

ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA

"OTAVALO - IBARRA - CAYAMBE"

Y DETERMINACION DE LOS TIEMPOS CRITICOS DE DESPEJE DE FALLAS

Tesis previa la obtención
del Título de

INGENIERO ELECTRICO

LUIS MIGUEL FRADEJAS DUARTE

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Quito

Octubre de 1969

Certifico que este trabajo
ha sido realizado por el
señor Luis Fradejas D.



Ing. Jaime Velasquez T.
CONSULTOR DE TESIS.

Quito, Octubre de 1969.

INDICE GENERAL

Introducción.-

CAPITULO I

CARACTERISTICAS GENERALES DEL PROYECTO "OTAVALO IBARRA CAYAMBE"

Generalidades	3
Diagrama eléctrico unifilar	4
Características eléctricas y mecánicas de los grupos generadores	5
Características eléctricas del equipo de transformación	15
Características eléctricas de las líneas de transmisión y subtransmisión	16

CAPITULO II

ESTUDIO DE LA FLUCTUACION DE POTENCIA EN EL SISTEMA

Análisis de la curva de carga del sistema y proyección de la demanda	35
Programa de despacho de carga y determinación de los aportes de potencia de cada central del sistema	37

CAPITULO III

DETERMINACION DE LOS PUNTOS DE FALLA CRITICOS DEL SISTEMA Y ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DEL MISMO

Determinación de los puntos críticos del Sistema bajo el punto de vista de fallas eléctricas	44
--	----

Diagrama de Impedancias del Sistema	51
Determinación de las localizaciones de falla a estudiarse	52
Desarrollo de los estudios de estabilidad para cada una de las fallas escogidas	54

ESTUDIO N° 1

Diagrama unifilar	54
Ubicación de cargas	55
Determinación de los voltajes en las barras de carga	57
Condiciones iniciales de operación	60
Determinación del tipo de oscilación de las centrales	65
Reducción de la red	77
Curvas del límite de estabilidad transitoria	89

ESTUDIO N° 2

Diagrama Unifilar	112
Ubicación de cargas	114
Voltajes en las barras de carga	115
Condiciones iniciales de operación	115
Determinación del tipo de oscilación	119
Reducción de la red	120
Curvas del límite de estabilidad	133
Tiempos máximos de despeje de fallas	158

CAPITULO IV

Conclusiones y Recomendaciones	
Conclusiones	162
Recomendaciones	164

LISTA DE ANEXOS

CAPITULO I

- I.-1 Diagrama Unifilar
- I.-2 Interconexión "El Ambi - Otavalo - Cayambe"
- I.-3 El Ambi
- I.- 4 Estación de Seccionamiento cerca de Ibarra
- I.-5 Planta Diesel (Ibarra)
- I.-6 Planta Atuntaqui
- I.-7 Planta Cotacachi
- I.-8 Efecto volante vs. velocidad sincrónica para grupos hidráulicos de 5.000 KVA
- I.-9 Estructura tanjente "S" (34.5 KV)
- I.-10 Estructura tanjente tipo "A"
- I.-11 Línea de 13.2 KV

CAPITULO II

- II.-1 Resumen del pronóstico de demanda por zonas para el sistema "Tulcán - Ibarra - Cayambe"
- II.-2.-a Resumen del pronóstico de demanda por zonas para el sistema "Otavalo - Ibarra - Cayambe"
- II.-2 Curva de carga representativa del sistema Tulcán Ibarra Cayambe
- II.-3 Curvas de crecimiento de la demanda, por zonas
- II.-4 Curvas de proyección de la generación de energía, por zonas
- II.-5 Características de las instalaciones existentes en el sistema "Tulcán - Ibarra - Cayambe"
- II.-6 Potencia y capacidad de generación de las centrales hidroeléctricas existentes
- II.-7 Características de las centrales del sistema "Otavalo - Ibarra - Cayambe"
- II.-8 Variación de la demanda máxima mensual

- II.-9 Requerimientos del mercado y disponibilidad de potencia y energía
- II.-10 Ubicación de las centrales en la curva de carga
- II.-11 Resumen del programa de operación
- II.-12 Cargas máximas, por centros de carga y períodos hidrológicos.

CAPITULO III

- III.-1 Reactancias transitorias de los generadores del Sistema
- III.-2 Reactancia de secuencia positiva de los transformadores del sistema
- III.-3 Impedancias de las líneas de interconexión
- III.-4 Diagrama de Impedancias
- III.-4.a Diagrama simplificado de impedancias

ESTUDIO N° 1

- III.-5 Falla en la localización N° 3: Curvas P - delta
- III.-6.a Falla en la localización N° 3: Curva del límite de estabilidad transitoria para la máquina "A"
- III.-6.b Idem para la máquina "B"
- III.-7 Falla en la localización N° 5: Curvas P - delta para la máquina "B"
- III.-8 Falla en la localización N° 5: Curva del límite de estabilidad transitoria para la máquina "B"
- III.-9 Falla en la localización N° 6: Curvas P - delta para las máquinas "A" y "B" combinadas
- III.-10 Falla en la localización N° 6: Curva del límite de estabilidad transitoria para las máquinas "A" y "B" combinadas
- III.-11 Falla en la localización N° 7: Curvas P - delta para las máquinas "A" y "B" combinadas
- III.-12 Falla en la localización N° 7: Curva del límite de estabilidad transitoria para las máquinas "A" y "B" combinadas

ESTUDIO N° 2

- III.-13 Falla en la localización N° 5: Curvas P - delta para las máquinas "D" y "B"
- III.-14.a Falla en la localización N°5: Curva del límite de estabilidad transitoria para la máquina "D"
- III.-14.b Idem para la máquina "B"
- III.-15 Falla en la localización N° 6: Curvas P - delta para las máquinas "D" y "B" combinadas
- III.-16 Falla en la localización N° 6: Curva del límite de estabilidad transitoria para las máquinas "D" y "B" combinadas
- III.-16 Falla en la localización N° 7: Curvas P - delta para las máquinas "D" y "B" combinadas
- III.- 18 Falla en la localización N° 7: Curva del límite de estabilidad transitoria para las máquinas "D" y "B" combinadas
- III.-19 Falla en la localización N° 10: Curva P - delta para la máquina "B"
- III.-20 Falla en la localización N° 10: Curva del límite de estabilidad transitoria para la máquina "B"
- III.-21 Falla en la localización N° 3: Curvas de oscilación
- III.-22 Falla en la localización N°3: Curvas P - delta para las máquinas "E" y "C" combinadas
- III.- 23 Falla en la localización N° 3: Curva del límite de estabilidad transitoria para las máquinas "E" y "C" combinadas

SISTEMA OTAVALO - IBARRA - CAYAMBE.

ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA Y DETERMINACION DE LOS
TIEMPOS CRITICOS DE DESPEJE DE FALLAS

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

El objeto del presente trabajo es determinar las condiciones para las cuales el sistema Otavalo-Ibarra-Cayambe es estable, y a base de un estudio de las fallas que más pueden afectarlo, determinar cual es la incidencia de esas condiciones anormales de operación en el comportamiento de los grupos generadores que alimentan al sistema, para que, en el caso de que se pueda presentar inestabilidad en el mismo, prevenirla - mediante el aislamiento de la falla causante del fenómeno en lapsos tales que no afecten la estabilidad del resto del sistema, el cual podrá seguir sirviendo a todos, o por lo menos a la mayoría de los centros de carga.

Este estudio no supone el diseño de ninguna de las partes del sistema eléctrico, sino que únicamente aprovecha, - sin entrar en detalles de diseño, el trabajo realizado por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación en lo referente a -- las características de las líneas que interconectan las diferentes centrales del sistema, las características principales de las centrales mismas, y los esquemas de conexiones elaborados, sin entrar a considerar los criterios observados para la adopción de esos esquemas.

En la parte final del trabajo se dan los tiempos-- máximos de operación de los conjuntos de protección para aislar una falla en su zona de operación, pero no se hace una -- coordinación de la protección del sistema, sino que únicamen-

te se establecen límites para ese trabajo.

La mayoría de la información empleada en el desarrollo del trabajo tiene su origen en los diseños y estudios hechos por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación. Sin embargo, en determinadas partes no se ha podido encontrar información en esta fuente, por lo que se ha recurrido a tablas y cuadros de características generales de equipos, tomados de las fuentes que se mencionan a lo largo del trabajo, y que si bien no constituyen datos exactos y reales sí son una aproximación - aceptable para el presente tipo de estudio.

Por otro lado, la intención de este trabajo es poner de manifiesto los principales métodos de estudios de estabilidad, aplicados a un sistema eléctrico simple. Por esta razón a lo largo del estudio se han explicado en forma más o menos detallada los principales conceptos y métodos, dando mayor énfasis a su aplicación antes que a la exactitud misma de -- los resultados obtenidos.

C A P I T U L O I

CARACTERISTICAS GENERALES DEL PROYECTO
"OTAVALO-IBARRA-CAYAMBE"

I.- 1.- GENERALIDADES.- El sistema Otavalo-Ibarra-Cayambe cubre casi en su totalidad el territorio de la provincia de Imbabura, y parte de la de Pichincha, -- alimentando diferentes poblaciones con energía eléctrica proveniente especialmente de la central hidroeléctrica "El Ambi", -- ubicada sobre el río del mismo nombre. Pero a más de esta central, existen en el sistema una serie de otras pequeñas, en su mayoría hidráulicas, que han estado alimentando a las poblaciones en las que se encuentran situadas, y a algunas aldeñas; la falta de agua en muchas de estas centrales, y la falta de capacidad instalada, han obligado a la construcción de la central "El Ambi" como fuente principal de energía para estas poblaciones, pero dejando las principales centrales existentes para cubrir la totalidad de la demanda del sistema en los próximos --- años, y con el fin de cubrir la base de la curva de carga.

Según los estudios realizados por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación, todas estas centrales, incluida la de "El Ambi", abastecerán satisfactoriamente la demanda del sistema hasta el año 1976. Sin embargo, se espera interconectar este sistema regional a la red nacional a principios del año 1975, y de allí tomar la energía necesaria.

La construcción de la central "El Ambi" para abastecer-

la demanda del sistema Otavalo-Ibarra-Cayambe, ha traído como consecuencia inmediata la necesidad de unir las poblaciones a servirse mediante líneas de transmisión y subtransmisión, lo cual ha dado lugar a la formación de un "anillo" eléctrico al cual se conectan todas las centrales del sistema, y del cual toman energía las diferentes poblaciones. La formación de este "anillo" no era la única posibilidad de suministrar energía a los centros de carga del sistema; sin embargo, el estudio de las diferentes alternativas ha dado lugar a la selección de ésta, y la conformación del sistema en la forma que se describe en la sección si siguiente.

I.- 2.- DIAGRAMA ELECTRICO UNIFILAR.- Para la elaboración del diagrama eléctrico unifilar del sistema (Anexo # I.-1), se han tomado como referencia los diferentes esquemas de las partes ya existentes del sistema así como los diseños de las partes nuevas, realizados por INECEL.

El diagrama del Anexo # I.-1, está pues conformado a base de los siguientes diagramas, cuya fuente es INECEL, y que adjuntamos también como anexos:

ANEXO #	PLANO
I.-2	Interconexión El Ambi-Otavalo-Cayambe
I.-3	El Ambi
I.-4	Estación de seccionamiento cerca de Ibarra
I.-5	Planta Diesel Ibarra
I.-6	Planta Atuntaqui
I.-7	Planta Cotacachi

Como puede verse en el Anexo # I.-1, el sistema Otavalo-Ibarra-Cayambe está conformado por seis centrales de las cuales

cinco son hidroeléctricas y una termoeléctrica (la de Ibarra), -- accionada por grupos Diesel. Sin embargo, varias de estas cen -- trales se agruparan entre sí a lo largo de este trabajo, con el -- fin de facilitar el procedimiento de cálculo, y sin que se come -- ta con ello un error apreciable, pues la capacidad de algunas de -- las mencionadas centrales es relativamente muy pequeña, y ellas -- se encuentran muy cercanas entre sí.

Por otro lado, puede apreciarse en el mismo diagrama, -- que el sistema tiene cinco centros principales de carga, ubica -- dos en las poblaciones de Ibarra, Atuntaqui, Cotacachi, Otavalo y -- Cayambe. Sin embargo, será conveniente recordar que las cargas -- localizadas en estos centros no corresponden exclusivamente a -- las cargas absorbidas por estas poblaciones, sino que también es -- tán incluídas las cargas de numerosas poblaciones adyacentes, -- alimentadas desde estos centros.

I.-3.- CARACTERIS TICAS ELECTRICAS Y MECANICAS DE LOS GRUPOS GE -- NERADORES. -- En el siguiente cuadro (N^o I.-1) se han ta -- bulado las principales características de -- las centrales que conforman el sistema, a saber: tipo de central, -- número de unidades generadoras capacidad de cada unidad, capaci -- dad total de la central, velocidad sincrónica de las unidades ge -- neradoras, voltaje de generación, reactancia y efecto volante de -- los grupos.

Estos datos han sido obtenidos de INECEL⁽¹⁾ ⁽²⁾, a excep -- ción de las dos últimas características, reactancia y efecto vo -- lante, la primera de las cuales ha sido extraída de una tablade -- características generales⁽³⁾, y la última calculada con un proce -- dimiento especial que se detalla más adelante.

En la determinación de las reactancias unitarias de los generadores de las centrales se han tomado valores promedio para los generadores de la central "El Ambi", y para las demás -- centrales se ha considerado que el porcentaje de reactancia aumenta al disminuir la potencia del generador tal como puede --- apreciarse en las curvas reactancia (PU)- KVA nominales ⁽³⁾. De esta forma se ha llegado a obtener valores aproximados de las - reactancias de los diferentes generadores que alimentan al sistema, valores que si bien no son exactos, tienen suficiente --- aproximación para propósitos generales como el presente.

Para llegar a determinar el efecto volante de las unidades de la central "El Ambi", se ha tomado como referencia una tabla de características generales de máquinas sincrónicas, suministrada por General Electric Co. y publicada en "Hydroelectric Handbook" ⁽⁴⁾ de Creager y Justin, la cual transcribimos parcialmente a continuación:

PESOS APROXIMADOS Y DIMENSIONES DE GENERADORES
ACCIONADOS MEDIANTE TURBINAS HIDRAULICAS DE --
EJE HORIZONTAL

POTENCIA NOMINAL KVA	VELOCIDAD R.P.M.	EFEECTO VOLANTE Lb-pie ²	PESO NETO Lb	DIMENSION Pulg.
5.000	514	113.000	53.000	-----
	300	328.000	75.000	-----
	150	1'320.000	117.000	-----

Con el fin de determinar el efecto volante de los gru--pos de "El Ambi", se ha dibujado en el anexo # I.-8 la curva -- WR^2 -R.P.M. , para una potencia de 5.000 KVA, la cual ha sido -- proyectada hasta $n=600$ R.P.M. El resultado de esta proyección - de la curva ha dado como resultado $WR^2 = 90.000$ Lb.-pie².

Para el cálculo del efecto volante de los grupos de las demás centrales se han tomado en consideración los criterios utilizados para el diseño de esas clase de equipos.

En general, hay cuatro criterios que deben ser aplicados conjuntamente en la determinación del efecto volante de un grupo generador⁽⁵⁾:

1.- El efecto volante debesser suficientemente grande para prevenir variaciones dañinas en frecuencia (y voltaje) cuando es la única unidad generadora en el sistema. Esas variaciones pueden ser el resultado de a) cambios violentos en la carga, o b) detorque pulsante en la máquina impulsora.

Para cumplir la condición a) el efecto volante debe ser

$$WR^2 = \frac{433 (Kw) \cdot T_1}{(R.P.M./100)^2} \quad (I)$$

donde T_1 varía entre 1.4 y 2.0 segundos.

La condición b), sin embargo, no será necesaria de considerar, ya que en una turbina hidráulica no hay posibilidad de que se presente torque pulsante.

2.- El efecto volante debe ser adecuado para la operación en paralelo de la unidad con un sistema muy grande (barra infinita). Esta condición puede ser mejor expresada en términos de la cantidad C, llamada "factor compresor", en la forma :

$$WR^2 = \frac{1.34 P_r f C}{(\text{RPM}/100)^4} \quad (\text{II})$$

donde P_r = Potencia sincronizante, en Kw/radián eléctrico
 f = Frecuencia del sistema, en ciclos/segundo
 C = Factor compresor, que es una característica de diseño.

3.- El efecto volante debe ser adecuado para la operación en paralelo de la unidad con otras cuyas características sean conocidas. Un método suficientemente preciso de verificarlo es comparar la frecuencia natural de cada unidad en un sistema infinito, usando la siguiente fórmula de American Standard Association (ASA):

$$F = \frac{35.200}{\text{RPM}} \sqrt{\frac{P_r f}{WR^2}} \quad (\text{ciclos/minute}) \quad (\text{III})$$

donde F es la frecuencia natural del sistema.

Si las frecuencias naturales así calculadas están todas por debajo de la frecuencia forzada más baja posible en aproximadamente 20%, entonces la condición habrá sido satisfecha, ya que las frecuencias naturales combinadas de cualquier grupo de unidades está siempre comprendida entre las frecuencias naturales de las unidades solas en un sistema infinito.

4.- El efecto de inercia está relacionado con el tiempo requerido, bajo condiciones transitorias, para alcanzar un desplazamiento angular después del cual no es posible el restablecimiento de las condiciones normales.

Generalmente, esta condición es despreciada, a menos - que se haya determinado que la unidad va a trabajar cerca del límite de estabilidad, en cuyo caso es necesario aumentar su inercia.

Es pues claro, que uno de estos criterios, varios de --- ellos, o todos ellos, son considerados para la determinación del efecto volante al momento de realizar el diseño de un grupo generador.

Para el presente caso de las presentes centrales que nos ocupan ~~debe~~ considerarse que todas ellas son antiguas, e instaladas con el propósito de alimentar cargas locales, situadas a pequeñas distancias de las mismas, o prácticamente, sobre la misma central; por otro lado, en el momento de la instalación de estas centrales, no se pensó en una interconexión entre ellas, ya que estaban destinadas exclusivamente a servir a las poblaciones donde fueron instaladas.

Por estas razones, es de suponer que el criterio utilizado para la determinación del momento de inercia fué el N° 1, ya que los demás no hubiera sido necesario considerar debido al carácter aislado de las centrales; además, pese a que todas ellas, a excepción de la Otavalo # 2, constan de dos grupos cada una -- tampoco habría sido necesario considerar el criterio N° 3, ya -- que al ser ambos grupos iguales en cada central aislada, no se -- presentaría problema alguno en su operación en paralelo.

Así pues, los momentos de inercia de cada uno de los grupos de las diferentes centrales del sistema deberán ser, en base al criterio de diseño N° 1 (página 8), los siguientes:

a) CENTRAL DIESEL IBARRA

(2 grupos diesel de 396 KVA cada uno, f.p.=0.80, 720 R.P.M.)

$$WR^2 = \frac{433.(396 \times 0.80).2.0}{(720/100)^2} = 5.280 \text{ Lb.-pie}^2$$

Redondeando este valor tenemos:

$$WR^2 = 5.300 \text{ Lb-pie}^2$$

b) CENTRAL ATUNTAQUI

(2 grupos de 250 KVA % , f.p. = 0.80 , 900 R.P.M.)

$$WR^2 = \frac{433 (250 \times 0.80) 2.00}{(900/100)^2} = 2.140 \text{ Lb.-pie}^2$$

Aproximando este valor, tenemos

$$WR^2 = 2.150 \text{ Lb-pie}^2$$

c) CENTRAL COTACACHI

(2 grupos de 300 KVA c/u , f.p. = 0.80 , 900 R.P.M.)

$$WR^2 = \frac{433 (300 \times 0.80) 2.00}{(900/100)^2} = 2.570 \text{ Lb-pie}^2$$

Aproximando este valor,

$$WR^2 = 2.600 \text{ Lb-pie}^2$$

d) CENTRAL OTAVALO # 1

(2 grupos de 250 KVA c/u , f.p. = 0.80 , 900 R.P.M.)

$$WR^2 = \frac{433 (250 \times 0.80) 2.00}{(900/100)^2} = 2.140 \text{ Lb-pie}^2$$

Aproximando:

$$WR^2 = 2.150 \text{ Lb-pie}^2$$

e) CENTRAL OTAVALO # 2

(1 grupo de 527 KVA, f.p = 0.80.720 R.P.M.)

$$WR^2 = \frac{433.(527 \times 0.80) \times 2.0}{(720/100)^2} = 7.060 \text{ Lb.-pie}^2$$

Aproximando este valor:

$$WR^2 = 7.100 \text{ Lb.-pie}^2$$

En los cálculos precedentes, se ha tomado el tiempo de reacción del regulador de velocidad (T_1) igual a 2.00 segundos, por considerar que todos los grupos son de cierre lento.

A continuación se detalla el cálculo de la constante de inercia H de cada una de las máquinas de las diferentes centrales, en Mega-Joules/MVA, lo cual completa las columnas del cuadro N° I.-1. Dicho cálculo está basado en la definición⁽⁶⁾ de la constante $H = \frac{N}{G}$ donde N = energía almacenada, en M-Joules, G = Potencia nominal, en MVA.

Auxiliariamente, será calculada la energía de rotación; una expresión adecuada para este cálculo es la siguiente:

$$N = 2.31 \times 10^{-10} WR^2 n^2,$$

la cual proviene de la fórmula de la energía de un cuerpo de rotación, $W = \frac{1}{2} I \omega^2$, en donde se ha reemplazado el momento de inercia $I = \frac{WR^2}{32.2}$, en unidades inglesas; además, $\omega = \frac{2\pi n}{60}$, con lo cual $N = \frac{746}{550} \times 10^{-6} \times \frac{1}{2} \frac{WR^2}{32.2} \times \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 =$

$$= 2.31 \times 10^{-10} \text{ WR}^2 \text{ n}^2 \quad \text{Mega-Joules}$$

1) CENTRAL EL AMBI:

$$\begin{aligned} G &= 5.00 \text{ MVA} \\ \text{WR}^2 &= 90.000 \text{ Lb.-pie}^2 \\ n &= 600 \text{ R.P.M.} \end{aligned}$$

$$N = 2,31 \times 10^{-10} \times 90.000 \times (600)^2 = 7.49 \text{ M-Joules}$$

$$H = \frac{N}{G} = \frac{7.49}{5.00} = 1.50$$

$$H = 1.50 \text{ MJ/MVA}$$

2) CENTRAL DIESEL IBARRA

$$\begin{aligned} G &= 0.396 \text{ MVA} \\ \text{WR}^2 &= 5.300 \text{ Lb.-pie}^2 \\ n &= 720 \text{ R.P.M.} \end{aligned}$$

$$N = 2.31 \times 10^{-10} \times 5.300 \times (720)^2 = 0.637 \text{ M-Joules}$$

$$H = \frac{0.637}{0.396} = 1.61$$

$$\underline{H = 1.61 \text{ MJ/MVA}}$$

3) CENTRAL ATUNTAQUI:

$$\begin{aligned} G &= 0,250 \text{ MVA} \\ \text{WR}^2 &= 2.150 \text{ Lb.-pie}^2 \\ n &= 900 \text{ R.P.M.} \end{aligned}$$

$$N = 2.31 \times 10^{-10} \times 2.150 (900)^2 = 0.402 \text{ M-Joules}$$

$$H = \frac{0.402}{0.250} = 1.61$$

$$\underline{H = 1.61 \text{ MJ/MVA}}$$

5) CENTRAL OTAVALO # 1

$$G = 0.250 \text{ MVA}$$

$$WR^2 = 2.150 \text{ Lb.-pie}^2$$

$$n = 900$$

$$N = 2.31 \times 10^{-10} \times 2.150 (900)^2 = 0.402 \text{ M/Joules}$$

$$H = \frac{0.402}{0.250} = 1.61$$

$$\underline{H = 1.61 \text{ MJ/MVA}}$$

6) CENTRAL OTAVALO # 2

$$G = 0.527$$

$$WR^2 = 7.100 \text{ Lb.pie}^2$$

$$n = 720 \text{ R.P.M.}$$

$$N = 2.31 \times 10^{-10} \times 7.100 \times (720)^2 = 0.852 \text{ M-Joules}$$

$$H = \frac{0.852}{0.527} = 1.62$$

$$\underline{H = 1.62 \text{ MJ/MVA}}$$

CARACTERISTICAS DE LOS TRANSFORMADORES DEL SISTEMA "OTAVALO-IBARRA-CAYAMBE"

TRANSF. #	UBICACION	CAPACIDAD NOMINAL(MVA)	RELACION DE TRANSF. Voltios	IMPEDANCIA % P.U.	REACTANCIA % P.U.	CONEXION
1	C.El Ambi	5.00	4.160/34.500	7.00 0.07	6.97 0.0697	$\Delta/\Delta/\Delta$
2	"	5.00	4.160/34.500	7.00 0.07	6.97 0.0697	$\Delta/\Delta/\Delta$
3	C.D. Ibarra	4.00	34.500/13.800	7.00 0.07	6.98 0.0696	$Y/\Delta/\Delta/\Delta$
4	"	4.00	34.500/13.800	7.00 0.07	6.96 0.0696	$Y/\Delta/\Delta/\Delta$
5	"	1.20	13.800/6.000	7.00 0.07	6.96 0.0696	$Y/\Delta/\Delta$
6	"	0.42	220/6.000	4.00 3.88	3.88 0.0388	$\Delta/Y/\Delta$
7	"	0.42	220/6.000	4.00 0.04	3.88 0.0388	$\Delta/Y/\Delta$
8	C.Atuntaqui	0.50	13.800/400	5.00 0.05	4.88 0.0488	$Y/\Delta/\Delta$
9	"	0.50	400/5.000	4.80 0.048	4.65 0.0465	$Y/\Delta/\Delta$
10	C.Cotacachi	0.50	400/13.800	5.00 0.05	4.84 0.0484	$\Delta/\Delta/\Delta$
11	"	0.50	400/5.000	4.80 0.048	4.62 0.0462	$Y/\Delta/\Delta$
12	Sub.Otavalo	2.00	34.500/13.800	7.00 0.07	6.95 0.0695	$Y/\Delta/\Delta/\Delta$
13	C.Otavalo#1	1.00	5.000/13.800	6.00 0.06	5.94 0.0594	$\Delta/\Delta/\Delta$
14	C.Otavalo#2	0.55	4.00/5.000	4.80 0.048	4.62 0.0462	$\Delta/\Delta/\Delta$
15	Sub.Cayambe	2.00	34.500/13.800	7.00 0.07	6.95 0.0695	$Y/\Delta/\Delta/\Delta$

Base de potencia: potencia nominal del transformador

I.- 4.- CARACTERISTICAS ELECTRICAS DEL EQUIPO DE TRANSFORMACION

Como puede apreciarse en el diagrama del Anexo N° I.-1, en el sistema existen dos subestaciones de transformación, una en Otavale y otra en Cayambe, y seis patios de transformación ubicados en cada una de las centrales generadoras del sistema; estos ocho puntos de transformación del nivel de voltaje están conformados por un total de quince transformadores de furza, siguiendo la disposición indicada en el Anexo # I.-1.

Las características de cada uno de los transformadores, así como su ubicación y su número de identificación en el diagrama, se dan en el cuadro N° I.-2 .

La capacidad nominal, relación de transformación, y tipo de conexión tienen su fuente de origen en los estudios realizados por INECEL y los diagramas de las instalaciones existentes, dados en los Anexos I.-2 a I.-7.

Por no disponerse de datos de placa para los transformadores se ha estimado su reactancia o impedancia a base de tablas de características generales publicadas por Westinghouse E. C. (3), (7).

Como puede apreciarse en el cuadro # I.-2, los valores de reactancia son aproximadamente los mismos que los de impedancia, de lo que se deduce que la resistencia de los transformadores tiene muy poca influencia en su impedancia total, razón por la cual en adelante se considerará a la impedancia como una reactancia pura.

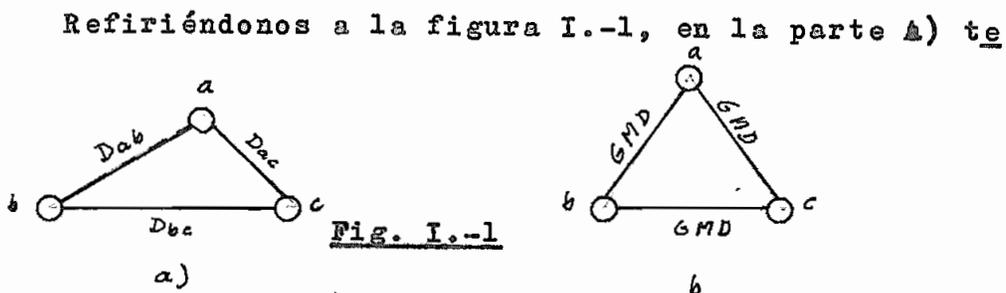
I.- 5.- CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE LAS LINEAS DE TRANSMISION Y SUBTRANSMISION.-

Las distintas centrales del sistema están interconectadas entre sí y -- con las subestaciones de reducción del nivel de voltaje en los centros de carga, mediante nueve líneas, las cuales se detallan en el diagrama del anexo #I.-1.

En el cuadro #I.-3 se dan las principales características físicas de todas las líneas, a saber: voltaje nominal de operación, longitud, calibre de conductor, características estas tomadas de los planos de las instalaciones existentes y de los diseños realizados por INECEL (Anexos I.-2 y I.-4). Además se indica el tipo de estructura de la línea, de acuerdo a las normas de construcción adoptadas por INECEL (Ver anexos I.-9, I.-10 y I.-11), y a base de la disposición de los conductores en la estructura se ha calculado la distancia media geométrica (GMD) entre los mismos, lo cual a su vez ha servido para la determinación de la impedancia y reactancia de las líneas.

El método seguido para el cálculo de la impedancia de las líneas es el siguiente:

- a) DETERMINACION DE LA DISTANCIA MEDIA GEOMETRICA (GMD) ENTRE CONDUCTORES.- Por definición, la distancia media geométrica entre conductores dispuestos asimétricamente, es la distancia simétrica equivalente entre los mismos conductores, con la cual tendrían la misma reactancia.



nemos una línea de disposición asimétrica, con distancias entre conductores D_{ab} , D_{bc} , y D_{ca} , todas ellas diferentes entre sí. La parte b) muestra una disposición simétrica de conductores, separados entre sí por la distancia GMD. Si ambas líneas han de ser eléctricamente equivalentes, la distancia equivalente GMD deberá ser un promedio geométrico de las distancias entre los conductores de la línea original, o sea:

$$GMD = \sqrt[3]{(D_{ab}) (D_{bc}) (D_{ca})}$$

Utilizando este criterio, y a base de las distancias indicadas en los anexos I.-9, I.-10, y I.-11, se ha calculado la distancia media geométrica para cada línea.

b) DETERMINACION DE LA RESISTENCIA DE LAS LINEAS.- La resistencia de cada línea ha sido determinada de acuerdo al calibre y tipo de conductor, utilizando tablas de características de conductores publicadas por Westinghouse E.C. (3). En esta forma ha sido determinada la resistencia unitaria (Ω / milla/ fase), la que multiplicada por la longitud de la línea da la resistencia total de la misma (Ω / fase).

c) DETERMINACION DE LA REACTANCIA DE LAS LINEAS.- La reactancia de toda línea está dividida matemáticamente en dos partes, la una correspondiente al conductor en sí mismo (a su calibre), y la otra correspondiente a la disposición de los conductores (GMD).

Para los diferentes calibres standard de conductores se

halla tabulada⁽³⁾ la primera componente de la reactancia; y mediante tablas auxiliares⁽³⁾ se determina la segunda componente, - en función de la distancia media geométrica de la línea (GMD).

d) DETERMINACION DE LA IMPEDANCIA DE LAS LINEAS.- La resistencia y reactancia determinadas en la forma que se describe en los acápates anteriores, dan implícitamente el valor de la impedancia en su forma compleja $r+jx$, de la cual se ha calculado su magnitud mediante la expresión:

$$Z = \sqrt{r^2 + x^2}$$

Con el fin de simplificar el trabajo posterior, las impedancias calculadas en ohmios han sido trasladados a un sistema unitario cuya base de potencia es la potencia de la mayor central del sistema, ésto es, 10.000 KVA, y cuya base de tensión es la tensión propia de cada línea en KV. Las impedancias y reactancias unitarias de las líneas han sido determinadas dividiendo la correspondiente impedancia o reactancia en ohmios para la base de impedancia, o lo que es igual, aplicando la siguiente fórmula derivada de la definición de base de impedancia:

$$Z_i(\text{pu}) = \frac{Z_{\Omega} \text{KVAB}}{1.000 \times \text{KV}_B^2}$$

A continuación se detalla el cálculo de la impedancia y su reducción a la base unitaria, para cada una de las líneas en estudio:

I.-5.-1.- Línea "El Ambi"-Subestación de seccionamiento en Ibarra".-

Características de la línea:

Voltaje Nominal	34.5 KV
Longitud	4.00 Km.
Conductor	3x1/0 ACSR+1x3/8" S.Martin
Tipo de estructura	Anexo # I.-10

DISTANCIA MEDIA GEOMETRICA:

a) Distancia entre conductores:

$$D_{1-2} = \sqrt{(92)^2 + (25)^2} = 95 \text{ cm.}$$

$$D_{1-3} = \sqrt{(160 - 25)^2 + (92)^2} = 163 \text{ cm.}$$

$$D_{2-3} = 160 \text{ cm.}$$

b) GMD:

$$GMD = \sqrt[3]{0.95 \times 1.63 \times 1.60} = 135 \text{ cm.}$$

$$\underline{GMD = 135 \text{ cm. (4' 5")}}$$

CALCULO DE LA IMPEDANCIA:

a) Resistencia:

$$r_a = 1.12 \ \Omega / \text{milla} / \text{fase}$$

$$R_L = 1.12 \times \frac{4.00}{1.6} = 2.80 \ \Omega / \text{fase}$$

b) Reactancia:

$$X_a = 0.656 \, \Omega / \text{milla/fase}$$

$$X_d = 0.1802 \, \Omega / \text{milla/fase}$$

Por lo tanto:

$$X = X_a + X_d = 0.656 + 0.1802 = 0.836 \, \Omega / \text{milla/fase}$$

$$X = 0.836 \times \frac{4.00}{1.6} = 2.09 \, \Omega / \text{fase}$$

c) Impedancia:

$$Z = (2.80 + j 2.09) \, \Omega / \text{fase} \quad \circ$$

$$Z = 3.5 \, e^{-j36.7^\circ}$$

d) Valores Unitarios:

Base de impedancia:

$$Z_B = \frac{1.000 \times (34.5)^2}{10.000} = 119 \, \Omega$$

$$r_{pu} = \frac{2.80}{119} = 0.0235 \, \text{P.U.}$$

$$X_{pu} = \frac{2.09}{119} = 0.0176 \, \text{P.U.}$$

$$Z_{pu} = 0.0235 + j0.0176 \quad \text{o} \quad Z_{pu} = 0.0294 e^{-j36.7^\circ}$$

I.-5.-2.- LINEA "Subestación de seccionamiento en Ibarra-Central Diesel Ibarra"

Características de la línea:

Voltaje Nominal	34.5 KV
Longitud	2.00 Km
Conductor	3x1/0 ACSR
Tipo de estructura	Anexo # I.-9
Número de circuitos	2 (separados)

DISTANCIA MEDIA GEOMETRICA

a) Distancia entre conductores:

$$D_{1-2} = D_{1-3} = \sqrt{(0.80)^2 + (1.17)^2} = 1.415 \text{ metros}$$

$$D_{2-3} = 1.60 \text{ metros}$$

B) GMD:

$$GMD = \sqrt[3]{(1.415)^2 \times 1.60} = 1,475 \text{ metros}$$

$$\underline{GMD = 1,475 \text{ metros (4' 10")}}$$

CALCULO DE LA IMPEDANCIA:

a) Resistencia:

$$r_a = 1.12 \, \Omega / \text{milla} / \text{fase}$$

$$R = 1.12 \times \frac{2.00}{1.6} = 1.40 \, \Omega / \text{fase}$$

b) Reactancia:

$$X_a = 0.656 \, \Omega / \text{milla} / \text{fase}$$

$$X_d = 0.1912 \, \Omega / \text{milla} / \text{fase}$$

$$X = X_a + X_d = 0.656 + 0.1912 = 0.8472 \, \Omega / \text{milla} / \text{fase}$$

$$X = 0.8472 \times \frac{2.00}{1.6} = 1.06 \, \Omega / \text{fase}$$

c) Impedancia:

$$Z = (1.40 + j1.06) \, \Omega / \text{fase}$$

e

$$Z = 1.75 e^{-j37.1^\circ} \, \Omega / \text{fase}$$

d) Valores Unitarios:

Base de impedancia:

$$Z_B = \frac{1.000 \times (34.5)^2}{10.000} = 119 \, \Omega$$

$$r_{pu} = \frac{1.40}{119} = 0.01175 \text{ P.U.}$$

$$X_{pu} = \frac{1.06}{119} = 0.0089 \text{ P.U.}$$

$$Z_{pu} = (0.01175 + j 0.0089) \text{ PU} \quad \text{o} \quad Z_{pu} = 0.0147 e^{-j37.1^\circ}$$

I.-5.-3.- Línea "Subestación de seccionamiento en Ibarra-Subestación Otavalo"

Características de la línea:

Voltaje Nominal	34.5KV
Longitud	21.00 Km
Conductor	ACSR 3x320 MCM (AWG)
Tipodde estructura	Anexo I.-9

DISTANCIA MEDIA GEOMETRICA:

$$\text{GMD} = 1.475 \text{ metros (4' 10")}$$

(ver sección I.-5.-2)

CALCULO DE LA IMPEDANCIA:

a) Resistencia:

$$r_a = 0.306 \ \Omega / \text{milla} / \text{fase}$$

$$r = 0.306 \times \frac{21}{1.6} = 4.02 \ \Omega / \text{fase}$$

b) Reactancia:

$$X_g = 0.451$$

$$X_d = 0.1912$$

$$X = X_g + X_d = 0.6422 \Omega / \text{milla} / \text{fase}$$

$$X = 0.6422 \frac{21}{1.6} = 8.43 \Omega / \text{fase}$$

c) Impedancias:

$$Z = (4.02 + j 8.43) \Omega / \text{fase}, \circ$$

$$Z = 9.35 e^{-j 64.5^\circ} \Omega / \text{fase}$$

d) Valores Unitarios:

Base de impedancia:

$$Z_B = \frac{1.000 \times (34.5)^2}{10.000} = 119 \Omega$$

$$r_{pu} = \frac{4.02}{119} = 0.0338 \text{ P.U.}$$

$$x_{pu} = \frac{8.43}{119} = 0.0708 \text{ P.U.}$$

0015 3

$$Z_{pu} = (0.0338 + j 0.0708) \text{ P.U.} \quad \circ \quad Z_{pu} = 0.0785 e^{-j64.5^\circ} \text{ PU}$$

I.-5.-4 Línea "Subestación Otavalo-Central Otavalo # 1" .-

Características de la línea:

Voltaje Nominal	13.8 KV
Longitud	2.50 Km
Conductor	ACSR 3x1/0 AWG
Tipo de estructura	Anexo # I.-11

DISTANCIA MEDIA GEOMETRICA

$$D_{1-2} = D_{1-3} = \sqrt{(110)^2 + (60)^2} = 125 \text{ cm.}$$

$$D_{2-3} = 220 \text{ cm.}$$

$$GMD = \sqrt[3]{(1.25)^2 \times 2.20} = 1.51 \text{ metros}$$

$$\underline{GMD = 151 \text{ metros (4' 11")}}$$

CALCULO DE LA IMPEDANCIA:

a) Resistencia:

$$r_a = 1.12 \ \Omega / \text{milla} / \text{fase}$$

$$r = 1.12 \frac{2.50}{1.6} = 1.75 \ \Omega / \text{fase}$$

b) Reactancia:

$$X_a = 0.656 \ \Omega / \text{milla} / \text{fase}$$

$$X_d = 0.1933 \ \Omega / \text{milla} / \text{fase}$$

$$X = X_a + X_d = 0.8493 \ \Omega / \text{milla} / \text{fase}$$

$$X = 0.8493 \frac{2.50}{1.6} = 1,325 \ \Omega \text{ /fase}$$

c) Impedancia:

$$Z = (1.750 + j 1.325) \ \Omega \text{ /fase}$$

$$Z = 2.20 e^{-j 37.1^\circ} \ \Omega \text{ /fase}$$

d) Valores Unitarios:

Base de impedancia:

$$Z_B = \frac{1.000 (13.8)^2}{10.000} = 19 \ \Omega$$

$$r_{pu} = \frac{1.75}{19} = 0.0921 \text{ P.U.}$$

$$X_{pu} = \frac{1.325}{19} = 0.0697 \text{ P.U.}$$

$$Z_{pu} = (0.0921 + j 0.0697) \text{ P.U. } \circ$$

$$Z_{pu} = 0.106 e^{-j 37.1^\circ}$$

I.-5.-5.- Línea Central Otavalo #1 - Otavalo #2.-

Características de la línea:

Voltaje Nominal

5.00 KV

Longitud	5.00 Km
Conductor	3x#2 AWG, Cobre
Tipo de estructura	Anexo # I.-11

DISTANCIA MEDIA GEOMETRICA

$$GMD = 1.5i \text{ metros} = 4^{\circ} 11''$$

(Ver sección I.-5.-4)

CALCULO DE LA IMPEDANCIA

a) Resistencia:

$$r_a = 0.964 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$r_l = 0.964 \frac{5.00}{1.6} = 3.01 \ \Omega / \text{conductor}$$

b) Reactancia:

$$X_a = 0.574 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X_d = 0.1933 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X = 0.7673 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X_L = 0.7673 \frac{5.00}{1.6} = 2.40 \ \Omega / \text{conductor}$$

c) Impedancia:

$$Z = (3.01 + j2.40) \ \Omega / \text{fase}, \quad o$$

$$Z = 3.85 e^{-j 38.5^\circ} \Omega / \text{fase}$$

d) Valores Unitarios:

Base de impedancia:

$$Z_B = \frac{1.000 (5.00)^2}{10.000} = 2.5 \Omega$$

$$r_{pu} = \frac{3.01}{2.5} = 1.204 \text{ P.U.}$$

$$X_{pu} = \frac{2.40}{2.5} = 0.96 \text{ P.U.}$$

$$Z_{pu} = (1.204 + j0.96) \text{ PU} = 1.54 e^{j 38.5^\circ} \text{ P.U.}$$

I.-5.-6.- Línea "Subestación Otavalo-Subestación Cayambe".-

Características de la línea:

Voltaje Nominal	34.5 KV
Longitud	23.0 Km
Conductor	ACSR 3x181.5 MCM
Tipo de estructura	Anexo # I.-9

$$GMD = 1.475 \text{ m} = 4'10" \text{ (Ver sección I.-5.-2)}$$

CALCULO DE LA IMPEDANCA:

a) Resistencia:

$$r_a = 0.723 \Omega / \text{conductor/milla}$$

$$r_L = 0.723 \frac{23.0}{1.6} = 10.40 \ \Omega / \text{conductor}$$

b) Reactancia:

$$X_a = 0.621 \ \Omega / \text{conductor/milla}$$

$$X_d = 0.1912 \ \Omega / \text{conductor/milla}$$

$$X = 0.8122 \ \Omega / \text{conductor/milla}$$

$$X_L = 0.8122 \frac{23.0}{1.6} = 11.66 \ \Omega / \text{conductor}$$

c) Impedancia:

$$Z = (10.40 + j11.66) \ \Omega / \text{fase}, \circ$$

$$Z = 15.70 e^{-j 45.3^\circ} \ \Omega / \text{fase}$$

d) Valores Unitarios:

Base de impedancia:

$$Z_B = \frac{1.000 \times (34.5)^2}{10.000} = 119 \ \Omega$$

$$r_{pu} = \frac{10.40}{119} = 0.0875 \text{ PU}$$

$$X_{pu} = \frac{11.66}{119} = 0.0980 \text{ PU}$$

$$Z_{pu} = (0.0875 + j0.0980) \text{ PU}, \circ$$

$$Z_{pu} = 0.1320 e^{-j 45.3^\circ} \text{ PU}$$

I.-5.-7.- Línea "Subestación Otavalo-Central Cotacachi".-

Características de la línea:

Voltaje Nominal	13.8 KV
Longitud	13.0 Km
Conductor	ACSR 3 x 62.4 MCM
Tipo de estructura	Anexo # I.-11

$$GMD = 1.51 \text{ m} = 4' 11'' \quad (\text{Ver sección I.-5.-4})$$

CALCULO DE LA IMPEDANCIA

a) Resistencia:

$$r_a = 169 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$r_L = 169 \frac{13.0}{1.6} = 13.73 \ \Omega / \text{fase}$$

b) Reactancia:

$$X_a = 0.665 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X_d = 0.1933 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X = 0.8583 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X_L = 0.8583 \frac{13.0}{1.6} = 6.98 \ \Omega / \text{fase}$$

c) Impedancia:

$$Z = (13.73 + j 6.98) \ \Omega / \text{fase}, \quad \circ$$

$$Z = 15.50 e^{-j26.8^\circ} \ \Omega / \text{fase}$$

d) Valores Unitarios:

$$\text{Base de impedancia} = Z_B = \frac{1.000 (138)^2}{10.000} = 19 \ \Omega$$

$$r_{pu} = \frac{13.73}{19} = 0.724 \text{ PU}$$

$$X_{pu} = \frac{6.98}{19} = 0.368 \text{ PU}$$

$$Z_{pu} = \frac{15.50}{19} e^{-j 26.8^\circ} = 0.816 e^{-j 26.8^\circ} = (0.724 + j0.368) \text{ PU}$$

I.-5.-8.- Línea "Central Cotacachi-Central Atuntaqui".-

Características de la línea:

Voltaje Nominal	13.8 KV
Longitud	6.4 Km
Conductor	ACSR 3 x 104.5 MCM
Tipo de estructura	Anexo # I.-11
GMD = 1.51 m = 4' 11"	(Ver sección I.-5.-4)

Cálculo de la impedancia:

a) Resistencia:

$$r_a = 1.12 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$r_L = 1.12 \frac{6.4}{1.6} = 4.48 \ \Omega / \text{fase}$$

b) Reactancia:

$$X_a = 0.656 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X_d = 0.1933 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X = X_a + X_d = 0.8493 \ \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X_L = 0.8493 \frac{6.4}{1.6} = 3.39 \ \Omega / \text{fase}$$

c) Impedancia:

$$Z = (4.48 + j 3.39) \ \Omega / \text{fase} = 5.62 e^{-j 37.1^\circ} \ \Omega / \text{fase}$$

d) Valores Unitarios:

Base de impedancia:

$$Z_B = \frac{1.000 \times (13.8)^2}{10.000} = 19 \Omega$$

$$r_{pu} = \frac{4.48}{19} = 0.236 \text{ PU}$$

$$X_{pu} = \frac{3.39}{19} = 0.1785 \text{ PU}$$

$$Z_{pu} = (0.236 + j0.1785) \text{ PU} = 0.296 \angle^{-j 37.1^\circ}$$

I.-5.-9.- Línea "Central Atuntaqui-Central Diesel Ibarra".-

Características de la línea:

Volaje Nominal	13.8 KV
Longitud	11.4 Km
Conductor	ACSR 3 x 104.5 MCM
Tipo de estructura	Anexo # I.-11
GMD = 1.51 m = 4' 11" (Ver sección I.-5.-4)	

CALCULO DE LA IMPEDANCIA

a) Resistencia:

$$r_a = 1.12 \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$r_l = 1.12 \frac{11.4}{1.6} = 7.98 \Omega / \text{fase}$$

b) Reactancia:

$$X_a = 0.656 \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X_d = 0.1933 \, \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X = X_a + X_d = 0.8493 \, \Omega / \text{milla} / \text{conductor}$$

$$X_L = 0.8493 \frac{11.4}{1.6} = 6.05 \, \Omega / \text{fase}$$

c) Impedancia:

$$Z = (7.98 + j 6.05) \, \Omega / \text{fase}, \quad \odot$$

$$Z = 10.0 e^{-j 37.1^\circ} \, \Omega / \text{fase}$$

d) Valores Unitarios:

Base de impedancia:

$$Z_B = \frac{1.000 (13.8)^2}{10.000} = 19 \, \Omega$$

$$r_{pu} = \frac{7.98}{19} = 0.42 \text{ PU}$$

$$X_{pu} = \frac{6.05}{19} = 0.318 \text{ PU}$$

$$Z_{pu} = (0.420 + j 0.318) \text{ PU} = 0.526 e^{-j 37.1^\circ} \text{ PU}$$

C A P I T U L O I I

ESTUDIO DE LA FLUCTUACION DE POTENCIA EN EL SISTEMA

II.-1.- ANALISIS DE LA CURVA DE CARGA DEL SISTEMA Y PROYECCION DE LA DEMANDA.-

El objeto del presente capítulo es determinar la carga que actuará sobre el sistema interconectado de la provincia de Imbabura, y su repartición entre las diferentes centrales generadoras que lo alimentan, dentro del período de estudio comprendido entre 1968 y 1974

En el año 1967, INECEL realizó los estudios de requerimiento de potencia y energía, y de proyección de la demanda para el mencionado período, pero pensando en un sistema más amplio que comprendía las ciudades de Tulcán, El Angel y San Gabriel, y las estaciones generadoras ubicadas en esa zona. Sin embargo ese proyecto ha sido transformado, reduciéndose a suministrar energía a las poblaciones de Ibarra, Otavalo, Cotacachi, Atuntaqui y Cayambe, a base de las centrales de El Ambi, Ibarra, Otavalo, Cotacachi y Atuntaqui.

