

7
621.31421
J37
c.5

*Estudio de Estabilidad en estado Transitorio del
Sistema Eléctrico de Guayaquil*



SECRETARIA

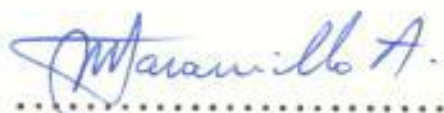


*Tesis de Grado para Optar el Título de
Ingeniero en Electricidad
por: Marcelo Jaramillo Aguilar*

**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).



.....
MARCELO JARAMILLO AGUILAR

Guayaquil, Septiembre de 1.969



SECRETARIA

AUTOR:

Marcelo A. Jaramillo

.....
MARCELO JARAMILLO AGUILAR

DIRECTOR DE TESIS:

.....
ING. GREGORIO WONG

PROFESOR:

.....

PROFESOR:

.....



SECRETARIA

A MIS PADRES Y MAESTROS



SECRETARIA

INDICE

	Pág.
INTRODUCCION	VII
I.- DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA	
A.- SISTEMA EXISTENTE	1
a) Generación	1
b) Transformación	2
c) Transmisión	2
d) Distribución	2
B.- SISTEMA FUTURO	3
a) Generación	3
b) Transformación	3
c) Transmisión	4
II.- VALORES POR UNIDAD DE LAS CONSTANTES DEL SISTEMA.-	
A.- REACTANCIAS	
a) Generadores	5
b) Subestaciones de transformación	7
c) Líneas	8
B.- CARGAS	8
a) Potencia máxima	8
b) Potencia mínima	11
c) Potencias de generación	12
d) Concentración de cargas	12
C.- TIPO Y LOCALIZACION DE FALLAS	12

	Pág.
D.- CONSTANTES DE INERCIA	16
III.- ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD EN ESTADO TRANSI- TORIO.-	
A.- CONDICIONES INICIALES DE OPERACION	23
a) Generador equivalente	23
b) Voltajes internos	24
B.- ECUACIONES ANGULO-POTENCIA	27
C.- DESPLAZAMIENTO ANGULAR CRITICO Y TIEMPO CRITICO DE DESPEJE.-	36
a) Desplazamiento angular crítico	36
b) Tiempo crítico de despeje	42
IV.- INTERRUPTORES DE POTENCIA	45
CONCLUSIONES	46
BIBLIOGRAFIA	47
FIGURAS	49
APENDICES	58



SECRETARIA

INTRODUCCION

La Empresa Eléctrica del Ecuador Inc., está llevando a la práctica un proyecto de expansión del sistema eléctrico que sirve a la ciudad de Guayaquil. Este proyecto prevee el incremento de la producción para satisfacer la demanda de energía eléctrica y disponer de las reservas necesarias hasta el año 1.976.

La presente Tesis tiene por objeto efectuar un estudio de la estabilidad transitoria del sistema eléctrico que es tará en operación en 1.971, por considerar que la financia ción de las inversiones comprendidas hasta esa fecha den-- tro del "proyecto de expansión del sistema", está debida-- mente asegurada.

Los datos necesarios para el estudio, se tomaron: unos del Departamento de Producción de la Empresa Eléctrica del Ecuador Inc., otros fueron calculados de las máquinas exis tentes, y adicionalmente se recurrió a tablas y curvas pre calculadas.

Para determinar las desviaciones angulares de las má-- quinas sincrónicas al ser afectadas por disturbios transi- torios, se utilizó el "criterio de igualdad de áreas" y -- los tiempos críticos de despeje se determinaron usando -- "curvas pre-calculadas".



I.- DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

A.- SISTEMA EXISTENTE

a) Generación

En la actualidad la ciudad de Guayaquil está servida por una sola central de generación, ubicada en las calles Eloy Alfaro y General Gómez. Esta central está formada por:

1. Planta a Diesel
2. Planta a vapor
3. Turbina a gas

Planta a Diesel.- Está compuesta por doce generadores impulsados por motores diesel. La capacidad total de esta planta es 16.711 KVA. y genera a 4,16 KV.

Planta a Vapor.- Está formada por las siguientes unidades de generación impulsadas por turbinas a vapor:

- 2 - 13,8 KV - 12.500 KVA. c/u
- 1 - 13,8 KV - 6.250 KVA.
- 1 - 4,16 KV - 6.250 KVA.

Existe una sola unidad de generación impulsada por una turbina a gas, cuya capacidad de generación es de 16.000 KVA. a 13,8 KV.

Las unidades de generación a 13,8 KV. están interconectadas a las de 4,16 KV. a través de una subestación de transformación.

b) Transformación

Existen dos subestaciones de transformación: una de elevación y otra de reducción.

La de elevación ubicada junto a la central de generación está formada por un solo transformador trifásico de $13,2 \Delta / 67 \text{ y, KV. y } 15.000 \text{ -- KVA.}$

La de reducción denominada subestación Los Ceibos por su ubicación, está formada por un transformador de $67 \Delta / 13,8 \text{ y, KV. y } 12.000 \text{ KVA.}$

c) Transmisión

Está en servicio un tramo de 10 KM de líneas operado a 67 KV., que interconecte la subestación de elevación con la subestación Los Ceibos.

Los conductores de fase son de tipo A.C.S.R. calibre 336,4 MCM. El alambre de protección contra descargas directas es de hierro galvanizado de 1/4".

La disposición de los conductores de fase y del alambre de protección se muestran en la Figura NQ1.

d) Distribución

El sistema de distribución primario es en su totalidad del tipo radial. Está formado por siete alimentadoras a 4,16 KV. y ocho a 13,8 KV.

Las alimentadoras a 4,16 KV. parten de las barras de salida de los generadores de 4,16 KV.

y sirven principalmente al sector céntrico de la ciudad.

De las alimentadoras de 13,8 KV. cinco parten de las barras de 13,8 KV. y tres de la subestación Los Ceibos.

B.- SISTEMA FUTURO

Existe un proyecto de expansión del sistema eléctrico elaborado por la Empresa Eléctrica -- del Ecuador, Inc., el cual prevé el incremento de la producción, para satisfacer la demanda de energía eléctrica y disponer de las reservas necesarias hasta el año 1.976.

Las principales fases comprendidas en este proyecto que estarán en servicio en 1.971 son las siguientes:

a) Generación

Montaje de un nuevo generador impulsado por una turbina a vapor en el sector denominado San Eduardo a la altura del km. 9 de la vía a Salinas. Esta unidad será la primera de las que -- formarán la central Estero Salado.

El voltaje de generación de esta unidad será a 13,8 KV. y su capacidad de 35.294 KVA.

b) Transformación

1. Instalación de una subestación de reducción que servirá al sector céntrico de la -- ciudad. Esta subestación estará formada por

dos transformadores trifásicos de $67 \text{ Y} / \text{Y}_2$
4,16 KV. y 5.000 KVA. de capacidad cada uno. *(Subestación Estero Salado)*

2. Montaje de una subestación de elevación en la central Estero Salado, formada por dos transformadores trifásicos de $13,2 \Delta / 67 \text{ Y}_2$ KV. y 15.000 KVA. de capacidad cada uno.

3. Montaje de una subestación de reducción en el sector de El Guasmo, formada por dos transformadores trifásicos de $67 \Delta / 13,8 \text{ Y}_2$ y 12.000 KVA. de capacidad cada uno. Esta subestación servirá a una gran extensión del sector sur de la ciudad.

4. - 2da subestación de Los Ceibos
c) Transmisión

El proyecto comprende la formación de un anillo a 67 KV. que interconecte la central de generación existente con la subestación Los Ceibos y la central Estero Salado. La capacidad y disposición de conductores de esta línea será similar al tramo que está actualmente en operación.

La figura N°2 representa el diagrama de una línea del sistema que estará en operación en -- 1.971.

II.- VALORES POR UNIDAD DE LAS CONSTANTES DEL SISTEMA

A.- REACTANCIAS

a) Generadores

Tomando como base 4,16 KV. - 12.500 KVA. para las unidades de generación a 4,16 KV y 13,8 KV. - 12.500 KVA para las unidades de generación a 13,8 KV., tenemos:

1. Planta a Diesel (Ver figura Nº3)

Unidades Nos. 1 y 2

$$X_d' = 12,71 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = 8,5 \text{ p.u.}$$

$$X_o = 2,32 \text{ p.u.}$$

Unidad Nº 3

$$X_d' = 9,42 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = 6,85 \text{ p.u.}$$

$$X_o = 2,57 \text{ p.u.}$$

Unidades Nos. 4, 6 y 12

$$X_d' = 3 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = 1,55 \text{ p.u.}$$

$$X_o = 1,5 \text{ p.u.}$$

Unidades Nos. 5, 10 y 11

$$X_d' = 1,8 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = 1,47 \text{ p.u.}$$

$$X_o = 0,334 \text{ p.u.}$$

$$X \text{ reactor} = 0,456 \text{ p.u.}$$

Unidades Nos. 7 y 8

$$X_d' = 1,33 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = 0,86 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0,095 \text{ p.u.}$$

Unidad Nº9

$$X_d' = 4,38 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = 3,38 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 2 \text{ p.u.}$$

$$X_{\text{reactor}} = 0,0725 \text{ p.u.}$$

2. Planta a Vapor (Ver figura Nº3)

Unidad Nº 1

$$X_d' = 0,26 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = 0,2 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0,1 \text{ p.u.}$$

$$X_{\text{reactor}} = 0,03 \text{ p.u.}$$

Unidad Nº 2

$$X_d' = 0,26 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = 0,2 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0,1 \text{ p.u.}$$

$$X_{\text{reactor}} = 0,035 \text{ p.u.}$$

Unidad Nos. 3 y 4

$$X_d' = 0,17 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = 0,11 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0,05 \text{ p.u.}$$

$$X_{\text{reactor}} = 0,02 \text{ p.u.}$$

3.- Generador de 16.000 KVA. (Turbinas a gas)

$$X_d' = 0,126 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = 0,086 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0,43 \text{ p.u.}$$

$$X_{\text{reactor}} = 0,0125 \text{ p.u.}$$

- 4.- Generador de 35.294 KVA. (Central Estero Salado).

$$X_d' = 0,23 \times \frac{12.500}{35.294} = 0,0814 \text{ p.u.}$$

$$X_2 = 0,17 \times \frac{12.500}{35.294} = 0,0578 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0,05 \times \frac{12.500}{35.294} = 0,017 \text{ p.u.}$$

$$X_{\text{reactor}} = \frac{30,17 - 30,05}{3} = 0,04 \text{ OHMIOS}$$

$$X_{\text{reactor}} = 0,04 \times \frac{12.500}{35.294} = 0,0141 \text{ p.u.}$$

b) Subestaciones de transformación

1. Interconexión entre los generadores a 4,16 y 13,8 KV. existentes.

$$X_0 = X_1 = X_2 = 0,095 \text{ p.u.}$$

2. Subestación de elevación existente.
Capacidad 15.000 KVA. - 13,2/67 KV.

$$X_1 = X_2 = 0,0567 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0,0487 \text{ p.u.}$$

3. Subestación de elevación Estero Salado
Capacidad 15.000 KVA. - 13,2/67 KV. cada una.

$$X_1 = X_2 = 0,0567 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0,0487 \text{ p.u.}$$

c) Líneas (Ver figura N°2)

Los voltajes de placa de la subestación de elevación existente son de 13,2/67 KV., por lo tanto el voltaje base para la línea será:

$$\text{KV. base} = 13,2 \times \frac{67}{13,2} = 70 \text{ KV.}$$

$$Z \text{ base} = \frac{(\text{KV. base})^2}{\text{KVA. base}} \times 1.000 = 392 \text{ ohmios}$$

Los valores de las reactancias de las líneas se indican en la Tabla N°1 (1)

B.- CARGAS

Las cargas seleccionadas para este estudio corresponden a un día normal de trabajo del mes de Noviembre de 1.971, por considerarse que la ejecución de las fases del proyecto de expansión del sistema eléctrico comprendidas hasta 1.971, está plenamente asegurada.

Para calcular las potencias correspondientes a las horas de máxima y mínima generación, se tomó como base lecturas de carga obtenidas durante nueve años consecutivos, comprendidos entre 1.958 y 1.967 (Tabla N°2) (2)

a) Potencia máxima

Aplicando los datos de la Tabla N°2 a la ecuación exponencial de la forma:

VALORES POR UNIDAD (p.u.) DE LAS REACTANCIAS DE SECUENCIA POSITIVA, SECUENCIA
 NEGATIVA, SECUENCIA CERO, DE LAS

LINEAS DE TRANSMISION

TRAMO FIG. NO 2	REACTANCIA DE SE- CUENCIA POSITIVA VALORES P. U.	REACTANCIA DE SE- CUENCIA NEGATIVA VALORES P.U.	REACTANCIA DE SECUENCIA CERO VALORES P.U.
G C	0,0056	0,0056	0,024
C D	0,0069	0,0069	0,0296
D E	0,0045	0,0045	0,0194
E G	0,0086	0,0086	0,0371

LECTURAS DE CARGA EN LAS HORAS DE MAXIMA Y MINIMA GENERACION, REGISTRADAS:
UN DIA NORMAL DE TRABAJO DEL MES DE NOVIEMBRE.-

AÑO	CARGA MINIMA EN KW HORA: 3 a 4 A.M.	CARGA MAXIMA EN KW. HORA: 7 a 8 P.M.	RELACION DE CARGA MINIMA Y MAXIMA. (2) : (3)
1.958	7.000	20.240	0.346
1.959	8.100	22.430	0.361
1.960	9.100	25.550	0.356
1.961	10.000	27.080	0.369
1.962	10.900	31.740	0.344
1.963	11.400	35.250	0.323
1.964	13.800	39.626	0.348
1.965	15.200	41.870	0.363
1.966	16.800	45.040	0.373
1.967	17.250	50.490	0.342

$$CM = KE^{Xt}$$

En la que:

CM = potencia máxima en Kw.

X = valor medio geométrico del tanto por -
uno anual de incremento de carga.

t = tiempo en años a partir de 1.958

K = constante

E = base de logaritmos neperianos

Obtenemos la siguiente ecuación:

$$CM = 20.900E^{0,0984t} \dots\dots\dots (1)$$

La figura NQ4 contiene el lugar geométrico de la ecuación (1).

La ecuación (1) nos permite calcular la potencia en la hora de máxima generación a partir del año 1.958.

b) Potencia mínima

La potencia mínima la podemos calcular utilizando la ecuación siguiente:

$$Cm = 0,354 CM \dots\dots\dots (2)$$

La ecuación (2) es de la forma

$$Cm = a CM$$

En la que:

CM = potencia máxima en Kw.

Cm = potencia mínima en Kw.

a = valor medio aritmético de las razones de carga mínima a carga máxima (Tabla NQ2)

c) Potencias de generación

De las ecuaciones (1) y (2) obtenemos para un día normal de trabajo del mes de Noviembre de 1.971, 75.000 y 26.500 Kw. para las horas de máxima y mínima generación, respectivamente.

Asumiendo un factor de potencia de 0,94 -- atrasado para la potencia máxima y de 1 para la potencia mínima, las potencias aparentes serán:

Generación máxima

$$S = \frac{CM}{\cos \theta} = 79.700 \text{ KVA.}$$

Generación mínima

$$S = \frac{Cm}{\cos \theta} = 26.500 \text{ KVA.}$$

d) Concentración de cargas

Los valores de las cargas y los puntos de concentración de las mismas se indican en las tablas 3 y 4 y en la Figura N^o2.

C.- TIPO Y LOCALIZACION DE FALLAS

Son varios los disturbios transitorios que amenazan en mayor o menor grado la estabilidad de un sistema eléctrico. Los más severos son los cor-tocircuitos o fallas.

La falla trifásica es la que en mayor grado afecta la estabilidad de un sistema, seguida en

PUNTOS DE CONCENTRACION, VALORES NOMINALES Y VALORES POR UNIDAD (P.U.)
DE LAS CARGAS PARA LA HORA DE MAXIMA GENERACION.-

FIG. NO 2

PUNTO DE CONCENTRACION DE LAS CARGAS	CARGA EN KVA.	VALORES POR UNIDAD (P.U.) DE LAS CARGAS SP.U. = P + JQ.	VALORES POR UNIDAD DE LAS IMPEDANCIAS DE LAS CARGAS (Zp.u)
C	16.000	1,201 + J 0,436	0,738 + J 0,268
D	7.000	0,526 + J 0,191	1,677 + J 0,609
E	12.000	0,9024 + J 0,3275	0,98 + J 0,355
F	34.700	2,61 + J 0,947	0,339 + J 0,123
G	10.000	0,752 + J 0,273	1,175 + J 0,4265

PUNTOS DE CONCENTRACION, VALORES NOMINALES Y VALORES POR UNIDAD (P.U)
 DE LAS CARGAS PARA LA HORA DE MINIMA GENERACION.-

PUNTO DE CONCENTRACION DE LAS CARGAS.FIG.NO2	CARGA EN KVA.	VALORES POR UNIDAD DE LAS CARGAS SP.U = P + J Q	VALORES POR UNIDAD DE LAS IMPERANCIAS DE CARGA Z P.U.
C	3.800	0,304 + J 0	11,36 + J 0
D	1.100	0,088 + J 0	3,385 + J 0
E	7.000	0,56 + J 0	1,785 + J 0
F	6.600	0,528 + J 0	1,892 + J 0
G	8.000	0,64 + J 0	1,56 + J 0

magnitud por las fallas de dos líneas a tierra, línea a línea y línea a tierra.

Las fallas más frecuentes son las de línea a tierra y las menos frecuentes las trifásicas. Sporn y Muller (3) dan los siguientes datos referentes a fallas de diferentes tipos ocurridos a un grupo de líneas de transmisión, la mayoría de las cuales se operaban a 132 KV.

Fallas de línea a tierra	58
" de 2 líneas a tierra	8
" trifásicas	<u>6</u>
Total...	72

Es práctica común asumir que un sistema eléctrico es suficientemente estable cuando soporta fallas de 2 líneas a tierra (4). Por esta razón en nuestro estudio analizaremos solamente los efectos transitorios producidos por fallas de 2 líneas a tierra y su consiguiente seccionalización.

Los puntos en los cuales se asume que ocurrirán las fallas para las condiciones de máxima y mínima generación se indican con letras minúsculas en la figura N°2.

Una falla de cualquier tipo se la representa por una admitancia conectada a la malla de secuencia positiva entre el punto de falla y tierra.

En un cortocircuito de 2 líneas a tierra, la admitancia de falla Y_F está dada por la siguiente ecuación.

$$Y_F = Y_0 + Y_2$$

En la que:

Y_0 = admitancia de secuencia cero, vista desde los puntos de falla.

Y_2 = admitancia de secuencia negativa, vista desde los puntos de falla.

