas informaciones han permitido combinar el análisis del sistema delta-abierto y calentamiento del motor en un modelo digital. Este modelo, implementado en un programa de computación puede ser usado para estimar condiciones prioritarias del sistema, determinar los efectos del voltaje desbalanceado en la operación del motor, y predecir límites de reducción de la capacidad nominal; necesaria para prevenir fallas en el aislamiento del motor.

La magnitud del desbalance de voltaje en este estudio ha sido restringida a aquellas contribuciones del voltaje desbalanceado total, hecho por la distribución desigual de cargas e impedancias de los transformadores desiguales. Cualquier voltaje desbalanceado introducido por el sistema primario o por la colocación en el tap equivocado de los transformadores, estaría en adición al considerado. Este desbalance primario podría adicionar o sustraer el valor del desbalance secundario, pero se debe considerar la peor condición que es la que actúa directamente. El voltaje desba-

lanceado depende más de la carga aplicada al banco, que de la combinación de transformadores usada en el banco.

Se han considerado métodos de reducción de la capacidad nominal, pues al no determinar el valor exacto de corrientes desbalanceadas (suma de componentes positiva y negativa), se hace difícil poder describir el fenómeno de la subida de temperatura en el motor. Sin embargo han sido establecidos límites, para ellos es estudio es realizado en base a la disipación de potencia en los bobinados del estator, para las dos condiciones de desbalance (pesimista y optimista).

El modelo digital permite usar ambas conexiones en adelanto y atraso en el sistema de distribución. En cada tipo de conexión, dependiendo de la carga tiene sus ventajas y desventajas. Al considerar ambas conexiones se puede hacer una comparación y optar por la conexión más conveniente. Con los resultados del modelo digital, para los dos tipos de conexiones, posteriormente, se puede comparar en base a la Tabla 1; utilización de los transformadores; regulación, caída de voltaje y voltaje desbalanceado.

Los modelos de secuencias del motor son lo más

generales posible, con excepción de que en el modelo de secuencia positiva se consideran las pérdidas en el núcleo, mediante una resistencia en paralelo con la rama de magnetización. Se desprecian las pérdidas en el cobre del rotor por ser relativamente pequeñas.

Un motor de inducción al funcionar con voltajes desbalanceados, reduce la utilización de su capacidad nominal, que el motor puede entregar en forma de potencia mecánica a condiciones nominales balanceadas. Esta reducción de potencia disponible en el motor se manifiesta en forma de torque negativo, producido por la presencia de corrientes de secuencia negativa. Debido al pequeño valor de la impedancia de secuencia negativa (valor relativo), con pequeños valores de voltajes desbalanceados, se produce un desbalance de corriente apreciablemente mayor. Las corrientes de secuencia negativa reducen el torque neto del motor y aumenta la disipación de potencia en forma de calor.

Dependiendo, si los voltajes desbalanceados aplicados al motor son en dos o tres fases, se tiene un calentamiento desigual en los bobinados del estator. Experiencias sobre este tema indican, que un desbalance de voltaje bajo el 5% puede ser tolerado, si se tiene un factor de servicio del 115% dado por el fabricante. Cuando voltajes des-

balanceados son presentados y no pueden ser evitados, la capacidad nominal del motor debe ser reducida, en caso contrario, unas cuantas alternativas pueden cambiar las condiciones de funcionamiento del sistema. Otra alternativa en el uso de un motor con potencia superior.

El uso de ecuaciones matriciales para voltaje desbalanceado como se presenta en esta tesis, debería ayudar en la determinación de efectos del voltaje desbalanceado en 4-conductores (tres fases y neutro), con el secundario en delta o delta-abierto, incluyendo motores de inducción. En el presente trabajo se simplifica grandemente al considerar sólo tres conductores (tres fases) y no el neutro (cargas monofásicas balanceadas). La inquietud persiste en poder analizar sistemas de distribución delta-abierto con 4-conductores, y además para varias cargas monofásicas y trifásicas.

Las condiciones de calentamiento y desbalance de voltaje en un motor, no permiten una solución fácil. La simulación en el computador es, quizá, el mejor acercamiento y con suficiente rapidez en la resolución de este tipo de problemas. Un programa tal, como el presentado en esta tesis, podría ser útil en los campos de aplicaciones e investigaciones.

MANUAL DE USO DEL PROGRAMA

La codificación del programa digital fue realizada lo más simplificada posible, y además para un corto tiempo de ejecución del programa. El lenguaje utilizado en el computador es "Fortran IV", y el tiempo utilizado en la resolución de un problema, corresponde de 60 a 70 segundos como máximo. Consta de un programa principal y de dos subrutinas.