A pesar de la modificación que ha sufrido el proyecto original, utilizaremos la información elaborada por INECEL en lo referente a los estudios de mercado, pero ajustándolos a las condiciones del nuevo proyecto.

El Anexo # II.-1, cuya fuente es INECEL, es un resumen del pronóstico de demandas por zonas, que incluye las siguientes: Tulcán, El Angel, San Gabriel, Ibarra, Cotacachi, Atuntaqui Otavalo y Cayambe.

En el anexo # II.-1.-a, han sido eliminadas las poblaciones de Tulcán, El Angel y San Gabriel, llegándose por lo tanto a obtener totales inferiores a los del anexo # II.-1, de acuerdo a la conformación del sistema que estamos estudiando.

En el anexo # II.-2, cuya fuente es también INECEL, se muestra la curva diaria de carga representativa del sistema Tulcán-Ibarra-Cayambe, y la correspondiente "curva modificada".

Sin embargo, tomaremos en cuenta que las características de la carga en las provincias de Carchi e Imbabura son muy similares, pues se tiene el mismo tipo de consumos, en porcentajes aproximadamente iguales, y el mismo régimen de utilización de la energía, debido a costumbres similares en sus pobladores.

Por esta razón no se cometerá ningún error considerable al tomar como curva de carga diaria representativa del sistema Otavalo-Ibarra-Cayambe la del sistema Tulcán-Ibarra-Cayambe, del anexo # II.-2, naturalmente considerándose valores relativos de porcentaje.

Del estudio de los anexos # II.-1.-a y II.-2 se desprende que la demanda máxima crecerá desde 3.060 Kw en el año de 1968 hasta 5.400 Kw en 1974; y puesto que la demanda mínima es el 27% de la demanda máxima, al final del período se necesitará tener una potencia firme en el sistema de 1.460 Kw.

Por otro lado, la capacidad de generación del sistema de berá variará desde 10.430 MWH anuales en 1968 hasta 19.090 MWH anuales en 1974.

En los anexos Nos. II.-3 y II.-4 se observan las curvas de crecimiento de la demanda y de la generación de energía.

II.-2 PROGRAMA DE DESPACHO DE CARGA Y DETERMINACION DE LOS -
APORTES DE POTENCIA DE CADA CENTRAL DEL SISTEMA.-

En esta parte se determinará, a base de los estudios existentes para el sistema Tulcán-Ibarra-Cayambe, modificados para el sistema Otavalo-Ibarra-Cayambe, la contribución de potencia de cada una de las centrales en las diferentes épocas del año, para el período de estudio 1968 - 1974, de acuerdo con las potencias firmes y nominales de cada una de las estaciones generadoras, así como de su capacidad anual de generación.

II.-2.-1.- Características de las Centrales del Sistema.- Los-

anexos Nos. II.-5 y II.-6 dan un resumen de las principales características de las centrales del sistema Tulcán-Ibarra-Cayambe.

Estas características han sido resumidas para las centrales que conforman el sistema Otavalo-Ibarra-Cayambe, en el anexo # II.-7.

Cabe aclarar que se ha encontrado que al río Ambi, al igual que el río San Pablo, el cual alimenta las demás centrales del sistema, tiene iguales regímenes hidrológicos, compuestos de cuatro períodos a saber:

- a) Primer Estiaje, de Enero a Marzo
- b) Período Medio, de Abril a Junio
- c) Segundo Estiaje, de Julio a Octubre
- d) Creciente, en Noviembre y Diciembre

La capacidad diaria de generación de las centrales está también dada en el anexo # II.-7, y ha sido calculada-

a base de la potencia útil indicada en el mismo anexo.

En lo que se refiere a la Central "El Ambi", puesto que tiene reservorio de regulación diaria, la potencia máxima que ella entrega al sistema, dependerá de su ubicación en la curva de carga, o sea, del factor de carga con el que trabaje.

II.-2.-2 EQUIPAMIENTO DEL SISTEMA.-- La Central "El Ambi" está formada por dos grupos hidroeléctricos de 4.000 Kw cada uno, o factor de potencia 0.80 - (5.000 KVA).

La potencia nominal instalada en el sistema en el año 1968, es de 3.673 Kw (Ver anexo # II.-5), que se descompone en la siguiente forma:

CUADRO II.- 1

CENTRAL	POTENCIA NOMINAL (Kw)	POTENCIA FIRME (Kw)
Ibarra	632	632
Fca. Atuntaqui	632	340
Hoja Blanca	600	510
Otavalo # 1	400	200
Otavalo # 2	422	180
Cotacahi	440	190
Atuntaqui	400	230
Cayambe	147	147
TOTAL	3.673	2.429

Sin embargo, no todas las centrales que constan en el cuadro anterior permanecerán en servicio una vez que entre en operación "El Ambi", ya que habría un exceso de potencia instalada en centrales antiguas de bajo rendimiento ; por esta razón se ha previsto para Mayo de 1.969 el retiro de las instalaciones de la Fábrica de Atuntaqui, la Central Hoja Blanca y la central diesel Cayambe, con una potencia total de 1.380 Kw, y el ingreso de la Central "El Ambi", con 8.000 Kw, lo que dá como resultado una potencia total instalada de 10.293 Kw.

II.-2.-3 UBICACION DE LAS CENTRALES EN LA CURVA DE CARGA.--

Existe una infinidad de posibilidades de repartir la carga total del sistema entre las diferentes centrales disponibles. El criterio que utilizaremos aquí es dar la mayor utilización posible a la central El Ambi , que es la de mayor rendimiento económico en el sistema (*); y a medida que sea necesario, incrementar la producción de energía en las demás centrales, las cuales, en lo posible se mantendrán en reserva.

El Anexo # II.-8, cuya fuente de origen es el "Programa de Operación de la Central Hidroeléctrica El Ambi", realizado por INECEL , muestra la variación de la demanda máxima para cada período hidrológico, mes por mes, como porcentaje de la demanda máxima producida en el mes de Diciembre.

Del estudio de dicho anexo se tienen las siguientes ---

----- 0 -----

(*) El estudio de los costos de explotación de las centrales está fuera del alcance de este trabajo.

demandas máximas, en cada período hidrológico:

CUADRO II.-2

PERIODO	MES	% DE LA DEMANDA MAXIMA ANUAL
Primer Estiaje	Enero	91.1
Medio	Junio	92.6
Segundo Estiaje	Octubre	94.6
Creciente	Diciembre	100.0

Puesto que el objeto del presente programa de despacho de carga es únicamente determinar los aportes de potencia de cada central del sistema, con el fin de realizar el estudio de estabilidad del mismo, y no constituye propiamente un Programa de Operacion, consideraremos solamente los años de 1969 que es el primer año del período de estudio; y 1974, año final del período de estudio, entendiéndose que en los años intermedios las condiciones de despacho de carga serán intermedias entre las estudiadas para los años mencionados.

El anexo # II.-9 es un cuadro comparativo de los requerimientos de potencia y energía del mercado del sistema, para cada período hidrológico, en los años 1969 y 1974 y de las posibilidades de generación de cada una de las centrales, en los mismos períodos hidrológicos.

La primera parte del cuadro, es decir, los requerimientos del mercado, ha sido elaborada a base de los valores -

de demanda máxima anual del anexo # II.-1.-a, y de la curva de variación de la demanda máxima mensual mostrada en el anexo --- # II.-8. Para la determinación del consumo de energía en los -- días de máxima demanda de cada período hidrológico se ha utili zado la curva de carga diaria representativa del sistema mostra da en el anexo # II.-2, y cuyo factor de carga es 50.4%.

De esta forma, la necesidad de generación de energía - será:

$$E = D_{\text{máx.}} \times f.c. \times T \times 10^{-3}$$

donde

$$E = \text{MWH/Día}$$

$$D_{\text{máx.}} = \text{Demanda máxima en Kw}$$

$$f.c. = \text{factor de carga} = 0.504$$

$$T = \text{Tiempo} = 24 \text{ horas}$$

La segunda parte del cuadro del anexo # II.-9 es una - síntesis del anexo # II.-6.

A base del anexo # II.-9 ha sido elaborado el # II.-10 en el que se muestran las curvas de carga diaria representativas del sistema, en valores porcentuales (anexo # II.-2), y la ubi cación de las diferentes centrales dentro de esas curvas, para cada uno de los períodos hidrológicos, en los años 1.969 y ---- 1.974 (*).

Del estudio de las curvas del anexo # II.-10 se verá - que se ha tratado de dar la mayor utilización a la central "El Ambi", introduciendo las demás centrales al sistema a medida -- que resultó necesario para satisfacer las necesidades de ener- gía.

----- 0 -----

(*)

En el año de 1.969 no se ha considerado el primer estia je debido a que el sistema se integrará después de este período.

Es un hecho notorio que durante los períodos de crecimiento, en todos los años comprendidos en el estudio, la central -- El Ambi es suficiente para satisfacer la demanda tanto de potencia como de energía; sin embargo, en los demás períodos hidrológicos, pese a que no se llega a copar la potencia instalada en la central "El Ambi", la escasez de caudal disponible da lugar a una deficiencia en la capacidad de generación de energía en esta central, motivo por el cual tienen que introducirse las demás centrales para cubrir la base de la curva de carga, centrales que por ser de pasada unas, y térmica otra, son típicas --- "centrales de base".

El anexo # II.-11 es un resumen de los gráficos del -- anexo # II.-10, en donde se indica el aporte de potencia de cada central utilizada, para cada año estudiado y cada período hidrológico; dicho aporte de potencia está indicado en Kw y como porcentaje de la demanda máxima del sistema; además, se indica el porcentaje de la potencia nominal a la cual trabaja cada central. En la central "El Ambi", que no tiene un régimen constante de trabajo, el aporte de potencia se refiere a la potencia máxima a la cual trabajará, es decir, a la potencia en la hora de pico, el cual se produce entre las 17:00 y las 18:00 horas.

II.-2.-4 DETERMINACION DE LAS CARGAS MAXIMAS EN LOS CENTROS DE CARGA DEL SISTEMA.-

A base de la curva del anexo --- # II.-8, la cual muestra la variación de la demanda máxima porcentual para los diferentes períodos hidrológicos, y de los valores de demanda máxima anual, por zonas, del anexo # II.-1.-a, ha sido elaborado el cuadro del -- anexo # II.-12, el cual da los valores de demanda máxima en cada centro de carga, para los diferentes períodos hidrológicos -- de los años para los cuales se está realizando el estudio.

Dichos valores de demanda máxima están dados en KW y en tanto por uno, utilizando una base de 10.000 KVA, tal como se hizo al referirse a los valores de las constantes de las máquinas y líneas en el capítulo I.

C A P I T U L O I I I

DETERMINACION DE LOS PUNTOS DE FALLA CRITICOS DEL SISTEMA Y ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DEL MISMO

III.-1 DETERMINACION DE LOS PUNTOS CRITICOS DEL SISTEMA BAJO EL PUNTO DE VISTA DE FALLAS ELECTRICAS.- El objeto del presente capítulo es determinar las condiciones que se establecerán en el Sistema cuando se produzca una falla que pudiera alterar la estabilidad del mismo,

Por lo tanto, serán estudiadas solo aquellas fallas consideradas como más severas desde el punto de vista de la estabilidad del sistema, antes que aquellas que pudieran resultar más perjudiciales en cuanto al daño físico que pudieran producir a los elementos de circuito.

Un criterio muy generalizado en estudios de estabilidad de sistemas de fuerza es el llamado "de áreas iguales", y que se basa en el hecho de que la potencia transferida entre dos fuentes de energía interconectadas entre sí a través de una red eléctrica, es una función del ángulo entre los fasores de los voltajes internos de dichas fuentes; la función en cuestión es la siguiente:

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \text{sen } \delta \quad (*) \quad (1)$$

en donde E_1 y E_2 son los voltajes internos de las fuentes, X_{12} la reactancia de la red que las interconecta, y δ el ángulo

----- 0 -----
(*) Si la red es puramente reactiva.

entre los fasores E_1 y E_2 .

En el estudio de una falla en un sistema de fuerza debe remos considerar tres períodos diferentes a saber:

- 1) Antes de producida la falla
- 2) El lapso durante el cual está presente la falla
- 3) El período posterior al despeje de la falla

Durante cada uno de estos períodos, la configuración de la red a la que están conectadas las fuentes de energía, será diferente; y consiguientemente, la amplitud de la curva representada por la ecuación (1) será también diferente en cada período. La representación de dicha ecuación se muestra en la figura III.-1, en donde la línea

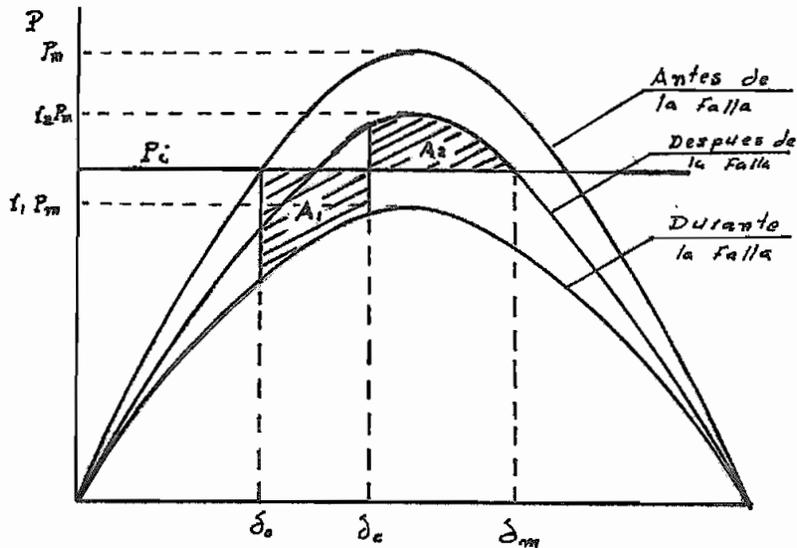


Fig. III.-1

continua P_i representa la potencia mecánica constante que se entrega a la máquina.

El área A_1 representa una potencia de aceleración de la

máquina, mientras que el área A_2 representa una potencia de deceleración de la misma. El límite de estabilidad se obtiene precisamente cuando estas dos áreas son iguales; y mientras A_2 sea mayor que A_1 no se producirá inestabilidad en el sistema. Por lo tanto, fijado el ángulo δ_c de despeje de la falla, cuanto menor sea la amplitud de la curva Potencia-Angulo, durante la falla, más nos acercaremos a las condiciones de inestabilidad en el sistema; y en el caso extremo, cuando esta amplitud sea cero es decir, la potencia transmitida entre las dos máquinas conectadas a la red sea nula, el área A_1 habrá llegado a ser su valor máximo, y por lo tanto, estaremos frente a las condiciones más adversas de falla en el sistema. La condición de que sea bloqueado el flujo de potencia entre ambas fuentes de energía se produce cuando se presenta la falla en los bornes mismos de una de ellas, pues entonces la impedancia entre los bornes de la máquina y la falla, es cero, dando como resultado que la impedancia entre las dos máquinas que se encuentran conectadas a la red, sea infinita, y por lo tanto, la potencia de sincronización sea cero.

En un sistema real, podemos pensar en las barras de la subestación de elévación de una central, como en los bornes de la misma; y es por ello que, habiendo demostrado que la localización de falla más desfavorable desde el punto de vista de la estabilidad del sistema, es en las barras de salida, nos deberemos limitar en el presente trabajo al estudio de fallas en esas localizaciones.

Sin embargo, dado que es muy poco probable que se produzcan la falla en las mismas barras de salida de la central, suprendemos localizaciones de falla ubicadas al comienzo mismo de las líneas de transmisión, fallas, que eléctricamente son equivalentes a fallas en las barras.

Por otro lado, en un sistema eléctrico de fuerza pueden presentarse varios tipos de fallas a saber:

- 1) De una fase a tierra
- 2) Entre dos fases
- 3) Entre dos fases y tierra
- 4) Entre las tres fases (falla simétrica)
- 5) Entre las tres fases y tierra (falla simétrica y a tierra).

Sin embargo, no todos estos tipos de falla tienen la misma influencia desde el punto de vista de la estabilidad del sistema, y será necesario determinar previamente el tipo de falla más desventajoso para los propósitos del presente trabajo, a fin de que, evitada la inestabilidad cuando se presente ese tipo de falla, se tenga la seguridad de que ningún otro tipo de falla será capaz de producir condiciones inestables.

Un método muy usado en el cálculo de las magnitudes de cortocircuito, es el de las "Componentes Simétricas", según el cual los voltajes y corrientes asimétricos producidos durante la falla, son descompuestos en tres juegos de magnitudes simétricas de diferente secuencia (positiva, negativa y cero), lo que da lugar a la existencia de tres diferentes redes durante la falla; la de secuencia positiva, la de secuencia negativa, y la de secuencia cero; el cálculo de una de las magnitudes asimétricas que aparecen durante la falla, se hace por suma de las correspondientes magnitudes simétricas de las diferentes secuencias. O, si se quiere representar la falla, cada tipo resultar una conexión diferente de las redes de las diferentes secuencias (1) (2); por ejemplo, la representación de una falla de línea a tierra, resulta ser la conexión en paralelo, en el punto de la falla, de la combinación serie de las redes de secuencia -

negativa y cero, con la red de secuencia positiva.

En una máquina sincrónica trifásica, la fuerza electromotríz es de secuencia positiva; y de acuerdo con la teoría de las componentes simétricas, la combinación de voltajes de secuencia positiva con corrientes de secuencia negativa o cero, no da como resultado una potencia; así, la potencia transmitida durante un cortocircuito, será de secuencia positiva.

En la red de secuencia positiva, un cortocircuito puede representar por la conexión de una impedancia en derivación Z_F , en el punto de falla⁽¹⁾. El valor de Z_F dependerá del tipo de falla y de las impedancias de las redes de secuencia negativa y cero, denominadas respectivamente Z_2 y Z_0 .

La relación existente entre Z_F y las impedancias de secuencia negativa y cero, Z_2 y Z_0 , puede ser determinada en forma simple a base de la estructura de la interconexión de las redes de las diferentes secuencias que representan a cada tipo de falla. En el caso de la falla de línea a tierra, al que hicimos referencia arriba, la impedancia Z_F será igual a la suma de Z_0 y Z_2 , ya que las redes de secuencia negativa y cero deberán cambiarse en serie, para en el punto de la falla conectarse en paralelo con la impedancia de secuencia positiva.

Simi larmente, y de acuerdo a los diagramas secuenciales de cada tipo de falla, la impedancia de falla Z_F , será para cada caso, la dada por la siguiente tabla:

TIPO DE CORTOCIRCUITO	IMPEDANCIA DE FALLA Z_F
Línea a tierra	$Z_0 + Z_2$
Línea a línea	Z_2
Dos líneas a tierra	$\frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2}$
Tres fases	0

Cualquier red a la que alimentan dos fuentes de energía podrá ser representada por una red T equivalente como la que se muestra en la Figura III.-2 , siendo el punto F aquel en

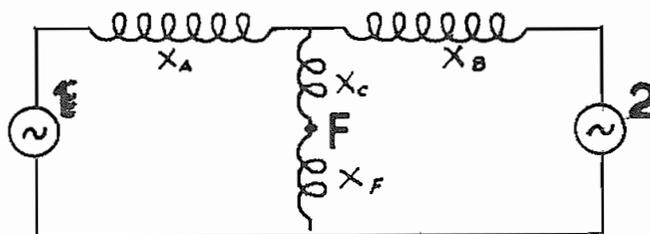


Figura III.-2

el cual se produce la falla. La red T de la Figura III.-2 podrá ser transformada en una red π como la de la Figura III.-3 en la cual la reactancia (o impedancia) X_{AB} será :

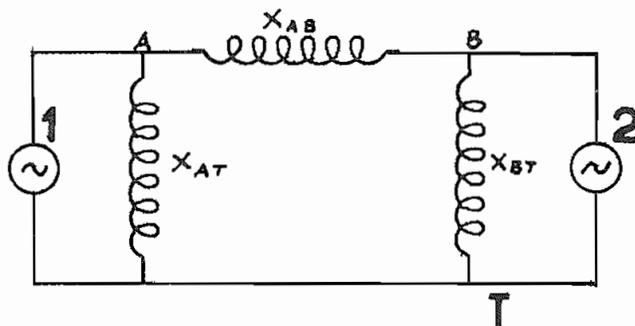


Figura III.-3

$$X_{AB} = X_A + X_B + \frac{X_A X_B}{X_C + X_F} \quad (2)$$

La reactancia X_{AB} es la causante de la transferencia de potencia entre las fuentes 1 y 2, es decir, es la reactancia X_{12} de la ecuación (1) .

Del análisis de las ecuaciones (1) y (2) , es obvio que al disminuir X_F , o en el caso extremo, hacer $X_F = 0$ la potencia sincronizante dada por la ecuación (1) disminuirá también, por lo cual es evidente que con la presencia de una falla simétrica ($X_F = 0$), se podrá transmitir menos potencia que con ningún otro tipo de falla, para un mismo ángulo δ . Consecuencia de esto es, que para una misma localización de falla, la curva del límite de estabilidad transitoria sea de menor amplitud para una falla simétrica que para otro tipo de falla, a igualdad de ángulo δ de potencia.

Del anterior razonamiento se deduce que, desde el punto de vista de la estabilidad del sistema, la falla simétrica es la más perjudicial, siguiéndole las fallas de dos líneas a tierra, línea a línea y de línea a tierra, en sus orden.

Es por esto que estudiaremos (como es usual en estudios de estabilidad), las fallas simétricas, ya que al hacerlo estaremos tomando las peores condiciones que pueden afectar al sistema.

En estudios de estabilidad de sistemas de fuerza cuyo objetivo es mejorar su estabilidad, el considerar las fallas simétricas puede llevar a resultados demasiado pesimistas; y puesto que la posibilidad de que se presente una falla simétrica es bastante remota, puede tomarse el siguiente tipo de falla que mayor daño puede producir a la estabilidad del sistema. La de-

cisión del mejoramiento de la estabilidad estará en general influenciada por el costo de ese mejoramiento, por un lado, y por el grado de continuidad de servicio que se desee, por otro lado; pudiéndose sacrificar la estabilidad del sistema con fallas simétricas, pero teniendo certeza de su funcionamiento óptimo con otros tipos de falla, como consecuencia de un balance económico entre los factores indicados.

Por el presente estudio, cuyo objeto preliminar es averiguar si el sistema es o no estable, tomaremos el tipo de falla más perjudicial, la falla simétrica, y a base de los resultados que se obtengan, podría variarse este criterio.

En definitiva, hemos demostrado que la localización más perjudicial de una falla es en las barras de las subestaciones de elevación de las centrales; (o en el comienzo de las líneas que salen de esa subestación); y el tipo más severo de falla es el simétrico o trifásico. Así, el estudio de estabilidad del presente capítulo se hará con fallas trifásicas en el comienzo de las líneas de salida de las subestaciones del sistema.

III.-2 DIAGRAMA DE IMPEDANCIAS DEL SISTEMA. Las impedancias de los generadores, transformadores y líneas que conforman el sistema, que se detallan en los cuadros I.-1, I.-2, y I.-3 del capítulo I, han sido transformados a la base de 10 MVA y se indican en los cuadros de los anexos III.-1 a III.-3.

A base de dichas impedancias y del diagrama unifilar del anexo # I.-1, se ha elaborado el diagrama de impedancias del anexo # III.-4 y el diagrama simplificado del anexo # III.-4.-a, en donde han sido eliminadas aquellas resistencias de línea que-

resultaron ser comparativamente muy bajas en relación a las reactancias adyacentes.

En los mencionados diagramas, se han realizado ya las combinaciones en paralelo de los grupos de cada central, de manera que las reactancias serie de los generadores representados -- son las correspondientes a la máquina equivalente de cada central.

III.-3.- DETERMINACION DE LAS LOCALIZACIONES DE FALLA A ESTUDIARSE.-

De acuerdo a los criterios discutidos en la sección III.-1 de este capítulo, en el diagrama del anexo # III.-4 se han marcado 10 puntos que representen igual número de localizaciones de falla trifásica, para las cuales estudiaremos las condiciones de estabilidad.

Sin embargo, puesto que no siempre estarán en operación las cinco centrales del sistema, como se explica en el Programa de Operación del capítulo II, se estudiarán las condiciones de estabilidad solo en aquellas localizaciones de falla que resulten más perjudiciales, de acuerdo a los criterios de la sección III.-1, según las condiciones de operación que se estén cumpliendo.

Así, las localizaciones de falla en los puntos 1 y 2, no serán ni siquiera tratadas, ya que el despeje de las mismas implica la interrupción del flujo de potencia entre la central "El Ambi" y cualquier otra, y por lo tanto no podrá mantenerse la estabilidad del sistema, teniendo que haber una pérdida forzosa -- del sincronismo.

Cuando de acuerdo al programa de operación, solo estén trabajando las centrales de "El Ambi" y Otavalo, será necesario estudiar solamente las fallas localizadas en los puntos 3, 5, 6

y 7, ya que los demás se encuentran muy alejados de las subestaciones de salida de esas centrales. En igual forma, cuando se encuentran en operación las centrales de El Ambi, Otavalo e Ibarra, deberán estudiarse las fallas ubicadas en los puntos 3, 4, 5, 6, 7 y 10.

De esta forma, el programa de estudios de estabilidad se reduce a lo indicado en el siguiente cuadro:

CUADRO # III.-1

CENTRALES EN OPERACION	LOCALIZACION DE FALLA A ESTUDIARSE*
El Ambi, Otavalo	3 - 5 - 6 - 7
El Ambi, Otavalo, Ibarra	3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 10

El método a utilizarse en los estudios de estabilidad para cada una de las fallas indicadas, será el siguiente:

- a) Diagrama Unifilar del sistema
- b) Ubicación de cargas
- c) Determinación de los voltajes en las barras de carga
- d) Determinación de las condiciones iniciales de operación.
- e) Determinación de cuáles centrales oscilan juntas y agrupación de las mismas.
- f) Reducción de la red, antes, durante y después de producirse la falla.

----- 0 -----

* Ver anexo # III.-4

g) Determinación de las curvas de estabilidad transitoria para cada una de las centrales, o grupo de ellas.

Utilizando el método resumido en los puntos anteriores desarrollaremos 2 estudios, el primero de los cuales contempla cuatro fallas diferentes; y el segundo seis fallas diferentes--según lo indicado en el cuadro # III.-1.

Según se desprende del anexo # II.-11, habrá períodos--en que trabaje solamente la central "El Ambi", en cuyo caso no será necesario ningún estudio, y períodos en que trabaje la --central "El Ambi" en paralelo con la central Otavalo, y con ésta y ésa Diesel Ibarra.

Para cada uno de estos dos últimos casos, estudiaremos la estabilidad en las condiciones de mayor carga.

III.-4.- DESARROLLO DE LOS ESTUDIOS DE ESTABILIDAD PARA CADA-UNA DE LAS FALLAS ESCOGIDAS.-

III.-4.-1 ESTUDIO N° 1

CENTRALES EN OPERACION: EL AMBI
OTAVALO

III.-4.-1.-a Diagrama Unifilar

Para el caso particular de este primer estudio, el diagrama de los anexos III.-4 y III.-4.-a se reduce al siguiente:

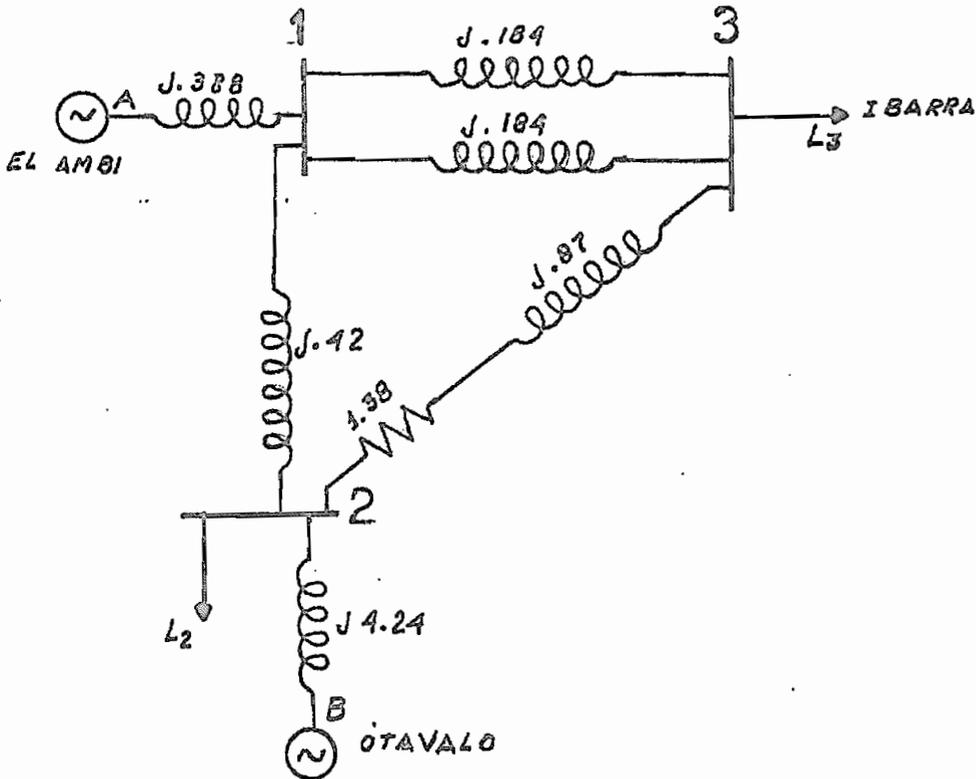


Fig. 1

III.-4.-1.-b Ubicación de Cargas.

De acuerdo a lo determinado en el Programa de Operación del Capítulo II (Ver anexos II.-11 y II.-12) las cargas máximas actuantes sobre el sistema, cuando estén en operación solamente las centrales de El ambi y Otavalo, son las siguientes:

Ibarra	2.315 Kw	$\cos\phi = 0.80$
Otavalo	875 "	"
Cayambe	756 "	"
Cotacachi	337 "	"
Atuntaqui	638 "	"

Las cargas de Cotacachi y Atuntaqui, situadas en la línea que une las barras 2 y 3 de la Figura 1, serán repartidas entre estas dos barras, en forma inversa a la magnitud de la impedancia que las separa de las mismas.

El esquema original es, según la figura del anexo ----- # III.-4, el mostrado en la Figura 2:

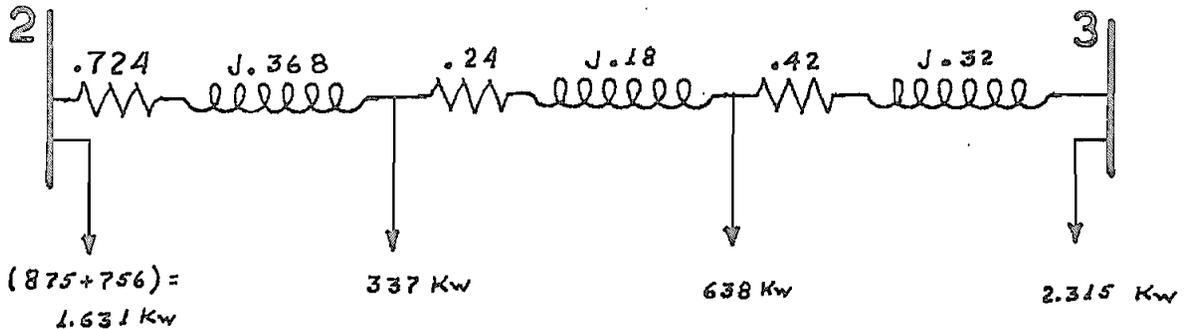


Figura 2

Carga sobre la barra 2:

$$\begin{aligned}
 L_2 &= (1) \quad 1.631 \text{ Kw} + 337 \frac{|(0.24+0.42) + j(0.18+0.34)|}{|1.38 + j0.87|} + 638 \frac{|0.42+j0.32|}{|1.38+j0.87|} \\
 &= 1.631 + 337 \frac{|0.66 + j0.50|}{|1.38 + j0.87|} + 638 \frac{|0.42 + j0.32|}{|1.38 + j0.87|} = \\
 &= 1.631 + 337 \frac{0.83}{1.64} + 638 \frac{0.53}{1.64} = \\
 &= 1.631 + 171 + 206 = 2.008 \\
 L_2 &= 2.008 \text{ Kw} \\
 &\text{----- } 0 \text{ -----}
 \end{aligned}$$

- (1) Las cantidades entre barras | | significan magnitud de los valores de impedancia.

Carga sobre la barra 3:

$$L_3 = 2.315 + (337 - 171) + (638 - 206) =$$
$$= 2.315 + 166 + 432 = 2.913$$

$$L_3 = 2.913 \text{ Kw}$$

con esta transformación las cargas L_2 y L_3 de la figura 1 tienen los siguientes valores unitarios:

$$L_2 = \frac{2.008}{10.000} = 0.20 \text{ P.U.}$$

$$L_3 = \frac{2.913}{10.000} = 0.29 \text{ P.U.}$$

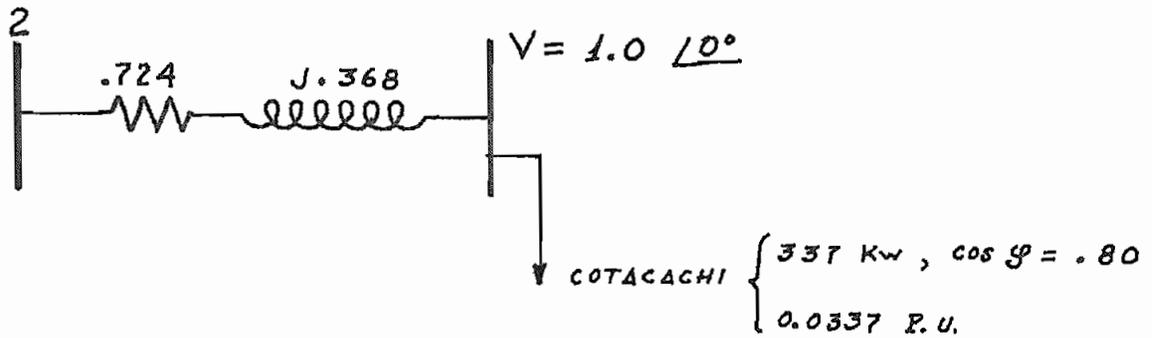
Las potencias entregadas por cada una de las centrales son, de acuerdo al anexo # II.-11 del programa de operación, las siguientes:

El Ambi	4.110 Kw	= 0.41 P.U.
Otavaló	800 Kw	= 0.08 P.U.

III.-4.-1.-c DETERMINACION DE VOLTAJES EN LAS BARRAS DE CARGA.-

Para determinar la magnitud de los voltajes en barras, asumiremos la presencia de voltajes nominal (1.00 PU) en las cargas de Atuntaqui y Cotacachi; y supondremos que toda la carga de Atuntaqui es alimentada desde Ibarra (barra 3), y toda la carga de Cotacachi desde Otavaló (barra 2).

De esta forma, de acuerdo al diagrama del anexo # III.- 4 - tenemos los siguientes diagramas:



a)

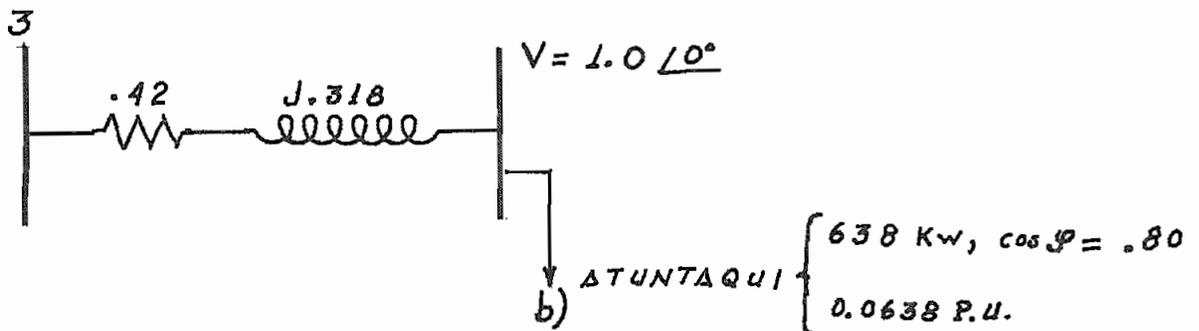


Fig. 3

Corriente de carga en Cotacachi:

$$I_2 = \frac{0.0337}{1 \times 0.8} \angle -36.7^\circ = 0.0421 \angle -36.7^\circ$$

Corriente de carga en Atuntaqui:

$$I_3 = \frac{0.0638}{1 \times 0.8} \angle -36.7^\circ = 0.080 \angle -36.7^\circ$$

Voltajes en las barras:

$$V_2 = 1.0 + (0.724 + j0.368) \times 0.0421 \angle -36.7^\circ =$$

$$= 1.0 + 0.814 \angle 27.8^\circ \times 0.0421 \angle -36.7^\circ =$$

$$\begin{aligned} &= 1.0 + 0.0343 \angle -9.7^\circ = \\ &= 1.0 + 0.0338 - j 0.00595 = 1.0338 - j 0.00595 = \\ |V_2| &= 1.034 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_3 &= 1.0 + 0.080 \angle -36.7^\circ \times (0.42 + j 0.318) = \\ &= 1.0 + 0.080 \angle -36.7^\circ \times 0.53 \angle 37^\circ = \\ &= 1.0 + 0.0425 = 1.0425 \end{aligned}$$

$$V_3 = 1.0425 \angle 0^\circ$$

Así la corriente circulante por la línea que une las barras 1 y 3 será la correspondiente a las cargas de Atuntaqui y de Ibarra.

Corriente de carga de Ibarra:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{2.315/10.000}{1.034 \times 0.8} \angle -36.7^\circ = 0.28 \angle -36.7^\circ = \\ &= 0.224 - j 0.168 \end{aligned}$$

Corriente a través de la línea 1 - 3:

$$\begin{aligned} I_{13} &= 0.224 - j 0.168 + 0.080 \angle -36.7^\circ = \\ &= 0.280 \angle -36.7^\circ + 0.080 \angle -36.7^\circ = \\ &= 0.36 \angle -36.7^\circ = 0.288 - j 0.216 \\ I_{13} &= 0.288 - j 0.216 \end{aligned}$$

Voltaje en la barra 1:

$$\begin{aligned} V_1 &= 1.034 + j \frac{0.184}{2} (0.288 - j 0.216) = \\ &= 1.034 + j 0.0265 + 0.0198 = \\ &= 1.054 + j 0.0265 \end{aligned}$$

$$|V_1| = 1.055$$

III.-4.-1.-d Condiciones iniciales de operación.- Las condiciones iniciales que necesitamos conocer son los voltajes internos de las máquinas y sus ángulos de torque, así como las potencias iniciales de operación.

Sin embargo, como un paso previo debemos determinar magnitud y fase los voltajes en las barras, ya que los valores calculados en la sección precedente son solo tentativas capaces de darnos una idea de los valores de la magnitud de dichos voltajes.