Las mallas que representan las condiciones de falla y post-falla, las podemos reducir a un circuito π equivalente (Figura NQ5). Los valores de las admitancias del circuito π equivalente que representan cada una de las condiciones de falla y post-falla se indican en las tablas Nos. 5 y 6. (Apéndice NQA)

D.- CONSTANTES DE INERCIA

Por ser las fuentes impulsoras de los generadores de diferentes tipos, la energía almacenada en cada unidad de generación se la ha calculado en base a los datos obtenidos para cada caso, así tenemos:

Turbina a gas. - Se ha obtenido del fabricante -- los siguientes datos (5):

	Velocidad		WR^2
Generador	3.600	r.p.m.	11.090 Lb-pie ²
Turbina	5.100	r.p.m.	48.100 Lb-pie ²

VALORES DE ADMITANCIAS DEL CIRCUITO π EQUIVALENTE PARA LAS CONDICIONES DE FALLA Y POST-FALLA . (FIG. N° 5).
CARGA MAXIMA.-

CONDICIONES DE FALLA			CONDICIONES DE POST - FALLA				
PUNTOS DE FALLA FIG. N°2	Y _{AB}	Y _{AD}	Y _{B0}	TRAMO DE LINEA DESCONECTADA FIG. N° 2	Y _{AB}	Y _{AD}	Y _{B0}
J	1,46 -95°46'	6,1 -84°45'	7,5 -73°58'	G C D E	3,77 -99°54'	1,244-25°30'	3,075-26°20'
L	1,05 -95°31'	6,73 -86°11'	8,73 -78°36'	G C D E	3,77 -99°54'	1,244-25°30'	3,075-26°20'
m	1,05 -95°31'	6,73 -86°11'	8,73 -78°36'	G E	3,7 -101°36'	1,615-25°30'	3,47 -28°11'
n	1,3 -93°42'	6,5 -85°17'	7,91 -75°34'	G E	3,7 -101°36'	1,615-25°30'	3,47 -28°11'
c	1,48 -94°14'	6,24 -85°21'	7,14 -73°45'	G C D E	3,77 -99°54'	1,244-25°30'	3,075-26°20'

TABLA Nº 6

VALORES DE LAS ADMITANCIAS DEL CIRCUITO \hat{Y} EQUIVALENTE PARA LAS CONDICIONES DE FALLA Y POST-FALLA (FIGURA Nº 5).

CARGA MINIMA.-

CONDICIONES DE FALLA			CONDICIONES DE POST - FALLA									
PUNTOS DE FALLA FIG. Nº2	Y _{AB}	Y _{AD}	Y _{BD}	TRAMO DE LINEA DESD FIG. Nº2	Y _{AB}	Y _{AD}	Y _{BD}					
j	1,18	-91°48'	6,4	-87°21'	4,58	-85°11'	3,49	-94°18'	0,908	-2°55'	0,82	-3°13'
l	0,996	-92°48'	6,4	-87°2'	5,14	-86°34'	3,49	-94°18'	0,908	-2°55'	0,82	-3°13'
m	0,996	-92°48'	6,4	-87°2'	5,14	-86°34'	3,33	-94°26'	0,814	-2°46'	0,837	-3°6'
n	1,146	-92°22'	6,41	-86°53'	4,75	-85°37'	3,33	-94°26'	0,814	-2°46'	0,737	-3°6'
c	1,161	-92°16'	6,28	-86°56'	4,67	-85°32'	3,49	-94°18'	0,908	-2°46'	0,82	-3°6'

Accesorios 3.600 r.p.m. 7.377 lb-pie²

La energía almacenada en cada una de las partes rotativas de una unidad, la obtenemos aplicando la siguiente ecuación:

$$M = 1,28 \times 10^{-12} \frac{WR^2 n^2}{f} \dots\dots(3)$$

En la que:

M = constante de inercia en Mega joules - segundo por grado eléctrico.

WR^2 = momento de inercia en lb - pie²

n = velocidad en revoluciones por minuto

f = frecuencia en ciclos por segundo

La energía total almacenada en cada unidad de generación es igual a la suma de la energía almacenada en cada una de sus partes rotativas.

Turbinas a vapor. - En estas unidades, turbina y generador giran a la misma velocidad angular, por estar directamente acoplados entre sí.

Usaremos curvas precalculadas (6) que nos dan la constante de inercia H en función de la velocidad y capacidad de cada unidad generadora.

La energía almacenada la calculamos utilizando la siguiente ecuación (7):

$$M = \frac{G H}{180 f} \dots\dots\dots(4)$$

En la que:

M = constante de inercia en MJ - segundo por grado eléctrico.

H = constante de inercia en Mega joules por MVA.

G = capacidad de régimen de la máquina en -- MVA.

f = frecuencia en ciclos por segundo.

Planta a Diesel.- Todas las unidades de generación de esta planta están provistas de volantes de hierro.

Para el cálculo de la energía almacenada en el generador utilizamos la ecuación (3) en la que tomamos $H = 2$ (8).

Un ejemplo de los pasos seguidos en el cálculo de la energía almacenada en las unidades de generación de la Planta a Diesel se ilustra en el Apéndice B.

En las tablas Nos. 7 y 8, se indican los resultados obtenidos en los cálculos de la energía almacenada en las máquinas que forman el sistema en estudio.

NUMERO DE UNIDADES	FUENTE DE IMPULSION	VELOCIDAD EN RPM	GENERADOR							M TOTAL ($\frac{MJ}{SEG}$ / $\frac{EO}{EO}$)	M P.U.
			KVA.	KV.	H EN ($\frac{MJ}{MVA}$)	M EN ($\frac{MJ}{SEG.}$ / $\frac{EO}{EO}$)	WR ² EN (lb - PIE ²)	M EN ($\frac{MJ}{MVA}$)			
1	MOTOR DIES	171.4	324	4.16	2	0.6	0.6×10^{-4}	708.4×10^3	4.48×10^{-4}	5.082×10^{-4}	0.406×10^{-4}
1	"	171.4	324	4.16	2	0.6	0.6×10^{-4}	414.5×10^3	2.56×10^{-4}	3.16×10^{-4}	0.253×10^{-4}
1	"	164	438	4.16	2	0.81	0.81×10^{-4}	780.81×10^3	4.12×10^{-4}	4.93×10^{-4}	0.294×10^{-4}
1	"	164	1000	4.16	2	1.85	1.85×10^{-4}	1352.4×10^3	7.76×10^{-4}	9.61×10^{-4}	0.77×10^{-4}
3	"	720	1250	4.16	2	2.31	2.31×10^{-4}	2.62×10^3	0.295×10^{-4}	7.815×10^{-4}	0.625×10^{-4}
3	"	277	1875	4.16	2	3.47	3.47×10^{-4}	314.5×10^3	5.15×10^{-4}	25.86×10^{-4}	2.07×10^{-4}
2	"	128.5	2625	4.16	2	4.86	4.86×10^{-4}	2584.2×10^3	9.1×10^{-4}	27.92×10^{-4}	2.23×10^{-4}

LISTA DE MAQUINAS SINCRONICAS IMPULSADAS POR TURBINAS.-

UNIDADES	FUENTE DE IMPULSION	CAPACIDAD EN KVA.	H EN $\frac{MJ}{MVA}$	GENERADOR		TURBINA VELOCIDAD EN R.P.M EN R.P.M.	M TOTAL EN (MJxSEG/E ⁰)	M P.U.
				KV.	VELOCID. EN R.P.M			
1	TURBINA A VAPOR	6250	7.24	4.16	3.600	3.600	41.9×10^{-4}	3.35×10^{-4}
1	"	6250	7.24	13.8	3.600	3.600	41.9×10^{-4}	3.35×10^{-4}
2	"	12500	6.74	13.8	3.600	3.600	156×10^{-4}	12.48×10^{-4}
1	"	35294	5.20	13.8	3.600	3.600	185.2×10^{-4}	14.7×10^{-4}
1	TURBINA A GAS	16000		13.8	3.600	5.100	317.3×10^{-4}	25.4×10^{-4}

III.- ESTUDIOS DE LA ESTABILIDAD EN ESTADO TRANSITORIO

A.- CONDICIONES INICIALES DE OPERACION

a) Generador equivalente

Asumimos que a la hora de máxima generación estarán en línea todos los generadores disponibles, y en la hora de mínima generación operarán las dos unidades de 12.500 KVA. de la Planta a Vapor y el generador de la central Estero Salado.

Utilizando el teorema Thévenin podemos reducir los generadores de la central existente a uno solo equivalente. Los valores de las reactancias de secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero del generador equivalente son:

Máxima generación	Mínima generación
$X_d' = 0,0381 \text{ p.u.}$	$X_d' = 0,0875 \text{ p.u.}$
$X_2 = 0,0272 \text{ p.u.}$	$X_2 = 0,0575 \text{ p.u.}$
$X_0 = 0,0372 \text{ p.u.}$	$X_0 = 0,0575 \text{ p.u.}$

La constante de inercia de un generador equivalente es igual a la suma de las constantes de inercia de los generadores que reemplaza, por lo tanto:

Máxima generación:

$$M_2 = 641,477 \times 10^{-4} \text{ MJxseg/E}^0$$

$$M_2 = \frac{641,477 \times 10^{-4}}{12,5} = 51,23 \times 10^{-4} \text{ p.u.}$$

Mínima generación

$$M_2 = 156 \times 10^{-4} \text{ MJ} \times \text{seg}/E^0$$

$$M_2 = \frac{156 \times 10^{-4}}{12,5} = 12,48 \times 10^{-4} \text{ p.u.}$$

El subíndice 2 expresa valores referentes a la central existente y el subíndice 1 a la central Estero Salado.

b) Voltajes internos

Para calcular los voltajes internos de los generadores 1 y 2, reducimos las redes exteriores - que representan las condiciones de máxima y mínima generación a circuitos π equivalentes (Figuras Nos. 6 y 7).

Asumimos que la central 1 entrega en el punto 6 una potencia activa de 2,56 p.u. a un voltaje de $1 \angle 0^0$ y factor de potencia 0,94 atrasado a la hora de máxima generación, y a la hora de mínima generación entrega 1,32 p.u. de potencia a un voltaje de 1 p.u. y factor de potencia 1.

Luego nos queda:

Generación máxima

$$P_1 = 2,56 \text{ p.u.}$$

$$\cos \theta_1 = 0,94$$

$$V_G = 1 \angle 0^0 \text{ p.u.}$$

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \theta_1 = 2,56 (0,363) = 0,93 \text{ p.u.}$$

$$S_1 = P_1 + jQ_1$$

$$I_1 = \frac{S_1 \text{ p.u.}}{V_G \text{ p.u.}} = 2,72 \angle -19^\circ 57' \text{ p.u.}$$

$$E_1 = V_G + I_1 X'G_1$$

$$E_1 = 1 \angle 0^\circ + (2,72 \angle -19^\circ 57')(0,0814 \angle 90^\circ) = \\ 1,094 \angle 10^\circ 57' \text{ p.u.}$$

$$I_{G0} = V_G Y_{G0} = (1 \angle 0^\circ)(2,6 \angle -21^\circ 36') = \\ 2,6 \angle -21^\circ 36' \text{ p.u.}$$

$$I_{GF} = I_1 - I_{G0}$$

$$I_{GF} = 2,72 \angle -19^\circ 57' - 2,6 \angle -21^\circ 36' = \\ 0,142 \angle 1^\circ 4' \text{ p.u.}$$

$$V_F = V_G + \frac{I_{GF}}{Y_{FG}}$$

$$V_E^f = 1 \angle 0^\circ + \frac{0,142 \angle 1^\circ 4'}{10,72 \angle -92^\circ 7'} = 1 \angle 1^\circ 50'$$

$$I_{F0} = V_F Y_{F0} = (1, \angle 1^\circ 50')(3,66 \angle -20^\circ 42') = \\ 3,66 \angle -18^\circ 52'$$

$$I_2 = I_{F0} - I_{GF}$$

$$I_2 = 3,66 \angle -18^\circ 52' - 0,142 \angle 1^\circ 4' = 3,44' \angle -20^\circ 34'$$

$$E_2 = V_F + I_2 X'G_2$$

$$E_2 = 1 \angle 1^\circ 50' + (3,44 \angle -20^\circ 34') (0,0381 \angle 90^\circ) = 1,05 \angle 7^\circ 25' \text{ p.u.}$$

Generación mínima

$$P_1 = 1,32 \text{ p.u.}$$

$$\cos \theta_1 = 1$$

$$V_G = 1 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$$

$$S_1 \text{ p.u.} = P_1 \text{ p.u.}$$

$$I_1 = \frac{S_1 \text{ p.u.}}{V_G \text{ p.u.}} = 1,32 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$$

$$E_1 = V_G + I_1 X'G_1$$

$$E_1 = 1 \angle 0^\circ + (1,32 \angle 0^\circ) (0,0814 \angle 90^\circ) = 1,02 \angle 6^\circ 9' \text{ p.u.}$$

$$I_{G0} = V_G Y_{G0} = 2,24 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{GF} = I_1 - I_{G0}$$

$$I_{GF} = 1,32 \angle 0^\circ - 2,24 \angle 0^\circ = 0,08 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$$

$$V_F = V_G + \frac{I_{GF}}{Y_{GF}}$$

$$V_F = 1 \angle 0^\circ + 0,074 \angle 90^\circ = 1 \angle 0^\circ 24' \text{ p.u.}$$

$$I_{F0} = V_F Y_{E0} = (1 \angle 0^\circ 24') (0,865 \angle 0^\circ) = 0,865 \angle 0^\circ 24'$$

$$I_2 = I_{FO} - I_{GF}$$

$$I_2 = 0,865 \angle 0^\circ 24' - 0,08 \angle 0^\circ = 0,785 \angle 0^\circ 24' \text{ p.u.}$$

$$E_2 = V_F + 12X' G_2$$

$$E_2 = 1 \angle 0^\circ 24' + (0,785 \angle 0^\circ 24') (0,0876 \angle 90^\circ) =$$

$$E_2 = 1 \angle 4^\circ 22' \text{ p.u.}$$

B.- ECUACIONES ANGULO-POTENCIA

Las ecuaciones ángulo-potencia nos permiten calcular la potencia eléctrica de salida de cada máquina en función de los desplazamientos angulares de las demás máquinas sincrónicas interconectadas entre sí.

En un sistema formado por una máquina finita interconectada a una barra infinita la ecuación - ángulo-potencia de la máquina finita es:

$$P_u = P_c + P_m \text{ Sen} (\delta - \gamma) \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

P_u = potencia eléctrica de salida del generador

$$P_c = |E_A|^2 ||Y_{AA}| \cos \theta_{AA} \dots\dots\dots (6)$$

$$P_m = |E_A| |E_B| |Y_{AB}| \dots\dots\dots (7)$$

$$\gamma = \theta_{AB} - 90^\circ \dots\dots\dots (8)$$

δ = desplazamiento angular del eje del rotor de la máquina finita con relación a la barra -

infinita.

E_A = voltaje interno de la máquina finita

E_B = voltaje de la barra infinita

Y_{AA} = admitancia propia del terminal de la máquina finita.

Y_{AB} = admitancia mútua entre los terminales de la máquina finita y la barra infinita.

Un sistema formado por dos máquinas finitas interconectadas entre sí, puede reemplazarse por un sistema equivalente formado por una máquina finita interconectada a una barra infinita.

Los valores de P_c , P_m y δ para las ecuaciones ángulo-potencia del sistema equivalente en términos del sistema formado por dos máquinas finitas se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$P_c = \frac{M_2 |E_1|^2 |Y_{11}| \cos \theta_{11} - M_1 |E_2|^2 |Y_{22}| \cos \theta_{22}}{M_1 + M_2} \dots (9)$$

$$P_m = \frac{|E_1| |E_2| |Y_{12}| \sqrt{M_1^2 + M_2^2 - 2 M_1 M_2 \cos 2 \theta_{12}}}{M_1 + M_2} \dots (10)$$

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \dots (11)$$

$$\gamma = - \tan^{-1} \left[\frac{M_1 + M_2}{M_1 - M_2} \tan \theta_{12} \right] - 90^\circ \dots (12)$$

En las que:

M_1 y M_2 = constante de inercia de las máquinas finitas.

E_1 y E_2 = voltajes internos de las máquinas finitas.

δ_1 y δ_2 = desplazamientos angulares de los ejes de las máquinas finitas con relación al eje de rotación sincrónica.

Y_{11} y Y_{22} = admitancias propias de los terminales de las máquinas finitas.

Y_{12} = admitancia mutua entre los terminales de las máquinas finitas.

Reemplazando el sistema en estudio por un sistema compuesto por una máquina finita y una barra infinita, obtenemos para las condiciones de falla y post-falla las ecuaciones ángulo-potencia indicadas en las tablas Nos. 9 y 10, 11 y 12. (Apéndice A)

En el cálculo de las ecuaciones ángulo-potencia se han hecho las siguientes suposiciones:

1. Que las impedancias de las cargas son constantes.
2. Que los generadores, transformadores y líneas de transmisión contienen solamente reactancias inductivas.

ECUACIONES ANGULO-POTENCIA PARA LAS CONDICIONES DE FALLA. (CARGA MINIMA)

PUNTOS DE FALLA FIG. N.º 2	P_C	P_M	γ	$P'_U = P_C + P_M \text{ Sen } (\delta + \gamma)$
J	-0,052	1,19	0°	-0,051 + Sen ($\delta + 0^\circ$)
L	-0,002	1	0°	-0,002 + Sen ($\delta + 0^\circ$)
m	-0,002	1	0°	-0,002 + Sen ($\delta + 0^\circ$)
n	-0,03	1,15	0°	-0,03 + 1,15Sen ($\delta + 0^\circ$)
c	-0,036	1,17	0°	-0,036 + 1,17Sen ($\delta + 0^\circ$)

TABLA Nº 10

ECUACIONES ANGULO-POTENCIA PARA LAS CONDICIONES DE POST-FALLA
(CARGA MINIMA).--

TRAMO DE LINEA DESCONECTADA. FIG. Nº2	P_C	P_M	δ	$P_U = P_C + P_M \text{ Sen } (\delta - \gamma)$
G C D E	0,001	3,52	0°	0,001 + 3,52 Sen ($\delta + 0^\circ$)
G E	0,001	3,36	0°	0,001 + 3,36 Sen ($\delta + 0^\circ$)

TABLA NO 11

ECUACIONES ANGULO-POTENCIA PARA LAS CONDICIONES DE FALLA

CARGA MAXIMA.-

PUNTOS DE FALLA FIG. NO 2	P_c	P_M		$P_U = P_c + P_M \text{Sen}(\delta - \delta')$
j	-0,0906	1,67	$-3^{\circ}12'$	$-0,0906 + 1,67 \text{Sen}(\delta + 3^{\circ}12')$
l	-0,07	1,2	$-2^{\circ}48'$	$-0,07 + 1,2 \text{Sen}(\delta + 2^{\circ}48')$
m	-0,07	1,2	$-2^{\circ}48'$	$-0,07 + 1,2 \text{Sen}(\delta + 2^{\circ}48')$
n	-0,046	1,49	$-2^{\circ}3'$	$-0,046 + 1,49 \text{Sen}(\delta + 2^{\circ}3')$
e	-0,063	1,65	$-2^{\circ}3'$	$-0,063 + 1,65 \text{Sen}(\delta + 2^{\circ}21')$

TABLA NO 12

ECUACIONES DE ANGULO-POTENCIA PARA LAS CONDICIONES DE POST-FALLA

(CARGA MAXIMA).-

TRAMO DE LINEA DESCONECTADO FIG. NO 2	P_C	P_M	δ	$P_U'' = P_C + P_M \text{Sen}(\delta - \delta')$
G C D E	-0,076	4,28	$-5^{\circ}29'$	$-0,076 + 4,28 \text{Sen}(\delta + 5^{\circ}29')$
G E	0,096	4,2	$-6^{\circ}30'$	$0,096 + 4,2 \text{Sen}(\delta + 6^{\circ}30')$

3. Que el voltaje detrás de la reactancia transiente y la potencia mecánica de entrada a los generadores permanecen constantes bajo condiciones de falla.

La potencia de entrada del generador del sistema equivalente está dada por la siguiente ecuación:

$$P_1 = \frac{M_2 P_{11} - M_1 P_{12}}{M_1 + M_2} \dots\dots\dots (13)$$

Donde:

P_{11} y P_{12} = potencia mecánica de entrada a las máquinas finitas.

M_1 y M_2 = constantes de inercia de las máquinas finitas.