1) Programa principal

El programa principal lee los datos del sistema, luego ejecuta el procedimiento explicado en 3.1, tanto para el calentamiento del motor como para la reducción de la capacidad nominal, finalmente presenta resultados de las condiciones prioritarias (HP nominales) y de la capacidad reducida del motor.

Para el ajuste de ecuaciones a valores especificados o requeridos se ha usado pequeñas tolerancias de error. El ajuste de la impedancia monofásica tiene un error $\epsilon_i \leq 0.001$ con un máximo de 10 iteraciones ($M \leq 10$),

pasado este número de iteraciones, la ejecución del programa es interrumpido. El ajuste del deslizamiento tiene un error $\epsilon_1 \leq 0.1$ con un máximo número de 12 iteraciones ($L \leq 12$), pasado este número de iteraciones, la ejecución del programa es interrumpido. Para la obtención de los HP-reducidos, también se utiliza en el ajuste un error ϵ_2 y un contador L.

Entre más pequeña es la carga monofásica (relativamente), más será el número de iteraciones utilizadas en el ajuste. Por lo tanto resulta imposible resolver el sistema para carga monofásica cero.

El ajuste de los HP reducidos es un proceso lento al final, por esta razón se usa un error no tan pequeño ($\epsilon_2 \leq 0.1$). Los límites de reducción de la capacidad nominal es un proceso que el distanciamiento entre estos límites, se va haciendo más grande conforme aumenta el porcentaje de voltaje desbalanceado. Puede darse el caso que no exista HP reducidos para el método optimista porque, el límite ha sobrepasado los HP nominales, en tal circunstancia, aparece en los resultados (no hay HP reducidos, método optimista), luego sigue el ajuste para los HP reducidos (método pesimista). El nombre optimista o pesimista, se refiere a condiciones de desbalance extremas, consideradas

en el modelo digital.

2) Subrutinas

Las subrutinas son utilizadas más de una vez en la ejecución del programa. La subrutina ABC es utilizada en la resolución de ecuaciones matriciales, sirve para multiplicar matrices.

$$\begin{bmatrix} 2 \times 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \times 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \times 1 \end{bmatrix}$$

La subrutina ASREV sirve para invertir matrices de $\begin{bmatrix} 2 \times 2 \end{bmatrix}$.

3) Alcance

El modelo digital ejecuta primero condiciones prioritarias para ello la potencia mecánica interna (P), ajusta a los HP nominales del motor. En esta forma escribe los primeros resultados correspondientes a condiciones prioritarias del sistema. Luego la potencia mecánica interna del motor es reducida, hasta que la disipación de potencia en los bobinados no excedan condiciones nominales, primero ajusta el método optimista (por ser el valor más

cercano), y después el método pesimista. Los resultados de la reducción de la capacidad nominal son presentados posteriormente.

4) Lectura de datos

Todos los datos son leídos en forma real y con formato F8.4, existen datos en forma compleja, tanto la parte real como la imaginaria cada una es codificada con formato F8.4. Detalles sobre la codificación de cada dato es realizada a continuación:

Los datos de placa necesarios son:

HP = Potencia nominal del motor en HP.

FREC = Frecuencia del sistema en Hz.

POLOS= Número de polos del motor.

NR = Velocidad del rotor en r.p.m.

IPCL = Corriente nominal del motor (de línea) en Amp.

V = Voltaje de placa del motor (de línea) en Volt.

KVA = Potencia de la carga monofásica en KVA.

FP = Factor de potencia de la carga monofásica.

VTERN= Voltaje a los terminales del banco delta-abierto
en Volt.

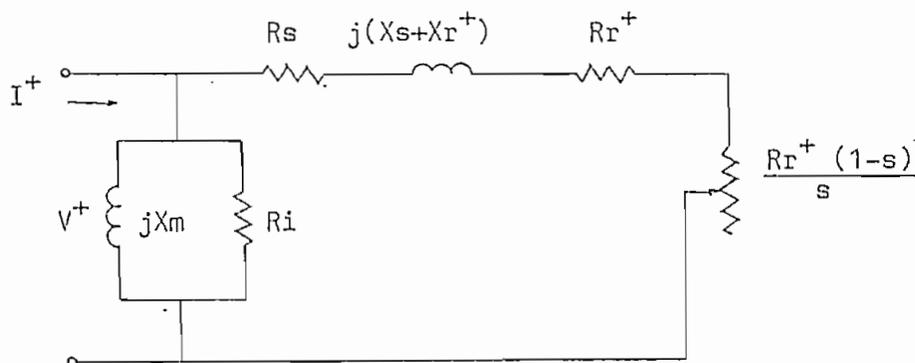
- Z_L = Impedancia de las líneas de distribución (parte real y parte imaginaria), en ohm por fase.
 Z_C = Impedancia de los cables que alimentan al motor (parte real y parte imaginaria), en ohm por fase.
 Z_1 = Impedancia del transformador que sirve al motor (parte real y parte imaginaria), en ohm por fase.
 Z_2 = Impedancia del transformador que sirve a la carga monofásica y al motor (parte real y parte imaginaria), en ohm por fase.
 $OPER$ = Índice "a", para conexión adelantada o atrasada del sistema (parte real y parte imaginaria).