A base de los calculado en la sección anterior, asumamos los siguientes valores:

$$\begin{aligned} V_1 &= 1.05 \angle \delta_1 \\ V_2 &= 1.03 \angle \delta_2 \\ V_3 &= 1.04 \angle 0 \quad (\text{Referencia}) \end{aligned}$$

Para determinar los valores de δ_1 y δ_2 utilizaremos las ecuaciones de transferencia de potencia, las cuales, de modo general, tienen la siguiente forma:

$$P_1 = V_1^2 y_{11} \cos \theta_{11} + V_1 V_2 y_{12} \cos (\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) + V_1 V_3 y_{13} \cos (\theta_{13} - \delta_1 + \delta_3) \quad (\text{A})$$

$$P_2 = V_2^2 y_{22} \cos \theta_{22} + V_1 V_2 y_{21} \cos (\theta_{21} - \delta_1 + \delta_2) + \\ + V_2 V_3 y_{23} \cos (\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (B)$$

$$P_3 = V_3^2 y_{33} \cos \theta_{33} + V_3 V_1 y_{31} \cos (\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + \\ + V_3 V_2 y_{32} \cos (\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \quad (C)$$

En nuestro caso, $\delta_3 = 0$ y, de acuerdo al diagrama de la figura 1:

$$Y_{12} = -\frac{1}{j0.42} = j 2.38 = 2.38 \angle 90^\circ$$

$$Y_{13} = -\frac{1}{j0.092} = +j 10.85 = 10.85 \angle 90^\circ$$

$$Y_{23} = -\frac{1}{1.38 + j0.87} = - (0.52 - j 0.33) = - 0.61 \angle -32^\circ = 0.61 \angle 148^\circ$$

$$Y_{11} = Y_{12} + Y_{13} = - j 2.38 - j 10.85 = 13.23 \angle -90^\circ$$

$$Y_{22} = Y_{12} + Y_{23} = -j 2.38 + 0.52 - j0.33 = 0.52 - j2.71 = 2.76 \angle -79^\circ$$

$$Y_{33} = Y_{13} + Y_{23} = - j10.85 + 0.52 - j0.33 = 0.52 - j11.18 = \\ = 11.20 \angle -87.3^\circ$$

y además:

$$P_1 = 0.41$$

$$P_2 = 0.08 - 0.20 = - 0.12$$

$$P_3 = - 0.29$$

Por lo tanto, las ecuaciones de transferencia de potencia para el sistema operando en las condiciones previamente es-

tablecidas, son las siguientes:

$$0.41 = (1.05)^2 \times 13.23 \cos(-90^\circ) + 1.05 \times 1.03 \times 2 \times 3.8 \cos(90^\circ - \delta_1 + \delta_2) + \\ + 1.05 \times 1.04 \times 10.85 \cos(90^\circ - \delta_1) \quad (1)$$

$$-0.12 = (1.03)^2 \times 2.76 \cos(-79^\circ) + 1.03 \times 1.05 \times 2.38(90^\circ - \delta_2 + \delta_1) + \\ + 1.03 \times 1.04 \times 0.61 \cos(148^\circ - \delta_2) \quad (2)$$

$$0.29 = (1.04)^2 \times 11.20 \cos(-87.3^\circ) + 1.04 \times 1.05 \times 10.85 \cos(90^\circ + \delta_1) + \\ + 1.04 \times 1.03 \times 0.61 \cos(148 + \delta_2) \quad (3)$$

Realizando las operaciones indicadas, las ecuaciones precedentes toman la forma siguiente:

$$0.41 = 2.58 \operatorname{sen}(\delta_1 - \delta_2) + 11.85 \operatorname{sen} \delta_1 \quad (4)$$

$$-0.678 = 2.58 \operatorname{sen}(\delta_2 - \delta_1) + 0.653 \cos(148 - \delta_2) \quad (5)$$

$$-0.85 = -11.85 \operatorname{sen} \delta_1 + 0.653 \cos(148 + \delta_2) \quad (6)$$

y puesto que $\operatorname{sen}(\delta_2 - \delta_1) = -\operatorname{sen}(\delta_1 - \delta_2)$, tenemos:

$$0.41 = 2.58 \operatorname{sen}(\delta_1 - \delta_2) + 11.85 \operatorname{sen} \delta_1 \quad (7)$$

$$-0.678 = -2.58 \operatorname{sen}(\delta_1 - \delta_2) + 0.653 \cos(148 - \delta_2) \quad (8)$$

$$-0.85 = -11.85 \operatorname{sen} \delta_1 + 0.653 \cos(148 + \delta_2) \quad (9)$$

Sumando las ecuaciones (7) y (8) tenemos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$-0.268 = 11.85 \operatorname{sen} \delta_1 + 0.653 \cos(148 - \delta_2) \quad (10)$$

$$-0.850 = -11.85 \operatorname{sen} \delta_1 + 0.653 \cos(148 + \delta_2) \quad (11)$$

Por último, sumando las ecuaciones (10) y (11):

$$-1.118 = 0.653 \cos(148 - \delta_2) + 0.653 \cos(148 + \delta_2) \quad (12)$$

$$0 \\ -1.71 = \cos(148 - \delta_2) + \cos(148 + \delta_2) \quad (13)$$

El desarrollo del segundo miembro de la ecuación (13) es el siguiente:

$$\begin{aligned} \cos (148 - \delta_2) + \cos (148 + \delta_2) &= \\ = \cos 148^\circ \cos \delta_2 + \sin 148^\circ \sin \delta_2 + \cos 148^\circ \cos \delta_2 - \sin 148^\circ \sin \delta_2 &= \\ = 2 \cos 148^\circ \cos \delta_2 \end{aligned}$$

Con lo cual la ecuación (13) queda reducida a :

$$-1.71 = 2 \cos 148^\circ \cos \delta_2 \quad (14)$$

y por lo tanto:

$$\delta_2 = \cos^{-1} \frac{-1.71}{2 \cos 148^\circ} = \cos^{-1} \frac{-1.71}{2(-0.86)} = 0^\circ$$

$$\delta_2 = 0^\circ$$

Reemplazando el valor $\delta_2 = 0$ en la ecuación (11) tenemos:

$$\begin{aligned} -0.85 &= -11.85 \sin \delta_1 + 0.653 \cos 148^\circ = \\ &= -11.85 \sin \delta_1 - 0.554 \end{aligned}$$

y por lo tanto:

$$\delta_1 = \sin^{-1} \frac{-0.850 + 0.554}{-11.85} = \sin^{-1} \frac{0.296}{11.85} = 1.43^\circ$$

$$\delta_1 = 1.43^\circ$$

De esta forma, las condiciones iniciales de operación en las barras, son las siguientes:

$$\begin{aligned} V_1 &= 1.05 \quad \underline{143^\circ} \\ V_2 &= 1.03 \quad \underline{0^\circ} \\ V_3 &= 1.04 \quad \underline{0^\circ} \end{aligned}$$

El voltaje interno de la máquina equivalente de la central El Ambi será igual a la suma del voltaje V_1 y la caída de tensión en la reactancia $j 0.388$ (Fig. 1). La corriente que atraviesa esta reactancia es $I_A = I_{12} + I_{13}$

La corriente I_{13} , según se calculó en la sección III.-4.-1.c es $I_{13} = 0.288 - j 0.216$, y la corriente I_{12} será:

$$\begin{aligned} I_{12} &= \frac{V_1 - V_2}{Z_{12}} = \frac{1.05 \angle 1.43^\circ - 1.03 \angle 0^\circ}{j 0.42} = \\ &= \frac{1.0496 - 1.030 + j 0.0267}{j 0.42} = \frac{0.0196 + j 0.0267}{j 0.42} = \\ &= \frac{-0.0267 + j 0.0196}{- 0.42} = 0.0625 - j 0.0467 = \\ &= 0.078 \angle - 36.7^\circ \end{aligned}$$

$$I_{12} = 0.078 \angle - 36.7^\circ$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} I_A = I_{12} + I_{13} &= 0.0625 - j0.0467 + 0.288 - j0.216 = \\ &= 0.3505 - j 0.2627 = 0.438 \angle - 36.7^\circ \end{aligned}$$

y el voltaje interno E_A es:

$$\begin{aligned} E_A &= V_1 + jI_A X_A = \\ &= 1.0496 + j0.0267 + 0.388 \angle 90^\circ \times 0.438 \angle - 36.7^\circ = \\ &= 1.0496 + j 0.0267 + 0.17 \angle 53.3^\circ = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 1.0496 + j 0.0267 + 0.102 + j 0.136 = \\ &= 1.1516 + j 0.1627 = 1.16 \angle 8.03^\circ \end{aligned}$$

$$\underline{E_A = 1.16 \angle 8.03^\circ}$$

El voltaje interno en la máquina equivalente de la central Otavalo será la suma de V_2 y la caída de tensión en la --- reactancia $j 4.24$ debida a la corriente de carga de la central. Esta corriente es

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{0.08}{1.03 \times 0.80} \angle -36.7 = 0.097 \angle -36.7^\circ = \\ &= 0.0776 - j0.0582 \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} E_B &= 1.03 + j0 + 0.097 \angle -36.7 \times 4.24 \angle 90^\circ = \\ &= 1.03 + 0.411 \angle 53.3 = 1.03 + 0.247 + j 0.33 = \\ &= 1.277 + j 0.33 = 1.32 \angle 14.5^\circ \end{aligned}$$

$$E_B = 1.32 \angle 14.5^\circ$$

Así, las condiciones iniciales del sistema son las siguientes:

$$\begin{aligned} E_A &= 1.16 \angle 8.03^\circ \\ E_B &= 1.32 \angle 14.5^\circ \\ \delta_{AB} &= - 6.47^\circ \end{aligned}$$

III.-4.-1.-e Determinación del tipo de oscilación de las centrales. Con el fin de determinar si las máquinas --

equivalentes de cada una de las centrales oscilan juntas o le hacen separadamente, calcularemos el ángulo relativo de torque-
 δ_{AB} , cuando está presente cada uno de los cortocircuitos trifásicos indicados en el cuadro # III.-1.

1.- FALLA EN LA LOCALIZACION N° 3:

De acuerdo a la figura del anexo # III.-4, el diagrama unifilar de impedancias, con una falla en la localización N° 3, es el siguiente:

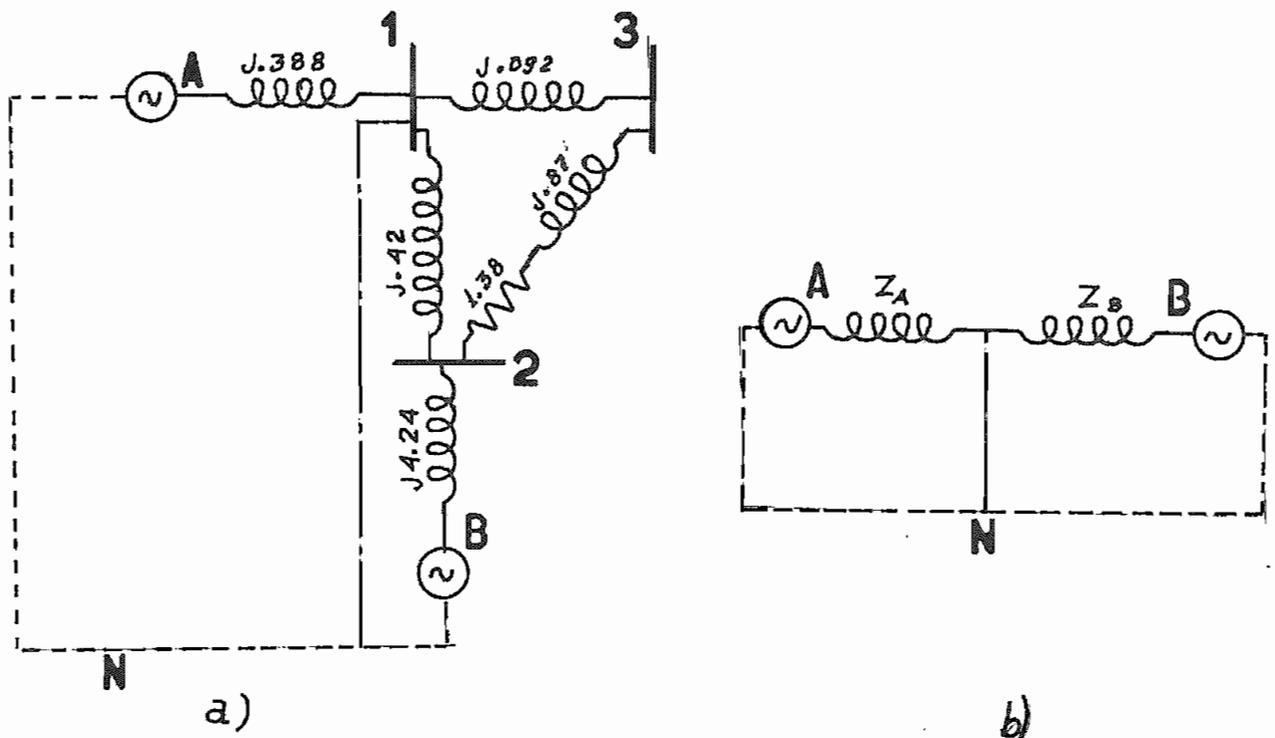


Fig. 4

en donde $Z_A = j 0.388$ y

$$\begin{aligned}
 Z_B &= j 4.24 + \frac{j 0.42 \times (1.38 + j0.87 + j0.092)}{1.38 + j (0.87 + 0.092 + 0.42)} = \\
 &= j 4.24 + \frac{j0.42 (1.38 + j 0.962)}{1.38 + j1.382} = \\
 &= j 4.24 + \frac{0.42 \angle 90^\circ \times 1.69 \angle 34.9^\circ}{1.95 \angle 45^\circ} = \\
 &= j4.24 + 0.364 \angle 79.9^\circ = 0.064 + j (4.24 + 0.36) = \\
 &= 0.064 + j 4.60 \approx j 4.60
 \end{aligned}$$

Para encontrar la corriente de cortocircuito en el punto de falla, utilizaremos un circuito equivalente de Thevenin, cuya impedancia será:

$$Z_T = \frac{Z_A Z_B}{Z_A + Z_B} = \frac{j 0.388 \times j 4.60}{j (0.388 + 4.60)} = j 0.359$$

y cuyo voltaje asumiremos igual, al voltaje en el punto de falla éste es $V_T = 1.05 \angle 1.43$

De esta forma, la corriente de cortocircuito será:

$$I_{cc} = \frac{V_T}{Z_T} = \frac{1.05 \angle 1.43}{0.359 \angle 90^\circ} = 2.925 \angle - 88.57$$

La repartición de esta corriente entre ambas máquinas será la siguiente:

Aporte de la máquina A:

$$I_{cc_A} = 2.925 \angle - 88.57 \frac{4.60}{0.388+4.60} = 2.70 \angle - 88.57^\circ$$

Aporte de la máquina B:

$$I_{cc_B} = 2.925 \angle -88.57^\circ \times \frac{0.388}{0.388 + j4.60} = 0.225 \angle -88.57^\circ$$

La corriente de la falla de cada máquina equivalente se rá igual a la suma de su aporte de corriente de cortocircuito - y su corriente de carga antes de producida la falla. Así, la - corriente de falla de la máquina A será

$$I_{FA} = I_{cc_A} + I_A = 2.70 \angle -88.57^\circ + 0.438 \angle -36.7^\circ =$$

$$= 0.063 - j 2.69 + 0.35 - j 0.26 = 0.413 - j 2.953,$$

y el voltaje interno:

$$E_A^1 = (0.413 - j2.953) j 0.388 = 1.15 + j 0.16 = 1.16 \angle 8^\circ$$

y $\delta_A' = 8^\circ$

Para la máquina B:

$$E_B^1 = \left(0.225 \angle -88.57^\circ \times \frac{1.38 + j0.962}{1.38 + j1.382} - 0.078 \angle -36.7^\circ \right) j 0.42 +$$

$$+ \left(0.225 \angle -88.57^\circ + 0.097 \angle -36.7^\circ \right) j 4.24 =$$

$$E_B^1 = \left(0.225 \angle -88.57^\circ \times \frac{1.69 \angle 34.9^\circ}{1.95 \angle 45^\circ} - 0.078 \angle -36.7^\circ \right) j 0.42 +$$

$$+ \left(0.0052 - j0.224 + 0.0775 - j0.0582 \right) j 4.24 =$$

$$= \left(0.195 \angle -98.67^\circ - 0.078 \angle -36.7^\circ \right) j 0.42 +$$

$$+ \left(0.0827 - j 0.282 \right) j 4.24 =$$

$$\begin{aligned} &= (-0.0294 - j0.193 - 0.0624 + j0.0468) j 0.42 + \\ &\quad + (0.0827 - j 0.282) j 4.24 = \\ &= (-0.0918 - j 0.1462) j0.42 + (0.0827 - j0.282) j4.24 = \\ &= - j0.0385 + 0.0613 + j0.35 + 1.195 = 1.256 + j0.31 = \\ &= 1.29 \angle 13.9^\circ, \text{ y } \delta'_B = 13.9^\circ \end{aligned}$$

La diferencia angular entre las dos máquinas, cuando está presente el cortocircuito en la localización N° 3, es pues:

$$\delta'_{AB} = \delta'_A - \delta'_B = 8 - 13.9 = - 5.9^\circ,$$

valor que difiere muy poco de $\delta_{AB} = - 6.47^\circ$, diferencia angular en condiciones normales de operación.

Este hecho indica que ambas máquinas oscilan casi juntas, sobre una "barra de referencia" (la barra 1); resultado que podría esperarse ya que la máquina A es de mucha mayor capacidad que la máquina B, resultando de ello que la primera obligue a la segunda a seguir su propia oscilación.

La falla en la localización N° 5 es eléctricamente igual a la de la localización N° 3, y por lo tanto, las mismas consideraciones son válidas en ambos puntos.

2.- FALLA EN LA LOCALIZACION N° 6.- El diagrama unifilar del sistema, con una falla localizada en el punto denominado 6, es, de acuerdo al anexo # III.4 el siguiente:

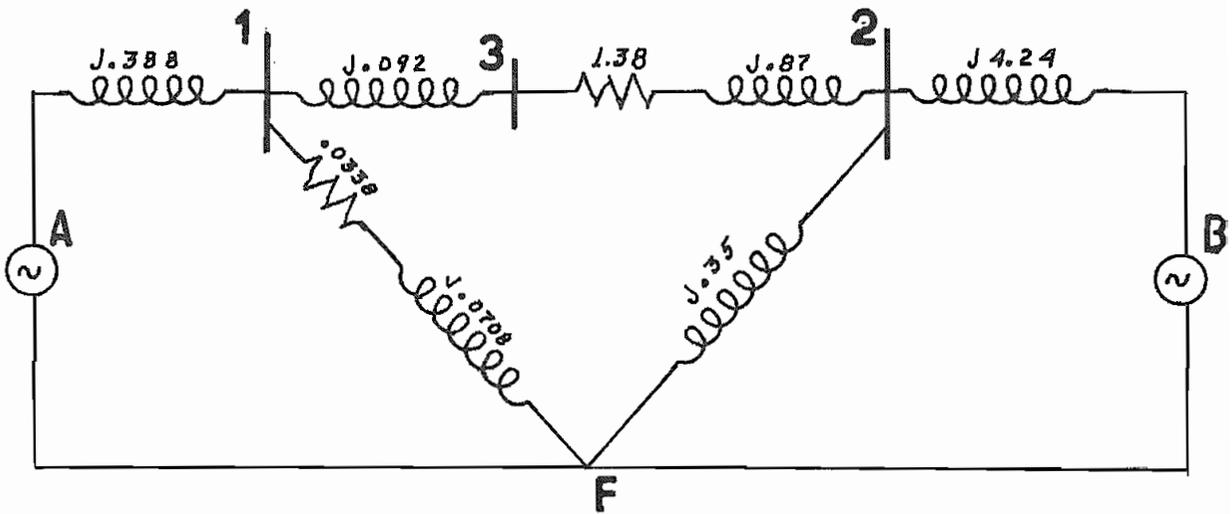


Fig. 5

Una transformación Δ - Y en el diagrama de la figura 5 - nos lleva al siguiente:

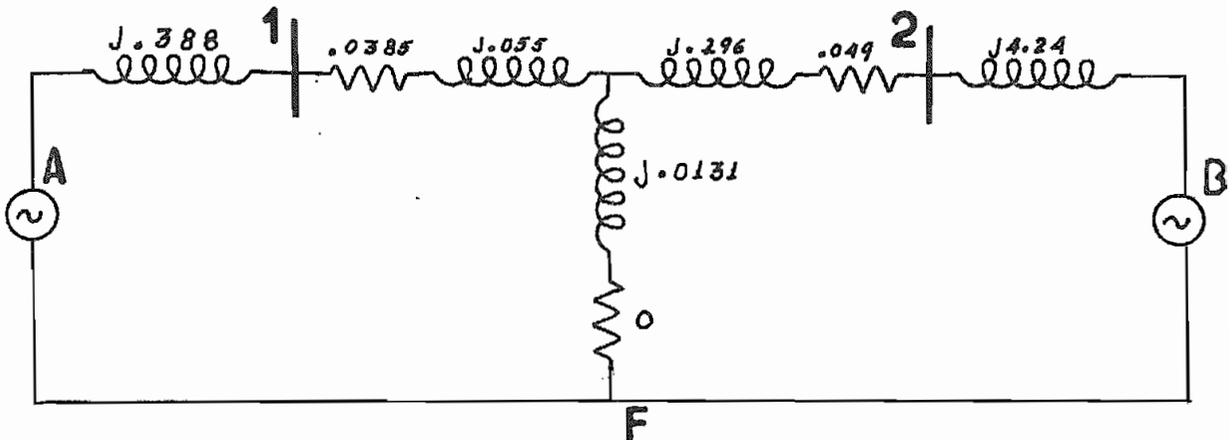


Fig. 6

en el cual

$$Z_1 = \frac{91.38 + j0.96}{(1.38 + j0.96) + (0.0338 + j0.0708) + j.035} =$$

$$= \frac{(1.38 + j 0.96) (0.0338 + j 0.0708)}{1.414 + j 1.38} =$$

$$= \frac{1.69 / 34.9^\circ \times 0.0785 / 64.4^\circ}{1.97 / 44.3^\circ} = 0.067 / 55.0^\circ =$$

$$= 0.0385 + j 0.055$$

$$Z_2 = \frac{(1.38 + j 0.96) j 0.35}{1.414 + j 1.38} = \frac{1.69 / 34.9^\circ \times 0.35 / 90^\circ}{1.97 / 44.3^\circ} =$$

$$= 0.30 / 80.6^\circ = 0.049 + j 0.296$$

$$Z_3 = \frac{(0.0338 + j 0.0708) j 0.35}{1.414 + j 1.38} = \frac{0.0785 / 64.4^\circ \times 0.35 / 90^\circ}{1.97 / 44.3^\circ} =$$

$$= 0.014 / 110.0^\circ = -0.0048 + j 0.131 \approx j 0.0131$$

y una agrupación de los elementos en serie da como resultado el diagrama de la figura 7:

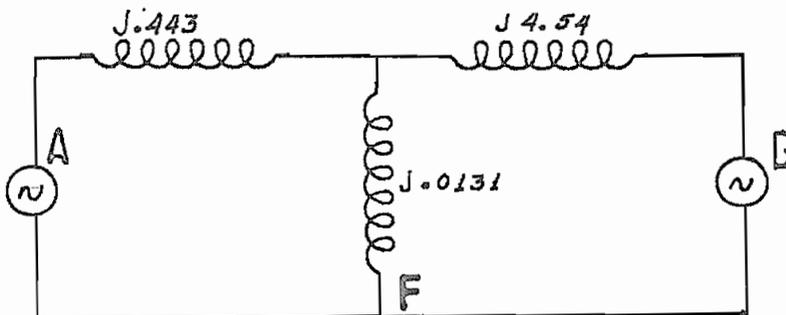


Fig. 7

La impedancia equivalente de Thevenin, vista desde el-

punto de falla es:

$$Z_T = j 0.0131 + \frac{j 0.443 \times j 4.54}{j (0.443 + 4.54)} =$$
$$= j 0.0131 + j 0.403 = j 0.416$$

$$Z_T = j 0.416$$

El voltaje en el punto de cortocircuito, antes de que éste se produzca, será

$$V_T = V_2 + j I_{12} \times 0.35 = 1.03 + 0.078 \angle -36.7 \times 0.35 \angle 90^\circ =$$
$$= 1.03 + 0.273 \angle 53.3 = 1.03 + 0.0164 + j 0.0218 =$$
$$= 1.0464 + j 0.0218 = 1.047 \angle 1.19^\circ$$

$$V_T = 1.047 \angle 1.19^\circ$$

Así, la corriente de cortocircuito en el punto de falla será:

$$I_{cc} = \frac{V_T}{Z_T} = \frac{1.047 \angle 1.19}{0.416 \angle 90^\circ} = 2.52 \angle -88.81$$

La repartición de esta corriente de cortocircuito entre las máquinas A y B, es la siguiente:

Aporte de la máquina A;

$$I_{cc_A} = 2.52 \angle -88.81 \times \frac{4.54}{4.54 + j0.443} =$$

$$= 2.52 \angle -88.81 \times \frac{4.54}{4.983} = 2.30 \angle -88.81$$

$$I_{cc_A} = 2.30 \angle -88.81 = 0.046 - j 2.295$$

Aporte de la máquina B:

$$I_{cc_B} = 0.22 \angle -88.81 = 0.0044 - j 0.2195$$

La corriente de falla de cada generador, será la suma de la corriente debida al cortocircuito y la corriente de carga presente antes de producida la falla.

Así los voltajes internos de las máquinas A y B, producido en cortocircuitos en el punto 6, serán:

$$E_A^1 = (I_{cc_A} + I_{12}) (0.0338 + j 0.0708) + (I_{cc_A} + I_A) j 0.388 =$$

$$= (0.046 - j 2.295 + 0.0625 - j 0.0467) \times 0.0785 \angle 64.4^\circ +$$

$$+ (0.046 - j 2.295 + 0.3505 - j 0.2627) j 0.388 =$$

$$= (0.1085 - j 2.3457) \times 0.0785 \angle 64.4 + (0.3965 - j 2.5577) j 0.388 =$$

$$= 2.35 \angle -87.3 \times 0.0785 \angle 64.4 + 2.60 \angle -81.2 \times 0.388 \angle 90^\circ =$$

$$= 0.1845 \angle -22.9 + 1.008 \angle 8.8 =$$

$$= 0.17 - j 0.072 + 0.997 + j 0.154 = 1.167 + j 0.082 =$$

$$= 1.17 \angle 4.17$$

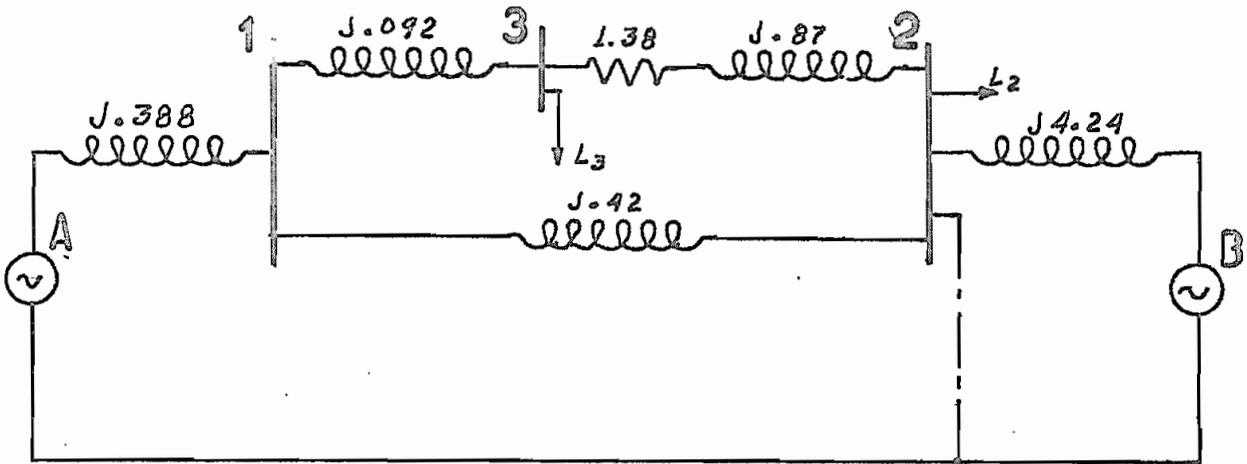


Fig. 8

o, haciendo las correspondientes combinaciones serie-paralelo:

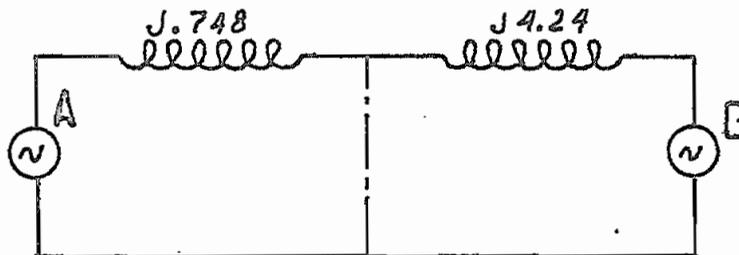


Fig. 9

La correspondiente impedancia equivalente de Thevenin - será:

$$Z_T = \frac{j0.748 \times j 4.24}{j(0.748 + 4.24)} = j \frac{0.748 \times 4.24}{4.988} = j 0.635$$

y la corriente de cortocircuito:

$$I_{cc} = \frac{1.03}{j 0.635} = - j 1.62$$

$$E_A^1 = 1.17 \underline{/4.17^\circ}$$

$$\begin{aligned} E_B^1 &= (I_{cc_B} - I_{12}) \times j 0.35 + (I_{cc_B} + I_B) j 4.24 = \\ &= (0.0044 - j 0.2195 - 0.0625 + j 0.0467) j 0.35 + \\ &+ (0.0044 - j 0.2195 + 0.0776 - j 0.0582) j 4.24 = \\ &= (-0.058 - j 0.1728) j 0.35 + (0.082 - j 0.2777) j 4.24 = \\ &= -j 0.0225 + 0.0605 + j 0.348 + 1.18 = 1.24 + j 0.3255 = \\ &= 1.28 \underline{/14.7^\circ} \end{aligned}$$

$$E_B^1 = 1.28 \underline{/14.7}$$

Por lo tanto:

$$\delta'_{AB} = \delta'_A - \delta'_B = 4.17 - 14.7 = -10.53$$

El valor de δ'_{AB} en condiciones de cortocircuito difiere del valor δ_{AB} en condiciones normales de operación, por lo que concluimos que con una falla en el punto N° 6, las máquinas A y B no oscilan juntas, y por lo tanto el sistema será considerado como dos máquinas finitas conectadas entre sí a través de una impedancia.

3.- FALLA EN LA LOCALIZACION N° 7.- Para este caso, el diagrama unifilar del sistema es el siguiente:

La repartición de esta corriente entre ambas máquinas es:

Aporte de la máquina A;

$$I_{cc_A} = -j 1.62 \times \frac{4.24}{4.24 + 0.748} = -j 1.38$$

Aporte de la máquina B:

$$I_{cc_B} = -j 1.62 \times \frac{0.748}{4.24 + 0.748} = -j 0.24$$

Consecuentemente, los voltajes internos serán:

$$\begin{aligned} E_A^1 &= \left(-j 1.38 \times \frac{1.38 + j0.87 + j0.092}{1.38 + j0.42 + j0.87 + j0.092} + 0.0625 - j0.0467 \right) j0.42 + \\ &+ (-j1.38 + 0.3505 - j0.2627) j0.388 = \\ &= (-j1.38 \times \frac{1.69 \angle 34.9^\circ}{1.95 \angle 45^\circ} + 0.0625 - j0.0467) j0.42 + \\ &+ (0.3505 - j 1.6427) j0.388 = \\ &= (-0.209 - j 1.18 + 0.0625 - j 0.0467) j0.42 + \\ &+ (0.3505 - j 1.6427) j 0.388 = \\ &= (-0.1465 - j 1.2267)j0.42 + (0.3505 - j1.6427)j0.388 = \\ &= -j0.0615 + 0.514 + j0.136 + 0.638 = 1.152 + j0.0745 = \\ &= 1.153 \angle 3.7^\circ \end{aligned}$$

$$E_A^1 = 1.153 \angle 3.7^\circ$$

$$\begin{aligned} E_B^1 &= j4.24 (-j 0.24 + 0.0776 - j 0.0582) = \\ &= j4.24 (0.07746 - j0.2982) = 1.263 + j0.329 = \\ &= 1.31 \angle 14.6^\circ \end{aligned}$$

$$E_B^1 = 1.31 \angle 14.6^\circ$$

Y por lo tanto, $\delta'_{AB} = \delta'_A - \delta'_B = 3.7 - 14.6 = -10.9^\circ$. Nuevamente el valor δ'_{AB} en cortocircuito difiere notablemente del valor δ_{AB} en condiciones normales, por lo que deducimos -- que con un cortocircuito simétrico en la localización N° 7 las máquinas A y B no oscilan juntas.

III.-4.-1.-f.- REDUCCION DE LA RED. Como un paso previo a la determinación de las curvas del límite de estabilidad transitoria, reduciremos la red a su forma más simple, para cada una de las localizaciones de falla, y para cada una de las siguientes condiciones:

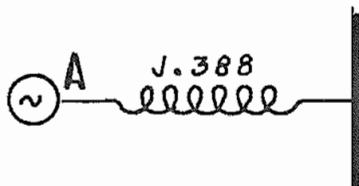
- a) Antes de producirse la falla
- b) Cuando la falla está presente
- c) Después de despejada la falla.

1.- FALLA EN LA LOCALIZACION N° 3. Según se determinó en la sección precedente, con una falla en la localización N° 3 el sistema puede ser considerado como una barra infinita sobre la cual oscilan ambas máquinas, y puesto que la falla se presenta precisamente en esa barra, la red tendrá la misma configuración antes de la falla y --

después de que ésta ha sido despejada. De esta forma, las respectivas configuraciones de la red, para cada máquina, son las siguientes:

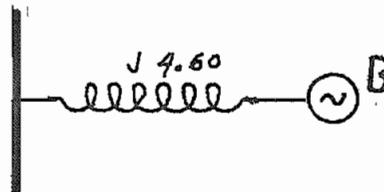
a) Antes de la falla:

Máquina A



a)

Máquina B

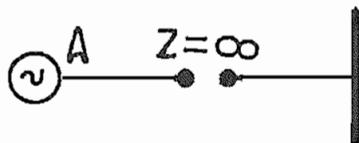


b)

Fig. 10

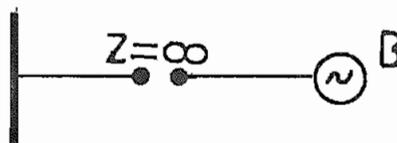
b) Durante la falla:

Máquina A



a)

Máquina B

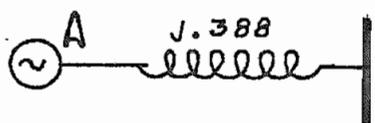


b)

Fig. 11

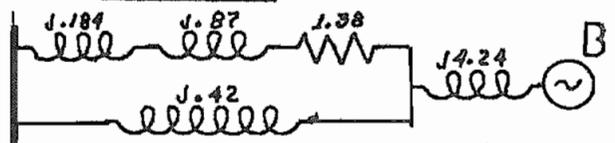
c) Después de la falla:

Máquina A

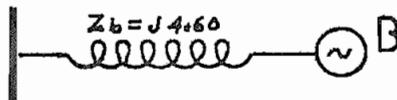


a)

Máquina B



b)



c)

Fig. 12

donde $Z_b = j4.24 + \frac{(1.38 + j1.054)j0.42}{1.38 + j1.054 + j0.42} = j4.60$

2.- FALLA EN LA LOCALIZACION N° 5.- Para la máquina A se mantiene la misma configuración en las tres condiciones; sin embargo, para la máquina B, la impedancia que la separa de la barra infinita (barra 1) luego de despejada la falla, es la siguiente:

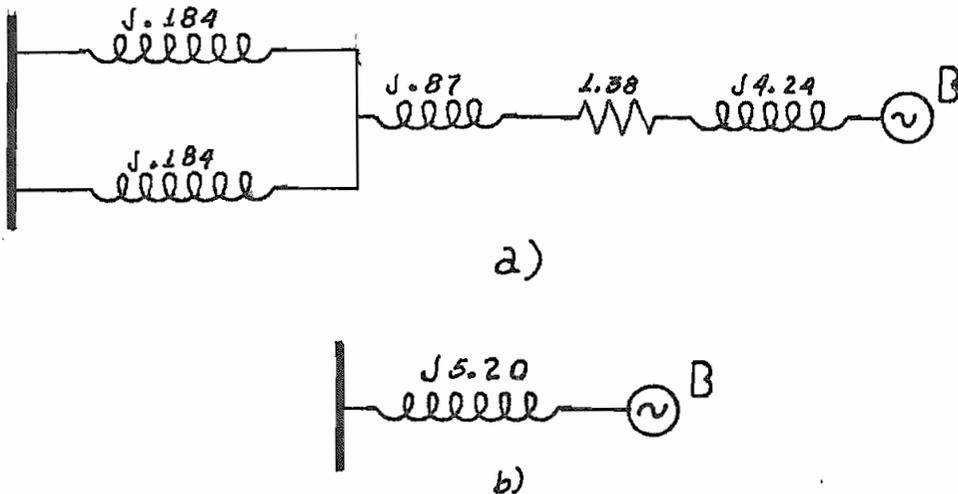


Fig. 13

Antes y durante la falla, la red asociada a la máquina B es, respectivamente, la de las figuras 10.-b y 11.-b.

3.- FALLA EN LA LOCALIZACION N° 6.- Puesto que la impedancia que separa las barras 1- y 3 es muy baja (0.092 PU), la carga ubicada en la barra 3 se la puede considerar como ubicada en la barra 1, con lo cual el diagrama de impedancia del sistema queda como se muestra en la figura 14, en donde las admitancias de las cargas $L_1 = L_3$ y L_2 son las siguientes:

$$Y_{L_1} = \frac{0.29 - j 0.217}{(1.05)^2} = \frac{0.29 - j 0.217}{1.10} = 0.264 - j0.197$$

$$Y_{L_2} = \frac{0.20 - j0.15}{(1.03)^2} = \frac{0.20 - j0.15}{1.06} = 0.189 - j0.142$$

y las respectivas impedancias de carga:

$$Z_{L_1} = \frac{0.264 + j 0.197}{(0.264)^2 + (0.197)^2} = \frac{0.264 + j0.197}{0.07 + 0.04} = \frac{0.264 + j0.197}{0.11} =$$

$$= 2.40 + j 1.79$$

$$Z_{L_2} = \frac{0.189 + j0.142}{(0.189)^2 + (0.142)^2} = \frac{0.189 + j0.142}{0.036 + 0.020} = \frac{0.189 + j0.142}{0.056} =$$

$$= 3.37 + j 2.53$$

De esta forma, antes de producida la falla, la red tiene la configuración de la figura 15, en la cual:

$$Z_{12} = \frac{(1.38 + j0.96)j0.421}{1.38 + j0.96 + j0.421} = 0.064 + j 0.359$$

Una transformación Δ - Y nos lleva al resultado de la figura 16, en donde:

$$Z_{01} = \frac{(2.40 + j1.79)(0.064 + j0.359)}{2.40 + 3.37 + j(1.79 + 2.53 + 0.36)} = \frac{(2.40 + j1.79)(0.064 + j0.359)}{5.37 + j 4.68} =$$

$$= \frac{3.00 \angle 36.8^\circ \times 0.365 \angle 79.8^\circ}{7.10 \angle 41^\circ} = 0.154 \angle 75.6^\circ =$$

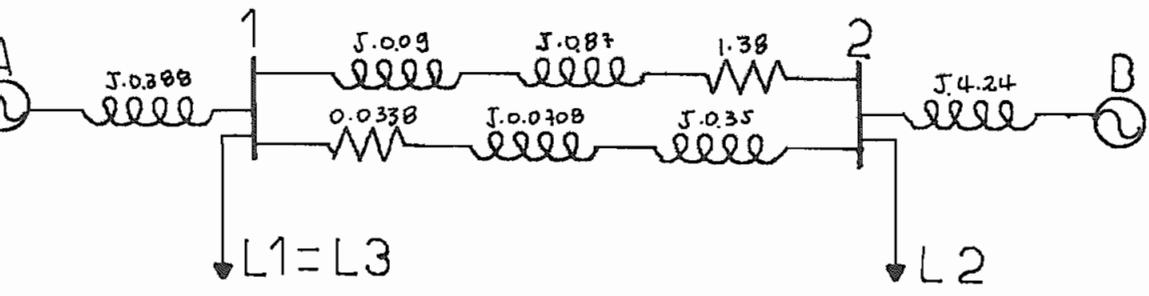


FIG 14

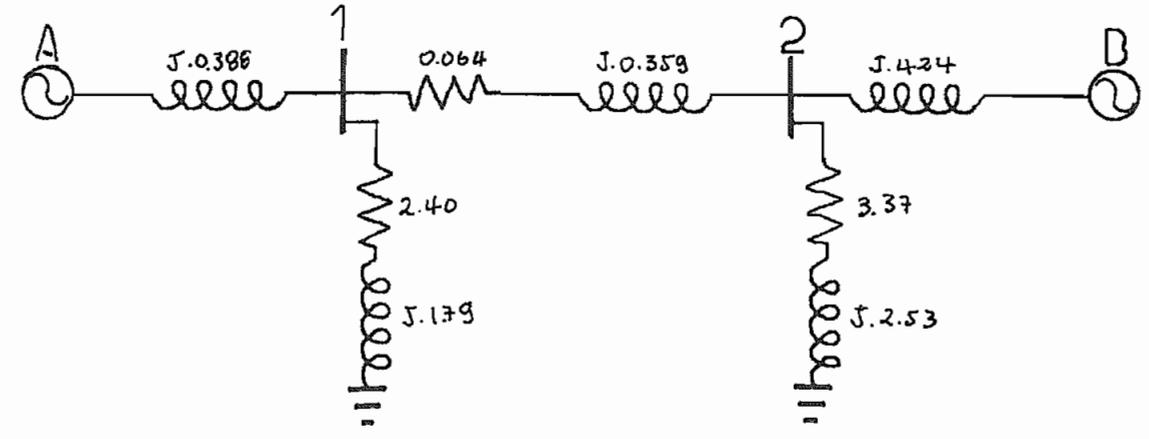


FIG 15

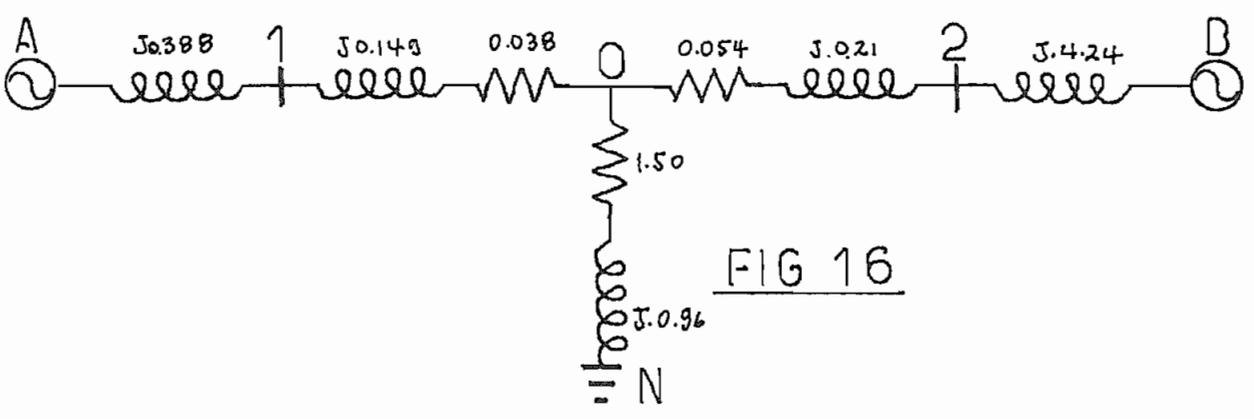


FIG 16

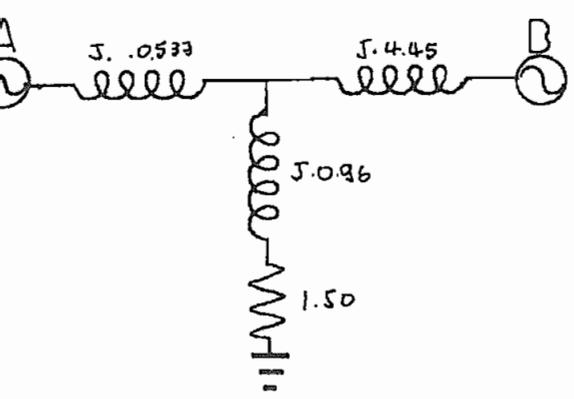


FIG 17

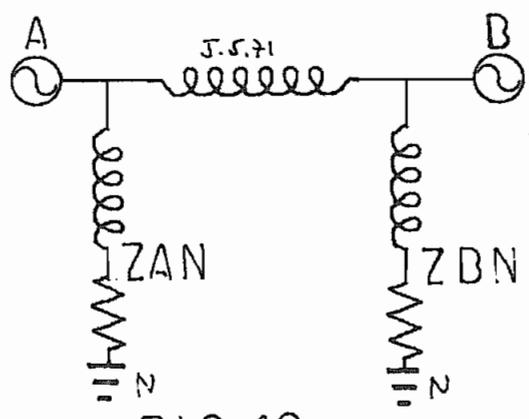


FIG 18

$$Z_{O2} = \frac{(0.064 + j0.359)(3.37 + j2.53)}{5.37 + j4.68} = 0.054 + j0.21 = 0.216 / \underline{75.6}$$

$$Z_{ON} = \frac{(2.40 + j1.79)(3.37 + j2.53)}{5.37 + j4.68} = 1.50 + j0.96 = 1.78 / \underline{32.6}$$

Con una agrupación de los elementos en serie el diagrama de la Figura 16 se reduce al de la 17 , y una transformación Y - Δ da como resultado:

$$\begin{aligned} Z_{AB} &= \frac{j0.537 \times j4.45 + j4.45(1.50 + j0.96) + (1.50 + j0.96)j0.537}{1.50 + j0.96} = \\ &= j5.71 \end{aligned}$$

Por lo tanto, antes de producirse la falla el diagrama del sistema es el mostrado en la Figura 18.

Durante la falla la red toma la forma indicada en la Figura 19 , en la cual las impedancias Z_{1N} y Z_{2N} , una vez agrupados sus elementos, quedan reducidas a las siguientes:

$$\begin{aligned} Z_{1N} &= \frac{(2.40 + j1.79)(0.0338 + j0.0708)}{2.40 + 0.0338 + j(1.79 + 0.0708)} = \\ &= 0.034 + j0.069 = 0.077 / \underline{63.9} \end{aligned}$$

$$Z_{2N} = \frac{(3.37 + j2.53) \times j0.35}{3.37 + j2.88} = 0.332 / \underline{86.3} = j0.33$$

Una transformación Δ - Y ahora da como resultado el diagrama de la Figura 20 , donde

$$\begin{aligned} Z_{O1} &= \frac{1.69 / \underline{34.8} \times 0.077 / \underline{63.9}}{(1.38 + 0.034) + j(0.96 + 0.069 + 0.33)} = \\ &= \frac{1.69 / \underline{34.8} \times 0.077 / \underline{63.9}}{1.97 / \underline{43.9}} = 0.028 + j0.0595 = 0.066 / \underline{64.8} \end{aligned}$$

$$Z_{O2} = \frac{1.69 \angle 34.8 \times 0.53 \angle 90}{1.97 \angle 43.9} = 0.047 + j0.296 = 0.30 \angle 80.9$$

$$Z_{ON} = \frac{0.077 \angle 63.9 \times 0.33 \angle 90}{1.97 \angle 43.9} = -0.0044 + j0.0121 = 0.0129 \angle 110$$

Agrupados los elementos en serie , el diagrama queda reducido al de la Figura 21 , en el que una transformación Y - Δ da el siguiente valor para la impedancia que separa las máquinas A y B:

$$Z_{AB} = \frac{j0.047 \times j4.53}{0.0129 \angle 110} + j0.0447 + j4.53 =$$

$$= 55.5 + j152.98 = 162.0 \angle 70.7$$

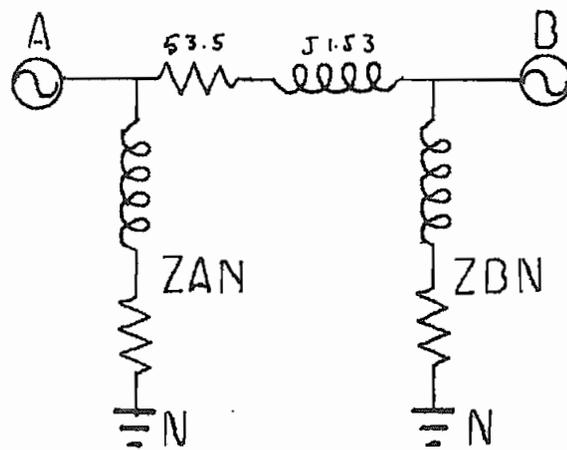
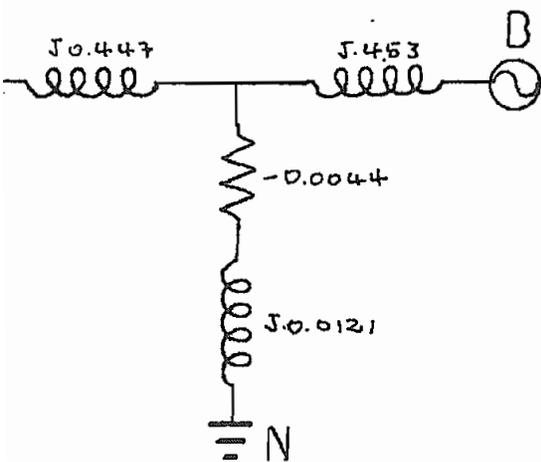
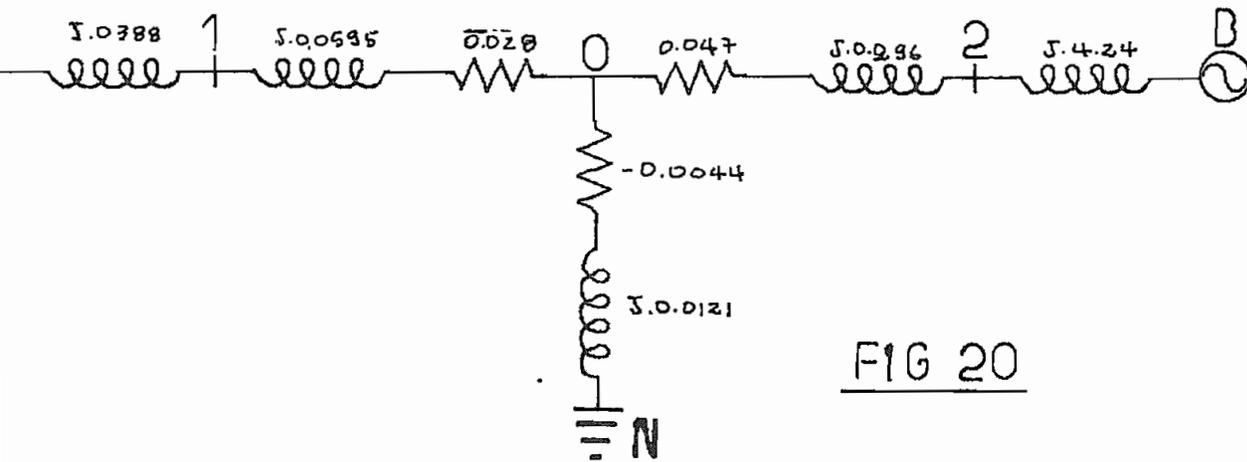
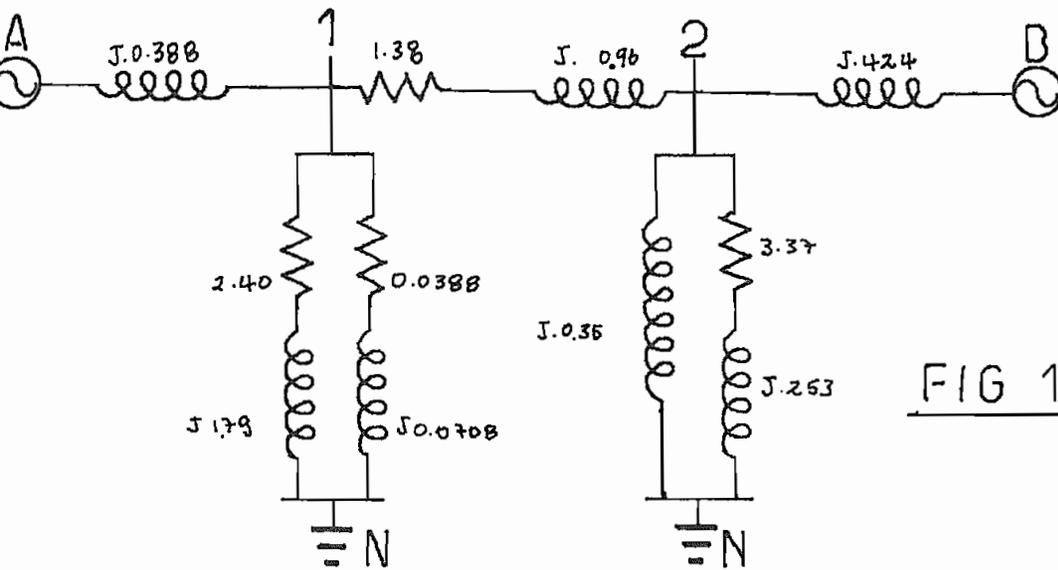
Así , durante la falla la red de interconexión del sistema tiene las características mostradas en la Figura 22.