Como se puede observar en el diagrama unifilar del sistema en estudio (Fig. NQ2), al producirse una falla en cualquier punto del anillo a 69 Kv., ésta se despejará con la operación de los interruptores 1 - 2 ó 3 - 4.

Al quedar fuera de servicio las subestaciones -- alimentadas por el tramo de línea desconectado, disminuirán: la potencia eléctrica de salida y la potencia mecánica de entrada de los generadores 1 y 2. Como la potencia mecánica de entrada P_1 al generador equivalente, es función de P_1 y P_2 , al variar éstas, también variará P_1 .

En el cálculo de la potencia mecánica de entrada al generador equivalente para la condición de post --

falla, asumiremos que la disminución de la carga externa afecta proporcionalmente a los valores - que P_1 y P_2 tenían al momento de producirse la - falla; por lo tanto nos queda:

Condición de pre-falla

Generación máxima

$$P_1 = 2,56 \text{ p.u.} \rightarrow 43\%$$

$$P_2 = 3,44 \text{ p.u.} \rightarrow 57\%$$

$$P_i = \frac{51,23(2,56) - 14,7(3,44)}{65,93} = 1,22 \text{ p.u.}$$

Generación mínima

$$P_1 = 1,32 \text{ p.u.}$$

$$P_2 = 0,8 \text{ p.u.}$$

$$P_i = \frac{12,48(1,32) - 14,7(0,8)}{27,18} = 0,173 \text{ p.u.}$$

Condiciones de post-falla (Ver Fig. Nº2)

Generación máxima

Tramo de línea desconectado: GCDE

Disminución de potencia: 1,73 p.u. (MW)

$$P_1 = 1,82 \text{ p.u.} \quad 2,56 - (1,73 \times 0,4) = 1,82$$

$$P_2 = 2,45 \text{ p.u.} \quad 3,44 - (1,73 \times 0,2) = 2,45$$

$$P_i = \frac{51,23(1,82) - 14,7(2,45)}{65,93} = 0,868 \text{ p.u.}$$

Tramo de línea desconectado: G E

Disminución de potencias: 0,902 p.u.

$$P_1 = 2,17 \text{ p.u.}$$

$$P_2 = 2,92 \text{ p.u.}$$

$$P_1 = \frac{51,23 (2,17) - 14,7 (2,92)}{65,93} = 1,035 \text{ p.u.}$$

Generación mínima

Tramo de línea desconectado: GCDE

Disminución de potencia: 0,392 p.u. *see table # 4*

$$P_1 = 1,08 \text{ p.u.}$$

$$P_2 = 0,65 \text{ p.u.}$$

$$P_1 = \frac{12,48 (1,08) - 14,7 (0,65)}{27,18} = 0,144 \text{ p.u.}$$

Tramo de línea desconectado: GE

Disminución de potencia: 0,56 p.u.

$$P_1 = 0,97 \text{ p.u.}$$

$$P_2 = 0,59 \text{ p.u.}$$

$$P_1 = \frac{12,48 (0,97) - 14,7 (0,59)}{27,18} = 0,126 \text{ p.u.}$$

C.- DESPLAZAMIENTO ANGULAR CRITICO Y TIEMPO CRITICO
DE DESPEJE

a) Desplazamiento angular crítico

El movimiento de toda máquina sincrónica en un sistema de potencia está gobernado por la ecuación

diferencial siguiente:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_i - P_u = P_a \dots\dots\dots(14)$$

En la que:

M = constante de inercia

δ = desplazamiento angular del eje del rotor de la máquina con relación al eje de rotación sincrónica.

P_i = potencia mecánica de entrada al eje del generador.

P_u = potencia eléctrica de salida del generador.

P_a = potencia de aceleración.

Al producirse un disturbio transitorio, se rompe el equilibrio entre la potencia de entrada y potencia de salida de la máquina, dando lugar a una potencia resultante P_a . Por acción de P_a , el ángulo δ puede oscilar hasta estabilizarse en un nuevo valor de trabajo, o incrementar indefinidamente. Si δ tiende a incrementar indefinidamente, la máquina perderá su sincronismo, a menos que el disturbio transitorio se elimine antes que δ sobrepase un valor crítico permisible δ_c .

Para analizar las variaciones del ángulo δ , podemos escribir la ecuación (10) en la siguiente forma:

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta} \dots\dots\dots(15)$$

$\omega' = \frac{d\delta}{dt}$ = diferencia entre la velocidad del rotor de la máquina y la velocidad sincrónica.

La máquina alcanzará su estado de reposo con relación al eje de rotación sincrónica cuando se cumpla la siguiente condición:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_m} P_a d\delta = 0 \dots\dots\dots(16)$$

La ecuación (11) puede interpretarse gráficamente como la suma de las áreas comprendidas entre las curvas P_1 vs δ y P_u' vs δ limitadas por los ángulos inicial δ_0 y máximo δ_m . (Figura N°8).

La máquina alcanzará su estado de reposo con relación al eje de rotación sincrónica, cuando la suma de la porción de área positiva A_1 y la porción de área negativa A_2 sea igual a cero.

A este método de análisis de la estabilidad transitoria se lo denomina "Criterio de Igualdad de Areas".

Al aplicar el Criterio de Igualdad de Areas al análisis de los efectos transitorios ocasionados al sistema en estudio, pueden presentarse los siguientes

casos:

1er. Caso:

En la figura N98 el punto de operación inicial del sistema se encuentra en a, sobre la curva Pu al producirse la falla, el punto de trabajo cae bruscamente a b sobre la curva P'u, originando una potencia de aceleración Pa representada por la magnitud $\overline{a-b}$.

El ángulo δ incrementará de su valor inicial δ_0 a su valor máximo δ_m , valor en el cual el área positiva A_1 es igual al área negativa A_2 , - condición suficiente para que el sistema sea estable. Luego oscilará entre los valores inicial δ_0 y máximo δ_m , hasta estabilizarse en nuevo valor de trabajo δ_s . Esto significa que el sistema puede soportar por tiempo indefinido falles de esta naturaleza.

La suposición de que el voltaje detrás de la reactancia transiente se mantiene constante bajo condiciones de falla, es válida para cortos períodos de tiempo. Al producirse la falla, la corriente de excitación del campo incrementa bruscamente tratando de contrarrestar la acción desmagnetizante de la corriente de la armadura y el flujo engarzado al circuito del campo permanece ligeramente menor a su valor normal durante el -

tiempo de la primera oscilación de δ , luego la corriente de excitación del campo disminuye y por consiguiente el flujo engrazado a éste, y el sistema aunque se mantuvo estable durante el tiempo de la primera oscilación de δ , puede posteriormente perder la estabilidad. La constante de tiempo de la curva de decremento de la corriente del campo, es del orden de 2 a 5 segundos. (Ref.9)

2º Caso:

Al producirse la falla, el punto a de -- operación inicial del sistema cae bruscamente al punto b sobre la curva Pu' , dando origen a la potencia de aceleración representada por la magnitud \overline{ab} . (Fig. 9)

El ángulo δ incrementa a partir de su valor inicial δ_0 , mientras la potencia de aceleración decrementa hasta reducirse a cero en el punto c correspondiente a un desplazamiento angular δ_1 . En el punto c se origina una potencia de retardación la misma -- que incrementa de valor, alcanza un valor máximo y luego decrementa hasta reducirse a cero en el punto d; a partir de d, nuevamente se origina una potencia de aceleración -- con valor inicial cero. En el punto e el --

área positiva A_1 es mayor que el área negativa A_2 ; la diferencia en el valor de las áreas positivas y negativas, se incrementará a partir de \underline{g} y tenderá a incrementar indefinidamente.

Para que el sistema no pierda estabilidad, la falla debe despejarse antes que la desviación angular de δ , sobrepase su valor crítico δ_c .

El despeje de cualquier falla ocurrida en el anillo a 69 KV. del sistema en estudio, ocasiona la disminución de la carga eléctrica externa, y al disminuir ésta, también disminuirá la potencia mecánica de entrada al generador equivalente.

El valor de la potencia mecánica de entrada al generador para la condición de post falla, está representada en la figura por P'_{i} .

Al despejarse la falla, para una desviación angular crítica δ_c , el punto de trabajo salta bruscamente de f sobre la curva $P'u$ a h sobre la curva $P''u$, originando la potencia de retardación representada por la magnitud \overline{gh} . El ángulo δ sigue incrementando, mientras la potencia de retardación decrece hasta reducirse a cero en el punto k , pa-

ra una desviación angular máxima δ_m .

El punto K en el que la suma de las áreas positivas A_2 y A_4 es igual a la suma de las áreas negativas A_1 y A_3 , es el nuevo punto de trabajo del sistema.

b) Tiempo crítico de despeje

Todo ángulo crítico tiene su correspondiente "tiempo crítico de despeje". En el cálculo de los tiempos críticos usaremos soluciones gráficas de la ecuación de balanceo obtenidas con el integrador M.I.T. (10). Las soluciones gráficas se conocen con el nombre de "curvas pre-calculadas" y se han graficado en términos de una variable sin dimensiones denominada "constante de tiempo modificada σ ".

σ está definida por:

$$\sigma = t_c \sqrt{\frac{f \times P_M}{180 M}} \dots\dots\dots(17)$$

Donde:

t_c = tiempo crítico de despeje

f = frecuencia en ciclos por segundo

M = energía cinética almacenada a velocidad en régimen en MJ.seg/ ϵ^0

Previa la aplicación de las curvas pre-calculadas

ladas es necesario conocer los valores de p y $\text{Sen } \delta'_0$.

p y $\text{Sen } \delta'_0$ están definidas por:

$$p = \frac{P_1 - P_c}{P_M} \quad \text{y} \quad \delta'_0 = \delta_0 - \gamma$$

P_1 , P_c , P_M y γ fueron definidos por las ecuaciones (13), (9), (10) y (12) respectivamente.

Los ángulos y tiempos críticos de despeje obtenidos para cada una de las fallas estudiadas se indican en la Tabla N°13.

ANGULOS CRITICOS Y TIEMPOS CRITICOS DE DESPEJE PARA FALLAS DE 2^a - T OCURRIDAS EN LA HDRA DE MAXIMA CARGA.

PUNTOS DE FALLA FIG. Nº 2	TRAMO DE LINEA DESCONECTADO FIG. Nº 2	ANGULO CRITICO DE DESPEJE.	TIEMPO CRITICO DE DESPEJE. t_c
J	G C D E	148°	0,973 Seg
l	G C D E	127,75°	0,65 Seg
m	G E	128°	0,66 Seg
n	G E	139,75°	0,735 Seg
c	G C D E	151,25°	0,805 Seg



SECRETARIA

IV.- INTERRUPTORES DE POTENCIA

De los resultados obtenidos en el Capítulo III, observamos que en todas las fallas estudiadas, los tiempos críticos de despeje se encuentran en el rango de 0,65 - 0,973 segundos (39 - 58 ciclos).

La protección contra fallas ocurridas en el anillo a 69 KV., puede coordinarse convenientemente utilizando interruptores con un mecanismo de operación - de ocho ciclos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el desarrollo de la presente Tesis, demuestran que el sistema eléctrico que servirá a la ciudad de Guayaquil en el año 1.971, tendrá excelentes características de estabilidad transitoria, lo que permitirá conseguir una adecuada coordinación del sistema de protección, usando dispositivos de tipo corriente.

La selección final de los interruptores de potencia, debe realizársela en base a un estudio de las corrientes de fallas, para poder determinar la capacidad de interrupción de cada uno de ellos.



SECRETARIA

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Ing. Roberto Yannuzzelli, Tesis de Grado, Páginas 12, 13 y 14. 1.967
- 2.- Departamento de Producción, EMPRESA ELECTRICA DEL ECUADOR INC. Curvas diarias de carga.
- 3.- PHILIP SPORN and C.A. MULLER, "Five years Experience with Ultrahigh-Speed Reclosing of High Voltage Transmission Lines, A.I.E.E. Trans., Vol. 60, Páginas 241-246, Mayo de 1.941
- 4.- E.W. KIMBARK, "Power System Stability". Vol. I, New York, John Wiley & Sons, Inc. 1964, Capítulo VI, Página 224.
- 5.- GENERAL ELECTRIC, Specification Control Settings & Operating Sequences. Vol. 185A963, Sec. 2, Página 1. Enero 1.967.
- 6 y 8.- A. I. E. E. Subcomites on Interconnection and Stability Factors, "First Report of Power System Stability". Elec. Eng. Vol. 56. Páginas 261-268, Febrero 1.937
- 7.- W. D. STEVENSON, Jr., "Elements of Power System Analysis", New York, Mc Graw Hill Book Company, Inc. 1962 Capítulo 15, Página 338.
- 9.- E. W. KIMBARK, "Power System Stability", Vol. I, New York, John Wiley & Sons Inc. 1964, Cap. IV Página 123.

10.- I. H. SUMMERS and J. B. Mc CLURE, "Progress in the -
Study of System Stability". A. I. E. E. Trans., Vol.
49, Páginas 132-158, Enero de 1.930.

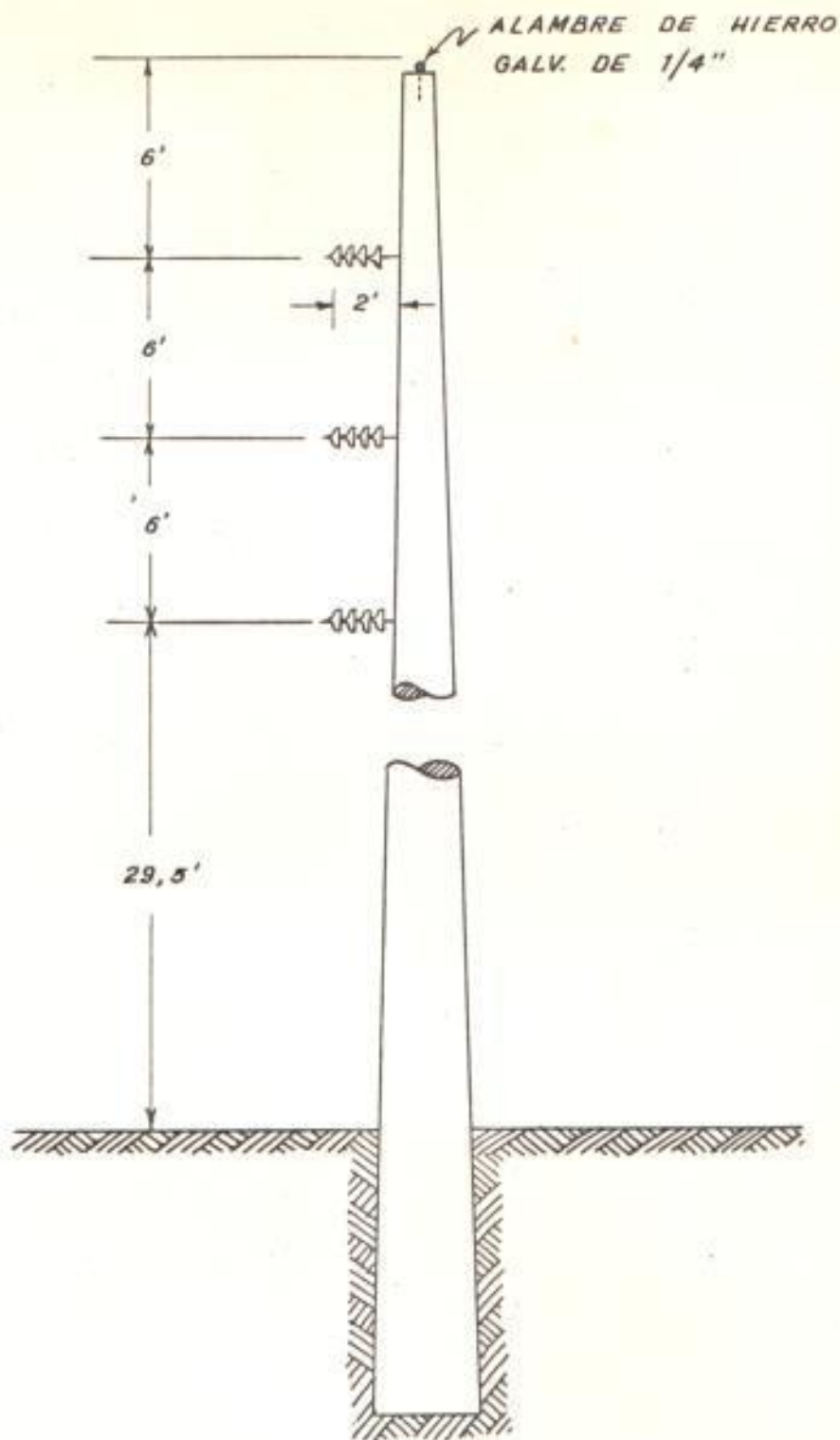


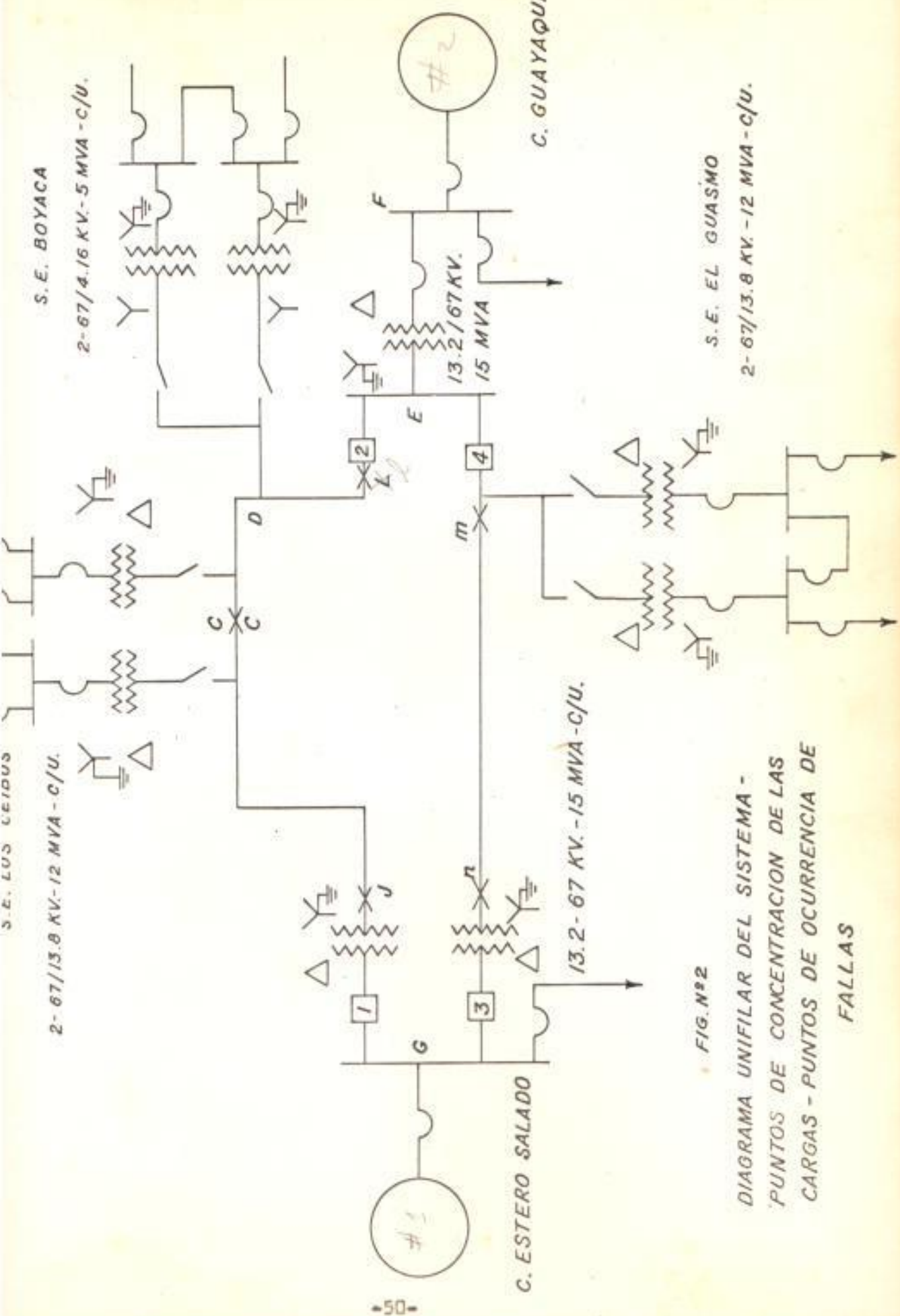
FIG. Nº 1

DISPOSICION DE LOS CONDUCTORES DE FASE Y LA LINEA DE PROTECCION CONTRA DESCARGAS DIRECTAS DE LA RED A 69 KV.

