

621.312134  
L795

PROYECTO DE UNA CENTRAL HIDRO-ELECTRICA PARA EL  
CANTON ZARUMA A BASE DE UN CENSO DE POBLACION Y  
SU PROYECCION DESPUES DE VEINTE AÑOS

INVENTARIO DE DOCUMENTOS  
CND. No. 2265 ✓

TESIS DE GRADO  
PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO EN ELECTRICIDAD



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Por: *Robelo Loaiza V.*  
ROBELO LOAIZA V.

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

( Art. sexto del Reglamento de exámenes y Títulos Profesionales de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.)

  
.....  
Robelo Loaiza V.

Guayaquil, Diciembre de 1967

DIRECTOR DE TESIS

*Sotomayor*  
.....  
Ing. Benigno Sotomayor.

PROFESOR

.....

PROFESOR

.....

Mi sincera GRATITUD para el Sr. Ing. Benigno Sotomayor, Director de esta Tesis, y para la Compañía Industrial Minera Asociada de Portovelo, cuyas colaboraciones han sido fundamentales para el desarrollo y presentación de este Proyecto.

Con todo respeto,

dedico esta Tesis

en honor de mi querida

ABUELITA.

" A MIS PADRES Y MAESTROS "



## I N D I C E

### INTRODUCCION

Antecedentes y Exposición de motivos que justifican el estudio y desarrollo de este Proyecto..... 3

### ANALISIS DEL SISTEMA HIDRO-ELECTRICO A PROYECTARSE:

1) Fuentes hidráulicas; determinación de los factores mediante los cuales se las pueda comparar para seleccionar las fuentes que más convengan. Potencia hidráulica a obtenerse de estas fuentes; potencia mecánica y eléctrica a deducirse; demanda que puede ser atendida con la potencia eléctrica; diferencias positivas y negativas entre la potencia hidráulica a disponerse y la demanda, forma de superar estas diferencias..... 6

### 2) LOCALIZACION DE LOS PUNTOS MAS IMPORTANTES PARA SU INSTALACION: OBRAS CIVILES: DESCRIPCION.

a) Bocatoma.-Obras a proyectarse y construirse; embalses, captaciones, rejillas, compuertas, muros... 13

b) Canal de aducción.- su longitud, su forma en sección transversal más conveniente, determinación de las dimensiones más adecuadas para escurrimiento de agua, de conformidad con el aforo efectuado a las fuentes a que se ha hecho referencia..... 16

c) Desarenadores.- su finalidad, elementos que lo constituyen y sus dimensiones..... 20

d) Tanque de presión.- su finalidad y dimensiones. Tubería de impulsión: finalidad y dimensiones..... 22

e) Casa de Máquinas..... 26

### 3) OBRAS ELECTRICAS:

- a) Determinación del número de unidades para la Central; especificación del tipo de turbinas a emplearse de acuerdo a su conveniencia. Cálculos para determinar la potencia eléctrica en cada unidad..... 27
- b) Tableros de control.- su finalidad. Cálculos de fallas y corto-circuitos; selección de los interruptores; protección con los diferentes tipos de relés. 33
- c) Sub-estación.- tipo de transformadores a utilizarse; estudio y cálculo de los mismos para su protección. Diagramas de conexión..... 66
- d) Transmisión de la energía eléctrica por medio de líneas de alta tensión desde la sub-estación hasta el lugar de su distribución . Determinación de los cables para estas líneas; su longitud, su protección y coordinación de los relés. Ligero análisis de los postes y tipos de aisladores a emplearse..... 71

### 4) PLANOS, DIAGRAMAS, Y REFERENCIAS PARA ESTA TESIS



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

Es tan evidente la evolución del hombre en el campo de las ciencias, que no es preciso ponderarla; La electricidad por ejemplo es un resultado de esa evolución y es tan importante que en nuestra era se ha hecho indispensable, pues el hombre ha sabido darle el uso más conveniente dentro de su vida individual y colectiva.

Son numerosos los factores que hacen de la electricidad una fuente de riqueza y progreso, los mismos que dan lugar a tantas utilidades en las ramas del comercio y la industria, tal es así que actualmente no puede ni debe existir ninguna ciudad por pequeña que sea que no necesite energía eléctrica: ya para su alumbrado, sus transportes, sus comunicaciones, para su industria, etc. e incluso los automóviles no pueden funcionar sin energía eléctrica para el encendido, el arranque y el alumbrado.

La energía eléctrica puede convertirse rápida y eficazmente en cualquier otra forma de energía, tal como la térmica, la mecánica, la lumínica, la química, y puede así mismo producirse en los lugares mejor convenientes, donde se disponga de energía hidráulica, la proximidad de minas de carbón, donde se obtenga sin dificultad el combustible, o en las riberas de las aguas navegables o cercanías de los puertos donde el transporte del combustible resulta económico. Además, la energía eléctrica se puede transportar económica y eficientemente a grandes distancias para su utilización en lugares donde sea más conveniente, como son los centros de población, fábricas e industrias.

Los numerosos usos y aplicaciones de la electricidad pueden conseguirse solamente si se posee un conocimiento completo

de las leyes de la corriente eléctrica, sus relaciones con el magnetismo, así como la manera de producirla y de obtener efectos electro-mecánicos y electro-químicos.



## ANTECEDENTES Y EXPOSICION DE MOTIVOS QUE JUSTIFICAN EL ESTUDIO Y DESARROLLO DE ESTE PROYECTO .-

Considerando el planteamiento de esta Tesis son muchos los motivos que merecen enunciarse, tan importantes, como la erección misma de este proyecto. Entre ellos, principalmente citaremos:

**P r i m e r o .-** La actual deficiencia del servicio eléctrico producida: por el crecimiento de la población, por la escasez de agua en los ríos que se encuentran instaladas las centrales hidroeléctricas y por el bajo rendimiento de las máquinas. Todas estas desventajas, se las podría explicar de la manera siguiente:

Para dotar del fluído eléctrico a la ciudad de Zaruma y al Campamento Minero de Portovelo, la South American Development Company Inc. (S.A.D.Co.) instaló en el año de 1927 una central hidroeléctrica denominada "Planta Amarillo" a orillas del río de su mismo nombre, con capacidad para 675 Kw repartida en los tres turbo-generadores de 225 Kw cada uno. Posteriormente, en el año 1936 instaló otra central hidroeléctrica a orillas del río Calera, con capacidad de 844 Kw repartida en dos turbo-generadores de 422 Kw cada uno, aumentando otra unidad de la misma capacidad para el año de 1946, contando de esta manera con 1266 Kw. Estas centrales se interconectaron para así dotar de servicio eléctrico a las dos poblaciones antes mencionadas.

Han transcurrido aproximadamente veinte años desde que se instaló la última unidad, y como es lógico, el crecimiento de la población se ha hecho presente, aumentando así una demanda de consumo eléctrico muy superior a la potencia generada, sin que ésta haya sido aumentada; consecuencia de esto, es que actualmente se tiene un pésimo servicio de alumbrado debido a la sobrecarga que ha producido una baja excesiva de voltaje.

Por otro lado, la escasez de agua en los ríos donde están instaladas las centrales, obliga a que en algunas épocas del verano, generalmente de septiembre a noviembre, no sea posible suministrar servicio de alumbrado a la población en las horas que simultáneamente todas las maquinarias del Campamento Minero entran en operación, ya que la potencia eléctrica que apenas se logra generar es utilizada únicamente para la alimenta-



ción de motores en los diferentes departamentos de trabajo.

Finalmente, el bajo rendimiento que en la actualidad tienen los generadores, es un motivo más para tener un servicio deficiente, puesto que el excesivo calentamiento en ellos nos está indicando en parte y claramente que algo de la energía se pierde dentro de la misma máquina, convirtiéndose en calor, que se disipa. Además, esta energía no es solamente pérdida si no que con el calentamiento que se tiene en su interior, se está limitando prácticamente su potencia utilizable, y además, con estas temperaturas que se alcanzan se está corriendo el riesgo de dañar el aislamiento.

Las pérdidas en vatios que originan el calentamiento de las máquinas cabe recordarlas: pérdidas en el arrollamiento del inducido y del inductor, pérdidas por contacto de las escobillas, pérdidas en el núcleo, o pérdidas por histéresis y corrientes parásitas, y, pérdidas en el reóstato que regula la corriente en el inductor.

S e g u n d o .- La presencia de otros ríos con caudal suficiente para generar una potencia eléctrica capaz de atender las necesidades de la ciudad y los pueblos vecinos que la rodean. El río Pindo es uno de estos ríos que más se presta para la situación e instalación de nuestra central hidroeléctrica en primer lugar, por poseer un caudal de agua apropiado que vá desde los 13 m<sup>3</sup>/s en épocas de verano, hasta los 20 m<sup>3</sup>/s en épocas lluviosas, evitando así el problema de la construcción de grandes embalses y compuertas de regulación, en el caso de tener poco o mucho caudal, respectivamente. De acuerdo a lo anteriormente enunciado, nuestra central tendría entonces un régimen pluvial, puesto que los mayores caudales se producen en invierno.

En segundo lugar este río tiene la gran ventaja de no distar mucho de la ciudad, puesto que la distancia es solamente de 11 Km<sup>1</sup>; evitándose también de esta manera, el alto costo que se tendría en la adquisición de una mayor cantidad de conductor y demás materiales para la transmisión de la energía.

---

(1) Valor obtenido del plano correspondiente a la Hoya de Zaruma y que se adjunta al final de esta Tesis.



Por último una ventaja más que nos proporciona este río es su notable caída, lo que es muy conveniente, porque con ello no sería necesario construir un canal de aducción de gran longitud para obtener una buena altura desde el tanque de presión hasta la casa de máquinas.

T e r c e r o .- La incrementación de la industria: Como quedó expuesto anteriormente, la South American Development Co. en 1927, comenzó también a efectuar trabajos para la explotación de minas en la búsqueda de metales, entre ellos: oro, plata y cobre; teniendo muy buenos resultados hasta el año 1950, en que dió por terminadas sus labores, formándose desde entonces una nueva Compañía "C.I.M.A" (Cía. Industrial Minera Asociada).

Desde entonces hasta nuestros días, la explotación en el subsuelo ha venido desapareciendo paulatinamente, y con ello también, la decadencia económica se aproxima alarmante. Todos estos problemas son los que hacen pensar que la ciudad de Zaruma después de muy poco tiempo ya no será un pueblo netamente minero, si no que tratará de encontrar nuevos cauces para su supervivencia, y ahí precisamente la necesidad de una buena y eficiente red de energía eléctrica que dé comienzo a la instalación de fábricas e industrias que fomenten la riqueza y progreso para evitar así el éxodo de familias y el desequilibrio económico de la ciudad.



Para el estudio del proyecto Pindo, que así se denominará en lo sucesivo la central hidroeléctrica a proyectarse, es necesario averiguar como primer paso, el crecimiento de la población en la ciudad de Zaruma hasta el año 1985.

Según estadísticas del Censo de Noviembre de 1962, la ciudad alcanzaba un total de 9.650 habitantes, con un crecimiento del 2 % anual. Para 1965 se estimaba unos 10.000 habitantes aproximadamente.

Para averiguar este crecimiento de población, recurrimos a la relación siguiente:

$$C = c ( 1 + r )^t \quad (1)$$

En que C es la población de la ciudad de Zaruma después de veinte años; c es la población estimada en 1965; r es el crecimiento anual por ciento de la población; y t el tiempo para el cual se desea saber el aumento de la población.

Luego, reemplazando en esta fórmula las cantidades numéricas, tenemos:

$$\begin{aligned}
C &= 10.000 ( 1 + 0.02 )^{20} \\
&= 10.000 ( 1.02 )^{20} \\
&= 10.000 \log 1.02 \times 20 \\
&= 10.000 \times 0.00860 \times 20 \\
&= 10.000 \times 0.17200 \\
\text{antilogaritmo de } 0.17200 &= 1.486 \\
C &= 14.860 \text{ habitantes.}
\end{aligned}$$

Para facilitar nuestros cálculos, aproximamos la población de Zaruma en 15.000 habitantes para el año 1985, o sea después de veinte años.

Para deducir la potencia eléctrica a instalarse se calcula un censo aproximado de la siguiente manera:

Considerando: 5 habitantes por familia  
Tenemos: 15.000 habitantes / 5 habitantes por familia  
Población: = 3.000 familias.

Las 3.000 familias económicamente repartidas en esta forma:

---

(1) Obtenido de las ecuaciones para intereses compuestos.

Para servicio RESIDENCIAL:

900 familias : radio	= 0,050 Kw	
alumbrado	= 0,050 Kw	
	<u>0,100 Kw/familia</u>	

carga: 900 x 0,100 = 90 Kw

1.500 familias : radio	= 0,050 Kw	
plancha	= 0,800 Kw	
alumbrado	= 0,200 Kw	
	<u>1,050 Kw/familia</u>	

carga: 1.500 x 1,050 = 1.575 Kw

400 familias : radio	= 0,050 Kw
plancha	= 0,800 Kw
alumbrado	= 0,500 Kw
licuadora	= 0,125 Kw
refrigerador	= 0,300 Kw
	<u>1,775 Kw</u>

carga: 400 x 1,775 = 710 Kw

200 familias : radio	= 0,050 Kw
plancha	= 0,800 Kw
alumbrado	= 0,700 Kw
licuadora	= 0,125 Kw
refrigerador	= 0,300 Kw
tocadiscos	= 0,050 Kw
tostadora	= 1,100 Kw
ventilador	= 0,100 Kw
	<u>3,225 Kw</u>

carga: 200 x 3,225 = 645 Kw

Total de carga eléctrica 3.020 Kw

Para servicio COMERCIAL: Esto incluye salones, tiendas, almacenes, bodegas, hoteles, pensiones, cines, iglesias, colegios, escuelas, consultorios, clínicas, hospitales, entre otras. Estimándose que la carga eléctrica es de 1,5 Kw para cada uno de ellos, y, aproximando a 400 el número de locales, se tendría u-



na demanda de 600 Kw para esta clase de consumo.

Para Servicio INDUSTRIAL hemos considerado los consumos que actualmente tiene la Compañía Minera, más las posibles instalaciones que se efectuaren posteriormente, llegando a considerar una demanda de 1.000 Kw, puesto que solamente la Compañía tiene alrededor de 700 Kw instalados.

Para servicio de alumbrado PUBLICO consideramos una demanda de 300 Kw incluyendo plazas, parques, calles y algunas entidades de servicio público gratuito.

Para calcular la posible potencia eléctrica tenemos que idear y aplicar un factor de diversidad para cada clase de consumo que se ha considerado.

CLASE DE CONSUMO	DEMANDA KW	FACTOR DE DIVERSIDAD <sup>(1)</sup>	POSIBLE POTENCIA KW
Residencial	3.020	0,40	1.208
Comercial	600	0,75	450
Industrial	1.000	0,80	800
Público	300	1,00	300
TOTAL			2.758

En esta forma, la posible potencia generada es de 2.758 Kw, mas, si tomamos en cuenta las pérdidas que deberán considerarse en la línea de transmisión, la potencia real a instalarse puede ser estimada en 3.000 Kw.

<sup>(1)</sup> El valor dado para cada factor de diversidad en el estudio de este proyecto, está basado en el mismo valor que la S.A.D.Co empleó para la instalación de las centrales Amarillo y Calera, estimándose desde luego, un pequeño aumento en cada uno de estos, debido al aumento existente de artefactos eléctricos desde esa época hasta la presente.

## ANALISIS DEL SISTEMA HIDROELECTRICO A PROYECTARSE

La central hidroeléctrica Pindo estaría ubicada a 11 Km de la ciudad de Zaruma, aprovechando las aguas de los ríos Luis y Ambocas, mediante una sola captación, que forma el mencionado río Pindo, teniendo además un canal de aducción común y abierto con una inclinación tal que permita una caída bruta de 50 m desde el tanque de presión, lugar donde termina el canal hasta las turbinas en la casa de máquinas. La tubería tendrá una extensión de 70,7 m y transportará un caudal suficiente de agua de 7,6 m<sup>3</sup>/s para generar 3.000 Kw en los alternadores.

Para determinar el caudal de agua disponible del río Pindo se encuentra instalado un limnómetro en el lugar mismo de la bocatoma.

Las lecturas de este limnómetro<sup>(1)</sup> durante el año 1965 fueron las siguientes:

MES	ALTURA ( m )	
	MINIMA	MAXIMA
Enero	0,47	1,34
Febrero	0,78	1,30
Marzo	0,80	1,30
Abril	0,86 *	2,45 *
Mayo	1,02	1,95
Junio	0,60	0,90
Julio	0,44	0,61
Agosto	0,37	0,41 *
Septiembre	0,33	0,49
Octubre	0,31 *	0,60
Noviembre	0,32	0,52
Diciembre	0,34	1,00

El área del río fué calculada en el mes de Diciembre, época en la cual el limnómetro indicaba una de las más bajas alturas.

(1) Regla graduada colocada en el río con el objeto de indicar la altura, de la cual se vá a deducir el gasto.



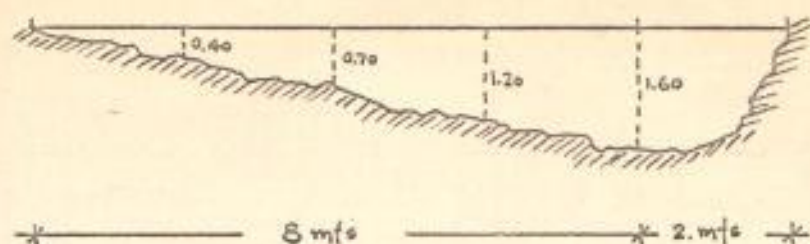


Diagrama # 1

El diagrama indica la forma que presenta el lecho del río, en el lugar donde se encuentra instalado el limnómetro, siendo su longitud de 10 m con profundidades medidas a intervalos iguales de 2 m.

Para facilitar el cálculo del área total hemos considerado 2 áreas triangulares cuyas bases son 8 m y 2 m con una altura común de 1,6 m.

$$A_1 = \frac{8 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}}{2} = 6,4 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \frac{2 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}}{2} = 1,6 \text{ m}^2$$

$$A_T = 6,4 \text{ m}^2 + 1,6 \text{ m}^2 = 8,0 \text{ m}^2$$

El perímetro mojado del río tiene una longitud de 11,20 m

$$p = 11,20 \text{ m}$$

El radio hidráulico es la relación del área al perímetro p

$$R = \frac{A}{p}$$

$$R = \frac{8,0 \text{ m}^2}{11,2 \text{ m}} = 0,714 \text{ m}$$

Para calcular la velocidad del agua recurrimos a la ecuación

$$U = C \sqrt{R I} \quad (1)$$



En que U es la velocidad del agua, C es una constante, R el radio hidráulico, I la pendiente.

El valor del coeficiente de rugosidad n para usarlo en la fórmula de Manning, es igual a 0,030 para río con rugoso lecho de piedras y con vegetación en los bordes.

$$n = 0,030 \quad (1)$$

Para valores de R = 0,714 y n = 0,030 obtenemos: C

$$C = 31,5 \quad (2)$$

La pendiente del río tiene un valor de I = 0,004

Por tanto, la velocidad del río será:

$$U = 31,5 \sqrt{0,714 \times 0,004}$$

$$U = 1,68 \text{ m/s}$$

Conocida la velocidad y el área del río, el caudal disponible lo obtenemos de la ecuación:

$$Q = U A$$

$$Q = 1,68 \text{ m/s} \times 8,0 \text{ m}^2$$

$$Q = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para la determinación del caudal de agua necesario para generar una potencia eléctrica útil de 3.000 Kw, tenemos que tomar en cuenta las pérdidas que se producen en los alternadores turbinas y tuberías.

Según datos proporcionados por la Empresa Eléctrica del Ecuador Inc. estas pérdidas son:

Tubería de impulsión	5 %
Turbinas	10 %
Alternadores	6 %

(1-2) Valores obtenidos de: "Hidráulica" de Francisco J. Domínguez, Editorial Universitaria S.A. III edición, páginas # 553 y # 644.

De la fórmula:

$$\text{Potencia eléctrica ( Kw )} = \frac{0,736 \times Q \times H \times 1.000 \times \varphi}{75} \quad (1)$$

Deducimos el caudal de agua en  $\text{m}^3/\text{s}$

$$Q = \frac{75 \times \text{Potencia eléctrica}}{736 \times H \times \varphi}$$

Donde:

altura  $H = 50 \text{ m} - \frac{5 \times 50}{100}$

$$H = 47,5 \text{ m}$$

Y: rendimiento de turbinas x alternadores

$$\varphi = 0,90 \times 0,94$$

$$\varphi = 0,846$$

Luego:

$$Q = \frac{75 \times 3.000 \text{ Kw}}{736 \times 47,5 \text{ m} \times 0,846}$$

$$Q = 7,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

---

(1) Obtenida de: "Hidráulica" por Francisco J. Domínguez, Editorial Universitaria S.A. III edición, página # 82.



LOCALIZACION DE LOS PUNTOS MAS IMPORTANTES PARA SU INSTALACION.  
OBRAS CIVILES : DESCRIPCION.

Los puntos más importantes para la instalación de una central hidroeléctrica son : Bocatoma, Tanque de Carga, y Casa de Máquinas, los mismos que para su estudio describiremos a continuación.