Después de despejada la falla la configuración de la red será la indicada en la Figura 23 , en la cual una transformación Δ -Y entre los puntos 1,2 y N da como resultado el diagrama de la Figura 24 , en donde :

$$Z_{O1} = \frac{(1.38 + j0.96)(2.40 + j1.79)}{(1.38 + 2.40 + 3.37) + j(0.96 + 1.79 + 2.53)} =$$

$$= \frac{(1.38 + j0.96)(3.37 + j2.53)}{7.15 + j5.28} = 0.466 + j0.336 =$$

$$= 0.57 \angle 35.0$$



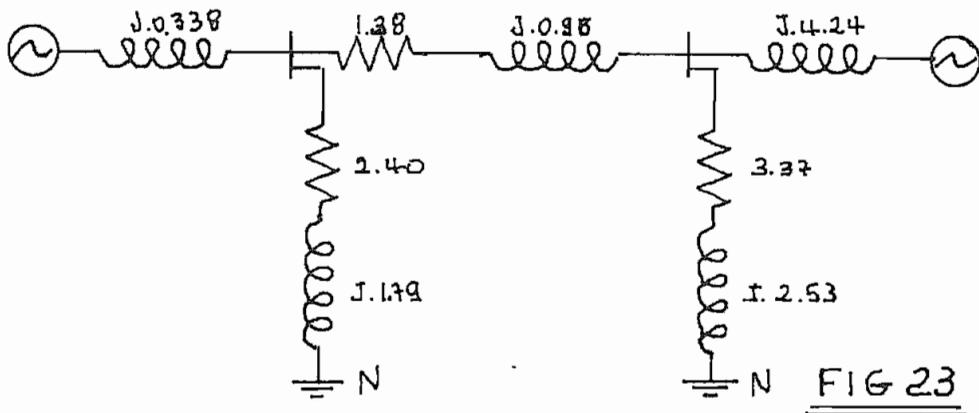


FIG 23

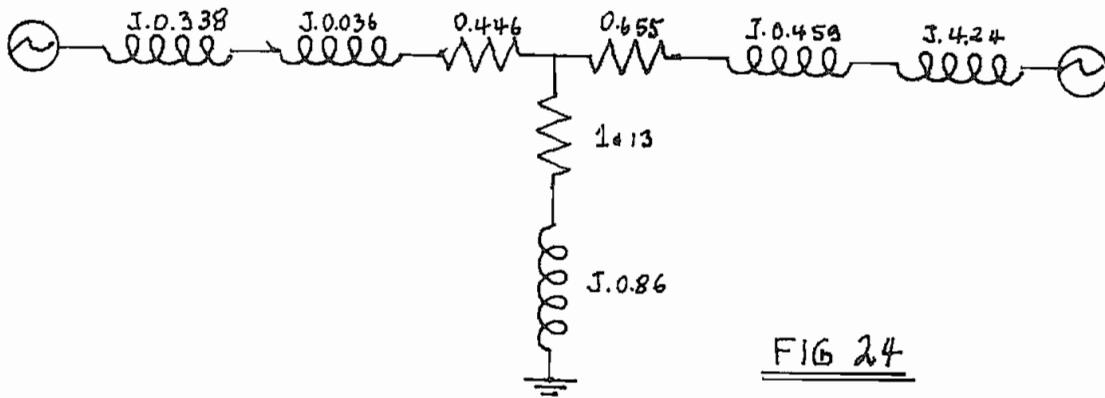


FIG 24

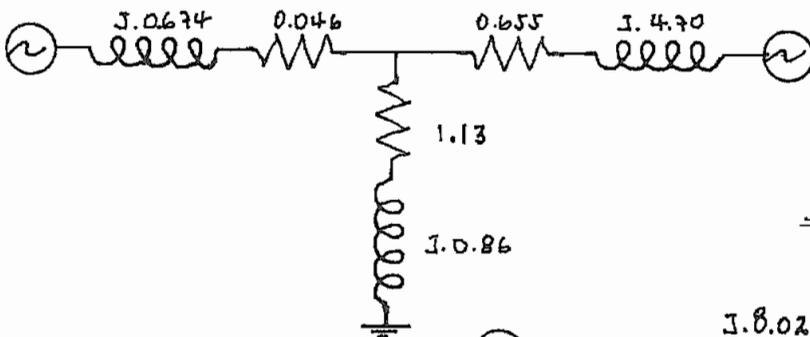
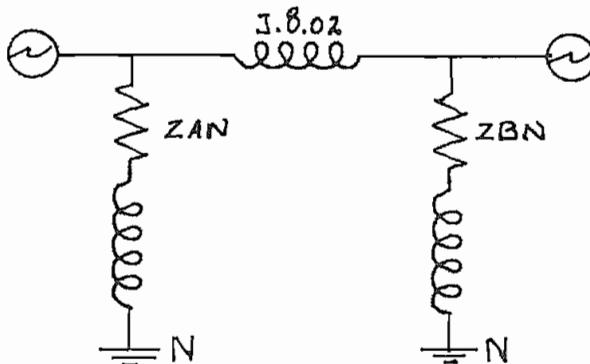


FIG 25

FIG 26



$$Z_{O2} = \frac{(1.38 + j0.96)(3.37 + j2.53)}{7.15 + j5.28} =$$

$$= 0.655 + j0.459 = 0.80 \angle 35.0$$

$$Z_{ON} = \frac{(2.40 + j1.79)(3.37 + j2.53)}{7.15 + j5.28} =$$

$$= 1.13 + j0.86 = 1.42 \angle 37.1$$

Una agrupación de los elementos en serie de la Figura 24 , da como resultado el esquema de la Figura 25 , de la cual tenemos que la impedancia equivalente entre las máquinas A y B será la siguiente:

$$Z_{AB} = \frac{(0.445 + j0.674)(0.655 + j4.70)}{1.13 + j0.86} + 0.446 + j0.674 + 0.655 + j4.70 =$$

$$= 0.58 + j8.02 \cong j8.02$$

Así , el esquema equivalente del sistema, una vez despejada la falla, será el que se muestra en la Figura 26

4.- FALLA EN LA LOCALIZACION N° 7.- Antes de producirse la falla en la localización marcada N° 7 el diagrama de impedancias es exactamente igual al de la Figura 18, ya que las impedancias involucradas en el sistema son las mismas que las tratadas al estudiar las condiciones precedentes a la falla en el punto 6.

La presencia de una falla en el punto 7 es eléctricamente equivalente a un cortocircuito de la barra 2 , y bajo estas condiciones no habrá transferencia de potencia entre las máquinas A y B; o, -

en otras palabras, la impedancia entre ambas máquinas será infinita.

Después de haber sido despejada la falla mediante la salida de operación de la línea que une las barras 2 y 3, y bajo la aproximación hecha de que la carga L_3 se encuentra ubicada en la barra 1, el diagrama de impedancias del sistema será el mostrado en la Figura 27, en el cual una transformación Δ -Y lo reduce al de la Figura 28, en donde

$$\begin{aligned} Z_{01} &= \frac{(2.40 + j1.79) \times j0.42}{(2.40+3.37) + j(1.79+2.53+0.42)} = \\ &= \frac{3.00 \angle 36.8 \times 0.42 \angle 90}{7.50 \angle 39.5} = j0.167 \end{aligned}$$

$$Z_{02} = \frac{(3.37 + j2.53) \times j0.42}{7.50 \angle 39.5} = j0.235$$

$$Z_{ON} = \frac{(2.40 + j1.79)(3.37+j2.53)}{7.50 \angle 39.5} = 1.40+j0.95 = 1.69 \angle 34.1$$

Una agrupación de los elementos en serie del diagrama de la Figura 28 da como resultado el de la Figura 29, y la impedancia Z_{AB} entre ambas máquinas será, como se muestra en la Figura 30, la siguiente:

$$\begin{aligned} Z_{AB} &= \frac{j0.555 \times j4.475}{1.40 + j0.95} + j0.555 + j4.475 = \\ &= -1.22 + j5.85 = 5.98 \angle 101.8 \end{aligned}$$

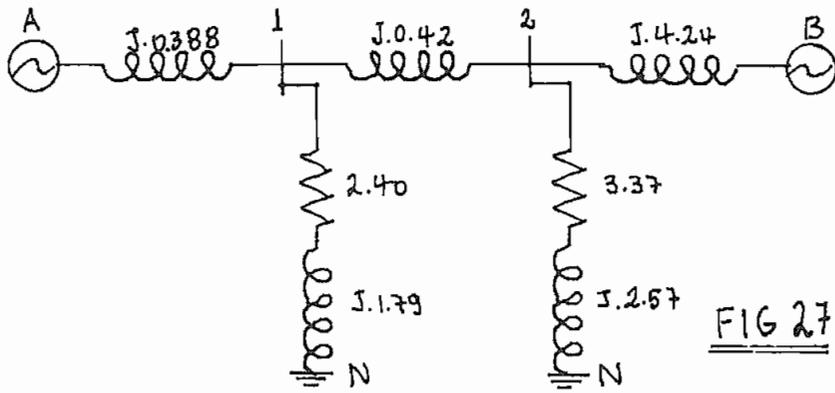


FIG 27

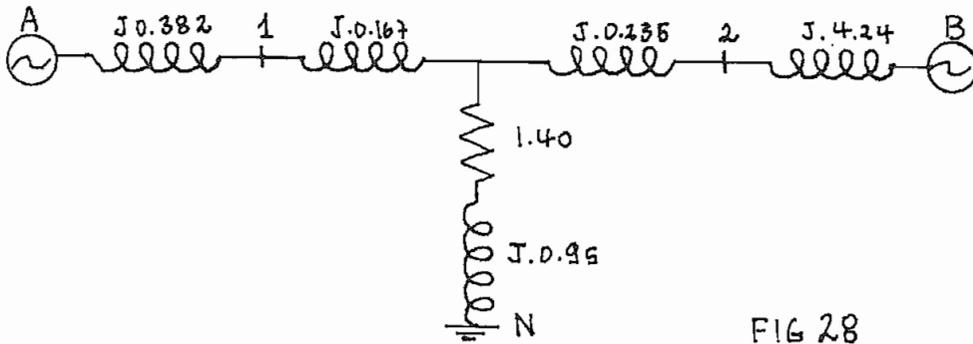


FIG 28

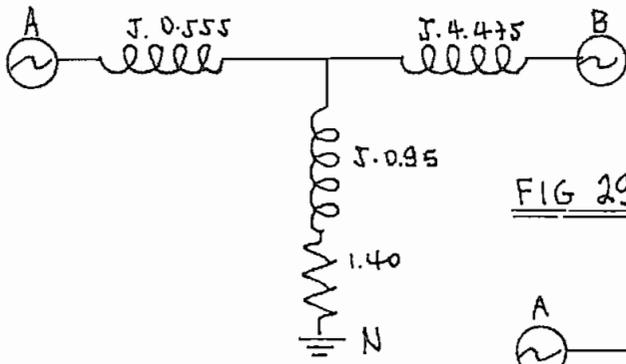


FIG 29

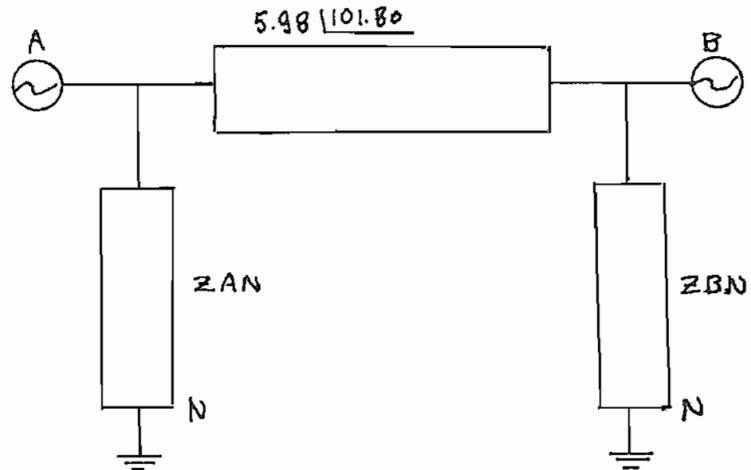


FIG 30

III.-4.-1.-g.-Curvas del Límite de Estabilidad Transitoria.- Si se considera una máquina finita conectada através de una impedancia a una barra infinita, y si en la red de interconexión se produce una falla, la potencia que puede transmitirse de la máquina a la barra sin pérdida del sincronismo, depende de la duración de la falla, siendo inversa la relación entre ambos factores.

Un método para el cálculo de la curva del límite de estabilidad transitoria está basado en el criterio de áreas iguales, mencionado al principio del presente capítulo (sección III.-1).

El método en cuestión consiste en lo siguiente:

Utilizando las curvas $P-\delta$ que representan las condiciones previa y posterior a la falla (Fig. III.-4), la línea P_i que representa la potencia de entrada a la máquina es desplazada verticalmente hasta obtener la igualdad de las áreas A_1 y A_2 ; de esta manera se obtiene el límite de estabilidad transitoria para despeje instantáneo de la falla.

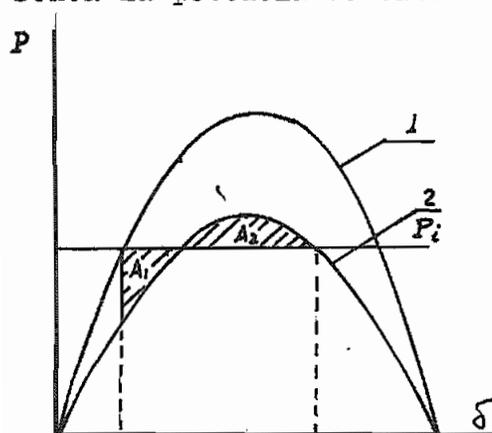


FIGURA III.-4

te hasta obtener la igualdad de las áreas A_1 y A_2 ; de esta manera se obtiene el límite de estabilidad transitoria para despeje instantáneo de la falla.

Si ahora en el gráfico de la Figura III.-4 se reemplaza la curva que representa las condiciones posteriores al despeje de la falla (curva 2) por la representativa de la condición de falla, y si se repite el mismo proceso, se obtendrá el límite de estabilidad para una

falla sostenida (tiempo infinito de despeje).

Consideremos ahora el gráfico de la Figura III.-5 , en el

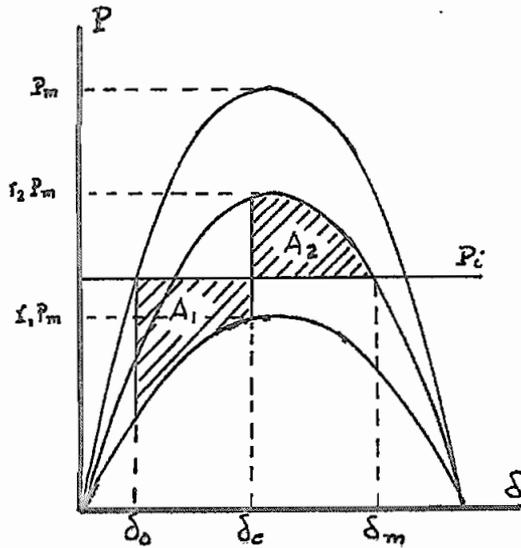


Figura III.-5

que se han representado las curvas para las tres condiciones. Si se elige un valor cualquiera de P_1 comprendido entre los límites establecidos para despeje instantáneo y para falla sostenida, el valor de δ_c puede ser ajustado de tal manera de llegar a la igualdad de las áreas A_1 y A_2 .

Repetiendo el procedimiento

para algunos valores de P_1 , se llegará

a obtener una curva del límite de estabilidad en función del ángulo crítico de despeje de la falla considerada.

Obtenida esta curva, la escala de la abcisa, la cual representa ángulo de despeje, puede ser transformada en una escala de tiempo de despeje si se conoce la curva de oscilación del sistema cuando la falla está presente.

El método más sencillo para hacer esta transformación de escala es utilizar las llamadas "curvas precalculadas de oscilación", que es una familia de curvas de oscilación obtenidas en función de parámetros adimensionales. Las curvas en cuestión tienen como ordenada el ángulo de potencia δ y como abcisa el tiempo modificado , definido como

$$\tau = t \sqrt{\frac{f \cdot P_M}{G \cdot H}} \quad (I)$$

donde: f = frecuencia del sistema

P_M = Amplitud de la curva de potencia

G = Capacidad de la máquina

H = Constante de inercia

Las diferentes familias de curvas han sido calculadas para diferentes valores iniciales de ángulo de potencia (δ_0), y el parámetro de las mismas es definido como

$$p = \frac{P_i - P_C}{P_M} \quad (\text{II})$$

en donde:

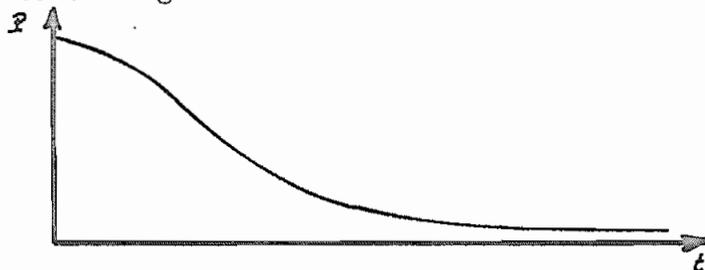
P_i = Potencia inicial de entrada a la máquina

P_C = desplazamiento vertical de la curva de potencia

P_M = amplitud de la curva de potencia

De esta forma es posible obtener la curva del límite de estabilidad transitoria para una falla producida en la red de interconexión que une la máquina finita y la barra infinita.

La curva del límite de estabilidad transitoria será de la forma mostrada en la Figura III.-6



El método descrito en las páginas anteriores, si bien está -- basado en la operación de una máquina finita sobre una barra infinita, es también aplicable a la operación de dos máquinas finitas interconectadas entre sí, pues el sistema de dos máquinas tendrá siempre un equivalente máquina finita - barra infinita; en este caso, la curva del límite de estabilidad representará la máxima potencia que es posible transmitir entre las dos máquinas (a través de la red de interconexión) en función de la duración de la falla.

Para que el sistema de dos máquinas finitas pueda ser reemplazado por una máquina finita y una barra infinita, será necesario utilizar una constante de inercia equivalente y potencias equivalentes de entrada y salida para la máquina finita equivalente.

Para derivar las características del sistema equivalente, utilizaremos las ecuaciones de oscilación de las dos máquinas finitas:

$$\frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = \frac{P_{a1}}{M_1} = \frac{P_{i1} - P_{u1}}{M_1} \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = \frac{P_{a2}}{M_2} = \frac{P_{i2} - P_{u2}}{M_2} \quad (2)$$

Además, el valor equivalente de δ será $\delta = \delta_1 - \delta_2$ (3)

Para el sistema equivalente, la ecuación de oscilación será:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} - \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = \frac{P_{a1}}{M_1} - \frac{P_{a2}}{M_2} \quad (4)$$

Multiplicando la ecuación (4) por $M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$ y reemplazando las ecuaciones (1) y (2) en (4) tenemos:

$$\frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{M_2 P_{i1} - M_1 P_{i2}}{M_1 + M_2} - \frac{M_2 P_{u1} - M_1 P_{u2}}{M_1 + M_2} \quad (5)$$

que puede ser escrita también en la forma:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_i - P_u = P_a \quad (6)$$

De las ecuaciones (5) y (6) :

$$M = \frac{M_1 \cdot M_2}{M_1 + M_2} \quad (7)$$

$$P_i = \frac{M_2 P_{i1} - M_1 P_{i2}}{M_1 + M_2} \quad (8)$$

$$P_u = \frac{M_2 P_{u1} - M_1 P_{u2}}{M_1 + M_2} \quad (9)$$

Las ecuaciones de transferencia de potencia de cada una de las máquinas finitas son las siguientes:

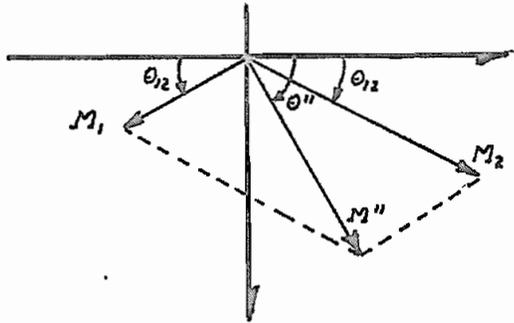
$$P_{u1} = E_1^2 Y_{11} \cos \theta_{11} + E_1 E_2 Y_{12} \cos(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) \quad (10)$$

$$P_{u2} = E_2 E_1 Y_{21} \cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + E_2^2 Y_{22} \cos \theta_{22} \quad (11)$$

Si ahora sustituimos las ecuaciones (10) y (11) en la (9), recordando que $\delta = \delta_1 - \delta_2$, tendremos:

$$P_u = \frac{M_2 E_1^2 Y_{11} \cos \theta_{11} - M_1 E_2^2 Y_{22} \cos \theta_{22}}{M_1 + M_2} + \frac{E_1 E_2 Y_{12} (M_2 \cos(\delta - \theta_{12}) - M_1 \cos(\delta + \theta_{12}))}{M_1 + M_2} \quad (12)$$

Los términos encerrados entre paréntesis en la ecuación (12) pueden ser considerados como las proyecciones horizontales de un vector M'' en el instante en que la variable δ tiene el valor cero, como se indica en la Figura III.-7. La suma de esas proyecciones horizontales



$$H = (M_2 - M_1) \cos \theta_{12} \quad (13)$$

y la suma de las proyecciones verticales de los vectores M_1 y M_2 será:

$$V = -(M_1 + M_2) \sin \theta_{12} \quad (14)$$

La magnitud del vector suma --

M'' será:

Figura III.-7

$$M'' = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{(M_2 - M_1)^2 \cos^2 \theta_{12} + (M_1 + M_2)^2 \sin^2 \theta_{12}} = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 - 2M_1 M_2 \cos(2\theta_{12})} \quad (15)$$

y el correspondiente argumento del vector M'' :

$$-\theta'' = \tan^{-1} \frac{V}{H} = -\tan^{-1} \left(\frac{M_1 + M_2}{M_2 - M_1} \tan \theta_{12} \right) \quad (16)$$

Con estas consideraciones la ecuación (12) puede ser escrita en forma más simple de la siguiente manera:

$$P_u = P_C + P_M \cos(\delta - \theta'') = P_C + P_M \text{sen}(\delta - \gamma) \quad (17)$$

en donde:

$$P_C = \frac{M_1 E_1^2 Y_{11} \cos \theta_{11} - M_2 E_2^2 Y_{22} \cos \theta_{22}}{M_1 + M_2} \quad (18)$$

$$P_M = \frac{E_1 E_2 Y_{12} M_1^2}{M_1 + M_2} = \frac{E_1 E_2 Y_{12}}{M_1 + M_2} \sqrt{M_1^2 + M_2^2 - 2M_1 M_2 \cos(2\theta_{12})} \quad (19)$$

$$\gamma = -\text{tn}^{-1} \left(\frac{M_1 + M_2}{M_1 - M_2} \text{tn} \theta_{12} \right) - 90^\circ \quad (20)$$

Las ecuaciones (18), (19) y (20) definen las curvas $P-\delta$ para el sistema máquina finita - barra infinita , equivalente de dos máquinas finitas conectadas por una red lineal.

Aplicando el método y los criterios expuestos en las páginas precedentes, procederemos al cálculo de las curvas del límite de estabilidad transitoria para cada una de las localizaciones de falla consideradas, recordando que en los puntos 3 y 5 las máquinas pueden ser consideradas como que oscilan sobre una barra una barra infinita; y - en los puntos 6 y 7 se tiene un sistema de dos máquinas finitas, el que será transformado a un sistema equivalente compuesto de una máquina finita y una barra infinita.

1.- FALLA EN LA LOCALIZACION Nº 3.-

Según se determinó en la sección

III.-4.-1.-f. ,deberán considerarse las dos máquinas separadamente ,

oscilando sobre una barra infinita.

Los diagramas de impedancias son los mostrados en las Figuras 10, 11 y 12, y conforme se determinó en la sección III.-4.-1.-d., el voltaje de la barra infinita es 1.05 P.U., y los voltajes de las máquinas A y B, 1.16 y 1.32, respectivamente.

Así, las ecuaciones de las curvas P - serán las siguientes:

MAQUINA A

MAQUINA B

a) Antes de la falla:

$$P_A = \frac{1.16 \times 1.05}{0.388} \text{ sen } \delta =$$
$$= 4.22 \text{ sen } \delta$$

$$P_B = \frac{1.32 \times 1.05}{4.60} \text{ sen } \delta =$$
$$= 0.30 \text{ sen } \delta$$

b) Durante la falla:

$$P_A = \frac{1.16 \times 1.05}{\infty} \text{ sen } \delta = 0$$

$$P_B = \frac{1.32 \times 1.05}{\infty} \text{ sen } \delta = 0$$

c) Después de la falla:

$$P_A = \frac{1.16 \times 1.05}{0.388} \text{ sen } \delta =$$
$$= 4.22 \text{ sen } \delta$$

$$P_B = \frac{1.32 \times 1.05}{4.60} \text{ sen } \delta =$$
$$= 0.30 \text{ sen } \delta$$

Puesto que las potencias iniciales de operación de las máquinas A y B son, respectivamente, 0.41 P.U. y 0.08 P.U., los ángulos iniciales de operación serán los siguientes:

Para la máquina A:

$$\delta_0 = \text{sen}^{-1} \frac{0.41}{4.22} = 5.55$$

Para la máquina B:

$$\delta_0 = \text{sen}^{-1} \frac{0.08}{0.3} = 15.5$$

las correspondientes curvas $P - \delta$ se muestran en los gráficos de los anexos III.-5.-a. y III.-5.-b.

Para ambas máquinas, y debido a que la curva $P - \delta$ después de despejada la falla es la misma que antes de que ésta se produzca, el límite de estabilidad para despeje instantáneo es igual al valor máximo de la curva de potencia; y puesto que durante la falla la ecuación de las curvas $P - \delta$ es $P_A = P_B = 0$, el valor del límite de estabilidad con falla sostenida será cero.

Así, para la máquina A, los valores del límite de estabilidad transitoria estarán comprendidos entre 0 y 4.22; y para la máquina B entre 0 y 0.30.

Para la determinación de los puntos intermedios de la curva del límite de estabilidad hagamos referencia a la Figura III.-5., -- en la cual llamaremos P_m a la máxima amplitud de la curva representativa de las condiciones anteriores a la falla; $r_1 P_m$ es la amplitud de la curva durante la falla; y $r_2 P_m$ la amplitud de la curva después de despejada la falla. Entonces, para que las áreas rayadas A_1 y A_2 sean iguales deberá cumplirse que:

$$(\delta_m - \delta_o) P_i = r_1 P_m \int_{\delta_o}^{\delta_c} \text{sen } \delta \, d\delta + r_2 P_m \int_{\delta_c}^{\delta_m} \text{sen } \delta \, d\delta$$

y puesto que $P_i = P_m \text{sen } \delta_o$:

$$(\delta_m - \delta_o) \text{sen } \delta_o = (r_2 - r_1) \cos \delta_c + r_1 \cos \delta_o + r_2 \cos \delta_m, \text{ o}$$

$$\cos \delta_c = \frac{(\delta_m - \delta_o) \text{sen } \delta_o - r_1 \cos \delta_o + r_2 \cos \delta_m}{r_2 - r_1}$$

en donde

$$\delta_m = \pi - \text{sen}^{-1} \frac{P_i}{r_2 P_m} = \pi - \text{sen}^{-1} \frac{\text{sen } \delta_o}{r_2}$$

Para el caso particular en que $r_1 = 0$ y $r_2 = 1$, como sucede cuando se produce una falla en la localización N° 3, las expresiones anteriores se reducen a las siguientes:

$$\cos \delta_c = \cos \delta_m + (\delta_m - \delta_o) \text{sen } \delta_o$$

$$\delta_m = \pi - \delta_o$$

El proceso sugerido por las dos ecuaciones precedentes se desarrolla para las máquinas A y B en los cuadros III.-2 y III.-3, en su orden en los cuales se han tomado para δ_o incrementos de 0.10.

Puesto que la amplitud de la curva P- δ durante la falla es cero, el parámetro p de la ecuación (II) de la sección III.-4.-1.-g. resulta tener un valor infinito, y por lo tanto no se pueden utilizar las curvas precalculadas de oscilación para obtener \mathcal{E}_c a partir de δ_c ; sin embargo, puesto que la potencia de aceleración $P_a = P_i - P_u$ es constante e igual a P_i , el tiempo crítico t_c de despeje de la falla puede obtenerse directamente mediante la expresión

$$t_c = \sqrt{\frac{2M (\delta_c - \delta_o)}{P_a}} = \sqrt{\frac{2GH (\delta_c - \delta_o)}{180 f P_i}}$$

en la cual δ_c y δ_o están expresados en radianes eléctricos.

Los cuadros III.-2 y III.-3 han sido completados con el cálculo de t_c , y las correspondientes curvas del límite de estabilidad transitoria se muestran en los gráficos del Anexo III.-6.

Para el cálculo de t_c en los cuadros III.-2 y III.-3, la correspondiente ecuación ha sido transformada de la siguiente forma:

$$t_c = \sqrt{\frac{2GH (\delta_c - \delta_o)}{180 f P_i}} = \sqrt{\frac{2GH}{180 f}} \times \sqrt{\frac{\delta_c - \delta_o}{P_i}}$$

La constante $\sqrt{2GH / 180 f}$ tiene los siguientes valores para cada máquina:

a) Máquina A:

$$\sqrt{\frac{2 \times 10.0 \times 1.50}{180 \times 60}} = 0.0526$$

b) Máquina B:

$$\sqrt{\frac{2 \times 1.027 \times 1.62}{180 \times 60}} = 0.0176$$

2.- FALLA EN LA LOCALIZACION No 5 .-

Nuevamente se considerará que las máquinas equivalentes A y B oscilan sobre una barra infinita de voltaje 1.05 P.U.

Los diagramas de impedancias, según se determinó en la sección anterior, son los de las Figuras 10-a y 11-a y 12-a para la máquina A antes, durante y después de la falla, en su orden; y 10-b, 11-b y 13-b para las mismas condiciones de la máquina B.

Los voltajes internos de las máquinas son: $E_A = 1.16$ P.U.

$$E_B = 1.32 \text{ P.U.}$$

En consecuencia, las correspondientes ecuaciones $P - \delta$ son las siguientes:

MAQUINA A

MAQUINA B

a) Antes de la Falla:

$$P_A = \frac{1.16 \times 1.05}{0.388} \text{ sen } \delta = 4.22 \text{ sen } \delta \quad P_B = \frac{1.32 \times 1.05}{4.60} \text{ sen } \delta = 0.30 \text{ sen } \delta$$

b) Durante la Falla:

$$P_A = \frac{1.16 \times 1.05}{\omega} \text{ sen } \delta = 0 \quad P_B = \frac{1.32 \times 1.05}{\omega} \text{ sen } \delta = 0$$

c) Después de la Falla:

$$P_A = \frac{1.16 \times 1.05}{0.388} \text{ sen } \delta = 4.22 \text{ sen } \delta \quad P_B = \frac{1.32 \times 1.05}{5.20} \text{ sen } \delta = 0.266 \text{ sen } \delta$$

Los ángulos iniciales de operación serán, teniendo en cuenta que las potencias iniciales son 0.41 P.U. y 0.08 P.U. para las máquinas A y B respectivamente, los siguientes:

$$\delta_{OA} = \text{sen}^{-1} \frac{0.41}{4.22} = 5.55 \quad ; \quad \delta_{OB} = \text{sen}^{-1} \frac{0.08}{0.30} = 15.5$$

Como puede verse, las condiciones cuando la falla se presenta en la localización N° 5 son las mismas que cuando se presenta en la N° 3, con la sola diferencia de que, para la máquina B, la amplitud de la curva $P - \delta$ que representa la condición de falla despejada es menor que la de la curva similar cuando aún no se ha producido la -- falla.

En consecuencia, las curvas $P - \delta$ y del límite de estabilidad transitoria para la máquina A serán las mismas de los anexos ----- III.-5.-a. y III.-6.-a. , respectivamente.

Las curvas $P - \delta$ para las tres condiciones , antes, durante y después de la falla, correspondientes a la máquina B se muestran en el Anexo Nº III.-7.

La relación de amplitudes de estas curvas es:

$$r_1 = 4.60 / \omega = 0 \quad ; \quad r_2 = 4.60 / 5.20 = 0.885$$

Nuevamente, el límite de estabilidad transitoria con falla sostenida será cero , ya que la amplitud de la curva $P - \delta$ cuando la falla está presente es cero.

Cuando el despeje de la falla es instantáneo, las áreas A_1 y A_2 de la figura del Anexo III.-7 deberán ser iguales , y por lo tanto

$$P_i (\delta_c - \delta_o) - \int_{\delta_o}^{\delta_e} r_2 P_m \text{sen } \delta \, d\delta = \int_{\delta_e}^{\delta_m} r_2 P_m \text{sen } \delta \, d\delta - P_i (\delta_m - \delta_c)$$

o,

$$P_i (\delta_m - \delta_o) = r_2 P_m \int_{\delta_o}^{\delta_m} \text{sen } \delta \, d\delta = r_2 P_m (\cos \delta_o - \cos \delta_m)$$

$$P_i (\delta_m - \delta_o) = 0.266 (\cos \delta_o - \cos \delta_m)$$

La ecuación precedente no es posible de resolver con los métodos convencionales , ya que tiene dos incógnitas ; sin embargo, en el cuadro Nº III.-4 se han efectuado una serie de tentativas de resolución por tanteo , las cuales nos han llevado a aceptar como solución de la ecuación el valor $P_i = 0.251$, y consecuentemente,

$$\delta_o = 57.0^\circ, \quad \delta_c = 70.8^\circ, \quad \delta_m = 109.2^\circ$$

De esta forma, la abcisa de la curva del límite de estabilidad transitoria variará entre cero (0) y 0.251 P.U.

El cálculo de los puntos de esa curva se detalla en el cuadro III.- 5 , y su gráfico se presenta en el Anexo No III.-8.

3.- FALLA EN LA LOCALIZACION No 6.-

Como ya fué establecido previamente, consideraremos un sistema de dos máquinas finitas conectadas entre sí a través de una red lineal. Este sistema será transformado en su equivalente formado por una máquina finita y una barra infinita, como paso previo al cálculo de la curva del límite de estabilidad transitoria.

Los diagramas de impedancia para antes, durante y después de la falla son los de las figuras 18, 22 y 26 , respectivamente. En esas figuras se muestran únicamente las impedancias Z_{AB} entre ambas máquinas, pero puesto que necesitaremos también las impedancias Z_{AA} y Z_{BB} procederemos a continuación a su cálculo.

Así, en el diagrama de la Figura 18:

$$\begin{aligned} Z_{AN} &= \frac{j0.537 \times j4.45 + j4.45(1.50 + j0.96) + (1.50 + j0.96)j0.537}{j4.45} = \\ &= 1.68 + j1.62 = 2.33 \angle 44.0 \end{aligned}$$

$$Z_{BN} = j4.45 + (1.50 + j0.96) \times \frac{4.45}{0.537} + 1.50 + j0.96 =$$

$$= 13.90 + j13.36 = 19.20 \angle 43.8$$

Recíprocamente:

$$Y_{AN} = \frac{1}{Z_{AN}} = \frac{1}{2.33 \angle 44} = 0.43 \angle -44$$

$$Y_{BN} = \frac{1}{Z_{BN}} = \frac{1}{19.20 \angle 43.8} = 0.052 \angle -43.8$$

$$Y_{AB} = \frac{1}{Z_{AB}} = \frac{1}{j5.71} = 0.175 \angle -90$$

Durante la falla (Figura 22):

$$Z_{AN} = \frac{j0.447 \times j4.53 + j4.53 \times 0.0129/110 + 0.0129/110 \times j0.447}{j4.53} =$$

$$= j0.46$$

$$Z_{BN} = \frac{j4.53 \times 0.0129/110}{j0.447} + j4.53 + 0.0129/110 = j4.67$$

y recíprocamente,

$$Y_{AN} = 1 / j0.46 = -j2.17 = 2.17 \angle -90$$

$$Y_{BN} = 1 / j4.67 = -j0.214 = 0.214 \angle -90$$

$$Y_{AB} = 1 / (53.5 + j15.3) = 0.0062 \angle -70.7$$

Después de despejada la falla (Figura 26):

$$Z_{AN} = \frac{(0.446 + j0.674)(1.13 + j0.86)}{0.655 + j4.70} + 0.446 + j0.674 + 1.13 + j0.86 =$$

$$= 1.81 + j1.58 = 2.40 \angle 41$$

$$Z_{BN} = \frac{(0.655+j4.70)(1.13+j0.86)}{0.446 + j0.674} + 0.655+j4.70+1.13+j0.86 =$$
$$= 5.62 + j12.96 = 14.10 \angle 66.5$$

y recíprocamente,

$$Y_{AN} = \frac{1}{2.40 \angle 41} = 0.417 \angle -41$$

$$Y_{BN} = \frac{1}{14.10 \angle 66.5} = 0.071 \angle -66.5$$

$$Y_{AB} = \frac{1}{j8.02} = -j0.125 = 0.125 \angle -90$$

Por lo tanto, las admitancias de punto matriz y de transferencia serán para cada caso las siguientes:

a) Antes de la Falla:

$$Y_{AA} = Y_{AB} + Y_{AN} = 0.175 \angle -90 + 0.43 \angle -44 = 0.309 - j0.404 =$$
$$= 0.566 \angle -56.9$$

$$Y_{BB} = Y_{AB} + Y_{BN} = 0.175 \angle -90 + 0.052 \angle -43.8 = 0.0375 - j0.211 =$$
$$= 0.213 \angle -79.9$$

$$Y_{AB} = -0.175 \angle -90 = 0.175 \angle 90$$

b) Durante la Falla:

$$Y_{AA} = 2.17 \angle -90 + 0.0062 \angle -70.7 = -j2.176 = 2.176 \angle -90$$

$$Y_{BB} = 0.214 \angle -90 + 0.0062 \angle -70.7 = -j0.22 = 0.22 \angle -90$$

$$Y_{AB} = -0.0062 \angle -70.7 = 0.0062 \angle 109.3$$

c) Después de despejada la falla:

$$Y_{AA} = 0.417 \angle -41 + 0.125 \angle -90 = 0.315 - j0.398 = 0.51 \angle -51.6$$

$$Y_{BB} = 0.071 \angle -66.5 + 0.125 \angle -90 = 0.0283 - j0.19 = 0.192 \angle -81.5$$

$$Y_{AB} = -0.125 \angle -90 = 0.125 \angle 90$$

Una vez que hemos obtenido las admitancias de punto motriz y de transferencia del sistema de dos máquinas en las tres condiciones a estudiarse (antes, durante y después de la falla), los valores de las curvas $P-\delta$ para estas condiciones serán, de acuerdo a las ecuaciones (17), (18), (19) y (20) de esta sección, las siguientes:

a) Antes de la falla:

$$P_C = \frac{0.154(1.16)^2 \times 0.309 - 1.39(1.32)^2 \times 0.0375}{1.39 + 0.154} = -0.01735 \quad (*)$$

$$P_M = \frac{1.16 \times 1.32 \times 0.175}{1.39 + 0.154} \sqrt{(1.39)^2 + (0.154)^2 - 2 \times 1.39 \times 0.154 \times \cos(2 \times 90)}$$

$$= 0.266$$

$$\gamma = -\tan^{-1} \left(\frac{1.39 + 0.154}{1.39 - 0.154} \times \tan(-90) \right) = 90 = 0$$

Así, la ecuación de la curva antes de producirse la falla es:

$$P_u = -0.01735 + 0.266 \text{ sên}(\delta - 0), \text{ o}$$

$$(*) \quad M_A = \frac{G_A H_A}{180 f} = \frac{10.0 \times 1.50}{180 \times 60} = 0.00139 = 1.39 \times 10^{-3}$$

$$M_B = \frac{G_B H_B}{180 f} = \frac{1.027 \times 1.6E}{180 \times 60} = 0.000154 = 0.154 \times 10^{-3}$$

$$P_u = -0.01735 + 0.266 \operatorname{sen} \delta$$

b) Durante la falla:

Puesto que con esta condición se cumple muy aproximadamente que $\theta_{AA} = \theta_{BB} = 90$, tendremos que $P_C = 0$, y

$$P_M = \frac{1.16 \times 1.32 \times 0.0062}{1.39 + 0.154} \sqrt{(1.39)^2 + (0.154)^2 - 2 \times 1.39 \times 0.154 \cos(2 \times 109.3)} = 0.0092$$

$$\gamma = -\operatorname{tn}^{-1} \left(\frac{1.39 + 0.154}{1.39 - 0.154} \times \operatorname{tn}(-70.7) \right) - 90 = -15.6$$

La ecuación de la curva durante la falla será pues:

$$P_u = 0.0092 \operatorname{sen}(\delta + 15.6)$$

c) Después de despejada la falla:

$$P_C = \frac{0.154(1.16)^2 \times 0.315 - 1.39(1.32)^2 \times 0.0283}{1.39 + 0.154} = -0.0019$$

$$P_M = \frac{1.16 \times 1.32 \times 0.125}{1.39 + 0.154} \sqrt{(1.39)^2 + (0.154)^2 - 2 \times 1.39 \times 0.154 \cos(2 \times 90)} = 0.191$$

$$\gamma = -\operatorname{tn}^{-1} \left(\frac{1.39 + 0.154}{1.39 - 0.154} \times \operatorname{tn}(-90) \right) - 90 = 0$$

La ecuación de la curva para este caso será la siguientes

$$P_u = -0.0019 + 0.191 \operatorname{sen} \delta$$

Las curvas $P - \delta$ para las tres condiciones se muestran en el Anexo Nº III.-9, en donde también se ha determinado el valor del límite de estabilidad para despeje instantáneo de la falla, desplazando la

línea $P_{iMáx.}$ hasta conseguir la igualdad de las áreas A_1 y A_2 ; este valor resultó ser 0.174 . Similarmente, igualando las áreas A_3 y A_4 , ha sido determinado el valor del límite de estabilidad con falla sostenida, el cual resultó ser 0.007. Des esta forma, los valores máximo y mínimo de la ordenada de la curva del límite de estabilidad serán, respectivamente, 0.174 y 0.007.

En la misma figura del Anexo No III.-9 se ha dibujado la curva del límite de estabilidad transitoria en función del ángulo de despeje de la falla, siguiendo el método gráfico descrito en las páginas 89 y 90. La abcisa de esta curva, dada ahora como ángulo de potencia, será transformada en valores de tiempo utilizando curvas precalculadas de oscilación.

Para la aplicación del método de las curvas precalculadas de oscilación deberemos calcular para varios valores de P_i el parámetro $p = (P_i - P_C) / P_M$, en el cual P_C y P_M son el desplazamiento vertical y la amplitud de la curva $P-\delta$ durante la falla; es decir, en nuestro caso, $P_C = 0$ y $P_M = 0.0092$.