2-67/13.8 KV.-12 MVA -C/U.

S.E. BOYACA

2-67/4.16 KV.-5 MVA -C/U.



C. ESTERO SALADO

13.2-67 KV.-15 MVA -C/U.

m

4

E

F

13.2/67 KV. 15 MVA

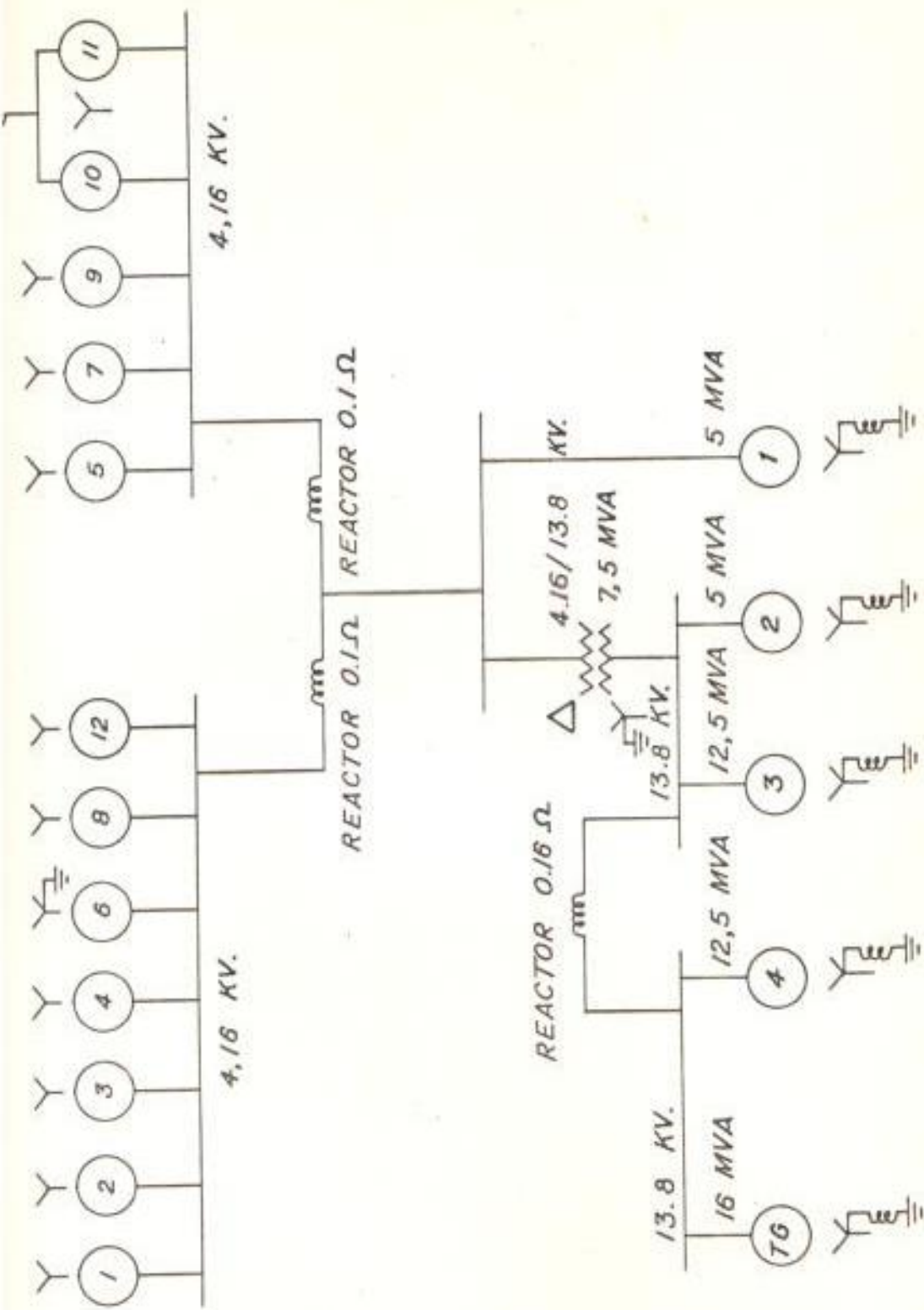
C. GUAYAQUIL

FIG. N°2

DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA -
 PUNTOS DE CONCENTRACION DE LAS
 CARGAS - PUNTOS DE OCURRENCIA DE
 FALLAS

S.E. EL GUASMO

2-67/13.8 KV.-12 MVA -C/U.



TURBINA A GAS

PLANTA A VAPOR

FIG. N° 3

DIAGRAMA UNIFILAR DE LA CENTRAL EXISTENTE

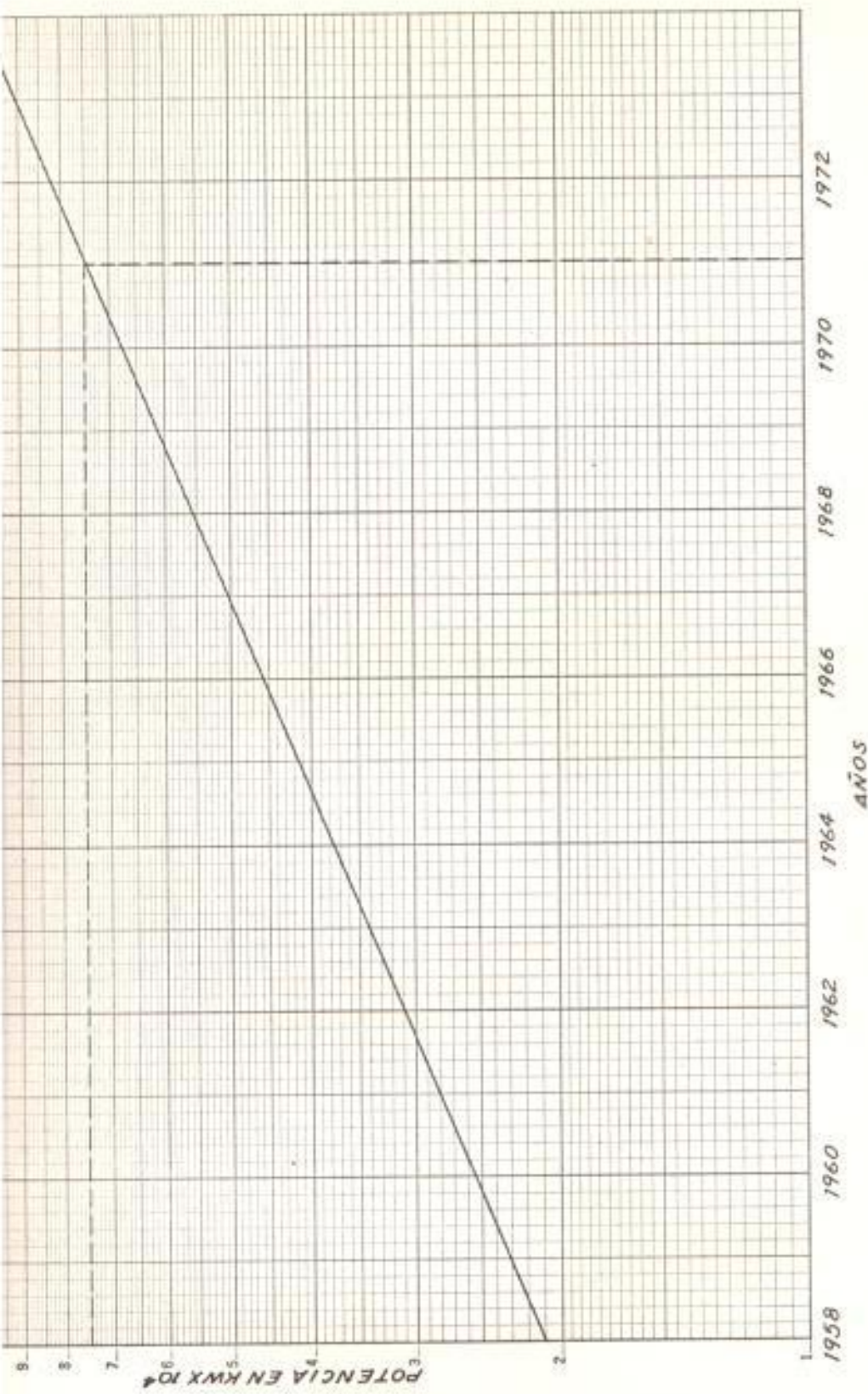
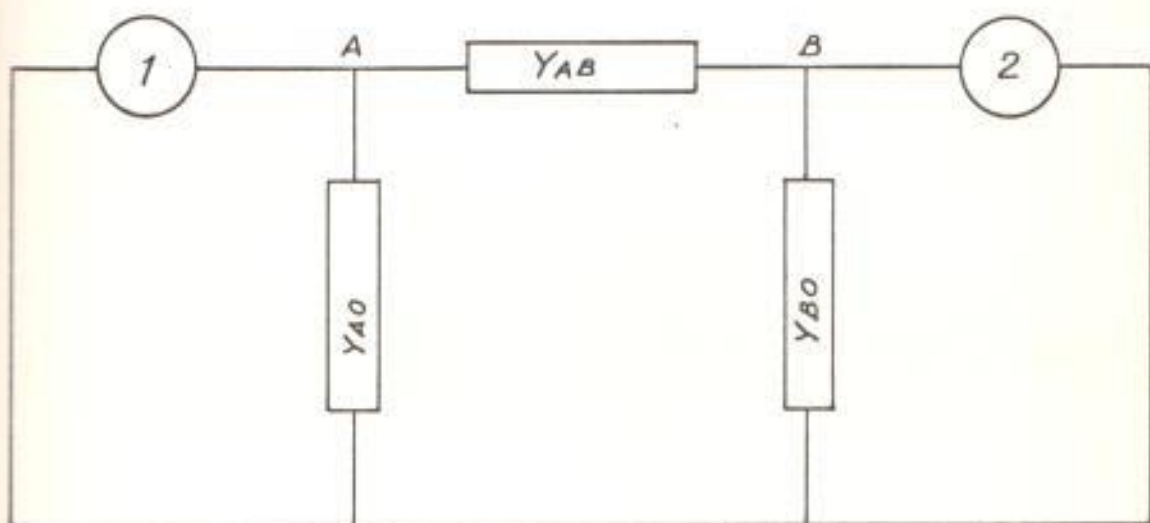


FIG Nº4
 CURVA DE INCREMENTO ANUAL DE CARGA, PARA LA HORA
 DE MAXIMA GENERACION (MES DE NOVIEMBRE)



1- CENTRAL ESTERO SALADO

2- CENTRAL EXISTENTE

FIG. Nº 5

CIRCUITO π EQUIVALENTE DE LAS CONDICIONES DE FALLA
Y POST FALLA

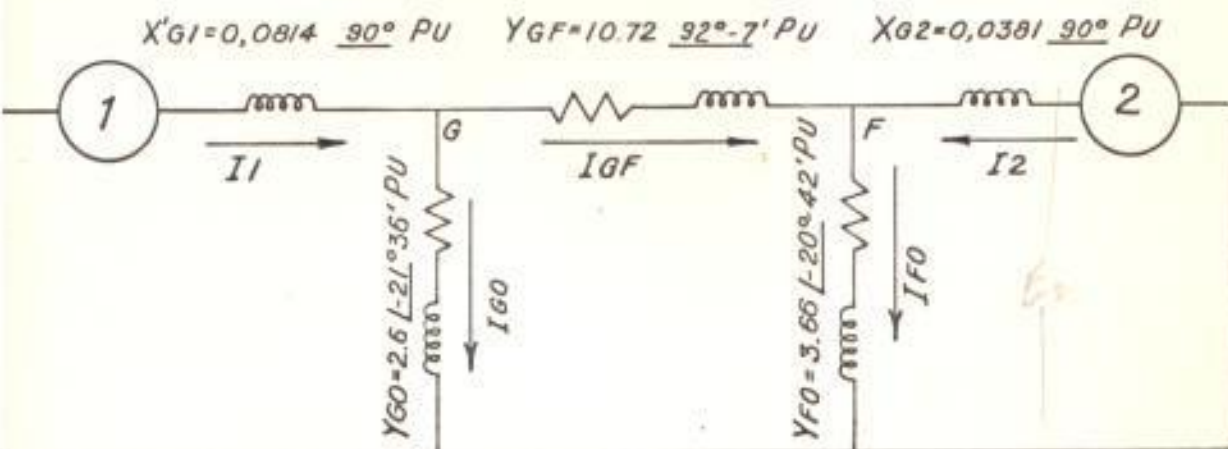


FIG. Nº 6

CIRCUITO π EQUIVALENTE DE LA CONDICION DE PREFALLA PARA CARGA MAXIMA

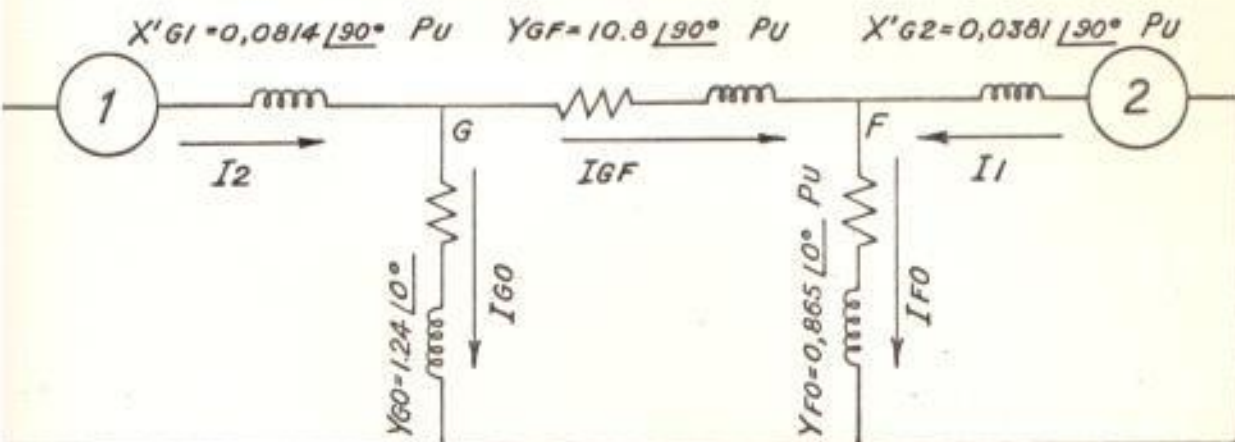
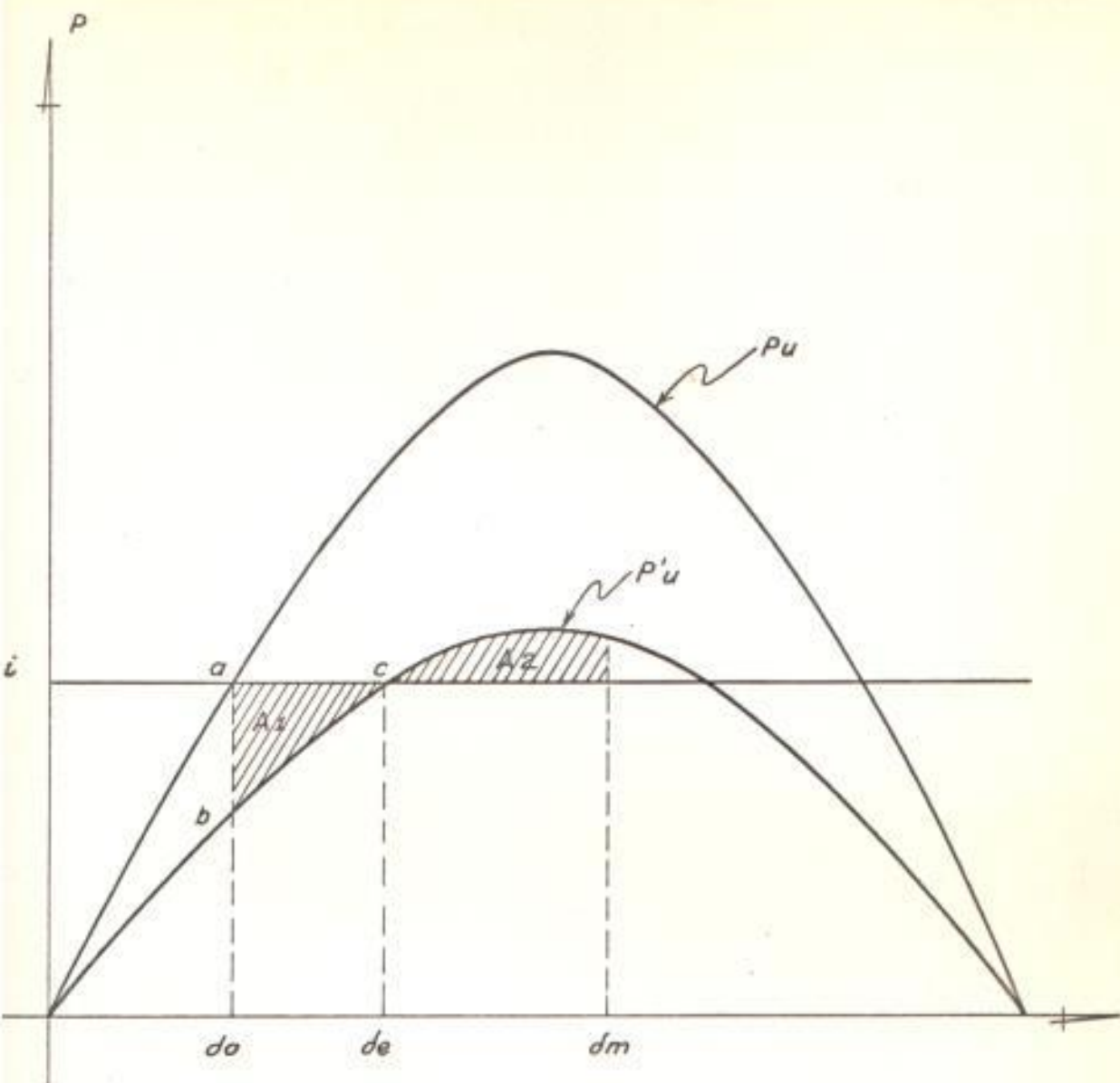