BOCATOMA .- Estaría ubicada en la margen derecha de un remanso que forma el Pindo aguas abajo de la confluencia del río Luis con el Ambocas, en el sitio denominado "El Puente". Este lugar ha sido seleccionado dadas las características propicias que presenta el terreno para la construcción de las obras, cuya finalidad es facilitar la captación de las aguas del río. De esta manera se ha considerado la inexistencia de peñascos y de tierras de fácil deslizamiento, excluyendo así el peligro de que al precipitarse sobre las construcciones obstruyan las tomas y hasta en algunos casos ocasionen su destrucción. Además, en este sitio la amplitud del río es relativamente pequeña, lo que es beneficioso, pues con ello la longitud del muro de retención sería limitada, significando así una economía para este proyecto.

Con el fin de mantener constante la cantidad de agua en el canal, se fijará en su entrada una compuerta de fondo, originando contracción solamente por el lado superior, con la su presión por el fondo y en los lados. Para este tipo de compuertas, considerando un escurrimiento bidimensional (que se puede tomar en cuenta por unidad de ancho) el coeficiente de gasto es el teórico  $m = 0,611^{(1)}$ , hecho confirmado por la experimentación; especialmente la de Escande, Henry y las recientes en Chile de A. Cofré y R. Buchheister.

Para determinar la altura que se produce aguas arriba de la compuerta, consideramos, que la entrada del canal sea de una forma rectangular de  $4,8 \text{ m}^{(2)}$  de anchura; la compuerta de fon-

---

<sup>(1)</sup> Obtenido de: "Hidráulica" de Francisco J. Domínguez, Editorial Universitaria S.A. III edición, página # 182

<sup>(2)</sup> Valor deducido de los cálculos efectuados para las dimensiones del canal de aducción.

do de todo el ancho, levantada 0,50 m para que escurra un gasto de  $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , si el régimen del canal da una altura de agua de 1,6 m. <sup>(1)</sup>

El gasto unitario es:  $q = \frac{7,6 \text{ m}^3/\text{s}}{4,8 \text{ m}}$

$$q = 1,58 \text{ m}^2/\text{s}$$

Altura crítica:  $h_c = 0,468 q^{2/3}$  <sup>(2)</sup>

$$h_c = 0,468 \sqrt[3]{1,58^2}$$

$$h_c = 0,63 \text{ m}$$

La comprobación es fácil: con esta altura obtenemos el área

$$A = 0,63 \text{ m} \times 4,8 \text{ m}$$

$$A = 3,02 \text{ m}^2$$

Por ser de forma rectangular la profundidad media es la profundidad de velocidad crítica, o sea:

$$h = \frac{1}{2} (0,63)$$

$$h = 0,315 \text{ m}$$

Es decir, la velocidad crítica  $U_c = \sqrt{2gh}$

$$U_c = \sqrt{2 \times 9,8 \times 0,315}$$

$$U_c = 2,48 \text{ m/s}$$

Y por lo tanto se verifica el gasto:

$$Q = U A$$

$$Q = 2,48 \times 3,02 = 7,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

---

<sup>(1)</sup> Dato obtenido de los cálculos efectuados para las dimensiones del canal de aducción.

<sup>(2)</sup> "Hidráulica" de Francisco J. Domínguez, Editorial Universitaria S.A. III edición, página # 72 y # 73



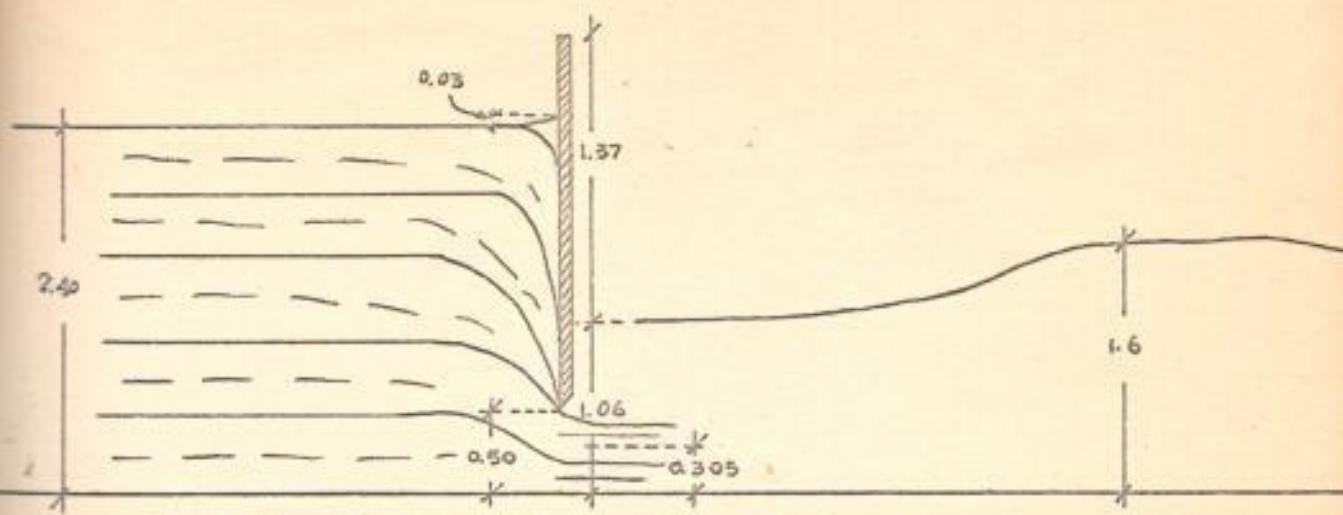


Diagrama # 2

Formando la razón  $\frac{h}{h_c} = \frac{1,6}{0,63} = 2,54$

La ecuación del gasto es  $q = ma\sqrt{2gh}$   
 $1,58 = 0,611 \times 0,5 \sqrt{2 \times 9,8 \times h}$

de donde:  $h = 1,37 \text{ m}$

La razón  $\frac{h}{a} = \frac{1,37}{0,5} = 2,74$

Con la ordenada 2,74 para el parámetro 2,54 (interpolando)  
 Vemos que corresponde a la abscisa: <sup>(1)</sup>

$$\frac{h_o}{h_c} = 3,81$$

o sea:  $h_o = 3,81 \times 0,63 \text{ m}$   
 $h_o = 2,40 \text{ m}$

<sup>(1)</sup> "Hidráulica" de Francisco J. Domínguez, Editorial Universitaria S.A. III edición, página # 187. Gráfico de Cofré y Buchheister, figura # 68



Velocidad afluyente  $U_0 = \frac{q}{m}$

$$U_0 = \frac{1,58 \text{ m/s}}{2,4 \text{ m}} = 0,65 \text{ m/s}$$

$$\frac{U_0}{2g} = \frac{(0,65)}{2 \times 9,8} = 0,03 \text{ m}$$

$$h = h_0 + \frac{U_0}{2g} - h$$

$$h = 2,4 + 0,03 - 1,37$$

$$h = 1,06 \text{ m}$$

Todos los valores calculados están indicados claramente en el diagrama # 2.

En la construcción de la Bocatoma a más de las compuertas será también necesario colocar rejillas para evitar el paso de basuras y cuerpos flotantes; generalmente se sitúan a continuación de la compuerta.

En rejillas de sección rectangular las pérdidas de carga que se obtienen están dadas por la fórmula;

$$\lambda = \left( \frac{1}{u} - 1 \right)^2 \left( 1 + \frac{s}{b} \right)^2 + \frac{s^2}{b}$$

Donde  $u$  puede calcularse en función de la razón de las anchuras  $\frac{b}{s+b}$ .

Siendo  $s$  la anchura de los barrotes y  $b$  la separación entre ellos.

CANAL DE ADUCCION .- El Canal de Aducción a utilizarse es de tipo abierto, o sea, un canal donde el líquido fluye con una superficie libre sujetándose solamente a la presión atmosférica; su construcción será sobre un terreno de ripio suelto que admite taludes de 1 de base por 2 de altura con una pendiente de 0,001.

Para determinar las dimensiones que deberá tener la sección transversal, no consideraremos la excavación que como margen de seguridad suele también dejarse, pues aceptamos, como es más lógico, que el nivel del agua ocupe toda la altura del terreno excavado del lado más bajo, y que ese borde bajo sea reforzado con el material de excavación.

La forma que conviene dar a una sección de magnitud dada, para que escurra mayor caudal posible: es lo que se ha llamado el "perfil de mejor escurrimiento". También se puede calcular la forma más conveniente de una sección de magnitud dada, capaz de conducir un gasto conocido, para producir la "menor filtración", aceptando que esta es proporcional a la raíz de la altura. En los tratados de Hidráulica, de ordinario se aborda el problema teórico irrealizable del perfil de mejor escurrimiento de un lecho excavado en terreno transversalmente horizontal, longitudinalmente inclinado con la pendiente  $i$  del canal, cuya excavación total es la sección mojada.

Por los ya conocidos teoremas de geometría sabemos que: entre las superficies de igual perímetro, la de mayor área corresponde al círculo; de los polígonos de  $n$  lados, el de mayor área es el regular; de los polígonos de lados de longitud dada, el de mayor área es el inscriptible, y de los polígonos de ángulos dados, el de mayor área es el circunscriptible. Respecto a estos últimos, es necesario notar que la sección de un canal puede considerarse un medio polígono que cumpla esas condiciones.

En consecuencia, la mejor sección es un semicírculo, entre las secciones trapeziales, el semihexágono regular, entre los rectángulos, el semicuadrado; entre los triángulos, el semicuadrado. Entre los trapecios de ángulos dados, el de mayor área es el circunscriptible en una semicircunferencia, esto indica que el lado inclinado de la sección es igual a la semianchura superficial.

En el caso nuestro, no se pueden aceptar formas de sección semicirculares, pues, además de ser de difícil construcción, el talud lateral no puede superar al talud natural del terreno; en lechos revestidos es, en cambio, posible dicha forma de sección.



Para calcular las dimensiones del canal de aducción, damos una base de 3,2 m para una sección de forma trapezoidal, cuyos taludes, como se explicó anteriormente, están en relación de 2 a 1.

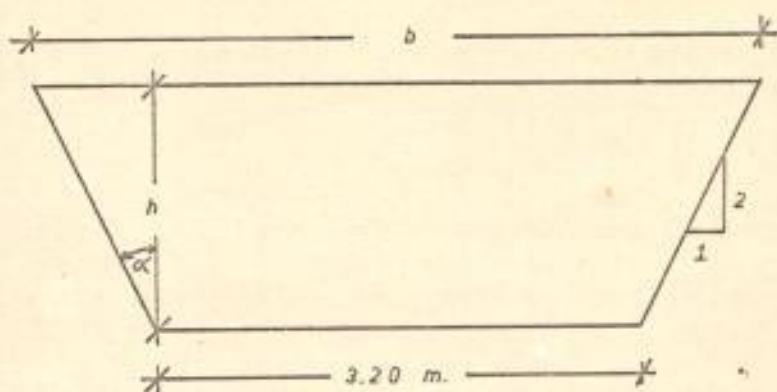


Diagrama # 3

Sabemos que el gasto  $Q = 7,6 \text{ m}^3/\text{s}$

Por las características del canal el coeficiente de rugosidad para usarlo en la fórmula de Manning es:

$$n = 0,025 \quad (1)$$

Considerando la pendiente  $I = 0,001$

Formamos la razón:

$$\frac{Qn}{\sqrt{I}} = \frac{7,6 \times 0,025}{\sqrt{0,001}} = 6$$

Con este valor entramos al abaco de Lehmann <sup>(2)</sup> horizontalmente hasta cortar la recta  $d = 3,2$  que es la anchura de la base. Desde este punto bajando verticalmente hasta la curva correspondiente a la sección trapezoidal de  $\text{tg} \alpha = 0,5$  encontramos que la corta a la altura de  $\frac{hn}{d} = 0,5$  es decir, que la altura de movimiento uniforme es:

$$hn = 0,5 \times 3,2 \text{ m}$$

$$hn = 1,6 \text{ m}$$

<sup>(1)</sup> "Hidráulica" por Francisco J. Domínguez, Editorial Universitaria S.A., III edición, página # 553-554

<sup>(2)</sup> Adjunto al final de esta Tesis.

Conocida la altura del canal, su sección transversal será:

$$A = \frac{1}{2} (a + b) h$$

$$A = \frac{1}{2} (3,2 + 3,2 + 2 h \operatorname{tg} \alpha) h$$

$$A = \frac{1}{2} (3,2 + 3,2 + 2 \times 1,6 \times 0,5) 1,6$$

$$A = 6,4 \text{ m}^2$$

La superficie libre del canal tendrá una amplitud de:

$$b = 3,2 + 2 \times 1,6 \times 0,5 = 4,8 \text{ m}$$

Por tanto, las dimensiones del canal serán las siguientes:

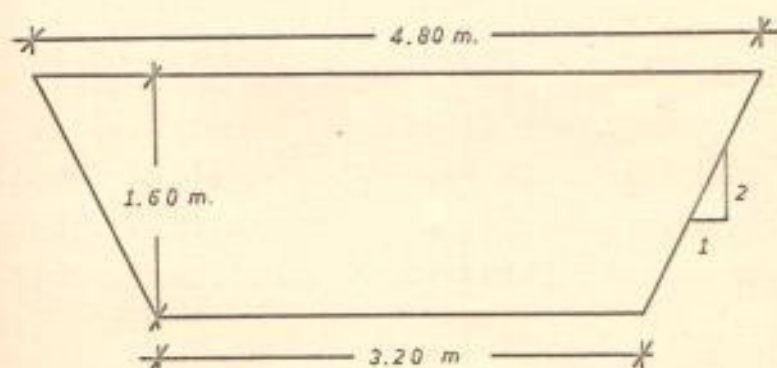


Diagrama # 4

El perímetro mojado de la sección es:

$$p = 3,2 + 2 h \sqrt{1^2 + 0,5^2}$$

$$p = 3,2 + 2 \times 1,6 \sqrt{1,25}$$

$$p = 3,2 + 3,2 \times 1,11$$

$$p = 6,75 \text{ m}$$

El radio hidráulico  $R = \frac{\text{Area } (A)}{\text{perímetro mojado } (p)}$

$$R = \frac{6,4 \text{ m}}{6,75 \text{ m}}$$

$$R = 0,94 \text{ m}$$

Según la fórmula de Manning para valores de  $R = 0,94$  y  $n = 0,025$  (interpolando) tenemos:



$$C = 39,6 \quad (1)$$

La velocidad del agua en el canal será:

$$U = C \sqrt{R I}$$

$$U = 39,6 \sqrt{0,94 \times 0,001}$$

$$U = 1,20 \text{ m/s}$$

Valor correspondiente a la velocidad media para no provocar erosión de las paredes. (2)

DESARENADOR .- La construcción de un desarenador en el canal de aducción es con el objeto de que gran cantidad de arena que arrastra el agua se deposite en su fondo. Para calcular sus dimensiones estimaremos una pendiente menor a la del canal, reduciendo en esta forma la velocidad del agua que permitirá la fácil sedimentación de la arena; el desarenador tendrá una longitud de 10 m y su sección transversal, al igual que el canal, será de forma trapecial; el material para su construcción será concreto.

Dadas las características del desarenador el coeficiente de rugosidad, para usarlo en la fórmula de Manning es:

$$n = 0,013 \quad (3)$$

Estimando una pendiente  $I = 0,00002$  y una base de 5,5 m con taludes de 1 a 2. Con el gasto  $Q = 7,6 \text{ m}^3/\text{s}$  formamos la razón:

$$\frac{Qn}{\sqrt{I}} = \frac{7,6 \times 0,013}{\sqrt{0,00002}} = 22,1$$

Con este valor entramos al abaco de Lehmann horizontalmente hasta cortar la recta  $d = 5,5$  que es la anchura de la base. Desde este punto verticalmente hasta la curva correspondiente a la sección trapecial de  $\text{tg } \alpha = 0,5$ ; encontramos que la corta a la altura de:



$$\frac{hn}{d} = 0,45$$

Sea una altura de  $hn = 0,45 \times 5,5 \text{ m}$

$$hn = 2,47 \text{ m}$$

Conocida la altura normal  $hn$  del desarenador, la sección transversal será:

$$A = \frac{1}{2} ( a + b ) h$$

$$A = \frac{1}{2} ( 5,5 + 5,5 + 2 h \operatorname{tg} \alpha ) h$$

$$A = \frac{1}{2} ( 11,0 + 2 \times 2,47 \times 0,5 ) 2,47$$

$$A = 16,64 \text{ m}^2$$

Por tanto las dimensiones que deberá tener el desarenador son:

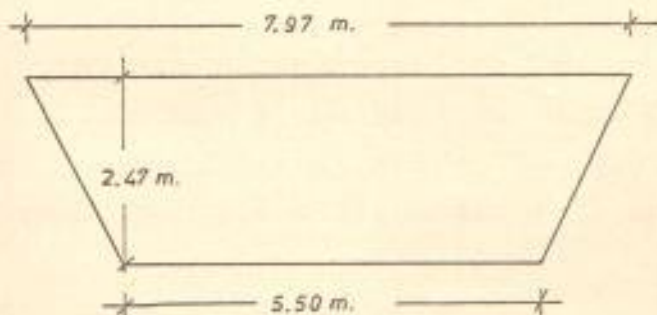


Diagrama # 5

De donde; el perímetro mojado de la sección es:

$$p = 5,5 + 2 h \sqrt{1 + 0,5}$$

$$p = 5,5 + 2 \times 2,47 \sqrt{1,25}$$

$$p = 11 \text{ m}$$

El Radio hidráulico  $R = \frac{A}{p}$

$$R = \frac{16,64 \text{ m}^2}{11 \text{ m}}$$

$$R = 1,51 \text{ m}$$

Para valores de  $R = 1,51$  y  $n = 0,013$

$$C = 82,4^{(1)}$$

De la fórmula:

$$U = C \sqrt{R I}$$

$$U = 82,4 \sqrt{1,51 \times 0,00002}$$

$$U = 0,45 \text{ m/s}$$

Correspondiente a la velocidad del agua en el desarenador.

TANQUE DE CARGA .- Este, admitirá un gasto de  $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , el mismo que deberá salir por medio de la tubería hacia las turbinas en la Casa de Máquinas; su construcción será de concreto y de forma rectangular. Estará provisto de un vertedero lateral o aliviadero usado para eliminar excesos de gasto, así como también, de una compuerta en su parte final para vaciarlo completamente cuando por razones de mantenimiento o reparaciones sea necesario.

Para calcular las dimensiones del Tanque, estimamos una pendiente  $I = 0,00001$  y una base de  $6 \text{ m}$ . Con el coeficiente de rugosidad  $n = 0,013$  y el gasto  $Q = 7,6 \text{ m}^3/\text{s}$  y deducimos la altura normal, por medio del abaco de Lehmann.

$$\text{La razón: } \frac{Qn}{\sqrt{I}} = \frac{7,6 \times 0,013}{\sqrt{0,00001}} = 31,2$$

Con este valor entramos al abaco de Lehmann, horizontalmente hasta la recta  $d = 6$  que es la anchura de la base. Desde esta intercepción verticalmente hasta la curva correspondiente a la sección rectangular, encontramos el valor de:

$$\frac{hn}{d} = 0,60$$

De donde:

$$hn = 0,6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$$

$$hn = 3,6 \text{ m}$$



Las dimensiones y forma del Tanque de Carga pueden apreciarse en el diagrama # 6, donde hemos asumido la longitud de 8 m para obtener una capacidad de 172,8 m<sup>3</sup> de agua.

