

621.3134
P893

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LOS MOTORES SINCRONICOS DE LA
CEMENTO NACIONAL CA

TESIS DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
GUAYAQUIL - ECUADOR

La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis corresponden exclusivamente al autor.

(Art. Sexto del Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la Escuela Superior Politécnica del Litoral).

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Juan Francisco del Pozo Lemos', written over a horizontal dotted line.

Juan Francisco del Pozo Lemos

AUTOR *Juan Francisco del Pozo Lemos*
.....

Juan Francisco del Pozo Lemos

DIRECTOR DE TESIS *Ricardo Delfini M.*
.....

Ing. Ricardo Delfini M.

PROFESOR

PROFESOR

A MIS PADRES Y MAESTROS

INDICE

INTRODUCCION	iiii
I.- EL PROBLEMA	
A.- DESCRIPCION DEL SISTEMA	1
a.- Estado del sistema actual	1
1.- Generación	1
2.- Subestaciones	1
3.- Líneas	1
4.- Motores sincrónicos	2
b.- Aprovechamiento del sistema actual	2
c.- Mejoras en el sistema actual para su mejor aprovechamiento	2
B.- CALCULO DE LAS CONSTANTES DEL SISTEMA	
a.- Generador equivalente	3
b.- Reactancias de las líneas	5
c.- Reactancias de las subestaciones	9
d.- Motor síncrono equivalente	11
e.- Constantes de inercia	11
f.- Cargas del sistema para mínima generación	16
C.- VOLTAJES TRANSIENTES Y DESPLAZAMIENTO ANGULAR	19
D.- ECUACIONES POTENCIA - ANGULO; ANTES, DURANTE Y DESPUES DE LA FALLA	21
E.- DESPLAZAMIENTO ANGULAR CRITICO	36
F.- TIEMPO CRITICO DE DESPEJE	37
II.- POSIBLES SOLUCIONES	
A.- ANALISIS DE LOS SISTEMAS	39

B. - INTERRUPTORES DE POTENCIA	39
C. - TIEMPO DE DESPEJE	40
III. - CONCLUSIONES	41
BIBLIOGRAFIA	42
FIGURAS	43

INTRODUCCION

He escogido, para esta tesis de grado, el tema "Estudio de estabilidad de los motores sincrónicos de La Cemento Nacional C.A." debido a que en el momento actual, el sistema de interconexión entre la Empresa Eléctrica Inc. y la planta industrial de la mencionada fábrica, no está construido de acuerdo a un diseño basado en el problema de estabilidad.

Este tipo de estudio se fundamenta en que en todo sistema de interconexión de máquinas sincrónicas debe ser programada de acuerdo a la estabilidad.

Las finalidades de este estudio pueden resumirse en dos puntos principales:

- A.- Encontrar los límites de estabilidad para las diferentes perturbaciones que puedan presentarse en el sistema.
- B.- Mejorar el sistema actual con miras a obtener continuidad automatizada en el servicio, en todos los casos en que las perturbaciones que se produzcan en él puedan ser despejadas dentro de los límites de estabilidad.

I.- EL PROBLEMA

A.- DESCRIPCION DEL SISTEMA

a.- Estado del sistema actual

1.- Generación

La fuente generadora en el sistema a tratarse es la Planta Eléctrica de Guayaquil, la misma que se encuentra formada por doce generadores impulsados por motores diesel, cuatro generadores impulsados por turbinas de vapor y un generador impulsado por turbina a gas. Los voltajes de generación son de 4.16 KV. y 13.8 KV., existiendo una subestación interna para su interconexión.

2.- Subestaciones

En el sistema se han considerado tres subestaciones:

Subestación de la Planta.- Esta subestación está constituida por un transformador trifásico elevador de 13.2 KV. a 67 KV. y su capacidad es de 15 MVA.

Subestación Los Ceibos.- Esta subestación esta formada por un transformador trifásico de bajada de 67 KV. a 13.2 KV. y su capacidad es de 12 MVA.

Subestación San Eduardo.- En esta subestación se encuentran tres transformadores trifásicos de bajada de 13.2 KV a 4.16 KV., siendo su capacidad 6.75 MVA.

3.- Líneas

El sistema está formado por las líneas que van desde la Planta de Guayaquil a la subestación San Eduardo. Una de ellas, llega

directamente y se la conoce con el nombre de alimentadora Portete con un voltaje de 13.8 KV. La otra línea, parte desde la subestación de la Planta a un voltaje de 69 KV. y llega a la subestación Los Ceibos, luego continua con un voltaje de 13.8 KV. hasta llegar a la subestación de San Eduardo (este tramo eg, fig. N° 2, está diseñado para una tensión de 69 KV., es decir formará parte del Anillo de 69 KV.)

4.- Motores sincrónicos

La capacidad de la fábrica "La Cemento Nacional C.A." es de 6 MW. en la cual tienen papel importante los motores sincrónicos utilizados para impulsar los molinos. Estos motores son en número de tres, dos de ellos de 900 HP. y uno de 450 HP.

b.- Aprovechamiento del sistema actual

En un comienzo, la alimentación de energía eléctrica a la fábrica "La Cemento Nacional C.A." se hacía simplemente a través de la alimentadora Portete. Con el desarrollo de los proyectos de la Empresa Eléctrica se hizo posible, mediante la parte ya construida del Anillo de 69KV., llegar a la mencionada fábrica por otro camino. En la actualidad, se usa una alimentadora mientras que la otra queda emergente. Fig. N° 1.

c.- Mejoras en el sistema actual para su mejor aprovechamiento

La parte fundamental del proyecto es unir las dos alimentadoras en la recepción. De esta manera, se obtiene un servicio más continuo ya que se puede seccionalizar cualquier falla por corto circuito que

ocurriera en las líneas. Esta seccionalización se la haría mediante interruptores de potencia al principio y al final de las alimentadoras. Fig. N° 2. El tiempo a que operan estos interruptores cuando sucede una falla, juega papel importante pues este, determina las condiciones de estabilidad o inestabilidad del sistema.

B.- CALCULO DE LAS CONSTANTES DEL SISTEMA

a.- Generador equivalente (1)

Planta Diesel		4.16 KV _B		12.5 MVA _B	
Generador	MVA.	KV.	X _{d'} pu.	X ₂ pu.	X ₀ pu.
1	0.324	4.16	12.71	8.10	2.32
2	0.324	4.16	12.71	8.10	2.32
3	0.438	4.16	9.42	6.85	2.57
4	1.25	4.16	3.00	1.55	1.50
5	1.875	4.16	1.80	1.47	0.334
6	1.25	4.16	3.00	1.55	1.50
7	2.625	4.16	1.33	0.86	0.095
8	2.625	4.16	1.33	0.86	0.095
9	1.00	4.16	4.38	3.38	2.00
10	1.875	4.16	1.80	1.47	0.334
11	1.875	4.16	1.80	1.47	0.334
12	1.25	4.16	3.00	1.55	1.50
Reactores	X _Ω	X _B	X _{pu.}		
Interconexión plantas.	0.10	1.38	0.0725		

Continuación:

Reactores	X_{Ω}	X_B	$X_{pu.}$
Gens. N° 5-10-11	0.13	1.38	0.456

Planta a Vapor 4.16-13.8 KV _B 12.5 MVA _B					
Generador	MVA.	KV.	$X_{d'}_{pu.}$	$X_{2pu.}$	$X_o_{pu.}$
1	6.25	4.16	0.26	0.20	0.10
2	6.25	13.8	0.26	0.20	0.10
3	12.5	13.8	0.17	0.11	0.05
4	12.5	13.8	0.17	0.11	0.05
A gas	16.0	13.8	0.125	0.086	0.43

Reactores	X_{Ω}	X_B	$X_{pu.}$
Gen. 1	0.0418	1.38	0.030
Gen. 2	0.5290	15.2	0.035
Gen. 3	0.3060	15.2	0.020
Gen. 4	0.3060	15.2	0.020
Gen. a gas	0.1900	15.2	0.0125

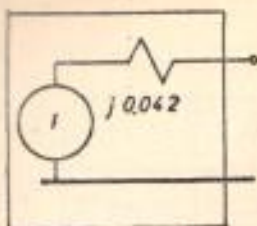
Subestación de 4.16 KV. a 13.8 KV. con una capacidad de 7.5 MVA.

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.0566 \frac{12.5}{7.5} = 0.095 \text{ pu.}$$

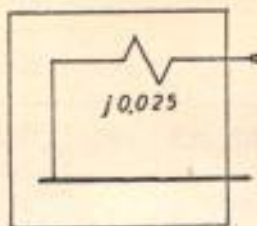
El cálculo del generador equivalente se lo realiza por medio del teorema de Thevenin. En la generación se presentan dos condiciones: - máxima y mínima generación. En máxima generación se encuentran - todos los generadores en línea mientras que en mínima generación solo se encuentran en línea los generadores N°s. 2, 3, 4 de la Planta a

Vapor.

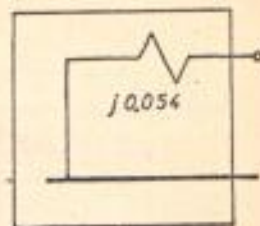
Máxima generación:



Sec. positiva

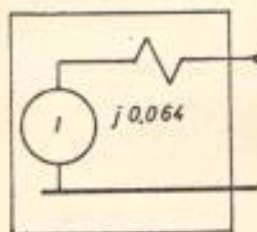


Sec. negativa

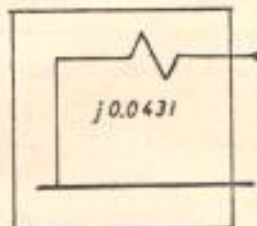


Sec. cero

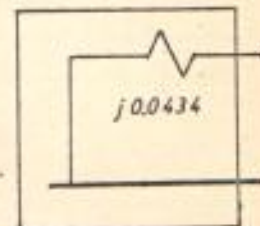
Mínima generación:



Sec. positiva



Sec. negativa



Sec. cero

b.- Reactancias de las líneas

X

1.- Alimentadora Portete

Esta alimentadora, tramo ab fig. N° 1, está dividida en tres partes:

Primera parte.-

Conductor de aluminio: 336.4 MCM - 19 hilos

Longitud: 1.305 Millas

Espaciamiento horizontal: 29" entre líneas adyacentes

Segunda parte.-

Conductor de cobre: 4/0 AWG - 19 hilos

Longitud: 0.745 Millas

Espaciamiento horizontal: 29" entre líneas adyacentes

Tercera parte.-

Conductor de cobre: 4/0 AWG - 19 hilos

Longitud: 2.15 Millas

Espaciamiento triangular: 34.2"-58"-34.2"

	L Mill.	D _{eq} pies	R _Ω /Mill.	X _Ω /Mill.	X.L
1º parte	1.305	3.05	0.307	0.604	0.788
2º parte	0.745	3.05	0.303	0.632	0.471
3º parte	2.150	3.40	0.303	0.645	1.387

Reactancia positiva y negativa del tramo ab. 2.646

$$X_1 = X_2 = 2.646 \frac{12.5}{(13.8)^2} = 0.174 \text{ pu.}$$

La reactancia de secuencia cero de la línea se la calcula de acuerdo a la fórmula de Carson. La línea no tiene alambre de tierra.

$$Z_0 = 3 \left(\frac{R_a}{3} + 1.588 f 10^{-3} + j 4.657 f 10^{-3} \log \frac{D_e^2}{D_{aa}} \right) \quad (2a)$$

Z₀ - Impedancia de secuencia cero de una línea sin conductor de tierra por milla.

R_a - Resistencia en ohmios de un conductor de la línea por milla.

f - Frecuencia en ciclos.

D_e - Distancia desde el conductor equivalente a otro conductor ficticio que tiene un radio geométrico propio de un pie.

D_{aa} - Radio geométrico propio de los tres conductores de línea.

Se toma una resistividad del terreno de: 300 ohmios/mt.³ (1)

$$\text{Por lo tanto: } D_e^2 = 2.160 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 4.840 \text{ pie.} \quad (2a)$$

ρ - Resistividad del terreno en ohmios / mt.³.

De esta manera la reactancia de secuencia cero será:

	r' pies	Deq ² pies	Da _a = $\sqrt[3]{r' \text{Deq}^2}$	L 0.838 log. $\frac{De^2}{Da}$
1º parte	0.0210 (4)	9.30	0.580	3.385 1.305
2º parte	0.0167	9.30	0.538	3.310 0.745
3º parte	0.0167	11.5	0.578	3.390 2.150

Reactancia cero del tramo ab. 14.10

$$X_0 = 14.10 \frac{12.5}{(13.8)^2} = 0.927 \text{ pu.}$$

2.- Alimentadora a 69 KV.

✕ Esta alimentadora, tramo cd fig. N°1, va desde la subestación de la Planta hasta la subestación Los Ceibos.