Además, deberemos también calcular los valores de $\delta'_0 = \delta_0 - \tau$ y $\delta'_c = \delta_c - \tau$, donde τ es el desplazamiento sobre el eje horizontal de la misma curva $P-\delta$; o sea, en nuestro caso, $\tau = -15.6^\circ$

Puesto que la ordenada de la curva del límite de estabilidad transitoria variará entre 0.174 y 0.007, los valores máximo y mínimo de p que tendremos que utilizar serán los siguientes:

$$p_{máx.} = (0.174 - 0) / 0.0092 = 18.9$$

$$p_{\min.} = (0.007-0)/0.0092 = 0.76$$

En las curvas precalculadas de Summers y Mc. Clure (1) , el valor del parámetro p varía entre 0.05 y 3.00, de tal manera que para la mayor parte de la curva del límite de estabilidad de la figura del Anexo N^o III.-9, no dispondremos de una curva precalculada de oscilación adecuada a nuestros valores, y por lo tanto el método no es aplicable en este caso.

El alto valor de la máxima ordenada de la curva del límite de estabilidad trae como consecuencia el valor sumamente grande de $p_{\max.}$, el cual es explicable en razón de que la amplitud de la curva $P-\delta$ durante la falla es muy baja (0.0092) en relación al valor del límite de estabilidad con despeje instantáneo , y como puede verse en el Anexo N^o III.-9 , no se comete un error apreciable si se considera que la curva $P-\delta$ durante la falla coincide con el eje de las abscisas ; - es decir, así se considera que la amplitud de la curva es cero, en cuyo caso podemos aplicar para el cálculo de la curva del límite de estabilidad transitoria el mismo método utilizado para la máquina B con falla en la localización N^o 5.

Pero puesto que en el Anexo N^o III.-9 se ha determinado gráficamente la curva del límite de estabilidad en función del ángulo crítico de despeje, obviaremos el procedimiento analítico para calcularlo, y simplemente lo leeremos de la curva de ese anexo, así como el ángulo inicial de operación, δ_0 , para luego pasar al cálculo del tiempo crítico de despeje.

CALCULO DE LA CURVA DEL LIMITE DE ESTABILIDAD TRANSITORIA MAQUINAS A Y B COMBINADAS

P_i	δ_0	δ_c	$\frac{\delta_c - \delta_0}{P_i}$	$\sqrt{\frac{\delta_c - \delta_0}{P_i}}$	t_c (1)
0.174	46.0	46.0	0	0	0
0.140	36.5	58.5	157	12.55	0.208
0.120	31.0	67.5	304	17.45	0.290
0.100	26.0	78.0	520	22.80	0.379
0.080	21.0	90.0	862	29.40	0.488
0.060	16.5	105.0	1.475	38.50	0.640
0.040	12.0	122.0	2.750	52.40	0.870
0.020	7.5	142.5	6.750	82.20	1.365
0.007	-	-	-	-	∞

(1) $t_c = 0.0166 \sqrt{\frac{\delta_c - \delta_0}{P_i}}$

Este procedimiento se ha desarrollado en el cuadro N^o III.-6 , en el cual el valor de la constante $\sqrt{2GH/180.f}$ es el siguiente:

$$\sqrt{\frac{2GH}{180 f}} = \sqrt{2M} = \sqrt{2 \frac{M_A \cdot M_B}{M_A + M_B}} = \sqrt{2 \frac{1.39 \times 0.154}{1.39 + 0.154} \times 10^{-3}} = 0.0166$$

La curva del límite de estabilidad transitoria para la máquina equivalente A-B se ha grafizado en el Anexo N^o III.-10.

4.- FALLA EN LA LOCALIZACION N^o 7.-

Como fué previamente establecido, se considerarán dos máquinas finitas conectadas entre sí a través de una red lineal.

El diagrama de impedancias para antes de producida la falla es, como en el caso de la falla en la localización N^o 6, el de la figura 18.

Durante la falla, la impedancia de transferencia Z_{AB} es infinita; y después de despejada la falla, el diagrama de impedancias es el de la Figura 30. En esta figura las impedancias Z_{AN} y Z_{BN} tienen los siguientes valores:

$$Z_{AN} = \frac{j0.555 \times (1.40 + j0.95)}{j4.475} + j0.555 + 1.40 + j0.95 =$$

$$= 1.574 + j1.623 = 2.26 \angle 45.8$$

$$Z_{BN} = \frac{(1.40 + j0.95) \times j4.75}{j0.555} + j4.475 + 1.40 + j0.95 =$$

$$= 12.60 + j13.02 = 18.1 \angle 45.8$$

y las correspondientes admitancias, las siguientes:

$$Y_{AN} = \frac{1}{2.26/45.8} = 0.443/-45.8 = 0.309 - j0.318$$

$$Y_{BN} = \frac{1}{18.1/45.8} = 0.055/-45.8 = 0.0385 - j0.0395$$

De esta forma, las admitancias de punto motriz y de transferencia para antes y después de la falla serán las siguientes:

a) Antes de la falla:

$$Y_{AA} = 0.566 /-56.9$$

$$Y_{BB} = 0.213 /-79.9$$

$$Y_{AB} = -0.175 /-90 = 0.175 /90$$

b) Después de la falla:

$$Y_{AA} = 0.443/-45.8 + \frac{1}{5.98} /-101.8 = 0.343 - j0.482 = 0.592/-54.6$$

$$Y_{BB} = 0.0385 - j0.0395 + 0.034 - j0.164 = 0.0725 - j0.203 = 0.216/-70.4$$

$$Y_{AB} = -\frac{1}{5.98} /-101.8 = -0.167 /-101.8 = 0.167 /78.2$$

La curva P- δ para la máquina combinada, antes de la falla, será, como en el caso de la falla en la localización N^o6, la siguiente:

$$P_u = -0.017 + 0.266 \text{ sen } \delta$$

Durante la falla la amplitud de la curva P- δ será cero, ya que, como se explicó en la sección III.-4.-1.-f.-4., cuando es cortocircuito esté presente no habrá transferencia de potencia entre las máquinas A y B.

Después de despejada la falla, la curva $P-\delta$ estará definida por las siguientes constantes:

$$P_C = \frac{0.154 \times (1.16)^2 \times 0.343 - 1.39(1.32)^2 \times 0.0725}{1.39 + 0.154} = -0.066$$

$$P_M = \frac{1.16 \times 1.32 \times 0.167}{1.39 + 0.154} \sqrt{(1.39)^2 + (0.154)^2 - 2 \times 1.39 \times 0.154 \cos(2 \times 78.2)}$$
$$= 0.252$$

$$\gamma = -\tan^{-1} \left(\frac{1.39 + 0.154}{1.39 - 0.154} \times \tan(-101.8) \right) - 90 = 9.5^\circ$$

La ecuación de la curva $P-$ después del despeje de la falla será pues la siguiente:

$$P_u = -0.066 + 0.252 \sin(\delta - 9.5)$$

Las curvas $P-\delta$ para las tres condiciones se han representado en el Anexo N° III.-11, y a base de ellas se ha dibujado también la curva del límite de estabilidad en función del ángulo crítico de despeje, utilizando el mismo método gráfico usado en el caso de la falla anterior. De igual manera, en el cuadro N° III.-7 se ha calculado la curva del límite de estabilidad transitoria en función del tiempo crítico de despeje a base de los valores de la curva del Anexo III.-11.

La curva del límite de estabilidad transitoria para la falla en la localización N° 7 se muestra en el Anexo N° III.-12.

CALCULO DE LA CURVA DEL LIMITE DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

MAQUINAS A Y B COMBINADAS

P_i	δ_o	δ_e	$\delta_c - \delta_o$	$\sqrt{\frac{\delta_c - \delta_o}{P_i}}$	t_c (1)
0.152	39.5	39.5	0	0	0
0.140	36.0	46.5	75.0	8.66	0.144
0.120	31.5	58.0	221	14.85	0.246
0.100	26.0	71.0	450	21.20	0.352
0.080	21.0	86.0	812	28.50	0.473
0.060	16.5	101.0	1,408	37.60	0.624
0.040	12.0	116.0	2,600	51.00	0.846
0.020	7.5	139.5	6,600	81.20	1.350
0	-	-	-	-	∞

(1) $t_c = 0.0166 \sqrt{\frac{\delta_c - \delta_o}{P_i}}$

ESTUDIO Nº 2

CENTRALES EN OPERACION: EL AMBI

OTAVALO

DIESEL IBARRA

III.4.2.a.- Diagrama Unifilar.-

Para el caso particular de este estudio, el diagrama del anexo Nº III.4 se reduce al de la Figura 1, y puesto que la impedancia entre las barras 1 y 3 es extremadamente baja, podemos agrupar en una sola las máquinas A y C (El Ambi y Diesel Ibarra), con lo cual el diagrama se transforma en el de la Figura 2.

La reactancia equivalente de la combinación de las máquinas A y C, que en adelante llamaremos D, es la siguiente :

$$X_D = \frac{j0.388 \times j4.97}{j0.388 + j4.97} = j0.36$$

En el diagrama de la Figura 1 se han marcado los puntos 3-4-5-6-7-10, en los cuales se deberá estudiar la falla trifásica. Sin embargo, al suprimir en la figura 2 la línea que une las barras 1 y 3, desaparecen los puntos 3 y 4, por lo que se estudiarán las condiciones de falla solamente en los puntos 5-6-7-10, dejando las localizaciones 3 y 4 para ser tratadas posteriormente.

Además, en el diagrama de la Figura 2 se han localizado solamente dos cargas, ya que las intermedias entre las barras 1 y 3 (Fig. 1) - serán repartidas entre estas barras.

Este proceso se realiza en la siguiente sección.

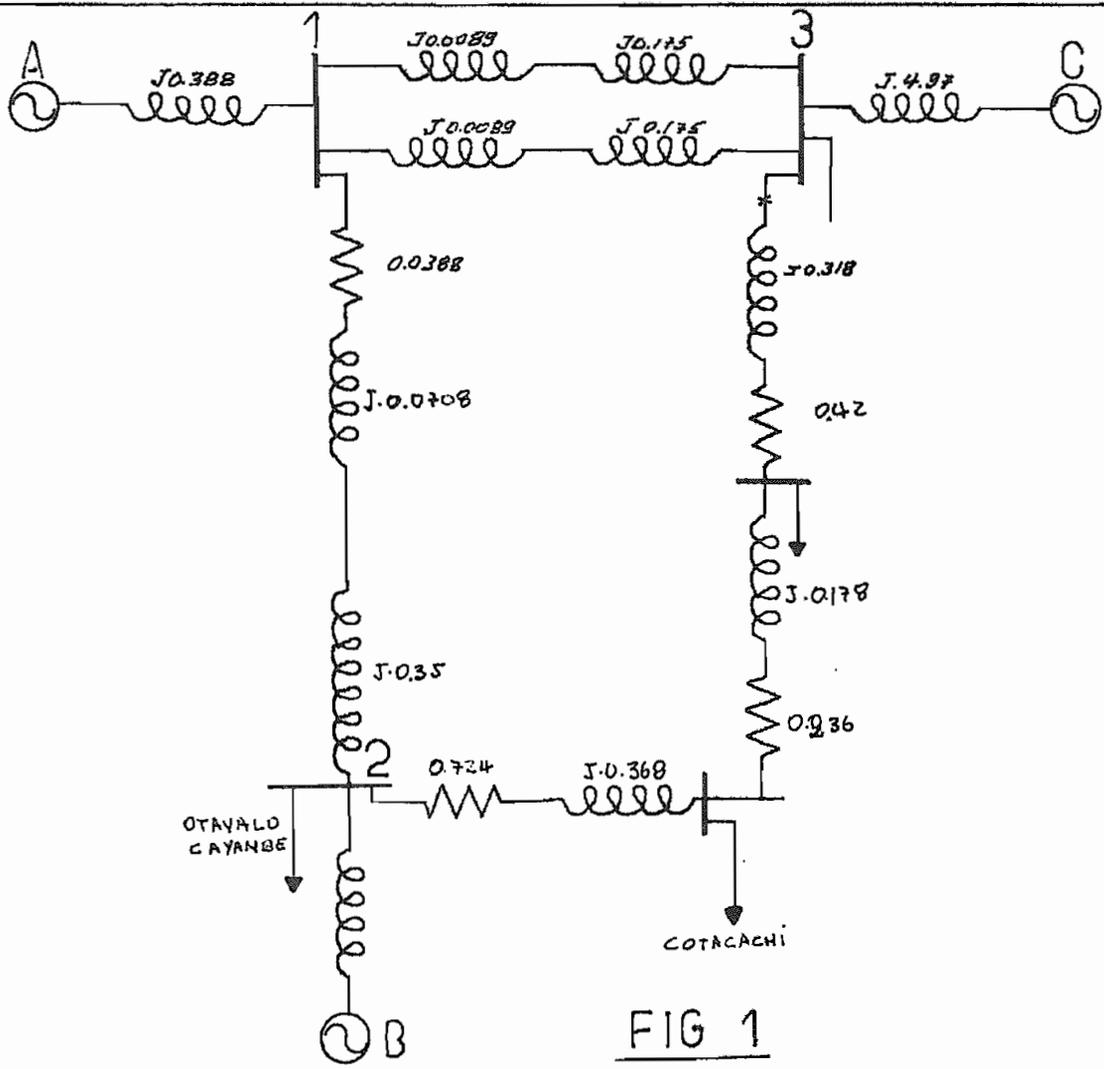


FIG 1

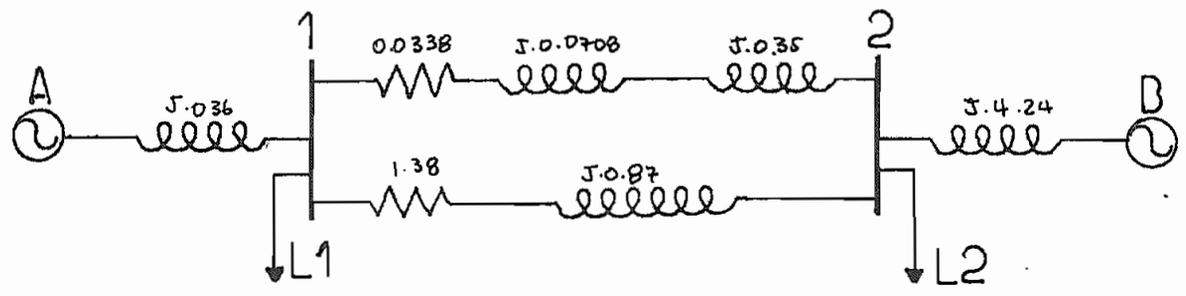


FIG 2

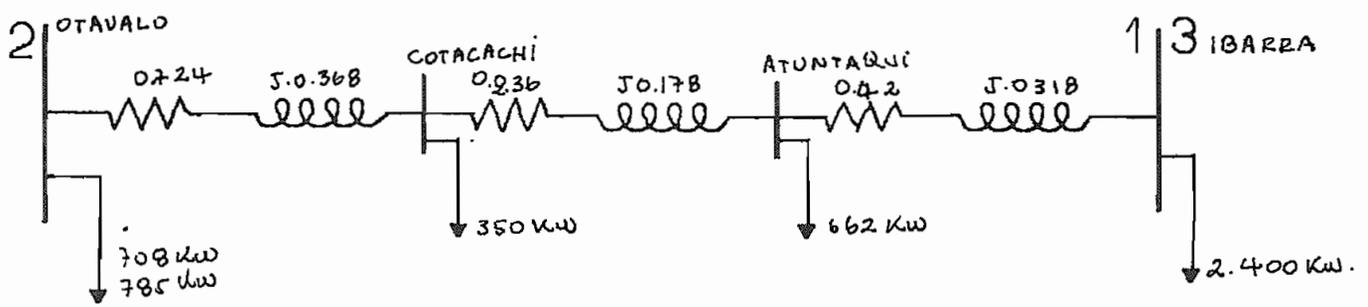


FIG 3

III.4.2.b.- Ubicación de cargas.-

Según se determinó en el programa de operación del Sistema, (ver anexo Nº II.12) , las cargas máximas en las condiciones de este estudio serán las siguientes:

Ibarra	2.400 Kw	cos ϕ = 0.80
Otavallo	908 "	"
Cayambe	785 "	"
Cotacachi	350 "	"
Atuntaqui	662 "	"
Total	5.105 Kw	cos ϕ = 0.80

Las cargas de Otavallo y Cayambe actúan sobre la misma barra (2) y la de Ibarra actúa en la barra (1); las cargas de Cotacachi y Atuntaqui serán repartidas entre estas dos barras en forma inversa a la impedancia que las separa.

Haciendo referencia a la Figura 3 tendremos la siguiente repartición de cargas:

a)Carga sobre la barra (2): Otavallo

$$L_2 = 908 + 785 + 350 \times \frac{|(0.24 + 0.42) + j(0.18 + 0.32)|}{|1.38 + j0.87|} + 662 \times \frac{|0.42 + j0.32|}{|1.38 + j0.87|} = 908 + 785 + 177 + 214 = 2.084 \text{ Kw}$$

Nota: Los valores entre barras significan magnitud de los valores de impedancia.

b) Carga sobre la barra (1):Ibarra

$$L_1 = 2.400 + (350 - 177) + (662 - 214) = 2.400 + 173 + 448 = 3.021 \text{ Kw}$$

Los valores unitarios de estas cargas, en la base de 10.000 KVA son los siguientes:

$$L_1 = 0.302 \text{ P.U.}$$

$$L_2 = 0.209 \text{ P.U.}$$

III.4.2.c.- Voltajes en las barras de carga.-

La determinación de los voltajes en los bornes de las cargas equivalentes se efectuó en la sección III.4.1.c. del Estudio Nº 1.

Asumiremos que estos voltajes permanecen constantes en las diferentes condiciones que estamos estudiando, de manera que tendremos:

$$V_1 = 1.05 \text{ P.U.}$$

$$V_2 = 1.03 \text{ P.U.}$$

III.4.2.d.- Condiciones iniciales de operación.-

Para encontrar el ángulo relativo entre los voltajes V_1 y V_2 , aplicaremos las ecuaciones de transferencia de potencia entre las barras 1 y 2, y supondremos que:

$$V_1 = 1.05 \angle \delta_1$$

$$V_2 = 1.03 \angle 0^\circ \quad (\text{referencia})$$

Las ecuaciones de transferencia de potencia, en forma general, son las siguientes:

$$P_1 = V_1^2 Y_{11} \cos \theta_{11} + V_1 V_2 Y_{12} \cos(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) \quad (1)$$

$$P_2 = V_2^2 Y_{22} \cos \theta_{22} + V_2 V_1 Y_{21} \cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) \quad (2)$$

Puesto que $\theta_{12} = \theta_{21}$, y $\delta_2 = 0$, las ecuaciones precedentes pueden ser escritas en la forma siguiente:

$$P_1 = V_1^2 Y_{11} \cos \theta_{11} + V_1 V_2 Y_{12} \cos (\theta_{12} - \delta_1) \quad (3)$$

$$P_2 = V_2^2 Y_{22} \cos \theta_{22} + V_1 V_2 Y_{12} \cos (\theta_{12} + \delta_1) \quad (4)$$

En el diagrama de la Figura 2, la impedancia entre las barras 1 y 2 es:

$$Z_{12} = \frac{(0.0338 + j0.0708 + j0.35)(1.38 + j0.87)}{(0.0338 + 1.38) + j(0.0708 + 0.35 + 0.87)} = 0.36 \angle 79.6^\circ$$

La correspondiente admitancia es:

$$Y_{12} = (1 / 0.36) \angle -79.6^\circ = 2.77 \angle -79.6^\circ$$

Así pues, las admitancias entre las barras 1 y 2 en el diagrama de la Figura 2, serán:

$$Y_{11} = 2.77 \angle -79.6$$

$$Y_{22} = 2.77 \angle -79.6$$

$$Y_{12} = -2.77 \angle -79.6 = 2.77 \angle 100.4$$

y las ecuaciones de transferencia de potencia las siguientes:

$$P_1 = (1.05)^2 \times 2.77 \cos(-79.6^\circ) + 1.05 \times 1.03 \times 2.77 \cos(100.4 - \delta_1) \quad (5)$$

$$P_2 = (1.03)^2 \times 2.77 \cos(-79.6^\circ) + 1.05 \times 1.03 \times 2.77 \cos(100.4 + \delta_1) \quad (6)$$

Puesto que las potencias de salida de cada una de las centrales (ver anexo Nº II.11) son

El Ambi	4.270 Kw
Ibarra	630 Kw
Otavalo	200 Kw

las potencias de entrada a cada una de las barras son:

Barra (1) : Ibarra 4.900 Kw = 0,490 P.U.

Barra (2) : Otavalo 200 Kw = 0,020 P.U.

Por lo tanto,

$$P_1 = 0,490 - 0,302 = 0,188 \text{ P.U.}$$

$$P_2 = 0,020 - 0,209 = -0,189 \text{ P.U.}$$

Con lo cual las ecuaciones (5) y (6) quedan en la forma:

$$0.188 = 0.55 + 3.00 \cos (100.4 - \delta_1) \quad (7)$$

$$-0.189 = 0.53 + 3.00 \cos (100.4 + \delta_1) \quad (8)$$

O en forma más simple,

$$-0.121 = \cos (100.4 - \delta_1) \quad (9)$$

$$-0.239 = \cos (100.4 + \delta_1) \quad (10)$$

Desarrollando el segundo miembro de las ecuaciones (9) y (10) tenemos:

$$-0.121 = \cos 100.4 \times \cos \delta_1 + \sin 100.4 \times \sin \delta_1 \quad (11)$$

$$-0.239 = \cos 100.4 \times \cos \delta_1 - \sin 100.4 \times \sin \delta_1 \quad (12)$$

Dividiendo la ecuación (11) por $\cos \delta_1$, tenemos:

$$-0.121 \sec \delta_1 = \cos 100.4 + \sin 100.4 \operatorname{tg} \delta_1, \text{ o,}$$

$$\sqrt{\operatorname{tg}^2 \delta_1 + 1} = 1.4 - 7.66 \operatorname{tg} \delta_1$$

y elevando ambos miembros al cuadrado:

$$\operatorname{tg}^2 \delta_1 + 1 = 1.95 - 2.14 \operatorname{tg} \delta_1 + 58.5 \operatorname{tg}^2 \delta_1$$

$$-57.5 \operatorname{tg}^2 \delta_1 + 2.14 \operatorname{tg} \delta_1 - 0.95 = 0$$

$$\operatorname{tg}^2 \delta_1 - 0.372 \operatorname{tg} \delta_1 + 0.0165 = 0 \quad (13)$$

La solución de la ecuación (13) será:

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{0.372 \pm \sqrt{(0.372)^2 - 4 \times 0.0165}}{2}$$

y por lo tanto:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_1 &= 0.313 & ; & & \delta_1 &= 17.4^\circ \\ \operatorname{tg}' \delta_1 &= 0.0535 & ; & & \delta_1' &= 3.06^\circ \end{aligned}$$

Dividamos ahora la ecuación (12) por $\cos \delta_1$:

$$\begin{aligned} -0.239 \operatorname{se} c \delta_1 &= \cos 100.4 - \operatorname{sen} 100.4 \operatorname{tg} \delta_1 \\ -0.239 \operatorname{sec} \delta_1 &= -0.18 - 0.98 \operatorname{tg} \delta_1 \\ \sqrt{\operatorname{tg}^2 \delta_1 + 1} &= 0.775 + 4.23 \operatorname{tg} \delta_1 \end{aligned}$$

Si elevamos ambos miembros al cuadrado y reducimos términos semejantes, tenemos la siguiente ecuación:

$$\operatorname{tg}^2 \delta_1 + 0.387 \operatorname{tg} \delta_1 - 0.024 = 0 \quad (14)$$

cuya solución es:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_1 &= 0.0535 & ; & & \delta_1 &= 3.06^\circ \\ \operatorname{tg}' \delta_1 &= -0.440 & ; & & \delta_1' &= -23.8^\circ \end{aligned}$$

Las ecuaciones (13) y (14) tienen, como era de esperarse, una --- raíz común, $\delta_1 = 3.06^\circ$, la cual, por el hecho de satisfacer ambas ecuaciones, es la que nos interesa.

Así, las condiciones iniciales en las barras de carga serán:

$$\begin{aligned} V_1 &= 1.05 \underline{/3.06^\circ} \\ V_2 &= 1.03 \underline{/0^\circ} \end{aligned}$$

La potencia entregada por la máquina D es 0.490 P.U. , y puesto que el voltaje en la barra 1 es $1.05 \underline{/3.06}$, la corriente será:

$$I_D = \frac{0.490 \underline{/ -36.8}}{0.8 \times 1.05 \underline{/ -3.06}} = 0.592 \underline{/ -33.74} = 0.492 - j0.329$$

y por lo tanto el voltaje interno de la máquina D será:

$$\begin{aligned} E_D &= 1.05 \angle 3.06 + 0.592 \angle -33.74 \times 0.36 \angle 90 = \\ &= 1.05 + j0.056 + 0.118 + j0.176 = 1.17 + j0.23 = 1.20 \angle 11.2^\circ \end{aligned}$$

En igual forma, la corriente de la máquina B será:

$$I_B = \frac{0.02 \angle -36.8}{0.8 \times 1.03} = 0.024 \angle -36.8 = 0.019 - j0.014$$

y el voltaje interno:

$$\begin{aligned} E_B &= 1.03 + (0.019 - j0.014) \times j4.24 = 1.09 + j0.08 \\ E_B &= 1.10 \angle 4.2^\circ \end{aligned}$$

Las condiciones iniciales en las barras son pues:

$$\begin{aligned} E_D &= 1.20 \text{ P.U.} & \delta_D &= 11.2^\circ \\ E_B &= 1.10 \text{ P.U.} & \delta_B &= 4.2^\circ \\ & & \delta_{DB} &= 7.0^\circ \end{aligned}$$

III.4.2.e.- Determinación del tipo de oscilación.-

Las localizaciones de

falla marcadas en la Figura 2 con los números 5 y 10 tienen la misma ubicación que las denominadas 3 y 5 en el Estudio Nº 1; y las 6 y 7 son exactamente las mismas que en dicho estudio. Y puesto que la máquina D es el resultado de la agrupación de las máquinas A y C, de las cuales C es de muy baja potencia en relación con A, podemos concluir que se cumplirán las mismas condiciones de oscilación, respectivamente, que en el Estudio Nº 1, y por lo tanto serán válidas para el Estudio Nº 2 las con-

sideraciones que se hicieron en el N° 1 en relación al método a utilizarse para estudiar la estabilidad con cada falla.

Así, para las fallas 5 y 10, consideraremos que las máquinas D y B oscilan sobre una barra infinita (la barra 1) de voltaje 1.05 P.U. ; y para las fallas 6 y 7 , consideraremos un sistema de dos máquinas finitas oscilando la una sobre la otra, para encontrar luego un sistema equivalente máquina finita-barra infinita.

III.4.2.f.- Reducción de la red.-

1.- FALLA EN LA LOCALIZACION N° 5 :

De acuerdo al esquema de la Figura

2 y a las consideraciones de la sección anterior, tenemos:

a) Antes de la falla

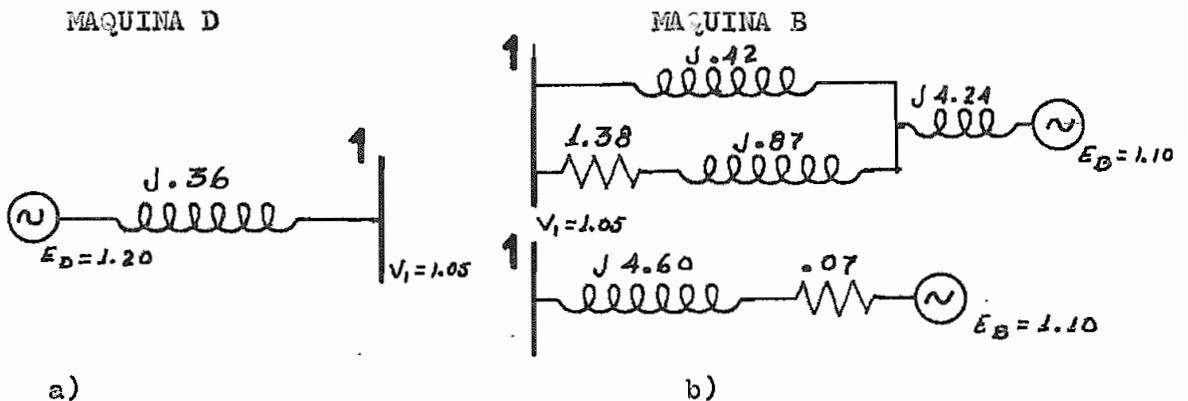


Figura 4

b) Durante la Falla

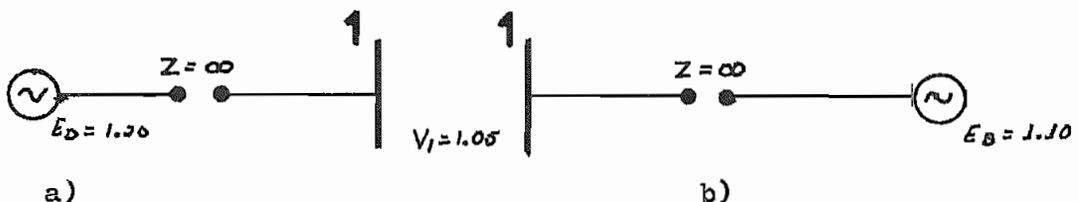


Figura 5

c) Después de la Falla:

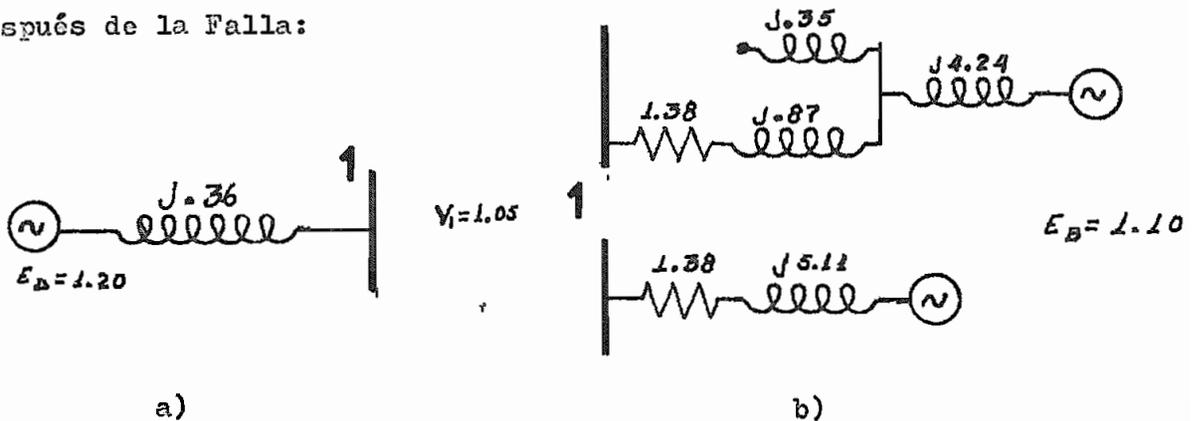


Figura 6

2.- FALLA EN LA LOCALIZACION No 6 :

En primer lugar deberemos calcular

la impedancia de las cargas L_1 y L_2 , como sigue:

$$Z_{L_1} = \frac{V_1^2}{P_1 - jQ_1} = \frac{(1.05)^2}{0.302 - j0.266} = 2.15 + j1.62$$

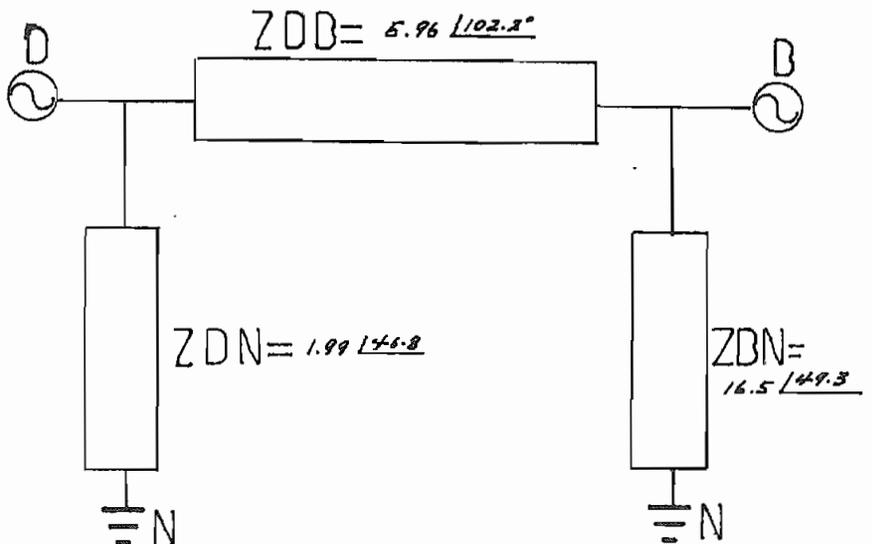
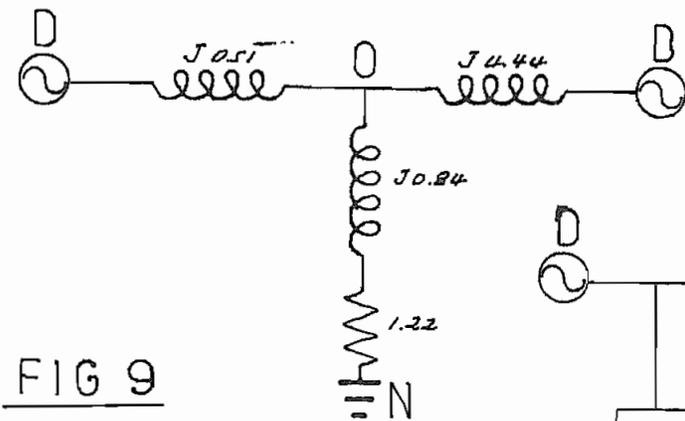
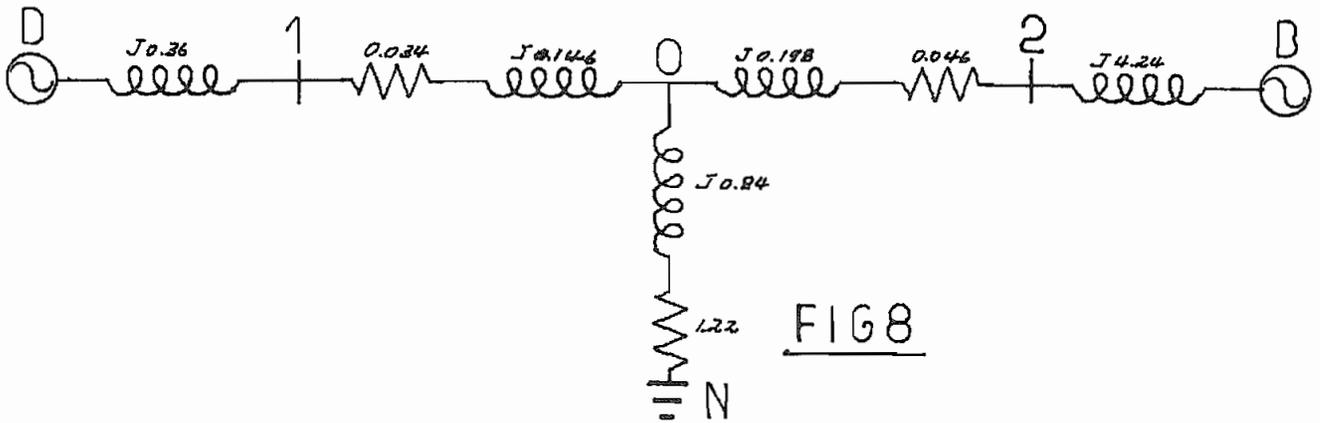
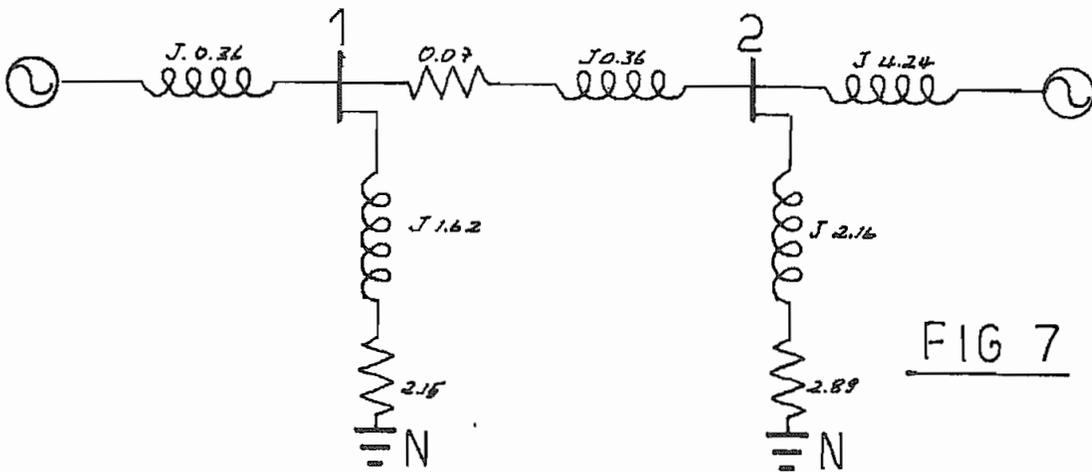
$$Z_{L_2} = \frac{V_2^2}{P_2 - jQ_2} = \frac{(1.03)^2}{0.209 - j0.157} = 2.89 + j2.16$$

De esta forma, el diagrama de impedancias, antes de producirse la falla, será el de la Figura 7, en el que la impedancia entre las --- barras 1 y 2 será

$$Z_{12} = \frac{(1.38 + j0.87) \times j0.42}{1.38 + j(0.87 + 0.42)} = 0.07 + j0.36$$

Una transformación $\Delta - Y$ en esta figura nos lleva a los diagramas de las figuras 8 y 9.

Las impedancias de la Y equivalente de la Figura 8 son:



$$Z_{o1} = \frac{(2.15 + j1.62)(0.07 + j0.36)}{(2.15+0.07+2.89)+j(1.62+0.36+2.16)} = 0.034 + j0.146 =$$

$$= 0.152 \angle 76.8^\circ$$

$$Z_{o2} = \frac{(0.07 + j0.36)(2.89 + j2.16)}{5.11 + j4.14} = 0.046 + j0.198 =$$

$$= 0.203 \angle 76.8^\circ$$

$$Z_{oN} = \frac{(2.15 + j1.62)(2.89 + j2.16)}{5.11 + j4.14} = 1.22 + j0.84 =$$

$$= 1.48 \angle 34.6^\circ$$

En la Figura 9 se han agrupado los elementos en serie de la figura 8, despreciándose aquellas resistencias relativamente muy pequeñas:

$$Z_{oD} = 0.034 + j(0.146 + 0.36) = 0.034 + j0.51 = j0.51$$

$$Z_{oB} = 0.046 + j(0.198 + 4.24) = 0.046 + j4.44 = j4.44$$

Una nueva transformación Y- Δ en el diagrama de la Figura 9 da lugar al de la Figura 10, en el cual:

$$Z_{DN} = \frac{(1.22 + j0.84) j0.51}{j4.44} + 1.22 + j0.84 + j0.51 = 1.36 + j1.45 =$$

$$= 1.99 \angle 46.8^\circ$$

$$Z_{BN} = \frac{(1.22 + j0.84) j4.44}{j0.51} + j4.44 + 1.22 + j0.84 =$$

$$= 11.82 + j12.60 = 16.50 \angle 49.3^\circ$$

$$Z_{DB} = \frac{j0.51 \times j4.44}{1.22 + j0.84} + j0.51 + j4.44 = -1.26 + j5.82 =$$

$$= 5.96 \angle 102.2^\circ$$

Las correspondientes admitancias de punto motriz y de transferencia de la red son:

$$Y_{DD} = \frac{1}{1.36 + j1.45} + \frac{1}{-1.26 + j5.82} = 0.31 - j0.53 = 0.615 / -59.6$$

$$Y_{BB} = \frac{1}{11.82 + j12.60} + \frac{1}{-1.26 + j5.82} = 0.004 - j0.21 = 0.21 / -90$$

$$Y_{DB} = \frac{-1}{5.96 / 102.2} = 0.168 / -102.2 = 0.168 / 77.8$$

Durante la falla la red tomará la configuración de la Figura 11. Después de la agrupación de las ramas en paralelo, el diagrama se muestra en la Figura 12, en la cual:

$$Z_{1N} = \frac{(0.034 + j0.070)(2.15 + j1.62)}{(2.15 + 0.034) + j(0.07 + 1.62)} = 0.034 + j0.068 = 0.076 / 63.20^\circ$$

$$Z_{2N} = \frac{(2.89 + j2.16) \times j0.35}{2.89 + j(2.16 + 0.35)} = j0.33$$

Una transformación $\Delta - Y$ en el diagrama de la Figura 12, y la posterior agrupación de los elementos en serie, da como resultado el diagrama de la Figura 13, en el cual:

$$Z_{OD} = j0.36 + \frac{(1.38 + j0.87)(0.034 + j0.068)}{(0.034 + 1.38) + j(0.068 + 0.87 + 0.33)} = j0.41$$

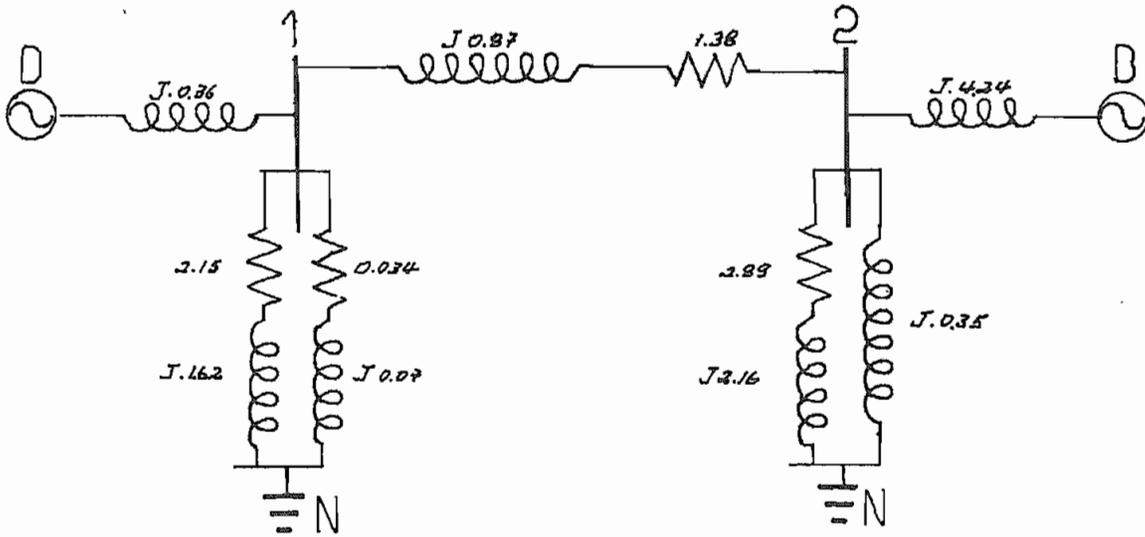


FIG 11

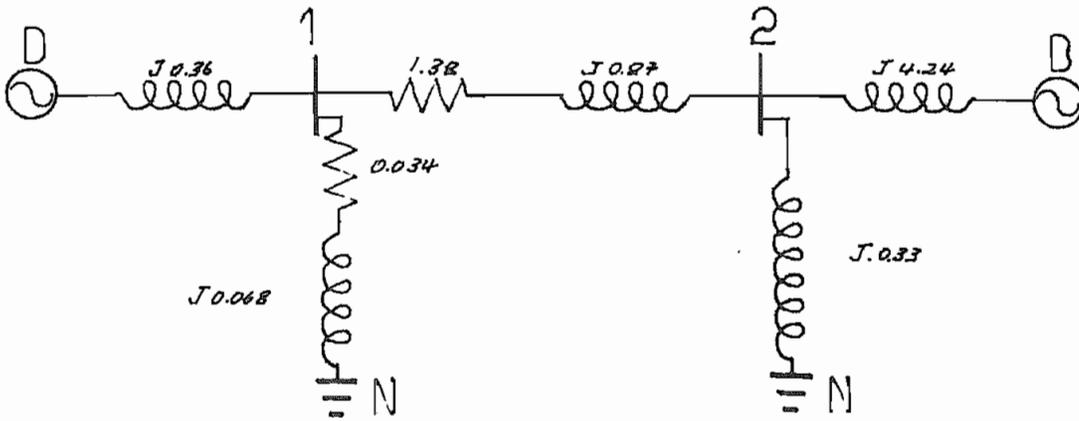


FIG 12

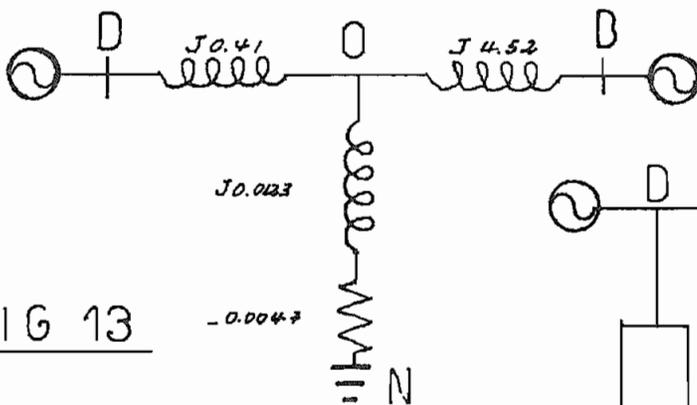


FIG 13

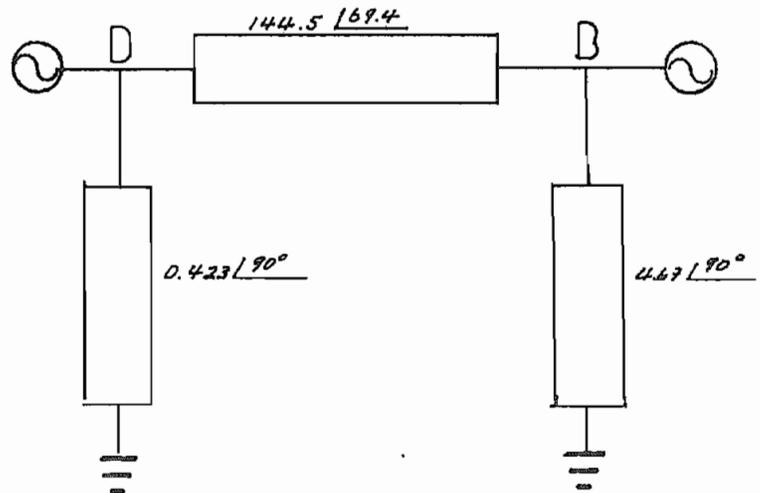


FIG 14

$$Z_{OB} = j4.24 + \frac{(1.38 + j0.87)(j0.33)}{1.414 + j1.268} = j4.52$$

$$Z_{ON} = \frac{(0.034 + j0.068)(j0.33)}{1.414 + j1.268} = -0.0047 + j0.0213 = 0.013 \angle 111.2$$

