

5
26j

**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

**Facultad de Estudios Superiores
Cuautitlán**

**Estudio de la Central Hidroeléctrica
Ing. Carlos Ramirez Ulloa de
Comisión Federal de Electricidad
"El Caracol"**

T E S I S

Que para Obtener el Título de:

Ingeniero Mecánico Electricista

PRESENTAN

Ublester Aviles Duarte

J. Humberto J. Cebada López

Asesor de Tesis : Ing. Alfredo López Tagle





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

PAG.

I.	INTRODUCCION A LA GENERACION HIDROELECTRICA-----	1
I.1	Fuentes de Energia -----	1
I.2	Plantas Generadoras -----	9
I.3	Controles Hidroeléctricos -----	13
II	DESCRIPCION DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA -----	22
II.1	Generalidades -----	22
II.1.1	Localización -----	22
II.1.2	Hidrografia, Topografia, E Hidrologia de la cuenca del Rio Balsas -----	23
II.2	Introducción -----	27
II.3	Obra de Desvío -----	29
II.4	Cortina -----	31
II.5	Vertedor -----	32
II.6	Obra de Toma -----	34
II.7	Casa de Máquinas -----	35
II.8	Tubo de Desfogue -----	37
II.9	Subestación -----	38
III	IMPORTANCIA PARA EL SISTEMA ELECTRICO DE LOS ESTADOS- DE MORELOS Y GUERRERO -----	40
IV	OPERACION COMO GENERADOR Y COMO CONDENSADOR SINCRONO-----	45
IV.1	Introducción -----	45
IV.2	Características Generales de los Generadores de LA -- CENTRAL HIDROELECTRICA EL CARACOL -----	49
IV.2.1	Estator -----	50
IV.3	Datos Técnicos -----	52

	PAG.
IV.4	Límites de Operación ----- 54
IV.4.1	Capacidad de Carga ----- 54
IV.4.2	Variación de Voltaje y Frecuencia ----- 56
IV.5	Puesta en Marcha y Parada ----- 58
IV.5.1	Controles Antes de Puesta en Marcha ----- 58
IV.5.2	Puesta en Marcha ----- 60
IV.5.3	Excitación en Vacío ----- 62
IV.5.4	Sincronización ----- 64
IV.5.5	Toma de Carga ----- 66
IV.5.6	Parada ----- 69
IV.6	Condiciones de mal Funcionamiento ----- 70
IV.6.1	Pérdida de Paso ----- 70
IV.6.2	Pérdida de Excitación ----- 71
IV.6.3	Operación con un único punto de masa en el circuito de Excitación ----- 72
IV.6.4	Averías en el Aislamiento de Bobinado de Armadura -- 73
IV.6.5	Servicios con desequilibrios de Corriente de Armadura. ----- 74
IV.7	Generador Síncrono de Polos Salientes ----- 77
IV.7.1	Generalidades ----- 77
IV.7.2	Diagrama Fasorial y Diagrama Circular de un Generador Síncrono de Polos Salientes ----- 78
IV.7.3	Generador y Condensador Síncrono ----- 87
IV.7.4	Diagrama Fasorial del Generador de la Central Hidro- eléctrica Carlos Ramírez Ulloa "EL CARACOL", f.p. = 0.95 (atrasado) ----- 88
IV.7.5	Diagrama fasorial del generador de la Central Hidro- eléctrica Carlos Ramírez Ulloa "EL CARACOL" f.p. = - 0.95 (adelantado) ----- 95

IV.7.6	Diagrama Fasorial del Generador de la Central Hidroeléctrica Carlos Ramirez Ulloa "EL CARACOL" f.p. = 0.0 (atrasado) -----	99
IV.7.7	Diagrama fasorial del Generador de la Central Hidroeléctrica Carlos Ramirez Ulloa "EL CARACOL" f.p. = 0.0 (adelantado)-----	103
IV.7.8	Excitación Negativa (para un generador sincrónico de polos salientes -----	107
IV.7.9	Valores Máximos de Potencia Activa y Reactiva -----	110
IV.7.10	Curva de Capabilidad -----	114
IV.7.11	Potencia Reactiva -----	133
V	SISTEMA DE EXCITACION, LUBRICACION Y ENFRIAMIENTO-----	137
V.1.1	Descripción del Sistema de Excitación y el Regulador de Tensión -----	137
V.1.2	Regulador de Tensión y Sistema de Excitación en la C.H. "EL CARACOL" -----	140
V.1.3	Funciones -----	146
V.2	Sistema de Lubricación-----	151
V.2.1	Chumacera gufa -----	151
V.2.2	Chumacera y Sistema de aceite de Lubricación-----	153
V.2.3	Datos Técnicos de la Chumacera Gufa -----	154
V.2.4	Aceite de Lubricación -----	154
V.2.5	Las vibraciones Mecánicas de la Chumacera-----	156
V.3	Sistema de Enfriamiento -----	158
V.3.1	Ventilación -----	158
V.3.2	Sistema de Enfriamiento -----	158
V.3.3	Datos Técnicos de los Enfriadores -----	160

V.3.4	Enfriamiento de Agua Aire -----	160
V.3.5	Refrigeradores de Máquina de Aire-Agua-----	161
V.3.6	Control de las condiciones de Operación de los Refri- geradores -----	165
V.3.7	Fuga de Agua de los Refrigeradores -----	166
V.3.9	Posibles daños causados al Panel -----	167
VI	SERVICIOS PROPIOS DE LA CENTRAL -----	168
VII	SUBESTACION DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA -----	174
VII.1	Introducción -----	174
VII.2	Clasificación de las Subestaciones Eléctricas -----	176
VII.3	Elementos que constituyen una Subestación -----	177
VII.4	Características de la Subestación de la Central Hi- droeléctrica -----	188
VIII	CONCLUSIONES -----	190

1. INTRODUCCION A LA GENERACION HIDROELECTRICA

La generación hidroeléctrica, representa para México una buena solución a sus necesidades, en energía eléctrica debido a que la generación es limpia, se cuenta con mucha tecnología nacional para producirla y además el potencial hidroeléctrico localizado en los diferentes ríos del país, es grande y se utiliza hasta la fecha en un porcentaje muy bajo.

La generación hidroeléctrica representaba hasta el mes de junio de 1981 el 43% de la capacidad total instalada del país que a su vez representa un 30% aproximadamente del aprovechamiento del potencial hidrológico con que cuenta el país.

La mayor parte del potencial hidroeléctrico se concentra en la cuenca de los ríos Grijalva - Usumacinta, Río Balsas y Papaloapan. Debido a lo anteriormente expuesto se tienen proyectadas grandes inversiones para este tipo de generación, en la cuenca de los ríos antes mencionados.

1.1. FUENTES DE ENERGIA

Desde la más remota antigüedad, el hombre se ha preocupado en aprovechar los recursos naturales que le rodean en su propio beneficio, buscando siempre optimizar los procedimientos y técnicas necesarias para explotarlos; ésto le ha permitido llegar al estado actual de desarrollo.

Uno de los principales recursos del cual siempre estuvo ro-

deado fue el agua, que es necesario como líquido vital para la vida misma. Pero conforme la humanidad ha ido evolucionando, -- han ido surgiendo otras necesidades: indispensables para el desarrollo y bienestar de la misma. La producción y utilización de energía es una de estas necesidades. Antiguamente se obtenía -- trabajo mecánico al transformar la energía cinética del agua por medio de ruedas con paletas o cajones que aunque eran artefactos rudimentarios tenían adecuadas aplicaciones.

Actualmente la sociedad depende en todos los aspectos en -- una gran proporción de la disponibilidad de energía en forma -- útil. La energía se usa para el calentamiento y el enfriamiento, la iluminación, nuestro entretenimiento, las comunicaciones y -- transportes, la construcción y fabricación, el lanzamiento de -- vehículos espaciales, etc. etc.

En la actualidad, la energía debe estar disponible en cantidades grandísimas que escapan a cualquier cálculo, en el lugar y en el momento que se necesite, en la forma adecuada para poder -- aplicarse a la tarea o necesidad que se presente, desde iluminar una sala de operaciones, hasta poner a funcionar grandes máquinas.

Algunas de las tareas de los científicos y de los ingenieros, es explorar y explotar fuentes de energía, inventar maneras para convertirla en una forma conveniente, proporcionar técnicas eficientes y medios para transportarla o transmitirla a localidades donde se necesita y de desarrollar medios y dispositivos pa-

ra utilizarla en beneficio de la humanidad.

Las fuentes de energía más comúnmente disponibles y que se usan en todo el mundo en la tecnología actual son los combustibles: carbón, petróleo, gas y madera. Se consideran fuentes de energía porque una reacción química, la oxidación, libera la energía en forma de calor, luz y productos del desarrollo de la combustión, es decir, que una reacción química origina la conversión de energía desde una forma tal como la almacenada en el combustible a otra tal como la térmica, radiante o mecánica. Algunas veces esta energía se utiliza en forma directa, como para el alumbrado, otras en forma indirecta, como cuando se le convierte en energía mecánica por medio de un motor de combustión interna, pero para facilidad en la transmisión y utilización final, la mayor parte de la energía liberada de los combustibles, se convierte aún en otra forma, la energía eléctrica.

Otra fuente de energía, de la que existen muchas controversias tanto en el sector público así como en las investigaciones científicas, es la energía nuclear.

Ciertos "combustibles" radiactivos pueden ser obligados a liberar energía (en forma térmica) por el proceso de fisión. Este proceso solo recientemente se ha vuelto factible y económico. Otro proceso nuclear, la fusión, promete convertirse en una fuente ilimitada de energía si la ciencia y la ingeniería pueden idear técnicas para controlar su liberación de energía.

El sol es otra fuente de energía, que en el lapso de un año radia hacia la tierra más energía que la almacenada en todos los depósitos conocidos de carbón, petróleo y gas. Tal cantidad de energía excede hasta la más descabellada de las estimaciones sobre el consumo mundial en el futuro predecible; pero los medios prácticos y económicos para almacenar y utilizar la energía solar en cantidades considerables aún están por ser desarrollados.