FIG. Nº 7

CIRCUITO π EQUIVALENTE DE LA CONDICION DE PREFALLA PARA CARGA MINIMA



P_i = POTENCIA MECANICA DE ENTRADA AL GENERADOR

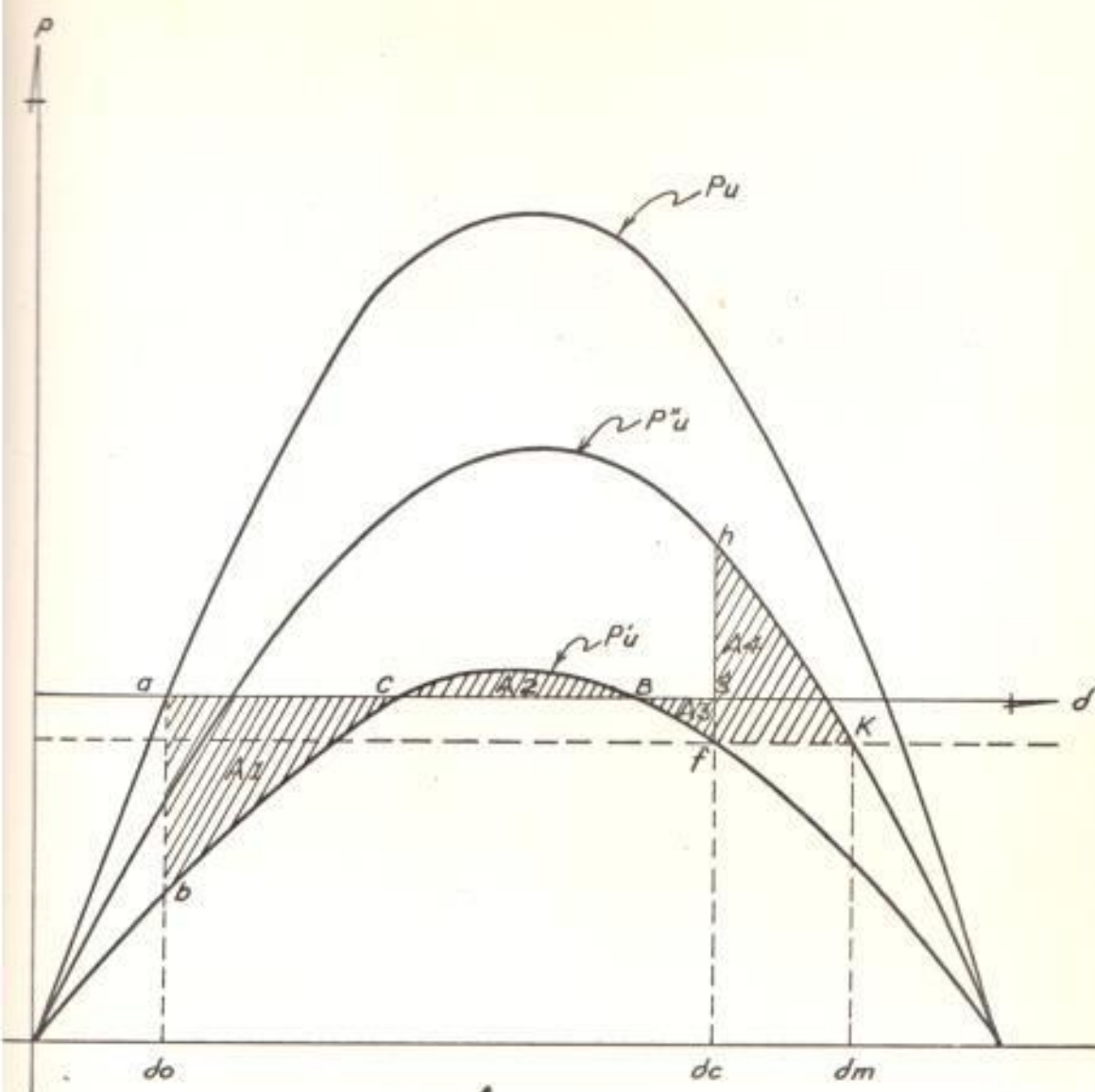
P_u = POTENCIA ELECTRICA DE SALIDA PARA LA CONDICION DE PRE-FALLA

P'_u = POTENCIA ELECTRICA DE SALIDA PARA LA CONDICION DE FALLA

δ = DESPLAZAMIENTO ANGULAR DEL EJE DEL ROTOR CON RELACION AL EJE DE ROTACION SINCRONICA

FIG. N° 8

CRITERIO DE IGUALDAD DE AREAS APLICADO A UNA FALLA SOSTENIDA



- P_u = POTENCIA MECANICA DE ENTRADA AL GENERADOR PARA LA CONDICION DE PRE-FALLA
- P'_u = POTENCIA MECANICA DE ENTRADA PARA LA CONDICION DE POST-FALLA
- P_u = POTENCIA ELECTRICA DE SALIDA PARA LA CONDICION DE PRE-FALLA
- P_u = POTENCIA ELECTRICA DE SALIDA PARA LA CONDICION DE POST-FALLA
- d = DESPLAZAMIENTO ANGULAR DEL EJE DEL ROTOR CON RELACION AL EJE DE ROTACION SINCRONICO.

FIG. N° 9

CRITERIO DE IGUALDAD DE AREAS APLICADO A UNA FALLA DESPEJADA A UN ANGULO CRITICO d_c

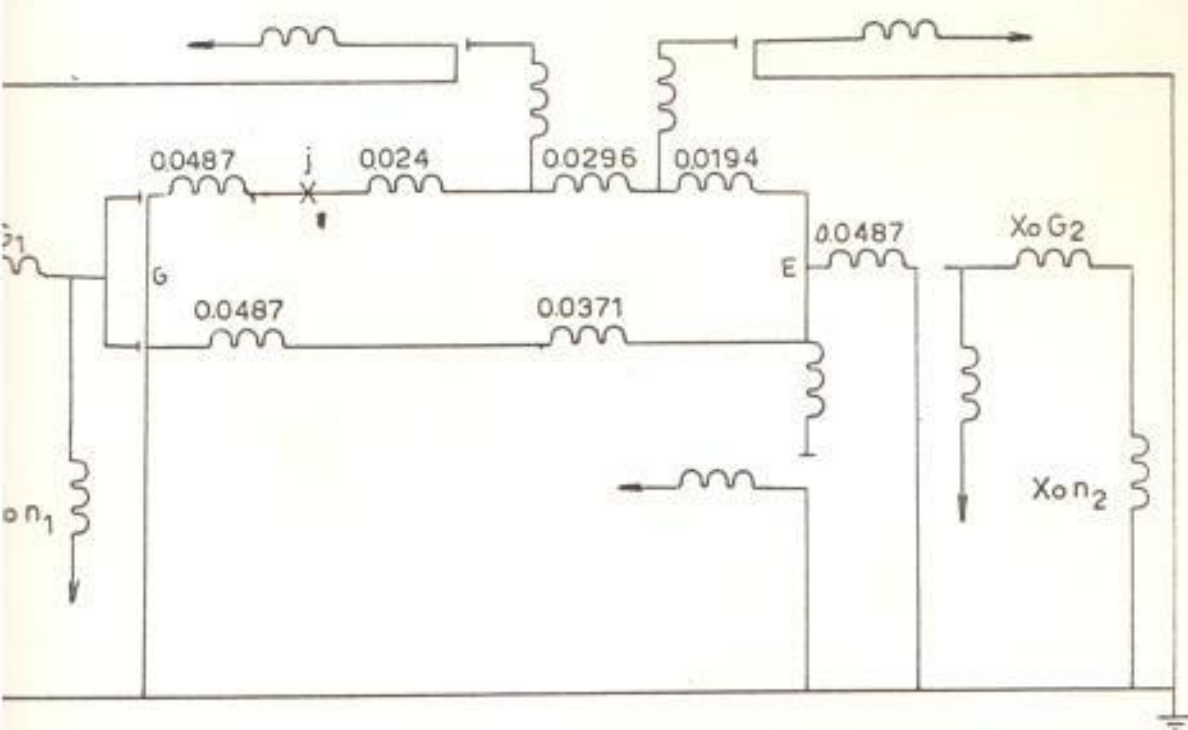
APENDICE A

ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD TRANSITORIA PARA UNA FALLA DE 2L-T OCURRIDA EN EL PUNTO j DEL SISTEMA REPRESENTADO EN LA FIGURA Nº2.-

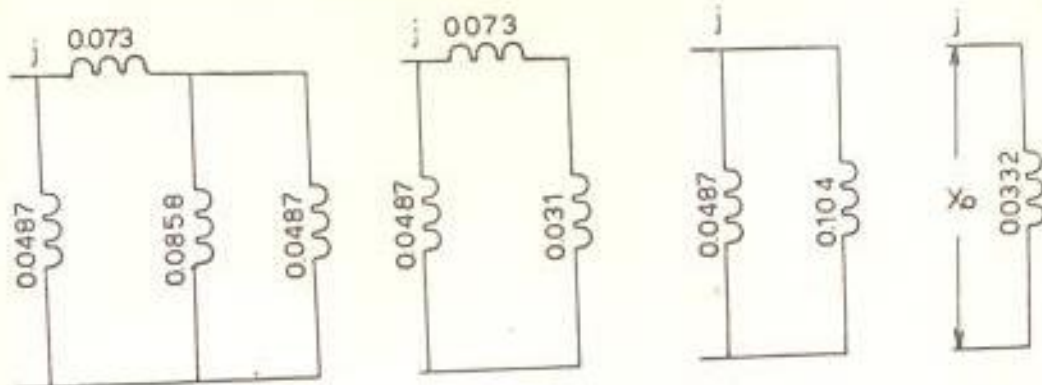
A.- MAXIMA GENERACION

a) CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA CONDICION DE FALLA.

1º) Reducción de la malla de secuencia cero. (Para valores de X_0 p.u.)

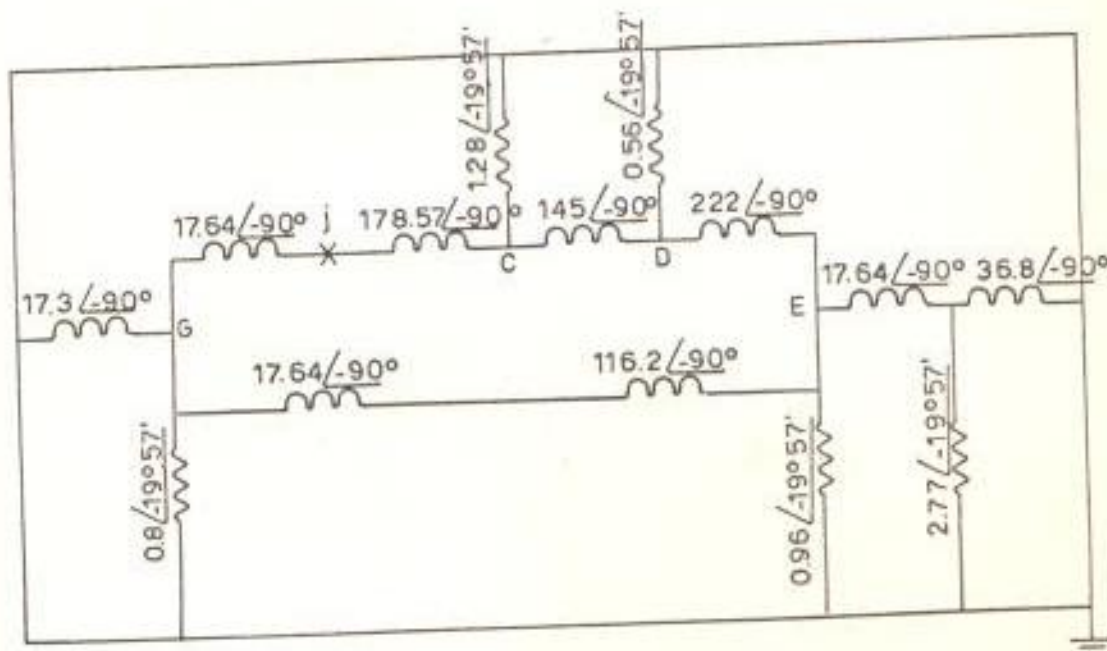


Simplificando nos queda:



$$Y_0 = \frac{1}{X_0} = \frac{1}{0,0332} = 30,1 \quad -90^\circ$$

29) Redacción de la malla de secuencia negativa (para valores de Y_2 p.u.)



Reemplazando las admitancias en paralelo, por su equivalente y eliminando el nudo C por una conversión estrella -

delta nos queda:

$$Y_{GO} = 17,3 \angle -90^{\circ} + 0,8 \angle -19^{\circ}57' = 17,6 \angle -87^{\circ}33'$$

$$Y_{FO} = 36,8 \angle -90^{\circ} + 2,77 \angle -19^{\circ}57' = 37,8 \angle -86^{\circ}2'$$

$$Y_{EO} = \frac{Y_{EF} \times Y_{FO}}{Y_{EF} + Y_{FO}}$$

$$Y_{EO} = \frac{17,64 \angle -90^{\circ} \times 37,8 \angle -86^{\circ}2'}{17,64 \angle -90^{\circ} + 37,8 \angle -86^{\circ}2'} + 0,96 \angle -19^{\circ}57' = 12,40 \angle -84^{\circ}37'$$

$$Y_{GE} = \frac{17,64 \angle -90^{\circ} \times 116,2 \angle -90^{\circ}}{133,84 \angle -90^{\circ}} = 15,35 \angle -90^{\circ}$$

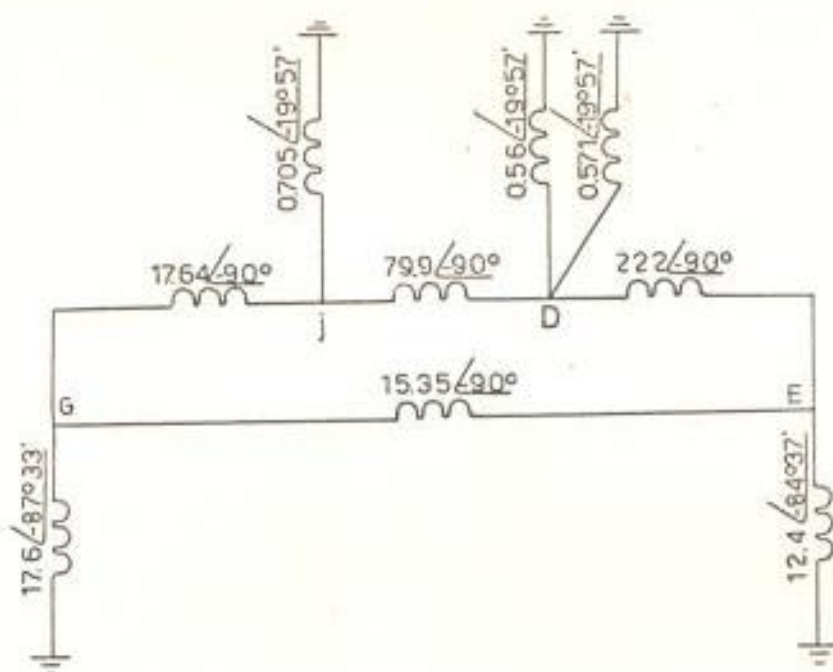
Nudo C

$$\Sigma Y = 178,57 \angle -90^{\circ} + 145 \angle -90^{\circ} + 1,28 \angle -19^{\circ}57' = 324 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{DJ} = \frac{178,57 \angle -90^{\circ} \times 145 \angle -90^{\circ}}{324 \angle -90^{\circ}} = 79,90 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{JO} = \frac{178,57 \angle -90^{\circ} \times 1,28 \angle -19^{\circ}57'}{324 \angle -90^{\circ}} = 0,705 \angle -19^{\circ}57'$$

$$Y_{DO} = \frac{145 \angle -90^{\circ} \times 1,28 \angle -19^{\circ}57'}{324 \angle -90^{\circ}} = 0,571 \angle -19^{\circ}57'$$



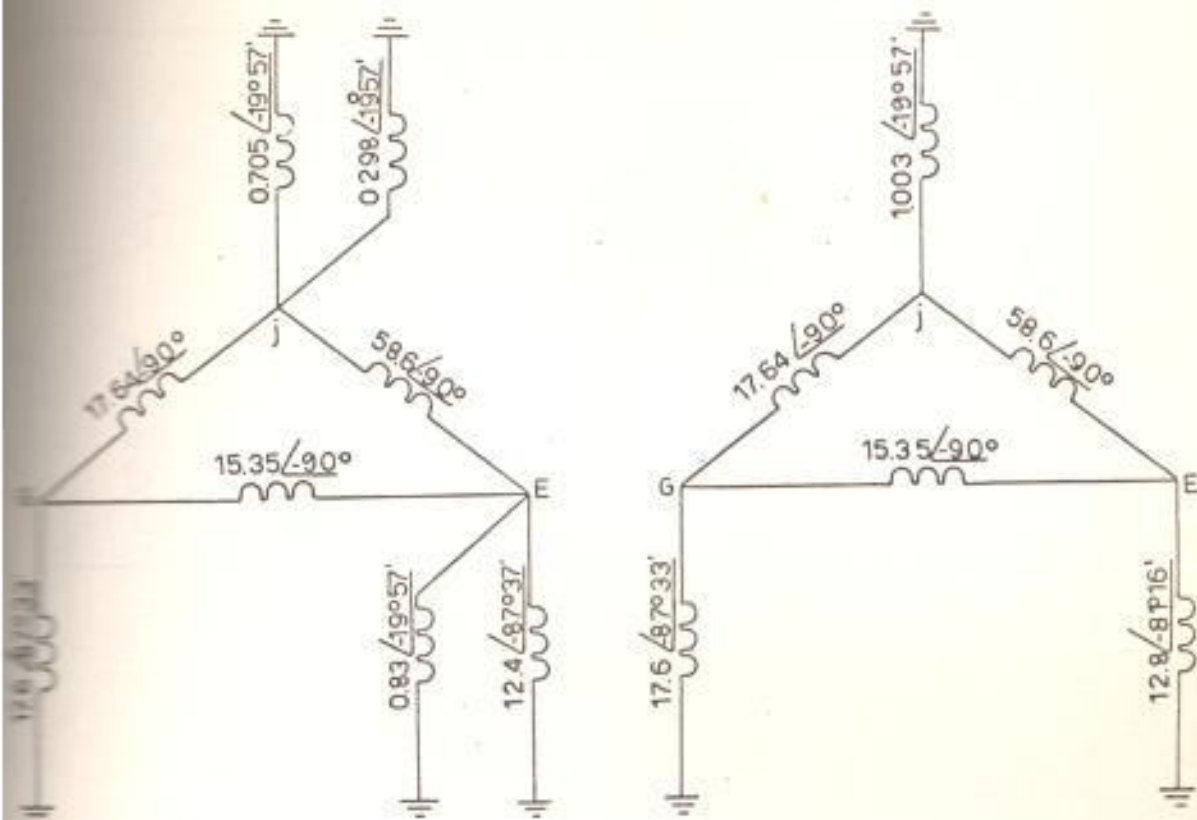
Eliminando el nudo D nos queda:

$$\Sigma Y = 79,9 \angle -90^{\circ} + 222 \angle -90^{\circ} + 1,131 \angle -19^{\circ} 57' = 302,3 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{EJ} = \frac{79,9 \angle -90^{\circ} \times 222 \angle -90^{\circ}}{302,3 \angle -90^{\circ}} = 58,6 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{JO} = \frac{79,9 \angle -90^{\circ} \times 1,131 \angle -19^{\circ} 57'}{302,3 \angle -90^{\circ}} = 0,298 \angle -19^{\circ} 57'$$

$$Y_{EO} = \frac{222 \angle -90^{\circ} \times 1,131 \angle -19^{\circ} 57'}{302,3 \angle -90^{\circ}} = 0,83 \angle -19^{\circ} 57'$$