Y por medio de una nueva transformación Y - Δ llegamos al diagrama de la Figura 14, en el cual:

$$Z_{DN} = \frac{0.013 \angle 111.2 \times 0.41 \angle 90}{4.52 \angle 90} = 0.047 + j0.0123 + j0.41 =$$

$$= j0.423$$

$$Z_{BN} = \frac{(0.013 \angle 111.2 \times 4.52 \angle 90)}{0.41 \angle 90} = 0.0047 + j0.0123 + j4.52 =$$

$$= j4.67$$

$$Z_{DB} = \frac{0.41 \angle 90 \times 4.52 \angle 90}{0.013 \angle 111.2} + j0.41 + j4.52 =$$

$$= 50.7 + j135.0 = 144.5 \angle 69.4$$

Las admitancias de punto motriz y de transferencia de la red serán las siguientes:

$$Y_{DD} = \frac{1}{0.423 \angle 90} + \frac{1}{144.5 \angle 69.4} = -j2.37$$

$$Y_{BB} = \frac{1}{4.67 \angle 90} + \frac{1}{144.5 \angle 69.4} = -j0.22$$

$$Y_{DB} = \frac{-1}{144.5 \angle 69.4} = -0.007 \angle -69.4 = 0.007 \angle 110.6$$

Después de despejada la falla, la red de la Figura 2 toma la forma mostrada en la Figura 15 , que luego de una transformación $\Delta - Y$ y la agrupación de los elementos en serie, se transforma según se muestra en la Figura 16 , en la cual:

$$\begin{aligned} Z_{OD} &= j0.36 + \frac{1.64/32.2 \times 2.70/36.8}{(2.15+1.38+2.89)+j(1.62+0.87+2.16)} = \\ &= j0.36 + \frac{1.64/32.2 \times 2.70/36.8}{7.96/35.9} = 0.46+j0.66 \approx 0.8/55.2 \end{aligned}$$

$$Z_{OB} = j4.24 + \frac{1.64/32.2 \times 3.61/36.8}{7.96/35.9} = 0.62+j4.66 = 4.7/82.4$$

$$Z_{ON} = \frac{2.70/36.8 \times 3.61/36.8}{7.96/35.9} = 0.97 + j0.75 = 1.22/37.7$$

En el diagrama de la Figura 16 una transformación $Y - \Delta$ da lugar al de la Figura 17 , en el cual:

$$\begin{aligned} Z_{DN} &= \frac{0.80/55.2 \times 1.22/37.7}{4.70/82.4} + 0.97 + j0.75 + 0.46 + j0.66 = \\ &= 1.65 + j1.45 = 2.20 / 41.3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{BN} &= \frac{4.70/82.4 \times 1.22/37.7}{0.80/55.2} + 0.97 + j0.75 + 0.62 + j4.66 \approx \\ &= 4.64 + j11.91 = 12.70 / 68.6 \end{aligned}$$

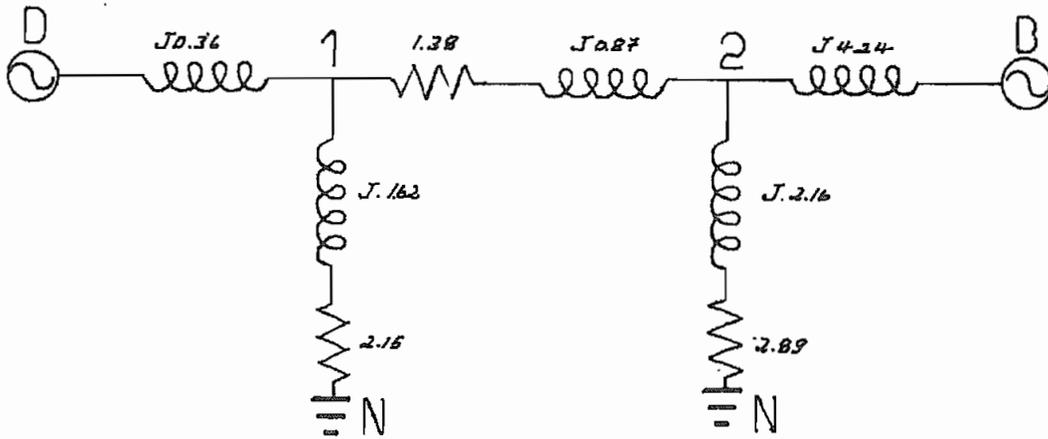


FIG 15

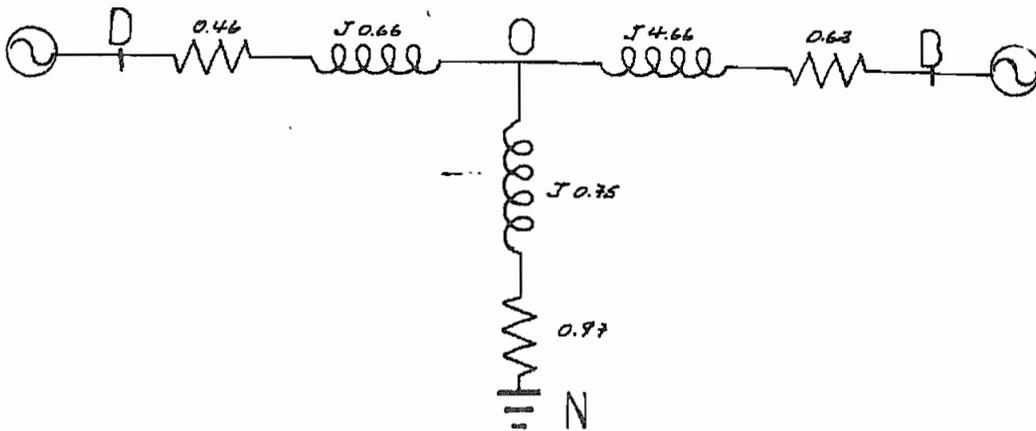


FIG 16

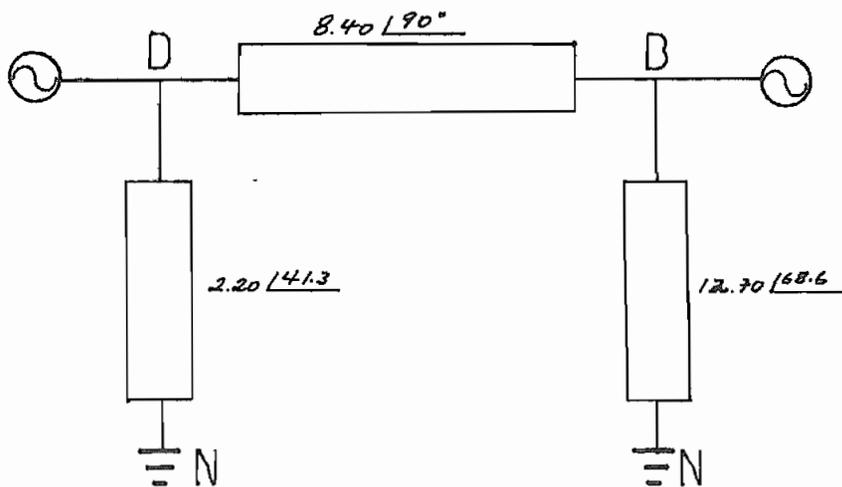


FIG 17

$$\begin{aligned} Z_{DB} &= \frac{0.80/55.2 \times 4.70/82.4}{1.22/37.7} + 0.46 + j0.66 + 0.62 + j4.66 = \\ &= 0.55 + j8.36 = 8.40 \angle 90 \end{aligned}$$

Las correspondientes admitancias de punto motriz y de transferencia de la red son:

$$\begin{aligned} Y_{DD} &= \frac{1}{2.20} \angle -41.3 + \frac{1}{8.40} \angle -90 = \\ &= 0.34 - j0.42 = 0.54 \angle -51.0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{BB} &= \frac{1}{12.70} \angle -68.6 + \frac{1}{8.40} \angle -90 = \\ &= 0.029 - j0.192 = 0.195 \angle -81.4 \end{aligned}$$

$$Y_{DB} = - \frac{1}{8.40} \angle -90 = -0.119 \angle -90 = 0.119 \angle 90$$

3.- FALLA EN LA LOCALIZACION N° 7 :

Antes de producirse la falla, las condiciones son exactamente las mismas que las correspondientes a la falla en la localización N° 6; de esta forma, el diagrama de la red para antes de la falla será el de la figura 10 . Y puesto que mientras esté presente la falla en la localización N° 7 se bloquea el flujo de potencia entre las máquinas D y B, la magnitud de la impedancia de

transferencia entre ambas será infinita.

Una vez despejada la falla, la red toma la configuración de la Figura 18, que por medio de una transformación Δ -Y y la agrupación de los elementos en serie, se transforma en el diagrama de la Figura 19, en el cual:

$$\begin{aligned} Z_{OD} &= j0.36 + \frac{2.70 \angle 36.8 \times 0.42 \angle 90}{(2.15+2.89) + j(1.62+0.42+2.16)} = \\ &= j0.36 + \frac{2.70 \angle 36.8 \times 0.42 \angle 90}{6.57 \angle 39.7} = j0.53 \end{aligned}$$

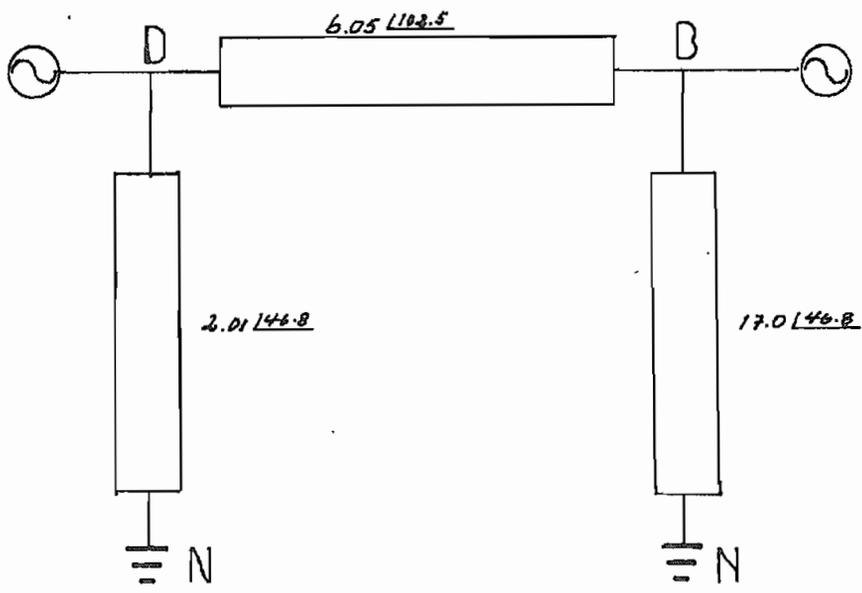
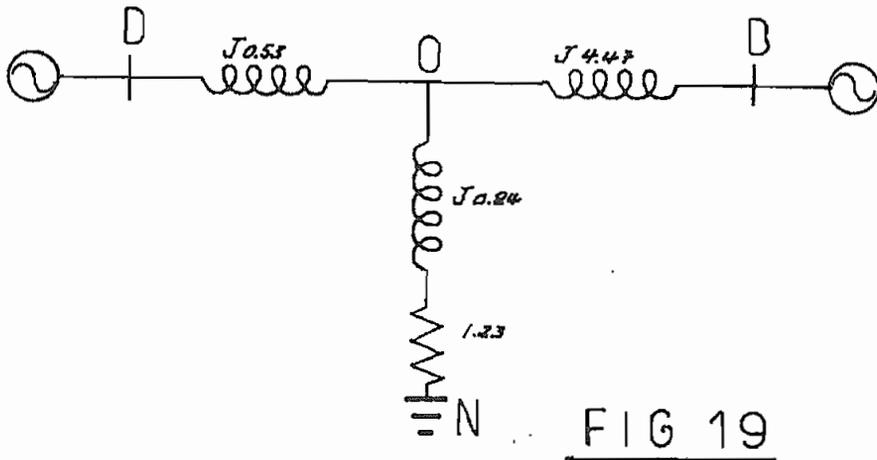
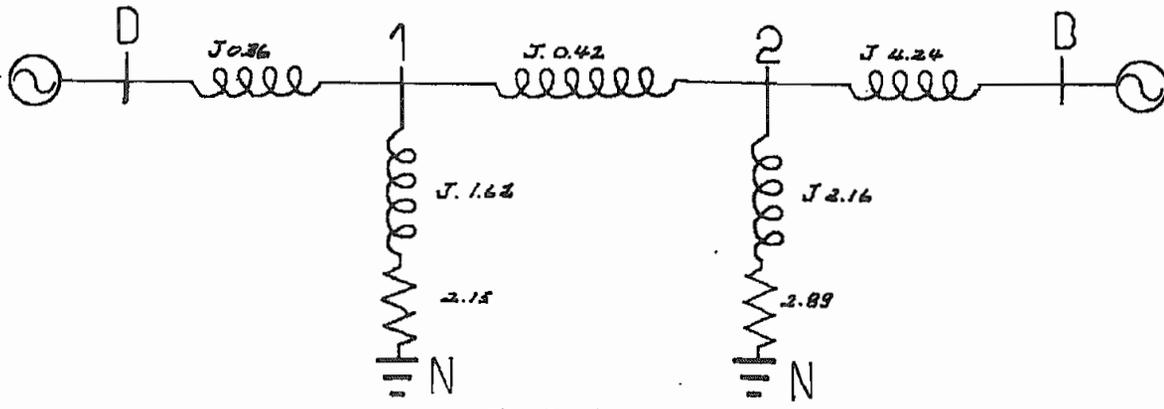
$$Z_{OB} = j4.24 + \frac{3.61 \angle 36.8 \times 0.42 \angle 90}{6.57 \angle 39.7} = j4.47$$

$$Z_{ON} = \frac{2.70 \angle 36.8 \times 3.61 \angle 36.8}{6.57 \angle 39.7} = 1.49 \angle 34.5 = 1.23 + j0.84$$

Una transformación Y - Δ en el diagrama de la Figura 19 da como resultado el de la Figura 20, en el que los valores de impedancia son los siguientes:

$$\begin{aligned} Z_{DN} &= \frac{1.49 \angle 34.5 \times 0.53 \angle 90}{4.47 \angle 90} + 1.23 + j0.84 + j0.53 = \\ &= 1.38 + j1.47 = 2.01 \angle 46.8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{BN} &= \frac{(1.23+j0.84) \times j4.47}{j0.53} + 1.23 + j0.84 + j4.47 = \\ &= 11.63 + j12.41 = 17.0 \angle 46.8 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} Z_{DB} &= \frac{j0.53 \times j4.47}{1.49 \angle 34.5} + j0.53 + j4.47 = \\ &= -1.31 + j5.90 = 6.05 \angle 102.5 \end{aligned}$$

Las correspondientes admitancias de punto motriz y de transferencia son las siguientes:

$$\begin{aligned} Y_{DD} &= \frac{1}{2.01} \angle -46.8 + \frac{1}{6.05} \angle -102.5 = \\ &= 0.31 - j0.53 = 0.62 \angle -59.6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{BB} &= \frac{1}{17.0} \angle -46.8 + \frac{1}{6.05} \angle -102.5 = \\ &= 0.004 - j0.20 = -j0.20 = 0.20 \angle -90 \end{aligned}$$

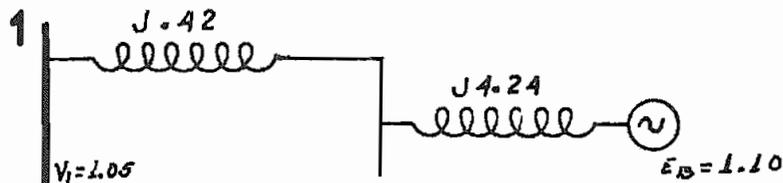
$$Y_{DB} = - \frac{1}{6.05} \angle -102.5 = -0.165 \angle -102.5 = 0.165 \angle 77.5$$

4.- FALLA EN LA LOCALIZACION Nº 10 .-

Como ya se explicó en la sección anterior, una falla en esta localización es eléctricamente igual a una en el punto Nº 5 .Por tal razón, para la máquina D los diagramas para antes, durante y después de la falla son, respectivamente, los de las Figuras 4.a , 5.a , y 6.a ; y para la máquina B los diagramas para antes y durante la falla serán los de las figuras 4.b y 5.b , respectivamente.

Una vez despejada la falla, la red asociada a la máquina B to-

mará la forma mostrada en la Figura 21



$$Z_{1B} = j0.42 + j4.24 = j4.66$$

FIGURA 21

111.4.2.g.- Curvas del Límite de Estabilidad.-

Para el cálculo de estas curvas consideraremos , como se explica en la sección 111.4.2.e. , que con la falla en los puntos 5 y 10 las máquinas D y B oscilan sobre una barra infinita de voltaje 1.05 P.U. ; y para las fallas 6 y 7 consideraremos un sistema de dos máquinas finitas oscilando entre si,el cual será transformado a un sistema equivalente máquina finita-barra infinita.

1.- FALLA EN LA LOCALIZACION No 5 .-

Los diagramas de impedancias para las máquinas D y B antes,durante y después de la falla son,respectivamente,los de las figuras 4,5 y 6.

Las correspondientes curvas P - δ son las siguientes:

MAQUINA D

MAQUINA B

a)Antes de la falla:

$$P = (1.20 \times 1.05 / 0.36) \text{sen } \delta = 3.50 \text{ sen } \delta$$

$$P = (1.10 \times 1.05 / 4.60) \text{sen } \delta = 0.292 \text{ sen } \delta$$

b) Durante la falla:

$$P = 0$$

$$P = 0$$

c) Después de la falla:

$$P = (1.20 \times 1.05 / 0.36) \text{sen } \delta = \\ = 3.50 \text{ sen } \delta$$

$$P = (1.110 \times 1.05 / 5.11) \text{sen } \delta = \\ = 0.262 \text{ sen } \delta$$

Las curvas $P-\delta$ se muestran en el gráfico del Anexo Nº 111.-13.

Para ambas máquinas, el límite de estabilidad con falla sostenida será cero, ya que la amplitud de la curva de potencia en esta condición es cero.

Para la máquina D el límite de estabilidad con despeje instantáneo será igual a la máxima amplitud de la curva de potencia, esto es, 3.50 P.U. , ya que la curva $P-\delta$ para antes y después de la falla es la misma.

Para la máquina B se ha determinado gráficamente en la figura del Anexo Nº 111.-13 el límite de estabilidad con despeje instantáneo, el cual resulta ser 0.25 P.U.

En los cuadros 111.8 y 111.9 se han calculado las curvas del límite de estabilidad transitoria en función del ángulo de despeje δ_c , utilizando el método descrito en las páginas 89 y 90, y la escala de ángulo transformada a escala de tiempo usando el método descrito en las páginas 97 y 98.

Para hacer esta transformación se tiene lo siguiente:

$$M_D = \frac{G_A \cdot H_A + G_C \cdot H_C}{180 f} = \frac{10 \times 1.5 + 0.62 \times 1.61}{180 \times 60} = 1.48 \times 10^{-3}$$

$$\sqrt{2M_D} = \sqrt{2 \times 1.48 \times 10^{-3}} = 0.0545$$
$$r_1 = 0 ; r_2 = 1$$

Máquina B:

$$\sqrt{2M_B} = \sqrt{2 \times 0.154 \times 10^{-3}} = 0.0176$$
$$r_1 = 0 ; r_2 = 0.262/0.292 = 0.90$$

Las curvas del límite de estabilidad transitoria se han dibujado en los anexos III.-14a y III.-14b ,para las máquinas D y B respectivamente.

2.- FALLA EN LA LOCALIZACION No 6.-

Para este caso consideraremos un sistema de dos máquinas finitas conectadas entre sí a través de una red lineal. La red de interconexión para antes, durante y después de la falla es la de las figuras 10, 14 y 17 respectivamente.

Las correspondientes curvas $P - \delta$ para la máquina equivalente (en un sistema equivalente máquina finita-barra infinita) serán las siguientes:

a) Antes de la falla:

$$P_C = \frac{1.48 \times (1.10)^2 \times 0.004 - 0.154 \times (1.20)^2 \times 0.31}{0.154 + 1.48} = -0.036$$

$$P_M = \frac{1.20 \times 1.10 \times 0.168}{0.154 + 1.48} \sqrt{(1.48)^2 + (0.154)^2 - 2 \times 1.48 \times 0.154 \cos(2 \times 77.8)}$$

$$= 0.256$$

$$\gamma = -\tan^{-1} \left(\frac{1.48 + 0.154}{0.154 - 1.48} \times \tan 77.8 \right) - 90^\circ = -\tan(-5.7) - 90 =$$

$$= 80^\circ - 90^\circ = -10^\circ$$

La ecuación de la curva P - δ será pues:

$$P_u = -0.036 + 0.256 \sin(\delta + 10)$$

b) Durante la falla:

$$P_C = \frac{1.48 \times (1.10)^2 \times 0 - 0.154 \times (1.20)^2 \times 0}{0.154 + 1.48} = 0$$

$$P_M = \frac{1.20 \times 1.10 \times 0.007}{0.154 + 1.48} \sqrt{(0.154)^2 + (1.48)^2 - 2 \times 0.154 \times 1.48 \cos(2 \times 110.6)}$$

$$= 0.0106$$

$$\gamma = -\tan^{-1} \left(\frac{0.154 + 1.48}{0.154 - 1.48} \times \tan 110.6 \right) - 90^\circ = -(-107) - 90 = 17^\circ$$

Por lo tanto, la ecuación de la curva será:

$$P_u = 0.0106 \sin(\delta - 17)$$

c) Después de la falla:

$$P_C = \frac{1.48 \times (1.10)^2 \times 0.029 - 0.154 \times (1.20)^2 \times 0.34}{0.154 + 1.48} = -0.003$$

$$P_M = \frac{1.20 \times 1.10 \times 0.119}{0.154 + 1.48} \sqrt{(0.154)^2 + (1.48)^2 - 2 \times 0.154 \times 1.48 \cos(2 \times 90)} =$$

$$= 0.183$$

$$\delta' = -\tan^{-1} \left(\frac{0.154 + 1.48}{0.154 - 1.48} \tan 90 \right) - 90 = 0$$

y la curva de potencia será:

$$P_u = -0.003 + 0.183 \sin \delta$$

Las curvas $P - \delta$ para las tres condiciones han sido dibujadas en el Anexo N^o lll.-15, en el que se puede ver que la amplitud de la curva cuando la falla está presente es relativamente muy pequeña, por lo que se la podrá considerar como cero; y el desplazamiento en el eje P de la curva $P - \delta$ después de la falla es asimismo muy pequeño, por lo que se podrá considerar que dicha curva tiene su origen en el origen de coordenadas.

Bajo estas dos aproximaciones hemos desarrollado en el cuadro N^o lll.-10 un proceso para el cálculo de la curva del límite de estabilidad transitoria en función del ángulo crítico de despeje.

El proceso en cuestión es el siguiente:

a) Asumir un valor de P_i comprendido entre los valores máximo y mínimo del límite de estabilidad.

b) Calcular $\delta_o + \gamma'$ reemplazando el valor de P_i en la ecuación de la curva previa a la falla.

c) Calcular δ_o

d) Calcular δ_m reemplazando el valor de P_i en la ecuación de la curva que representa las condiciones después de la falla.

e) Calcular $\cos \delta_m$

f) Calcular $P_i(\delta_m - \delta_o)$ ----- (δ_m y δ_o en radianes)

g) Calcular el producto de la amplitud máxima de la curva --
P - δ después de la falla por $\cos \delta_m$ ($0.183 \cos \delta_m$)

h) Calcular $\cos \delta_c = \frac{P_i(\delta_m - \delta_o) + 0.183 \cos \delta_m}{0.183}$, y consecuentemente, δ_c .

La fórmula para el cálculo de $\cos \delta_c$ proviene de igualar las áreas A_1 y A_2 de la figura del Anexo Nº III.-15 :

$$P_i(\delta_c - \delta_o) = \int_{\delta_c}^{\delta_m} 0.183 \operatorname{sen} \delta d\delta - P_i(\delta_m - \delta_c)$$

$$P_i(\delta_m - \delta_o) = 0.183 \cos \delta_c - 0.183 \cos \delta_m$$

$$\cos \delta_c = \frac{P_i(\delta_m - \delta_o) + 0.183 \cos \delta_m}{0.183}$$

Es sin embargo necesario tener presente que esta fórmula es válida solo para el caso particular en que no haya desplazamiento - (sobre ninguno de los dos ejes) de la curva P - δ que representa las condiciones después de la falla, y en que la amplitud de la curva durante la falla sea cero.

En el mismo cuadro III.-10 ha sido transformada la escala de ángulo a escala de tiempos mediante el procedimiento ya utilizado en los casos anteriores. Para ello, la constante equivalente de inercia - de la combinación de las dos máquinas es:

$$M = \frac{M_D \times M_B}{M_D + M_B} = \frac{1.48 \times 0.154}{1.48 + 0.154} \times 10^{-3} = 0.14 \times 10^{-3} = 0.00014, y$$

$$\sqrt{2M} = \sqrt{2 \times 0.14 \times 10^{-3}} = 0.0167$$

La curva del límite de estabilidad transitoria obtenida con el procedimiento descrito se muestra en el anexo N^o III.-16.

3.- FALLA EN LA LOCALIZACIÓN N^o 7.-

Según se estableció previamente, las condiciones para antes de producida la falla son las mismas que en el caso de que ésta se produzca en la localización N^o 6 ; y durante la falla no puede haber transferencia de potencia , por lo que la amplitud de la curva será cero.

Después de la falla, el diagrama del sistema es el de la Figura 20, y la correspondiente curva $P - \delta$ será la siguiente:

$$P_C = \frac{1.48 \times (1.10)^2 \times 0.004 - 0.154 \times (1.20)^2 \times 0.31}{0.154 + 1.48} = -0.036$$

$$P_M = \frac{1.20 \times 1.10 \times 0.165}{0.154 + 1.48} \sqrt{(0.154)^2 + (1.48)^2 - 2 \times 0.154 \times 1.48 \cos(2 \times 77.5)} = 0.256$$

$$\gamma' = -\tan^{-1} \left(\frac{0.154 + 1.48}{0.154 - 1.48} \times \tan 77.5 \right) - 90 = -10$$

Así , las curvas $P - \delta$ serán las siguientes:

a) Antes de la Falla:

$$P_u = -0.036 + 0.256 \sin(\delta + 10)$$

b) Durante la Falla:

$$P_u = 0$$

c) Después de la Falla:

$$P_u = -0.036 + 0.256 \text{ sen}(\delta + 10)$$

Como puede verse, la curva es la misma antes y después de la falla, y por lo tanto, el valor máximo del límite de estabilidad --- (despeje instantáneo) será igual al valor máximo de P_u , esto es, -- $-0.036 + 0.256 = 0.22$ P.U.

Con falla sostenida, el valor del límite de estabilidad será cero, pues la amplitud de la curva $P - \delta$ durante la falla es nula.

La curva $P - \delta$ para antes y después de la falla se muestra en el Anexo Nº III.-17, en el cual ha sido también calculada en forma gráfica la curva del límite de estabilidad en función del ángulo crítico de despeje.

La abcisa de esta curva ha sido transformada a valores de -- tiempo como se detalla en el cuadro III.-11

4.- FALLA EN LA LOCALIZACION Nº 10.-

La falla en el punto 10 es eléctricamente igual a la ocurrida en el punto 5, con una pequeña variante en la red asociada a la máquina B después de la falla.

Así, para la máquina D la curva del límite de estabilidad para una falla en el punto Nº 10 es la misma del Anexo Nº III.-14.-a; y para la máquina B las ecuaciones de las curvas $P - \delta$ para antes y --durante la falla son, respectivamente:

CURVA DEL LIMITE DE ESTABILIDAD FALLA EN LA LOCALIZACION N° 7 MAQUINAS D Y B COMBINADAS

P_1	δ_o	δ_c	$\delta_c - \delta_o$	$\sqrt{\frac{\delta_c - \delta_o}{P_1}}$	t_c	(1)
0.22	80	80	0	0	0	0
0.20	57	61	4.0	4.48	0.075	0.075
0.18	47	54	7.0	6.24	0.104	0.104
0.16	40	54	14.0	9.36	0.156	0.156
0.14	33	57	24.0	13.08	0.218	0.218
0.12	27	62	35.0	17.00	0.284	0.284
0.10	22	70	48.0	21.95	0.365	0.365
0.08	17	80	63.0	28.00	0.467	0.467
0.06	12	92	80.0	36.50	0.610	0.610
0.04	7.5	108	98.5	49.60	0.830	0.830
0.02	3.0	125	122.0	78.20	1.305	1.305
0	-	-	-	-	-	∞

$$(1) \quad t_c = 0.0167 \sqrt{\frac{\delta_c - \delta_o}{P_1}}$$

$$P_u = 0.292 \text{ sen } \delta$$

$$P_u = 0$$

Después de despejada la falla la curva $P - \delta$ será:

$$P_u = \frac{1.10 \times 1.05}{4.66} \text{ sen } \delta = 0.288 \text{ sen } \delta$$

Las curvas correspondientes a la máquina B en las tres condiciones se han representado en las Figuras del Anexo Nº III.-19 , en el cual se ha calculado gráficamente el límite de estabilidad para despeje instantáneo, el cual resultó ser 0.285 P.U. .Con falla sostenida el límite de estabilidad es cero.

La curva del límite de estabilidad ha sido calculada en el cuadro Nº III.-12 y dibujada en el Anexo Nº III.-20.

Al hacer la aproximación de considerar como cero la impedancia que une las barras 1 y 3 de la Figura 1 , desaparecieron los puntos de falla 3 y 4 .Las fallas en estos puntos serán tratadas a continuación.

El método a seguirse será calcular las curvas de oscilación con falla sostenida para cada una de las máquinas del sistema de la Figura 1 .Si a base de estas curvas de oscilación se llega a determinar que el sistema es estable con falla sostenida, podremos concluir que no habrá ninguna limitación en el tiempo de despeje de las fallas Pero si por el contrario, una o más de las tres máquinas tiene una curva de oscilación que manifieste condiciones de inestabilidad, deberemos calcular una curva del límite de estabilidad para el sistema,

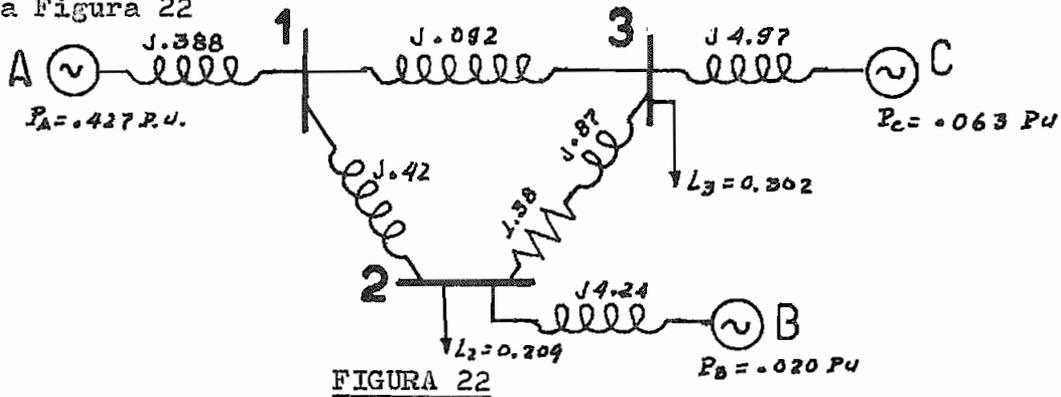
para lo cual agruparemos entre sí dos de las máquinas ; la determinación de qué máquinas deben agruparse en una sola se hará considerando la forma de las curvas de oscilación de cada máquina.

Para el cálculo de las curvas de oscilación utilizaremos el método de "punto por punto" (1), según el cual:

$$\Delta \delta_n = \Delta \delta_{n-1} + \frac{(\Delta t)^2}{M} P_{a(n-1)}$$

Para los cálculos utilizaremos intervalos de tiempo de 0.05 segundos ($\Delta t = 0.05$ seg.).

El diagrama del sistema, antes de producirse ninguna falla es el de la Figura 22



y si asumimos los mismos voltajes en barras del Estudio N° 1, tenemos:

$$\begin{aligned} V_1 &= 1.05 \angle \delta_1 \\ V_2 &= 1.03 \angle \delta_2 \\ V_3 &= 1.04 \angle 0 \quad (\text{Referencia}) \end{aligned}$$

y además:

$$Y_{11} = 13.23 \angle -90$$

$$Y_{12} = 2.38 \angle 90$$

$$Y_{22} = 2.76 \angle -79$$

$$Y_{13} = 10.85 \angle 90$$

$$Y_{33} = 11.20 \angle -87.3$$

$$Y_{23} = 0.61 \angle 148$$

Las potencias de entrada a las barras son las siguientes:

$$P_1 = 0.427 \text{ P.U.}$$

$$P_2 = 0.020 - 0.209 = -0.189 \text{ P.U.}$$

$$P_3 = 0.063 - 0.302 = -0.239 \text{ P.U.}$$

Y las ecuaciones de transferencia de potencia:

$$\begin{aligned} 0.427 = (1.05)^2 \times 13.23 \cos(-90) + 1.05 \times 1.03 \times 2.38 \cos(90 - \delta_1 + \delta_2) + \\ + 1.05 \times 1.04 \times 10.85 \cos(90 - \delta_1 + \delta_3) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} -0.189 = 1.03 \times 1.05 \times 2.38 \cos(90 - \delta_2 + \delta_1) + (1.03)^2 \times 2.76 \cos(-79) + \\ + 1.03 \times 1.04 \times 0.61 \cos(148 - \delta_2 + \delta_3) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} -0.239 = 1.04 \times 1.05 \times 10.85 \cos(90 - \delta_3 + \delta_1) + \\ + 1.04 \times 1.03 \times 0.61 \cos(148 - \delta_3 + \delta_2) + (1.04)^2 \times 11.2 \cos(-87.3) \end{aligned} \quad (17)$$

Y haciendo las operaciones indicadas y reemplazando el valor

$$\delta_3 = 0:$$

$$0.427 = 2.57 \sin(\delta_1 - \delta_2) + 11.85 \sin \delta_1 \quad (18)$$

$$-0.745 = -2.57 \sin(\delta_1 - \delta_2) + 0.66 \cos(148 - \delta_2) \quad (19)$$

$$-0.810 = -11.85 \sin \delta_1 + 0.66 \cos(148 + \delta_2) \quad (20)$$

Si sumamos las ecuaciones (18) y (19) tenemos:

$$-0.318 = 11.85 \operatorname{sen} \delta_1 + 0.66 \cos(148 - \delta_2) \quad (21)$$

y sumando la ecuación (21) con la (20) resulta:

$$-1.128 = 0.66 \cos(148 + \delta_2) + 0.66 \cos(148 - \delta_2) \quad (22)$$

Al desarrollar el segundo miembro de la ecuación (22) y simplificar términos semejantes se tiene:

$$-1.128 = 2 \times 0.66 \cos 148 \times \cos \delta_2, \text{ o}$$

$$\delta_2 = \cos^{-1} \frac{-1.128}{2 \times 0.66 \times \cos(148)} = 0^\circ$$

Reemplazando este valor en la ecuación (18) tenemos:

$$0.427 = (2.57 + 11.85) \operatorname{sen} \delta_1, \text{ o}$$

$$\delta_1 = \operatorname{sen}^{-1} \frac{0.427}{14.42} = 1.7^\circ$$

Así, las condiciones iniciales en las barras serán:

$$V_1 = 1.05 \angle 1.7 = 1.05 + j0.031$$

$$V_2 = 1.03 \angle 0 = 1.03 + j0$$

$$V_3 = 1.04 \angle 0 = 1.04 + j0$$

Los voltajes internos de las máquinas serán en consecuencia los siguientes:

$$\begin{aligned} V_A &= 1.05 + j0.031 + \frac{0.427}{1.05 \times 0.8} \angle -36.8 + 1.7 + 0.388 \angle 90 = \\ &= 1.163 + j0.192 = 1.18 \angle 9.4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_B &= 1.03 + j0 + \frac{0.020}{1.03 \times 0.8} \angle -36.8 \times 4.24 \angle 90 = \\ &= 1.091 + j0.082 = 1.092 \angle 4.3 \end{aligned}$$

$$V_C = 1.04 + j0 + \frac{0.063}{1.04 \times 0.8} \angle -36.8 \times 4.97 \angle 90 =$$

$$= 1.266 + j0.297 = 1.30 \angle 13.2$$

Con una falla en el punto 3, y considerando la impedancia de las cargas, el diagrama del sistema toma la forma del de la Figura -- 23, el cual una vez agrupados los elementos en paralelo se transforma en el de la Figura 24.

Los cálculos para la reducción de los elementos en paralelo son los siguientes:

$$Z_{13} = \frac{(2.15 + j1.62) \times j0.092}{2.15 + j(1.62 + 0.092)} = 0.090 \angle 88.5 = j0.09$$

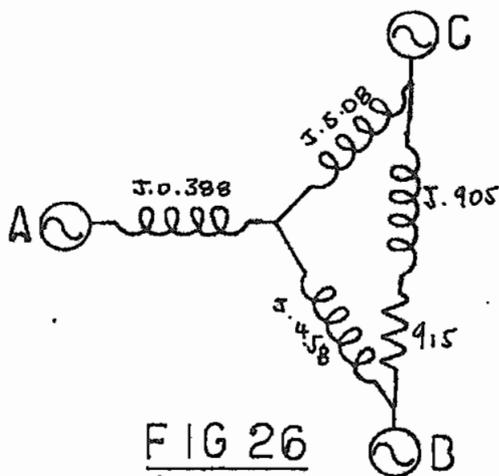
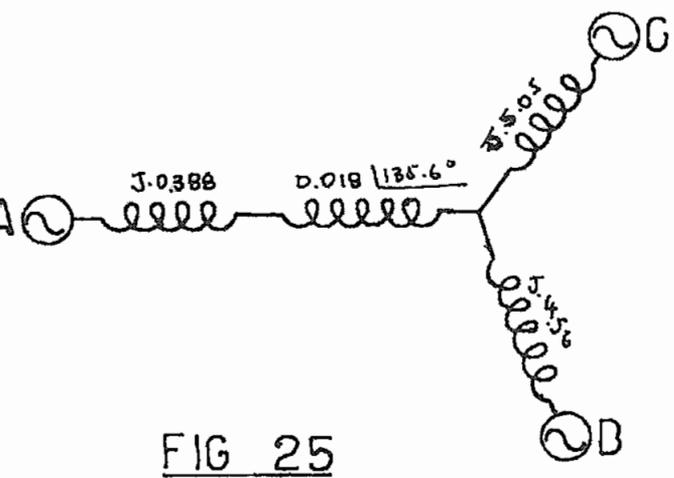
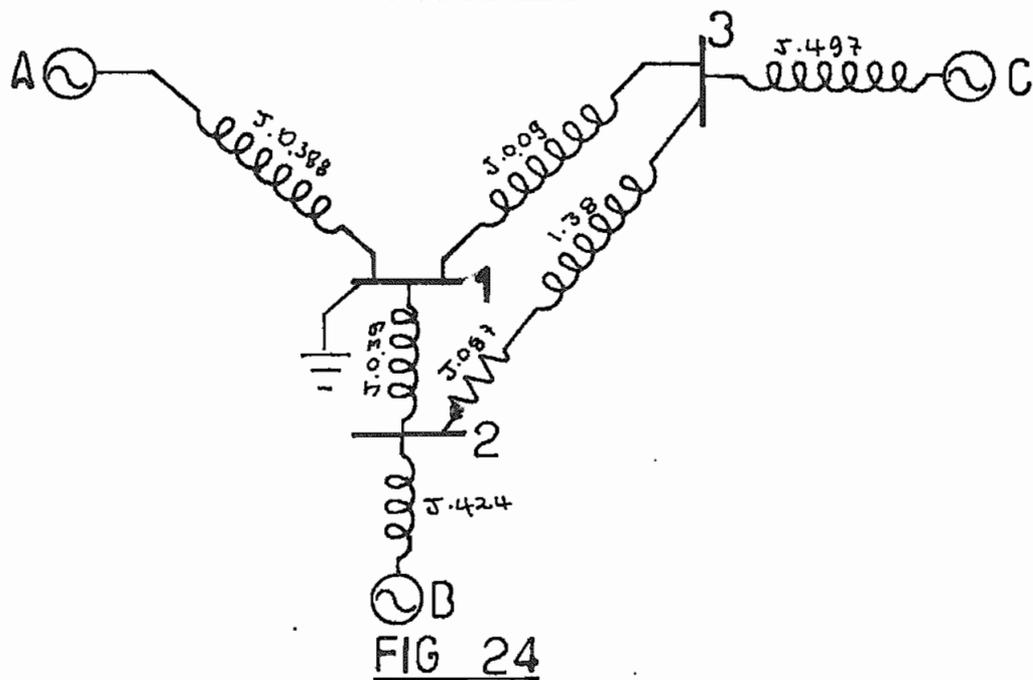
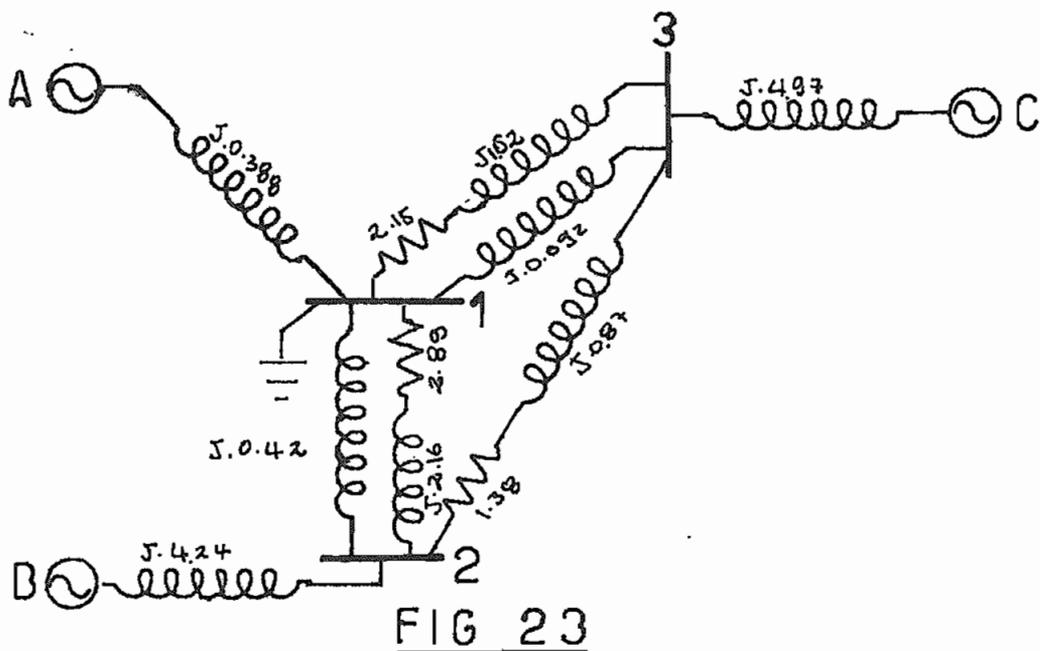
$$Z_{12} = \frac{(2.89 + j2.16) \times j0.42}{2.89 + j(2.16 + 0.42)} = 0.392 \angle 85.3 = j0.39$$

Una transformación $\Delta - Y$ entre los puntos 0, 2 y 3 del diagrama de la Figura 24 y la agrupación de los elementos conectados en serie da lugar al diagrama de la Figura 25, en el cual:

$$Z_{00'} = \frac{j0.09 \times j0.39}{1.38 + j(0.09 + 0.39 + 0.87)} = 0.018 \angle 135.6 = -0.013 + j0.0127$$

$$Z_{0'C} = j4.97 + \frac{(1.38 + j0.87) \times j0.09}{1.93 \angle 44.4} = j5.05$$

$$Z_{0'B} = j4.24 + \frac{(1.38 + j0.87) \times j0.39}{1.93 \angle 44.4} = j4.56$$



Ahora una transformación Y - Δ entre los puntos O,B,C del diagrama de la Figura 25 da lugar al de la Figura 26 , en el cual:

$$Z_{OC} = \frac{0.018/\underline{135.6} \times 5.05/\underline{90}}{4.56/\underline{90}} = 0.013 + j0.0127 + j5.05 =$$

$$= -0.0269 + j5.08 = j5.08$$

$$Z_{OB} = \frac{0.018/\underline{135.6} \times j4.56}{j5.05} = 0.013 + j0.0127 + j4.56 =$$

$$= -0.0246 + j4.58 = j4.58$$

$$Z_{BC} = \frac{j4.56 \times j5.05}{0.018/\underline{135.6}} + j4.56 + j5.05 =$$

$$= 915.0 + j905.0 = 1,290.0 \underline{/44.6}$$

Las admitancias de punto matriz y de transferencia de cada máquina serán las siguientes:

$$Y_{AA} = 1/j0.388 = -j2.57 = 2.57 \underline{/ -90}$$

$$Y_{AC} = 1/\infty = 0$$

$$Y_{AB} = 1/\infty = 0$$

$$Y_{BB} = \frac{1}{j4.58} + \frac{1}{1,290/\underline{44.6}} = -j0.218 = 0.218 \underline{/ -90}$$

$$Y_{BA} = 1 / \infty = 0$$

$$Y_{BC} = - \frac{1}{1,290/\underline{44.6}} = -0.00078 \underline{/ -44.6} = 0.00078 \underline{/135.4}$$

$$Y_{CC} = \frac{1}{j5.08} + \frac{1}{1,290/\underline{44.6}} = 0.197 \underline{-90}$$

$$Y_{CA} = 1 / \infty = 0$$

$$Y_{CB} = - \frac{1}{1,290/44.6} = -0.00078/\underline{-44.6} = 0.00078/\underline{135.4}$$

En consecuencia, las ecuaciones de transferencia de potencia mientras la falla está presente, serán las siguientes:

$$P_{uA} = (1.18)^2 \times 2.57 \cos(-90) + 1.18 \times 1.09 \times 0 + 1.18 \times 1.30 \times 0 = 0$$

$$P_{uA} = 0$$

$$P_{uB} = 1.09 \times 1.18 \times 0 + 1.09^2 \times 0.218 \cos(-90) + 1.09 \times 1.30 \times 0.00078 \cos(135.4 - \delta_B + \delta_C)$$

$$P_{uB} = 0.0011 \cos(135.4 - \delta_B + \delta_C)$$

$$P_{uC} = 1.30 \times 1.18 \times 0 + 1.30 \times 1.09 \times 0.00078 \cos(135.4 - \delta_C + \delta_B) + (1.30)^2 \times 0.197 \cos(-90)$$

$$P_{uC} = 0.0011 \cos(135.4 - \delta_C + \delta_B)$$

Para la aplicación del método de "punto por punto" en la determinación de las curvas de oscilación deberemos calcular previamente la relación $(\Delta t)^2/M$ para cada máquina, que será, si tomamos intervalos de 0.05 seg., las siguientes:

$$(\Delta t)^2/M_A = (0.05)^2/1.39 \times 10^{-3} = 1.80$$

$$(\Delta t)^2/M_B = (0.05)^2/0.154 \times 10^{-3} = 16.25$$

$$(\Delta t)^2/M_C = (0.05)^2/0.092 \times 10^{-3} = 27.20$$

CURVA DE OSCILACION MAQUINA " A "

CUADRO N° III.-13

t	Pi	PU	Pa = Pi - PU	1.80 Pa	$\Delta \delta_A$	δ_A
0-	0.427	0	0	0	—	9.4
0 +	0.427		0.427			9.4
Oprom	"		0.213	0.384		
					0.384	
0.05	"	"	0.427	0.384	0.768	9.784
0.10	"	"	0.427	0.384		10.552
					1.152	
0.15	"	"	0.427	0.384		11.704
					1.536	
0.20	"	"	0.427	0.384		13.240
					1.920	
0.25	"	"	0.427	0.384		15.160
					2.304	
0.30	"	"	0.427	0.384		17.464
					2.688	

t	P_1	P_U	$\frac{P_a}{P_1 - P_U}$	$1.80 P_a$	$\Delta \delta_A$	δ_A
0.35	0.427	0	0.427	0.384	3.072	20.152
0.40	"	"	0.427	0.384	3.456	23.224
0.45	"	"	0.427	0.384	3.840	26.680
0.50	"	"	0.427	0.384	4.224	30.520
0.55	"	"	0.427	0.384	4.608	34.744
0.60	"	"	0.427	0.384	4.992	39.352
0.65	"	"	0.427	0.384	5.376	44.344
0.75	"	"	0.427	0.384	5.376	49.720

CUADRO N° III.- 15

El cálculo de las curvas de oscilación a base de las ecuaciones de transferencia de potencia y de las expresiones

$$\delta_n = \delta_{(n-1)} + \Delta \delta_n$$
$$\Delta \delta_n = \Delta \delta_{(n-1)} + \frac{(\Delta t)^2}{M} \cdot P_{a(n-1)}$$

se detalla en los cuadros III.-13 a III.-15 , y las correspondientes curvas de oscilación (para falla sostenida) se muestran en el Anexo Nº III.-21.