Este conjunto de fuentes de energía prometen un suministro adecuado de energía por milenios; sin embargo, un mayor sentido de observación muestra que la situación no es tan halagüeña como parece. La fuente de energía principal en la actualidad es la de los combustibles y si consideramos el grado en que la demanda de energía del mundo está aumentando es muy probable que en un futuro no muy lejano lleguemos a ver virtualmente exhaustos los suministros de combustibles. La energía nuclear promete un aumento de suministro de energía, pero el material nuclear apropiado para la fisión es esencialmente combustible, y el suministro es limitado y del orden de magnitud de nuestra reserva de combustible normal. Por ésto resulta imperativo investigar y desarrollar otras fuentes de energía, para que dentro de unas cuantas generaciones, puedan ser las fuentes principales de energía.

Muy aparte de la fuente de la que la energía se obtiene, -- existen siempre los problemas básicos de la conversión de energía, su transmisión y utilización, y el de los dispositivos que se necesitan para resolver tales problemas. En la tecnología actual la única forma de energía que resuelve convenientemente los

problemas básicos de transmisión, distribución y utilización para muchos propósitos diferentes, es la energía eléctrica. Ni -- nuestra ciencia ni nuestra tecnología han descubierto ningún -- otro medio por el cual sea posible una técnica competitiva para la conversión y transmisión. Por tanto, la energía de cualquier y de la totalidad de nuestras fuentes, debe ser convertida a la forma eléctrica si se desea abastecer una gran parte de nuestras necesidades.

Durante mucho tiempo, la generación y conversión de la energía eléctrica ha ocupado un lugar secundario en la apreciación pública en comparación con las consecuciones más espectaculares de las válvulas electrónicas y los dispositivos a base de semiconductores. Los ingenieros eléctricos, los científicos, los -- profesores y sus alumnos parece ser que han considerado a la -- energía eléctrica un campo de estudio más bien estéril, falto en general de interés y de oportunidades. No obstante, diversos estudios, que han calculado las reservas de combustibles fósiles -- (carbón, gas y petróleo) que constituyen un muy elevado porcentaje (95% aproximadamente) de las fuentes de energía con que actualmente se cuenta. El crecimiento de la población y el nivel de vida en constante aumento, permiten predecir que en el caso -- más favorable, las reservas de combustible bastan para 200 años -- aproximadamente, mientras que cálculos más pesimistas, lo estiman en unos 50 años. Ello aconseja la búsqueda de nuevas fuentes de energía así como el perfeccionamiento de métodos para la conversión de energía. El insaciable afán de exploración humana de las profundidades oceánicas y del espacio exterior han empeza

do a estimular la investigación de otros medios de conversión de energía. Pero cualquiera que sea el método de generación de energía, parece, puesto que la electricidad es la única forma de la energía que es relativamente fácil de utilizar, controlar y convertir a otras formas de energía, probablemente continuará siendo la principal forma de energía utilizada por el hombre. Por consiguiente, se desprende de éllo que este es un campo que debe continuar siendo investigado.

Por último otra fuente de energía es la mecánica, contenida en nuestros sistemas hidráulicos la que puede ser almacenada en presas y convertida por generadores hidroeléctricos; y la de las mareas de los océanos, que pueden ser una fuente enorme de energía, siempre y cuando se descubran e instalen medios prácticos y económicos para su conversión.

Antiguamente (como ya se mencionó) el hombre obtenía trabajo mecánico por medio de ruedas con paletas o cajones que colocaban en alguna caída de agua y que debido a la energía cinética el agua las hacía girar.

Estas ruedas, se fueron transformando hasta que en el año de 1833, aprovechando por primera vez el principio de reacción FOURNEYRON, construyó la primera turbina hidráulica que en su evolución dió lugar a las modernas turbinas tipos : FRANCIS, HELICE, KAPLAN, BULBO, TUBULAR Y DERIAZ. También en 1846 ZUPPINGER fabricó la primera rueda de impulso que posteriormente en 1880 el ING. LESTEN ALLEN PELTON perfeccionó, convirtiéndola en

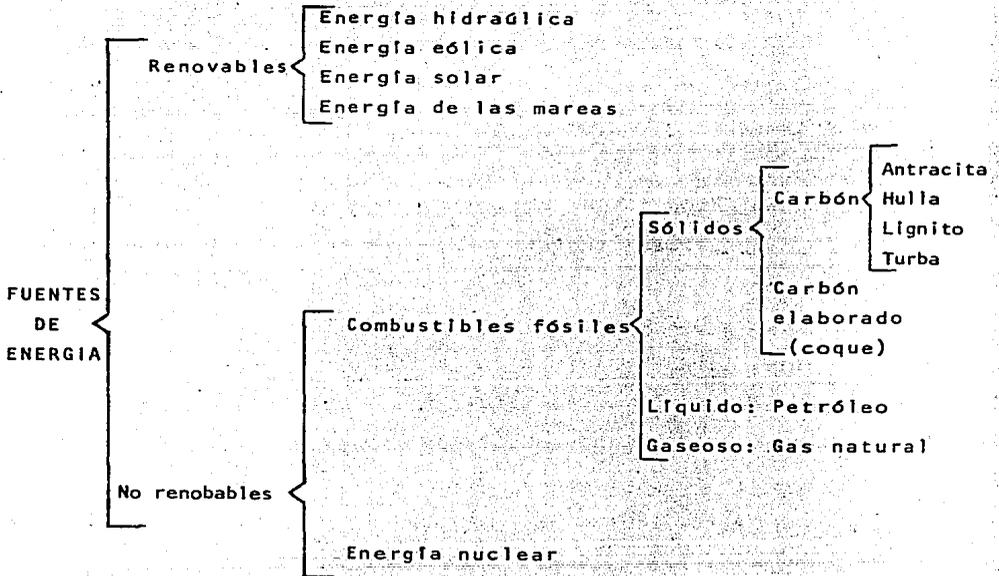
la turbina de construcción moderna que hasta nuestros días lleva su nombre.

El uso principal que actualmente se les ha dado a las turbinas hidráulicas, es el de acoplarlas a generadores eléctricos para que ya como unidad, transformen la energía del agua en ENERGIA ELECTRICA.

La generación que se obtiene de las centrales hidroeléctricas posee varias características que la hacen jugar un papel - - extraordinariamente importante en la economía de los servicios eléctricos, ya que éstos grupos turbo-alternadores, se arrancan rápidamente, se adaptan fácilmente a la demanda de energía eléctrica, no contaminan la atmósfera ni el agua que utilizan y hasta el momento es el medio más económico de generar electricidad, además como se ha mencionado muchas veces, emplea para su funcionamiento un recurso renovable; finalmente debemos observar que la mayoría de las presas que se construyen son de propósito múltiple, es decir, se proyectan no solo para suministrar agua a las turbinas, sino para otros fines, tales como el control de avenidas de los ríos, navegación, riego, fuente de la industria piscícola, etc., con lo cual beneficia a las regiones donde se localizan, además del derrame económico que se vierte a los pobladores que se concentran durante la construcción de las mismas.

Debemos considerar como desfavorables, sin embargo, los problemas sociales que origina al tener que inundar muchas veces poblados, tierras de cultivo, etc.

El siguiente cuadro sinóptico nos muestra un panorama general de las fuentes de energía y su clasificación:

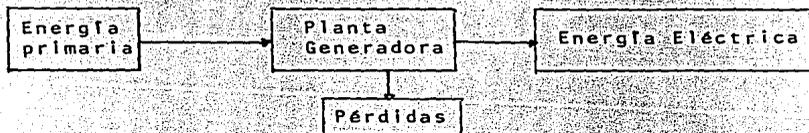


1.2. PLANTAS GENERADORAS

Una planta generadora, es una estación que transforma una energía primaria dada en otra forma de energía utilizable (eléctrica por lo general); no importando, la fuente de energía primaria utilizada o la clase de equipo de transformación de energía (llamada comunmente de generación) o las características de corriente y voltaje obtenidas en los circuitos de utilización.

Como ya dijimos en la actualidad, la única forma de energía que resuelve convenientemente los problemas básicos de transmisión, distribución y utilización para muchos propósitos diferentes es la energía eléctrica. Por tanto, la energía de cualquiera y de la totalidad de las fuentes de energía debe ser convertida a la forma eléctrica.

En forma esquemática el diagrama de una Planta Generadora de energía eléctrica es:



El diagrama de bloques de un sistema de aprovechamiento eléctrico es:



De acuerdo a lo mencionado anteriormente las plantas generadoras se clasifican de la siguiente manera:

- 1) Según la función que desempeñan
 - a) Primaria o de base
 - b) Secundaria
 - c) Auxiliar
- 2) Según la clase de corriente que generan
 - a) Corriente directa
 - b) Corriente Alterna
 - c) De conversión
- 3) Según la clase de energía primaria que transforman
 - a) Térmicas
 - Gas
 - Vapor de caldera
 - carbón
 - b) Hidráulicas

1).- Según la función que desempeñan

a) Planta primaria o de base. - Llamada también de base, es la que puede suministrar una carga constante y continua durante el año, siendo las variaciones de carga situadas por encima del nivel de generación de esta planta cubiertas por otros suministros eléctricos.

b) Planta secundaria o de picos. - Es una de generación esencialmente variable y esta destinada a cubrir los picos de carga de la curva de consumo. Esta clase de planta, para ser económica y de mayor utilidad, requiere un embalse de regulación que le permita aprovechar los caudales no consumidos durante los períodos de menor demanda de carga.

Como es obvio, la planta primaria y secundaria deben obrar en conjunto siendo conectadas en paralelo a las mismas barras colectoras para prestar un servicio satisfactorio. Para ello se usa generalmente una planta hidráulica y una térmica, o al contrario, según sean las características del caudal utilizable en la planta hidráulica durante el año, y los costos relativos de generación y transmisión en una y otra planta.

c) Planta auxiliar. - Como su nombre lo indica, está destinada a prestar servicios limitados, tales como energía para el equipo de construcción de una planta principal, el alumbrado de ésta durante su explotación, el suministro de corriente continua para excitación de los alternadores, carga de baterías, grúas, etc.

Estas pequeñas plantas pueden estar constituidas por unidades hidráulicas unidas por la misma conducción forzada de la planta principal, o por unidades hidráulicas o térmicas independientes cuyos generadores pueden estar montados dentro o fuera de la casa de fuerza de la planta principal.