Conductor ACSR: 336.4 MCM - 18/1 hilos

Longitud: 6.32 Millas

Espaciamiento vertical: 6' entre líneas adyacentes

Alambre de tierra: hierro galvanizado de 1/4" ✕

Reactancia de secuencia positiva y negativa (1).

$$X_1 = X_2 = 6.32 \cdot 0.705 \frac{12.5}{(13.8)^2} = 0.0113 \text{ pu.}$$

Reactancia de secuencia cero .

$$X_0 = 6.32 \cdot 3.04 \frac{12.5}{(13.8)^2} = 0.049 \text{ pu.}$$

Este cálculo está basado en el método desarrollado por E. Clarke en el que la reactancia de secuencia cero con alambre de tierra,

es: $X_{00-w} = X_{00} + K \Delta X$ ver fig. N°3 (3)

X_{00} - Reactancia de secuencia cero sin alambre de tierra.

ΔX - Incremento en la reactancia de secuencia cero debido al alambre de tierra.

K - Factor de multiplicación debido a la resistividad del terreno.

3.- Alimentadora o tramo eg

Esta línea, fig. N° 1, está formada por dos partes:

Primera parte, tramo ef.- Este tramo está diseñado para una tensión de 69 KV., pero en la actualidad está trabajando con una tensión de 13.8 KV.

Conductor ACSR: 336.4 MCM - 18/1 hilos

Longitud: 2.1 Millas

Espaciamiento vertical: 6' entre líneas adyacentes

* Alambre de tierra: hierro galvanizado de 1/4"

Reactancia de secuencia positiva y negativa (1).

$$X_1 = X_2 = 2.10 \cdot 0.705 \frac{12.5}{(13.8)^2} = 0.0974 \text{ pu.}$$

Reactancia de secuencia cero.

$$X_0 = 2.10 \cdot 3.04 \frac{12.5}{(13.8)^2} = 0.42 \text{ pu.}$$

Segunda parte, tramo fg.-

Conductor de aluminio: 336.4 MCM - 19 hilos

Longitud: 1.12 Millas

Espaciamiento triangular: 34.2"-58"-34.2"

	L Mill.	Deq pies	R _a /Mill.	X _a /Mill.	X.L
fg	1.12	3.40	0.307	0.617	0.691

Reactancia positiva y negativa del tramo fg. 0.691

$$X_1 = X_2 = 0.617 \frac{12.5}{(13.8)^2} = 0.0455 \text{ pu.}$$

Reactancia de secuencia cero. De acuerdo a la fórmula de Carson, se tiene:

	r' pies	Deq^2 pies	$Daa = \sqrt[3]{r' Deq^2}$	$L 0.838 \log. \frac{De^2}{Daa}$
fg	0.021	11.5	0.623	3.24 1.12

Reactancia cero del tramo fg.

3.63

$$X_0 = 3.63 \frac{12.5}{(13.8)^2} = 0.239 \text{ pu.}$$

c. - Reactancias de las subestaciones

1. - Subestación de la Planta

Transformador trifásico elevador

Capacidad: 15 MVA.

Relación de tensiones: 13.2 KV. a 67 KV.

Conexión: Delta - Estrella

*

Reactancia de secuencia positiva y negativa.

$$X_1 = X_2 = 0.0748 \frac{(13.2)^2}{(13.8)^2} \frac{12.5}{15} = 0.0567 \text{ pu.}$$

Reactancia de secuencia cero.

$$X_0 = 0.0644 \frac{(13.2)^2}{(13.8)^2} \frac{12.5}{15} = 0.0487 \text{ pu.}$$

2. - Subestación Los Ceibos

✓ Transformador trifásico de bajada

Capacidad: 12 MVA.

Relación de tensiones: 67 KV. a 13.2 KV.

*

Conexión: Delta - Estrella

Reactancia de secuencia positiva y negativa.

$$X_1 = X_2 = 0.0703 \frac{(13.2)^2}{(13.8)^2} \frac{12.5}{12} = 0.067 \text{ pu.}$$

Reactancia de secuencia cero.

$$X_0 = 0.0715 \frac{(13.2)^2}{(13.8)^2} \frac{12.5}{12} = 0.0681 \text{ pu.}$$



3.- Subestación San Eduardo

Esta subestación está formada por tres transformadores trifásicos de bajada.

Transformador N° 1

Capacidad: 1.5 MVA.

Relación de tensiones: 13.2 KV. a 4.16 KV.

Conexión: Estrella - Estrella



Reactancia de secuencia positiva, negativa y cero.

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.057 \frac{(13.2)^2}{(13.8)^2} \frac{12.5}{1.5} = 0.435 \text{ pu.}$$

Transformador N° 2

Capacidad: 1.5 MVA.

* Relación de tensiones: 13.2 KV. a 4.16 KV.

Conexión: Estrella - Estrella

N2 {

Reactancia de secuencia positiva, negativa y cero.

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.0558 \frac{(13.2)^2}{(13.8)^2} \frac{12.5}{1.5} = 0.425 \text{ pu.}$$

Transformador N° 3

Capacidad: 3.75 MVA.

Relación de tensiones: 13.2 KV. a 4.16 KV.

Conexión: Estrella - Estrella

Reactancia de secuencia positiva, negativa y cero.

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.055 \frac{(13.2)^2}{(13.8)^2} \frac{12.5}{3.75} = 0.168 \text{ pu.}$$

La reactancia de secuencia positiva, negativa y cero equivalente de esta subestación será:

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.03 \text{ pu.}$$

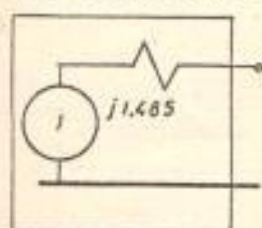
d.- Motor síncrono equivalente

El cálculo de las reactancias de secuencias de los motores síncronos de la fábrica "La Cemento Nacional C.A." es:

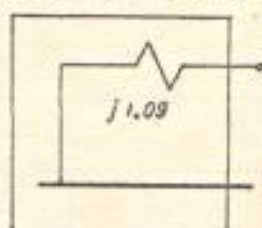
Motor	4.35 KV _B		12.5 MVA _B		
	MVA.	KV.	Xd' pu.	X ₂ pu.	X ₀ pu.
1	0.451	4.16	5.57	4.05	3.54
2	0.886	4.00	4.05	2.98	1.90
3	0.886	4.00	4.05	2.98	1.90

Estos motores están conectados en estrella con neutro flotante.

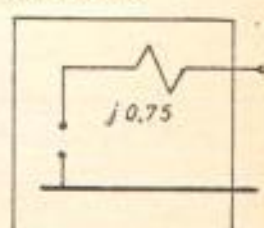
Las reactancias de secuencias del motor equivalente serán:



Sec. positiva



Sec. negativa



Sec. cero

e.- Constantes de inercia

X

Este circuito está compuesto principalmente de dos partes: la generadora y la receptora síncrona. En consecuencia, es necesario calcular ambas constantes de inercia.

Al hacer un análisis de las dos partes, se observa que la receptora sin crónica absorbe una cantidad constante de KW., mientras que la generadora tiene que entregar KW. de acuerdo a las horas de consumo de todo el sistema (ciudad de Guayaquil). Por consiguiente, se operan dos condiciones: máxima y mínima generación.

Para el estudio de estabilidad que se realiza, la condición más crítica

se presenta cuando la parte generadora opera en mínima generación, pues así, se la puede representar con una máquina de menor magnitud y llegar a un mayor grado de comparación y de interacción con la parte receptora sincrónica (sistema de dos máquinas finitas). Por otro lado, con máxima generación, la magnitud de esta máquina comparada con la parte receptora sincrónica es lo suficientemente grande, tanto que se la podría reemplazar con un sistema de Barra Infinita (reactancia interna cero, inercia infinita). Es decir, se constituiría en un sistema de un motor conectado a Barra Infinita.

1.- Constante de inercia del generador equivalente para mínima generación.

Generador	G MVA.	H Mj/MVA	M Mjseg/°E	M pu.
2	6.25	7.1	$41.1 \cdot 10^{-4}$	$3.29 \cdot 10^{-4}$
3	12.5	6.6	$76.4 \cdot 10^{-4}$	$6.11 \cdot 10^{-4}$
4	12.5	6.6	$76.4 \cdot 10^{-4}$	$6.11 \cdot 10^{-4}$

$$M = \frac{G \cdot H}{180 f} = 0.925 \cdot 10^{-4} G H \text{ Mj. seg./}^\circ\text{E} \quad \text{Fig. N}^\circ 4 \text{ (5a)}$$

Constante de inercia.

G - Capacidad de la máquina en MVA.

H - Energía almacenada a velocidad nominal en Mj. dividida por la capacidad de la máquina en MVA.

f - frecuencia en ciclos.

Para representar la constante de inercia (M) en las bases del sistema, se debe dividir ese valor para la potencia base (MVA_B).

La constante de inercia equivalente de las máquinas situadas en

un mismo lugar es igual a la suma de las constantes de inercia independientes expresadas en una misma base.

$$M = M_2 + M_3 + M_4 = 15.51 \cdot 10^{-4} M_j \cdot \text{seg.} / ^\circ E \text{ pu.}$$

Los valores de las constantes H que se han tomado de la fig. N° 4 ya incluyen la turbina con condensación.

2.- Constante de inercia del motor sincrónico equivalente de "La Cemento Nacional C.A."

En esta parte del sistema, los motores sincrónicos son aprovechados para impulsar molinos. Por lo tanto, el momento de inercia total debe ser igual a la suma de los momentos del motor y del molino.

Unidad	G MVA	Motor			Molino	
		H $\frac{M_j}{\text{MVA}}$	n_1	WK ² lb pie ²	n_2	WK ² lb pie ²
1	0.451	2	600	$10.83 \cdot 10^3$	16	$11.73 \cdot 10^5$
2	0.886	2	514	$29.05 \cdot 10^3$	17	$39 \cdot 10^5$
3	0.886	2	514	$29.05 \cdot 10^3$	17	$39 \cdot 10^5$

Este cuadro es el resultado de los siguientes cálculos:

Motores sincrónicos.-

$$WK^2 = \frac{H G 10^{10}}{2.31 n_1^2} \text{ lb.} \cdot \text{pie}^2 \quad (2b)$$

H - Energía almacenada a velocidad nominal en Mj. dividida para la capacidad de la máquina en MVA. Fig. N° 4

G - Capacidad de la máquina en MVA.

n_1 - Revoluciones por minuto del motor.

Molinos.-

En el cálculo del momento de inercia de masa de los molinos se ha usado el método de descomposición, es decir, en diferentes cilindros huecos.

Es momento de inercia de masa para un cilindro hueco es:

$$I_m = \frac{1}{2} M (R^2 + r^2) \quad \text{slug-pie}^2 \quad (8)$$

I_m - Momento de inercia de masa.

M - Masa en slugs.

R, r - Radios, exterior e interior, del cilindro hueco en pies.

$$M = \frac{W}{g} \quad \text{slugs}$$

W - Peso en lbs.

g - Gravedad = 32.2 pies / seg.²

γ - Peso específico = 490 lb./pie³

V - Volumen del cilindro hueco en pies³.

$$W = \gamma V \quad \text{lbs.}$$

$$V = L (R^2 + r^2) \quad \text{pie}^3$$

L - Longitud del cilindro en pies.

Por otro lado:

$$I_m = \frac{W}{g} K^2 \quad \text{slug-pie}^2$$

K^2 - Radio de giro en pies².

$$WK^2 = g I_m \quad \text{lb.-pie}^2$$

Reemplazando todos los valores calculados en I_m , se tiene:

$$WK^2 = \frac{\pi \gamma}{2} L (R^2 + r^2) (R^2 + r^2) \quad \text{lb.-pie}^2$$

Esta expresión puede ser separada en dos partes:

Primera parte. -

$$\frac{\pi \gamma}{2} = 770 \text{ lb./pie}^3$$

Segunda parte.-

$$L (R^2 - r^2) (R^2 + r^2) = C \text{ pie}^5$$

La constante C depende de las dimensiones de cada cilindro hueco en que se ha subdividido cada molino. Por lo tanto, la fórmula final será:

$$WK^2 = 770 \sum_{n=1}^n C_n \text{ lb.-pie}^2$$

Los valores calculados para las constantes C de los molinos son:

Molino N° 1.-

$$C = 1.723,0 \text{ pie}^5$$

Molinos N°s 2 - 3.-

$$C = 5.058,0 \text{ pie}^5$$

La precisión de este método depende de el criterio que se ha tenido para considerar los cilindros seccionales.

El momento de inercia en lb.-pie² equivalente de cada unidad, es decir del motor más el molino, y tomando en cuenta que las velocidades de rotación son distintas en ambas partes:

$$WK^2 = WK_{\text{mot.}}^2 + \left[\frac{n_2}{n_1} \right]^2 WK_{\text{mol.}}^2 \text{ lb.-pie}^2$$

Esta expresión está transferida del lado del motor.

n_1 - Velocidad en revoluciones por minuto del motor.

n_2 - Velocidad en revoluciones por minuto del molino.