El índice "a" es igual a $1 \angle 120^\circ$

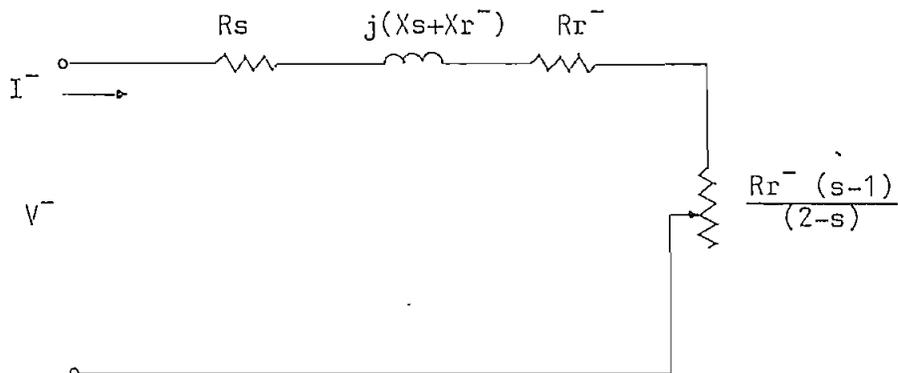
Para conexión adelantada $a = -0.5 - j 0.866$

Para conexión atrasada $a = -0.5 + j 0.866$

Parámetros del motor:



Modelo de secuencia positiva para una fase del motor de inducción.



Modelo de secuencia negativa para una fase del motor de inducción.

Todos los parámetros del motor son dados para ser leídos en ohmios por fase y son los siguientes de acuerdo al modelo de secuencias:

- RS = Resistencia del estator.
- RI = Resistencia debida a pérdidas en el núcleo.
- RRP = Resistencia del rotor secuencia positiva.
- RRN = Resistencia del rotor secuencia negativa.
- XM = Reactancia de magnetización.
- XS = Reactancia de dispersión del estator.
- XRP = Reactancia de dispersión del rotor, secuencia positiva.
- XRN = Reactancia de dispersión del rotor, secuencia negativa.

Los datos son perforados en cinco tarjetas, con formato F8.4 y la forma de codificación es presentada a continuación.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE

DEPARTAMENTO DE _____

PROGRAMADO POR _____

VERIFICADO POR _____

PAGINA

FECHA

CODIFICACION

PROGRAMA

1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67																																									
5) CODIFICACION DE DATOS																																																																																																										
1. Constantes del motor: (2 tarjetas)																																																																																																										
HP					FREC					POLOS					NR					IPCL					V																																																																																	
RS					RI					RRP					RRN					XM					XS					XRP					XRN																																																																							
2. Constantes de la carga monofásica: (1 tarjeta)																																																																																																										
KVA					FP					VTERM																																																																																																
3. Constantes de líneas, cables y transformadores: (1 tarjeta)																																																																																																										
ZL					ZC					Z1					Z2																																																																																											
real					imaginario					real					imaginario					real					imaginario					real					imaginario																																																																							
4. Indice "a", para conexión adelantada o atrasada: (1 tarjeta)																																																																																																										
OPER																																																																																																										
real					imaginario																																																																																																					

6) Resultados

Antes de empezar la ejecución del programa, el programa escribe los datos del sistema. Después se tiene resultados para condiciones prioritarias (motor a potencia nominal), la forma de presentación y ejecución son los siguientes:

- Voltajes a los terminales del motor $|V_{ab}|$, $|V_{bc}|$, $|V_{ca}|$, en voltios (según el modelo del sistema de distribución.
- Corrientes en las líneas $|I_1|$, $|I_1 + I_3|$, $|I_3|$, en Amp. (según el modelo del sistema de distribución.
- Voltaje de desbalanceado en el motor, en %.
- Disipación de potencia en los devanados del estator, para ambas condiciones de desbalance (met. optimista y pesimista), en watios.
- Temperatura en el motor, sobre 40°C de temperatura ambiente, la temperatura nominal es 120°C , los resultados son dados en grados centígrados.
- Como dato adicional se da la disipación nominal de los devanados del estator, que

es calculada inicial en el programa, es dada en watios.