2).- Según la clase de corriente obtenida

a) Plantas de corriente directa. - Son en general de poca capacidad y de uso limitado a tranvías y ferrocarriles eléctricos, industrias eléctricas y servicios de comunicaciones. Además, como la energía de corriente directa no es transportable económicamente a distancias aprovechables, por lo general cuando se re-

quieren suministros de corriente directa la solución más económica consiste en transportar la energía en forma de corriente alterna al área de consumo, en donde, para su utilización es convertida en corriente directa.

b) Plantas de corriente alterna. - Casi la totalidad de energía generada en las plantas eléctricas es de corriente alterna, la cual se eleva a un voltaje conveniente para ser transportada práctica y económicamente a cualquier distancia, sin pérdidas -- que hagan su consumo antieconómico.

c) Plantas de conversión. - Estas no son generadoras, sino -- que se limitan a recibir corriente alterna transportada desde -- una planta generadora o transformadora, para convertirla en corriente directa por medio de convertidores u otras máquinas de -- rectificación.

3).- Según la energía primaria utilizada.

De acuerdo con la energía primaria utilizada las plantas -- eléctricas se clasifican en: termoeléctrica, hidroeléctrica, geotérmicas y nucleoelectricas.

Como el estudio de las plantas generadoras es muy amplio en este caso nos enfocaremos sobre las Plantas Generadoras Hidro -- eléctricas.

1.3.- CENTRALES HIDROELECTRICAS

Una central hidroeléctrica, se puede definir simplemente como el conjunto de obras e instalaciones proyectadas para transformar la energía cinética del agua en energía eléctrica, sin embargo debido a que se construyen sobre ríos y éstos no conducen el mismo caudal de agua en dos puntos distantes sobre su mismo cauce y que además existen muy pocas probabilidades de que se encuentren sitios que técnicamente nos permitan aprovechar un desnivel similar, hace que cada proyecto sea único, que cada turbina y generador que se instala requiere un diseño particular.

Esta situación ha dado como consecuencia que se hayan desarrollado comercialmente turbinas capaces de adaptarse a condiciones específicas dentro de ciertos rangos de operación, así vemos que para aprovechar grandes desniveles y poco gasto, las turbinas tipo Pelton son las adecuadas, el caso contrario o sea pequeños desniveles y grandes gastos, se cuenta con las turbinas Kaplan y para resolver cualquier condición intermedia se tienen los tipos Francis.

Además con el fin de abatir costos, los fabricantes han establecido series de turbinas de cada tipo, las cuales se agrupan de acuerdo con un parametro conocido como velocidad específica - $(N_s = NP^{0.5} H_n^{-1.25})$ donde N =Vel. de rotación, P =potencia de la turbina, H_n = altura neta.) de esta manera los diseños se estandarizan y los métodos de selección se simplifican.

Como es de suponer, el diseño de las obras civiles debe realizarse de acuerdo con las características del sitio por explotar, buscando la mayor economía, afectar lo mínimo posible la ecología de la zona y los asentamientos humanos.

Los componentes principales de una central hidroeléctrica son: LA OBRA DE TOMA, CASA DE MÁQUINAS, Y LA OBRA DE RESTITUCIÓN.

LA OBRA DE TOMA tiene como objetivo principal permitir y controlar la extracción del agua de una presa o de un río, en las cantidades justas y en el momento que se requiera para su uso en la casa de máquinas con la menor pérdida de energía posible y sin fenómenos dinámicos que afecten el resto de las instalaciones. De acuerdo con su disposición general, se pueden diferenciar tres tipos principales de obras de toma:

a.- DE CONDUCCION A SUPERFICIE LIBRE.

b.- CON GALERIA A PRESION

c.- A PIE DE PRESA

Los elementos principales de las obras de toma a superficie libre son:

1.- PRESA DERIVADORA.

1.1.- Vertedores de excedencias y servicio

2.- ESTRUCTURA COLECTORA

2.1.- Entrada con umbral

2.2.- Rejas de claros amplios

2.3.- Compuerta de entrada

2.4.- Tramo de transición

2.5.- Desarenador

3.- CANAL DE FUERZA Y SUS ESTRUCTURAS SECUNDARIAS COMO:

3.1.- Vertedor de excedencias

3.2.- Tuneles

3.3.- Sifones

3.4.- Puentes

4.- ESTRUCTURA DE PUESTA A PRESION

4.1.- Tanque de regulación

4.2.- Vertedor de excedencias

4.3.- Desfogue de fondo

4.4.- Umbral con rejillas

4.5.- Cámara de compuertas o válvulas

4.6.- Entrada a la tubería

5.- TUBERIA A PRESION (ENTERRADAS O SUPERFICIALES)

5.1.- Válvulas

5.2.- Juntas de expansión

5.3.- Silletas

5.4.- Machones de anclaje

5.5.- Otros

Los elementos principales de las obras de tema con galerías a --

presión, son:

1.- PRESA DE ALMACENAMIENTO

1.1.- Vertedores de excedencias y servicio

1.2.- Desfogue profundo

2.- ESTRUCTURA COLECTORA (DE LUJBRERA O TORRE)

2.1.- Rejas de claros amplios

2.2.- Compuertas de servicio

2.3.- Compuerta de emergencia

2.4.- Zona de transición

3.- GALERIAS O TUNELES A PRESION (REVESTIDOS O NO REVESTIDOS)

3.1.- Drenes o lloradores

3.2.- Zona de transición

4.- POZOS DE OSCILACION

4.1.- Tuberías auxiliares

4.2.- Rejas

5.- TUBERIAS A PRESION

5.1.- Válvulas

5.2.- Juntas de expansión

5.3.- Silletas

5.4.- Machones de anclaje

Los elementos principales de las obras de toma a pie de presa --

son:

1.- PRESA DE ALMACENAMIENTO

2.- ESTRUCTURA COLECTORA

3.- TUBERIA A PRESION

Por lo que puede apreciarse los tres tipos de instalaciones se diferencian considerablemente. La de superficie libre se rige ampliamente por las aportaciones de agua del río y por el empleo de embalses generalmente pequeños, que permiten una regulación de la generación de poco tiempo.

Tienen además la desventaja de que la energía eléctrica que producen es directamente proporcional a las aportaciones del agua y frecuentemente en estiaje dejan de operar.

La derivación del agua se hace desde una presa generalmente baja. El umbral de la estructura colectora se localiza por debajo del cimacio del vertedor, con el objeto de que la captación sea posible aún con niveles bajos en el vaso. La carga utilizable en el aprovechamiento se obtiene generalmente acortando el camino mediante un canal de poca pendiente y sobre la ladera de la montaña, desde el punto de captación hasta el punto más bajo en el río. El canal termina en una estructura de puesta a presión, a partir del cual arrancan las tuberías hasta la casa de máquinas. Este tipo de obras de toma, puede apreciarse todavía en instalaciones de principios de siglo, época en que fue muy usada, sin embargo todavía estuvo en uso hace treinta años.

La diferencia fundamentalmente entre este tipo de obra y el que utiliza galería a presión, es que la estructura de puesta a presión se reemplaza por el pozo de oscilación y el canal de fuerza por el túnel, además por ser presa de almacenamiento no requiere desarenador.

El tipo de obra de toma con galería a presión, se recomienda cuando el río a partir de un estrechamiento apropiado para una boquilla, sigue con una fuerte pendiente formando una gran curva, de tal modo que, mediante un túnel a través de la montaña se puede ganar una caída considerable.

Este tipo de obras de toma, se uso mucho en nuestro país, después de la segunda guerra mundial y la última central que se construyó utilizando galería a presión y pozo de oscilación, fue LA VILLITA hace aproximadamente quince años.

Las obras de toma a pie de presa, que se había utilizado en pocas ocasiones en México, se ha vuelto muy común y todas las centrales de gran potencia que se han construido de hace veinte años a la fecha, han sido de éste tipo, por ejemplo podemos mencionar : EL INFIERNILLO, MALPASO, BELISARIO DOMINGUEZ (ANGOSTU--RA), Y MANUEL MORENO TORRES (CHICOASEN), de las cuales se puede subrayar que representan el 68.5 por ciento de la potencia que se tiene en el país en centrales hidroeléctricas.

En nuestro país la primer central hidroeléctrica se instalo en 1889 en Batopilas, Chih., y tuvo una capacidad de 22.38 Kw.,

después de ésta se instalaron muchas otras con capital privado y para suministrar energía a compañías textiles principalmente.

La operación de las centrales hidroeléctricas de la Comisión Federal de Electricidad, principió el 9 de noviembre de 1939, con Xia en Oaxaca que contaba con una unidad de 85 Kw.

La primer obra de importancia que emprendió C.F.E., fue la construcción del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, ubicado en la zona noroeste del Estado de México, cuya capacidad inicial corresponde a una unidad de la central Ixtapantongo con potencia de 28000 Kw, aprovechando una caída de agua de 328 m. con turbina tipo Francis, lo cual era fuera de lo común en su época, pero técnicamente inobjetable.

En 1962, utilizando el agua del Rfo Apulco entró en operación la Central Hidroeléctrica Mazatepec, en el estado de Puebla que aprovecha un desnivel de 516 m. que es el mayor en México hasta la fecha. Esta central, constituida por cuatro unidades generadoras de 52 000 Kw, cada una, movidas por turbinas tipo Pelton, estableció, en su época, una marca mundial en su diseño en el cual se destaca el uso de seis chorros de agua.

En el año de 1965 entró en operación comercial La Central Hidroeléctrica El Infiernillo, que en ese tiempo marcó un record mundial de potencia por unidad, en los países occidentales, desarrollando la turbina 173 Mw a su caída de diseño.

Esta central marca el inicio de la construcción de grandes-

presas y la instalación de unidades de gran potencia. A este -- respecto se debe mencionar el desarrollo integral de las cuencas del Rfo Grijalva que son hasta la fecha siguiendo el escurrimiento del agua:

- BELISARIO DOMINGUEZ (ANGOSTURA) DE 900 Mw.
- MANUEL MORENO TORRES (CHICOASEN) DE 1500 Mw,
- COPAINALA (EN CONSTRUCCION) DE 200 ó 300 Mw,
- MALPASO DE 1080 Mw
- PEÑITAS (EN CONSTRUCCION) DE 400 Mw.