Los valores calculados para los momentos de inercia WK^2 para cada unidad son:

Unidad N° 1.-

$$WK^2 = 11.66 \cdot 10^3 \text{ lb.-pie}^2$$

Unidades N°s 2 - 3.-

$$WK^2 = 33.30 \cdot 10^3 \text{ lb.-pie}^2$$

De acuerdo a estos valores de los momentos de inercia, WK^2 , se calcula la expresión para la constante de inercia, M .

$$M = 1.28 \cdot 10^{-12} \frac{n^2}{f} WK^2 \text{ Mj.seg./}^\circ\text{E pu.} \quad (5a)$$

n - Velocidad en revoluciones por minuto. Se toma la velocidad a que ha sido transferido el sistema.

f - frecuencia en ciclos.

Los valores calculados para las constantes de inercia M de cada unidad son:

Unidad N° 1.-

$$M = 0.0717 \cdot 10^{-4} \text{ pu.}$$

Unidades N°s 2 - 3.-

$$M = 0.1505 \cdot 10^{-4} \text{ pu.}$$

El valor de la constante de inercia equivalente de estas unidades es:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 = 0.473 \cdot 10^{-4} \text{ pu.}$$

f_s .- Cargas del sistema para mínima generación

Los cargas del sistema son:

1.- Carga de la ciudad χ

La distribución de la energía eléctrica se la realiza por medio de alimentadoras que parten desde las barras de generación. Las tensiones de estas alimentadoras son: 13.8 KV., barras de la Planta

a Vapor y 4.16 KV., barras de la Planta Diesel.

2.- Carga de la subestación Los Ceibos

✓ La subestación Los Ceibos entrega energía eléctrica a una tensión de 13.8 KV. al sector industrial y al de las ciudadelas de esa zona.

3.- Carga de la subestación San Eduardo

✓ La única carga que recibe esta subestación es la de la fábrica "La Cemento Nacional C.A."

De acuerdo a esta distribución, la carga para mínima generación es:

Carga de la ciudad	8 MW. 90% f.p. ind.
Carga de la subestación Los Ceibos	6 MW. 90% f.p. ind.
Carga de la subestación San Eduardo.....	6 MW. 90% f.p. ind.
	20 MW. 90% f.p. ind.

Esta apreciación de carga está hecha con un criterio de actualidad, - es decir, se ha tomado un pequeño factor de crecimiento de las cargas, en vista de que en un futuro muy próximo el sistema será rediseñado.

La carga de la subestación San Eduardo, fábrica "La Cemento Nacional C.A.", está dividida en dos partes:

Carga asincrónica.- La carga asincrónica está constituida netamente por motores de inducción con un promedio de 70% f.p. ind.

Carga sincrónica.- La carga sincrónica está constituida por tres motores sincrónicos:

Motor N° 1.

Motor sincrónico de 450 HP usado para impulsar un molino de cemento.

Motor N° 2. ✕

Motor sincrónico de 900 HP usado para impulsar un molino de cemento.

Motor N° 3.

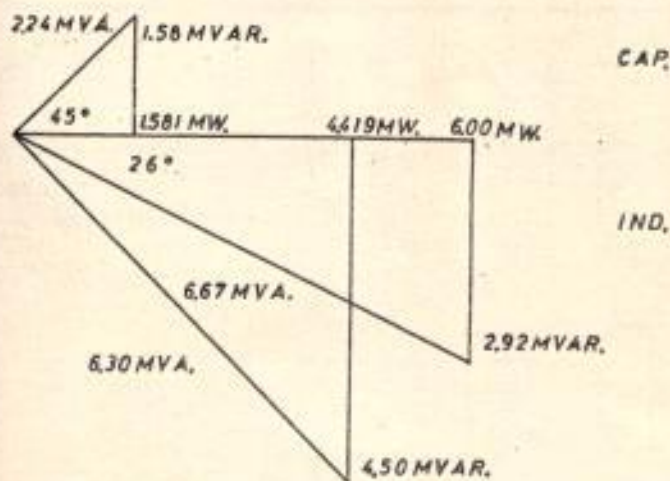
Motor sincrónico de 900 HP usado para impulsar un molino de crudo.

Motor	HP.	MVA.	90% carga MVA.
1	450	0.451	0.305
2	900	0.886	0.638
3	900	0.886	0.638

1,581



Los motores sincrónicos son usados también para corregir el f.p. de la fábrica.

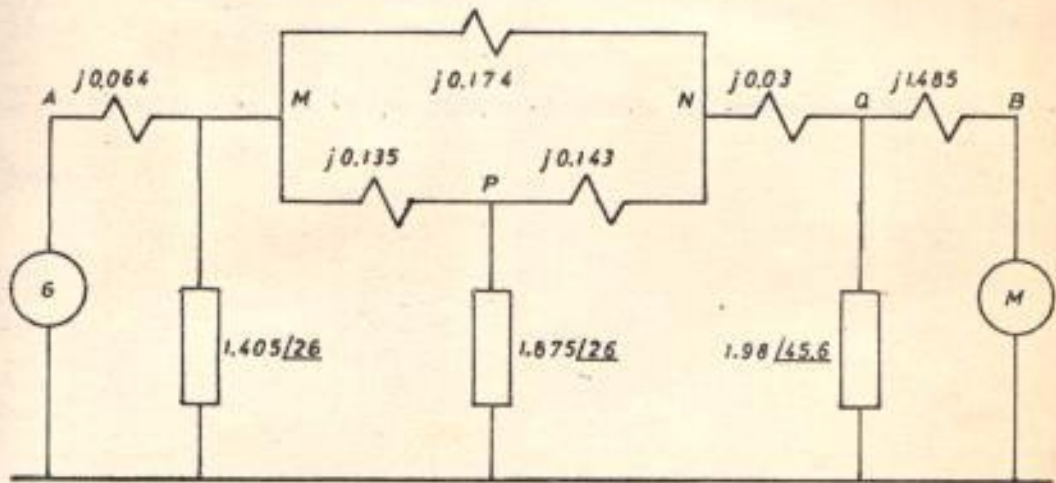


Carga	MVA.	MW.	MVAR.	% f.p.
Asnco.	6.30	4.419	4.50	70 ind.
Snco.	2.24	1.581	1.58	70.7 ind.
Total:	6.67	6.00	2.92	90 ind.

Cuadro de las cargas del sistema para mínima generación:

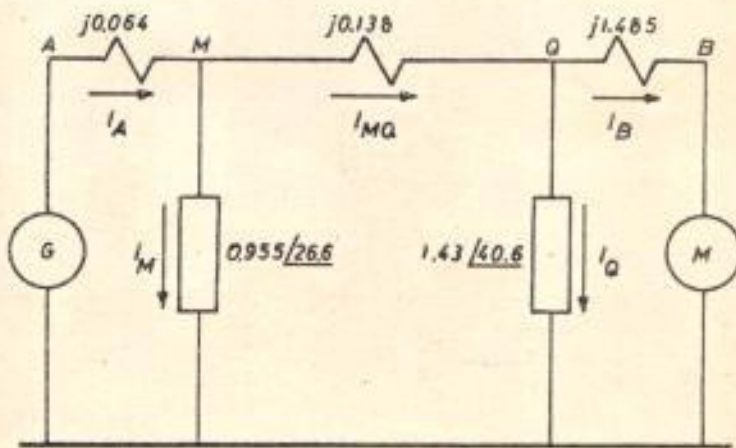
Cargas asnco.	MW.	% f.p.	Z pu.
Ciudad	8.00	90 ind.	$1.265 + j 0.616 = 1.405 / 26$
Los Ceibos	6.00	90 ind.	$1,686 + j 0.822 = 1.875 / 26$
San Eduardo	4.419	70 ind.	$1.386 + j 1.415 = 1.98 / 45.6$

Diagrama unifilar del sistema:



C.- VOLTAJES TRANSIENTES Y DESPLAZAMIENTO ANGULAR

Mediante reducciones en el circuito unifilar anterior, se llega a un circuito más simplificado:



Para resolver el circuito anterior se asume que el voltaje en el punto Q es 1 pu. con un ángulo de referencia de 0° .

El valor de I_B es:

$$I_B = \frac{2.24}{12.5} \angle 45$$

Este valor está calculado a partir de los MVA. sincrónicos, carga, dividido para los MVA_B.

El voltaje contraelectromotriz del motor sincrónico equivalente (M), será:

$$V_Q = -E_B + I_B X_{QB} \quad ; \quad -E_B = V_Q - I_B X_{QB}$$

La reactancia X_{QB} es la reactancia transiente del motor sincrónico equivalente.

$$V_Q = 1 \angle 0 \quad ;$$

$$-E_B = 1.2 \angle -9$$

$$I_Q = \frac{E_Q}{Z_Q} \quad ;$$

$$I_Q = 0.7 \angle -40.6$$

$$I_{MQ} = I_B + I_Q \quad ;$$

$$I_{MQ} = 0.735 \angle -26.55$$

$$E_M = E_Q + I_{MQ} X_{MQ} \quad ;$$

$$E_M = 1.046 \angle 4.97$$

$$I_M = \frac{E_M}{Z_M} \quad ;$$

$$I_M = 1.095 \angle -21.63$$

$$I_A = I_M + I_{MQ} \quad ;$$

$$I_A = 1.82 \angle -23.7$$

$$E_M = E_A - I_A X_{AM} \quad ;$$

La reactancia X_{AM} es la reactancia transiente del generador equivalente.

$$E_A = 1.11 \angle 10.25$$

El ángulo de desviación entre los voltajes E_A y E_B , es:

$$\delta = \delta_A - \delta_B \quad ;$$

$$\delta = 19.25$$

$$P_A = \dot{E}_A I_A \cos. \theta_{AA} \quad ;$$

El ángulo entre E_A e I_A es: θ_{AA} .

$$P_A = 1.68 \text{ pu.}$$

El valor de P_A a partir de las cargas del sistema es:

$$P_A = \frac{20.0}{12.5} = 1.6 \text{ pu.}$$

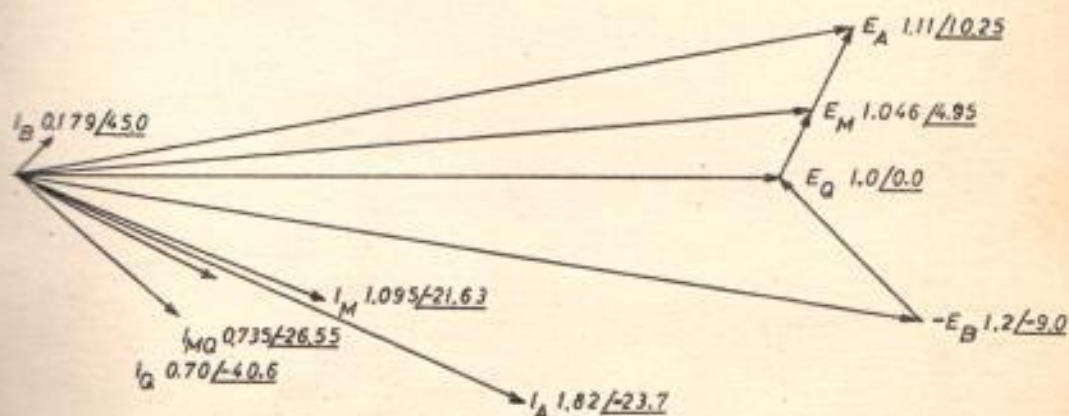
La diferencia entre estas dos cantidades es que al considerar al sistema como un anillo cerrado, las condiciones de tensión mejoran por lo tanto se entregará más potencia para las mismas cargas.

$$- P_B = \dot{E}_B I_B \cos. \theta_{BB} \quad ;$$

El ángulo entre E_B e I_B es: θ_{BB} .

$$- P_B = 0.127 \text{ pu.}$$

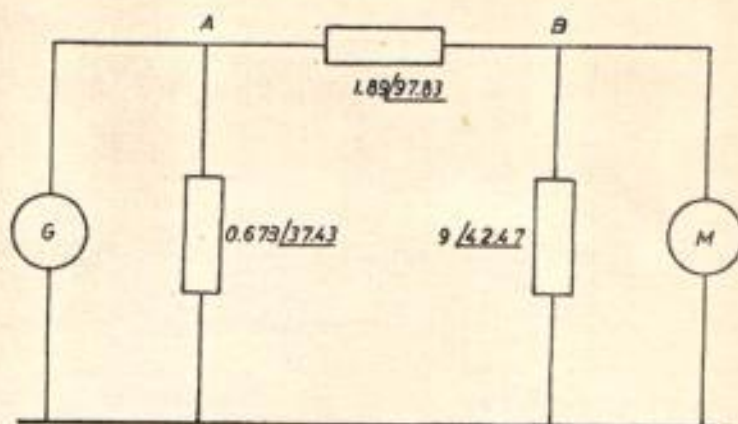
El diagrama vectorial del sistema será:



D.- ECUACIONES POTENCIA - ANGULO; ANTES, DURANTE Y DESPUES DE LA FALLA

a.- Antes de la falla

El circuito correspondiente a las condiciones iniciales, mostrado en el literal anterior (C), se lo reduce a un circuito Π .