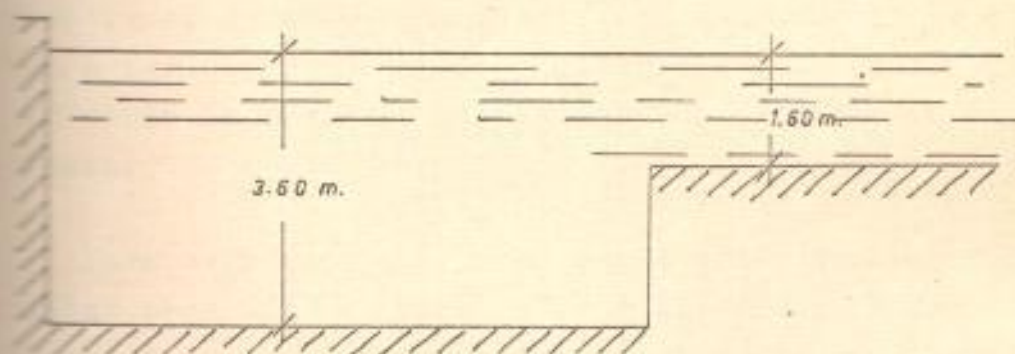
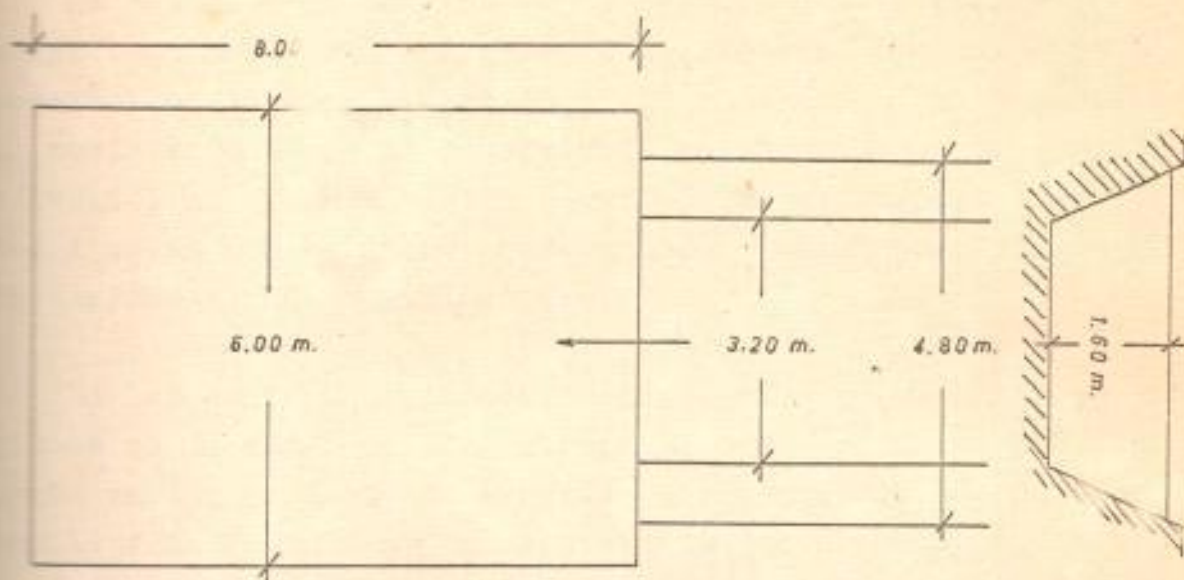


Diagrama # 6

TUBERIA DE IMPULSION .- La velocidad del agua en la tubería de impulsión también tiene su limitación proveniente de la necesidad de evitar grandes variaciones de presión en golpes de ariete, o las variaciones que acompañan a las grandes velocidades y ocasionan desperfectos en las juntas.

Se llama golpe de ariete a la sobrepresión que se produce

en una cañería que tiene movimiento uniforme y en que una válvula final se cierra algo o del todo, llamándose en este caso golpe de ariete positivo; o bien, se abre más de lo que estaba: golpe de ariete negativo.

La sobrepresión creada en la válvula que se cierra o abre se propaga hacia aguas arriba de la cañería como una onda de presión, hasta el comienzo de dicha cañería, si allí encuentra un recipiente se refleja volviendo hacia aguas abajo hacia la válvula final, donde vuelta a reflejarse se propaga nuevamente hacia aguas arriba, pero amortiguándose cada vez, debido a los frotamientos, hasta extinguirse. <sup>(1)</sup>

En las centrales hidroeléctricas, en que las turbinas provistas de un regulador de velocidad, cuya acción es precisamente variar el gasto de admisión de la máquina, de acuerdo con la demanda instantánea de potencia, continuamente se están produciendo golpes de ariete que alterando el régimen también continuamente, dificultan algo la admisión misma que tratan de regular. Además, los accidentes bruscos pueden acarrear ciertos bruscos del regulador que se traducen en golpes de ariete positivos, de gran intensidad: Las sobrepresiones positivas, van a ser soportadas por el material de la cañería, que debe ser capaz de resistir las fatigas accidentales que les corresponden.

Para averiguar el diámetro más conveniente que produzca la máxima economía, se circunscribe el cálculo a diámetros poco diferentes entre sí, de modo que el espesor no varía; por eso el costo alrededor de un diámetro dado, resulta proporcional al diámetro y se estima suficiente en la resolución de los problemas de la práctica introducir la fórmula sencilla de costo:

$$C = \delta L D$$

Donde D = Diámetro de la cañería instalada, L su longitud, y el coeficiente  $\delta$  que es variable según la clase de material

---

<sup>(1)</sup> "Hidráulica" por Francisco J. Domínguez, Editorial Universitaria S.A. III edición, página # 713



y las circunstancias comerciales.

Para los cálculos de la tubería, tomamos como referencia el abaco de Lamont,<sup>(1)</sup> del cual, por el método de tanteo encontraremos el diámetro de la cañería.

Sabemos que el caudal de agua es  $Q = 7.600$  lts/s con una pérdida de carga de 0,05. El material de la tubería es acero remachado y la temperatura del agua  $10^{\circ}\text{C}$ .

El diámetro encontrado tiene que verificar con el gasto dado y la pérdida de carga. Poniendo un diámetro en la línea 6, se une ese punto con el gasto  $Q = 7.600$ , recta que se prolonga hasta la línea de cambio. Intercepta esta recta un valor de UD en la línea 4. Llevando este valor UD a la línea 10 y uniéndolo con  $T = 10^{\circ}\text{C}$  en la línea 11, se prolonga hacia arriba esa recta hasta la línea 9. De ahí subimos verticalmente a la curva  $\frac{D}{e}$  (cuyo valor se obtiene de la línea 8). Así se obtiene un valor de  $\lambda$  que se saca a la línea 1 y que se une con el punto determinado en la línea de cambio, interceptando sobre la línea 2 un valor de  $J$ , que es la pérdida de carga estimada en la tubería.

En el cuadro siguiente van los tanteos hechos para distintos valores de diámetro:

L I N E A						
6	8	4-10	9	1	2	3
DIAMETRO D =	$\frac{D}{e}$	UD	Re	$\lambda$	J	U
1,30	144	7,6	$6 \times 10$	0,035	0,048	6,0
1,28	142	7,8	$6,1 \times 10$	0,033	0,050	6,2

<sup>(1)</sup> Adjunto al final de esta Tesis, y obtenido del Texto "Hidráulica" por Francisco J. Domínguez.

Como puede verse, el diámetro que satisface la pérdida de carga es de 1,28 m. Evidentemente, una cañería de este último diámetro no existe en el comercio, de modo que habríamos de colocar la inmediatamente mayor existente que sería el diámetro calculado en el primer tanteo, es decir, un diámetro de 1,3 m.

CASA DE MAQUINAS .- Estaría ubicada en la ribera derecha del río en el sitio denominado "Los Ceibos", lugar de fácil acceso y con suficiente amplitud para su construcción. En su interior irán los 3 generadores trifásicos de 1000 Kw cada uno que totalizarán los 3.000 Kw que será la potencia instalada en la central, y que serán accionados por tres turbinas horizontales tipo Francis de 1.500 H.P. cada uno.

Sobre un costado de la Casa de Máquinas, y al aire libre, irá el transformador elevador de voltaje conectado directamente a las barras de alta tensión. De estas barras partirá una línea de transmisión de 22.000 voltios hacia Zaruma.

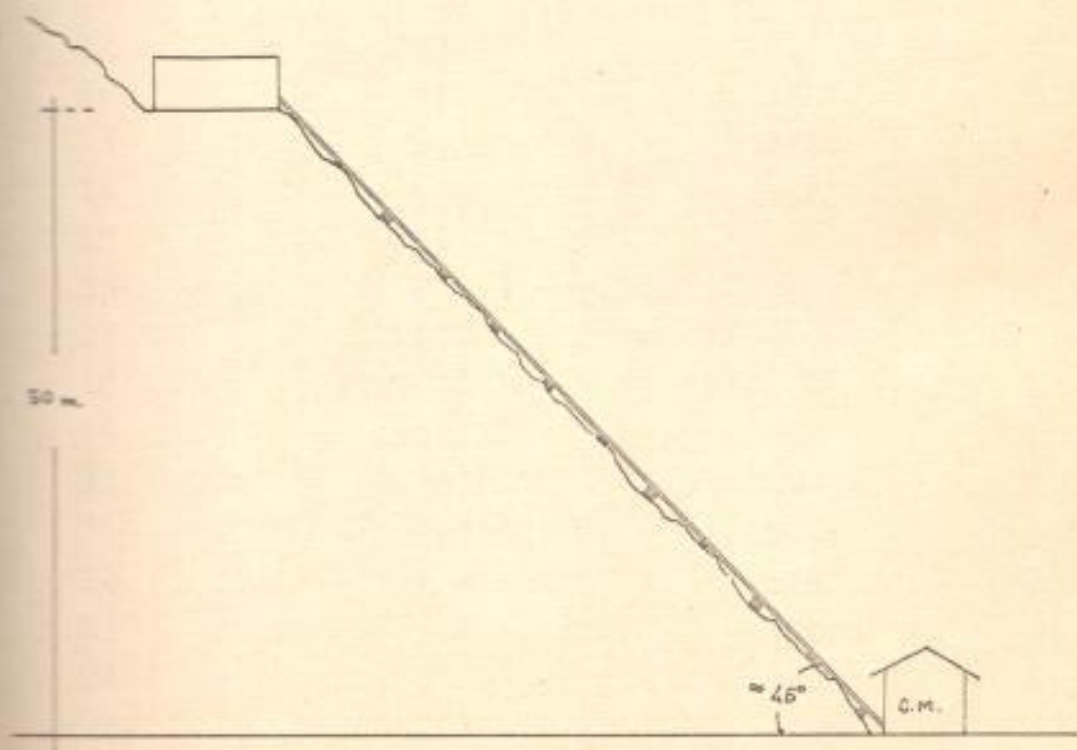


Diagrama # 7



## OBRAS ELECTRICAS

DETERMINACION DEL NUMERO DE UNIDADES PARA LA CENTRAL Y ESPECIFICACION DEL TIPO DE TURBINAS A EMPLEARSE.- La potencia eléctrica de 3.000 Kw a instalarse en esta central, se la ha considerado repartida en tres turbo-generadores, cada uno con capacidad de 1.000 Kw. Esto obedece a una deducción de la curva de carga obtenida de las centrales hidroeléctricas Calera y Amarillo en un día cualquiera de operación. Con los datos que a continuación se anotan, procederemos luego a graficarla.

HORA DEL DIA	PLANTA CALERA Kw.	PLANTA AMARILLO Kw.	TOTAL Kw.
6	660	320	980
7	660	390	1.050
8	660	460	1.120
9	660	440	1.100
10	750	480	1.230
11	970	510	1.480
12	760	490	1.250
13	940	490	1.430
14	930	490	1.420
15	950	500	1.450
16	920	490	1.410
17	970	500	1.470
18	1.020	530	1.550
19	1.290	560	1.850
20	1.300	560	1.860
21	1.240	560	1.800
22	1.100	520	1.620
23	980	500	1.480
24	870	480	1.350
1	750	490	1.320
2	700	450	1.300
3	660	420	1.250
4	660	400	1.350
5	660	350	1.380

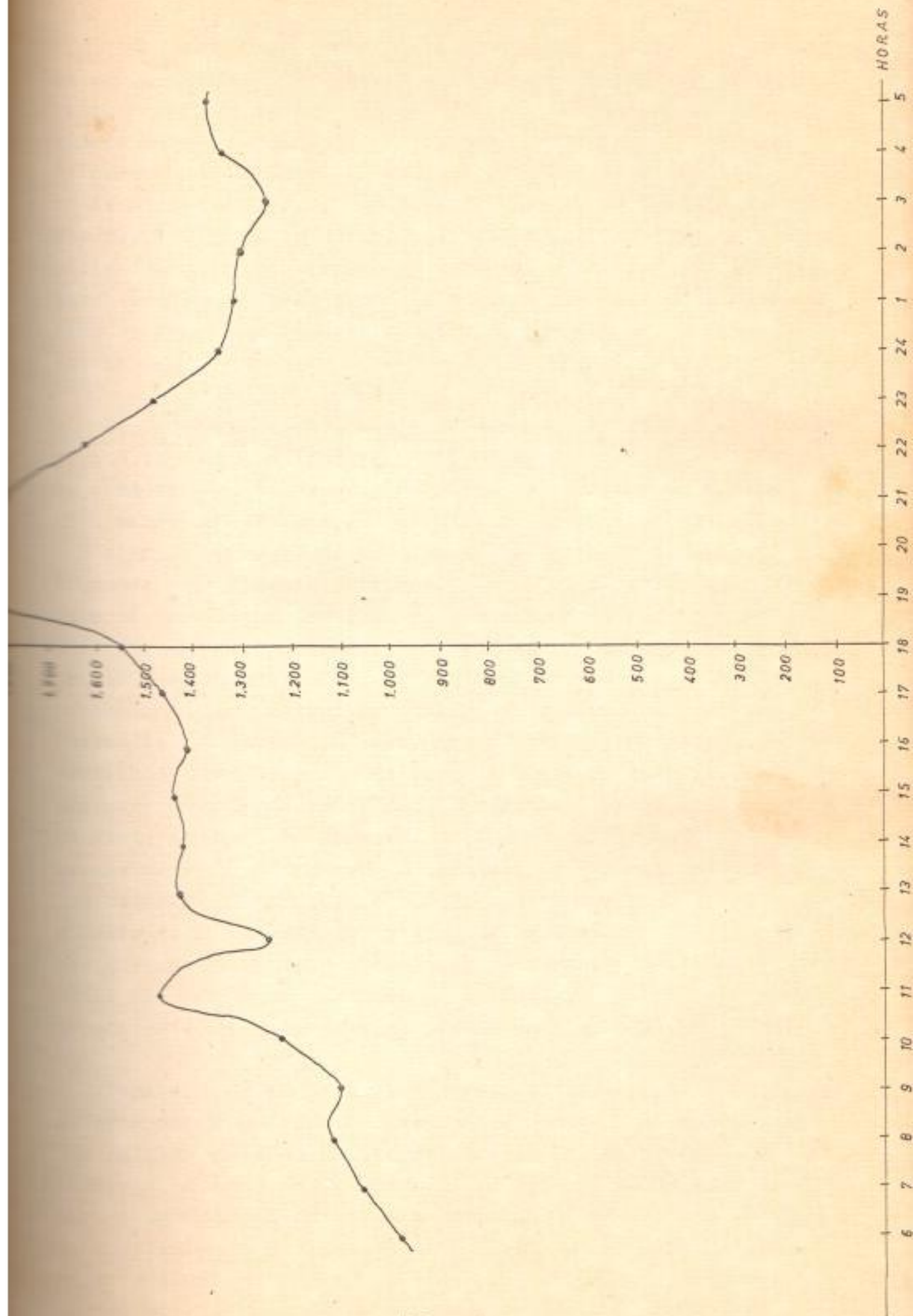


Diagrama # 8



Como puede observarse en la curva, a la hora 6 corresponde la carga mínima de 980 Kw, y a la hora 20 la máxima carga de 1.860 Kw. El empleo de 3 generadores de 1.000 Kw cada uno, sería lo más conveniente, pues operando primero con una unidad, y luego con 2 en paralelo se atendería suficientemente la demanda mínima y máxima, respectivamente; el tercer grupo sería una reserva de energía para satisfacer las necesidades de servicio conforme éstas vayan en aumento, o también podría utilizarse como emergencia cuando por razones de mantenimiento o daño se tenga que separar de servicio uno de los 2 grupos en operación.

Los generadores a instalarse serán de corriente alterna, ya que en la actualidad, más del 90 % de la energía eléctrica se produce y se transporta en forma de corriente alterna. Una gran parte de esta energía se utiliza como corriente alterna, por ejemplo, para motores, hornos eléctricos y muchos otros tipos de receptores eléctricos, y para el alumbrado. En muchos casos, sin embargo, se requiere suministrar la energía eléctrica en forma de corriente continua, aun cuando las distribuciones sean de alterna. Por ejemplo, se necesita corriente continua para cargar las baterías de acumuladores, para electrólisis y para teléfonos. Los tranvías y ferrocarriles eléctricos también necesitan de esta clase de energía. Se usa aún corriente continua en muchos barrios de algunas ciudades. Su ventaja principal consiste en poder emplear baterías de acumuladores para asegurar la continuidad del servicio, ya que los motores de corriente continua se adaptan bien a las necesidades de los ascensores y prensas, dos tipos de aplicaciones que absorben una proporción considerable de la fuerza motriz. (La corriente continua para el servicio urbano se va, no obstante, reemplazando por redes de alterna).

Para el transporte de la energía eléctrica, la corriente alterna presenta múltiples ventajas, siendo una de las primeras la gran economía que se obtiene en la utilización de conductores de sección pequeña para el transporte de la energía por medio de líneas de alta tensión; esto se explica, del modo siguiente: generando potencia eléctrica en forma de corriente alterna, es posible elevar el voltaje de generación merced al empleo de transformadores estáticos; con tensiones relativamente altas la corriente eléctrica en las líneas de



transporte es menor; y para estos valores de corriente es posible el uso de cables de menor diámetro. Sin embargo, no hay que desestimar el uso de corriente continua para la transmisión, puesto que, con el empleo de los grupos motor-generador con motor de inducción o sincrónico, y los convertidores sincrónicos o conmutatrices, es posible transportar energía eléctrica con bastante economía y eficiencia; por un lado porque se puede utilizar hasta un solo conductor, si el retorno se lo hace por tierra; y por otro lado, porque la caída de voltaje se debe únicamente a la resistencia de la línea, pues la reactancia es nula. Las desventajas que presentan es de que la potencia útil de estas unidades queda limitada solamente por la potencia que pueden llegar a alcanzar las dinamos en la actualidad; y aún más, los grupos motor-generador requieren dos máquinas, con el correspondiente aumento de costo y de espacio ocupado, y que el rendimiento global no es muy elevado, por ser el producto de los rendimientos individuales de las dos unidades del grupo.

Otra ventaja de la corriente alterna es la posible construcción de generadores de gran potencia que giren a elevadas velocidades, de modo que su costo de producción y los gastos de explotación por Kw resulten reducidos, y estos generadores se adaptan perfectamente a turbinas motrices de elevada velocidad. Debido a las dificultades de conmutación, es en cambio difícil de construir generadores de corriente continua de potencias nominales muy superiores a los 5.000 Kw que además han de funcionar a velocidad reducida, lo que exige máquinas muy grandes y pesadas. Los generadores de corriente alterna debido a su fortaleza y simplicidad a la ausencia de colector y al hecho de que sus características de funcionamiento se adaptan bien a una marcha de velocidad constante, es también preferido en las centrales generadoras de potencias mayores.

En cuanto a su aplicación en la industria, la mayoría de los motores son de inducción de corriente alterna, puesto que facilitan trabajar a velocidad constante y cuyo rendimiento es mejor que el de corriente continua, además son más baratos y su explotación es menos costosa.

En este proyecto hidroeléctrico las tres unidades a instalarse tendrán las características siguientes:



Turbinas horizontales	1.500 HP	2.530 lts/s
tipo Francis	1.200 RPM	h = 50 m
Generadores de	1.250 Kva	2.400 voltios
corriente alterna	3 fases	60 ciclos
General Electric	cos = 0,8	1.200 RPM

Los tres generadores a instalarse serán del tipo de rotor con polos salientes y con bobinado de amortiguación. Los generadores con rotor cilíndrico generalmente se utilizan para las turbinas de vapor que giran a gran velocidad.

Los generadores serán auto-excitados, es decir, tendrán su propia excitación acoplada directamente sobre su eje o accionada por medio de una banda o correa movida por dicho árbol. Las ventajas que se obtienen con estos generadores son varias, y entre ellas: la tendencia a mantener constante el potencial en los terminales, puesto que cualquier cambio o variación de este voltaje ocasionaría también variaciones en la excitación del campo. La única caída de voltaje que se produce es debida a la resistencia de la armadura por donde circula una pequeña corriente de campo. Por tanto, se podría decir que la excitación del campo es dependiente del voltaje en los terminales del generador. Además, tiene una diferencia relativamente pequeña en la caída de voltaje cuando la máquina opera sin carga que a plena carga, razón por la cual es útil para sistemas de potencia constante cuando la línea de transmisión no es suficientemente larga para requerir un incremento de voltaje del generador que compense la caída en la línea cuando la carga aumenta.

El sistema de excitación se lo indica en el diagrama # 9. La resistencia fija que se conecta en el circuito del campo excitatriz se usa cuando se desea limitar la corriente máxima, cuyo valor es tal que interfiere al mejor funcionamiento del sistema regulador de voltaje; el reóstato del campo excitatriz y el reóstato del campo generatriz controlan principalmente la excitación del generador cuando el regulador de voltaje no está en servicio. La corriente de excitación en el campo del ge-

parador puede ser regulada cambiando el voltaje de salida en la excitatriz o manteniendo constante el voltaje de excitación y cambiando la resistencia del campo generatriz.