Como situación especial se debe mencionar que la Central Manuel Moreno Torres, además de ser la mayor en potencia instalada en la República, su cortina de 245 m. de altura es la quinta en el mundo del tipo de enrocamiento. En Peñitas se instalaran -- turbinas tipo Kaplan fabricadas en Checoeslovaquia con capacidad de 101 Mw, por lo que serán las más grandes del país en su tipo.

Hasta el mes de junio de 1981, la potencia instalada en centrales hidroeléctricas, es de 6594 lo que representa el 43.3% -- aproximadamente de la capacidad total del país y se prevefa generar en ese mismo año 21 000 GWH.

Actualmente están en construcción las centrales de Peñitas-- con 400 Mw y Copainala de 200 Mw, sobre el Rfo Grijalva, "CARA-- COL" de 592.8 Mw que utiliza aguas del Rfo Balsas; La Amistad de 68 Mw sobre El Rfo Bravo; Itzantun de 900 Mw en la cuenca del -- Grijalva; Comedero de 100 Mw en el Rfo San Lorenzo.

En esa fecha estaban en la etapa final de elaboración del -
proyecto, las centrales: Bacurato sobre El Río Sinaloa, Tepoa, -
San Juan Tetelcingo, Huichastla, Ostutla y Jiltepec sobre El Río
Balsas, Aguamilpa sobre el Río Santiago.

Se tiene estudiado además un potencial teórico medio de - -
56322 Mw y plenamente identificados 19 619.

II. DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA

II.1 GENERALIDADES

II.1.1 Localización

El P.H. Ing. Carlos Ramirez Ulloa se está construyendo sobre uno de los meandros que forma el Rfo Balsas, en el lugar llamado "El Caracol" en el Estado de Guerrero. La boquilla (Lugar donde él sufre un estrechamiento y donde se construye la Cortina) se encuentra ubicada en la parte noroeste del estado; aproximadamente a 73 Km. aguas abajo del cruce del río con la carretera nacional México-Acapulco en el puente "Mezcala". Sus coordenadas geográficas correspondientes son $17^{\circ} 57' 30''$ de latitud norte con $99^{\circ} 59' 8''$ de longitud oeste, cerca del poblado de Apaxtla de Castrejón.

Este proyecto está comunicado por la carretera México-Acapulco hasta la ciudad de Iguala Guerrero; por la carretera Iguala-Cd. Altamirano hasta el kilometro 61, en donde se desvía a la izquierda y desde ahí hasta el proyecto por medio de una carretera pavimentada que pasa por la población de Apaxtla y lleva al Caracol con una longitud de 78 Km. El tiempo estimado desde la Ciudad de Iguala a la población del Caracol es de 3 horas aproximadamente.

Existe como acceso desde hace muchos años, la vía fluvial por el propio Rfo Balsas, sistema que se dificulta cuando el río lleva poco o mucho gasto.

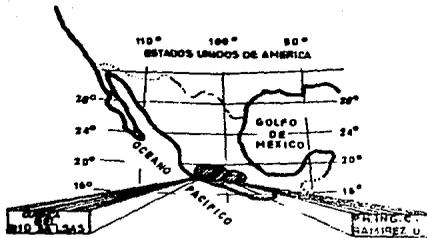
El camino de acceso al proyecto se inicia en la población - de Teloloapan, Guerrero en el Km. 61 de la carretera Iguala-Cd.- Altamirano, como ya se dijo. Tiene una longitud de 78 Km. pasando por las poblaciones de Acatempan, Oxtotitlan, Apaxtla y El Caracol. El camino podría considerarse dividido en 2 grandes tramos por lo que a su pendiente se refiere. El primer tramo, Teloloapan-Apaxtla, el camino va sobre un terreno que podría considerarse de lomerío de suave a mediana pendiente, es decir, entre 0 y 5% y el segundo tramo Apaxtla-Caracol entre lomerío de pendientes fuerte 8% y el camino en franca ladera entre 8 y 16%.

Por lo anterior, se comprende que este camino, sobre todo - en su segundo tramo, fue indispensable pavimentarlo, pues es la única protección contra la fuerte erosión en su camino de montaña, dado que en las fuertes pendientes de su rasante cualquier otro tipo de revestimiento es arrastrado por las lluvias. En este segundo tramo, el camino va prácticamente en balcón con cortes hasta de 60m. de altura con los consiguientes problemas de inestabilidad de taludes, que cortes de tal altura entrañan.

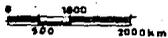
11.1.2 HIDROGRAFIA, TOPOGRAFIA E HIDROLOGIA DE LA CUENCA DEL RIO BALSAS.

La cuenca hidrográfica del Río Balsas se localiza entre los meridianos 97°30' y 103°15' de longitud oeste, y entre los paralelos 17°00' y 20°05' de latitud Norte. Cubre una área de drenaje aproximada de 108,000 Km². que representa aproximadamente el 6% del área de la República Mexicana, se encuentra delimitada --

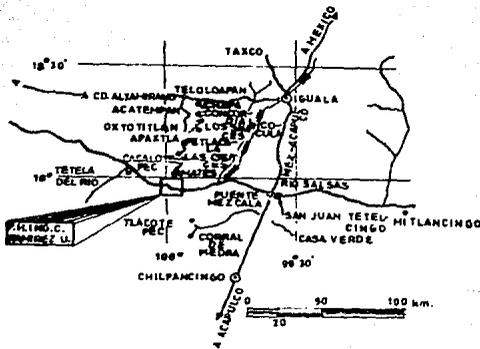
M E X I C O



CUENCA DEL BALSAS



LOCALIZACION



F. E. S. CUAUTITLAN U. N. A. M.	
TESIS PROFESIONAL	
NOMBRES: J. HUMBERTO J. CEBADA L. UBLESTER AVILES D.	
ESCALA:	LAMINA No. 2

por la Cordillera Neovolcánica, La Sierra Madre del Sur y La Sierra Madre Oriental y abarca áreas considerables de los Estados de Oaxaca, Puebla, México, Morelos, Michoacán, Guerrero, Jalisco, Tlaxcala y pequeñas zonas del D. F.

El Rfo Balsas tiene sus orígenes en los arroyos procedentes de la Sierra Nevada y la Malinche teniendo su desembocadura en el Océano Pacífico, sirve como Límite Geográfico en una parte de los Estados de Guerrero y Michoacán y tiene un escurrimiento anual de 14,000 millones de metros cúbicos.

La cuenca de captación hasta el sitio del proyecto tiene una área de 45,597 Km², la cual no incluye el área de 3240 Km² correspondientes a la presa de Valsequillo Puebla.

Actualmente en el sitio del proyecto existen levantamientos topográficos de Rfo Balsas con planos a escala 1:5000 con curvas de nivel a cada 10 m. que incluyen la totalidad del vaso y un levantamiento topográfico de la zona de la obra a escala 1:1000 con curvas de nivel a cada metro.

El levantamiento topográfico de la región fue hecho a partir de fotografías aéreas; de tal manera que fue posible examinar los lugares más convenientes para el embalse.

Los primeros estudios de exploración por parte de la C.F.E. en la cuenta del Rfo Balsas se llevaron a cabo en 1950, y en 1959 se elaboró el primer estudio hidrológico del Balsas.

La hidrología es uno de los pilares en que se sustentan los aprovechamientos hidroeléctricos, es el punto de partida junto con la concepción del aprovechamiento para llegar al establecimiento del proyecto en sí.

Del estudio hidrológico dependen importantes características del aprovechamiento, como veremos más adelante. Fundamentalmente el estudio hidrológico consiste en saber, la disponibilidad del agua y que usos se le da en esta región, y cuales son los datos de partida que condicionaran y delimitaran las magnitudes del proyecto. En primer lugar se debe recopilar toda la información, se ordena se analiza y se completa, para después con éstos datos determinar el diseño del proyecto.

Se instalaron sobre el río las estaciones hidrométricas de San Juan Tetelcingo en 1951, de Santo Tomás en 1954 y posteriormente en agosto de 1976 la estación hidrométrica El Caracol. Los dos primeros estudios sirvieron de base para iniciar la construcción de las centrales hidroeléctricas Infiernillo y La Villita.

Los escurrimientos se dedujeron para el período 1951-1974 de la siguiente manera: Se determinó el área tributaria de cada estación.

Sitio	Area tributaria
1.- Santo Tomás	52,020 Km ²
2.- Sn. Juan Tetelcingo	42,707 Km ²
3.- El Caracol	48,837 Km ²

Se obtuvo el rendimiento por Km² y la constante que afecta a los volúmenes mensuales ocurridos en las dos primeras estaciones hidrométricas, dando por resultado los volúmenes correspondientes al sitio del Caracol mediante la fórmula siguiente:

$$V_e = (K) (V_1) + V_2 (1 - K) \text{ ----- (1)}$$

donde:

V_e = Volumen escurrido en el Caracol

V_1 = Volumen escurrido en Santo Tomás

V_2 = Volumen escurrido en San Juan Tetelcingo

$$K = \frac{\text{Área del Caracol} - \text{Área San Juan Tetelcingo}}{\text{Área Sto. Tomás} - \text{Área Sn. Juan Tetelcingo}}$$

$$= \frac{48837 - 42707}{52020 - 42707} = 0.6582$$

Se compararon los volúmenes registrados en la estación hidrométrica " El Caracol " con los deducidos según el método anterior y se encontró un error de $\pm 5\%$ de tal manera que el estudio se considero aceptable.

De esta manera se dedujeron los gastos máximos anuales de el caracol.

(1951-1974), para cuyo diseño se seleccionó el gasto de 4,615 --

m^3 /seg. Correspondiente a un período de retorno de 50 años. Para determinar la avenida máxima probable se tomó en cuenta la precipitación máxima probable, transponiendo un Ciclón del Pacífico que se presentó tres días antes que el Ciclón del Golfo. La avenida máxima probable resultó tener un pico de $17,800 m^3$ /seg. y un volumen de 9,012 millones de metros cúbicos.