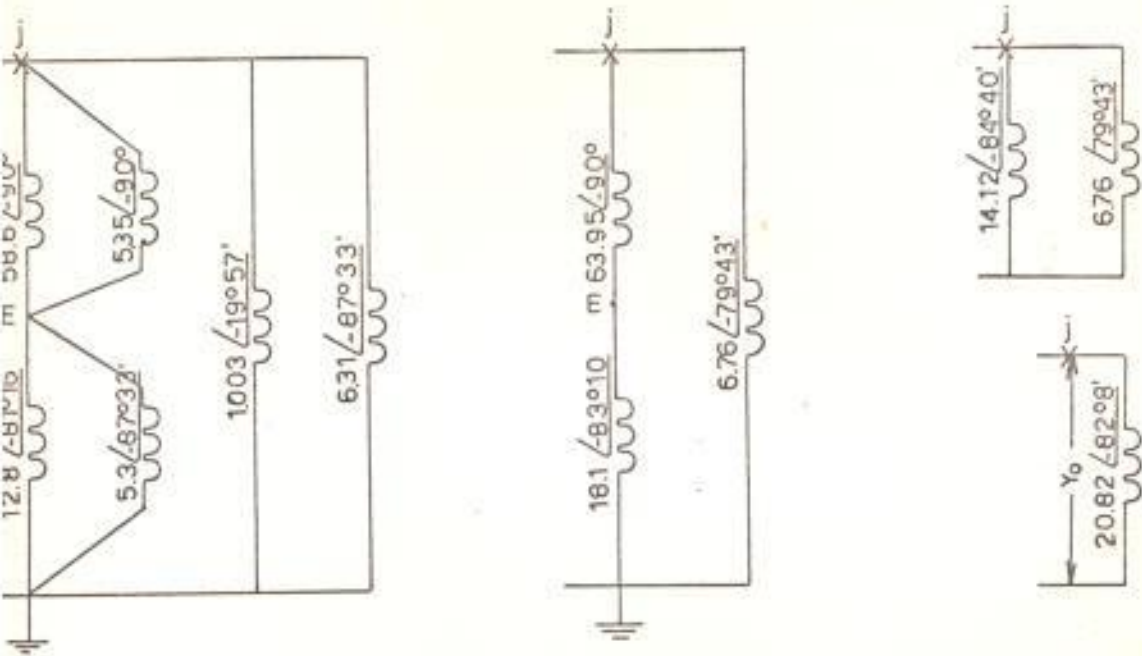
Eliminando el nudo G por medio de una conversión estrella - delta, obtenemos:

$$\Sigma Y = 17,64 \angle -90^{\circ} + 15,35 \angle -90^{\circ} + 17,6 \angle -87^{\circ}33' = 50,56 \angle -90^{\circ}$$

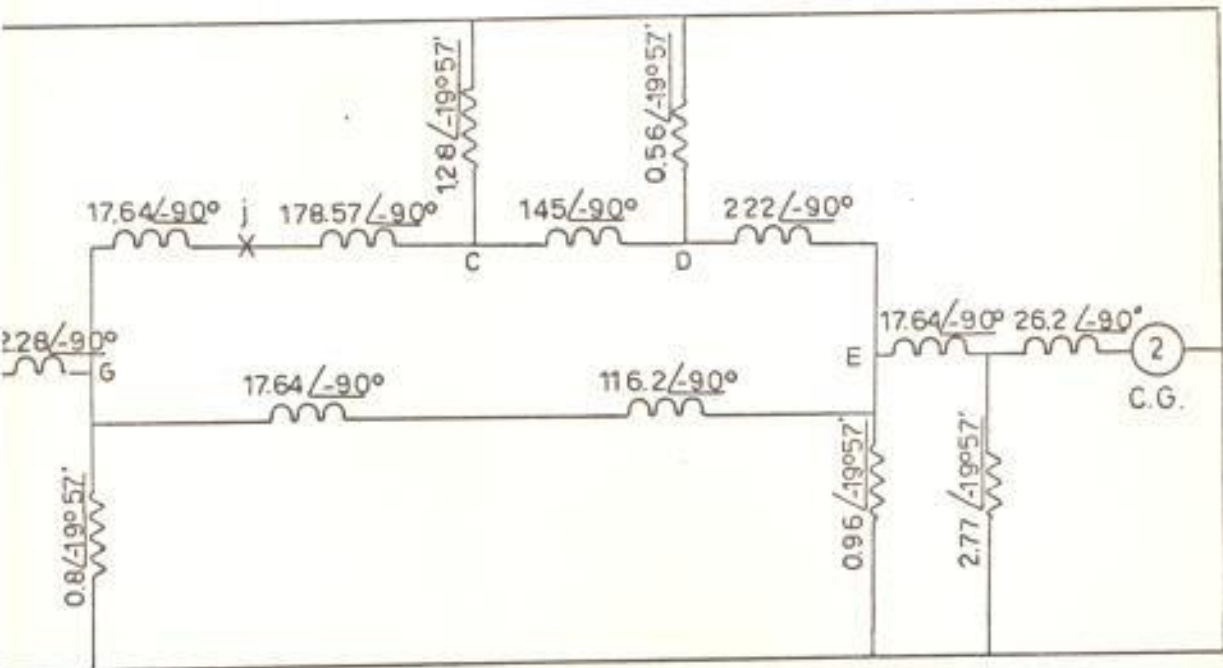
$$Y_{EJ} = \frac{17,64 \angle -90^{\circ} \times 15,35 \angle -90^{\circ}}{50,56 \angle -90^{\circ}} = 5,35 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{JD} = \frac{17,64 \angle -90^{\circ} \times 17,6 \angle -87^{\circ}33'}{50,56 \angle -90^{\circ}} = 6,31 \angle -87^{\circ}33'$$

$$Y_{ED} = \frac{15,35 \angle -90^{\circ} \times 17,6 \angle -87^{\circ}33'}{50,56 \angle -90^{\circ}} = 5,3 \angle -87^{\circ}33'$$



30) Reducción de la malla de secuencia positiva
(para valores de Y' p.u.)



Reemplazando las admitancias conectadas entre G y E por una sola equivalente, y eliminando los nudos C y E por conversiones estrella - Delta, nos queda:

$$Y_{GE} = \frac{17,64 \angle -90^{\circ} \times 116,2 \angle -90^{\circ}}{17,64 \angle -90^{\circ} + 116,2 \angle -90^{\circ}} = 15,35 \angle -90^{\circ}$$

Nudo C

$$Y = 178,57 \angle -90^{\circ} + 145 \angle -90^{\circ} + 1,28 \angle -19^{\circ}57' = 324 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{JD} = \frac{178,57 \angle -90^{\circ} \times 145 \angle -90^{\circ}}{324 \angle -90^{\circ}} = 79,9 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{JO} = \frac{178,57 \angle -90^{\circ} \times 1,28 \angle -19^{\circ}57'}{324 \angle -90^{\circ}} = 0,705 \angle -19^{\circ}57'$$

$$Y_{DO} = \frac{145 \angle -90^{\circ} \times 1,28 \angle -19^{\circ}57'}{324 \angle -90^{\circ}} = 0,574 \angle -19^{\circ}57'$$

Nudo E

$$\Sigma Y = 222 \angle -90^{\circ} + 17,64 \angle -90^{\circ} + 15,35 \angle -90^{\circ} + 0,96 \angle -19^{\circ}57' = 255,32 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{DG} = \frac{222 \angle -90^{\circ} \times 15,35 \angle -90^{\circ}}{255,32 \angle -90^{\circ}} = 13,36 \angle -90^{\circ}$$

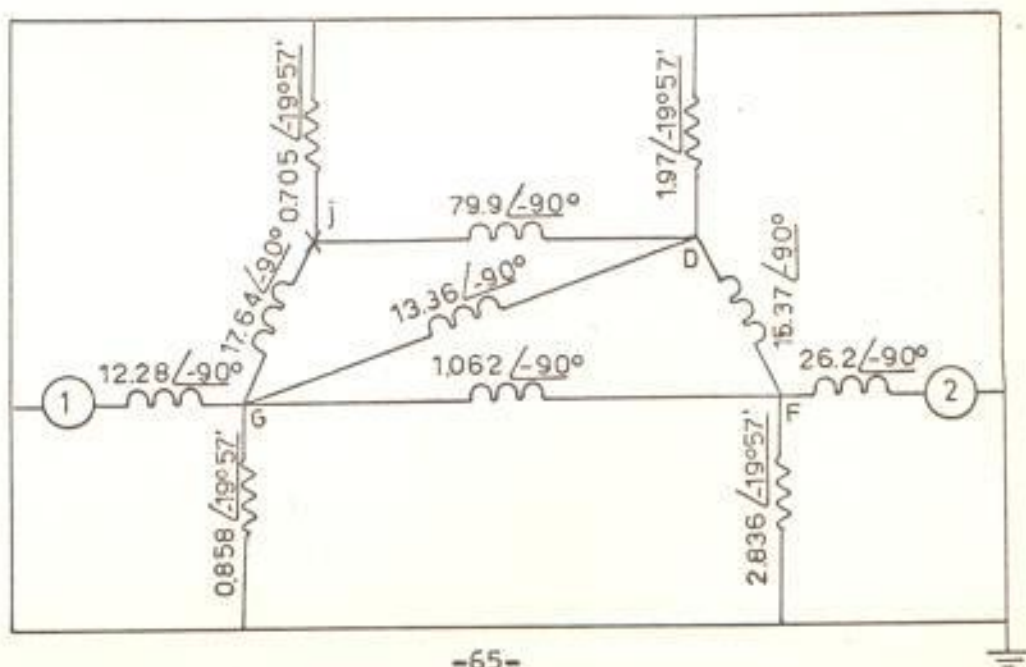
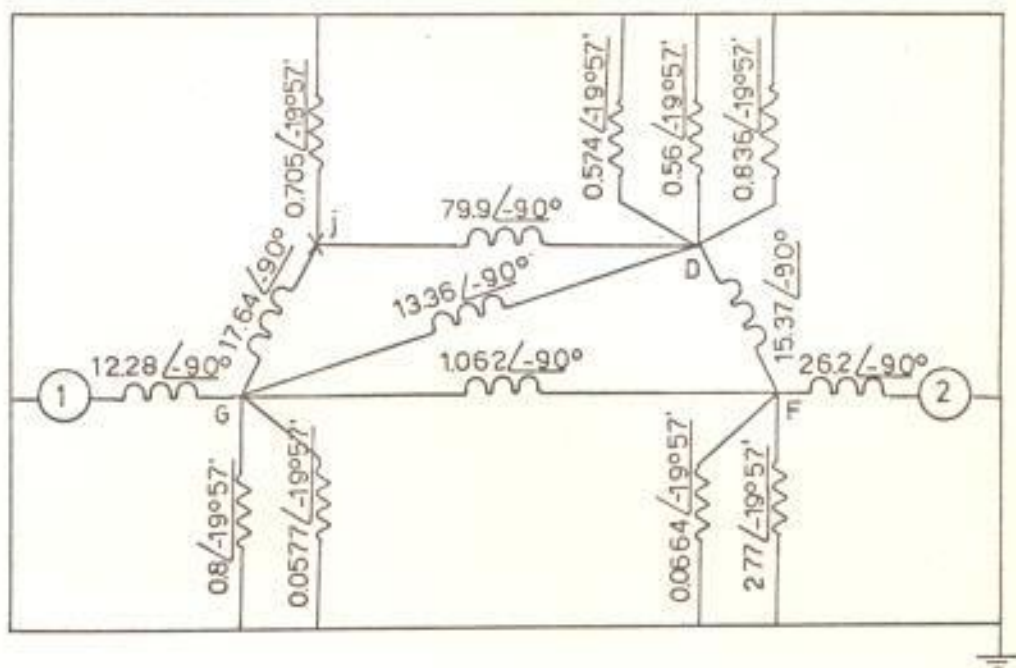
$$Y_{DF} = \frac{222 \angle -90^{\circ} \times 17,64 \angle -90^{\circ}}{255,32 \angle -90^{\circ}} = 15,37 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{FG} = \frac{15,35 \angle -90^{\circ} \times 17,64 \angle -90^{\circ}}{255,32 \angle -90^{\circ}} = 1,062 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{DO} = \frac{222 \angle -90^{\circ} \times 0,96 \angle -19^{\circ}57'}{255,32 \angle -90^{\circ}} = 0,836 \angle -19^{\circ}57'$$

$$Y_{G0} = \frac{15,35 \angle -90^\circ \times 0,96 \angle -19^\circ 57'}{255,32 \angle -90^\circ} = 0,0577 \angle -19^\circ 57'$$

$$Y_{F0} = \frac{17,64 \angle -90^\circ \times 0,96 \angle -19^\circ 57'}{255,32 \angle -90^\circ} = 0,06664 \angle -19^\circ 57'$$



Eliminamos el nudo D

$$\Sigma Y = 79,9 \angle -90^\circ + 13,36 \angle -90^\circ + 15,37 \angle -90^\circ + 1,97 \angle -19^\circ 57' = 109,30 \angle -90^\circ$$

$$Y_{JD} = \frac{79,9 \angle -90^\circ \times 1,97 \angle -19^\circ 57'}{109,30 \angle -90^\circ} = 1,44 \angle -19^\circ 57'$$

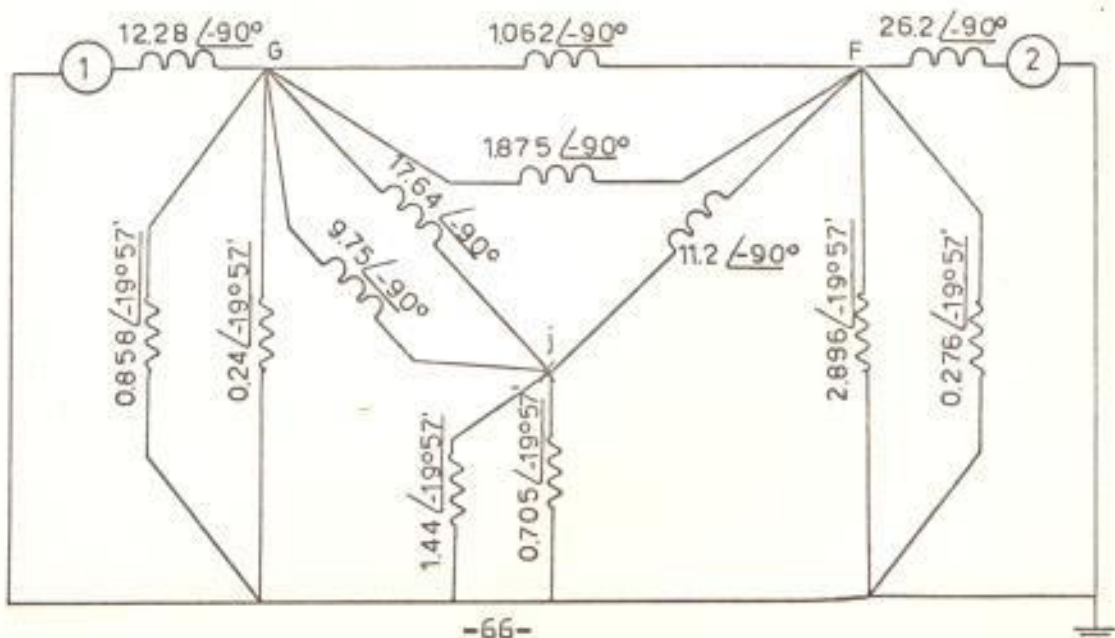
$$Y_{FD} = \frac{15,37 \angle -90^\circ \times 1,97 \angle -19^\circ 57'}{109,30 \angle -90^\circ} = 0,276 \angle -19^\circ 57'$$

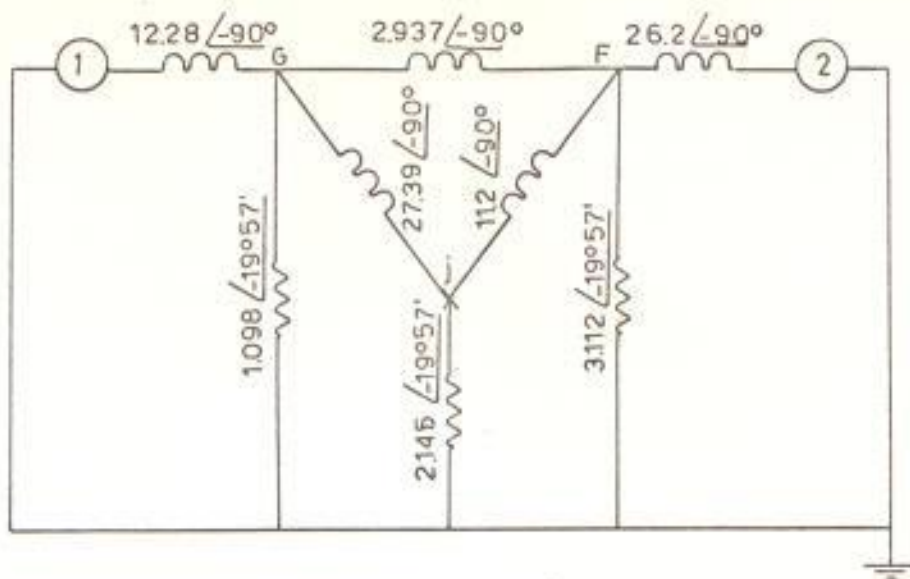
$$Y_{GF} = \frac{15,37 \angle -90^\circ \times 13,36 \angle -90^\circ}{109,30 \angle -90^\circ} = 1,875 \angle -90^\circ$$

$$Y_{GD} = \frac{13,36 \angle -90^\circ \times 1,97 \angle -19^\circ 57'}{109,30 \angle -90^\circ} = 0,24 \angle -19^\circ 57'$$

$$Y_{JG} = \frac{79,9 \angle -90^\circ \times 13,36 \angle -90^\circ}{109,30 \angle -90^\circ} = 9,75 \angle -90^\circ$$

$$Y_{JF} = \frac{79,9 \angle -90^\circ \times 15,37 \angle -90^\circ}{109,30 \angle -90^\circ} = 11,2 \angle -90^\circ$$





Eliminando el nudo G nos queda:

$$\Sigma Y = 12,28 \angle -90^{\circ} + 2,937 \angle -90^{\circ} + 27,39 \angle -90^{\circ} + 1,098 \angle -19^{\circ}57' = 43 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{AG} = \frac{12,28 \angle -90^{\circ} \times 1,098 \angle -19^{\circ}57'}{43 \angle -90^{\circ}} = 0,313 \angle -19^{\circ}57'$$