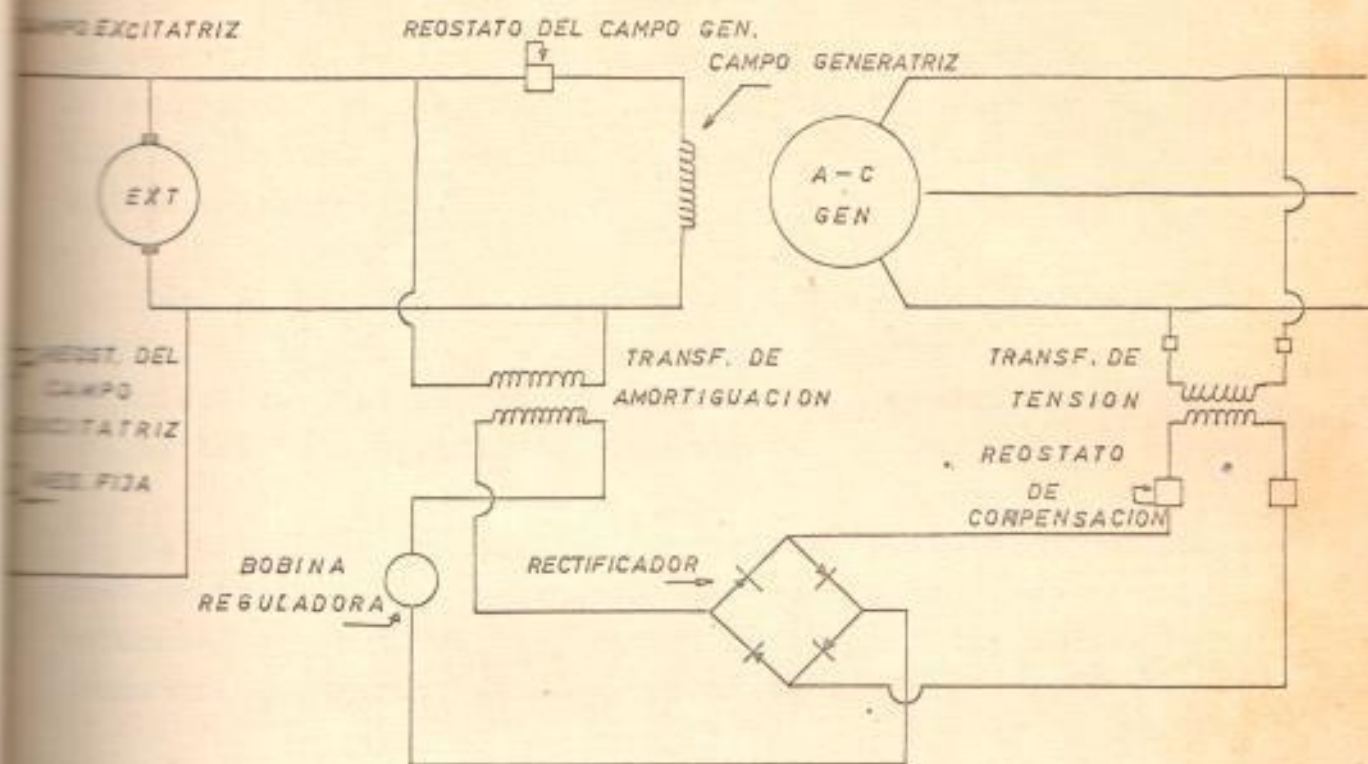


Diagrama # 9

Para estabilizar el voltaje regulado y prevenir oscilaciones excesivas o variaciones pendulares de la excitatriz, un efecto de amortiguación se produce en el circuito de la bobina reguladora por medio de un transformador de amortiguación. Un bobinado de este transformador se conecta al campo del generador, cuyo voltaje está siendo regulado y el otro bobinado se conecta en serie con la bobina reguladora de voltaje; cuando hay un cambio en los voltajes de excitación como resultado de la acción reguladora, la energía es transferida por inducción de un bobinado a otro en el transformador de amortiguación.<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> "Electrical Transmission and Distribution Reference Book" of the Westinghouse Electric Corporation; Fourth Edition .- pag # 219



## TABLEROS DE CONTROL: SU FINALIDAD. CALCULOS DE FALLAS Y CORTO CIRCUITO.

En el plano # 3 que se adjunta, se muestran las conexiones eléctricas de los instrumentos de medición correspondientes a cada unidad; estos aparatos están fijos a los tableros, y permiten al operador darse cuenta en que condiciones se encuentra operando la máquina.

Para el estudio de fallas y corto circuitos por el método analítico, lo más complejo, laborioso y dificultoso son los cálculos, pero la introducción del método de Componentes Simétricas los ha simplificado grandemente.

El método de Componentes Simétricas consiste en reducir un sistema trifásico no balanceado de vectores en tres sistemas balanceados que se conocen con el nombre de componentes simétricas de secuencia positiva, negativa y cero.

La componente simétrica de secuencia positiva consiste de tres vectores iguales en magnitud, desplazados  $120^{\circ}$  entre sí y rotando en una dirección tal que alcanzan su valor máximo positivo en una secuencia abc.

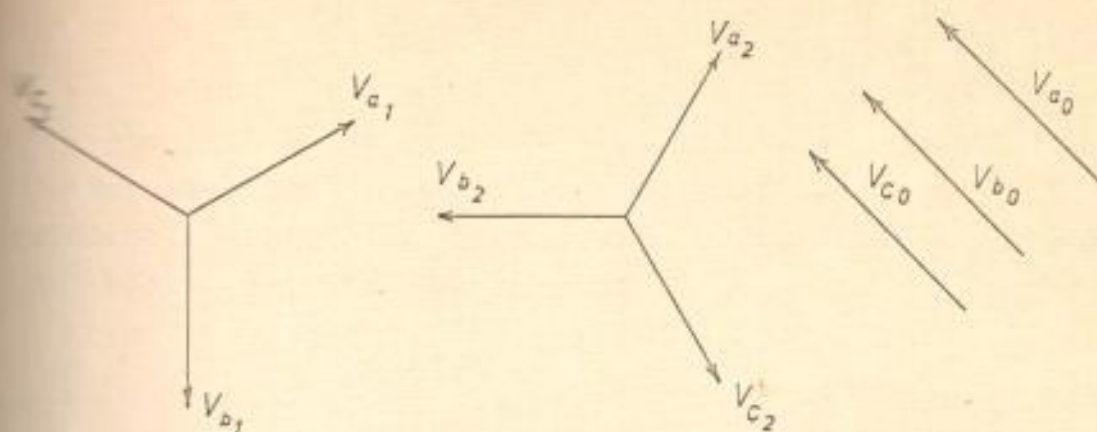
La componente de secuencia negativa consiste de tres vectores iguales en magnitud, desplazados  $120^{\circ}$  entre sí y rotando en una secuencia acb.

La componente de secuencia cero consiste de tres vectores iguales en magnitud y en fase.

Para identificar a cada una de estas componentes utilizamos el suscripto 1 para la componente de secuencia positiva, el suscripto 2 para la secuencia negativa, y el suscripto cero (0) para la componente de secuencia cero; así por ejemplo:  $E_{a_1}$  es la componente de secuencia positiva para el voltaje en la fase A.

En el diagrama # 10 se muestran las relaciones de los vectores para las componentes simétricas de secuencia positiva, negativa y cero de un sistema trifásico no balanceado, siendo

Las fases ABC.



Componentes de  
secuencia positiva

Componentes de  
secuencia negativa

Componentes de  
secuencia cero

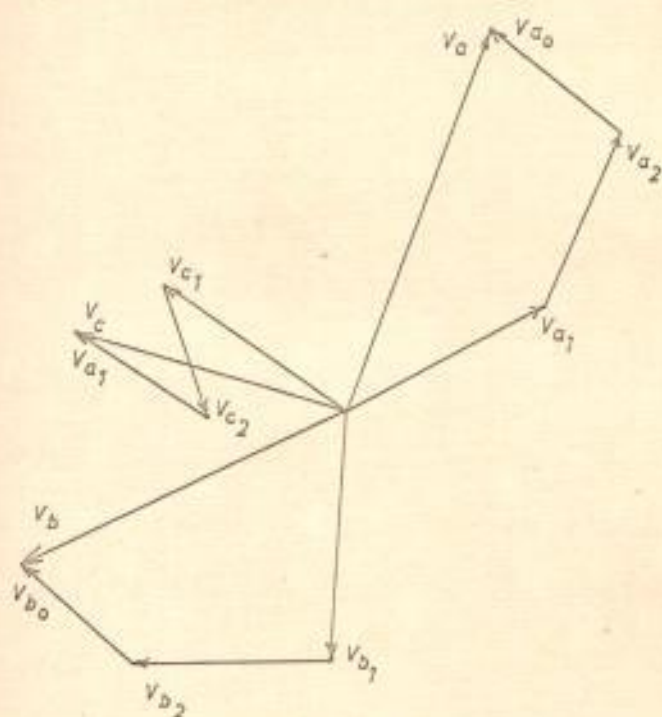


Diagrama # 10

Cada uno de los vectores originales no balanceado es la suma de sus componentes, y expresados en términos de sus componentes son: <sup>(1)</sup>

$$\vec{V}_a = \vec{V}_{a_1} + \vec{V}_{a_2} + \vec{V}_{a_0}$$

$$\vec{I}_a = \vec{I}_{a_1} + \vec{I}_{a_2} + \vec{I}_{a_0}$$

$$\vec{V}_b = \vec{V}_{b_1} + \vec{V}_{b_2} + \vec{V}_{b_0}$$

$$\vec{I}_b = \vec{I}_{b_1} + \vec{I}_{b_2} + \vec{I}_{b_0}$$

$$\vec{V}_c = \vec{V}_{c_1} + \vec{V}_{c_2} + \vec{V}_{c_0}$$

$$\vec{I}_c = \vec{I}_{c_1} + \vec{I}_{c_2} + \vec{I}_{c_0}$$

<sup>(1)</sup> Elements of Power System Analysis, William D. Stevenson Jr.



Introduciendo el operador "a" para facilitar los cálculos

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120}$$

Esto indica que el vector "a" tiene de magnitud la unidad y desplazado 120° en una dirección positiva desde el eje de referencia. El vector "a" operando sobre otro, lo hace rotar 120° hacia adelante; por ejemplo:

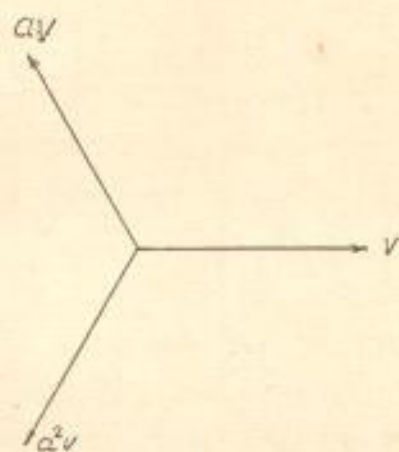


Diagrama # 11

Por tanto, las ecuaciones anteriores se convierten: <sup>(2)</sup>

$$\begin{aligned} \vec{V}_a &= \vec{V}_{a_1} + \vec{V}_{a_2} + \vec{V}_{a_0} & \vec{I}_a &= \vec{I}_{a_1} + \vec{I}_{a_2} + \vec{I}_{a_0} \\ \vec{V}_b &= a^2\vec{V}_{a_1} + a\vec{V}_{a_2} + \vec{V}_{a_0} & \vec{I}_b &= a^2\vec{I}_{a_1} + a\vec{I}_{a_2} + \vec{I}_{a_0} \\ \vec{V}_c &= a\vec{V}_{a_1} + a^2\vec{V}_{a_2} + \vec{V}_{a_0} & \vec{I}_c &= a\vec{I}_{a_1} + a^2\vec{I}_{a_2} + \vec{I}_{a_0} \end{aligned}$$

De donde:

$$\begin{aligned} \vec{V}_{a_0} &= 1/3 (\vec{V}_a + \vec{V}_b + \vec{V}_c) & \vec{I}_{a_0} &= 1/3 (\vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c) \\ \vec{V}_{a_1} &= 1/3 (\vec{V}_a + a\vec{V}_b + a^2\vec{V}_c) & \vec{I}_{a_1} &= 1/3 (\vec{I}_a + a\vec{I}_b + a^2\vec{I}_c) \\ \vec{V}_{a_2} &= 1/3 (\vec{V}_a + a^2\vec{V}_b + a\vec{V}_c) & \vec{I}_{a_2} &= 1/3 (\vec{I}_a + a^2\vec{I}_b + a\vec{I}_c) \end{aligned}$$

En un sistema trifásico la suma de las corrientes de línea es igual a la corriente en el neutro.

$$\vec{I}_n = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c$$

Luego:

$$\vec{I}_n = 3 \vec{I}_{a_0}$$

<sup>(2)</sup> Elements of Power System Analysis, William D. Stevenson Jr. McGraw-Hill Book Company, Inc. Second edition, pag # 276

Las fallas que se presentan en los sistemas de potencia son en su mayoría no simétricas que consisten de corto circuitos no simétricos, fallas no simétricas a través de impedancias o, por rotura de uno o dos conductores. Las fallas no simétricas que pueden ocurrir son:

- a) Falla trifásica
- b) Falla de una línea a tierra
- c) Falla de línea a línea
- d) Falla de dos líneas a tierra

Para el cálculo de cada una de ellas, necesitamos conocer el valor de las reactancias subtransientes de secuencia positiva, el mismo que para los generadores, lo obtenemos de la tabla # 1.

En la mayoría de los generadores la reactancia subtransiente de secuencia positiva y la reactancia de secuencia negativa tienen los mismos valores; la reactancia de secuencia cero generalmente es menor; para nuestros cálculos hemos considerado un valor de 8 %.<sup>(2)</sup>

De la tabla # 1 obtenemos:

Reactancia subtransiente de secuencia positiva  $X''_d = 15,5 \%$

Reactancia de secuencia negativa  $X_2 = 15,5 \%$

Reactancia de secuencia cero  $X_0 = 8 \%$

Antes de iniciar el estudio de fallas en el sistema de Potencia, analizaremos primero las corrientes de fallas en los terminales de uno cualquiera de los generadores, para lo cual vamos a suponer que el generador está operando sin carga y a voltaje nominal.

Para facilitar los cálculos introducimos también, el sistema por unidad (p.u). En este sistema las cantidades nominales se consideran como unidad, y cualquier otra se expresa como una fracción de ellas. La ventaja que ofrece este sistema

---

<sup>(2)</sup> "Electrical Transmission and Distribution Reference Book" of the Westinghouse Electric Corporation; Fourth Edition.- pag # 189



es que tiende a eliminar los coeficientes que en todo momento resultan molestos para las operaciones.

REACTANCIAS APROXIMADAS PARA GENERADORES DE POLOS <sup>(1)</sup>  
SALIENTES O MOTORES SINCRONICOS A 60 CICLOS

Tabla # 1

VALORES POR CIENTO SOBRE KVA DE LA MAQUINA				
EVA de REGIMEN 0,8 F.P.	KW	VOLTAJE de REGIMEN	REACTANCIA SUBTRANSIENTE X"d	
			1.200 RPM	3.600 RPM
625	500	240	14,5	8,0
		480	14,5	9,0
		600	14,5	9,0
		2.400	14,5	9,0
		4.160	14,0	9,5
781	625	240	---	8,5
		480	---	8,5
		600	---	7,5
		2.400	---	9,0
		4.160	---	9,5
937	750	240	---	11,5
		480	---	7,5
		600	---	7,0
		2.400	---	7,5
1.250	1.000	240	---	10,0
		480	---	10,0
		600	15,5	10,0
		2.400	15,5	9,0
		4.160	15,5	10,0

<sup>(1)</sup> "Industrial Power Systems Handbook".- Donald Beeman.-  
McGraw-Hill Book Company, Inc. New York. First Edition; Pag # 92

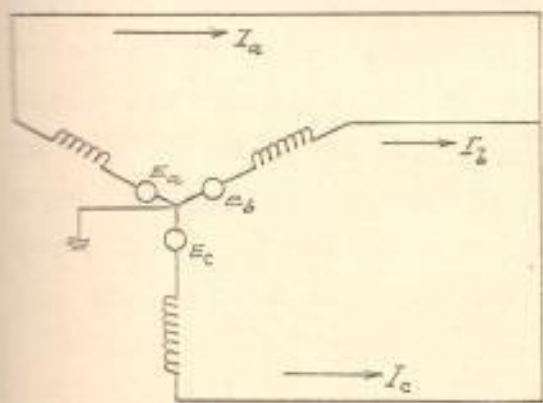
A continuación procedemos a analizar cada una de las fallas mencionadas en la página # 36.

Si asumimos:

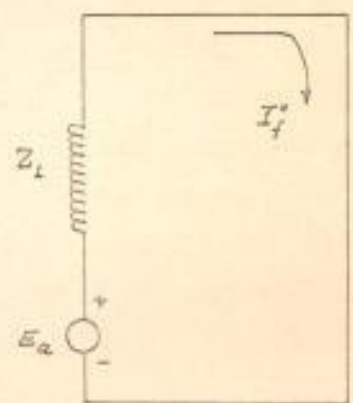
- 1°) Que las corrientes de falla sean calculadas usando las reactancias subtransientes.
- 2°) Tomar como base 2.400 v y 1.250 Kva.
- 3°) Todas las resistencias sean despreciables.
- 4°) Fijar un voltaje de falla igual a 1,0  $\angle 0^\circ$  p.u. como referencia.

a) Falla Trifásica .- El circuito para falla trifásica en un generador sin carga conectado en "Y", con su neutro puesto a tierra se muestra en el diagrama # 12-a. Para su estudio se considera que las fases a, b, c, están conectadas a tierra ; luego:

$$\vec{E}_a = \vec{E}_b = \vec{E}_c = 0$$



(a)



(b)

Diagrama # 12

Esta condición puede ser representada por un corto circuito en el diagrama de secuencia positiva (diag.# 12-b).

Donde:

- $\vec{E}_a$  = voltaje de falla (p.u.)
- $\vec{Z}_1$  = impedancia subtransiente
- $\vec{I}_f$  = corriente subtransiente de falla

$$\vec{I}_f = \frac{\vec{E}_a}{\vec{Z}_1}$$



$$\vec{I}''_f = \frac{1,0 \angle 0^\circ}{j 0,155} \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}''_f = -j 6,45 \text{ p.u.}$$

Corriente de Base  $\vec{I}_B = \frac{(Kva)_B}{\sqrt{3} (Kv)_B}$

$$\vec{I}_B = \frac{1.250 \text{ Kva}}{\sqrt{3} 2,4 \text{ Kv}}$$

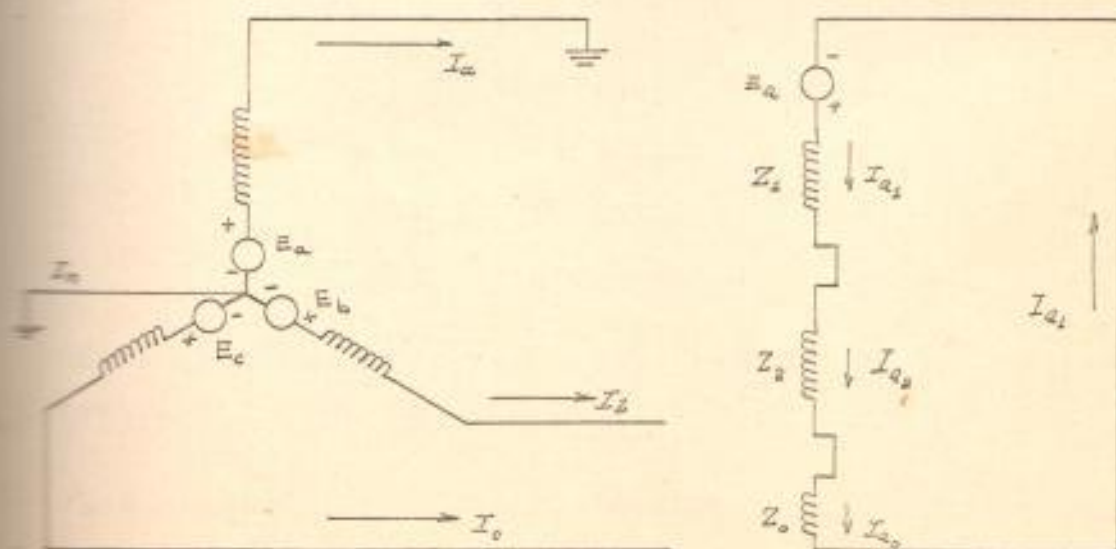
$$\vec{I}_B = 300 \text{ amp}$$

La corriente de falla  $\vec{I}_a = \vec{I}''_f \times \vec{I}_B$

$$\vec{I}_a = -j 6,45 \times 300$$

$$I_a = 1.935 \text{ amp}$$

2) Falla de una línea a tierra .- Las impedancias equivalentes a las secuencias: positiva, negativa y cero se conectan en serie para determinar la corriente de falla. En el diagrama # 13-a se muestra la falla en la fase a del generador, cuyo neutro está puesto a tierra; Las corrientes en las fases c y b son nulas, y solamente existe la corriente de falla en la fase a que tiene su retorno por el neutro.