Las ecuaciones Potencia-Angulo, son: (5b)

$$P_A = E_A^2 Y_{AA} \cos. \theta_{AA} + E_A E_B Y_{AB} \cos. (\theta_{AB} - \delta_A + \delta_B)$$

$$P_B = E_B^2 Y_{BB} \cos. \theta_{BB} + E_A E_B Y_{AB} \cos. (\theta_{AB} + \delta_A - \delta_B)$$

En donde:

$$Y_{AA} = \frac{Z_{AO} + Z_{AB}}{Z_{AO} Z_{AB}} ;$$

$$Y_{AA} = 1.81 / -52.21$$

$$Y_{BB} = \frac{Z_{BO} + Z_{AB}}{Z_{BO} Z_{AB}} ;$$

$$Y_{BB} = 0.599 / -89.1$$

$$Y_{AB} = - \frac{1}{Z_{AB}} ;$$

$$Y_{AB} = 0.529 / 82.17$$

$$\delta = \delta_A - \delta_B ;$$

$$\delta = 19.25$$

$E_A^2 Y_{AA} \cos. \theta_{AA}$	$E_B^2 Y_{BB} \cos. \theta_{BB}$	$E_A E_B Y_{AB}$	θ_{AB}
1.36	0.0135	0.705	82.17

Reemplazando estos valores en las ecuaciones Potencia-Angulo, se tie

ne:

$$P_A = 1.36 + 0.705 \cos. (82.17 - \delta) ;$$

$$P_A = 1.681 \text{ pu.}$$

$$P_B = 0.0135 + 0.705 \cos. (82.17 + \delta) ;$$

$$P_B = -0.1263 \text{ pu.}$$

Se observa que la diferencia de estos valores con los calculados en el literal anterior (C), son muy pequeños.

El sistema en estudio está formado por dos máquinas finitas. Para resolver lo se lo reemplaza con una máquina finita equivalente conectada a un sistema de barras infinita. (5c)

De esta manera, se tendrá solamente una ecuación Potencia-Angulo.

$$P_U = P_C + P_M \text{ sen.} (\delta - \gamma)$$

En donde:

$$P_C = \frac{M_B E_A Y_{AA} \cos. \theta_{AA} - M_A E_B Y_{BB} \cos. \theta_{BB}}{M_A + M_B}$$

$$P_M = \frac{E_A E_B Y_{AB}}{M_A + M_B} \sqrt{M_A^2 + M_B^2 - 2 M_A M_B \cos. 2\theta}$$

$$\gamma = -\tan^{-1} \left[\frac{M_A + M_B}{M_A - M_B} \tan. \theta_{AB} \right] - 90$$

M_A - Constante de inercia del generador equivalente = $15.51 \cdot 10^{-4} \text{ pu.}$

M_B - Constante de inercia del motor equivalente = $0.473 \cdot 10^{-4} \text{ pu.}$

Reemplazando los valores correspondientes en las expresiones anteriores, se tiene:

$$P_C = 0.0271 \text{ pu.}$$

$$P_M = 0.704 \text{ pu.}$$

$$\gamma = 7.35$$

Por lo tanto:

$$P_U = 0.0271 + 0.704 \text{ sen.} (\delta - 7.35) \quad \text{Fig. N}^\circ 5, \text{curva A}$$

Ecuación potencia-ángulo para operación normal del sistema con doble alimentación.

Para el valor inicial del ángulo de desplazamiento, se tiene:

$$\delta_0 = 19.25 \quad ;$$

$$P_U = 0.172 \text{ pu.}$$

De acuerdo al método usado, la ecuación de penduleo equivalente del sistema de dos máquinas finitas, es:

$$M \delta'' = P_a$$

$$P_a = P_i - P_u$$

En donde:

$$M - \text{Constante de inercia de la máquina equivalente} = \frac{M_A M_B}{M_A + M_B}$$

P_a - Potencia de aceleración

P_i - Potencia mecánica entregada al eje de la máquina equivalente.

P_u - Potencia eléctrica de salida de la máquina equivalente.

En este caso, La ecuación de la máquina equivalente es el de un generador conectado a través de impedancias a un sistema de barras infinita. Esto se debe a que:

$$\delta = \delta_A - \delta_B$$

Por otro lado:

$$P_i = \frac{M_B P_A - M_A P_B}{M_A + M_B} \quad ;$$

$$P_A = 1.68 \text{ pu.}$$

$$P_B = -0.127 \text{ pu.}$$

$$P_i = 0.172 \text{ pu.}$$

Esto significa que en la condición inicial la máquina equivalente per
manece estabilizada, esto es:

$$P_a = 0$$

O lo que es lo mismo:

$$P_i = P_u$$



d.- Durante la falla

Perturbaciones del sistema.- Las perturbaciones en un sistema de in-
terconexión de máquinas síncronas, provocan estados transitorios -
en la potencia de sincronización de estas máquinas, que muchas ve-
ces pueden ocasionar interrupciones permanentes en dicho sistema.

Por esta razón, se trata de seccionalizar estos lugares con la suficiente
rapidez, para que el servicio se mantenga.

El tipo de falla, en un determinado lugar del circuito, señala estados
de mayor o menor fluctuación en el sistema, debido a la magnitud de
la reactancia de falla. Para reactancias de fallas pequeñas, es menor
el intercambio de potencia en el sistema de dos o más máquinas síncró
nicas. Es por esto que las fallas: trifásica, dos líneas a tierra, línea a
línea y línea a tierra están en orden creciente en lo referente al in-
tercambio de potencia. Al analizar un sistema bajo condiciones de -
una determinada falla, se ve que el punto de localización de la mis-
ma, hace variar la reactancia de falla. Las dos condiciones, tipo de
falla y su localización, determinan el estado de estabilidad o inesta-
bilidad del sistema.

Este estudio descarta la posibilidad de falla trifásica debido a que la

probabilidad de ocurrencia es muy remota. Se ha escogido en cambio, la falla dos líneas a tierra (2L-T), en vista de que esta tiene un grado de ocurrencia menor que la falla más común que es de una línea a tierra (L-T). Además, se adquiere un grado de seguridad mayor, ya que se asegura al sistema bajo condiciones más críticas.

Cabe mencionar, que el grado de seguridad con que se diseña un sistema, depende, entre otras cosas, de su importancia y del factor económico.

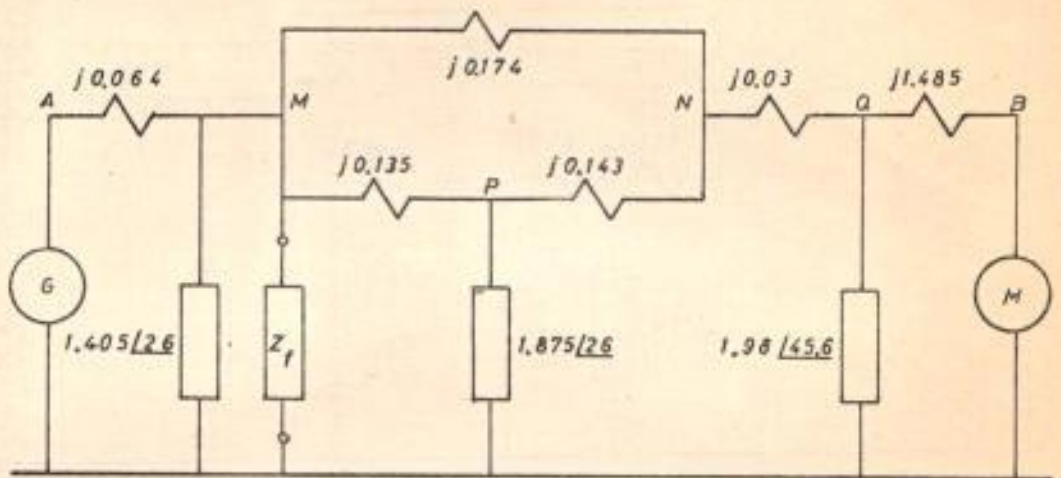
En el sistema mostrado en la fig. N° 2, los lugares más críticos, bajo una misma falla, se encuentran en las alimentadoras hacia los extremos M o N (siendo mayor el primero) pudiendo contarse con el despeje de las fallas por seccionalización de alimentadoras. La única condición imposible para seccionalizar, es bajo fallas en las barras de generación o recepción, para lo cual debe suspenderse el servicio. El único punto a favor de esto es su pequeñísima probabilidad de ocurrencia.

El hecho de contar con doble alimentación a la recepción, proporciona al sistema un mayor grado de seguridad y confiabilidad, pues en este sistema es fácil seccionalizar cualquier tramo bajo falla y mantener el servicio.

Al aumentar el número de alimentadoras en paralelo disminuye la impedancia entre generación y recepción, proporcionando así una mayor amplitud en la curva Potencia-Angulo del sistema y por lo tanto, un mayor máximo en la potencia transmisible.

Análisis del sistema bajo falla del tipo: 2L-T

1.- Falla 2L-T en el punto M



Para falla del tipo 2L-T la impedancia de falla, Z_f , es:

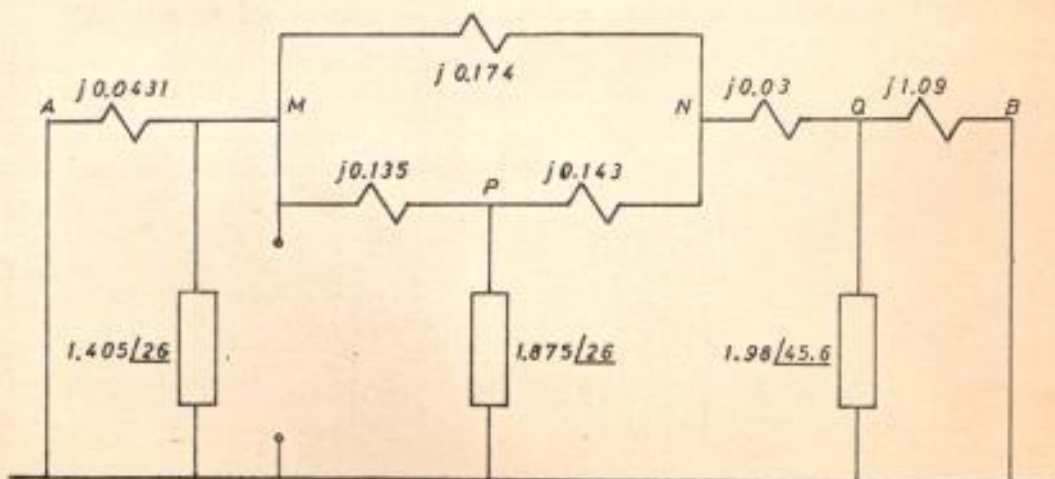
$$Z_f = \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

Z_2 - Impedancia de secuencia negativa del sistema para falla localizada en algún punto del mismo.

Z_0 - Impedancia de secuencia cero del sistema para falla localizada en algún punto del mismo.