Datos Hidrológicos para El Caracol

Area de la cuenca	48,837.000 Km^2
Escurrimiento medio anual	$6,304 \times 10^6 m^3$
Caudal medio anual	$199,89 m^3$ /seg.
Avenida máxima supuesta	$3,881.00 m^3$ /seg.

11.2. INTRODUCCION

Para poder satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica la C.F.E. ha tenido que estudiar el aprovechamiento de todos los recursos posibles de generación, con el objeto de canalizar sus esfuerzos en la utilización racional de nuestros recursos.

De esta manera se han venido construyendo plantas Térmicas-convencionales de Vapor, Nucleares y Geotérmicas e Hidroeléctricas.

De los sistemas Hidroeléctricos más importantes en el país uno es el del Río Balsas. Su aprovechamiento integral está pla-

neado por siete plantas; dos de ellas en operación, la Villita y el Infiernillo; una en construcción, Ing. Carlos Ramírez Ulloa, y cuatro en estudio, Chiltepec, Huixtla, San Juan Tetelcingo y Tepoa.

Antes de la creación de la C.F.E. en el año de 1937, se importaba el 100% de la Tecnología Hidroeléctrica desde la concepción, estudio y diseño; hasta la construcción y operación del proyecto.

Fue en 1939 cuando el Vocal Ejecutivo de la C.F.E. Ing. Carlos Ramírez Ulloa, integró un grupo de Ingenieros Mexicanos en las ramas Civil, Mecánica y Eléctrica; así con estos pioneros, fue posible diseñar y construir en México la mayor parte de las Centrales de Ixtapantongo y Santa Bárbara.

A la fecha los proyectos Hidroeléctricos en nuestro país son 100% diseñados y construidos por la Ingeniería Mexicana y de la inversión total más o menos 20% corresponde a elementos de importación en la compra de maquinaria y equipo electromecánico, ya que también parte de éstos son fabricados en el país.

Este proyecto lleva el nombre de Ing. Carlos Ramírez Ulloa en honor al que fuera primer vocal ejecutivo de la C.F.E. y precisamente quién promovió el estudio en la región de Guerrero sobre el Río Balsas para la construcción de Plantas Hidroeléctricas. Este proyecto fue llamado P.H. " El Caracol, debido al lugar en que se encuentra.

El proyecto persigue varios objetivos, los más relevantes son: La generación y distribución de energía eléctrica, regularización de las aguas del Balsas, la creación de fuentes de trabajo y la preservación del suelo en la zona.

El proyecto necesitó varios años de investigación. Se hicieron estudios entre 1959 y 1963, y de 1973 a la fecha, reconociéndose finalmente cinco sitios posibles para localizar el eje de la Cortina. También se sugirieron más de 24 alternativas de Cortinas como son: Cortinas de concreto, Cortinas de tierra y plantas hidroeléctricas subterráneas y a cielo abierto.

11.3 OBRA DE DESVIO

Después de los diversos tipos de estudios que se realizan (topográficos, geológicos, hidrológicos) para determinar el lugar donde ha de construirse la central hidroeléctrica y una vez determinado éste y los sitios donde ha de ir cada una de las partes componentes (Cortina, Vertedor, Casa de Máquinas, etc.) el paso siguiente es la construcción de la Obra de Desvío.

La Obra de Desvío tiene como finalidad desviar las aguas del cauce natural del río de tal manera que deje libre el área donde van a realizarse los trabajos de construcción de Cortina y el Vertedor de excedencias.

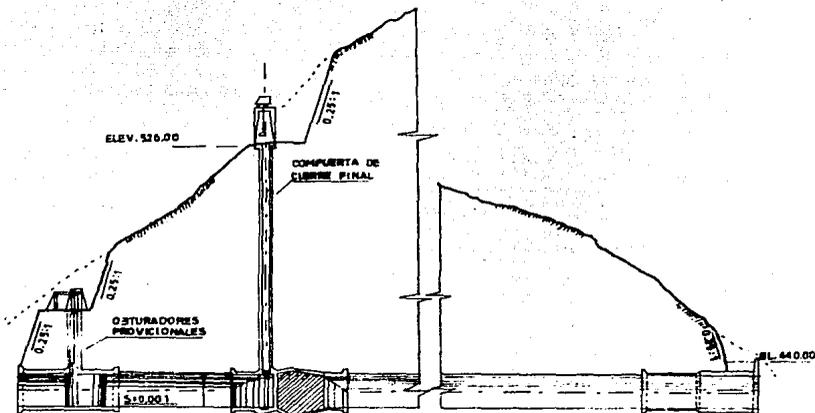
En este caso, la Obra de Desvío consta de dos túneles para-

lejos y rectos separados entre sí 40 m., partiendo de la margen derecha cruzan el macizo rocoso norte para descargar hacia aguas abajo del Vertedor, tiene una longitud aproximada de 400 m.

La sección de los túneles es de tipo portal, compuesta por la zona superior semicircular de 13 m. de diámetro y la inferior rectangular de 6.5 m. de altura por 13 m. de ancho, revestidos de concreto únicamente 15 m. en las entradas y en las salidas -- con pendientes de 0.01% y 1.3% (túnel # 2 y túnel # 1 respectivamente) proyectados para conducir un gasto de $4350 \text{ m}^3/\text{seg}$.

Entre ambos túneles existe una diferencia de alturas de 5 m. el túnel número 1 se encuentra en la elevación 422 m.s.n.m. y el túnel número 2 en la elevación 427 m.s.n.m.

Las atagufas de desvío tanto de aguas arriba como las de aguas abajo, forman parte de la Cortina. La corona de la atagufa aguas arriba esta en la elevación 460.00 m.s.n.m. ambas son de enrocamiento, el corazón es de arcilla impermeable y los taludes tienen pendientes 2:1. Para poder desviar el gasto de la avenida máxima registrada se determinó que la altura de la atagufa aguas arriba tuviera una elevación superior a la elevación 455 m.s.n.m. las características principales de la atagufa son: 44 m. de altura sobre el aluvión, 50 m. de corona, 211 m. en la base y una longitud de 340 m. construida de materiales -- graduados con corazón impermeable de arcilla, el volumen total es de aproximadamente $952,140 \text{ m}^3$.



K0+000.00
 Elev. 483.00
 K0+010.770
 Elev. 481.999
 K0+031.770
 Elev. 481.900

PORTAL DE ENTRADA

K0+071.500
 Elev. 471.924
 K0+084.500
 Elev. 471.915
 M0+114.500
 Elev. 471.885

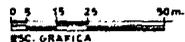
ESTRUCTURA DE CIERRE FINAL

K0+135.940
 M0+278.430

M0+331.610
 Elev. 481.948
 M0+371.630
 Elev. 481.928
 M0+411.651
 Elev. 481.916
 M0+451.670
 Elev. 481.897

PORTAL DE SALIDA

OBRA DE DESVIO
PERFIL POR TUNEL No 1



F. E. S. CUAUTITLAN U. N. A. M.

TESIS PROFESIONAL

NOMBRES: J. HUMBERTO J. CEBADA L. UBLESTER AVILES D

ESCALA

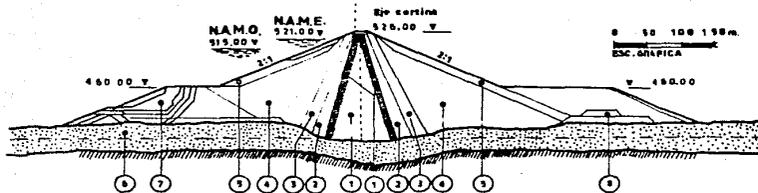
LAMINA No. 3

Datos de la obra de Desvío

Gasto total de descarga	4350 m ³ /seg.
Avenida de diseño	4515 m ³ /seg.
Periodo de retorno considerado	50 años.

11.4 CORTINA

La presa o Cortina consiste en un muro o dique que se construye a lo ancho del río cuya finalidad es la de embalsar agua, de tal manera que alcance un nivel adecuado para que adquiera -- energía potencial suficiente para que en un determinado momento o permanentemente pueda ser aprovechada esta energía al convertirse en energía cinética, cuando desde determinada altura se -- conduce a través de la tubería a presión hasta las turbinas y -- por medio del chorro de agua obtener trabajo mecánico al girar -- ésta y a su vez hacer girar el rotor del generador mediante la -- flecha que va unida a la turbina y así obtener energía eléctrica aplicando todos los requerimientos adicionales que para este -- efecto se necesiten. Así la función de la presa o Cortina, es -- la de almacenar agua en lo que se tiene considerado será el vaso de la presa para así poder aprovecharla como ya se mencionó anteriormente. La Cortina es del tipo de materiales graduados, con una altura máxima de 126 m., la elevación de la corona se localiza en la cota 526, el ancho de la corona es de 12 m, el ancho total de la base es aproximadamente 540 m. con una longitud de la corona de 348 m., el volumen total de la Cortina es de 6,262,000 m³.



- SECCION MAXIMA**
- ① - CORAZON IMPERMEABLE
 - ② - CORAZON PERMEABLE [w OPTIMA = 2%]
 - ③ - FILTRO
 - ④ - TRANSICION
 - ⑤ - ENROCAMIENTO COMPACTO
 - ⑥ - ENROCAMIENTO DE GRAN TAMAÑO
 - ⑦ - ALUVION DEL RIO
 - ⑧ - ATAGUIA AGUAS ARRIBA
 - ⑨ - ATAGUIA AGUAS ABAJO

F. E. S. CUAUTITLAN U. N. A. M.	
TESIS PROFESIONAL	
NOMBRES: J. HUMBERTO J. CEBADA L. UBLESTER AVILES D.	
ESCALA:	LAMINA No. 4

Dentro de las presas de tierra y enrocamiento, se clasifica como una Cortina de materiales graduados, se ha dado este nombre a aquellas en que los materiales que la forman se distribuyen en forma gradual, de los suelos que forman el corazón impermeable, pasando por los filtros y transiciones a los enrocamientos.