(a)

(b)

Diagrama # 13

Del diagrama # 13-b deducimos:

$$\begin{aligned}\bar{I}_c &= \bar{I}_b = 0 \\ \bar{I}_a &= \bar{I}_{a_1} + \bar{I}_{a_2} + \bar{I}_{a_0} \\ \bar{I}_{a_1} &= \bar{I}_{a_2} = \bar{I}_{a_0} \\ \bar{I}_a &= 3 \bar{I}_{a_1} \\ \bar{I}_{a_1} &= \frac{\bar{E}_a}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}\end{aligned}$$

Donde:  $\bar{Z}_1$  = impedancia subtransiente  
 $\bar{Z}_2$  = impedancia de secuencia negativa  
 $\bar{Z}_0$  = impedancia de secuencia cero

$$\begin{aligned}\bar{V}_{a_1} &= \bar{E}_a - \bar{I}_{a_1} \bar{Z}_1 \\ \bar{V}_{a_2} &= - \bar{I}_{a_2} \bar{Z}_2 \\ \bar{V}_{a_0} &= - \bar{I}_{a_0} \bar{Z}_0 \\ \bar{V}_a &= \bar{V}_{a_1} + \bar{V}_{a_2} + \bar{V}_{a_0} = 0\end{aligned}$$

La corriente subtransiente en el generador es:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{a_1} &= \frac{1,0 \ 0}{j \ 0,155 + j \ 0,155 + j \ 0,08} \text{ p.u.} \\ \bar{I}_{a_1} &= \frac{1,0 \ 0}{j \ 0,39} \text{ p.u.} \\ \bar{I}_{a_1} &= -j \ 2,56 \text{ p.u.} \\ \bar{I}_{a_1} &= \bar{I}_{a_2} = \bar{I}_{a_0} = -j \ 2,56 \text{ p.u.} \\ \bar{I}_a &= 3 \bar{I}_{a_1} \\ \bar{I}_a &= 3 (-j \ 2,56) \\ \bar{I}_a &= -j \ 7,68 \text{ p.u.} \\ \bar{I}_a &= j \ 7,68 \times 300 \\ \bar{I}_a &= 2.304 \text{ amp}\end{aligned}$$

Este mismo valor corresponde a la corriente que circula por el neutro del generador.

Las componentes simétricas del voltaje del punto de falla a tierra son:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{a_1} &= 1,0 - (-j \ 2,56) (j \ 0,155) \\ \bar{V}_{a_1} &= 0,603 \text{ p.u.}\end{aligned}$$



$$\vec{V}_{a_2} = -(-j2,56)(j0,155) = -0,396 \text{ p.u.}$$

$$\vec{V}_{a_0} = -(-j2,56)(j0,080) = -0,204 \text{ p.u.}$$

Los voltajes de línea a tierra son

$$\vec{V}_a = 0,603 + (-0,396) + (-0,204) = 0$$

$$\vec{V}_b = 0,603(-0,5 - j0,866) - 0,396(-0,5 + j0,866) - 0,204$$

$$\vec{V}_b = -0,307 - j0,864 \text{ p.u.}$$

$$\vec{V}_c = 0,603(-0,5 + j0,866) - 0,396(-0,5 - j0,866) - 0,204$$

$$\vec{V}_c = -0,307 + j0,864 \text{ p.u.}$$

Los voltajes de línea a línea son

$$\vec{V}_{ab} = \vec{V}_a - \vec{V}_b = 0,307 + j0,864 = 0,917 \underline{70,4^\circ} \text{ p.u.}$$

$$\vec{V}_{bc} = \vec{V}_b - \vec{V}_c = 0 - j1,728 = 1,728 \underline{270^\circ} \text{ p.u.}$$

$$\vec{V}_{ca} = \vec{V}_c - \vec{V}_a = -0,307 + j0,864 = 0,917 \underline{109,6^\circ} \text{ p.u.}$$

Los voltajes de línea expresados en voltios

$$\vec{V}_{ab} = 0,917 \times \frac{2,4 \text{ Kv}}{\sqrt{3}} \underline{70,4^\circ} = 1,272 \underline{70,4^\circ} \text{ Kv}$$

$$\vec{V}_{bc} = 1,728 \times \frac{2,4 \text{ Kv}}{\sqrt{3}} \underline{270^\circ} = 2,397 \underline{270^\circ} \text{ Kv}$$

$$\vec{V}_{ca} = 0,917 \times \frac{2,4 \text{ Kv}}{\sqrt{3}} \underline{109,6^\circ} = 1,272 \underline{109,6^\circ} \text{ Kv}$$

El diagrama de vectores para voltajes después de la falla se muestran a continuación.

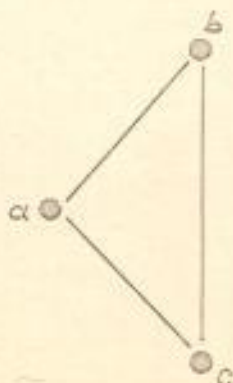


Diagrama # 14

c) Falla de línea a línea.- El diagrama # 15-a muestra una falla de línea a línea de un generador sin carga conectado en "Y" con la falla en las fases b y c.

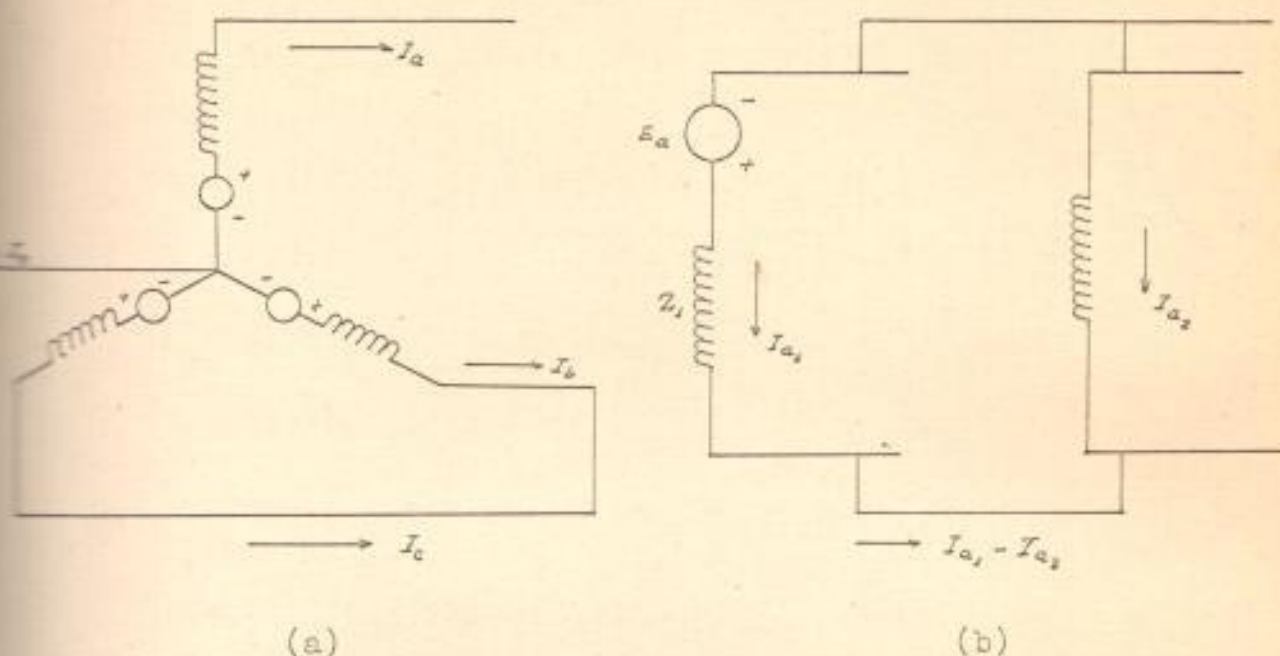


Diagrama # 15

Las condiciones de falla se expresan por las ecuaciones siguientes:

$$\vec{V}_b = \vec{V}_c \quad \vec{I}_a = 0 \quad \vec{I}_b = -\vec{I}_c$$

De donde obtenemos las componentes simétricas <sup>(1)</sup>

$$\begin{aligned} \vec{V}_{a_1} &= \vec{V}_{a_2} & \vec{V}_{a_0} &= 0 \\ \vec{I}_{a_1} &= -\vec{I}_{a_2} & \vec{I}_{a_0} &= 0 \end{aligned} \quad \vec{I}_{a_1} = \frac{\vec{E}_a}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2}$$

El diagrama equivalente que satisfacen todas las ecuaciones anteriores, se indica en el gráfico # 15-b.

Para este tipo de falla, la impedancia de secuencia cero no se incluye en el circuito debido a que las corrientes de falla de las fases b y c no tienen retorno por el neutro, por tanto, la corriente en éste será nula.

De las fórmulas expuestas se tiene:

(1) Elements of Power System Analysis, William D. Stevenson Jr. McGraw-Hill Book Company, Inc. Second Edition, pag # 307



$$\vec{I}_{a_1} = \frac{1,0 \angle 0^\circ}{j0,155 + j0,155} = -j3,22 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_{a_2} = j3,22 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_{a_0} = 0$$

$$\vec{I}_a = -j3,22 + j3,22 = 0$$

$$\vec{I}_b = -j3,22(-0,5 - j0,866) + j3,22(-0,5 + j0,866)$$

$$\vec{I}_b = -5,576 + j0 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_c = 5,576 + j0 \text{ p.u.}$$

La corriente subtransiente en amperios es:

$$\vec{I}_b = -5,576 \times 300 = 1.672,8 \angle 180^\circ \text{ amp}$$

$$\vec{I}_c = 5,576 \times 300 = 1.672,8 \angle 0^\circ \text{ amp}$$

Las componentes simétricas de los voltajes del punto de falla al neutro son

$$\vec{V}_{a_1} = \vec{V}_{a_2} = 1,0 - (-j3,22)(j0,155) = 0,501 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$$

$$\vec{V}_{a_0} = 0$$

Los voltajes de línea a tierra son:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_{a_1} + \vec{V}_{a_2} + \vec{V}_{a_0} = 0,501 + 0,501 = 1,002 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$$

$$\vec{V}_b = \vec{V}_c = 0,501(-0,5 - j0,866) + 0,501(-0,5 + j0,866)$$

$$\vec{V}_b = \vec{V}_c = -0,501 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$$

Los voltajes de línea a línea son:

$$\vec{V}_{ab} = \vec{V}_a - \vec{V}_b = 1,002 + 0,501 = 1,503 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$$

$$\vec{V}_{bc} = \vec{V}_b - \vec{V}_c = -0,501 + 0,501 = 0$$

$$\vec{V}_{ca} = \vec{V}_c - \vec{V}_a = -0,501 - 1,002 = 1,503 \angle 180^\circ \text{ p.u.}$$

Expresados en voltios, los voltajes de línea a línea son

$$\vec{V}_{ab} = 1,503 \times \frac{2,4}{\sqrt{3}} = 2,085 \underline{0^\circ} \text{ Kv}$$

$$\vec{V}_{bc} = 0 \text{ Kv}$$

$$\vec{V}_{ca} = -1,503 \times \frac{2,4}{\sqrt{3}} = 2,085 \underline{180^\circ} \text{ Kv}$$

- d) Falla de dos líneas a tierra.- El circuito para falla de doble línea a tierra de un generador sin carga, conectado en "Y" y con su neutro puesto a tierra se muestra en el diagrama # 16. La falla ocurre en las fases b y c del generador.

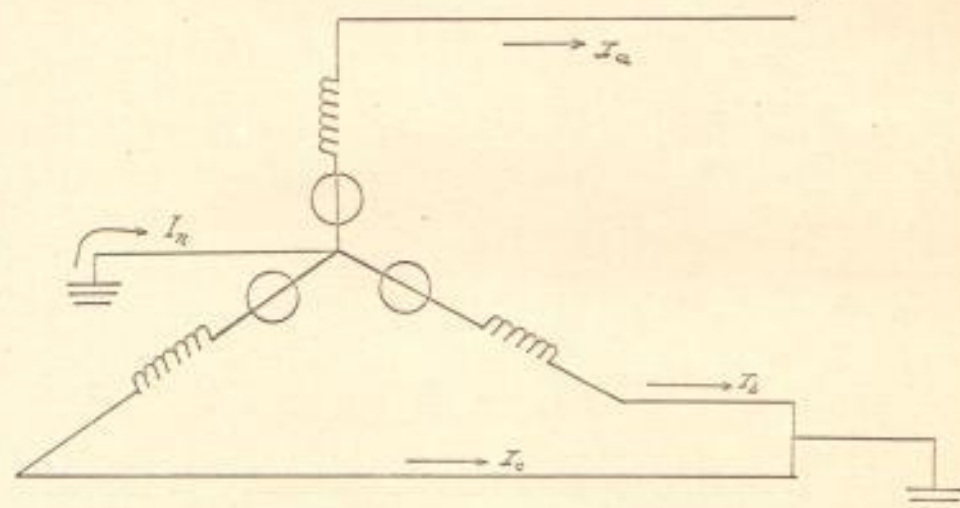


Diagrama # 16

Las condiciones de falla se expresan por las siguientes ecuaciones: <sup>(1)</sup>

$$\vec{V}_b = 0 \quad \vec{V}_c = 0 \quad \vec{I}_a = 0$$

Las componentes simétricas de voltaje son dadas por las relaciones:

$$\vec{V}_{a_1} = \vec{E}_a - \vec{I}_{a_1} Z_1$$

$$\vec{V}_{a_1} = \vec{V}_{a_2} = \vec{V}_{a_0}$$

$$\vec{I}_{a_1} = \frac{\vec{E}_a}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)}$$

(1) Elements of Power System Analysis, William D. Stevenson Jr. McGraw-Hill Book Company, Inc. Second Edition, pag # 310



El circuito que satisface todas las ecuaciones anteriores se indica en el diagrama # 17.

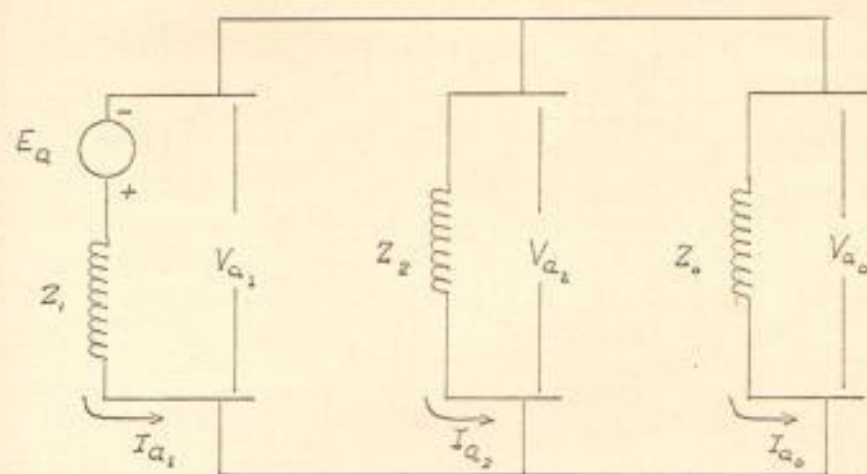


Diagrama # 17

Las componentes simétricas de la corriente subtransiente son:

$$\vec{I}_{a_1} = \frac{1,0 + j0}{j0,155 + (j0,155)(j0,08)/j0,155 + j0,08}$$

$$\vec{I}_{a_1} = -j4,81 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_{a_2} = -\frac{\vec{V}_{a_2}}{Z_2}$$

$$\vec{V}_{a_1} = 1 - (-j4,81)(j0,155)$$

$$\vec{V}_{a_1} = 0,254 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_{a_2} = -\frac{0,254}{j0,155} = j1,63 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_{a_0} = -\frac{\vec{V}_{a_0}}{Z_0}$$

$$\vec{I}_{a_0} = -\frac{0,254}{j0,08} = j3,15 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_a = -j4,81 + j1,63 + j3,15 = 0 \text{ p.u.}$$

La corriente subtransiente en la fase b es:

$$\vec{I}_b = -j4,81(-0,5 - j0,866) + j1,63(-0,5 + j0,866) + j3,15$$

$$\vec{I}_b = -5,567 + j4,75 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_b = 7,31 \underline{139,5^\circ} \text{ p.u.}$$

La corriente subtransiente en la fase c es:

$$\vec{I}_c = -j4,81(-0,5 + j0,866) + j1,63(-0,5 - j0,866) + j3,15$$

$$\vec{I}_c = 5,567 + j4,75 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_c = 7,31 \underline{40,5^\circ} \text{ p.u.}$$

La corriente subtransiente en la fase b y en la fase c expresada en amperios

$$\vec{I}_b = 300 \times 7,31 \underline{139,5^\circ} = 2.193 \underline{139,5^\circ} \text{ amp}$$

$$\vec{I}_c = 300 \times 7,31 \underline{40,5^\circ} = 2.193 \underline{40,5^\circ} \text{ amp}$$

La corriente en el neutro del generador es:

$$\vec{I}_n = 3 \vec{I}_{a_0}$$

$$\vec{I}_n = 3 \times j3,15 = j9,45 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_n = 9,45 \underline{90^\circ} \times 300 = 2.835 \underline{90^\circ} \text{ amp}$$

Los voltajes de líneas a tierra son:

$$\vec{V}_a = 3 \vec{V}_a,$$

$$\vec{V}_a = 3 \times 0,254 = 0,762 \text{ p.u.}$$

$$\vec{V}_b = \vec{V}_c = 0$$

Los voltajes de línea a línea son:

$$\vec{V}_{ab} = \vec{V}_a - \vec{V}_b = 0,762 \text{ p.u.}$$

$$\vec{V}_{bc} = \vec{V}_b - \vec{V}_c = 0$$

$$\vec{V}_{ca} = \vec{V}_c - \vec{V}_a = -0,762 \text{ p.u.}$$

Expresado en voltios los voltajes de línea a línea son:

$$\vec{V}_{ab} = 0,762 \times \frac{2,4}{\sqrt{3}} = 1,057 \underline{0^\circ} \text{ Kv}$$



$$V_{bc} = 0$$

$$V_{ca} = -0,762 \times \frac{2,4}{\sqrt{3}} = 1,057 \quad 180^\circ$$

De los cálculos efectuados, la falla más rigurosa en los terminales del generador es la que ocurre de línea a tierra, o sea, donde la corriente subtransiente o corriente rms inicial simétrica alcanza un valor de  $I = 2.304$  amp. Por tanto, la determinación del interruptor será en base de este valor.

La potencia de falla será:

$$P = \sqrt{3} \quad 2,4 \times 2.304$$

$$P = 9.584,6 \text{ Kva.}$$

Los valores de la corriente y de la potencia de interrupción se determinarán después de seleccionar el tiempo de operación de los interruptores, previo estudio de estabilidad del sistema.

Para el estudio de fallas en todo el sistema, nos falta solamente calcular las reactancias de la línea, puesto que para los transformadores, aproximadamente, las tomamos de la tabla # 2. <sup>(1)</sup>

Tabla # 2

IMPEDANCIAS APROXIMADAS A 60 CICLOS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA SOBRE 500 KVA			
ALTO VOLTAJE	BAJO VOLTAJE	AUTO ENFRIADO O ENFRIADO POR AGUA régimen (%)	ENFRIADO POR ACEITE régimen (%)
15 o menos	15 o menos	5,5	6,75
25 o menos	15 o menos	5,5	8,25
34,5 o menos	15 o menos	6,0	9,0
69 o menos	15 o menos	7,0	10,5

(1) "Industrial Power Systems Handbook".- Donald Beeman.-  
McGraw-Hill Book Company, Inc. New York. First Edition; Pag # 97

La reactancia subtransiente de secuencia positiva para el transformador, cuya capacidad es de 4.500 Kva, es la misma que la reactancia de secuencia negativa y secuencia cero.

En este caso, para transformadores de aceite con refrigeración propia y por corriente forzada de aire, tenemos:

$$X''_d = X_2 = X_0 = 8,25 \%$$

La línea de transmisión estará suministrando 3.000 Kw a una carga concentrada a 7 millas de distancia, a una frecuencia de 60 ciclos por segundo y factor de potencia inductivo de 0,8 la línea se calculará para un 5 % de regulación aproximadamente.

Con los valores asumidos determinamos el voltaje y el tamaño del conductor, en la figura # 20

$$3.000 \text{ Kw} \times 7 \text{ millas} = 21.000 \text{ Kw-millas}$$

Valor que en la figura intercepta a la curva de 22 Kv, correspondiendo a un conductor ACSR # 4/0 con 4' de espaciamiento. (1)

Al utilizar crucetas centradas de madera, la separación entre conductores deberá ser de 4' y 8'.

La línea tendrá un alambre superior de tierra, copperweld 3 No 8 de 0,277" de diámetro y una resistencia a 25°C de 2,91 ohmios por conductor por milla.

Para la protección de la línea, el alambre de tierra se fijará al tope del poste, de tal manera que su proyección vertical forme un ángulo de 30° con una línea imaginaria dirigida al conductor exterior. (ver diagrama # 18).