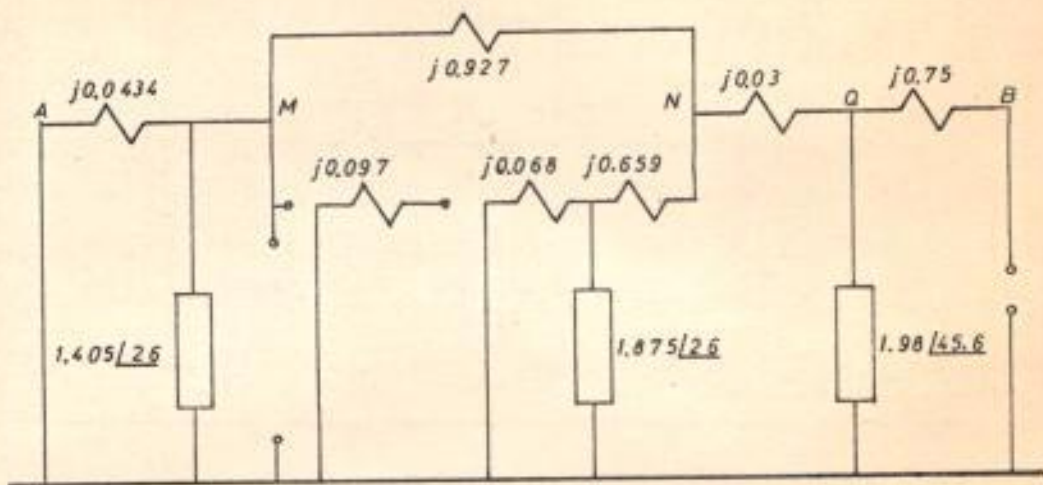
Cálculos de los valores de Z_2 y Z_0 para falla localizada en el punto M:

Impedancia de secuencia negativa.-



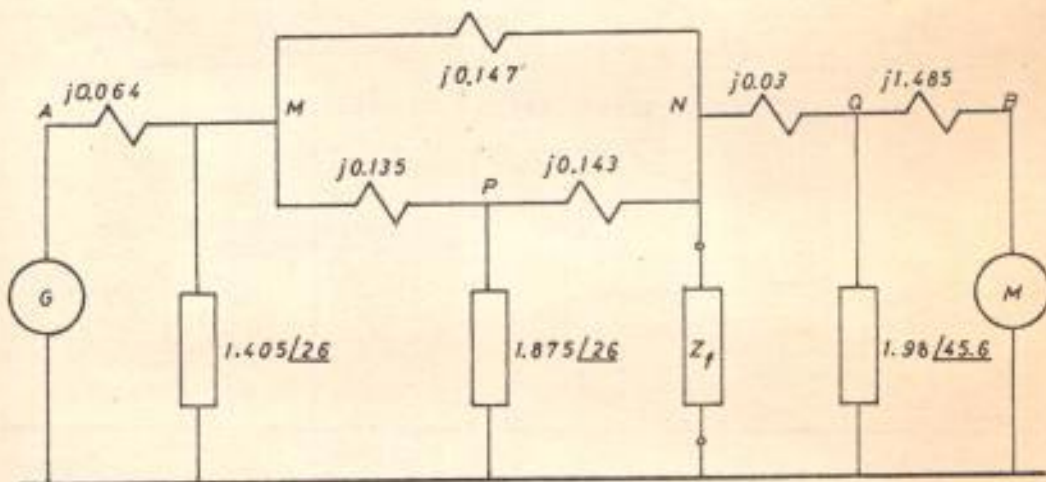
$$Z_2 = j 0.038 \text{ pu.}$$

Impedancia de secuencia cero.-



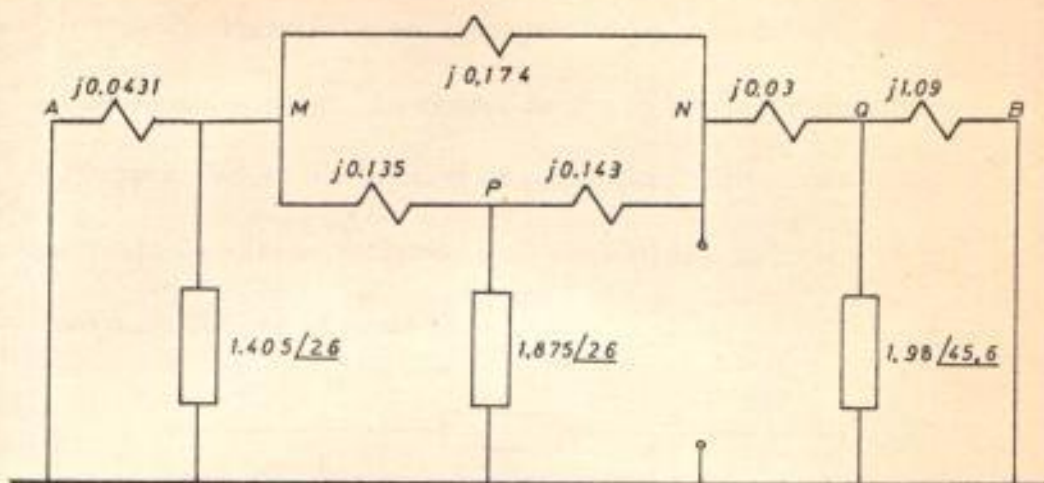
$$Z_0 = j 0.0461 \text{ pu.}$$

2.- Falla 2L-T en el punto N



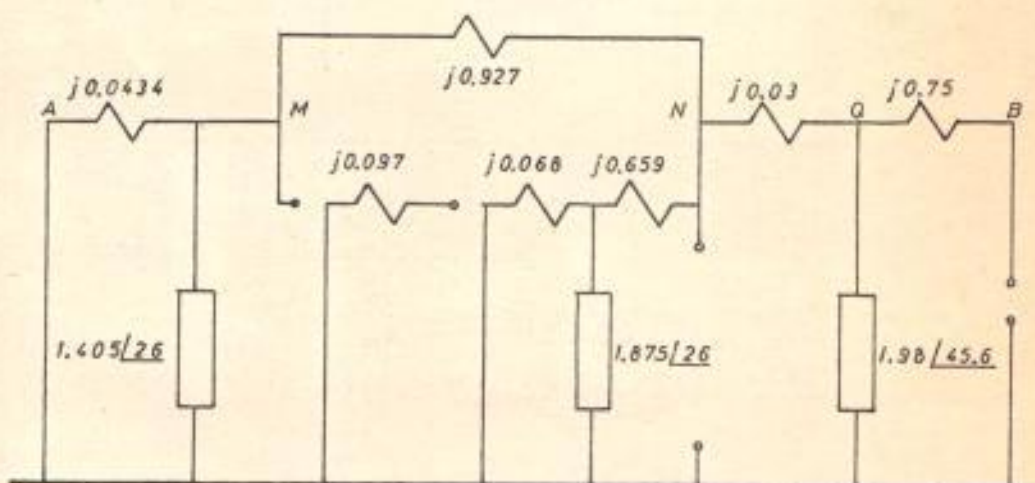
Cálculos de los valores de Z_2 y Z_0 para falla localizada en el punto N:

Impedancia de secuencia negativa.-



$$Z_2 = j 0.122 \text{ pu.}$$

Impedancia de secuencia cero. -



$$Z_0 = j 0.358 \text{ pu.}$$

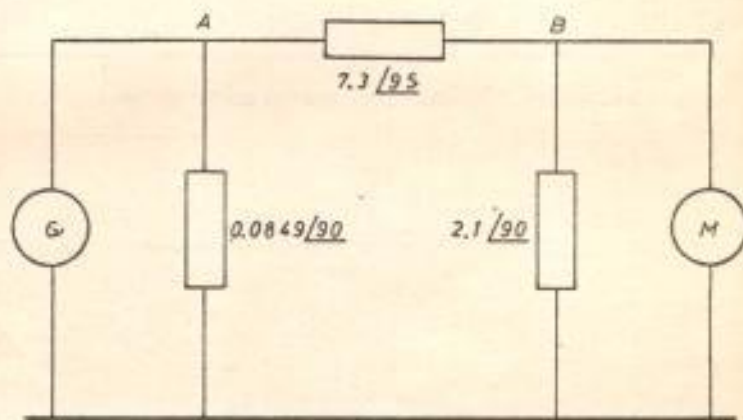
Con estos valores así calculados, se procede a formar el siguiente

cuadro:

Lugar de falla	Z_2 pu.	Z_0 pu.	Z_f pu.
M	$j 0.038$	$j 0.0461$	$j 0.0199$
N	$j 0.122$	$j 0.358$	$j 0.0910$

Para la falla analizada, se procede a reemplazar los valores de las impedancias de falla en los respectivos lugares del diagrama de secuencia positiva. En el caso de una falla en un determinado lugar se reduce el diagrama de secuencia positiva, con la impedancia de falla ya incluida, a un circuito π .

Para falla 2L-T en el punto M.-



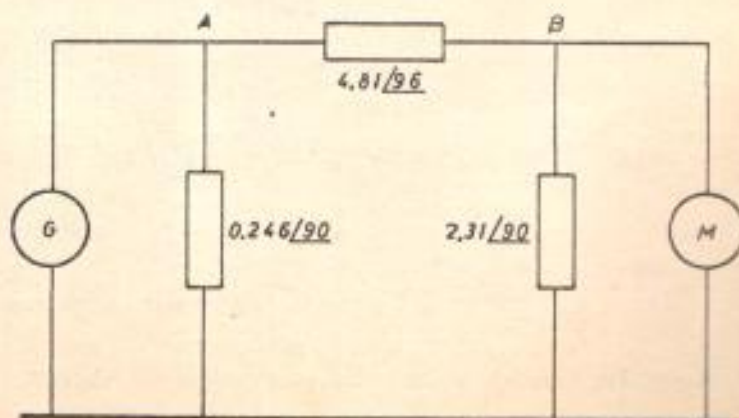
En donde:

$$Y_{AA} = 11.83 \angle -90 \text{ pu.}$$

$$Y_{BB} = 0.640 \angle -90 \text{ pu.}$$

$$Y_{AB} = 0.137 \angle 85.0 \text{ pu.}$$

Para falla 2L-T en el punto N.-



En donde:

$$Y_{AA} = 4.250 / -90 \text{ pu.}$$

$$Y_{BB} = 0.639 / -90 \text{ pu.}$$

$$Y_{AB} = 0.206 / 84.0 \text{ pu.}$$

Falla en:	$E_A Y_{AA} \cos. \theta_{AA}$	$E_B Y_{BB} \cos. \theta_{BB}$	$E_A E_B Y_{AB}$	θ_{AB}
M	0	0	0.182	85
N	0	0	0.277	84

Reemplazando estos valores en la ecuación Potencia-Angulo, se tiene:

Para falla 2L-T en el punto M.-

$$P_C = 0$$

$$P_M = 0.182 \text{ pu.}$$

$$\delta = 4.7$$

Es decir:

$$P_U = 0.182 \text{ sen. } (\delta - 4.7) \quad \text{Fig. N}^\circ 5, \text{ curva F}$$

Para falla 2L-T en el punto N.-

$$P_C = 0$$

$$P_M = 0.277 \text{ pu.}$$

$$\delta = 5.6$$

Es decir:

$$P_U = 0.277 \text{ sen. } (\delta - 5.6) \quad \text{Fig. N}^\circ 5, \text{ curva E}$$

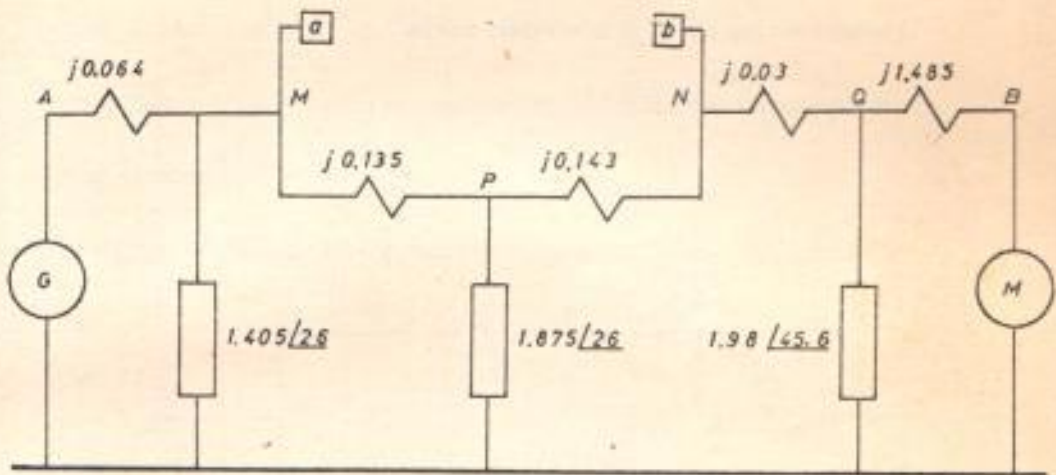
c.- Después de la falla

1.- Desconexión del tramo ab, fig. N° 2

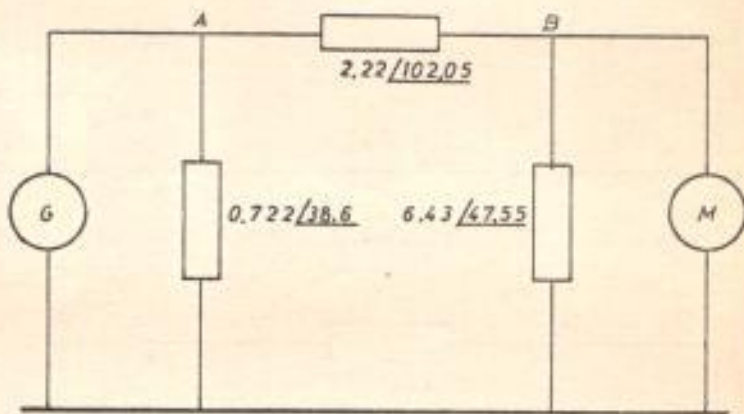
La desconexión de este tramo, ab, debe hacerse por operación

simultánea de los interruptores a, b cuando esta alimentadora se vea perturbada por una falla.