En una segunda parte se obtiene la reducción de la capacidad nominal necesaria del motor, para prevenir fallas del aislamiento en el estator:

- HP reducidos por el método optimista.
- HP reducidos por el método pesimista.

LISTADO DEL PROGRAMA

C ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - FACULTAD DE ING. ELECTRICA, ESP. POTENCIA,
 C TESIS DE GRADO REALIZADA POR: VICENTE RICO CORCEVA,
 C TÍTULO: ANALISIS DE LA OPERACION DE UN MOTOR TRIFASICO DE INDUCCION EN
 C SISTEMAS DE DISTRIBUCION RURAL DELTA-ADIENTO-

```
0001 COMPLEX IS(2,1),ZS(2,2),A(2,2),ZCIRC(2,3),VCLT(2,1),W(3,2),IT2(3,1)
0002 COMPLEX ZL,ZC,Z1,Z2,COPER,COPER,VAB,VBC,Z,ZPCS,ZNEG,ZMCONF
0003 COMPLEX ZXH(2,2),AXZXW(2,2),MAT(2,2),MATINV(2,2),DETERM
0004 COMPLEX MATI(2,1),H(2,1),P(2,1),C(2,1)
0005 COMPLEX AINV(2,2),I(2,1),VT(2,1),VMONOF,ZNEVA,IRF,IRN
0006 COMPLEX WZIS(3,1),C(3,1),VCA
0007 REAL IPCL,KVA,RR,NS,ISOPT,ISPES
0008 REAL IA,IO,IC
```

C LECTURA DE LAS CONSTANTES DEL MOTOR
 READ(1,10)HP,FREC,PCLOS,RR,IPCL,V

```
0009 10 FORMAT(4F8.4)
0010 READ(1,20)NS, RI,RRP,RRN, XN, XS, XRP, XRN
0011 20 FORMAT(8F8.4)
0012
```

C LECTURA DE LAS CONSTANTES DE LA CARGA MONOFASICA

```
0013 READ(1,30)KVA,FP,VTERRN
0014 30 FORMAT(3F8.4)
```

C LECTURA DE LAS CONSTANTES DE LINEAS, CABLES Y TRANSFORMADORES

```
0015 READ(1,40)ZL,ZC,Z1,Z2
0016 40 FORMAT(8F8.4)
```

C LECTURA DEL OPERADOR A, PARA CONEXION ADELANTADA C ATASACA

```
0017 READ(1,50)OPER
0018 WRITE(3,50)KVA,FP,HP,RS
0019 50 FORMAT(1H,/,/,50X,'DATOS DEL SISTEMA',/,50X,'*****')
0020 '1,/,/,15X,'CARGA TRIFASICA (MOTOR)',/,12X,'DATOS DE PLACA',7X,'C
0021 ONSTANTES (CMS)',14X,'CARGA MONOFASICA',12X,'KVA=',F8.2,5X,'FP=',F
0022 6.4,/,10X,'HP' =',F10.4,7X,'RS' =',F10.4)
0023 WRITE(3,60)FREC,RI,ZL,PCLOS,RRP,RRN,PRN,ZC,IPCL,XN,V,XS,Z1,XRP,XRN,
0024 *Z2
```

60 FORMAT(10X,'FREC(FZ)='F10.4,7X,'RI'='F10.4,15X,'LINEAS
 11.2X,'ZL'='F8.4,2X,'+J',F8.4,/,10X,'PCLOS'='F10.4,7X,'FP'='F
 10.4,/,10X,'RR(RPM)'='F10.4,7X,'RRN'='F10.4,15X,'CABLES
 11.2X,'ZC'='F8.4,2X,'+J',F8.4,/,10X,'IPCL(A)'='F10.4,7X,'XV'='F
 10.4,/,10X,'V(VOLT)'='F10.4,7X,'XS'='F10.4,15X,'TRANSFORMADOR 1
 11.2X,'Z1'='F8.4,2X,'+J',F8.4,/,10X,'XRP'='F10.4,/,10X,'XRN'='F10
 11.4,15X,'TRANSFORMADOR 2'='F8.4,2X,'+J',F8.4,/,10X,'Z2'='F8.4,2X,'+J',F8.4)

```
0022 WRITE(3,70)VTERRN,OPER
0023 70 FORMAT(1/,2X,'VOLTAJE TERMINAL DE LOS TRANSFORMADORES (EN VACIO) =  

  <F8.2,2X,'(VCLT)' =',F2.5X,'OPERADOR A (PARA CONEXION ADELANTADA O A  

  <TRASACA)' =',F8.4,2X,'+J',F8.4)
```