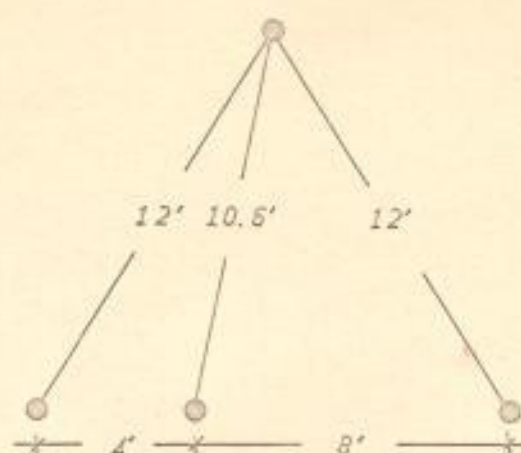
La reactancia subtransiente de la línea la obtenemos de

---

(1) "Electrical Transmission and Distribution Reference Book" of the Westinghouse Electric Corporation; Fourth Edition. Pag # 283



las tablas de características eléctricas de conductores; así:



La reactancia inductiva del conductor ACSR # 4/0 para 1' de espaciamento y 60 períodos es

$$X_a = 0,581 \Omega / \text{cond.} / \text{milla}$$

$$X_d \text{ para } 4' \text{ de espaciamento} = 0,168 \Omega / \text{cond.} / \text{milla}$$

$$X_d \text{ para } 8' \text{ de espaciamento} = 0,252 \Omega / \text{cond.} / \text{milla}$$

$$X_d \text{ para } 12' \text{ de espaciamento} = 0,301 \Omega / \text{cond.} / \text{milla}$$

Luego, la reactancia de secuencia positiva para la línea de transmisión es:

$$X_d'' = 0,581 + 1/3(0,168 + 0,252 + 0,301)$$

$$X_d'' = X_2 = 0,821 \Omega / \text{cond.} / \text{milla}$$

$$X_d'' = X_2 = 5,75 \Omega / \text{cond.}$$

Para determinar la reactancia de secuencia cero de la línea, recurrimos a la ecuación <sup>(1)</sup>

$$Z_0 = Z_{0a} - \frac{Z_{0ag}^2}{Z_{0g}}$$

(1) Electrical Transmission and Distribution Reference Book of the Westinghouse Electric Corporation; Fourth Edition. Pag # 50

donde:

Zoa = auto impedancia de secuencia cero de los conductores de corriente.

Zog = auto impedancia de secuencia cero del alambre de tierra.

Zoag = impedancia mutua de secuencia cero entre los conductores de corriente y el alambre de tierra.

siendo

$$Zoa = Xa + Xe - 2/3(Xd \text{ para } 4' + Xd \text{ para } 8' + Xd \text{ para } 12').$$

$$Zog = 3 Xa + Xe$$

$$Zoag = Xe - 3/3(Xd \text{ para } 12' + Xd \text{ para } 10,6' + Xd \text{ para } 12').$$

Para el conductor ACSR # 4/0

$$Xa = 0,581 \Omega / \text{cond.} / \text{milla}$$

$$Xe = 0,006985f \log 4665600 \frac{\epsilon}{f} \quad (4) \text{ pg } 44$$

La resistividad  $\epsilon$  de la tierra la obtenemos de la tabla # 3. <sup>(1)</sup>

Tabla # 3

	RESISTIVIDAD ( $\Omega$ -m)
Promedio General	100
Agua de Mar	0,01-1,0
Tierra Pantanosa	10-100
Tierra Seca	1.000
Material de Pizarra	$10^7$
Piedra Arenisca	$10^8$

(1) "Electrical Transmission and Distribution Reference Book" of the Westinghouse Electric Corporation; Fourth Edition.- Pag # 580



Para nuestro caso,  $\rho = 1.000 \Omega\text{-m}$

luego  $X_e = 3,307 \Omega/\text{cond.}/\text{milla.}$

$$Z_{oa} = 0,581 + 3,307 - 2/3(0,721)$$

$$Z_{oa} = 3,408 \Omega/\text{cond.}/\text{milla}$$

$$Z_{og} = 3(2,91) + 3,307$$

$$Z_{og} = 12,03 \Omega/\text{cond.}/\text{milla}$$

$$Z_{oag} = 3,307 - 3/3(0,888)$$

$$Z_{oag} = 2,419 \Omega/\text{cond.}/\text{milla}$$

Conocidos estos valores procedemos a determinar la reactancia de secuencia cero de la línea de transmisión, mediante la ecuación indicada en la pag # 49

$$Z_o = 3,408 - \frac{(2,419)^2}{12,03}$$

$$Z_o = 2,922 \Omega/\text{cond.}/\text{milla}$$

$$Z_o = 20,45 \Omega/\text{cond.}$$

El diagrama de una línea correspondiente al Sistema de Potencia de este proyecto, es el que se indica a continuación

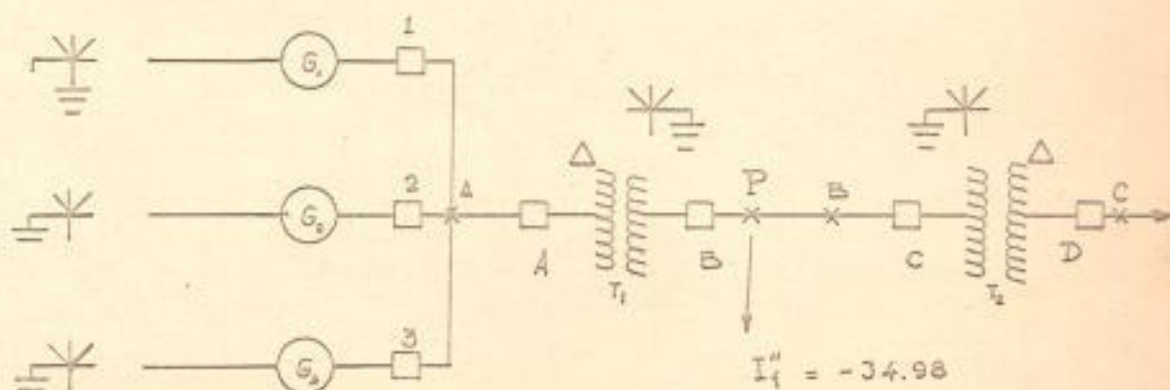


Diagrama # 19

En el punto P del diagrama, suponemos que ocurre un corto

circuito de línea a tierra. Como voltaje de falla asumimos el de régimen.

Las bases escogidas para el estudio de falla, se indican en la tabla # 4

Tabla # 4

ZONA DEL SISTEMA	(KVA) <sub>B</sub>	(KV) <sub>B</sub>	(I) <sub>B</sub> amp
A	4.500	2,4	1.081,7
B-C	4.500	22,0	118,2
D	4.500	2,4	1.081,7

La impedancia base para la línea es:

$$Z_B = \frac{(Kv)_B^2 \times 1.000}{(Kva)_B}$$

$$Z_B = \frac{(22)^2 \times 1.000}{4.500}$$

$$Z_B = 107,5 \Omega$$

Reduciendo estas cantidades al sistema por unidad (p.u.) tenemos:

Para los generadores

$$X_{p.u.} = Z_{real} \frac{(Kv)_{real}^2}{(Kv)^2} \frac{(Kva)_B}{(Kva)_{real}}$$

$$X_{p.u.} = j0,155 \frac{(2,4)^2 (4.500)}{(2,4)^2 (1.250)} = j0,55$$

$$X_{p.u.} = j0,08 \frac{(2,4)^2 (4.500)}{(2,4)^2 (1.250)} = j0,28$$

Para los transformadores, las reactancias conservan sus



mismos valores, o sea

$$X''d = X_2 = X_0 = j0,0825 \text{ p.u.}$$

Para las líneas de transmisión

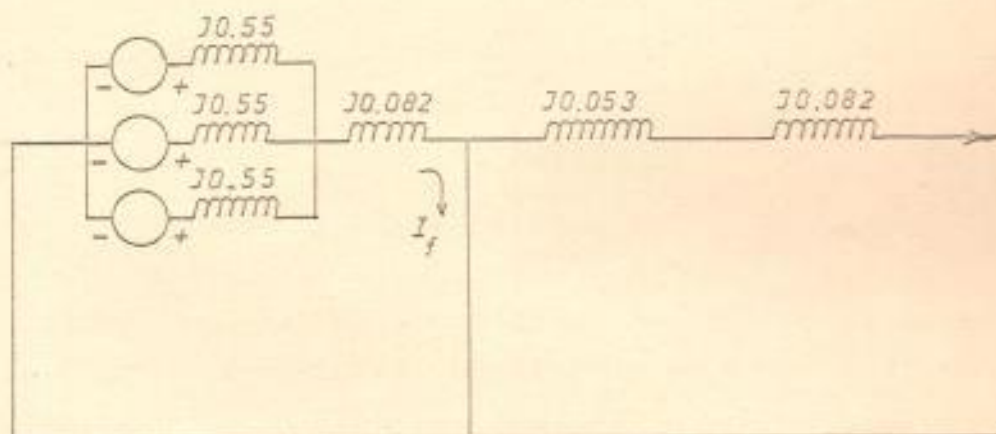
$$X_{p.u.} = \frac{Z_{\text{real}}}{Z_B}$$

$$X_{p.u.} = \frac{5,75}{107,5} = j0,053$$

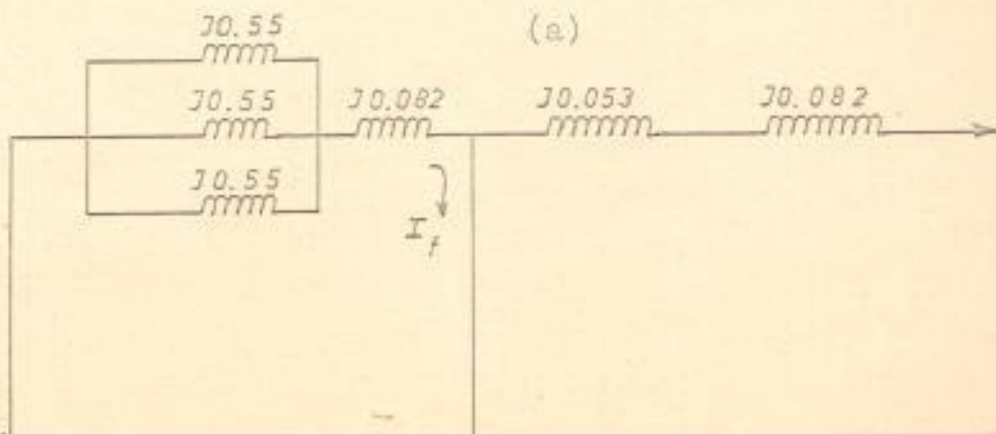
$$X_{p.u.} = \frac{20,45}{107,5} = 0,190$$

Los diagramas de impedancias para representar el sistema de potencia son los siguientes:

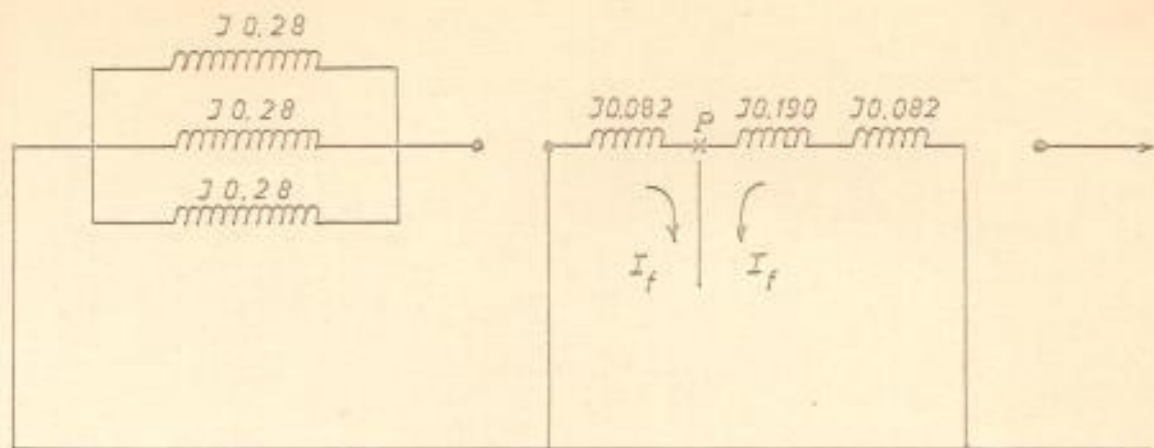
- a) Secuencia positiva
- b) Secuencia negativa
- c) Secuencia cero



(a)



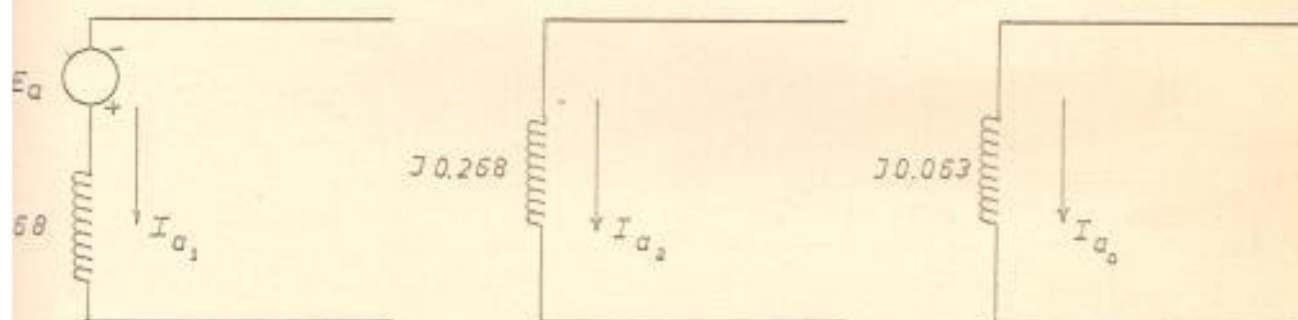
(b)



(c)

Diagrama # 20

Los diagramas equivalentes para cada una de las secuencias son:



(a)

(b)

(c)

Diagrama # 21

Para el tipo de falla que estamos analizando, la reactancia de secuencia positiva, negativa y cero se conectan en serie (ver diagrama # 22).

$$\text{En el circuito, } \vec{I}_{a_1} = \frac{\vec{E}_a}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0}$$

$$\vec{I}_{a_1} = \frac{1,0 + j0}{j0,268 + j0,268 + j0,063}$$

$$\vec{I}_{a_1} = - j1,666 \text{ p.u.}$$

La corriente subtransiente de falla que circula en el sistema, y que se descarga a tierra es:



$$\vec{I}_a = 3 (-j1,666) = -j4,998 \text{ p.u.}$$

Expresada en amperios:

$$\vec{I}_a = -j4,998 \times 118,2 \text{ amp} = 590,5 \underline{270^\circ} \text{ amp}$$

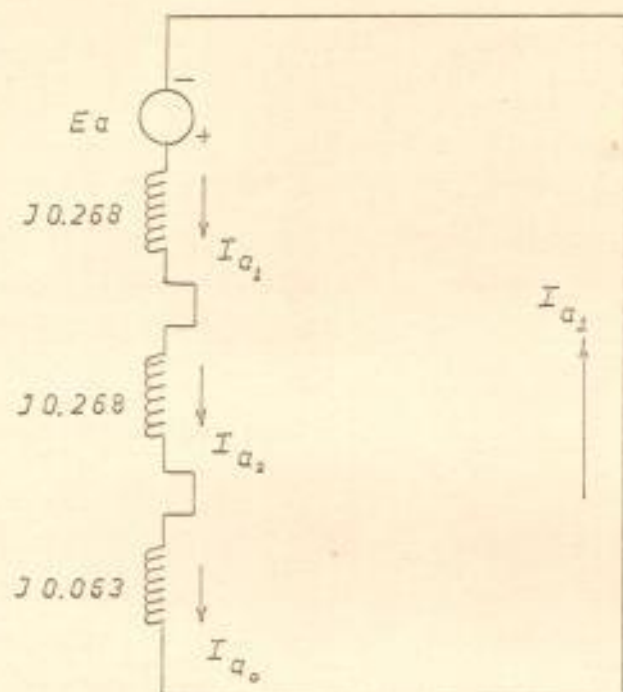


Diagrama # 22

Refiriéndonos al diagrama # 20 (c) podemos averiguar las corrientes que fluyen a tierra por el neutro de cada transformador

$$\frac{0,272}{0,082} I_{T_2} + I_{T_2} = -j1,666$$

$$\vec{I}_{T_2} = -j0,385 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_{T_1} = -j1,281 \text{ p.u.}$$

Luego, en el transformador de la subestación elevadora

$$\vec{I}_n = 3 I_{a0}$$

$$\vec{I}_n = 3 \times -j1,281 = -j3,843 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_n = -j3,843 \times 118,2 = 454,2 \underline{270^\circ} \text{ amp}$$

En el transformador de la subestación reductora

$$\vec{I}_n = 3 \times -j0,385 = -j1,155 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_n = -j1,155 \times 118,2 = 136,5 \underline{270^\circ} \text{ amp}$$

La suma de estas dos corrientes debe ser igual a la corriente de falla en el sistema, puesto que éstas son las únicas que fluyen a tierra a través de cada neutro de los transformadores; la corriente en el neutro de los generadores es nula, y esto se explica por la conexión en " $\Delta$ " del transformador elevador.

SELECCION DE LOS INTERRUPTORES.- En principio se asumió que una falla de línea a tierra ocurría en los terminales de un generador, y los interruptores se seleccionaron en base de la corriente de falla que circulaba por cada uno de ellos; en este caso, para determinar los interruptores A B C y D del sistema, emplearemos también el mismo procedimiento, suponiendo que una falla de línea a tierra, la más rigurosa de todas, ocurre en cada uno de los puntos ya establecidos en el diagrama # 19.

En el interruptor A la corriente de falla es:

$$\vec{I}_{a_1} = \frac{1,0 + j0}{j0,186 + j0,186 + j0,093} = -j2,15 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_a = 3 \times (-j2,15) = -j6,45 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_a = 1.081,7 (-j6,45) = 6.977 \underline{270^\circ} \text{ amp}$$

La potencia de falla es:

$$P = 6,45 \times 4.500 = 29.025 \text{ Kva.}$$

La corriente de falla para el interruptor B quedó calcu-



lada anteriormente en la página # 55.

La potencia de falla será :

$$P = \sqrt{3} \ 22 \times 590,5 = 22.490 \text{ Kva.}$$

En el interruptor C la corriente de falla es:

$$\vec{I}_{a_1} = \frac{1,0 + j0}{j0,321 + j0,321 + j0,272} = -j1,09 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_a = 3 \times (-j1,09) = -j3,27 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_a = 118,2 \times -j3,27 = 386,5 \underline{270^\circ} \text{ amp}$$

La potencia de falla es:

$$P = 3,27 \times 4.500 = 14.715 \text{ Kva.}$$

En el interruptor D la corriente de falla

$$\vec{I}_{a_1} = \frac{1,0 + j0}{j0,403 + j0,403 + j0,354} = -j0,862 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_a = 3 (-j0,862) = -j2,586 \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_a = 1.081,7 (-j2,586) = 2.797,2 \underline{270^\circ} \text{ amp}$$

La potencia de falla será

$$P = 2,586 \times 4.500 = 11.637 \text{ Kva.}$$

RELES DE PROTECCION .- La función de los relés en la operación de un sistema de potencia es prevenir o limitar daños durante las fallas o sobrecargas y disminuir sus efectos del resto del sistema; esto se consigue dividiendo el sistema en zonas separadas y protegidas por interruptores tal como se muestra en el diagrama # 19. Sumándose a la función de protección, los interruptores son también usados para desconectar el circuito bajo condiciones normales.

Los problemas de aplicación de relés consisten en escoger uno cualquiera de ellos para reconocer o detectar la existencia de una falla dentro de una zona protegida, y la función del interruptor es desconectar esa zona del sistema para permitir que el resto continúe operando normalmente.

Los relés de protección son instalados en el sistema de potencia a través de transformadores de corriente y de potencial, y conectados al circuito de control para la operación del interruptor. La corriente de control, ya sea para abrir o cerrar los contactos del relé se provee generalmente desde un banco de baterías; aunque también se utiliza corriente alterna mediante el empleo de transformadores de potencial y de corriente.

El uso de transformadores es para protección, tanto del personal que opera como de los aparatos, y aún más, para permitir el uso razonable de aislamiento en el relé. Comúnmente, el transformador de corriente empleado es de 120 voltios, 60 ciclos y con 5 amperios en el secundario. La razón de transformación es seleccionada de acuerdo al amperaje máximo del primario. En el secundario del transformador la corriente no debe exceder el valor nominal indicado en el relé, esto es aplicable particularmente a los relés de fase donde la corriente de carga fluye a través de ellos.

En este capítulo trataremos únicamente de la protección de generadores, la protección de los transformadores y líneas de transmisión se estudiará más adelante.

PROTECCION DE LOS GENERADORES .- La mayoría de los generadores de corriente alterna cuya capacidad está sobre los



1.000 Kva están equipados con protección diferencial, para desconectarlo del sistema si las corrientes  $I_1$  e  $I_1'$  (ver diagrama # 23) en los dos extremos de cada una de las fases difieren en sus magnitudes. Los diseños para los generadores modernos han hecho que las fallas internas sean menos frecuentes, sin embargo, pueden ocurrir fallas que de no seccionalizarse a tiempo obligarían prácticamente a retirar del servicio estas unidades; con el fin de evitarlo es importante que las condiciones anormales sean reconocidas prontamente para así separar del sistema el área perturbada.

Las condiciones anormales que generalmente soportan las máquinas generatrices son: sobre-cargas, sobre-calentamientos, sobre-velocidades, sobre-voltajes, fallas o pérdidas de campo, motorización, corto circuitos en las bobinas del estator. Varias de estas condiciones no requerirán desconexión automática de la máquina y ellas pueden atenderse correctamente mientras el generador está en operación, otras como fallas, requerirán retirar lo más rápido a la máquina del servicio.