El diagrama unifilar correspondiente a esta seccionalización es:



Se reduce el diagrama anterior a un circuito π , en donde:



En donde:

$$Y_{AA} = 1.8 \angle -71.72 \text{ pu.}$$

$$Y_{BB} = 0.556 \angle -88.8 \text{ pu.}$$

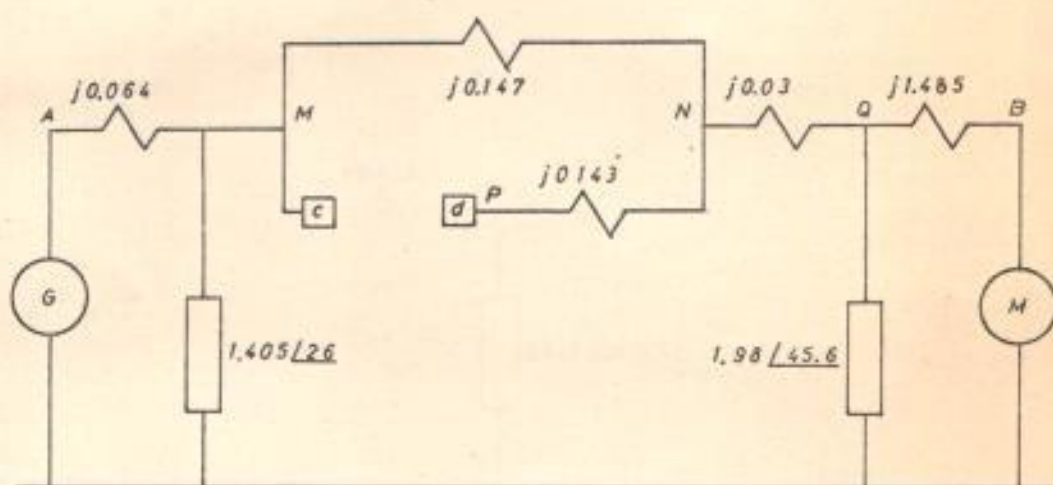
$$Y_{AB} = 0.45 \angle 77.9 \text{ pu.}$$

2.- Desconexión del tramo cd, fig. N° 2

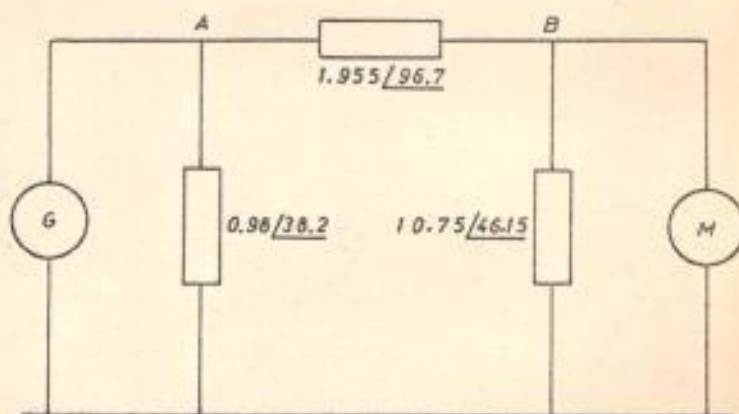
La desconexión de este tramo, cd, debe hacerse por operación

simultánea de los interruptores c, d cuando esta alimentadora se vea perturbada por una falla. La actuación de los aparatos de protección, bajo estas circunstancias, deben desconectar la carga de la subestación Los Ceibos debido a que las alimentadoras que quedan en servicio no cubren las necesidades de carga de todo el sistema.

El diagrama unifilar correspondiente a esta seccionalización es:



Se reduce el diagrama anterior a un circuito π , en donde:



En donde:

$$Y_{AA} = 1.35 \angle -57 \text{ pu.}$$

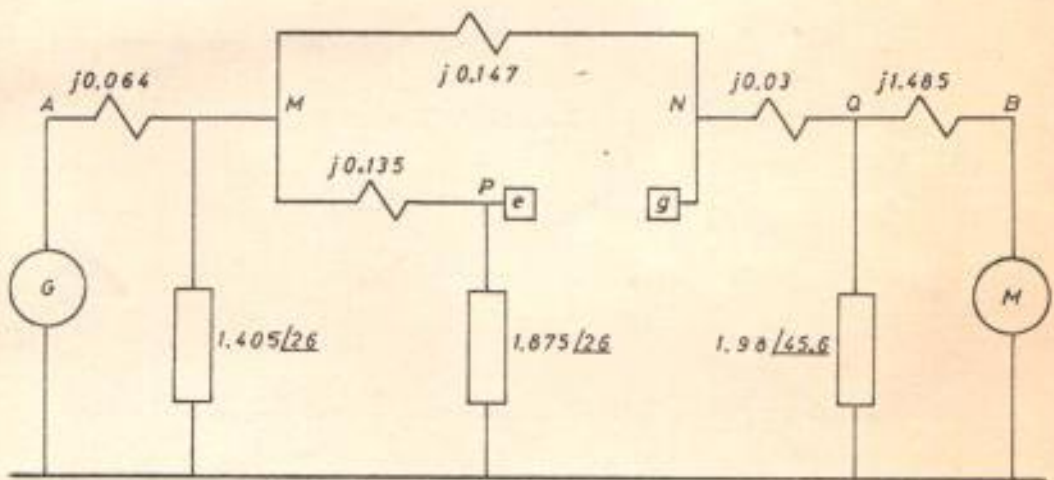
$$Y_{BB} = 0.575 \angle -89.45 \text{ pu.}$$

$$Y_{AB} = 0.511 \angle 83.3 \text{ pu.}$$

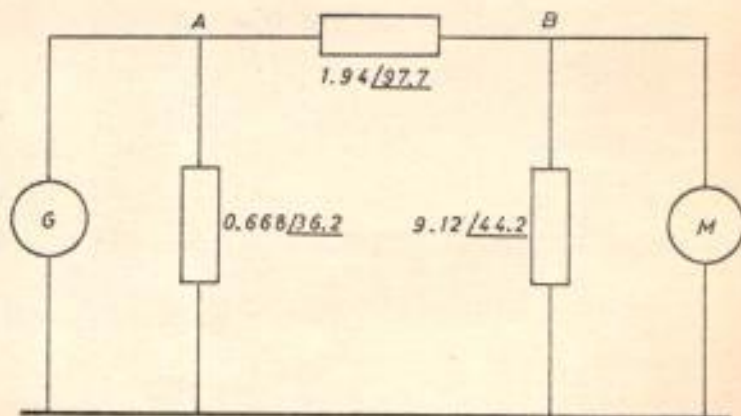
3.- Desconexión del tramo eg, fig. N° 2

La desconexión de este tramo, eg, debe hacerse por operación simultánea de los interruptores e, g cuando esta alimentadora se vea perturbada por una falla.

El diagrama unifilar correspondiente a esta seccionalización es:



Se reduce el diagrama anterior a un circuito π , en donde:



En donde:

$$Y_{AA} = 1.795 \angle -50.6 \text{ pu.}$$

$$Y_{BB} = 0.588 \angle -88.9 \text{ pu.}$$

$$Y_{AB} = 0.507 \angle 82.3 \text{ pu.}$$

Tramo desconectado	$E_A Y_{AA} \cos. \theta_{AA}$	$E_B Y_{BB} \cos. \theta_{BB}$	$E_A E_B Y_{AB}$	θ_{AB}
ab	0.694	0.00166	0.600	77.9
cd	0.907	0.00	0.680	83.3
eg	1.400	0.00163	0.674	82.3

Reemplazando estos valores en la ecuación Potencia-Angulo, se tiene:

Para desconexión del tramo ab.-

$$P_C = 0.0045 \text{ pu.}$$

$$P_M = 0.598 \text{ pu.}$$

$$\delta = 9.65$$

Es decir:

$$P_U = 0.0045 + 0.598 \text{ sen. } (\delta - 9.65) \quad \text{Fig. N}^\circ 5, \text{ curva D}$$

Para desconexión del tramo cd.-

$$P_C = 0.0269 \text{ pu.}$$

$$P_M = 0.679 \text{ pu.}$$

$$\delta = 6.3$$

Es decir:

$$P_U = 0.0269 + 0.679 \text{ sen. } (\delta - 6.3) \quad \text{Fig. N}^\circ 5, \text{ curva B}$$

Para desconexión del tramo eg.-

$$P = 0.0256 \text{ pu.}$$

$$P = 0.673 \text{ pu.}$$

$$\delta = 7.2$$

Es decir:

$$P_U = 0.0256 + 0.673 \text{ sen. } (\delta - 7.2) \quad \text{Fig. N}^\circ 5, \text{ curva C}$$

E.- DESPLAZAMIENTO ANGULAR CRITICO

En la fig. N° 5, se muestra las curvas de Potencia-Angulo antes, durante y después de las fallas. Mediante el criterio de igualdad de áreas aplicado en los estudios de estabilidad, se encontró el ángulo de desplazamiento crítico, ángulo límite entre la estabilidad e inestabilidad, de este estudio. (5d)

a.- Con falla en el extremo M

El significado de esta falla es:

1.- Falla 2L-T en el tramo ab, hacia el extremo M

Al despejar la falla, el servicio se mantiene a través del tramo cg. Fig. N° 5, curvas F y D.

El desplazamiento angular crítico es:

$$\delta_c = 147.50$$

2.- Falla 2L-T en el tramo cd, hacia el extremo M

Al despejar la falla, el servicio se mantiene a través del tramo ab. Fig. N° 5, curvas F y B.

El desplazamiento angular crítico es:

$$\delta_c = 149.00$$

b.- Con falla en el extremo N

El significado de esta falla es:

1.- Falla 2L-T en el tramo ab, hacia el extremo N

En este caso, la magnitud de la perturbación es de tal naturaleza que el sistema puede estabilizarse aun con la falla.

2.- Falla 2L-T en el tramo eg, hacia el extremo N

Para esta condición se presenta el mismo caso anterior, es decir, que el sistema puede mantenerse estable con la falla.

F.- TIEMPO CRITICO DE DESPEJE

El cálculo del tiempo crítico de despeje se lo efectúa de acuerdo al método de las ecuaciones de penduleo pre-calculadas. (5e)

De acuerdo a este método se tiene:

Partiendo de la ecuación de penduleo de la máquina equivalente

$$M \ddot{\delta} = P_a = P_i - P_U \\ = P_i - P_C - P_M \text{sen.} (\delta - \gamma)$$

Se llega a la ecuación de penduleo modificada

$$\frac{\pi}{180} \frac{d^2 \delta'}{d\tau^2} = p - \text{sen.} \delta'$$

En donde:

$$p = \frac{P_i - P_C}{P_M}$$

$$\tau = t \sqrt{\frac{\pi P_M}{180 M}}$$

$$\delta' = \delta - \gamma ; \delta'_0 = \delta_0 - \gamma$$

Calcular: $\text{sen.} \delta'_0$

Con falla en el extremo M

a.- Falla 2L-T en el tramo ab, hacia el extremo M

$$p = 0.945$$

$$\tau = 8.31 t$$

$$\delta'_0 = 19.25$$

$$\text{sen.} \delta'_0 = 0.33$$

$$\delta_c = 147.50$$

b.- Falla 2L-T en el tramo cd, hacia el extremo M

$$p = 0.945$$

$$\zeta = 8.31 \text{ t}$$

$$\delta'_0 = 19.25$$

$$\text{sen. } \delta'_0 = 0.33$$

$$\delta_c = 149.00$$

Mediante las curvas de penduleo pre-calculadas se encuentran los valores de los tiempos modificados críticos para estos dos casos: Fig. N° 6

Falla hacia el extremo M del:	ζ_c	t_c	Ciclos
tramo ab	3.80	0.457	27.4
tramo cd	3.95	0.475	28.5



II.- POSIBLES SOLUCIONES

A.- ANALISIS DE LOS SISTEMAS

Mediante observaciones hechas en el sistema existente, fig. N° 1, y debido a que se desconocía el comportamiento del mismo en lo referente a su estabilidad, se lo estudió tratando de proporcionarle algunas mejoras que conduzcan a resultados más satisfactorios. El cambio propuesto en el sistema es unir las dos alimentadoras en la subestación San Eduardo. Ver fig. N° 2.

La razón principal de utilizar doble alimentación es que el sistema adquiere mayor estabilidad cuando la reactancia disminuye entre generación y recepción.

Otra ventaja que presenta este sistema, es la posibilidad de seccionalizar los tramos afectados por una falla con mayor selectividad que el de la fig. N° 1.

Los resultados obtenidos son de tal naturaleza, que demuestran que el sistema propuesto tiene excelentes características de estabilidad. Se puede observar además, que el sistema existente, siempre y cuando se utilice debidamente el interruptor de transferencia de la subestación San Eduardo - indicado en la fig. N° 1, posee características de estabilidad ligeramente inferiores al sistema propuesto. Comparativamente, los resultados pueden apreciarse en la fig. N° 5. Los cálculos del sistema existente no están incluidos en esta tesis por ser prácticamente una repetición de los del sistema propuesto.