Del estudio de las curvas del Anexo Nº III.-21 se desprende lo siguiente:

- a) Ninguna de las máquinas puede mantener su estabilidad con una falla sostenida en la localización Nº 3.
- b) Las máquinas A y B mantienen un ángulo de torque relativo aproximadamente constante; o, en otras palabras, oscilan casi juntas.

Estas mismas conclusiones son aplicables también a la falla en el punto Nº 4, pues la impedancia entre los puntos 3 y 4 ----- (Figura 1) es casi nula.

De esta forma, para un estudio de las fallas en los puntos 3 y 4, podremos agrupar entre sí las centrales de El Ambi y Otavalo , - y considerarlas como una sola.

Por otro lado, y debido a que las fallas en los puntos 3 y 4 son eléctricamente casi equivalentes, estudiaremos solo una de ellas, la falla en el punto 3, que es la más severa de ambas.

Así, antes de producida la falla, la red del sistema tendría la configuración mostrada en la Figura 27, en la cual la reactancia equivalente de la máquina E será:

$$X_E = \frac{0.388 \times 4.24}{0.388 + 4.24} = 0.355$$

y puesto que la potencia total suministrada por la máquina es -----
 $P_E = 0.427 + 0.020 = 0.447$ P.U., el voltaje interno de la máquina equivalente E será:

$$\begin{aligned} E_E &= 1.05 + j0.031 + \frac{0.447}{1.05 \times 0.8} \frac{-36.8 + 1.7}{0.355} \angle 90^\circ = \\ &= 1.238 + j0.047 = 1.24 \angle 2.16 \end{aligned}$$

Una transformación $\Delta - Y$, considerando las impedancias de las cargas, en el diagrama de la Figura 27 da lugar al de la Figura 28, en el cual:

$$\begin{aligned} Z_{OE} &= j0.355 + \frac{j0.09 (2.15 + j1.62)}{(2.15+2.89)+j(1.62+2.16+0.09)} = \\ &= j0.355 + \frac{0.09/90 \times 2.69/37}{6.35/37.5} = j0.393 \end{aligned}$$

$$Z_{OC} = j4.97 + \frac{j0.09 \times (2.89+j2.16)}{6.35/37.5} = j5.02$$

$$Z_{ON} = \frac{2.69/37 \times 3.60/37}{6.35/37.5} = 1.22 + j0.90$$

Al hacer una nueva transformación $Y - \Delta$ obtendremos el diagrama de la Figura 29, en el cual:

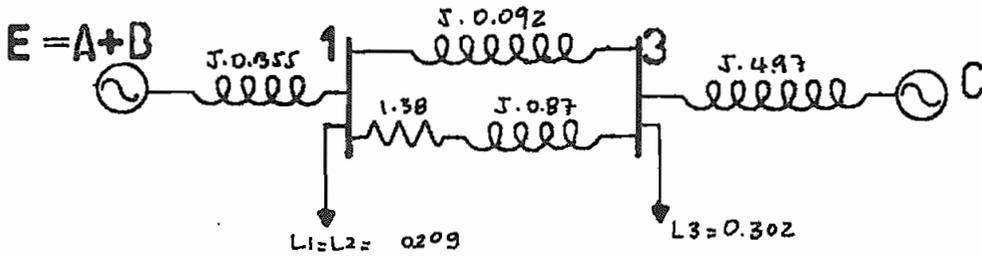


FIG 27

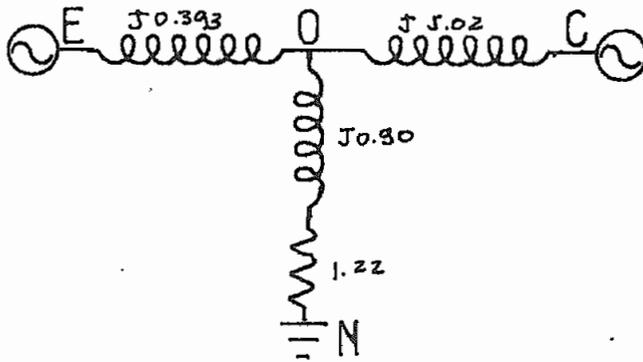


FIG 28

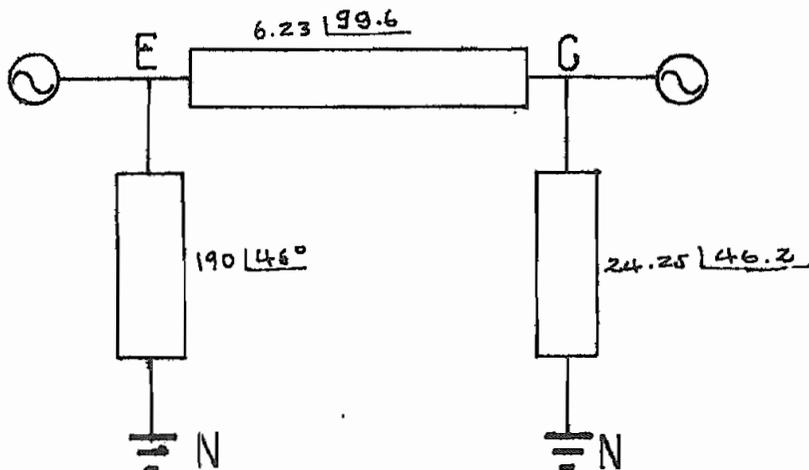


FIG 29

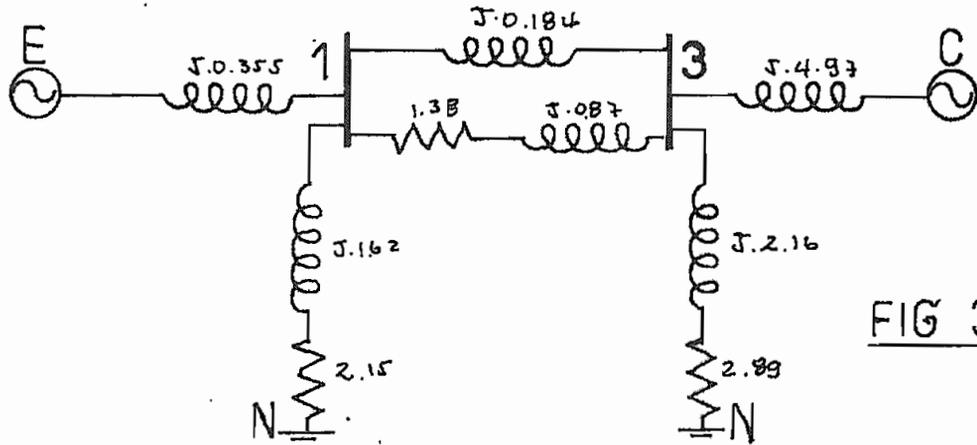


FIG 30

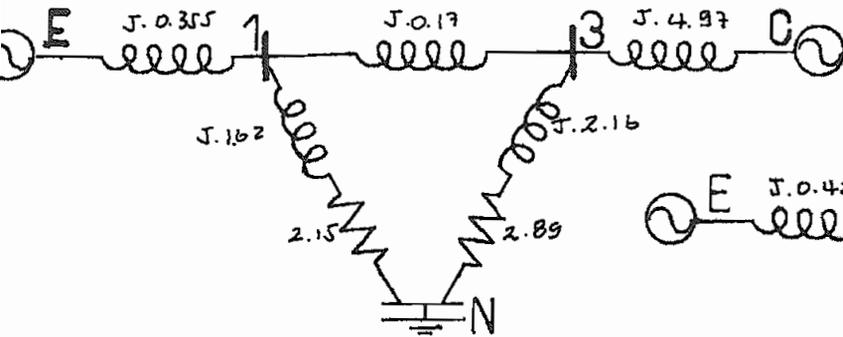


FIG 31

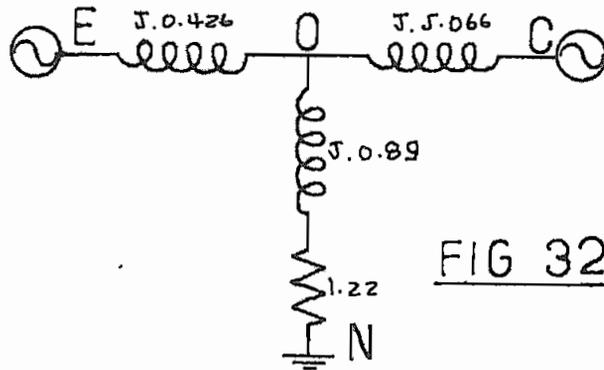


FIG 32

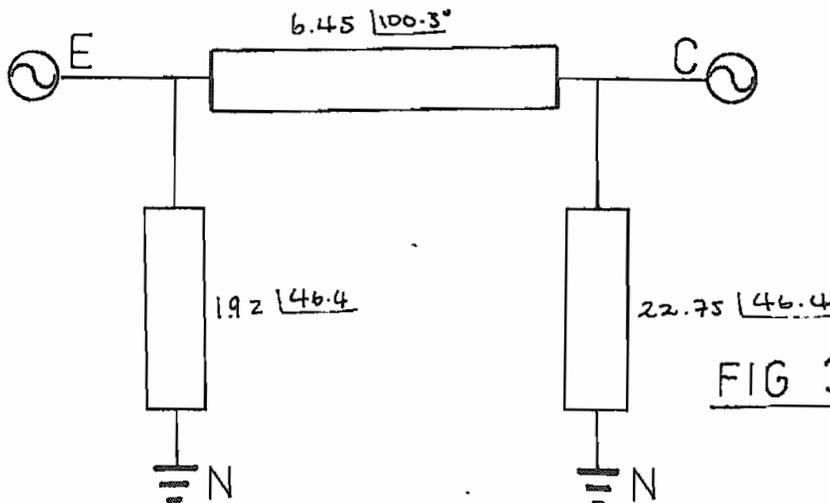


FIG 33

$$Z_{EN} = \frac{1.52/36.5 \times 0.393}{5.02} + j0.393 + 1.22 + j0.90 =$$

$$= 1.315 + j1.37 = 1.90 \underline{/46.0}$$

$$Z_{CN} = \frac{1.52/36.5 \times 5.02}{0.393} + 1.22 + j0.90 + j5.02 =$$

$$= 16.82 + j17.52 = 24.25 \underline{/46.2}$$

$$Z_{EC} = \frac{j0.393 \times j5.02}{1.52/36.5} + j0.393 + j5.02 =$$

$$= -1.04 + j6.18 = 6.23 \underline{/99.6}$$

Mientras esté presente el cortocircuito en el punto N^o 3 , la impedancia entre las dos máquinas será infinita, y por lo tanto no habrá transferencia de potencia entre ellas.

Una vez despejada la falla el diagrama del sistema toma la forma mostrada en la Figura 30, en la cual la impedancia entre las barras 1 y 3 es

$$Z_{13} = \frac{1.64 \underline{/32.0} \times 0.184 \underline{/90}}{1.38 + j(0.87+0.184)} = j0.17$$

El nuevo diagrama se muestra en la Figura 31, en la que una transformación Δ - Y da como resultado el diagrama mostrado en la Figura 32, en la cual:

$$Z_{OE} = j0.355 + \frac{(2.15 + j1.62) \times j0.17}{(2.15+2.89) + j(1.62+0.17+2.16)} = j0.426$$

$$Z_{OC} = j4.97 + \frac{3.60/37 \times 0.17/90}{6.40 / 38} = j5.066$$

$$Z_{ON} = \frac{3.60/37 \times 2.69 /37}{6.40 /38} = 1.51 /36 = 1.22 + j0.89$$

Por último, una nueva transformación Y - Δ en el diagrama de la Figura 32 dá como resultado el de la Figura 33:

$$\begin{aligned} Z_{EN} &= \frac{1.51 /36 \times 0.426}{5.066} + 1.22 + j0.89 + j0.426 = \\ &= 1.324 + j1.392 = 1.92 /46.4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{CN} &= \frac{1.51 /36 \times 5.066}{0.426} + 1.22 + j0.89 + j5.066 = \\ &= 15.72 + j16.50 = 22.75 /46.4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{EC} &= \frac{0.426 /90 \times 5.066 /90}{1.51 /36} + j0.426 + j5.066 = \\ &= -1.15 + j6.33 = 6.45 /100.3 \end{aligned}$$

Así, las admitancias de punto motriz y de transferencia de la red serán las siguientes:

a) Antes de la Falla:

$$Y_{EE} = \frac{1}{1.90/46} + \frac{1}{6.23/99.6} = 0.309 - j0.536 = 0.618 /-60$$

$$Y_{CC} = \frac{1}{24.25/46.2} + \frac{1}{6.23/99.6} = 0.0015 - j0.188 = 0.188 /-90$$

$$Y_{EC} = \frac{1}{6.23 \angle 99.6} = -0.16 \angle -99.6 = 0.16 \angle 80.4$$

b) Después de la Falla:

$$Y_{EE} = \frac{1}{1.92 \angle 46.4} + \frac{1}{6.45 \angle 100.3} = 0.267 - j0.889 = 0.93 \angle -73.2$$

$$Y_{CC} = \frac{1}{22.75 \angle 46.4} + \frac{1}{6.45 \angle 100.3} = 0.003 - j0.184 = 0.184 \angle -90$$

$$Y_{EC} = -\frac{1}{6.45 \angle 100.3} = -0.155 \angle -100.3 = 0.155 \angle 79.7$$

Las constantes de inercia para las máquinas E y C son las siguientes:

$$M_E = M_A + M_B = (1.39 + 0.154) \times 10^{-3} = 1.544 \times 10^{-3}$$

$$M_C = 0.092 \times 10^{-3}$$

De esta forma, las ecuaciones de las curvas P- δ para la máquina equivalente en el sistema equivalente máquina finita-barra infinita, serán las siguientes:

a) Antes de la Falla:

$$P_C = \frac{1.544(1.30)^2 0.0015 - 0.092(1.24)^2 0.309}{0.092 + 1.544} = -0.0242$$

$$P_M = \frac{1.30 \times 1.24 \times 0.16}{1.636} \sqrt{(0.092)^2 + (1.544)^2 - 2 \times 0.092 \times 1.544 \cos(2 \times 80.4)} = 0.259$$

$$\delta = -\tan^{-1} \left(\frac{0.092 \times 1.544}{0.092 - 1.544} \tan 80.4 \right) - 90 = -8.5$$

Ecuación de la curva:

$$P_u = -0.0242 + 0.259 \operatorname{sen}(\delta + 8.5)$$

b) Durante la Falla:

Puesto que durante la falla no puede haber --
transferencia de potencia, la ecuación de la curva es

$$P_u = 0$$

c) Después de la Falla:

$$P_C = \frac{1.544 \times (1.30)^2 \times 0.003 - 0.092 \times (1.24)^2 \times 0.267}{0.092 + 1.544} = -0.0297$$

$$P_M = \frac{1.30 \times 1.24 \times 0.155}{1.636} \sqrt{(0.092)^2 + (1.544)^2 - 2 \times 0.092 \times 1.544 \cos(2 \times 79.7)} = 0.248$$

$$\gamma = -\operatorname{tn}^{-1} \left(\frac{0.092 + 1.544}{0.092 - 1.544} \operatorname{tn} 79.7 \right) - 90 = -9.2$$

Ecuación de la curva:

$$P_u = -0.0297 + 0.248 \operatorname{sen}(\delta + 9.2)$$

Las curvas P- δ para cada una de las condiciones se muestran en el Anexo N^o III.-22, en cuya figura se ha determinado también el límite de estabilidad con despeje instantáneo, valor que resultó ser 0.212 P.U.; con falla sostenida el límite de estabilidad es, naturalmente, cero.

En la misma figura se ha determinado por el método gráfico - la curva del límite de estabilidad en función del ángulo crítico de

despeje de la falla; y en el cuadro N^o III.-16 la ordenada de esta --
curva ha sido transformada a la escala de tiempo , para lo cual:

$$\sqrt{2 \frac{M_E \times M_C}{M_E + M_C}} = \sqrt{2 \frac{1.544 \times 0.092}{1.544 + 0.092} \times 10^{-3}} = 0.0132$$

La curva del límite de estabilidad transitoria así calculada se muestra en el Anexo N^o III.-23.

$$P_i \quad \delta_0 \quad \delta_c \quad \delta_c - \delta_0 \quad \sqrt{\frac{\delta_c - \delta_0}{P_i}} \quad t_c^{(1)}$$

0.212	—	—	—	—	0
0.180	43.5	54.0	10.5	7.45	0.098
0.150	34.0	60.0	26.0	13.20	0.174
0.120	25.5	70.0	44.5	19.20	0.254
0.100	20.0	79.0	59.0	24.30	0.320
0.080	15.0	87.0	72.0	30.00	0.396
0.050	7.5	103.0	95.5	43.70	0.578
0.020	1.0	126.0	125.0	79.00	1.041

0

$$(1) \quad t_c \quad 0.0132 \sqrt{\frac{\delta_c - \delta_0}{P_i}}$$

CUADRO # III.- 16

CURVA DEL LIMITE DE ESTABILIDAD TRANSITORIA
 FALLA EN LA LOCALIZACION N° 3
 MAQUINAS E Y C COMBINADAS

III.-5. Tiempos Máximos de Despeje de Fallas.-

Una vez que han sido obtenidas las curvas del límite de estabilidad transitoria para aquellas fallas que se determinó que eran las más perjudiciales para la estabilidad del sistema, procederemos a calcular a base de estas curvas y de las máximas potencias de operación de las centrales (según se estableció en el programa de operación), los tiempos críticos de despeje de esas fallas.

Debe sin embargo ponerse de relieve que no se pretende aquí hacer una coordinación de los tiempos de operación del equipo de protección, lo cual puede ser materia de un extenso trabajo, sino únicamente establecer los límites máximos de duración de cada falla desde el punto de vista de la estabilidad del sistema, los cuales servirían para un estudio de coordinación de la protección del mismo.

Los resultados del análisis de las curvas del límite de estabilidad transitoria obtenidas en el Estudio Nº 1 se muestran en el cuadro Nº III.-17 ; y en el cuadro Nº III.-18 se muestran resultados similares obtenidos del Estudio Nº 2.

tales resultados (el tiempo máximo de despeje en particular), han sido obtenidos gráficamente de la curva del límite de estabilidad en cuestión tomando como ordenada la potencia máxima a la cual opera la central en referencia, y leyendo en la abscisa el correspondiente tiempo de despeje.

Para aquellas casos en que se consideró un sistema máquina-finita-barra infinita esta potencia es directamente la de operación de la central en cuestión ; pero para los casos en que se consideró un sistema de dos máquinas finitas (con un equivalente máquina finita-barra infinita), se ha utilizado una potencia equivalente de -- entrada, dada por la expresión

$$P_i = \frac{M_2 P_{i1} - M_1 P_{i2}}{M_1 + M_2}$$

expresión que fué derivada en la sección III.-4.-1.-g.

Así , en el Estudio Nº 1 , puesto que las potencias de las -- centrales El Ambi y Otavalo son, respectivamente, 0.41 y 0.08 P.U. , - para las fallas en los puntos 6 y 7 , en las cuales se hizo una combi nación de estas dos máquinas, la potencia equivaiente de entrada es:

$$P_i = \frac{1.39 \times 10^{-3} \times 0.08 - 0.154 \times 10^{-3} \times 0.41}{(0.154 + 1.39) \times 10^{-3}} = 0.031 \text{ P.U.}$$

En forma similar, en el Estudio Nº 2 , puesto que las máximas - potencias de operación de las centrales El Ambi, Otavalo e Ibarra --- (máquinas A, B y C respectivamente) son, en su orden, 0.427, 0.020 y --- 0.063 P.U. , y tomando en cuenta que para las fallas en los puntos - 5, 6, 7 y 10 se agruparon en una sola las máquinas A y C (agrupación a la que se dió el nombre de máquina D), al estudiar las fallas en las localizaciones 6 y 7, la potencia equivalente de entrada fué:

RESULTADOS DEL ESTUDIO N° 1

LOCALIZACION DE LA FALLA	POTENCIA DE OPERACION DE LAS MAQUINAS: A (El Ambi) (Otavalo)	MAQUINA EQUIVALENTE (1)	POTENCIA DE LA MAQUINA EQUIVALENTE	CURVA DEL LIMITE DE ESTABILIDAD (Anexo N°)	TIEMPO MAXIMO DE DESPEJE DE LA FALLA (seg)
3	0.410			III.-6.-a	0.950
3	0.080			III.-6.-b	0.595
5	0.410			III.-6.-a	0.950
5	0.080			III.-8	0.580
6	0.410	A + B	0.051	III.-10	1.055
7	0.410	A + B	0.051	III.-12	1.015

NOTA(1): En un sistema equivalente máquina finita - barra infinita

$$P_i = \frac{0.154 \times 10^{-3} (0.427 + 0.063) - (1.39 + 0.092) \times 10^{-3} \times 0.020}{(1.39 + 0.092) \times 10^{-3} + 0.154 \times 10^{-3}} =$$
$$= 0.028 \text{ P.U.}$$

Y al estudiar la falla en la localización N° 3, debido a que se agruparon entre sí las máquinas A y B para formar la máquina E, la potencia de la máquina equivalente E+C es :

$$P_i = \frac{(1.39 + 0.154) \times 0.063 - 0.092 \times 0.447}{(1.39 + 0.154) + 0.092} = 0.0344 \text{ P.U.}$$

Del estudio de los cuadros III.-17 y III.-18 se desprende que, de acuerdo a las condiciones de operación consideradas, para una misma localización de falla existen diferentes tiempos críticos de despeje de la misma.

Por esta razón, para mantener la estabilidad de todas las máquinas en todas las condiciones de operación, deberá tomarse como -- tiempo máximo de despeje de una falla el mínimo de los valores que -- aparecen en los cuadros III.-17 y III.-18.

Con esta consideración se ha elaborado la siguientes tabla - de resumen:

RESUMEN DE TIEMPOS MAXIMOS DE DESPEJE DE FALLAS

<u>Falla N°</u>	<u>Tiempo Máximo</u>	<u>Falla N°</u>	<u>Tiempo Máx.</u>
3	0.595 seg.	7	1.015 seg.
5	0.580 "	10	0.835 "
6	1.055 "		

Debido a que cada falla estudiada implica una línea de transmisión, y en algunos casos dos fallas diferentes se encuentran sobre la misma línea, y ya que hemos supuesto un despeje de las fallas por apertura simultánea de los elementos protectores involucrados, a base del resumen de la tabla precedente podemos llegar a determinar el tiempo máximo de operación del conjunto de elementos que protegen una determinada línea.

Así, la línea que une la subestación de seccionamiento de Ibarra y la subestación Otavalo, en cuyos extremos se han supuesto las fallas 5 y 6, deberá estar equipada con elementos de protección que actúen en un tiempo no mayor de 0.580 seg.

A continuación damos una tabla de los tiempos máximos en que debe ser aislada cada línea al producirse una falla dentro de la zona de protección de los disyuntores de sus extremos (referirse al Anexo Nº I.-1)

TIEMPOS MAXIMOS DE AISLAMIENTO DE LAS LINEAS

<u>Línea</u>	<u>Tiempo Máximo</u>
1.- Subestación de seccionamiento - Subestación Otavalo	0.580 seg.
2.- Subestac. Otavalo - Cotacachi	1.015 "
3.- Subestac. Seccionam. - C.D. Ibarra	0.595 "
4.- C.D. Ibarra - Central Atuntaqui	0.835 "

- / - - - - -

C A P I T U L O I V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

IV.- 1.- CONCLUSIONES.- A lo largo del presente estudio hemos podido apreciar algunos aspectos que intencionalmente han sido dejados para tratarse al final.

En lo referente a la estructuración misma del sistema hay un aspecto que debería ser estudiado y es que, mientras la subestación de seccionamiento de Ibarra y la Central Diesel Ibarra están unidas por una línea a doble circuito, entre la Central El Ambi y la subestación de seccionamiento de Ibarra existe una sola línea, que si por alguna razón falla, interrumpirá el suministro de energía al mercado de todo el sistema. Esta línea de 4 Km. de longitud, no tendría un costo adicional muy grande si se la duplicara, con lo cual se garantizaría la continuidad del servicio en el sistema.

En cuanto al equipamiento del sistema y las condiciones hidrológicas del Rio Ambi, podemos concluir que en los períodos de estiaje, y en especial el segundo estiaje, es notoria la escasez de agua para la central El Ambi, que apenas tiene una capacidad de generación de energía de 42.2 MWH/día, y una potencia firme de 1.680 Kw (Ver anexos II.-7 y II.-9).

Es evidente en el programa de despacho de carga del Capítulo II, que no se llega nunca a utilizar toda la potencia-

instalada en la central El Ambi, pues a lo más se utiliza de -- ella solo 5.400 Kw de los 8.000 instalados (Ver anexo II.-11);- en otras palabras, hay un exceso de potencia instalada y una ca pacidad muy limitada de generación de energía.

En lo referente a la estabilidad misma del sistema, es evidente que no hay problema alguno, pues cualquier falla en el sistema puede ser despejada en tiempos maximos del orden de 0.6 seg., ésto es, 36 ciclos, lo que quiere decir que se podrá uti- lizar equipo de protección sumamente lento. Sin embargo, la -- existencia de una sola línea de salida desde la Central El Ambi da lugar a la posibilidad de que se presente inestabilidad (y - de hecho se presentará) al fallar esta línea, pues mientras es- té presente la falla no habrá transferencia de potencia entre - la central El Ambi y el resto del sistema, y al ser despejada - la falla se interrumpirá definitivamente el flujo de potencia.

En definitiva, llegamos a tres conclusiones:

- 1.- Aparentemente no resulta conveniente la existencia de una- sola línea de salida para la Central "El Ambi".
- 2.- Existe un exceso de potencia instalada en el sistema, y -- una baja capacidad de generación en la Central "El Ambi"
- 3.- No existe problema alguno en el sistema en lo referente a- la estabilidad del mismo, a no ser el caso de presentarse- una falla en la línea de salida de la central "El Ambi". En tal virtud, podrá utilizarse equipo lento de protección.

IV.-2.- RECOMENDACIONES.- Como se dijo en la sección precedente, la construcción de una doble línea entre la central "El Ambi" y la subestación de seccionamiento de Ibarra solucionaría el problema de la inestabilidad al -- producirse una falla en ese tramo.

Naturalmente, una decisión en este sentido tendrá que ser tomada contrastando el costo adicional de esa línea con el beneficio que ocasionaría en la operación total del sistema. Pero es evidente que la duplicación de la mencionada línea se la podría hacer a un costo muy bajo (aproximadamente \$70.000/km), -- con lo cual se tendría una completa seguridad de continuidad en el servicio, en lo referente a líneas, y una suspensión del servicio podría deberse únicamente a fallas dentro de las centrales.

En cuanto al problema del exceso de potencia instalada y déficit de agua en la central "El Ambi", una solución habría sido instalar una capacidad menor, suficiente para satisfacer las necesidades del mercado (ésto es, unos 5.000 Kw), en la central "El Ambi", con lo cual se tendría la misma capacidad de generación de energía, pero un mayor factor de planta. Sin embargo, esto no es posible, pues a la fecha se encuentran ya instalados dos grupos de 4.00 Kw cada uno.

Este exceso de potencia se debe sin duda a la concepción inicial del sistema integrando al mismo las áreas de Tulcán, El Angel y San Gabriel, en cuyo caso podría aprovecharse la capacidad de El Ambi como central de pico, ya que en el área norte se cuenta con centrales de pasada que serían suficientes

para cubrir la base de la curva de carga.

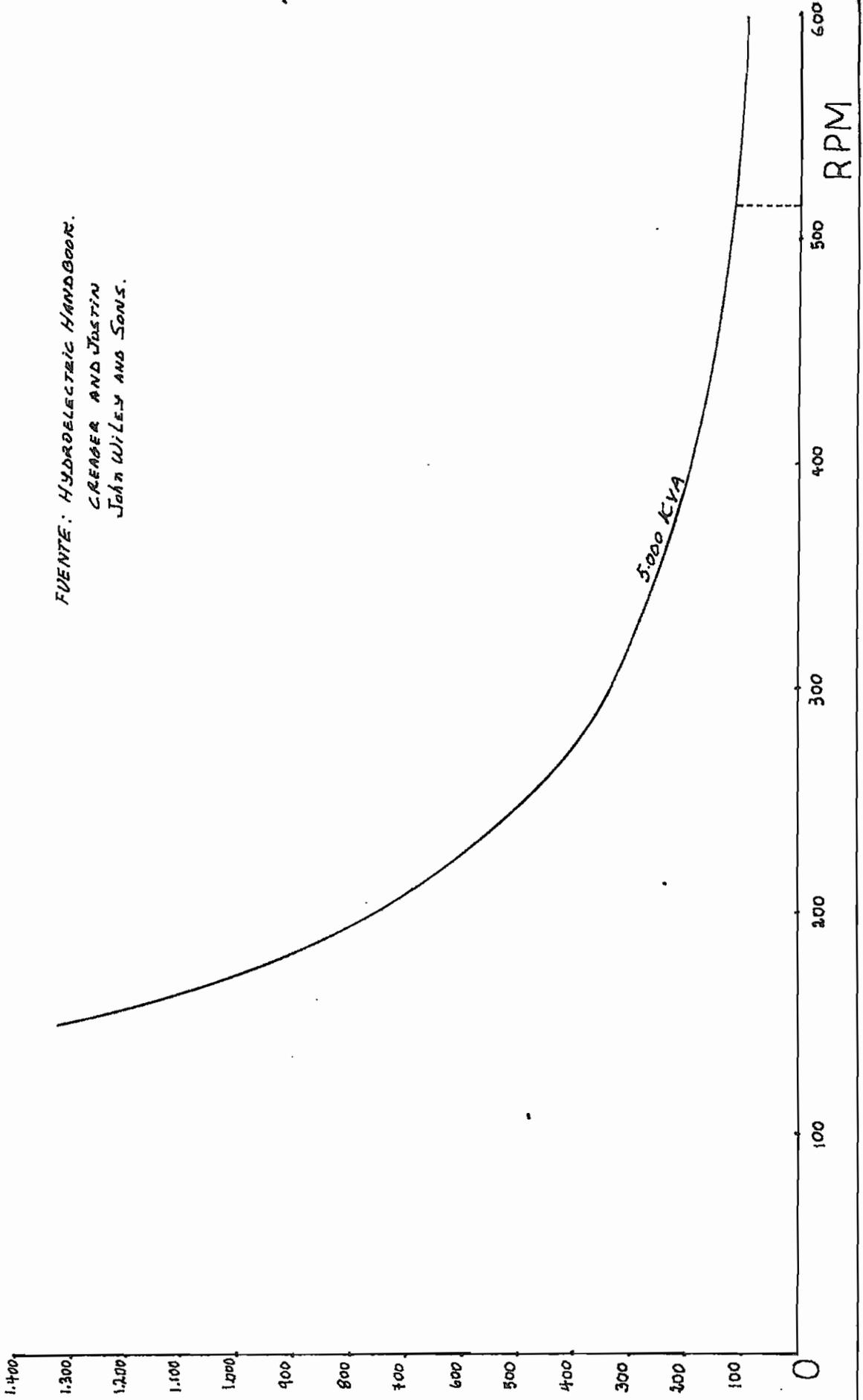
En resumen, tenemos dos recomendaciones que hacer sobre el sistema:

- 1.- Debe duplicarse la línea que va desde la central "El Ambi" a la subestación de seccionamiento de Ibarra, a fin de garantizar la continuidad del servicio.
- 2.- Debe construirse la línea de interconexión Ibarra-Tulcán, a fin de obtener un mejor aprovechamiento de la Central - "El Ambi".

ANEXO # 1 ... 8

EFECTO VOLANTE .- VELOCIDAD SINCRÓNICA
GRUPOS HIDRAULICOS DE 5.000 KVA.

FUENTE: HYDROELECTRIC HANDBOOK.
CREAGER AND JUSTIN
JOHN WILEY AND SONS.



SISTEMA "OTAVALO - IBARRA - CAYAMBE"

RESUMEN DEL PRONOSTICO DE DEMANDA POR ZONAS

1.- NUMERO DE ABONADOS	1.968	1.969	1.970	1.971	1.972	1.973	1.974
a) Ibarra	5.470	5.880	6.170	6.510	6.960	7.460	8.040
b) Cotacachi	1.180	1.200	1.230	1.240	1.270	1.280	1.330
c) Atuntaqui	2.270	2.350	2.410	2.610	2.740	2.860	3.010
d) Otavalo	1.990	2.050	2.120	2.210	2.320	2.480	2.530
e) Cayambe	1.300	1.380	1.480	1.600	1.730	1.890	2.080
TOTAL	12.210	12.860	13.410	14.170	15.020	15.970	16.990

2.- DEMANDA MAXIMA (KW)

a) Ibarra	1.380	1.590	1.790	1.850	2.180	2.330	2.540
b) Cotacachi	280	290	310	320	330	350	370
c) Atuntaqui	480	500	540	580	610	650	700
d) Otavalo	670	700	750	800	850	920	960
e) Cayambe	250	520	570	620	680	750	830
TOTAL	3.060	3.600	3.960	4.170	4.650	5.000	5.400

Anexo # II.-1.-a

Hoja 1 de 2.

SISTEMA "CTAVALO - IBARRA - CAYAMBE"

RESUMEN DEL PRONOSTICO DE DEMANDA POR ZONAS

3.- ENERGIA GENERADA.- (MW - H)	1.968	1.969	1.970	1.971	1.972	1.973	1.974
a) Ibarra	4.710	5.500	6.290	6.580	7.740	8.380	9.110
b) Cotacachi	950	980	1.050	1.090	1.140	1.190	1.270
c) Atuntaqui	1.620	1.720	1.840	1.990	2.130	2.280	2.440
d) Otavalo	2.350	2.510	2.670	2.840	3.050	3.280	3.450
e) Cayambe	800	1.690	1.900	2.060	2.320	2.560	2.840
TOTAL	10.430	12.400	13.750	14.560	16.360	17.690	19.090

Anexo # II.- 1.- a

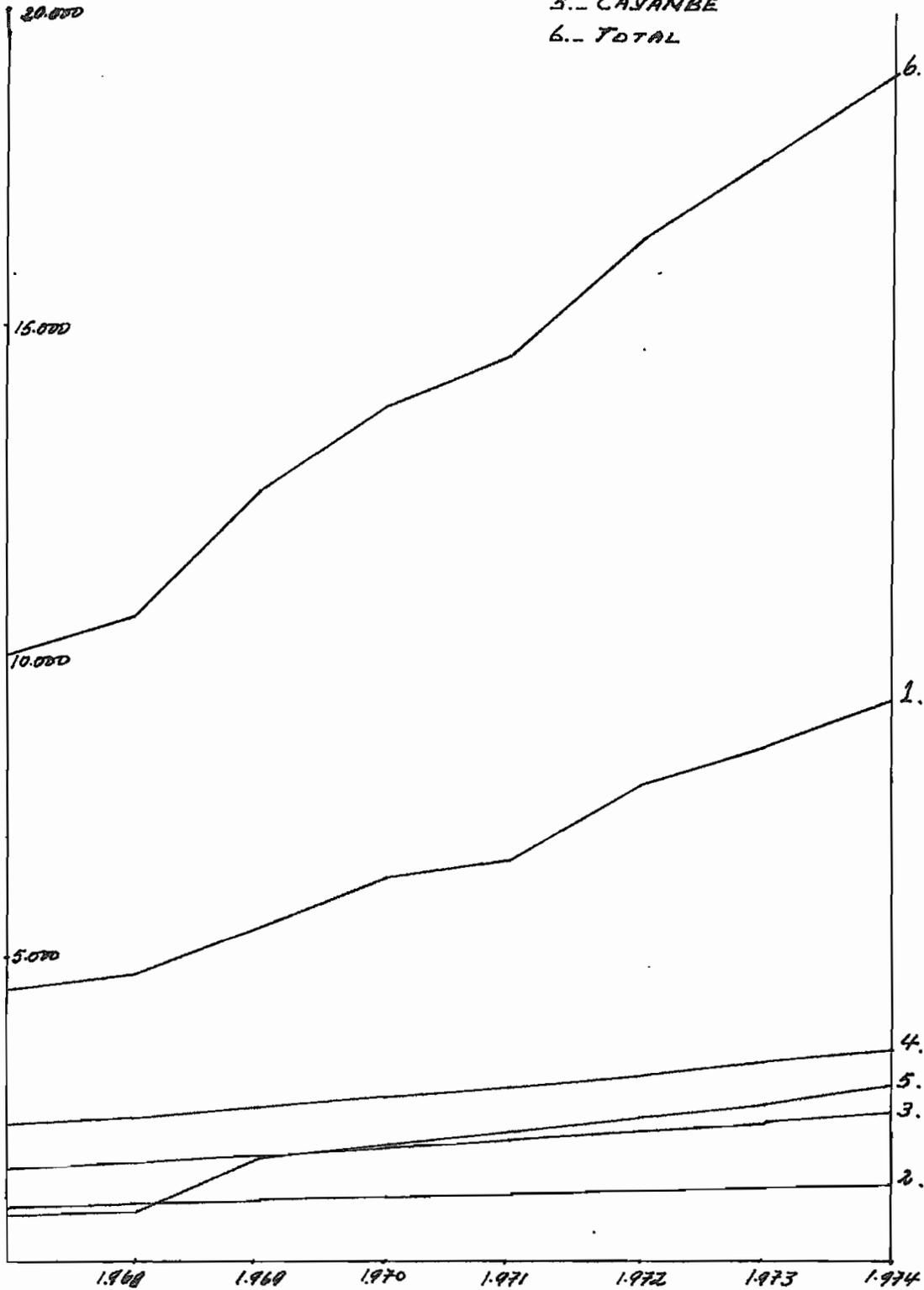
Hoja 2 de 2.

SISTEMA OTAVALO - IBARRA - CAYAMBE

CURVAS DE PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN
DE ENERGÍA POR ZONAS:

- 1.- IBARRA
- 2.- COTACACHI
- 3.- ATUNTAQUI
- 4.- OTAVALO
- 5.- CAYAMBE
- 6.- TOTAL

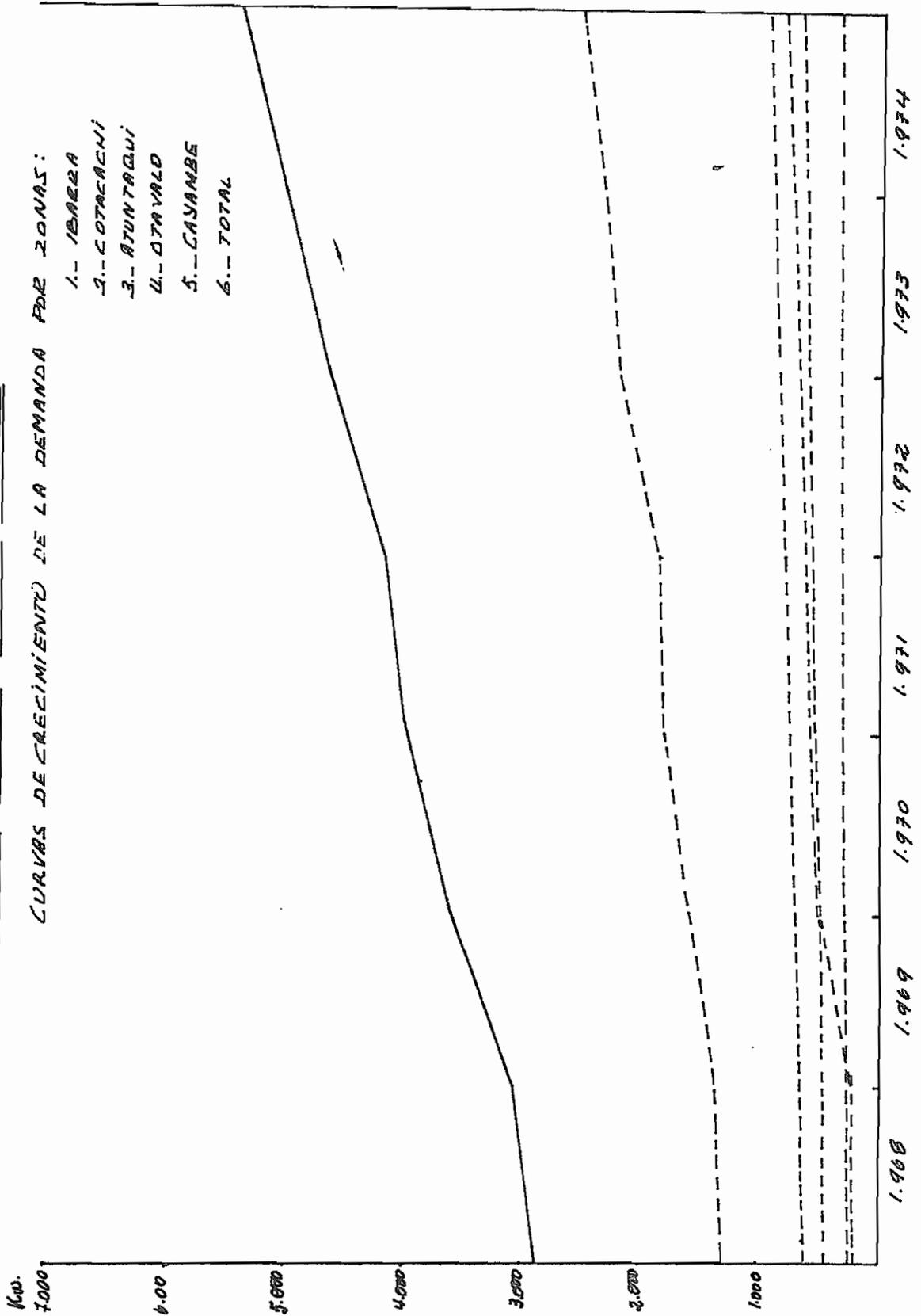
ANEXO # II.-3



SISTEMA OTAVALO - IBARRA - CAYAMBE

CURVAS DE CRECIMIENTO DE LA DEMANDA POR ZONAS:

- 1.- IBARRA
- 2.- COTACACHI
- 3.- ATUNTAQUI
- 4.- OTAVALO
- 5.- CAYAMBE
- 6.- TOTAL



CARACTERISTICAS DE LAS CENTRALES DEL SISTEMA: "OTAVALO - IBARRA - CAYAMBE".--

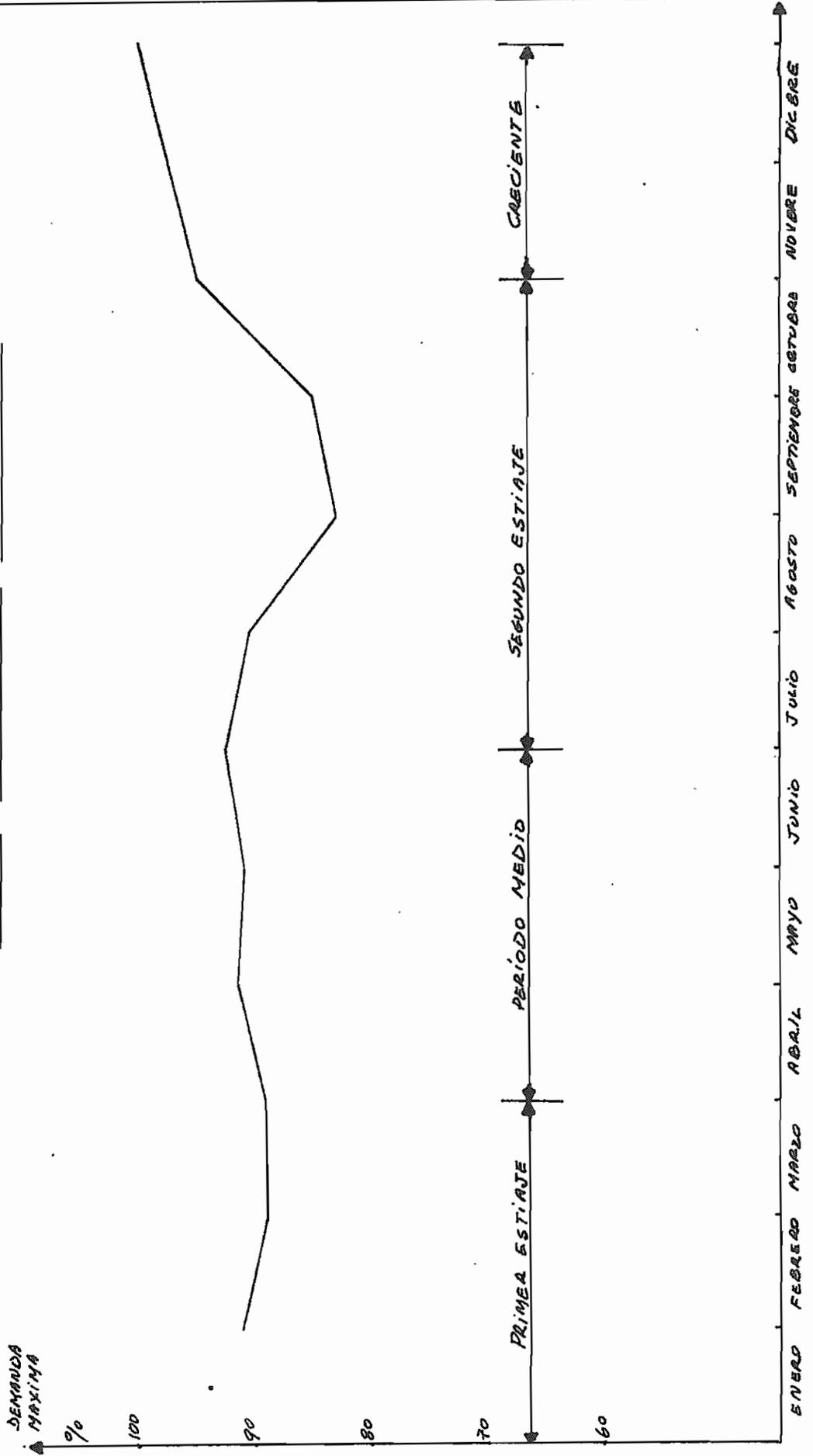
	EL ACBI	DIESEL IBARRA	COTACACHI	ATUNTAQUI	OTAVALO #1	OTAVALO #2	TOTAL
POTENCIA NOMINAL (KW)	8.000	632	440	400	400	422	10.294
POTENCIA FIRME (KW)	1.680(1)	632	190	230	200	180	3.112
CAUDALES UTILES (M ³ /seg.)							
a) Primer Estiaje	130	---	1.52	1.20	1.60	1.60	
b) Período Medio	2.00	---	1.52	1.20	1.64	1.64	
c) Segundo Estiaje	1.30	---	0.72	0.72	0.72	0.72	
d) Creciente	4.00	---	1.52	1.20	1.60	1.60	
POTENCIA UTIL (KW)							
a) Primer Estiaje	1.760	632	400	390	400	400	3.982
b) Período Medio	2.710	632	400	390	400	400	4.932
c) Segundo Estiaje	1.760	632	190	230	200	180	3.192
d) Creciente	5.430	632	400	390	400	400	7.652
CAPACIDAD DE GENERACION (MWH/Día)							
a) Primer Estiaje	42.2	15.2	9.6	9.4	9.6	9.6	95.6
b) Período Medio	65.0	15.2	9.6	9.4	9.6	9.6	118.4
c) Segundo Estiaje	42.2	15.2	4.6	5.5	4.8	4.3	76.6
d) Creciente	130.3	15.2	9.6	9.4	9.6	9.4	185.5

NOTA: (1) Sin regulación

ANEJO # 2 -- 8.