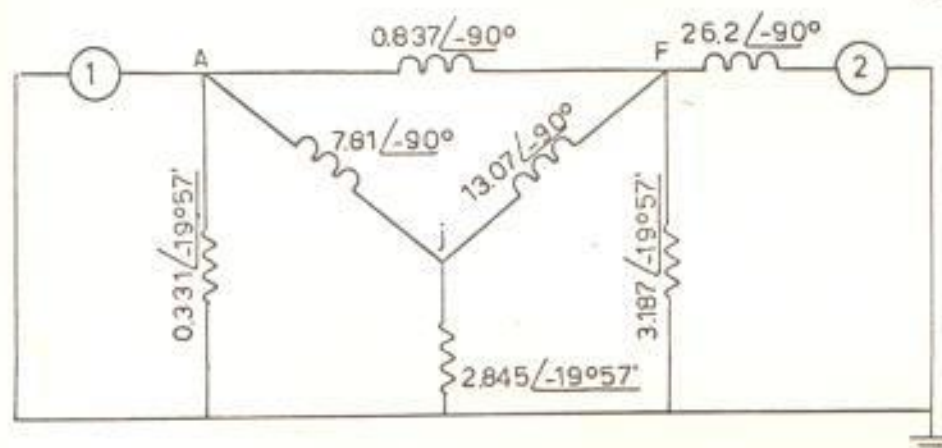
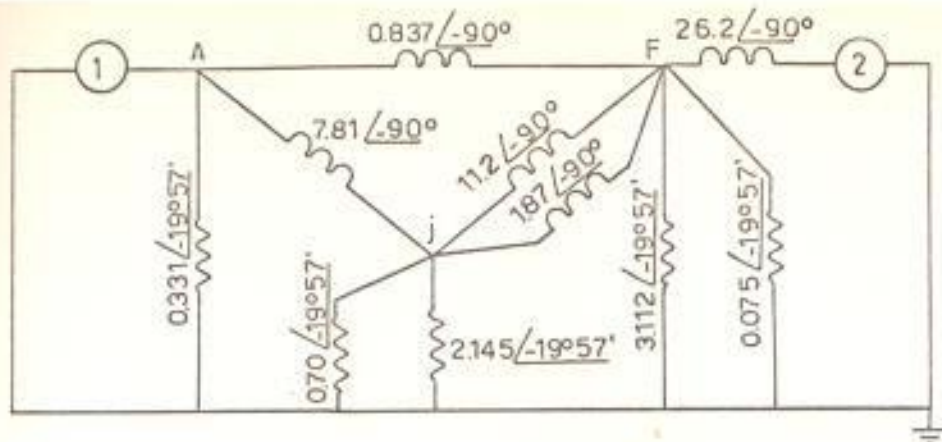
$$Y_{AF} = \frac{12,28 \angle -90^{\circ} \times 2,937 \angle -90^{\circ}}{43 \angle -90^{\circ}} = 0,837 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{AJ} = \frac{12,28 \angle -90^{\circ} \times 27,39 \angle -90^{\circ}}{43 \angle -90^{\circ}} = 7,81 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{JF} = \frac{27,39 \angle -90^{\circ} \times 2,937 \angle -90^{\circ}}{43 \angle -90^{\circ}} = 1,87 \angle -90^{\circ}$$

$$Y_{FG} = \frac{2,937 \angle -90^{\circ} \times 1,098 \angle -19^{\circ}57'}{43 \angle -90^{\circ}} = 0,075 \angle -19^{\circ}57'$$

$$Y_{JG} = \frac{27,39 \angle -90^{\circ} \times 1,098 \angle -19^{\circ}57'}{43 \angle -90^{\circ}} = 0,70 \angle -19^{\circ}57'$$



Eliminando el nudo F nos queda:

$$\Sigma Y = 0,837 \angle -90^\circ + 13,07 \angle -90^\circ + 26,2 \angle -90^\circ + 3,187 \angle -19^\circ 27' = 41,3 \angle -85^\circ 50'$$

$$Y_{AB} = \frac{0,837 \angle -90^\circ \times 26,2 \angle -90^\circ}{41,3 \angle -85^\circ 50'} = 0,531 \angle -94^\circ 10'$$

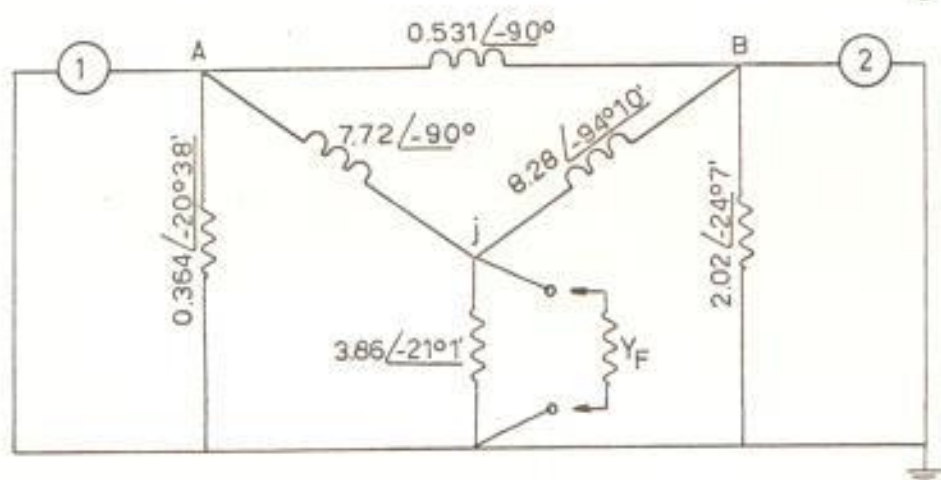
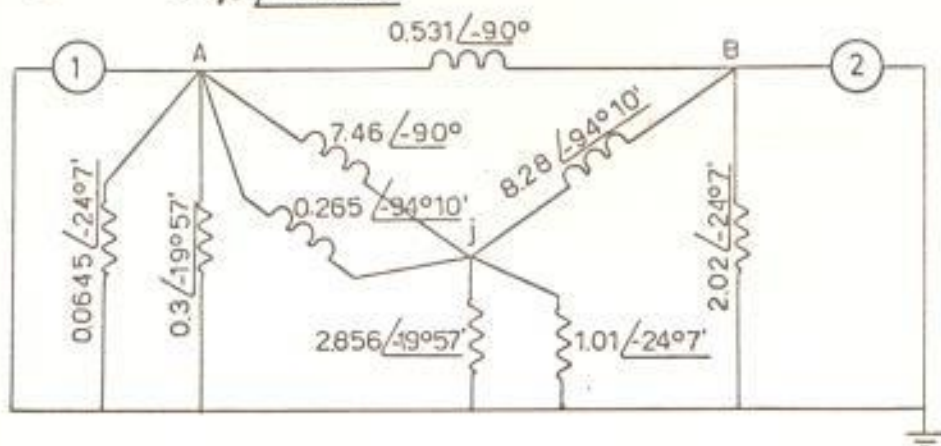
$$Y_{AJ} = \frac{0,837 \angle -90^\circ \times 13,07 \angle -90^\circ}{41,3 \angle -85^\circ 50'} = 0,265 \angle -94^\circ 10'$$

$$Y_{AO} = \frac{0,837 \angle -90^\circ \times 3,187 \angle -19^\circ 57'}{41,3 \angle -85^\circ 50'} = 0,0646 \angle -24^\circ 7'$$

$$Y_{JO} = \frac{13,07 \angle -90^\circ \times 3,187 \angle -19^\circ 57'}{41,3 \angle -85^\circ 50'} = 1,01 \angle -24^\circ 7'$$

$$Y_{B0} = \frac{26,2 \angle -90^\circ \times 3,187 \angle -19^\circ 57'}{41,3 \angle -85^\circ 50'} = 2,02 \angle -24^\circ 7'$$

$$Y_{Bj} = \frac{13,07 \angle -90^\circ \times 26,2 \angle -90^\circ}{41,3 \angle -85^\circ 50'} = 8,28 \angle -94^\circ 10'$$



40) Circuito equivalente.

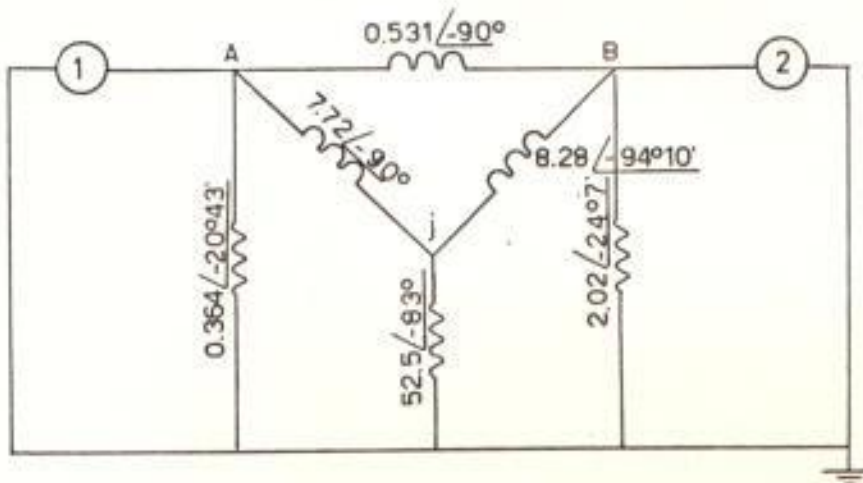
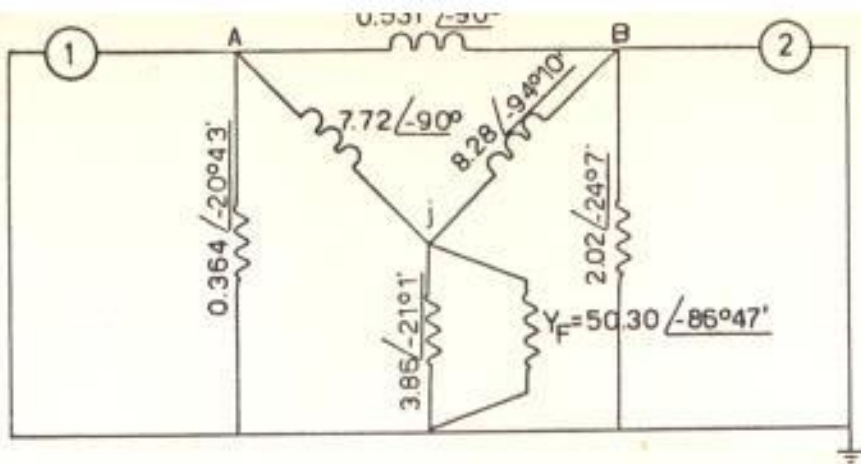
L_B admittancia de falla que interviene en una falla de 2L-T está dada por:

$$Y_F = Y_2 + Y_0$$

Reemplazando los valores obtenidos para Y_2 y Y_0 , tenemos:

$$Y_F = 20,82 \angle -82^\circ 8' + 30,1 \angle -90^\circ = 50,80 \angle -86^\circ 47'$$

Conectando la admittancia de falla Y_F entre los puntos de falla en la malla de secuencia positiva, nos queda:



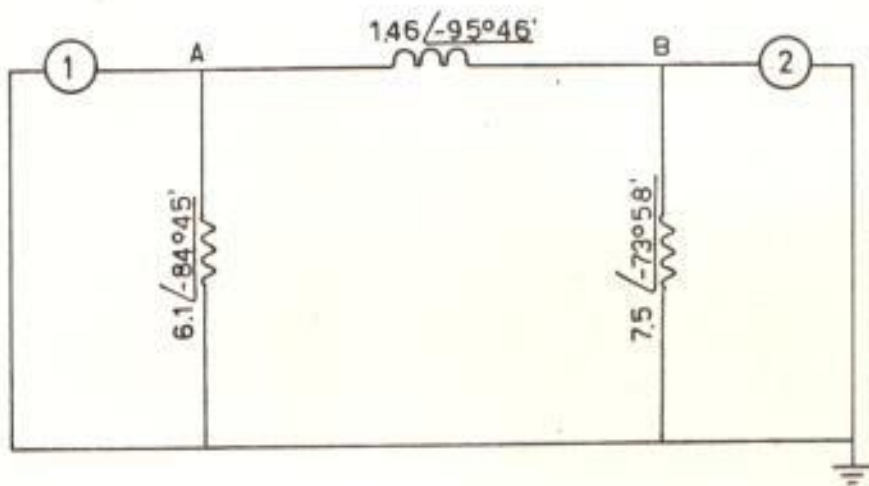
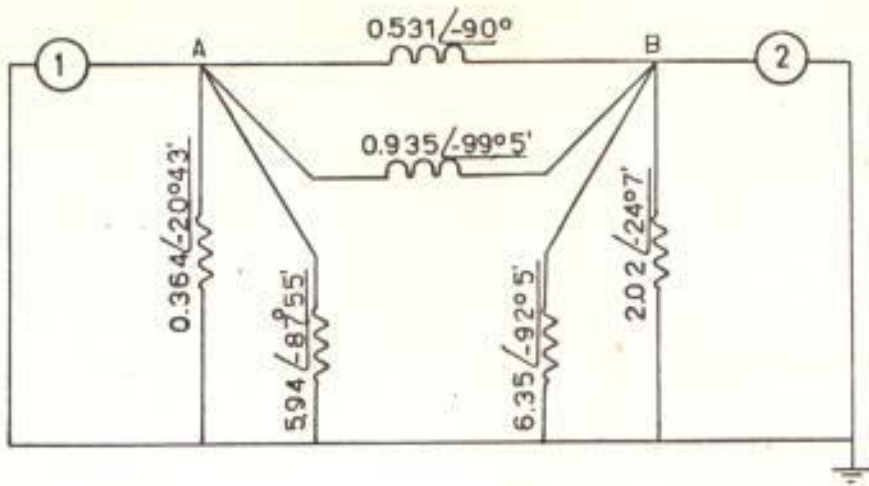
Eliminando el nudo j con una conversión estrella - Delta, nos queda:

$$\Sigma Y = 7,72 \angle -90^\circ + 8,28 \angle -94^\circ 10' + 52,5 \angle -83^\circ = 68,40 \angle -85^\circ 5'$$

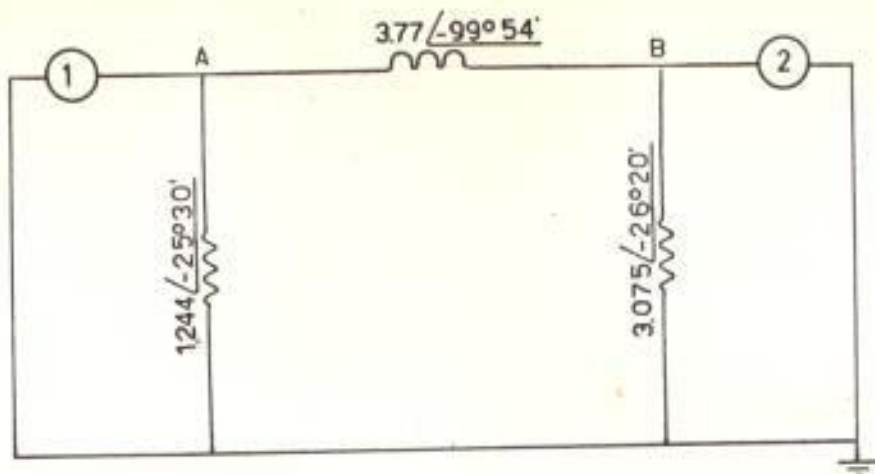
$$Y_{AB} = \frac{7,72 \angle -90^\circ \times 8,28 \angle -94^\circ 10'}{68,40 \angle -85^\circ 5'} = 0,935 \angle -99^\circ 5'$$

$$Y_{AO} = \frac{7,72 \angle -90^\circ \times 52,5 \angle -83^\circ}{68,40 \angle -85^\circ 5'} = 5,94 \angle -87^\circ 55'$$

$$Y_{BO} = \frac{8,28 \angle -94^\circ 10' \times 52,5 \angle -83^\circ}{68,40 \angle -85^\circ 5'} = 6,35 \angle -92^\circ 5'$$



b.- CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA CONDICION DE POST-FALLA.
 Tramo de líneas desconectado: GCDE (Figura N°2)
 Procedimiento igual que en el caso anterior, por medio de conversiones estrella - Delta, obtenemos el siguiente circuito π (Tabla N°5)



c.- ECUACIONES ANGULO - POTENCIA.-

1.- Condiciones iniciales de operación

$$M_1 = 14,70 \times 10^{-4} \text{ p.u.} \quad E_1 = 1,094 \angle 10^\circ 57' \text{ p.u.}$$

$$M_2 = 51,23 \times 10^{-4} \text{ p.u.} \quad E_2 = 1,05 \angle 7^\circ 25' \text{ p.u.}$$

$$P_1 = 1,22 \text{ p.u.} \quad \delta_0 = \delta_1 - \delta_2$$

$$\delta_0 = 10^\circ 57' - 7^\circ 25' = 3^\circ 32'$$

2.- Ecuación ángulo - potencia para la condición de falla.-

$$Y_{11} = 6,1 \angle -84^\circ 45' + 1,46 \angle -95^\circ 46' = 7,51 \angle -85^\circ 52' \text{ p.u.}$$

$$Y_{22} = 7,5 \angle -73^\circ 58' + 1,46 \angle -95^\circ 46' = 8,81 \angle -77^\circ 25' \text{ p.u.}$$

$$Y_{12} = -1,46 \angle -95^\circ 46' = 1,46 \angle 84^\circ 14' \text{ p.u.}$$

$$\theta_{11} = \underline{-86^\circ 52'} \quad \cos \theta_{11} = 0,0546$$

$$\theta_{22} = \underline{-77^\circ 25'} \quad \cos \theta_{22} = 0,217$$

$$\theta_{12} = \underline{84^\circ 14'} \quad \cos \theta_{12} = 0,979$$

$$\tan \theta_{12} = 9,9$$

Aplicando las ecuaciones (2 - 5 - 9 y 10 del Cap.III), tenemos:

$$P_C = \frac{51,23 \times 10^{-4} (1,094)^2 (7,51) (0,0546) - 14,70 \times 10^{-4} (1,05)^2 (8,81) (0,217)}{14,70 \times 10^{-4} + 51,23 \times 10^{-4}}$$

$$P_C = -0,0906 \text{ p.u.}$$

$$P_M = \frac{(1,094)(1,05)(1,46) \sqrt{(14,7)^2 + (51,23)^2 - 2(14,7)(51,23)(-0,979)} \times 10^{-4}}{14,7 \times 10^{-4} + 51,23 \times 10^{-4}}$$

$$P_M = 1,67 \text{ p.u.}$$

$$\gamma = - \tan^{-1} \left[\frac{14,7 \times 10^{-4} + 51,23 \times 10^{-4}}{14,7 \times 10^{-4} - 51,23 \times 10^{-4}} \times 9,9 \right] - 90^\circ$$

$$\gamma = \underline{86,8^\circ} - 90^\circ = \underline{-3,2^\circ}$$

$$P_U = -0,0906 + 1,67 \text{ Sen } (\delta + 3,2^\circ)$$

3.- Ecuación ángulo-potencia para la condición de post-falla.-

$$Y_{11} = 1,244 \underline{\angle -25^\circ 30'} + 3,77 \underline{\angle -99^\circ 54'} = 4,27 \underline{\angle -83^\circ 38'} \text{ p.u.}$$

$$Y_{22} = 3,075 \underline{\angle -26^\circ 20'} + 3,77 \underline{\angle -99^\circ 54'} = 5,4 \underline{\angle -67^\circ 33'} \text{ p.u.}$$

$$Y_{12} = -3,77 \underline{\angle -99^\circ 54'} = 3,77 \underline{\angle 80^\circ 6'} \text{ p.u.}$$

$$\theta_{11} = \underline{-83^\circ 38'}$$

$$\text{Cos } \theta_{11} = 0,11$$

$$\theta_{22} = \underline{-67^\circ 33'}$$

$$\text{Cos } \theta_{22} = 0,381$$

$$\theta_{12} = 80^\circ 6'$$

$$\text{Cos } 2 \theta_{12} = -0,94$$

$$P_{11}' = 0,868 \text{ p.u.}$$

$$\tan \theta_{12} = 5,75$$

Luego:

$$P_c = \frac{51,23 \times 10^{-4} (1,094)^2 (4,24)(0,11) - 14,7 \times 10^{-4} (1,05)(5,4)(0,381)}{14,7 \times 10^{-4} + 51,23 \times 10^{-4}}$$

$$P_c = -0,076 \text{ p.u.}$$

$$P_M = \frac{(1,094)(1,05)(3,77) \sqrt{(14,7)^2 + (51,23)^2} - 2(14,7)(51,23)(-0,94) \times 10^{-4}}{14,7 \times 10^{-4} + 51,23 \times 10^{-4}}$$

$$P_M = 4,28 \text{ p.u.}$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left[\frac{14,7 \times 10^{-4} + 51,23 \times 10^{-4}}{14,7 \times 10^{-4} - 51,23 \times 10^{-4}} \times 5,75 \right] - 90^\circ$$

$$\gamma = 84^\circ 31' - 90^\circ = -5^\circ 29'$$

$$P_{u'} = -0,076 + 4,28 \text{ Sen} \left(\int + \underline{5^\circ 29'} \right)$$

d.- DESPLAZAMIENTO ANGULAR CRITICO Y TIEMPO CRITICO DE DESPEJE.-

Desplazamiento angular crítico.-

En la Figura A, a representa el punto inicial de trabajo. (Condición de pre-falla); las curvas P_U y $P_{U'}$, son los lugares geométricos de las ecuaciones ángulo-potencia para las condiciones de falla y post-falla.