B.- INTERRUPTORES DE POTENCIA

El circuito mostrado en la fig. N° 2 indica que los interruptores necesarios para el sistema propuesto son: a, b, c, d, e, g.

Los interruptores existentes son: a, c, d, e.

Los interruptores a, c son marca General Electric tipo AM-13.8-500 y los interruptores d, e son marca Westinghouse tipo 150 DH-P 500. El tiempo de desconexión de los interruptores una vez recibida la señal de los relés, es de 8 ciclos.

Se recomienda que los interruptores b, g sean del tipo intemperie sumergido en aceite.

C.- TIEMPO DE DESPEJE

De acuerdo a los resultados obtenidos para el sistema propuesto, se encontró que el tiempo más crítico se presenta cuando ocurre una falla 2L-T hacia el extremo M de la alimentadora Portete (tramo ab, fig. N° 2). Este tiempo es de 27.4 ciclos.

Mediante un criterio de seguridad, se recomienda que, la operación de los interruptores debe hacerse lo más rápido posible empleando los aparatos de protección adecuados. Complementando esta observación, se sugiere que todos los interruptores tengan el mismo tiempo de despeje.

Debido a que éste estudio no cubre la protección del sistema, se han limitado los resultados a indicar el tiempo crítico de despeje de la falla 2L-T más perjudicial y a dar recomendaciones sobre el tiempo de operación de los relés e interruptores.

III. - CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que tanto el sistema propuesto como el actual, tienen características excelentes de estabilidad, siendo el propuesto superior al otro.

Una decisión final sobre cuál de los dos sistemas deberá aplicarse tiene que basarse estrictamente en un análisis económico de acuerdo con los intereses de la empresa, aunque ya se ha visto que técnicamente los dos sistemas son recomendables.

Es aconsejable, además, que se complete este trabajo con el estudio de protección de los dos sistemas para llegar a una decisión final que cumpla con las finalidades técnicas y económicas más ventajosas.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- R. YANNUZZELLI, Tesis de Grado, 1.967
- 2.- W. D. STEVENSON, Jr., Elements of Power System Analysis, New York, Mc. Graw-Hill Book, 1.955
 - a.- Capitulo XII, pág. 250
 - b.- Capitulo XV, pág. 328
- 3.- EDITH CLARKE, Circuit Analysis of A-C Power Systems, vol. I, New York, John Wiley & Sons, 1.943
Capitulo XI, pág. 391
- 4.- E. W. KIMBARK, Power System Stability, vol. I, New York, John Willey & Sons, 1967
 - a.- Capitulo I, pág. 24
 - b.- Capitulo III, pág. 78
 - c.- Capitulo IV, pág. 132
 - d.- Capitulo IV, pág. 122
 - e.- Capitulo V, pág. 149
- 5.- E. W. KIMBARK, Power System Stability, vol. II, New York, John Willey & Sons, 1.967
- 6.- E. W. KIMBARK, Power System Stability, vol. III, New York, John Willey & Sons, 1.962
- 7.- A. S. LANGSDORF, Theory of Alternating Current Machinery, New York, Mc. Graw-Hill Book, 1937
- 8.- F. L. SINGER, Engineering Mechanics, New York, Harper & Row, 1.954
Capitulo VIII, pág. 222

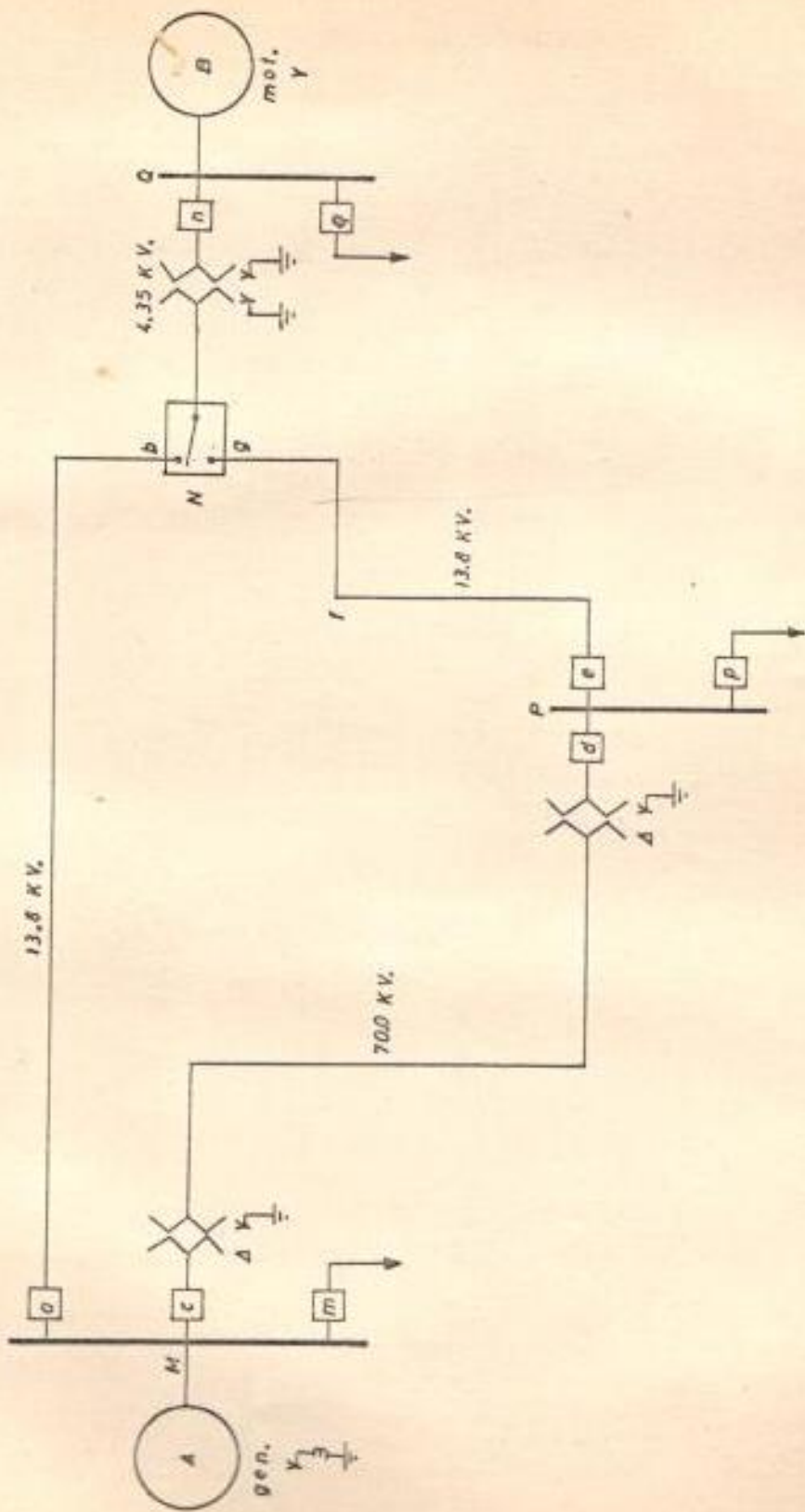


Fig. No 1

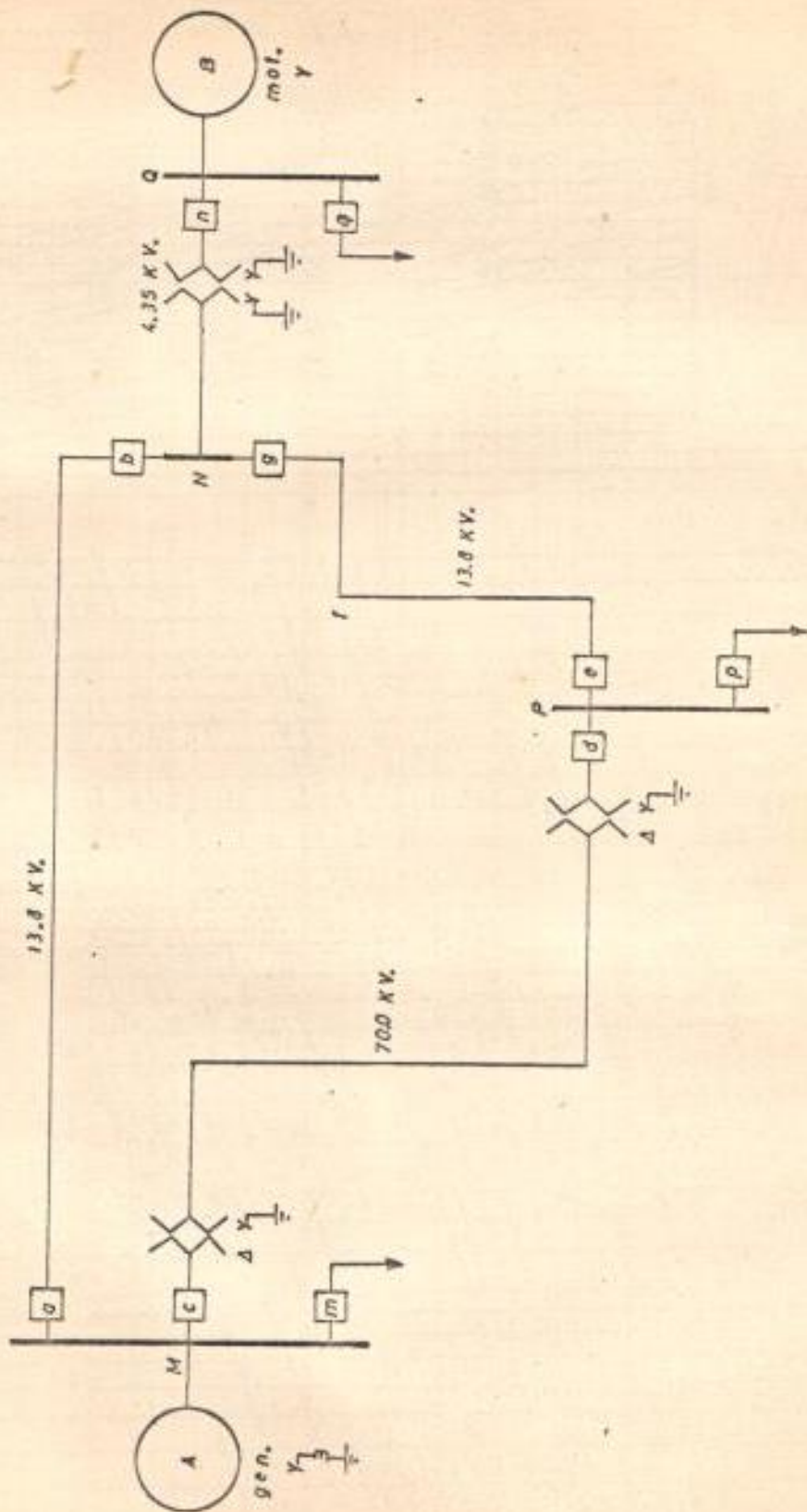
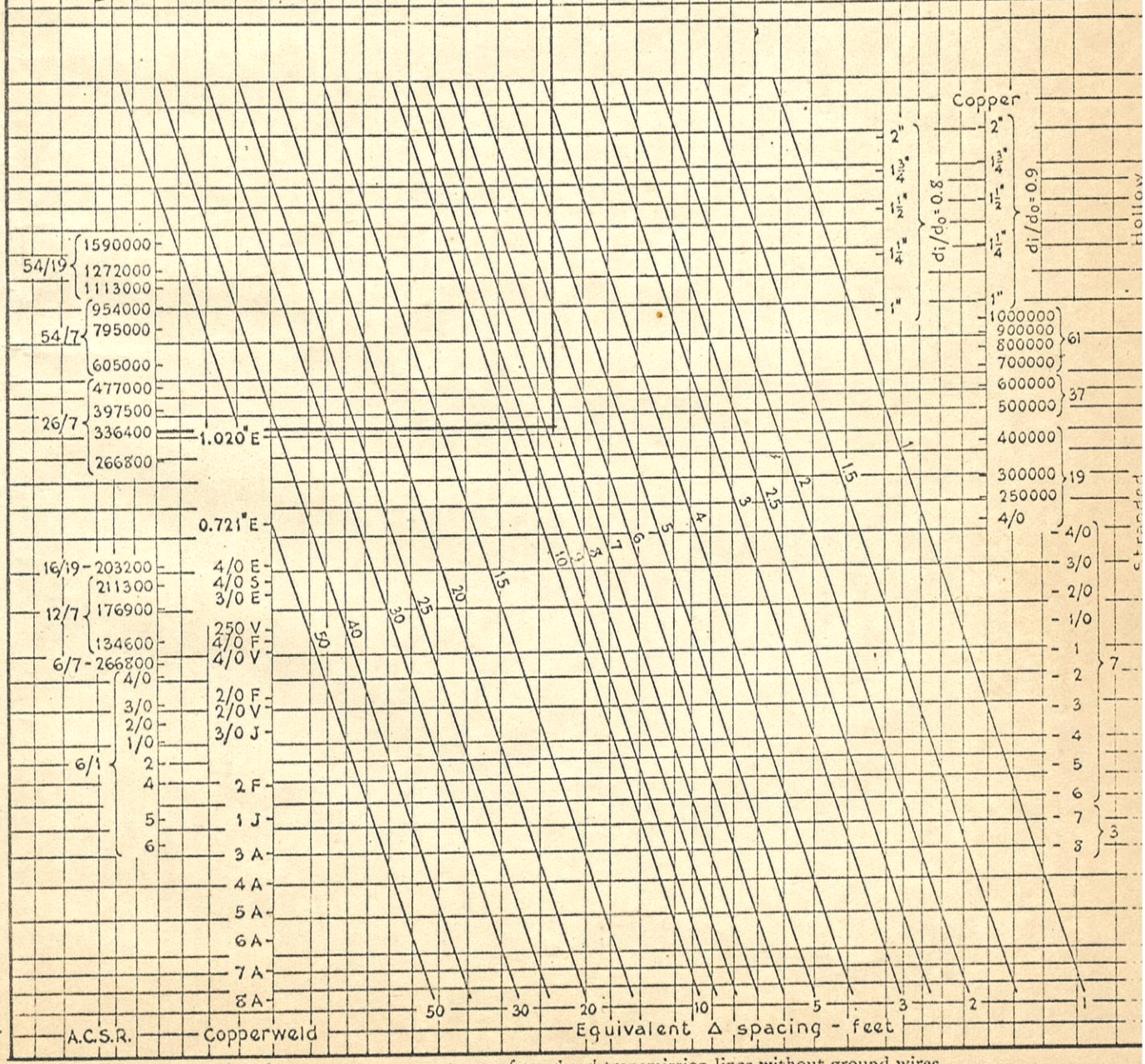
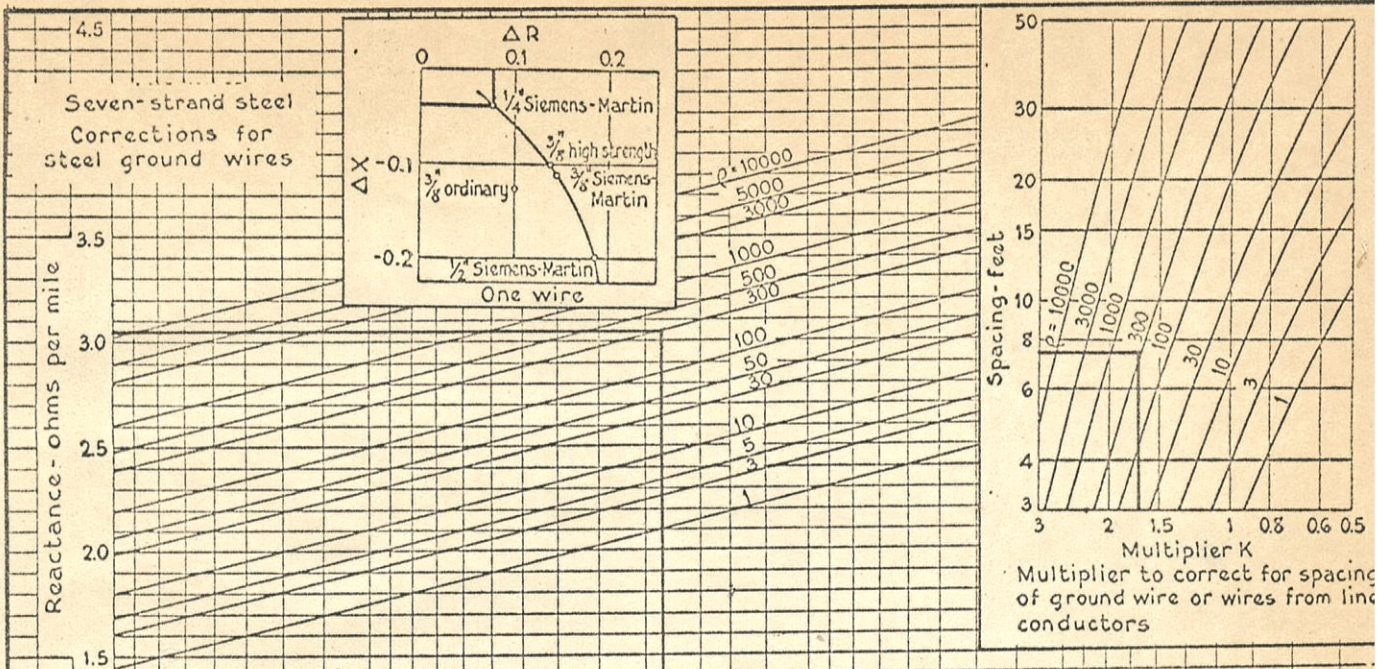