Datos de la Cortina

Sección	Simétrica
Altura Máxima	126 m.
Ancho de la Corona	12 m.
Longitud de la Corona	370 m.
Ancho aprox. de la Base	540 m. (entre atagufas)

Datos de Embalse

Area Máx. de Embalse	47.03 km ² .
Nivel Máx. de Embalse (N.A.M.E.)	523.60 m.s.n.m.
Nivel Máx. de Operación (N.A.M.O.)	521.00 "
Nivel min. de Operación (N.A.Min.O)	495.00 "
Capacidad total (N.A.M.E.)	1897 x 10 ⁶ m ³
Capacidad Útil (N.A.M.O.)	1616 x 10 ⁶ m ³

11.5 VERTEDOR

La función del Vertedor de Demasías como su nombre lo indica, es de regular la cantidad de agua contenida en el vaso de la presa, y desalojar los volúmenes de agua excedente.

El Vertedor de Demasías está ubicado en la margen derecha y constituido por un canal de llamada, estructura de control con 8 compuertas.

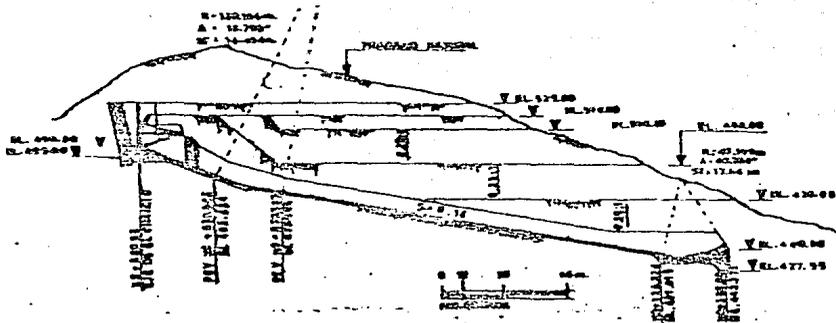
La capacidad del Vertedor es de $17,000 \text{ m}^3/\text{seg.}$ que corresponde a una avenida de $17,000 \text{ m}^3/\text{seg.}$ El volumen total de la excavación fue de $3,220,000 \text{ m}^3$. El área total de las paredes es de 34000^2 m la cual está protegida con malla y gunita, y posteriormente drenado con barrenos de 3" de diámetro y 9 m. de longitud.

El volumen total de concreto en esta estructura se estima en $180,000 \text{ m}^3$.

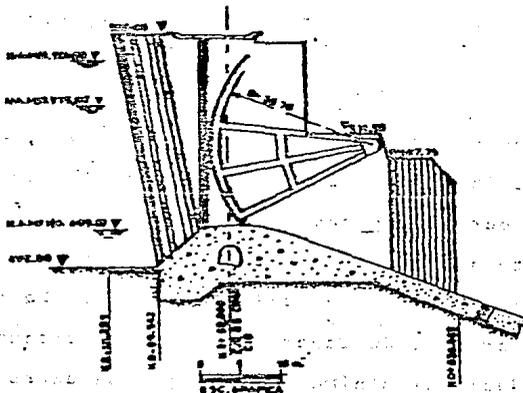
Por las condiciones naturales de espacio disponible, así como para tener mayor flexibilidad y confiabilidad en la operación y mantenimiento de las obras de excedencias, se localizó en la margen derecha adyacente a la Cortina; está constituido por dos canales a cielo abierto terminando en salto de esquí. La dirección de la descarga se orientó de acuerdo con los resultados del modelo físico, para reducir al mínimo los riesgos de derrumbes o inestabilidad de taludes que pudieran afectar la confiabilidad de la operación del proyecto, debido a la erosión de laderas y de la socavación del cause.

Datos del Vertedor:

Sección variable (ancho)	112.60 m.
Elevación de la Cresta	498.0 m.s.n.m.
Longitud total de la Cresta	77.6 m.
Número de Compuertas radiales	8
Capacidad Máxima de descarga por canal.	$8500 \text{ m}^3/\text{seg.}$



SECCION LONGITUDINAL



F. E. S. CUAUTITLAN U. N. A. M.

TESIS PROFESIONAL

NOMBRES: J. HUMBERTO J. CEREDA L. UNLESTER AVILES D.

ESCALA:

LAMINA No. 2

Capacidad total de descarga	17,000 m ³ /seg.
Avenida de diseño	17,800 m ³ /seg.
Volumen de la avenida	9012 x 10 ⁶ m ³ .
Duración	17 días
Estructura terminal entre deflector (ángulo)	30°

11.6 OBRA DE TOMA

La Obra de Toma desempeña un papel muy importante dentro de la Central Hidroeléctrica, ya que en ésta se va a regular la entrada del agua a las Turbinas por medio de la tubería a presión. La Obra de toma se sitúa sobre la margen derecha del río con una plantilla a la elevación 470 m.s.n.m. y cortes hasta de 56 m. de altura. Para esta obra se han proyectado estructuras de rejillas en la entrada, una compuerta auxiliar en rampa para las 3 unidades y compuertas de operación en la lumbrera vertical operadas por servomotor; cada una de ellas cubre un claro de 7.50 m. de altura por 6.50 m. de ancho.

Datos de la Obra de Toma.

Número de tomas	3
Gasto máximo considerado/toma	257 m ³ /seg.

La conducción a presión es de 313.4 m. de longitud, sección circular 7.50 m. de diámetro, se localiza después de las compuertas de servicio en este caso, el proyecto consistió básicamente en un tramo semihorizontal y otro inclinado conectados entre sí por curvas verticales.

El tramo semihorizontal de 210 m. de longitud, 8.62% de pendiente y 7.50 m. de diámetro, como ya se dijo anteriormente, esta revestido de concreto armado de 60 cm. de espesor. En su rama descendente inclinada y la horizontal inferior tendrá un blindaje de acero de 38.10 mm. a 44.45 mm. de espesor empacado de concreto.

Otra curva vertical de 25° y 25 m. lleva finalmente al tramo horizontal de 12 m. de longitud que se adelgaza hasta los 5.67 m. para acoplarse a presión con su correspondiente turbina.

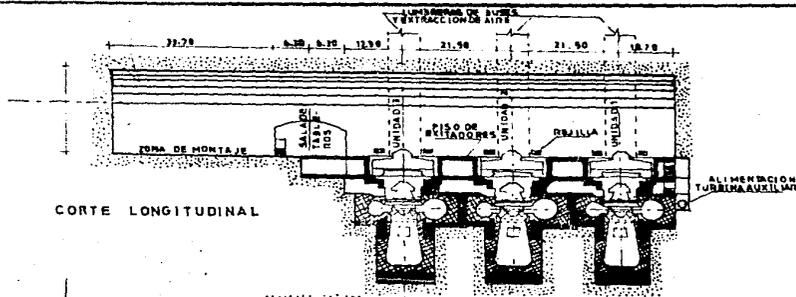
Datos de la conducción a presión

Número de conductos	3
Diámetro	7.50/5.67 m.
Sobre presión máxima	38.61 m.

11.7 CASA DE MAQUINAS

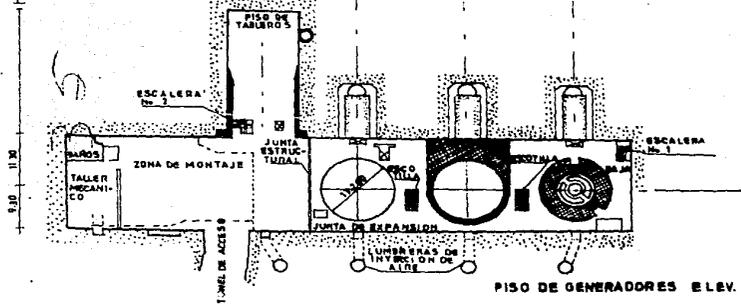
La Casa de Máquinas esta alojada en la margen derecha del río es una excavación subterránea de 114 m. de longitud, 20 m. de ancho y en su parte más profunda 49 m. de alto, estan instaladas 2 gruas viajeras con una capacidad de 270 ton. cada una. El acceso a la Casa de Máquinas se hace por medio de un túnel de sección portal de 9 m. de diámetro con una longitud de 275 m.

En ella se alojaran 3 unidades turbogeneradoras de 190 MW c/u tipo Francis de eje vertical, alimentadas por tuberías a presión.



CORTE LONGITUDINAL

432.785	
431.400	GRUA VIAJERA
420.400	
419.900	PISO DE GENERADORES
412.100	PISO DE TURBINAS
404.500	ETAPAS DE COLADO
404.000	PRIMER COLADO
	SEGUNDO COLADO
392.000	TERCER COLADO



0.25 10m.
ESC. GRAFICA

F. E. S. CUAUTLAN U. N. A. M.	
TESIS PROFESIONAL	
NOMBRES: J. HUMBERTO J. CEBADA L. URBESTER AVILES D.	
ESCALA:	LAMINA No. 7

si3n que a su vez descargan en el t3nel correspondiente. En el pa3o aguas arriba integrada a la Casa de M3quinas, se construy3 la casa de tableros de 30 m. de largo 25 m. ancho y 15 m. de altura. Tambi3n en esta parte se alojaron las bater3as que alimentaron al generador con c.d.

Los generadores quedaron conectados a los transformadores que se localizan en una plataforma a cielo abierto (elevaci3n -- 485 m.s.n.m.) mediante lumbreras, una por unidad, desde el piso de cables (elevaci3n 415.5 m.s.n.m.) con una secci3n rectangular de 2.10 m x 3.05 m.

Datos de las Turbinas que se alojaron en la Casa de M3quinas.

Turbinas	Mitsubishi
Tipo	Francis - eje vertical
N3mero	3
Velocidad Nominal	128.57 r.p.m.
Carga de dise3o	91.20 m
Gasto de dise3o	237.90 m ³ /seg.
Tiempo de cierre del distribuidor	9 seg.
Sobre velocidad	51.50 %
Factor de planta	0.27

Datos de los Generadores que se alojaron en la Casa de M3quinas.

Generadores (marca)	Ansaldo S. P. A.
Tipo	ATBW-56 208,000 KVA
Rotaci3n	En direcci3n de las manecillas del reloj visto -- desde arriba.

Voltaje Nominal	16 KV
Frecuencia	60 c.p.s.
Factor de potencia	0.95 (atrasado)
Capacidad Nominal	208,000 KVA.
Velocidad Nominal	128.57 r.p.m.
Número de polos	56
Velocidad de desboque	250 r.p.m.