SISTEMA "OTAVALO - IBARRA - CAYAMBE"

VARIACIÓN DE LA DEMANDA MÁXIMA MENSUAL.



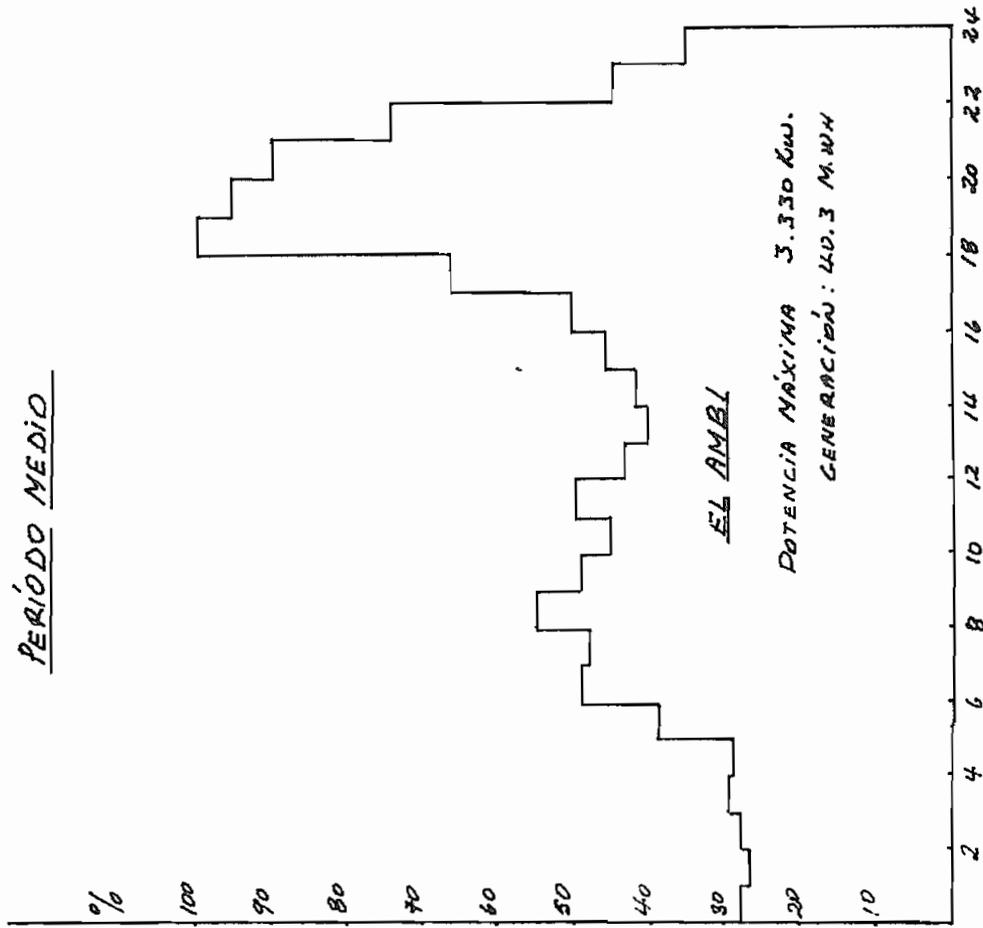
SISTEMA "OTAVALO - IBARRA - CAYAMBEN"

REQUERIMIENTOS DEL MERCADO Y DISPONIBILIDAD DE POTENCIA Y ENERGIA

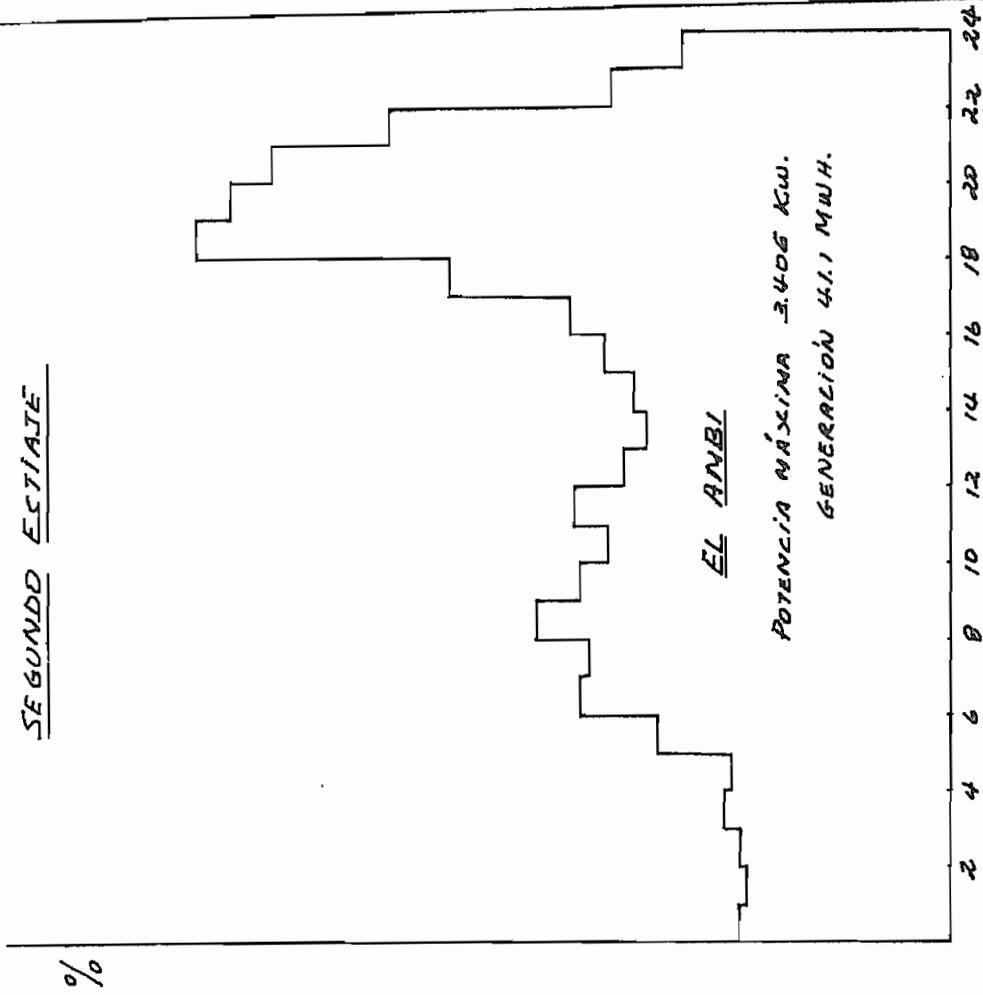
Kw	PRIMER ESTIAJE		PERIODO MEDIO		SEGUNDO ESTIAJE		CRECIENTE	
	MWH/Día	Kw	MWH/Día	Kw	MWH/Día	Kw	MWH/Día	Kw
1.969		3.330	40.3	3.405	41.1	3.600	43.5	43.5
1.974	59.4	5.000	60.5	5.100	61.6	5.400	65.8	65.8
I.- REQUERIMIENTOS DEL MERCADO								
El Ambi	42.2	8.000	65.0	8.000	42.2	8.000	130.3	130.3
Diesel Ibarra	15.2	632	15.2	632	15.2	632	15.2	15.2
Cotacachi	9.6	400	9.6	190	4.6	400	9.6	9.6
Atuntaqui	9.4	390	9.4	230	5.5	390	9.4	9.4
Otavallo # 1	9.6	400	9.6	200	4.8	400	9.6	9.6
Otavallo # 2	9.6	400	9.6	180	4.3	400	9.4	9.4
II.- DISPONIBILIDAD EN CENTRALES								

SISTEMA OTAVALO - IBARRA - CAYAMBE
PROGRAMA DE OPERACIÓN

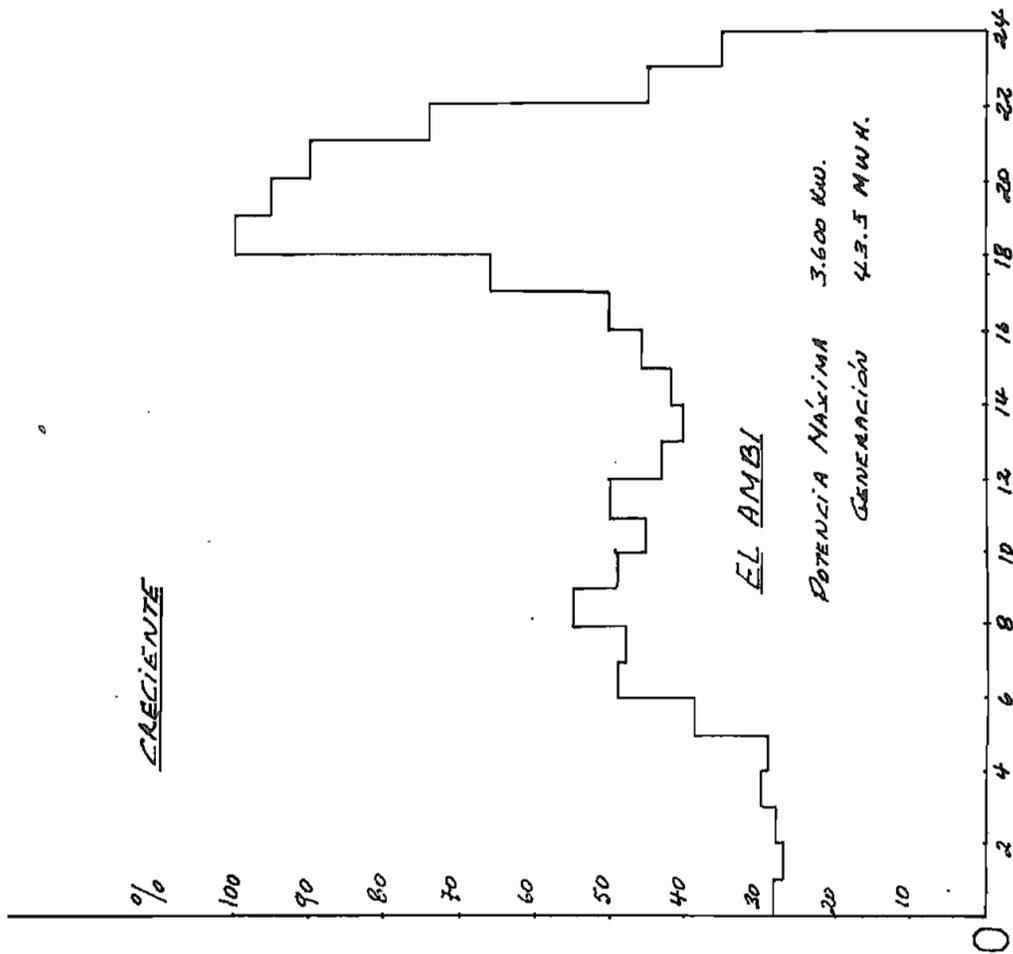
UBICACIÓN DE LAS CENTRALES EN LA CURVA DE CARGA



ANEXO



Nº 11



ANEXO # II.-10

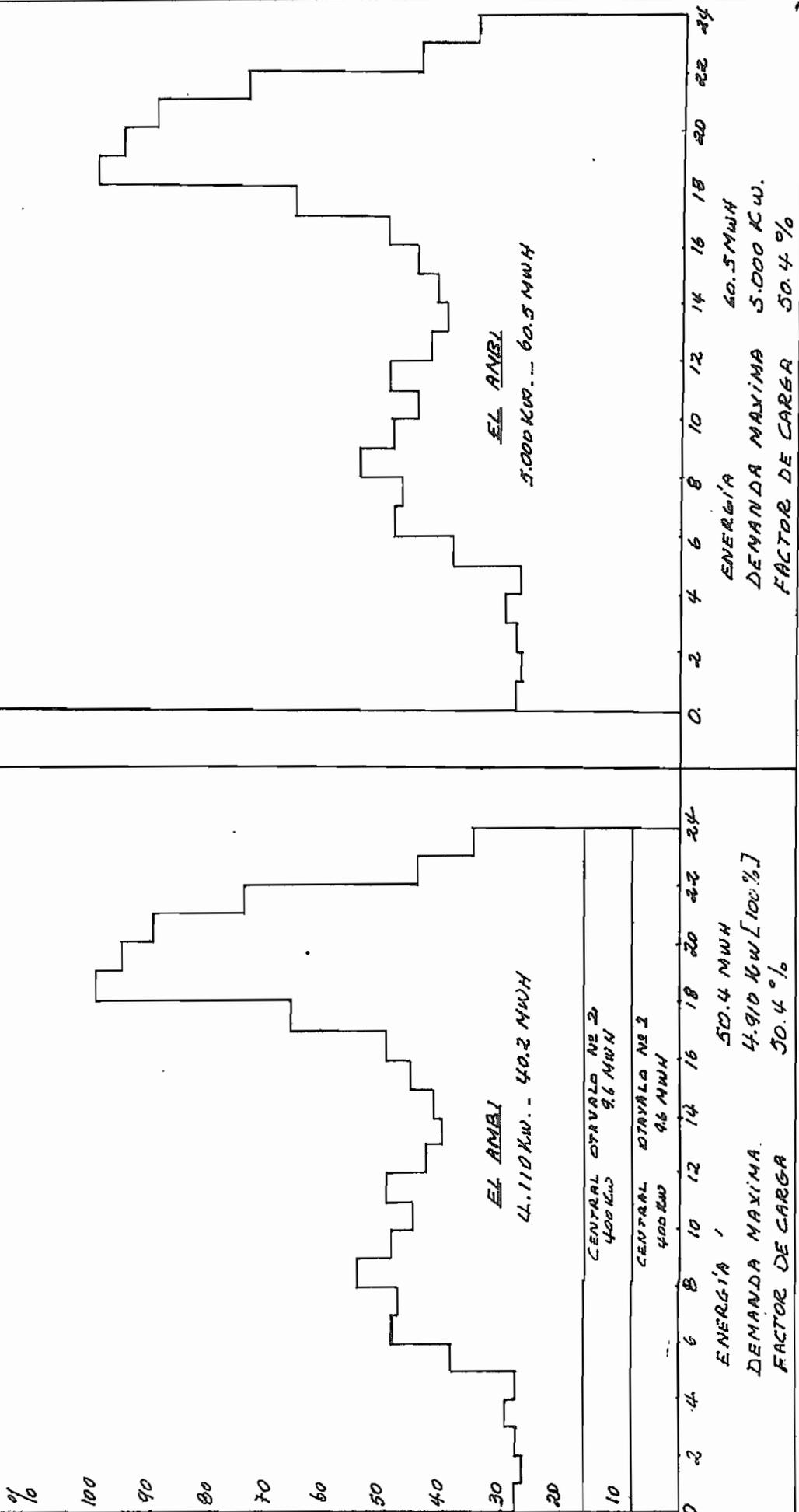
DEMANDA MÁXIMA 3.600 Kw [100%]
 ENERGÍA 43.5 MWH
 FACTOR DE CARGA 50.4 %

AÑO 1974.

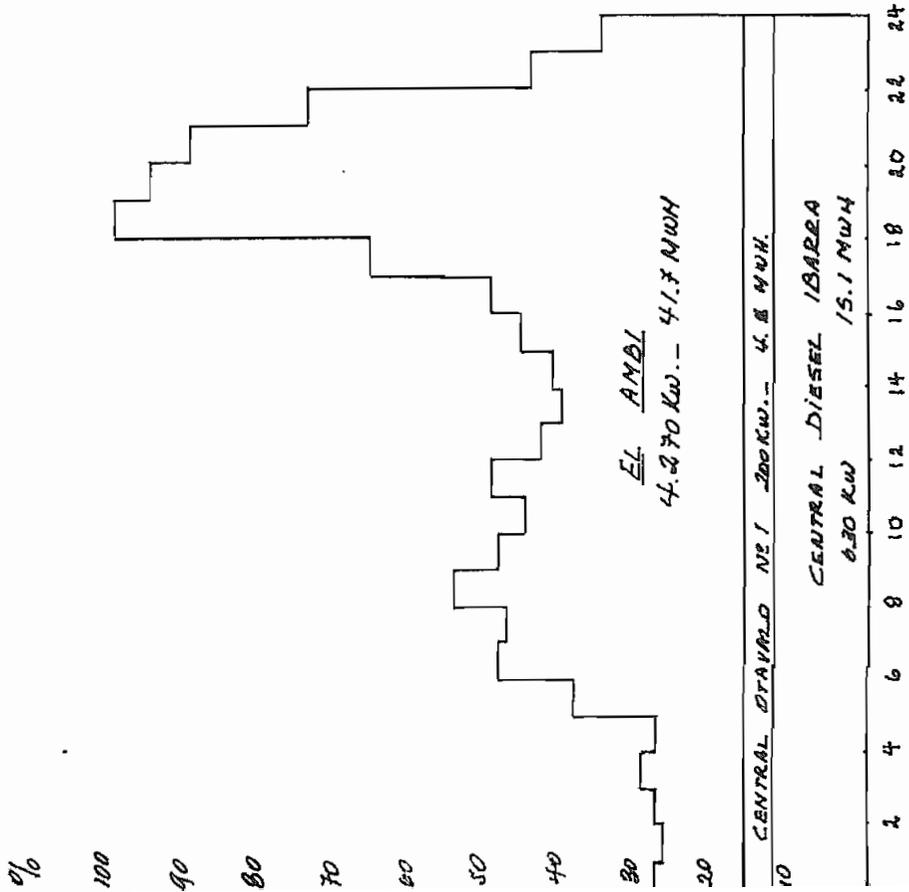
ANEXO # II.-10

PRIMERA ESTIAJE

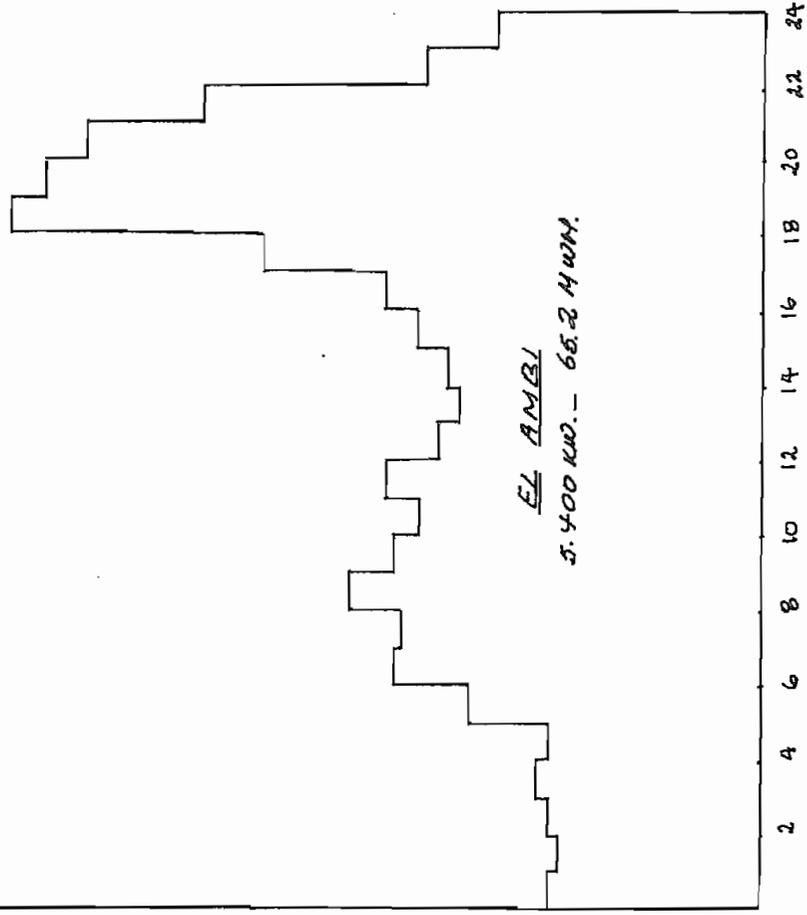
PERIODO MEDIO



SEGUNDO ESTIAJE



CRECIENTE



SISTEMA "OTAVALO - IBARRA - CAYAMBE" .- RESUMEN DEL PROGRAMA DE OPERACION

	1969		1974	
	Kw	% (1)	Kw	% (2)
I.- REQUERIMIENTOS DEL MERCADO				
I.-1 Primer Estiaje			4.910	100
I.-2 Período Medio	3.330	100	5.000	100
I.-3 Segundo Estiaje	3.405	100	5.100	100
I.-4 Creciente	3.600	100	5.400	100
II.- APORTES DE POTENCIA				
II.-1 Primer Estiaje				
a) El Ambi			4.110	83,7
b) Diesel Ibarra				51,4
c) Cotacachi				
d) Atuntaqui				
e) Otavalo # 1			400	8,15
TOTAL			4.910	100,00
II.-2 Período Medio				
a) El Ambi	3.330	100	5.000	100
b) Diesel Ibarra			41,6	62,5
c) Cotacachi				
d) Atuntaqui				
e) Otavalo #1				
f) Otavalo #2				
TOTAL	3.330	100	5.000	100

ANEXO # II.- 11

SISTEMA " OTAVALO - IBARRA - CAYABBE ".- RESUMEN DEL PROGRAMA DE OPERACION

	Kw	% (1)	% (2)	Kw	% (1)	% (2)
II.-3 Segundo Estiaje		1.969			1.974	
a) El Ambi	3.405	100	42.6	4.270	83.8	53.4
b) Diesel Ibarra				650	12.3	100.0
c) Cotacachi						
d) Atuntaqui						
e) Otavalo # 1				200	3.9	50.0
f) Otavalo # 2						
TOTAL	3.405			5.100	100.0	
II.- 4 CRECIENTE						
a) El Ambi	3.600	100	45	5.400	100	67.5
b) Diesel Ibarra						66
c) Cotacachi						
d) Atuntaqui						
e) Otavalo # 1						
f) Otavalo # 2						
TOTAL	3.600	100		5.400	100	

NOTAS: (1) Porcentaje sobre la Demanda Máxima

(2) Porcentaje de la Potencia Nominal de la Central

CENTRO DE
CARGA

1.969

1.974

	PRIMER ESTIAJE	PERIODO MEDIO	SEGUNDO ESTIAJE	CRECIENTE	PRIMER ESTIAJE	PERIODO MEDIO	SEGUNDO ESTIAJE	CRECIENTE
IBARRA	1.450 0.181	1.470 0.184	1.504 0.188	1.590 0.199	2.315 0.289	2.350 0.294	2.400 0.300	2.540 0.317
ATUNTAQUI	466 0.057	463 0.058	473 0.059	500 0.0625	638 0.080	648 0.081	662 0.083	700 0.0875
COTACACHI	264 0.033	268 0.034	274 0.034	290 0.036	337 0.042	342 0.043	350 0.044	370 0.046
OTAVALO	638 0.080	648 0.081	662 0.083	700 0.0875	875 0.109	889 0.110	908 0.113	960 0.120
CAYAMBE	474 0.059	481 0.060	491 0.061	520 0.065	756 0.0945	768 0.096	785 0.098	830 0.104
TOTAL	3.282 0.410	3.330 0.416	3.404 0.426	3.600 0.450	4.921 0.490	4.997 0.500	5.105 0.638	5.400 0.675

SISTEMA "OTAVALO - IBARRA - CAYAMBE"

CARGAS MAXIMAS, POR CENTROS DE CARGA Y PERIODOS HIDROLOGICOS

REACTANCIAS TRANSITORIAS DE LOS GENERADORES DEL SISTEMA

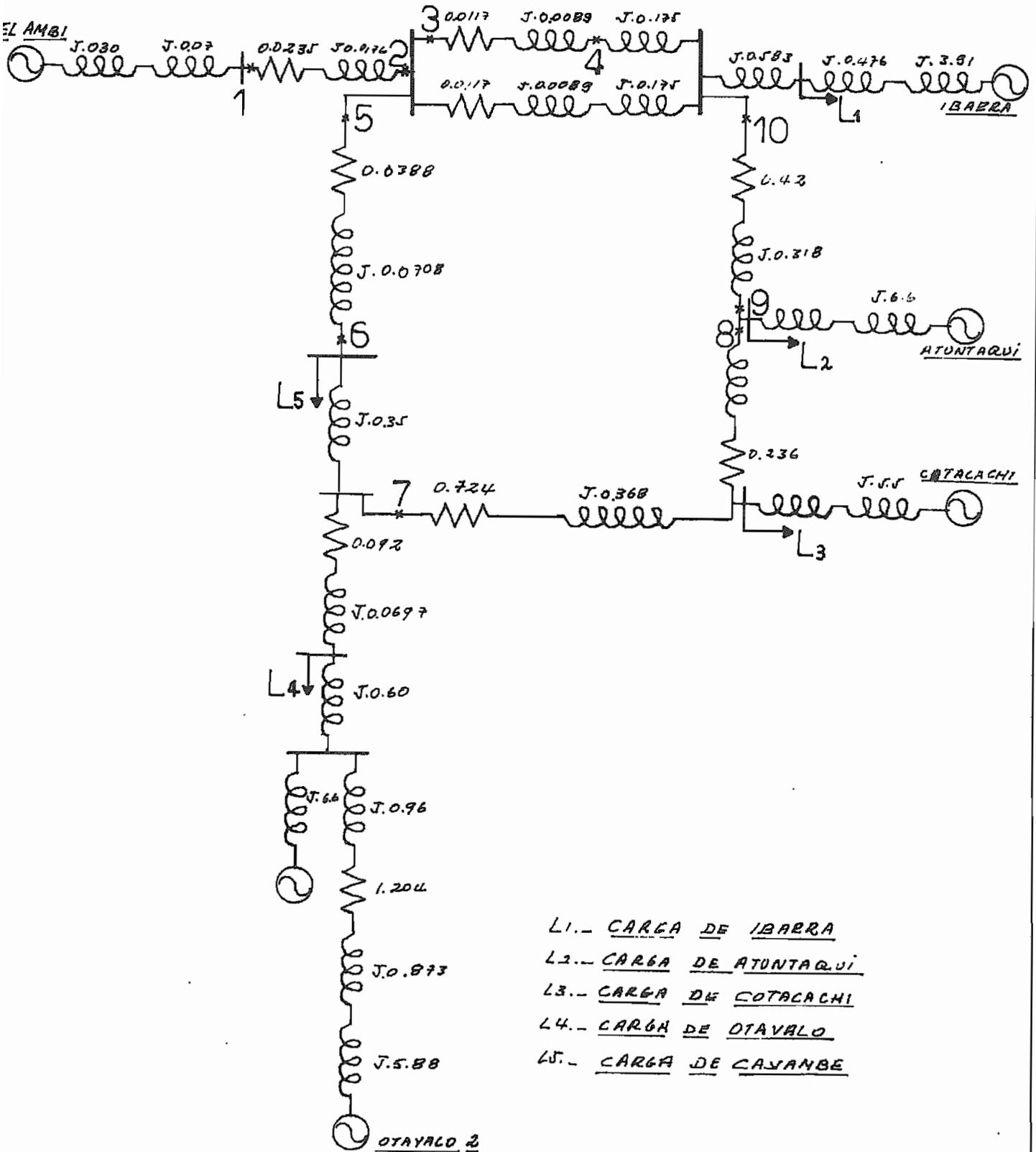
DESCRIPCION	Potencia Nominal MVA	Reactancia Transitoria en la propia Base (FU)	Reactancia Transitoria en la Base de 10 MVA (FU)
Generadores C, El Ambi	5.00	0.30	0.60
Generadores C,Diesel Ibarra	0.396	0.31	7.82
Generadores C,Atuntaqui	0.250	0.33	13.20
Generadores C,Cotacachi	0.300	0.33	11.00
Generadores C,Otavallo#1	0.250	0.33	13.20
Generadores C,Otavallo#2	0.527	0.31	5.88

TRANSF. #	UBICACION	CAPACIDAD NOMINAL MVA	RELACION DE TRANSF.	REACTANCIA EN LA PROPIA BA- SE P.U.	REACTANCIA EN LA BASE DE LO MVA P.U.
1 - 2	C. El Ambi	5.00	4.16/34.5	0.07	0.14
3 - 4	C.D. Ibarra	4.00	34.5/13.8	0.07	0.175
5	C.D. Ibarra	1.20	13.8/6.0	0.07	0.583
6 - 7	C.D. Ibarra	0.42	0.22/6.0	0.04	0.952
8	C. Atuntaqui	0.50	13.8/0.4	0.05	1.00
10	C. Cotacachi	0.30	13.8/0.4	0.05	1.67
12	S. Otavalo	2.00	34.5/13.8	0.07	0.35
13	C. Otavalo # 1	1.00	13.8/5.0	0.06	0.60
14	C. Otavalo # 2	0.55	5.0/0.4	0.048	0.873

ANCIA DE LAS LINEAS DE INTERCONEXION

L I N E A	RESISTENCIA		REACTANCIA		IMPEDANCIA	
	P.U.		P.U.		P.U.	
1.- El Ambi-Subestación de Seccionamiento	0.0235		0.0176		0.0294	
2.- Subestación de Seccionamiento C.D.Ibarra	0.0117		0.0089		0.0147	
3.- Subestación de Seccionamiento Sub.Otavalo	0.0338		0.0708		0.0785	
4.- Subestación Otavalo - C. Otavalo # 1	0.0920		0.0697		0.106	
5.- Central Otavalo#1 - Central Otavalo#2	1.2040		0.960		1.540	
6.- Subestación Otavalo-Subestación Cayambe	0.0885		0.098		0.1320	
7.- Subestación Otavalo-Central Cotacachi	0.724		0.568		0.816	
8.- Central Cotacachi-Central Atuntaqui	0.236		0.1785		0.296	
9.- Central Atuntaqui-C. D. Ibarra	0.420		0.518		0.562	

"DIAGRAMA DE IMPEDANCIAS"



- L1.- CARGA DE IBARRA
- L2.- CARGA DE ATUNTAQUI
- L3.- CARGA DE COTACACHI
- L4.- CARGA DE OTAYALO
- L5.- CARGA DE CAJANBE

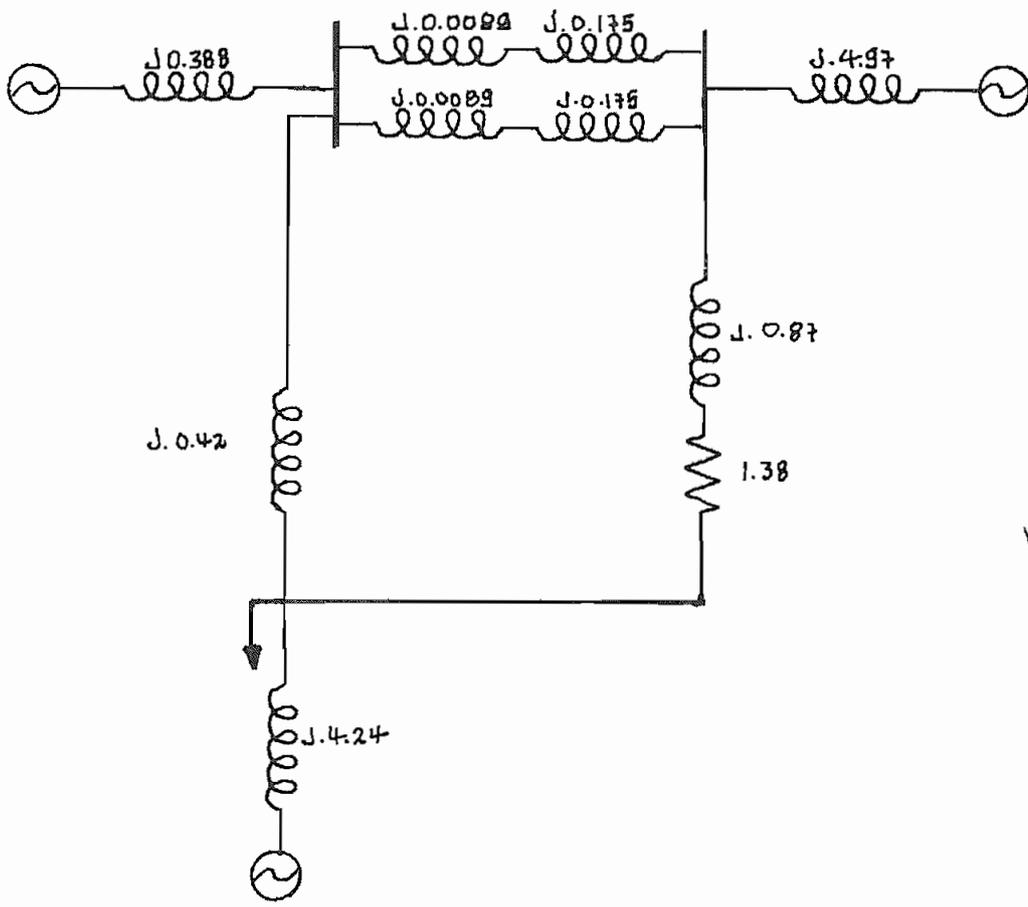


DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE IMPEDANCIAS

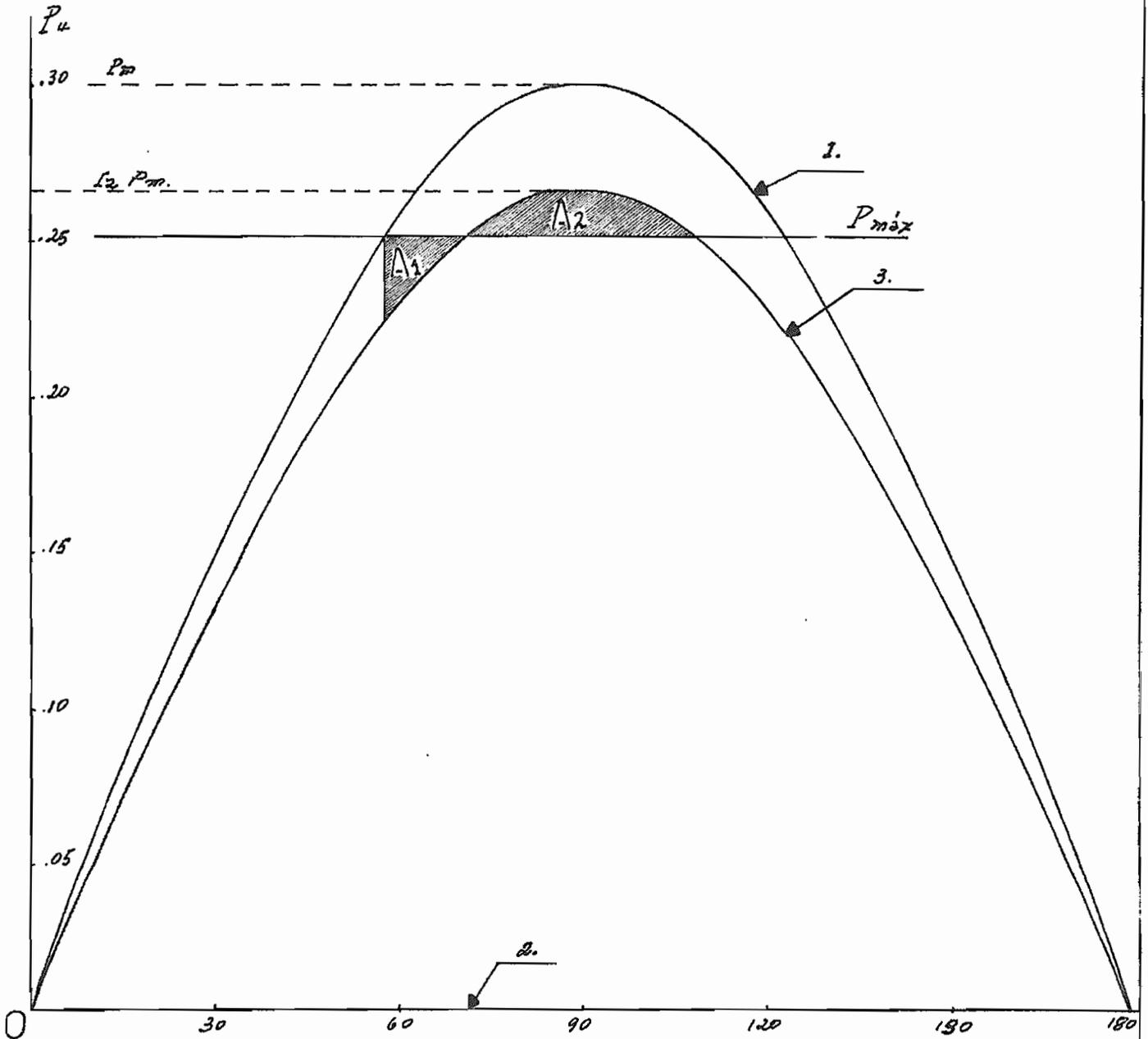
ESTUDIO Nº 1

FALLA EN LA LOCALIZACIÓN Nº 5

CURVA P - δ

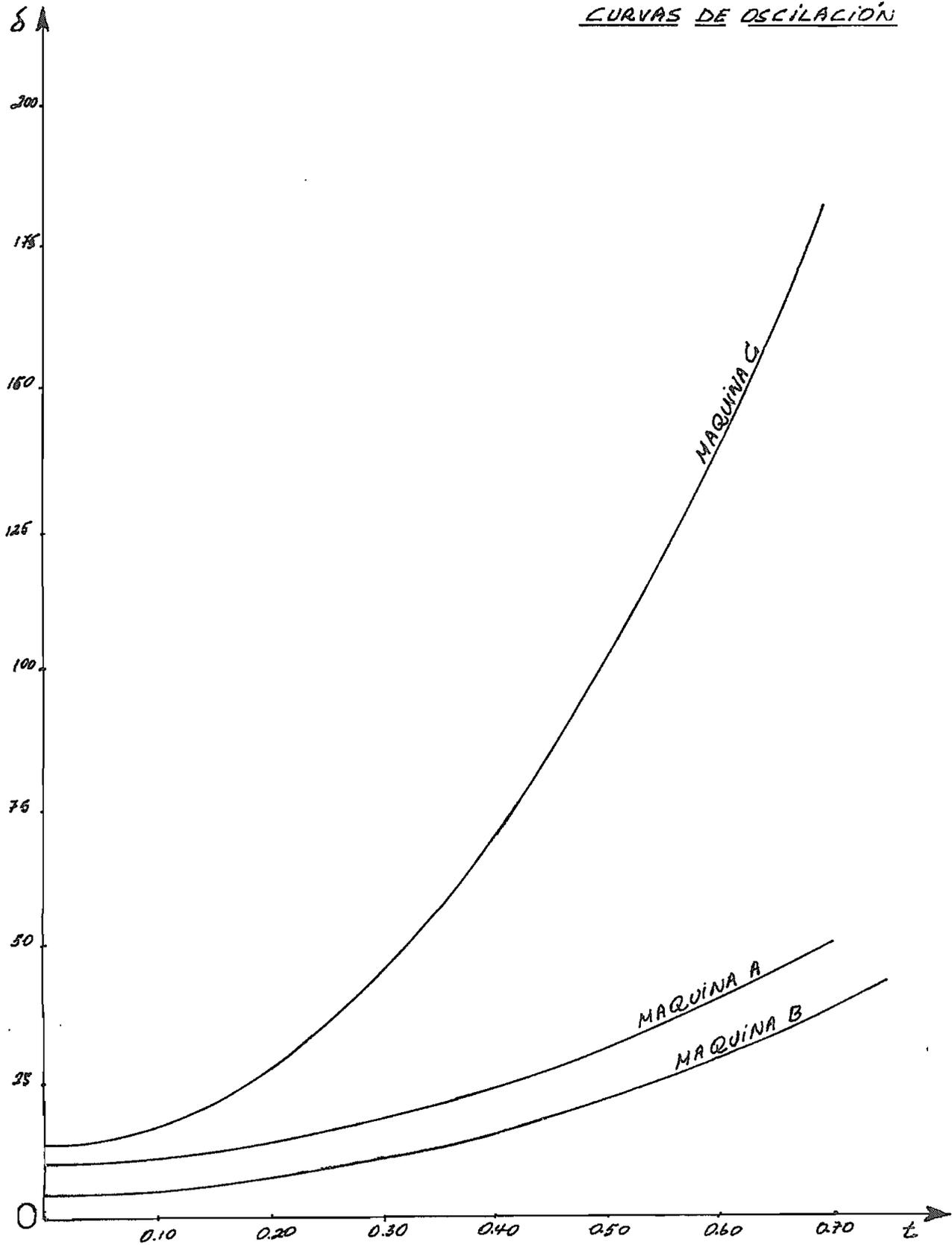
MARQUINA B

[Centrales Olavalo # 1 u # 2]



- 1. - ANTES DE LA FALLA.
- 2. - DURANTE LA FALLA.
- 3. - DESPUÉS DE LA FALLA.

FALLA EN LA LOCALIZACIÓN Nº 3
CURVAS DE OSCILACIÓN



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

CAPITULO I

- 1) Características del Sistema Ibarra - Cayambe
Instituto Ecuatoriano de Electrificación
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Marzo de 1968
- 2) Programa de Operación de la central hidroeléctrica El Ambi
División de Planificación de INECEL
1.967
- 3) Electrical Transmission and Distribution Systems
Westinghouse E. C.
1.964
- 4) Hydroelectric Handbook
Creager and Justin
John Wiley and Sons (Editores)
- 5) Standard Handbook for Electrical Engineers
A. E. Knowlton
Mc. Graw - Hill Book Company

CAPITULO II

- 6) Programa de Operación de la central hidroeléctrica El Ambi
División de Planificación de INECEL
1.967

CAPITULO III

- 1) Power Systems Stability
Kimbark
Editorial Jonh Wiley
- 2) Transmission and Distribution Reference Book
Westinghouse E. C.