C DETERMINACION DE VAB, VBC, Y DISIPACION DE POTENCIA NOMINAL

```
0024 VAB=VTERNA*(1-C-0.)
0025 COPER=CONJG(CPER)
0026 VBC=VTERN+COPER
0027 PNC4=I(IPCL/1.732)**2)*RS
0028 HPA=HP
```

C VALORES INICIALES PARA DESLIZAMIENTO (S), Y DE LA IMPEDANCIA

```
0029 C MONOFASICA (ZMCONF)
0030 NS=120.0*FREC/PCLOS
0031 S=(NS-RR)/NS
0032 ZNC=CAUS(VAB)*2/(KVA*1000.)
0033 ZMCONF=CMPLX((ZNC*FP),ZNC*(1-0-(FP*2)))/*0.5))
```

C FORMACION DE TODAS LAS MATRICES Y SOLUCION DE IS

```
0034 C MATRIZ A
0035 A(1,1)=(1.0-COPER)/3.
0036 A(1,2)=(OPER-COPER)/3.
0037 A(2,1)=(1.0-COPER)/3.
0038 A(2,2)=(COPER-COPER)/3.
```

C MATRIZ V (VCLT)

```
0039 VCLT(1,1)=VAB
0040 VCLT(2,1)=(C-0.)
```

C LES UN CONTADOR ITERATIVO PARA AJUSTE DEL DESLIZAMIENTO A HP NOMINALES

```
0041 L=C
0042 C MATRIZ ZS
0043 Z=CMPLX(0.,XN)
0044 35 ZPOS=Z+CMPLX((RS+RRP/S),(XS+XRP))/(Z+CMPLX((RS+RRP/S),(XS+XRP)))
0045 ZNEG=CMPLX((RS+RRN/(2.-S)),(XS+XRN))
0046 ZS(1,1)=ZPOS
0047 ZS(1,2)=(0.,0.)
0048 ZS(2,1)=(0.,0.)
0049 ZS(2,2)=ZNEG
```

C LES CONTADOR ITERATIVO PARA AJUSTE DE ZMCONF.

```
0050 M=C
0051 C MATRIZ Z (ZCIRC)
0052 ZS(1,1)=Z1-Z2-Z0*ZL-Z0*ZC
```

05

B I B L I O G R A F I A

1. S. C. SEEMATTER and E. F. RICHARDS, "Computer analysis of 3-phase induction motor operation on rural open-delta distribution systems". IEEE Trans. on industry applications, vol. IA-12, September/October 1976, pp. 479-485.
2. A.S. ANDERSON and R.C. RUETE, "Voltage unbalance in delta secondaries serving single-phase and 3-phase loads", AIEE Trans., vol. 73, pt. IIA, August, 1954, pp. 928-932.
3. H.M. BANKUS and J.E. GERNGROSS. "Unbalanced loading and voltage unbalance on 3-phase distribution transformer banks", AIEE. Trans., vol. 73, pt. IIIA, April, 1954, pp. 367-376.
4. H.M. BANKUS and J.E. GERNGROSS, "Combined single-phase and 3-phase loading of open-delta transformer banks", AIEE Trans., vol. 76, pt. III, February, 1958, pp. 1337-1343.

5. B.N. GAFFORD, W.C. DUESTERHOEFT, and C.C. MOSHER, "Heating of induction motors on unbalanced voltages", AIEE Trans., vol. 78, pt. IIIA, June, 1959, pp. 282-288.
6. ALEXANDER S. LANGSDORF, "Teoría de las máquinas de corriente alterna", 2da. Ed., pp. 376.
7. M.M. BERNDT and N.L. SCHMITZ, "Derating of poly-phase induction motors operated with unbalanced line voltages", AIEE Trans., vol. 78, pt. IIIA, February, 1963, pp. 680-685.
8. R.N. RAO and P.A. RAO, "Derating factors of polyphase induction motors under unbalanced line voltage conditions", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-87, January 1968, pp. 240-248.
9. J.E. WILLIAMS, "Operation of 3-phase induction motors on unbalanced Voltages", AIEE Trans. vol. 73, April, 1954, pp. 125-133.
10. P.L. ALGER, "The Nature of Induction Machines". New York: Gordon and Breach, Science Publications, Inc., 1965.