Para protección de los generadores contra posibles corto circuitos en los bobinados del estator, se recomienda el relé diferencial Westinghouse tipo CA de velocidad normal de operación, aproximadamente de 0,1 segundos; sin embargo, el relé Westinghouse tipo HA para alta velocidad está capacitado para interrumpir el servicio hasta un ciclo después de haber ocurrido la falla.

El relé diferencial tipo CA está acondicionado para operar con cualquier desbalance o diferencia entre los valores de corriente que circulan por las bobinas de restricción (ver diagrama # 23) es decir, la corriente  $I_1 - I_1'$  que circulará por la bobina operacional del relé es la que lo hace operar cuando una falla ocurre, en estos casos la corriente  $I_1$  súbitamente aumenta mientras que la corriente  $I_1'$  puede decrecer o súbitamente aumentar y fluir en dirección opuesta, de tal forma que la corriente de falla ahora fluya a través del relé para operación. En operación normal la corriente  $I_1$  que entra en la máquina es igual a la corriente  $I_1'$  que sale en cada una de las fases.

El relé tipo CA existe para dos porcentajes diferentes de desconexión: 10 % y 25 %. Estos valores representan el porcentaje de corriente desequilibrada para operación expresada en términos de la menor. El de 10 % necesita un mínimo de 0,18 amperios y el de 25 % de 0,45 amperios; Esta es la corriente a través de la bobina operacional necesaria para cerrar justamente los contactos del relé. Con 3 amperios o más para el de 10 %, o 7 amperios o más para el de 25 %, el tiempo de operación del relé es de 10 ciclos con un mínimo de 5-6 ciclos.

En el relé tipo HA el porcentaje de desbalance varía alrededor de 5 % en 5 amperios a 20 % en 60 amperios. Como se indicó anteriormente este tipo de relé opera a un ciclo después de haber ocurrido la falla. Para protección de los generadores contra corto circuitos internos este tipo de relé deberá emplearse, aunque su costo es aproximadamente el 20 % más que tres relés tipo CA

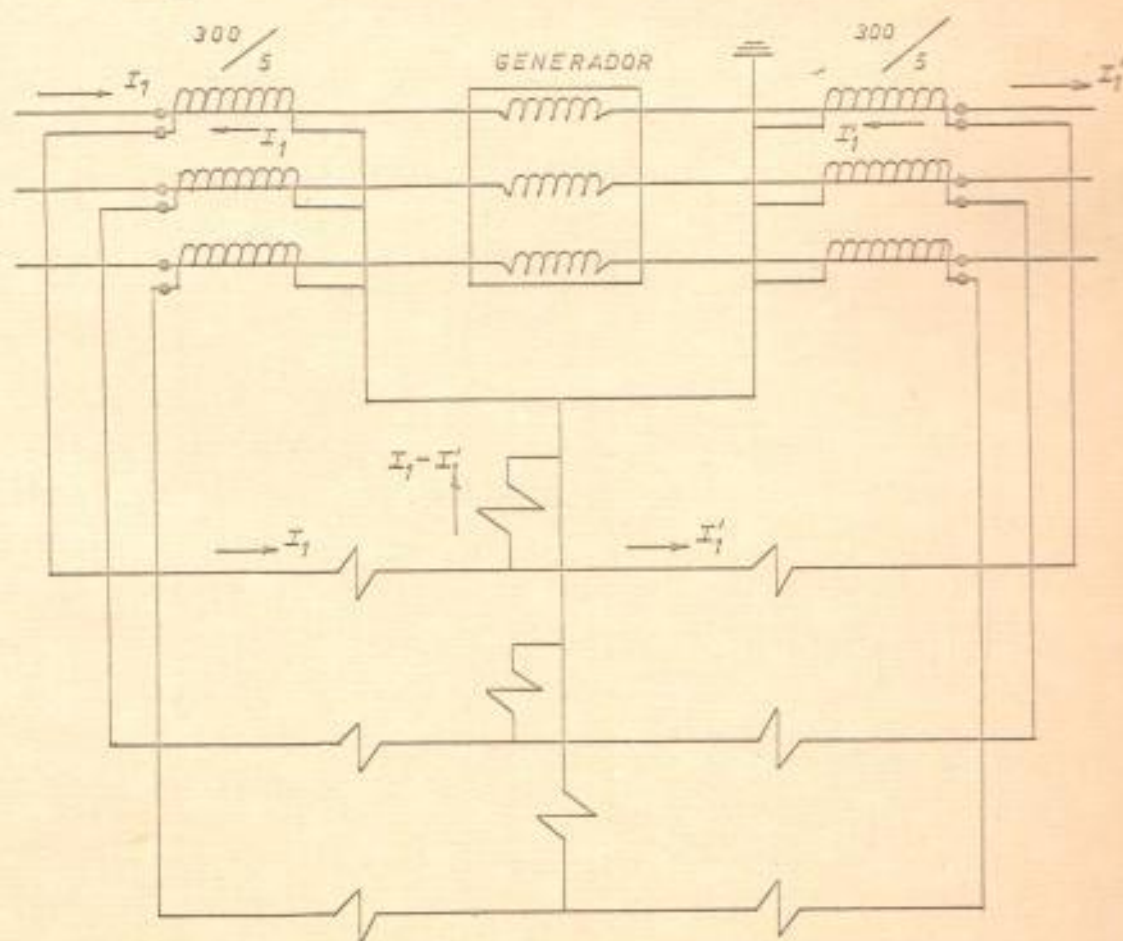


Diagrama # 23



La corriente de régimen en cada uno de los generadores es:

$$I = \frac{1.250 \text{ Kva}}{\sqrt{3} \cdot 2,4 \text{ Kv}} = 300,4 \text{ amp.}$$

Luego los transformadores de corriente a utilizarse tendrán una relación de 300/5.

PROTECCION DE LOS GENERADORES CONTRA CORRIENTES TRIPASICAS DESBALANCEADAS .- Las corrientes trifásicas desbalanceadas causan en el estator corrientes de doble frecuencia que pueden ser inducidas en el hierro del rotor; estas corrientes rápidamente producirán calentamientos excesivos del rotor, y los daños serán muy graves si se permite al generador continuar operando en estas condiciones. Las corrientes desbalanceadas pueden también causar fuertes vibraciones, pero el problema más agudo es el sobre calentamiento.

Los generadores modernos son diseñados para operar con corrientes desbalanceadas en el estator. El tiempo  $t$  que un generador puede operar en estas condiciones, sin peligro a dañarse, puede expresarse de la forma:

$$\int_0^t i_2^2 dt = K \quad (1)$$

Donde  $i_2$  es la componente instantánea de secuencia negativa de la corriente en el estator, expresada en función del tiempo, y  $K$  es una constante igual a 40 para generadores de turbinas hidráulicas. Si el valor de la función integrada está entre éste dado por  $K$  y dos veces su valor, el generador puede sufrir daños leves y en este caso una inspección a tiempo de la superficie del rotor es aconsejable. Si el valor integrado es mayor a dos veces el valor de  $K$ , graves daños es de esperarse.

Para proteger los generadores de estas corrientes des-

---

(1) The Art and Science of Protective Relaying; C. Russell Mason. John Wiley & Sons, Inc. New York. II Edition, pag # 221

balanceadas que son el resultado de la falta, o falle de la protección, o fallas del equipo de protección total del sistema, el relé Westinghouse tipo COQ o un similar es el más convenientemente empleado, éste no es sino un relé de secuencia negativa con un mínimo de partida de 0,6 p.u. de la corriente de secuencia negativa ( $i_2$ ) y tiene derivaciones entre 3 a 5 amperios de  $i_2$ . Este relé es conectado para disparar el interruptor principal del generador.

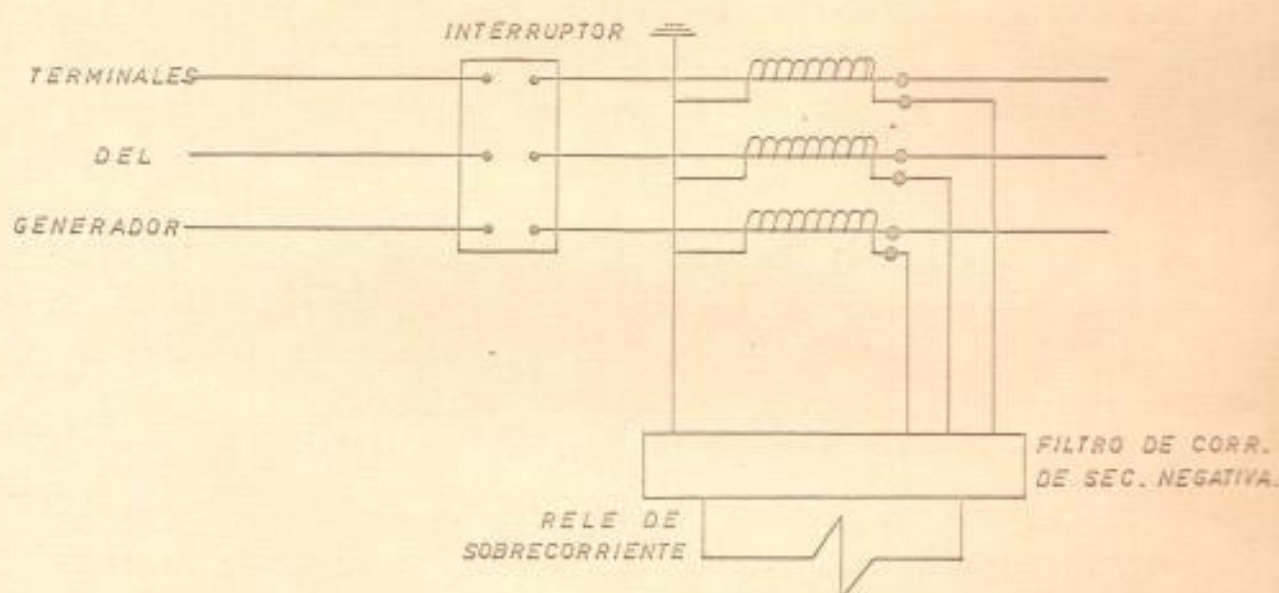


Diagrama # 24

PROTECCION CONTRA LAS PERDIDAS DE EXCITACION .- Cuando un generador sincrónico pierde excitación, opera como un generador de inducción, girando sobre la velocidad de sincronismo. Los generadores de rotores cilíndricos no están adaptados para tal operación por no poseer bobinados de amortiguación que puedan llevar las corrientes inducidas del rotor. Consecuentemente los rotores de generadores de turbinas a vapor se sobre-calentarán tan pronto como las corrientes inducidas fluyan en el hierro de su estructura. Los generadores de polos salientes invariablemente tienen bobinados de amortiguación, y, por lo tanto, no están sujetos a tales sobre-calentamientos.

Las pérdidas de sincronismo no requieren un disparo inmediato del interruptor, a menos que haya un decrecimiento del voltaje terminal a un punto donde posiblemente ocurrirá



la inestabilidad del sistema. Generalmente una máquina toma de 2 a 6 segundos para perder sincronismo. Un turbo generador puede girar sin peligro a una velocidad sobre la de sincronismo con excitación cero por un tiempo de 2 a 3 minutos, aunque el tiempo máximo registrado ha sido de 17 minutos para una máquina de 10.000 Kw operando a una frecuencia de 25 ciclos.

Cuando un generador pierde excitación, absorbe potencia reactiva del sistema aumentando de 2 a 4 veces la carga nominal del generador. Las pérdidas de excitación son un resultado de las pérdidas de campo de la excitatriz principal, disparos accidentales de los interruptores, corto circuitos en los bobinados del campo, mal contacto en los carbones de la excitatriz, o errores de operación.

Para proteger los generadores de estas anomalías, el relé Westinghouse tipo HLF o similar, es aplicable para todo tipo de máquinas.

Este relé tiene como finalidad:

- 1) Alertar al operador de cualquier pérdida o baja de la excitación que podría dañar la máquina o resultar en inestabilidad.
- 2) Alertar al operador tan pronto como sea posible de la pérdida de campo de tal forma que pueda tener tiempo suficiente para corregir esa anomalía, y
- 3) Disparar la máquina automáticamente si hay peligro de inestabilidad en el sistema.

PROTECCION CONTRA LA MOTORIZACION .- La protección en este caso, es principalmente para la fuerza motriz del sistema, mas bien que para el propio generador. Una de las causas de la motorización es la deficiencia de la fuerza motriz que se imprime a un generador de corriente alterna. Cuando esta fuerza no puede abastecer todas las pérdidas, la deficiencia se suple por absorción de potencia real del sistema. Como la excitación del campo debe de mantenerse constante, la misma potencia reactiva fluirá como antes de la motorización. Así pues en motorización, la potencia real entrará a la máquina, mientras que la potencia reactiva puede ser o positi-

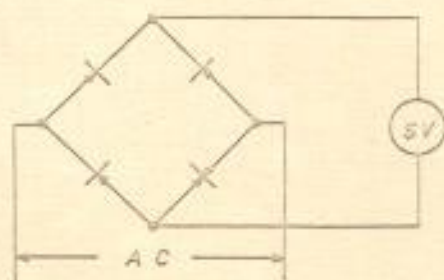
va (inductiva) o negativa (capacitiva). Generalmente la potencia reactiva será, positiva ya que las máquinas no operan con factor de potencia adelantado.

En turbinas hidráulicas la protección para la motorización puede ocasionalmente ser deseada contra las formaciones de cavidades en las hojas o aspas de las turbinas. Estas cavidades ocurren como consecuencia del poco flujo de agua, resultado del bloqueo u obstrucción de las compuertas, o las rejillas por basuras u hojarascas que acarrea el agua; sin embargo, en Centrales donde existe personal de limpieza, generalmente no se necesita de esta protección.

La protección sería suministrada por un relé direccional de potencia capaz de operar con una corriente de motorización de un valor más o menos igual al 2,5 % de la de régimen del generador.

PROTECCION DE SOBRE VOLTAJES PARA GENERADORES DE TURBINAS HIDRAULICAS .- Esto es recomendable principalmente para generadores hidroeléctricos que están sujetos a las sobrevelocidades y consecuentemente sobre voltajes, como consecuencia de las pérdidas de carga.

Han habido casos donde generadores de turbinas hidráulicas pueden llegar de 130 a 140 % de la velocidad nominal como un resultado de la disminución de carga; lo que produce que el voltaje aumente en un 200 % o más. El diagrama # 25 muestra la protección de sobre voltaje para un generador. (1)



SV: relé de sobre voltaje

Diagrama # 25

(1) Applied Protective Relaying. A New "Silent Sentinels" Publication. Westinghouse Electric Corporation. pag #4-16



El relé puede usarse para actuar una alarma o hacer un cambio en el sistema de excitación para reducir el voltaje aplicado.

## SUB-ESTACION TRANSFORMADORA DEL SISTEMA

La sub-estación estará adjunta a la casa de máquinas y al aire libre, y la constituirá principalmente un transformador estático de las características siguientes:

3 fases, 60 ciclos, 4.500 Kva, tipo OA/FA sumergido en aceite a  $55/65^{\circ}\text{C}$ , alto voltaje 22 Kv, conexión  $\text{Y}_a$  con 3 derivaciones de 2,5 % sobre voltaje de régimen y 1 de 2,5 % bajo voltaje de 22 Kv. El lado de baja a 2,4 Kv tendrá una conexión  $\Delta$ ; con radiadores adaptados a la caja.

Como las potencias y las pérdidas térmicas de los transformadores aumentan mucho más rápidamente que su superficie normal, y puesto que con la circulación natural del aceite no llega a conseguirse disipar más que de 0,04 a 0,05 w/cm<sup>2</sup> es necesario para potencias mayores (35 Kva y superiores) que la superficie de radiación del calor supere a la normal de la caja; Para transformadores de potencias moderadas dichas superficies pueden duplicarse haciendo que los lados de la caja sean ondulados, y, para potencias mayores se sueldan tubos de retorno que comunican la parte alta y la parte baja de la caja, teniendo un mejor enfriamiento mediante una corriente forzada de aire que circula en contacto con las superficies exteriores de refrigeración, que pueden ser estos tubos o radiadores adaptados a la caja. La corriente forzada de aire se crea por medio de ventiladores dispuestos fuera del transformador, frecuentemente en la parte inferior de los radiadores.

La ventaja mayor que ofrecen los transformadores trifásicos es la de tener un bajo costo comparado con su equivalente de tres transformadores monofásicos, y esto se debe a que por su construcción se necesita especialmente menor cantidad de material ferromagnético. Los transformadores trifásicos además, tienen un peso considerablemente menor y mucha menos superficie de planta que tres transformadores monofásicos de igual potencia, por lo que son preferidos en la práctica, resultando también una economía en el transporte, pues resulta más barato trasladar a cualquier lugar un trans-



formador trifásico que su equivalente de tres monofásicos.

La gran desventaja que presentan los transformadores trifásicos es de que al averiarse una fase debe de inmediato retirarse del servicio todo el transformador, lo que no sucede en un banco constituido por tres monofásicos acoplados, puesto que si se avería uno de ellos, el sistema de nuestro estudio podría trabajar en triángulo abierto-estrella abierto con su capacidad reducida en un 57,7 % del banco de tres unidades, o se puede reemplazar el transformador averiado por otro de reserva que puede substituírse rápidamente.

El montaje ( $\Delta Y_2$ ) triángulo-estrella es el preferido para sub-estaciones elevadoras de voltaje, pues con estas conexiones, no se presenta el problema del neutro flotante, ni de la distorsión de la onda, como sucede con el montaje estrella-estrella. Otra importante ventaja de esta clase de acoplamiento es que requiere menos aislamiento para altas tensiones así por ejemplo, en el caso nuestro el transformador necesita aislarse solamente para 12,716 Kv con respecto a tierra.

PROTECCION .- La protección requerida para transformadores es contra sobre-cargas y fallas que pueden producirse interiormente, o en sus terminales externos.

Para el primer caso un relé térmico se sumerge en el aceite del transformador, pero energizado desde un transformador de corriente que reacciona a la temperatura del cobre. Este relé solamente lo poseen transformadores modernos, y tienen contactos para actuar una alarma que anuncia el acercamiento de temperaturas peligrosas.

La protección de fallas internas en los transformadores de más de 1.000 Kva, se realiza principalmente por medio del uso de relés de tipo diferencial. El relé diferencial Westinghouse tipo CA o similar es el de mayor aplicación por ser el menos complejo y el más económico, y éste a diferencia del relé diferencial para generadores, se caracteriza por tener un porcentaje de 50 % de desbalance y necesitar una corriente mínima de 2,8 amp. para actuar. Para su operación cualquier corriente comprendida sobre este límite y que circule por la bobina operacional sería necesaria.

Como se explicó anteriormente el transformador de potencia está en una conexión  $\Delta Y_2$  y los transformadores de corriente a cuyos secundarios estarán instalados los relés, se conectarán en estrella para el lado triángulo, y en triángulo para la conexión estrella, esto se hace con el fin de rotar las fases y eliminar la secuencia cero en la operación del relé cuando la conexión en estrella está puesta a tierra.

El diagrama # 26 indica las conexiones del relé para dotar de protección diferencial al transformador.

A continuación procedemos a calcular los transformadores de corriente y a seleccionar las derivaciones del relé para las cuales deberá operar satisfactoriamente.

Corriente en el lado de alta tensión del transformador:

$$I = \frac{4.500 \text{ Kva}}{\sqrt{3} \cdot 22 \text{ Kv}} = 118,2 \text{ amp.}$$

Transformadores de corriente a utilizarse:

$$150/5$$

La corriente en el secundario de este transformador será:

$$I_{\text{sec}} = \frac{118,2 \times 5}{150} = 3,94 \text{ amp.}$$

La corriente fuera de la conexión " $\Delta$ " de los transformadores de corriente

$$I_{\text{sec}} = \sqrt{3} \times 3,94 = 6,81 \text{ amp.}$$

Corriente en el lado de baja tensión del transformador:

$$I = \frac{4.500 \text{ Kva}}{\sqrt{3} \cdot 2,4 \text{ Kv}} = 1.081,7 \text{ amp.}$$

Luego los transformadores de corriente deberán tener una relación de:

$$1.200/5 = 240$$



Corriente en el secundario de este transformador de corriente

$$I_{\text{sec}} = \frac{1.081,7 \times 5}{1.200} = 4,50 \text{ amp}$$

Derivación a utilizarse 5.

Para el lado de alta tensión del transformador

$$\frac{6,81}{4,50} \times 5 = 7,56$$

luego, podríamos utilizar la derivación 8.

Con esta derivación en el relé, se tendría una corriente de 4,25 amperios en la bobina de restricción.

En la bobina operacional se tendrá:

$$I_{\text{op}} = 4,50 - 4,25 = 0,25 \text{ amp}$$

que está dentro del límite de operación, pues el porcentaje de desbalance es

$$\% = \frac{4,50 - 4,25}{4,25} = 5,8$$

Al cambiar las derivaciones del transformador, la corriente operacional en el relé, para cada una de ellas es:

DERIVACION	KV	CORRIENTE OPERACIONAL EN EL RELE	DERIVACION EN EL PRIMARIO	DERIVACION EN EL SECUNDARIO
2,5 %	23,650	0,25	5	8
2,5 %	23,100	0,25	5	8
2,5 %	22,550	0,26	5	8
2,5 %	21,450	0,27	5	8
--	22,000	0,25	5	8

De los cálculos efectuados, y tal como se indica en el cuadro anterior, podemos llegar a la conclusión de que si cambiamos las derivaciones del transformador, manteniendo fijas las del primario y secundario en el relé, la corriente de desbalance que circulará por la bobina operacional es casi invariable para cualquiera de los casos.