11.8 TUBO DE DESFOGUE

En una turbina es el órgano de desagüe, pero se le conoce también como tubería o tubo de aspiración, porque crea una aspiración o depresión a la salida del rodete. En el tubo de desfogue, circula el agua que abandona el rodete de la turbina. Su función es recuperar la energía cinética que de otra forma se despreciaría al descargar libremente a la atmósfera, es decir es un difusor que sirve para recuperar la presión a cambio de la velocidad. Se tiene así a la salida del rodete una presión más baja que la atmosférica, y por lo tanto un gradiente de presión dinámica más alta a través del rodete. Por lo general, los tubos de desfogue poseen un codo y un cambio en la geometría de su sección transversal, de circular a rectangular. El principal problema de su diseño es obtener la recuperación de energía con la menor trayectoria del fluido, es decir con el tubo más corto, sin producir separación de flujo.

El perfil del tubo de aspiración, deberá ser diseñado para obtener la máxima eficiencia de la turbina, y será dividido en secciones convenientes de acuerdo a las limitaciones de transpor

te. Todas estas secciones posteriormente serán soldadas en el campo.

En el P.H. " Ing. Carlos Ramírez Ulloa ", el tubo de aspiración fué hecho de placas de acero roladas según normas ASTM-A36 con un peso de 66 toneladas. El tubo de desfogue es del tipo de descarga ahogada, longitud de 97.2 m. desde el inicio de la pila hasta la salida en dos ductos de sección variable desde 4.5 m. x 4.05 m. hasta 4.05 x 7.29 m. de donde termina la pila y transición a una sola sección portal de 9.00 m. de diámetro, obturada por una compuerta 20 m. antes de la salida, las cuales están operadas por un sistema de malacates sobre un portico.

Comprende 3 tuneles de sección compuesta (circular a rectangular) con longitudes de 62 m., 78 m., y 97.2 m. para las unidades generadoras 1, 2 y 3 respectivamente y con pendientes del 1% para desalojar un gasto de $245 \text{ m}^3/\text{seg.}$ por unidad de desfogue.

11.9 SUBESTACION

La Subestación estará dividida en 2 secciones: Subestación de Transformación y Subestación de Distribución.

La Subestación de Transformación estará en una plataforma ubicada en la elevación 485 m.s.n.m. en el flanco norte de la margen derecha del río sobre la Casa de Máquinas, con una área de $3,300 \text{ m}^2$. La excavación requirió de varios recortes para com

pletar una altura máxima de 80 m. con pendientes de 0.25: 1 y -- una excavación de 160,000 m³ de roca. En esta Subestación se encuentran los transformadores de potencia que estarán conectados al generador por medio de unos ductos, conteniendo 3 líneas de 16 KV, éstos ductos también servirán para la extracción e inyección de aire de la Casa de Máquinas.

La Subestación de distribución estará a la elevación 570 -- m.s.n.m. de esta Subestación saldrá una línea de 230 KV/ c/u que vendrá de la Subestación de Transformación o sea de los transformadores de potencia que tienen las siguientes características.

Transformadores de Potencia

Tipo de unidad	monofásicos (1)
Tipo de Enfriamiento	OA/FOA1/FOA2
Capacidad Nominal	225 MVA
Tensión Primaria (B.T.)	16 KV.
Tensión Secundaria (A.T.)	230 KV.

III. IMPORTANCIA PARA EL SISTEMA ELECTRICO DE LOS ESTADOS DE MORELOS_Y GUERRERO.

Se modeló la red del interconectado incluyendo todas las obras previstas en el POISE hasta 1987. Se modeló igualmente las cargas de acuerdo al desarrollo del Mercado, afinando especialmente las involucradas con las zonas Morelos y Acapulco.

Se efectuaron una serie de corridas de flujo en demanda máxima y mínima variando sólo la generación de la C.H. El Caracol desde 0 MW hasta su máxima 594 MW, conservando el voltaje de Generación constante, en 1.025 p.u. para máxima y en 1.00 para mínima.

Los resultados que se obtuvieron para la C.H. El Caracol se muestran en las gráficas anexas.

Estas gráficas tienen en el eje horizontal la potencia Real Generada por la Planta y en la vertical la potencia Reactiva Generada o Absorbida.

De estas curvas se observan algunos puntos extremos en la generación de reactivos, se resumen en la tabla siguiente:

MW de Pta.	MVAR	MVAR
	(D. Máx.)	(D. Min.)
0	+ 47	- 29
180	+ 7	- 67
225	+ 5	- 65
465	+ 47	0
594	+110	+ 79

Se anexan diagramas de vaciados de flujo donde se muestra sólo la red de interés, para Demanda máxima y mínima con Generación máxima y mínima en la C.H. El Caracol.

El perfil de voltaje que se tiene es aceptable en los 4 casos mostrados.

En cuanto al predespacho horario para el estiaje de esta Central, se anexa una simulación del vaso, utilizando aportaciones de año y medio proporcionado por el Depto. de Estudios a Mediano Plazo del CENAL.

En esta simulación se observa que la generación posible en los meses de Enero y Mayo, será del orden de 45 GWH por lo que un predespacho horario sería el siguiente:

0 a 18 horas	0 MW (Cond. Sincr.)
18 a 22 horas	400 MW
22 a 24 horas	0 MW (Cond. Sincr.)

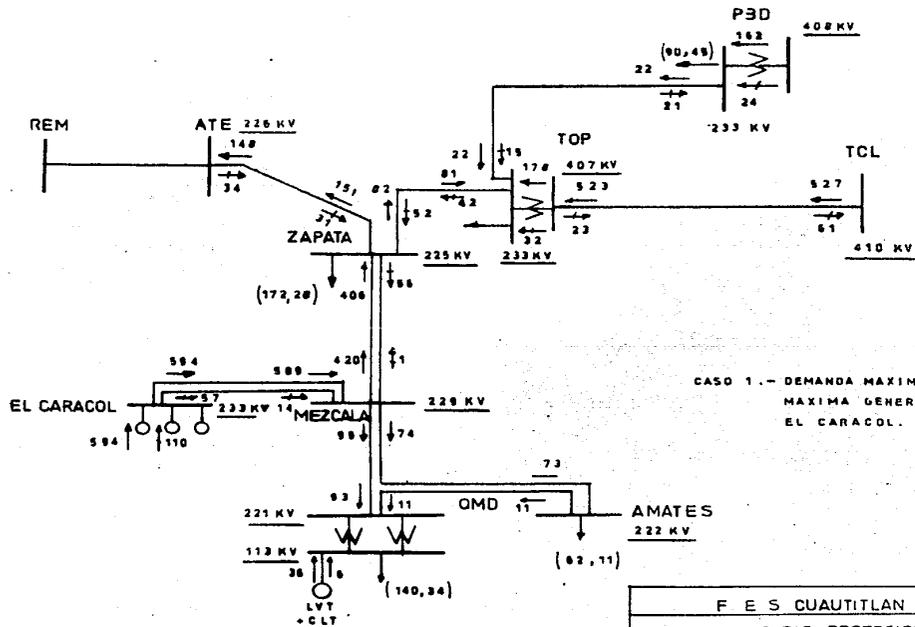
En los meses de Febrero, Marzo y Abril, la generación posible será del orden de 30 GWH, y a nivel horario sería:

0 a 18 horas	0 MW (Cond. Sincr.)
18 a 22 horas	250 MW
22 a 24 horas	0 MW (Cond. Sincr.)

Esto sería en días hábiles y en Domingo podría quedarse las 24 horas como Condensador Síncrono.

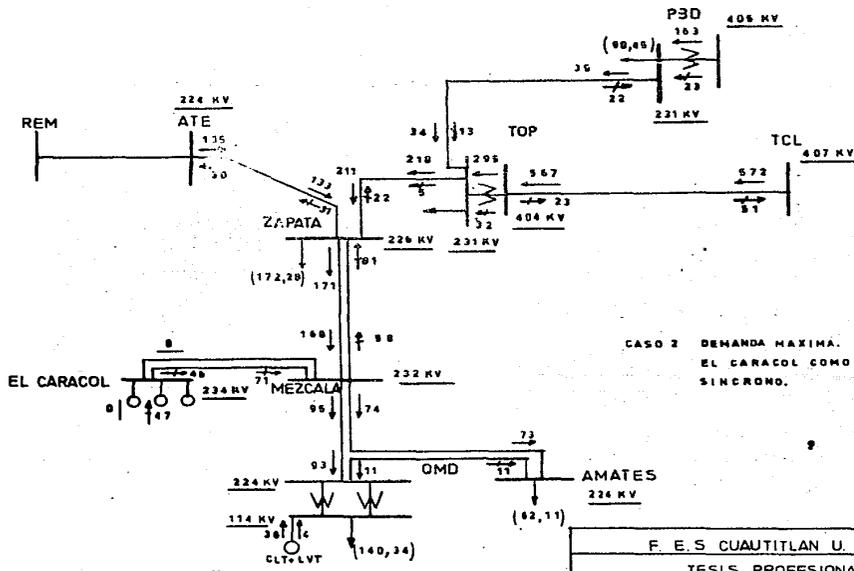
La asignación de reactivos se manejaría en base a las gráficas anexas de acuerdo a la generación Real.

Durante la operación de la Planta en el estiaje no se requeriría el Disparo Automático de Generación (DAG).