Fig. N° 2



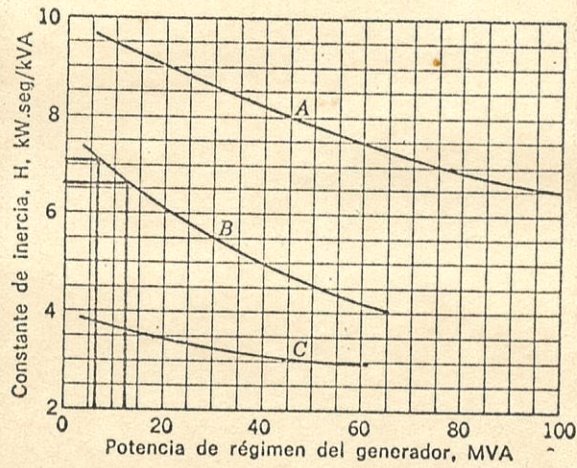
60-cycle, zero-sequence reactance of overhead transmission lines without ground wires.

ρ = earth resistivity in ohms per meter cube

TABLA 15.2 CONSTANTES DE INERCIA DE MÁQUINAS SINCRÓNICAS *	
Tipo	Constante de inercia H, megajulios/MVA
Condensadores sincrónicos: †	
Grandes.....	1,25
Poquitos.....	1,00 *
Motores sincrónicos.....	2,00

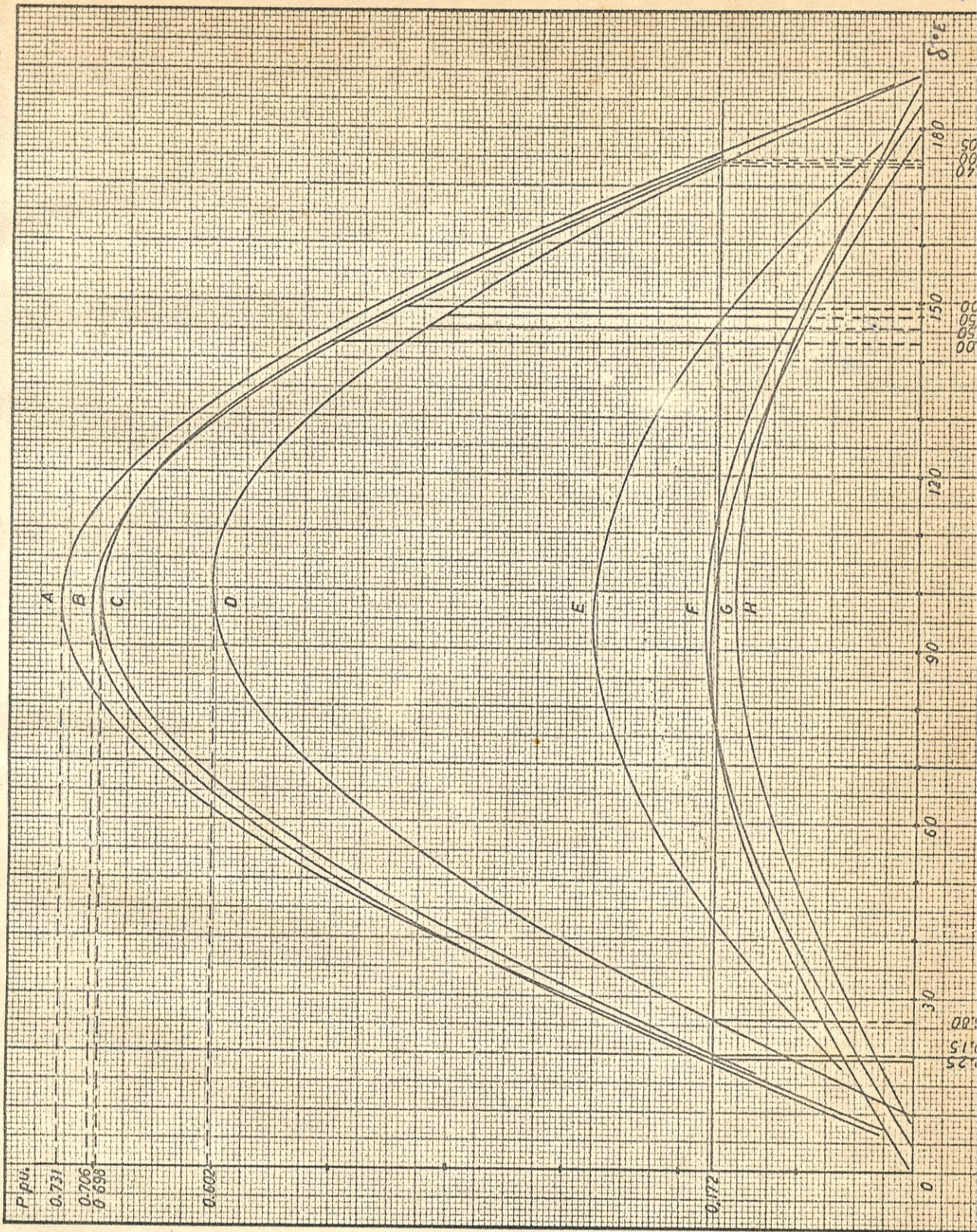
* Tomado de *Elec. Eng.*, febrero, 1937, pág. 226.

† Refrigerados con hidrógeno, 25 % menos.



Constantes de inercia de turbogeneradores de vapor grandes, incluyendo la turbina. (A) 1.800 r.p.m., con condensación; (B) 3.600 r.p.m., con condensación; (C) 3.600 r.p.m., sin condensación. (Datos publicados en la revista *Eléc. Eng.*, vol. 56, pág. 268, febrero 1937.)

Fig. N° 4



- A.- Operación normal con doble alimentación
- B.- Tramo cd desconectado
- C.- Tramo eg desconectado
- D.- Tramo ab desconectado
- E.- Falla 2L-T en el extremo M
- F.- Falla 2L-T en el extremo N
- G.- Falla 2L-T con alimentación a través de ab en el extremo M
- H.- Falla 2L-T con alimentación a través de cg en el extremo M

Fig. N° 5

Pre-calculated swing curves

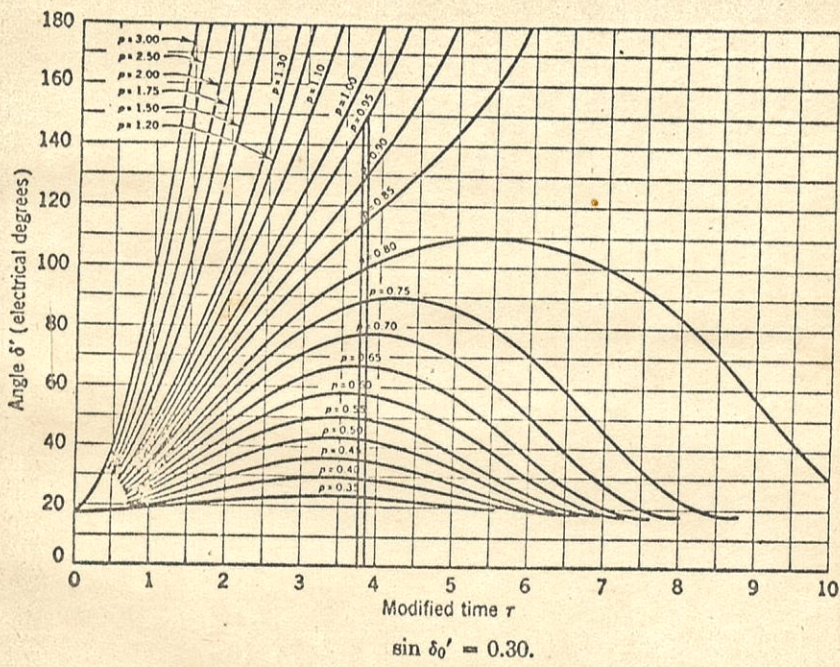


Fig. N° 6