La potencia mecánica de entrada para las condiciones de falla y post-falla, está representada por las rectas P_i y $P_{i'}$. Como se puede observar en la figura, el ángulo crítico de despeje corresponde a un valor de 148° , desplazamiento angular para el cual la suma de las áreas positivas A_1 y A_3 es igual a la suma de las áreas negativas A_2 y A_4 .

COMPROBACION:

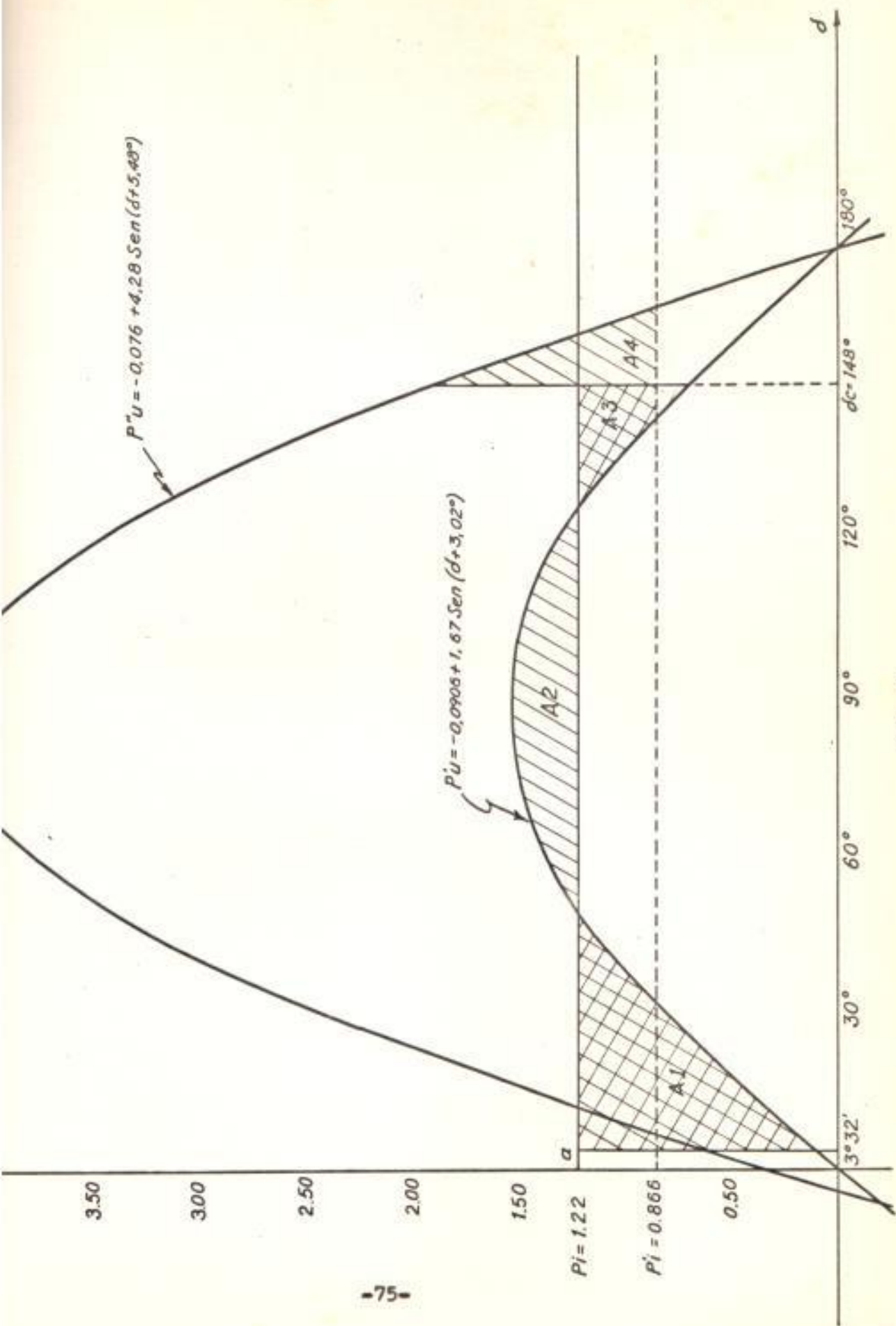


Fig. A

$$A_1 = \int_{3,534^{\circ}}^{48,616^{\circ}} \left\{ (1,22) - \left[-0,096 + 1,677 (\text{Sen. } \delta + 3,2^{\circ}) \right] \right\} d\delta = 23$$

$$A_2 = \int_{48,516^{\circ}}^{125,083^{\circ}} \left\{ \left[-0,096 + 1,677 \text{ Sen } (\delta + 3,2^{\circ}) \right] - (1,22) \right\} d\delta = 18,8$$

$$A_3 = \int_{125,083^{\circ}}^{148^{\circ}} \left\{ (1,22) - \left[-0,096 + 1,677 \text{ Sen}(\delta + 3,2^{\circ}) \right] \right\} d\delta = 5,35$$

$$A_4 = \int_{148^{\circ}}^{161,8^{\circ}} \left\{ \left[-0,076 + 4,28 \text{ Sen } (\delta + 5^{\circ}29') \right] - (0,868) \right\} d\delta = 9$$

$$A_1 + A_3 = 23 + 5,35 = 28,35$$

$$A_2 + A_4 = 18,8 + 9 = 27,8$$

$$A_1 + A_3 \approx A_2 + A_4$$

Tiempo crítico de despeje

Los datos necesarios para el cálculo de t_c son los siguientes:

$$P_1 = 1,22 \text{ p.u.}$$

$$P_c = 0,0906 \text{ p.u.}$$

$$P_M = 1,677 \text{ p.u.}$$

$$= -3,2^{\circ}$$

$$\alpha = 3,534^{\circ}$$

$$M_1 = 14,70 \times 10^{-4} \text{ p.u.}$$

$$M_2 = 51,23 \times 10^{-4} \text{ p.u.}$$

$$\delta_c = \underline{148^\circ}$$

Luego calculamos las siguientes cantidades:

$$M = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} = \frac{14,7 \times 10^{-4} \times 51,23 \times 10^{-4}}{14,7 \times 10^{-4} + 51,23 \times 10^{-4}} = 11,43 \times 10^{-4} \text{ p.u.}$$

$$P_1 = P_1 - P_c = 1,22 - (-0,0906) = 1,3106 \text{ p.u.}$$

$$p = \frac{P_1'}{P_M} = \frac{1,3106}{1,67} = 0,785$$

$$\delta_o' = \delta_o - \gamma = 3,534^\circ - (-3,2^\circ) = 6,734^\circ$$

$$\text{Sen } \delta_o' = 0,1169$$

$$\delta_c' = \delta_c - \gamma = \underline{148^\circ} - (\underline{-3,2^\circ}) = \underline{151,2^\circ}$$

Conociendo los valores de p , $\text{Sen } \delta_o'$ y δ_c' , obtenemos de "Las curvas pre-calculadas" (Ref. N°10) el valor de la constante de tiempo modificada τ , así:

$$\tau = 4,9$$

El tiempo crítico de despeje t_c lo calculamos de la ecuación (17) del capítulo III.

$$\tau = t_c \sqrt{\frac{\gamma \times 1,67}{180 \times 11,43 \times 10^{-4}}} = t_c \sqrt{25,45}$$

$$\tau = 5,04 t_c$$

$$t_c = \frac{\tau}{5,04} = \frac{4,9}{5,04} = 0,973 \text{ Seg.}$$

B.- MINIMA GENERACION.-

Condiciones iniciales de operación

$$M_1 = 14,70 \times 10^{-4} \text{ p.u.}$$

$$E_1 = 1,01 \angle 16^{\circ}9' \text{ p.u.}$$

$$M_2 = 12,48 \times 10^{-4} \text{ p.u.}$$

$$E_2 = 1 \angle 14^{\circ}22' \text{ p.u.}$$

$$P_i = 0,173 \text{ p.u.}$$

$$\delta_0 = 6^{\circ}9' - 4^{\circ}22' = 1^{\circ}47'$$

Aplicando las ecuaciones (2 - 5 - 9 - 10 Cap.III) en la misma forma que en el caso anterior, obtenemos los siguientes resultados:

Ecuación ángulo-potencia para la condición de falla

$$P_u' = -0,051 + 1,19 \text{ Sen } (\delta + 0^{\circ})$$

Ecuación ángulo-potencia para la condición de post-falla.

$$P_u'' = 0,001 + 3,52 \text{ Sen } (\delta + 0^{\circ})$$

De la aplicación del criterio de igualdad de áreas a las curvas de la figura B (lugar geométrico de P_i , P_i' , P_u' y P'') encontramos que para un desplazamiento angular máximo δ el área positiva A_1 es igual al área negativa A_2 . El nuevo punto de trabajo será el punto b de intersección de las curvas P_u' y P_i .

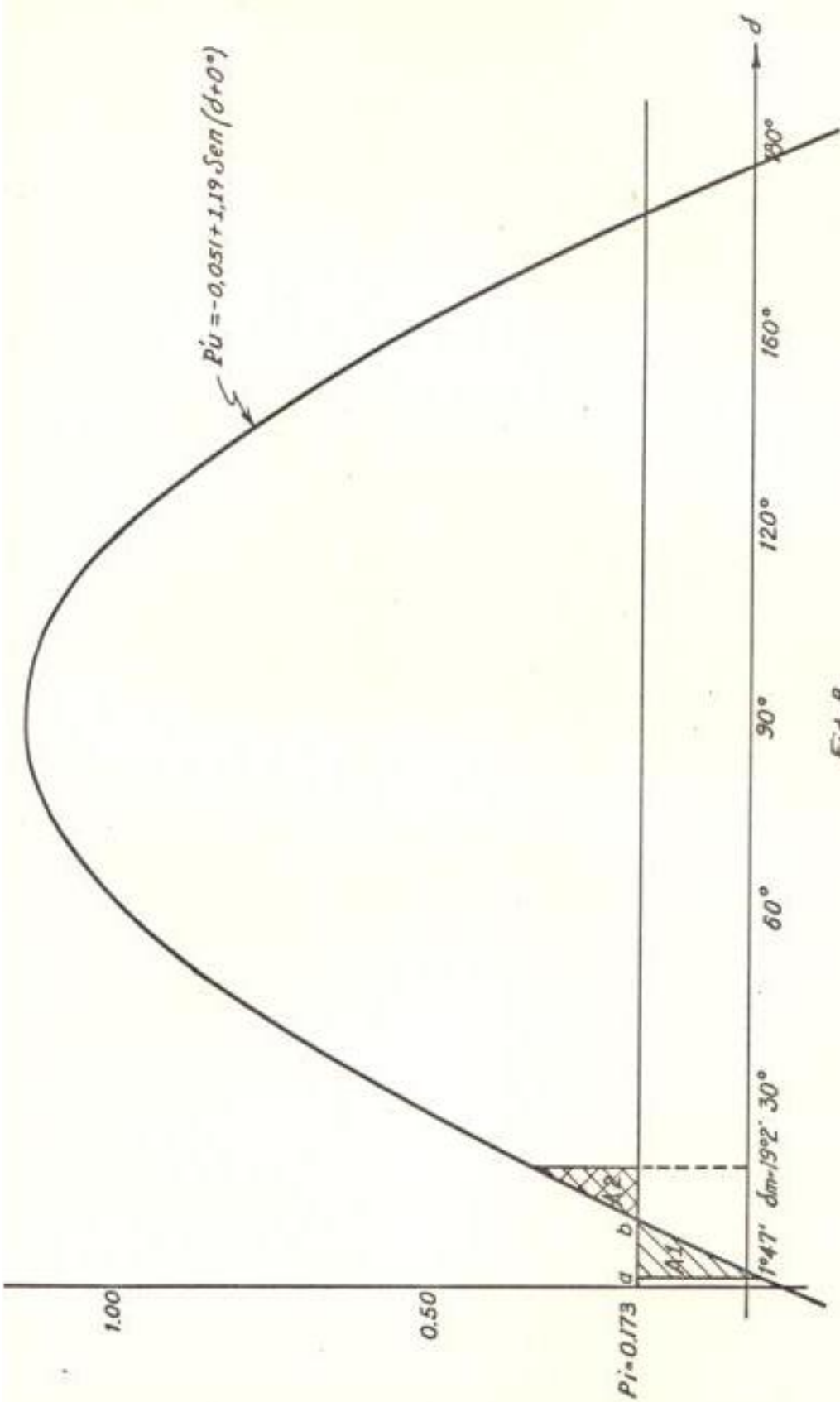


Fig. B

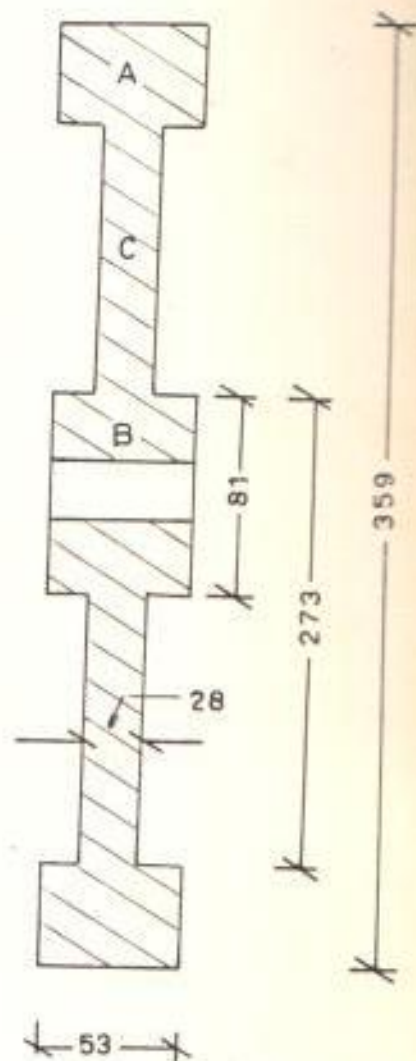
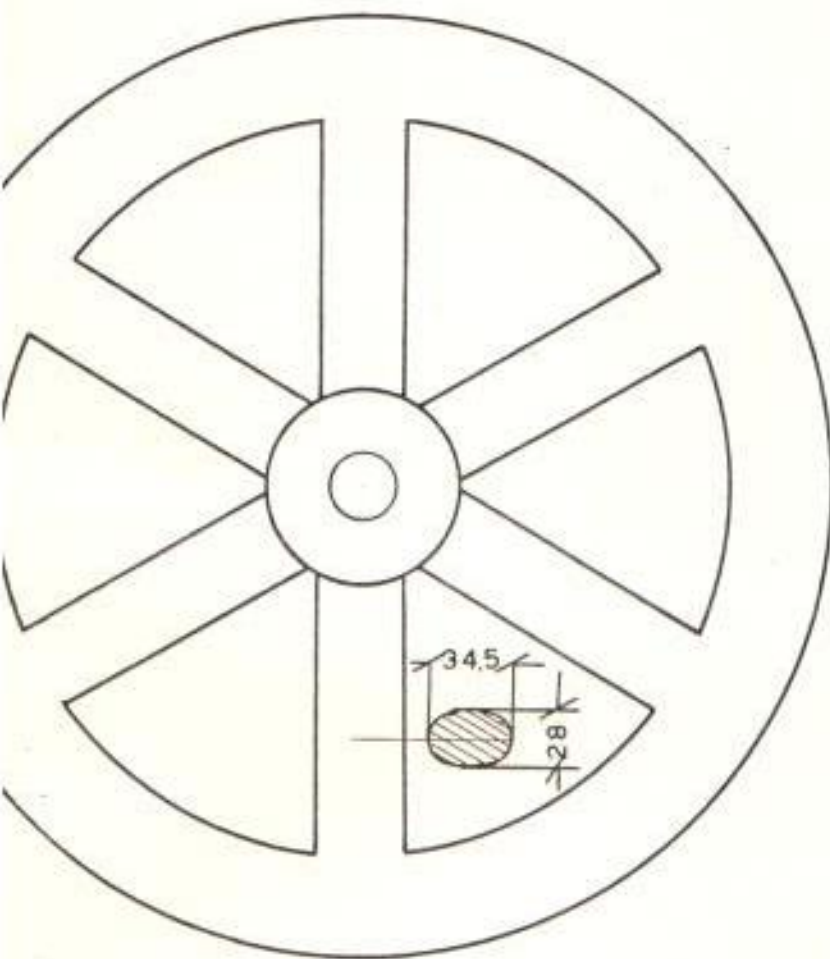
APENDICE B

CALCULO DE LA ENERGIA ALMACENADA EN EL VOLANTE DE LA UNIDAD Nº3 DE LA PLANTA A DIESEL.

Momento de inercia WR^2

VOLANTE DE HIERRO DE LA UNIDAD Nº3 DE LA PLANTA A DIESEL.

(Todas las medidas son en centímetros).-



Para el cálculo del momento de inercia, dividimos el volante en llantas (sección A), cubo (sección B) y radios.

El peso específico del hierro fundido lo tomamos igual a -- $7,2 \text{ gr/cm}^3$; por consiguiente:

$$\text{Peso de la llanta} = \frac{(179,5)^2 - (136,5)^2}{35} \times \frac{7,2 \times 2,202}{1,000} =$$

$$23.800 \text{ lbs.}$$

$$\text{Peso del cubo} = (40,5)^2 \times 53 \times \frac{7,2 \times 2,202}{1,000} =$$

$$4.330 \text{ Lbs.}$$

$$\text{Peso de cada radio} = 17,25 \times 14 \times 96 \times \frac{7,2 \times 2,202}{1,000} =$$

$$1.155 \text{ Lbs.}$$

$$WR^2 \text{ para la llanta} = \frac{1}{2} \times 23.800 (5,89^2 + 4,475^2) =$$

$$650.000 \text{ Lb. pie}^2$$

$$WR^2 \text{ para el cubo} = \frac{1}{2} \times 4.330 (1,33^2) = 3.810 \text{ Lb. pie}^2$$

$$WR^2 \text{ para los radios} = 6 \times 1.155 \frac{1}{2} \times 3,145^2 + 2,9^2 =$$

$$63.900 \text{ Lb.pie}^2$$

$$WR^2 = 650.000 + 3.810 + 63.900 = 780.810 \text{ Lb-pie}^2$$

La energía cinética almacenada a velocidad de régimen, la calculamos aplicando la ecuación (3 Cap. II)

$$N = 164 \text{ r.p.m.}$$

$$M = 1,28 \times 10^{-12} \times \frac{780.810 (164)^2}{60} =$$

$$M = 4,12 \times 10^{-4} \text{ Mj - Seg/E}^0$$