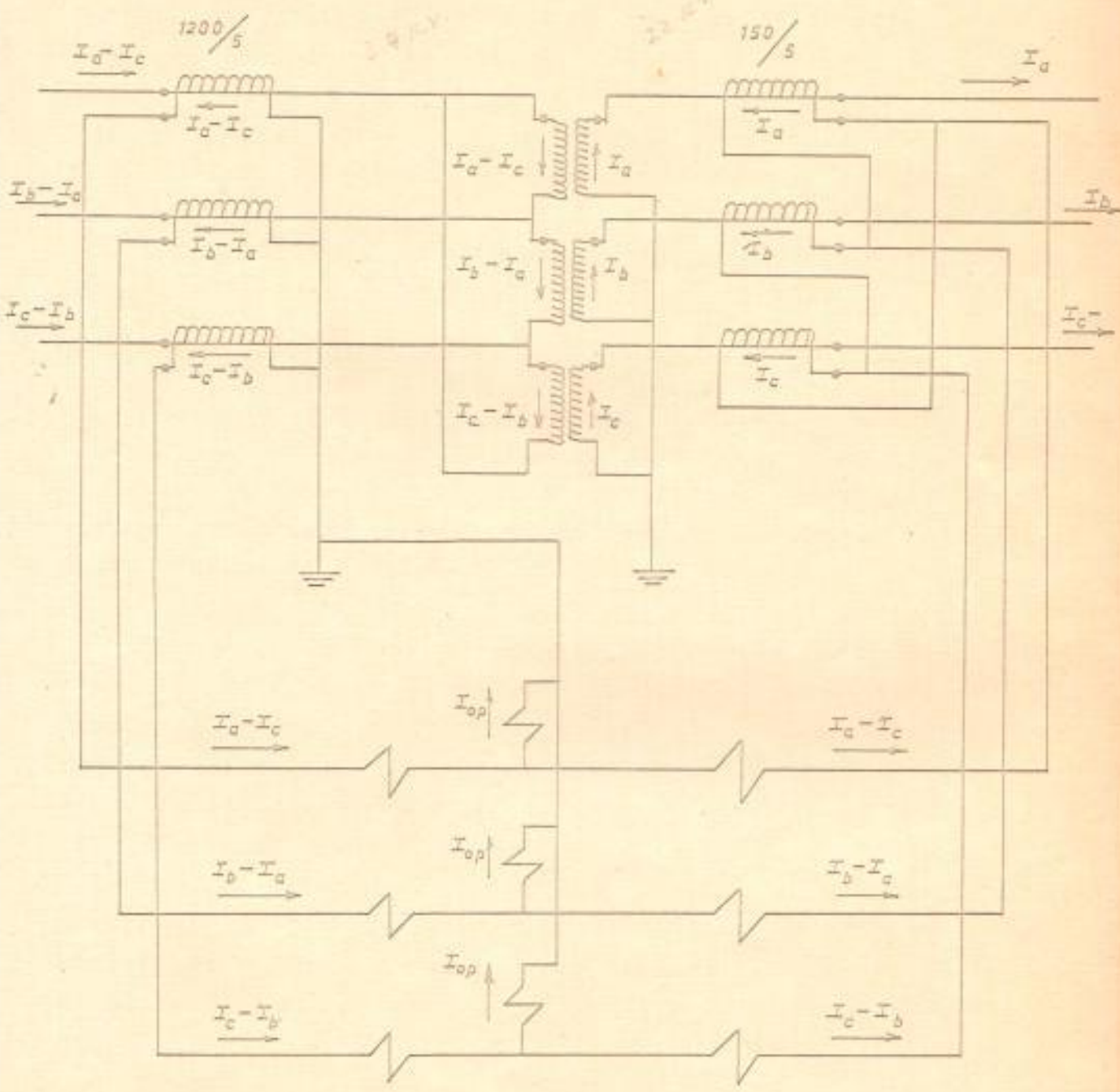


Diagrama # 26



## LINEAS DE TRANSMISION

El transporte de la energía eléctrica a distancias considerables y de una manera bastante económica se logra con tensiones elevadas, que son fáciles de conseguir con corrientes alternas. Los voltajes de generación llegan hasta aproximadamente 20 Kv, los mismos que a través de transformadores son elevados para así obtener mayores voltajes de transmisión.

La tensión de transporte se determina principalmente atendiendo a razones económicas. Aunque las tensiones elevadas permiten reducir la sección de los conductores, la economía que se obtiene se reduce debido al aumento de costo de aislamiento de la línea, de sus estructuras de soporte, y por el mayor tamaño de las estaciones transformadoras.

Debido al peligro que representan, no suele permitirse que líneas de alta tensión pasen por distritos muy poblados para llegar hasta las sub-estaciones de distribución; por esta razón, la sub-estación donde se reducirá la tensión estará situada a las afueras de la Ciudad y luego continuar a bajo voltaje para su distribución.

La energía se produce a 2,4 Kv y se transmite a las barras, luego se eleva a la tensión de transporte de 22 Kv por medio del transformador trifásico de la sub-estación, cuyos secundarios están conectados a las barras de 22 Kv. La energía circula entonces por una línea de transporte de siete millas de longitud y compuesta de un solo circuito, hasta la sub-estación situada en las afueras de la ciudad donde debe distribuirse y utilizarse. Allí se reduce a 2,4 Kv y se transmite a las barras del panel principal de distribución de las alimentadores que serán construídas a los sectores de la ciudad.

De acuerdo, a la clasificación general de líneas de transmisión, esta sería una línea de transmisión corta, puesto que solamente alcanza una longitud de 7 millas, aproximadamente 11 Km.

La clasificación de las líneas de acuerdo a su longitud

tenemos:

Línea corta  $\leq 50$  millas

Línea mediana 50 — 150 millas

Línea larga  $> 150$  millas

Para los cálculos de caída de voltaje, regulación, y eficiencia en las líneas de transmisión cortas, solamente se considerará la resistencia y la reactancia inductiva del conductor; la reactancia capacitiva es despreciable y solamente se la toma en cuenta en líneas mayores de 150 millas.

Los problemas en las líneas de transporte, se resolverán únicamente como un simple circuito de corriente alterna.

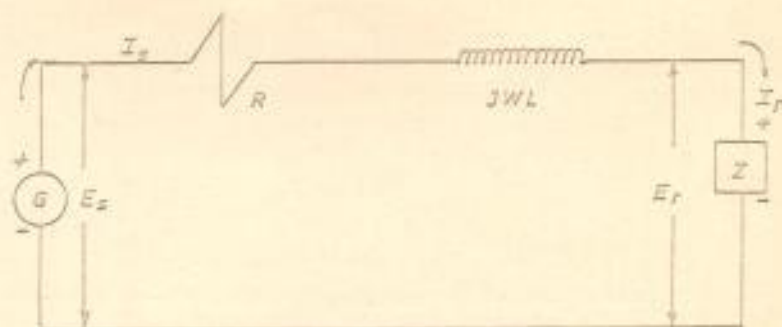


Diagrama # 27

Para nuestros cálculos, el diagrama de una línea se ha representado en la figura anterior, donde:

$\vec{E}_s$  = voltaje en la fuente

$\vec{E}_r$  = voltaje en los terminales del receptor

$R$  = resistencia del conductor

$X_L$  = reactancia inductiva del conductor

Para calcular la regulación de la línea es más conveniente utilizar el diagrama de vectores, haciendo  $\vec{E}_s$  el vector de referencia. El diagrama de vectores se muestra a continuación.



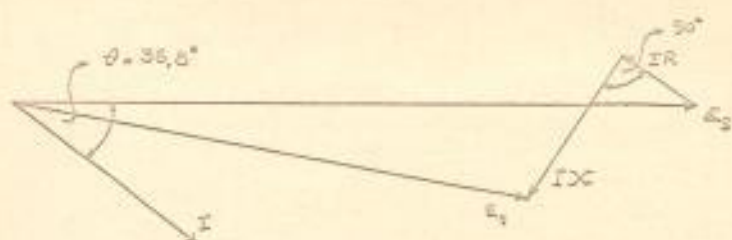


Diagrama # 28

De donde:

$$\vec{E}_r = \vec{E}_s - \vec{I}Z$$

$$\vec{E}_r = \vec{E}_s + \vec{I}(-R - jX)$$

$$\vec{E}_r = \vec{E}_s \angle 0^\circ + (\vec{I} \cos \phi - j\vec{I} \sin \phi)(-R - jX)$$

Siendo:

$$\vec{E}_s = 12,716 + j0 \text{ Kv}$$

$$R = 0,445 \Omega / \text{cond.} / \text{milla para conductor ACSR \# 4/0} \\ = 3,11 \Omega / \text{cond.}$$

$$\vec{I} = \frac{3.750 \text{ Kva}}{\sqrt{3} \cdot 22 \text{ Kv}} = 98,2 \angle -36,8^\circ \text{ amp}$$

$$\vec{I} \cos \phi = 98,2 \times 0,8 = 78,8 \text{ amp}$$

$$\vec{I} \sin \phi = 98,2 \times 0,6 = 59,1 \text{ amp}$$

$$X_L = 5,75 \Omega / \text{cond.}$$

Luego

$$\vec{E}_r = 12,716 + j0 + (78,8 - j59,1)(-3,11 - j5,75)$$

$$\vec{E}_r = 12,134 \angle -1,26^\circ \text{ Kv}$$

$$\vec{E}_r = 21 \angle -1,26^\circ \text{ Kv}$$

correspondiente al voltaje de línea en los terminales -

La regulación de la línea será:

$$\% \text{ Reg} = \frac{E_s - E_r}{E_r}$$

$$\% \text{ Reg} = \frac{22 \text{ Kv} - 21 \text{ Kv}}{21 \text{ Kv}} = 4,76$$

Para calcular el rendimiento de la línea, averiguamos primeramente las pérdidas que se producen en ella.

$$\text{Pérdidas} = 3 I^2 R = 3 \times 98,2 \times 3,11 = 89,9 \text{ Kw}$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{3.000 \text{ Kw} - 89,9 \text{ Kw}}{3.000 \text{ Kw}} = 97,0 \%$$

PROTECCION DE LAS LINEAS .-- Una gran parte de las interrupciones en las líneas de alta tensión se deben a los rayos o descargas atmosféricas.

Las líneas de transmisión de energía se protegen parcialmente contra las descargas atmosféricas empleando hilos de tierra que se colocan a mayor altura que los conductores conservando las regulaciones indicadas en la página # 48; estos hilos son de acero, de cobre con alma de acero o de una aleación de alta resistencia a la tracción, y se conectan con los puntos más altos de las torres metálicas y en el caso de los postes de madera con un alambre de cobre que establece comunicación con tierra a lo largo del poste.

En su mayor parte las líneas están protegidas por pararrayos. La misión de los pararrayos es limitar el aumento de tensión entre sus terminales hasta un valor que solo sea superior a la tensión de la línea, cuando la tensión aplicada a los pararrayos alcanza el valor crítico (aproximadamente 2,5 veces el volteje al que opera la línea); este descarga corrientes de intensidad infinitamente grandes, sin que aumente la tensión en los terminales.

Los pararrayos deben conectarse tan cerca como sea po-



sible de los aparatos que se quiera proteger, por ejemplo deben montarse directamente sobre los transformadores o sobre las crucetas para protección de aisladores, seccionadores, cajas fusibles etc. Cuando se quiere proteger una central debe instalarse en el extremo de la línea de entrada o de salida, tan cerca como se pueda de las unidades de la central.

Debido a su costo no es práctico emplear gran número de pararrayos para proteger los aisladores de una línea; por esta razón los tubos de protección que son cerrados y de poco costo relativamente, encuentran en la actualidad amplia aplicación para este propósito. Los tubos de protección están contruidos con un tubo de fibra o de mica con casquillos en ambos extremos. Dentro del tubo hay dos electrodos: inferior y superior. El casquillo superior va unido a unas antenas y los tubos están instalados de manera que cada una de las antenas queda exactamente debajo de un conductor formando con ella un espacio de aire en serie. El electrodo inferior está en comunicación con tierra. Cuando salta la chispa la descarga pasa a la antena y al interior del tubo desde el electrodo superior al inferior.

Para mejor protección de las líneas se obtiene localizando el conductor de tierra a una altura tal en el tope del poste que permita un ángulo de protección de  $30^{\circ}$  (ver diagrama # 18)

La protección contra fallos de la línea de transmisión de este proyecto, que pudieran ocurrir en cualquiera de sus puntos, se logrará mediante la localización de un relé de distancia.

En el diagrama # 19 el relé B Westinghouse tipo DK-4 o similar, se utilizará para protección de la línea.

Para fijar la impedancia en el secundario del relé, seguiremos el mismo procedimiento que recomienda la Westinghouse a través de su boletín # I.L.41-491-4B.

Impedancia en el secundario del relé:

$$Z_R = (0,9) Z_L \frac{R_c}{R_v}$$

Siendo

0,9 = Porción de la línea para la cual se fijará el relé

$R_c$  = Relación del transformador de corrientes  
150/5

$R_v$  = Relación del transformador de voltaje  
22/0,120 Kv

$Z_L$  = Impedancia de la línea  
0,44 + j0,82  $\Omega$ /cond./milla  
6,51  $\underline{61,8^\circ}$   $\Omega$ /cond.

Luego

$$Z_R = 0,9 \times 6,51 \times \frac{30}{183,3} = 0,954 \Omega$$

La impedancia que se fijará en el relé es:

$$Z = \frac{P \times S}{1 + M}$$

donde:



T = Valor del tap del compensador  
(0,87-1,16-1,45-2,03-2,9-4,06-5,8)

S = Valor del tap en el primario del auto-transformador (1-2-3)

M = Valor del tap en el secundario del auto-transformador (0,03-0,06-0,09-0,12-0,15-0,18)

Como el ángulo de torque máximo que el relé trae desde fábrica es  $75^{\circ}$ , y, teniendo en nuestro caso solamente un ángulo de  $61,8^{\circ}$ , tendremos que hacer la corrección siguiente:

$$Z_R = 0,954 \times \frac{\sin 75^{\circ}}{\sin 61,8^{\circ}} = 1,04 \Omega$$

Para el valor de  $Z_R = 1,03 \Omega$  corresponden

$$S = 1 \quad T = 1,16 \quad M = 0,12$$

Estos deberán satisfacer la relación anterior

$$Z_R = \frac{1,16 \times 1}{1 + 0,12} = 1,03 \Omega$$

Con la finalidad de proteger los generadores para fallas hasta la sub-estación, se utilizarán relés de sobrecorriente, los mismos que se han denominado 1-2-3-A en el diagrama # 19.

Estos, deberán coordinarse de la siguiente manera:

Relé A .-

General Electric tipo IJCV51A o similar, con voltaje de resticción y con características de tiempo inverso; con derivaciones 4-5-6-8-10-12 y 16. Se fijará en la posición # 4 para el disparo.

Para 20 voltios de restricción, asumiendo una corriente de falla de 1.500 amp en el punto "a" de la figura # 19 y utilizando para los transformadores de corriente una relación de 400/5, tenemos:

Corriente en el secundario del transformador

$$I = \frac{1.500}{80} = 18,75 \text{ amp}$$

Corriente múltiplo de tap

$$I_R = \frac{18,75}{4} = 4,68 \text{ amp}$$

Si se desea que el relé opere en un tiempo de 0,48 seg. éste deberá fijarse en el dial # 3.

Si la falla ocurre en uno cualquiera de los generadores, asumiendo para este caso una corriente de falla de 500 amp. en sus terminales, el relé se fijará en el dial # 3 para operar en un tiempo de 0,86 seg.

Los relés de sobrecorriente 1-2-3 tienen las mismas características de operación que el relé "A".

La corriente de falla en los terminales de los generadores se ha asumido ser de 500 amp. Luego,

Corriente en el secundario del transformador

$$I = \frac{500}{80} = 6,25 \text{ amp}$$

Corriente múltiplo de tap

$$I_R = \frac{6,25}{4} = 1,56 \text{ amp.}$$

Para que el relé opere en un tiempo de 0,38 seg será nece-



serio fijarlo en el dial # 1.

Si la falla ocurre en el punto "a" este relé se fijará en el dial # 5 para un tiempo de operación de 0,55 seg.

Debido a la irregularidad orográfica que presentan las zonas por donde la línea de transmisión deberá construirse, ha sido necesario emplear postes de madera de una altura establecida de 11,50 m desde el conductor de fase hasta tierra, aumentándose una longitud de 3,6 m, de tal forma que permita localizar el conductor de tierra en el extremo del poste, para así obtener un ángulo de protección de  $30^{\circ}$ .

Los postes de madera tienen la ventaja de ser económicos, ventaja que aumenta, naturalmente, en las regiones de bosques o cerca de ellas; son ligeros, fáciles de equinar y de levantar; por el contrario, su duración es menor que la de los postes metálicos o de hormigón. Debido a la poca altura de los postes de madera, los venos deben ser de poca luz.

Sin embargo, cabe anotar que de entre los varios tipos de postes, sean éstos de hierro, de hormigón, o metálicos, la forma menos costosa de soporte para líneas de transmisión, es la torre flexible. Su forma se basa en el principio de que si las fuerzas de tracción de dos tramos contiguos son iguales, la torre actúa sólo como pia derecho que soporta la línea en un extremo, pero no tiene que resistir esfuerzos horizontales.

Las torres flexibles son simplemente estructuras en forma de A, previstas para resistir el máximo esfuerzo transversal que pueda presentarse, pero no los esfuerzos en la dirección de la línea. Cuando se usan estas torres es preciso disponer torres de anclaje cada 1.500 m aproximadamente, que compensen cualquier desequilibrio de tensiones mecánicas que pueda provenir de la rotura de un cable.

La ventaja de las torres flexibles está en el hecho de que pueden transportarse completamente montadas, e izarse con facilidad.

Las crucetas a emplearse serán también de madera con dos apoyos metálicos sobre la estructura del poste.

La característica de funcionamiento de una línea de transporte depende en gran parte de sus aisladores.

El aislador debe tener no solamente la suficiente resistencia mecánica para soportar las cargas máximas debidas muchas veces al viento, sino que también deben resistir esfuerzos mecánicos anormales, descargas atmosféricas y sobretensiones internas, sin que se libere el conductor que sostienen. Están concebidos de manera que la lluvia elimine el polvo y la suciedad. Los aisladores se fabrican de vidrio, porcelana y compuestos patentados. El aislamiento de las líneas de baja tensión ofrece escasa o ninguna dificultad.

El vidrio es conveniente para líneas de construcción ligeras, tales como las telefónicas o las de transporte a tensión media; cuando las tensiones llegan hasta 10 o 15 Kv, ofrecen la ventaja de su precio reducido y de que se descubren fácilmente sus defectos y roturas. Por el contrario, son higroscópicos y se rompen con facilidad. Solamente se pueden emplear los vidrios de alta calidad resistentes al calor, como el pírrex, para las líneas de alta tensión.

La porcelana tiene excelentes características mecánicas y eléctricas, pero es más cara que el vidrio. Los defectos internos son invisibles y las grietas producen la rápida destrucción del aislador. La porcelana es el principal material empleado para aisladores de líneas de alta tensión.

En nuestro proyecto, se emplearán aisladores de porcelana tipo espiga ASA clase 56-1 o similar a Ohio Brass Cat # 38246 aconsejables por su poco costo, la facilidad de instalación y el que proporcionen un soporte rígido para los conductores.

Los aisladores de espiga pueden utilizarse con seguridad hasta unos 66 Kv, pero para tensiones de este orden resulten grandes, costosos y producen esfuerzos de torsión excesivos en las crucetas.



En aquellas estructuras de ángulo o de remate de la Línea de transmisión será necesario utilizar aisladores de suspensión formando cadenas de 3 unidades para cada fase. Los aisladores serán ASA Clase 52-1 similar a Ohio Brass Cat. # 32433.

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

- 1) "HIDRAULICA" por Francisco Javier Domínguez. Tercera Edición.
- 2) "ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE" BOOK" of the Westinghouse Electric Corporation. Fourth Edition.
- 3) "ELEMENTS OF POWER SYSTEM ANALYSIS". William D. Stevenson Jr. Second Edition.
- 4) "INDUSTRIAL POWER SYSTEMS HANDBOOK". Donald Beeman. First Edition.
- 5) "THE ART AND SCIENCE OF PROTECTIVE RELAYING"; C. Russell Mason. Second Edition.
- 6) "APPLIED PROTECTIVE RELAYING". A New Silent Sentinels Publication of the Westinghouse Electric Corporation.
- 7) BOLETIN N° I.L.41-491-4B ; Westinghouse.
- 8) BOLETIN N° GEI-28763-D ; General Electric.
- 9) "TRANSMISSION AND DISTRIBUTION INSULATOR". Ohio Brass Company; Catalog # 42.