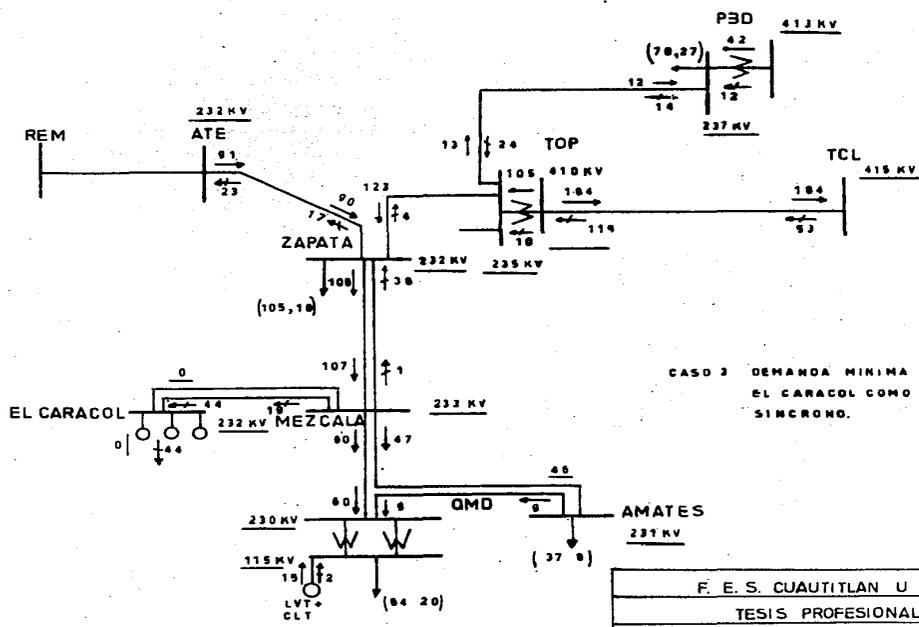
CASO 1.- DEMANDA MAXIMA
 MAXIMA GENERACION EN
 EL CARACOL.

F E S CUAUTITLAN U N A M	
T E S I S P R O F E S I O N A L	
NOMBRES Y NÚM.	D J CEZADA L UBLESTEIR AVILES D
ESCALA:	LAMINA N.



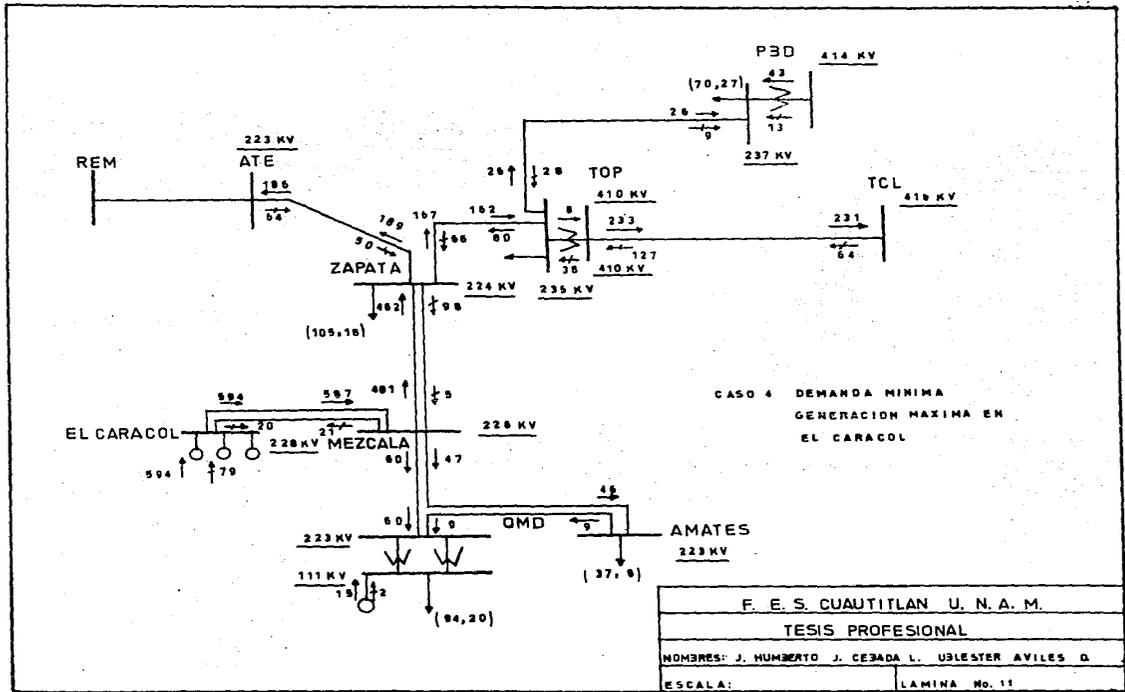
CASO 2 DEMANDA MAXIMA.
 EL CARACOL COMO CONDENSADOR
 SINCRONO.

F. E. S. CUAUTITLAN U. N. A. M	
TESIS PROFESIONAL	
NOMBRES: J. HUMBERTO J. CEBADA L. USLESTER AVILES O.	
ESCALA:	LAMINA No. 9



CASO 3 DEMANDA MINIMA
 EL CARACOL COMO CONDENSADOR
 SINCRONO.

F. E. S. CUAUTITLAN U N A M	
TESIS PROFESIONAL	
NOMBRES: J. HUMBERTO J. CEBADA L. UZLESTER AVILES D.	
ESCALA:	LAMINA No 10

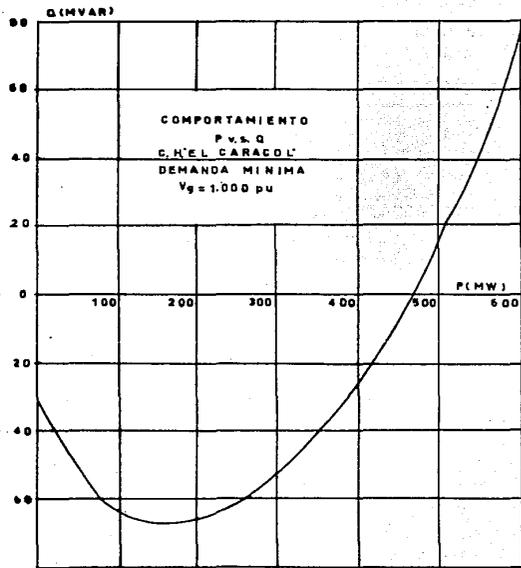
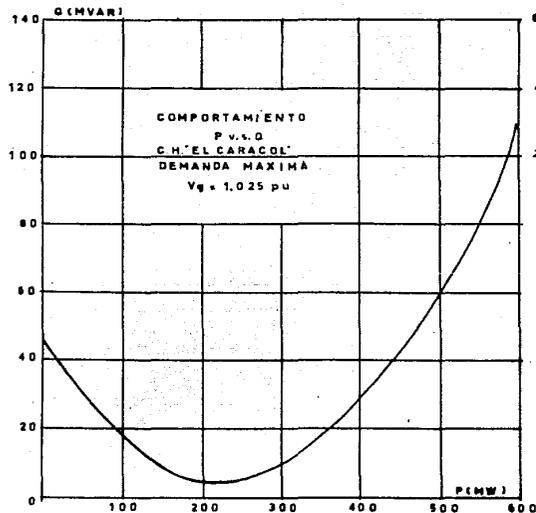


SIMULACION DEL VASO CARACOL
Escurreimientos de año Medio

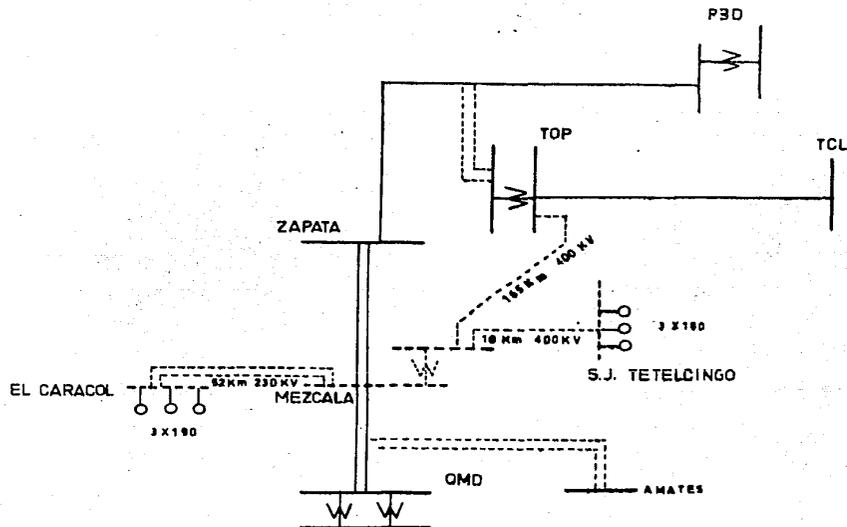
MES	NIVEL INICIAL MSNM	VOLUMEN UTIL MILL.M ³	CONS. ESP. M ³ /KWH	GEN. GWH	EXTR. TURB. MILL.	APORTACION TOTAL M ³	POT. MAX. MW	F . P. %
ENERO	514.50	3362.4	4.217	45	190	190	590.0	10.3
FEBRERO	514.50	3362.4	4.217	34	143	143	590.0	8.6
MARZO	514.50	3362.4	4.217	31	129	129	590.0	7.0
ABRIL	514.50	3362.4	4.217	28	119	119	590.0	6.6
MAYO	514.50	3362.4	4.217	43	182	182	590.0	9.8
JUNIO	514.50	3362.4	4.217	132	555	555	590.0	31.0
JULIO	514.50	3362.4	4.217	178	750	750	590.0	40.5
AGOSTO	514.50	3362.4	4.217	201	847	847	590.0	45.8
SEPTIEMBRE	514.50	3362.4	4.217	267	1125	1125	590.0	62.8
OCTUBRE	514.50	3362.4	4.217	149	630	630	590.0	34.0
NOVIEMBRE	514.50	3362.4	4.217	72	304	304	590.0	17.0
DICEMBRE	514.50	3362.4	4.217	54	226	226	590.0	12.2
T O T A L	-----	-----	-----	1234	5200	5200	-----	23.9

De los estudios realizados se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- 1) Dado que la carga en el QMD para la fecha de entrada en Operación será del orden de 200 MW, en condiciones de máxima generación de la Planta, las líneas de Mezcala a E. Zapata operarán con cargas entre 370 y 400 MW. Por lo que no se soportará la contingencia sencilla en estas líneas, siendo necesario un disparo automático de generación para evitar la pérdida de Sincronismo.
- 2) Al ocurrir contingencia sencilla en las líneas de Mezcala - El Caracol, si será soportable dado que son líneas más cortas y con doble conductor por fase, lo único que Mezcala y El Quemado quedan con bajo voltaje.
- 3) En condiciones de demanda mínima la situación del caso - uno se agrava si existe máxima generación en la Planta, al disminuir la carga en el Quemado y con éste incrementar el flujo en las líneas de Mezcala a E. Zapata.
- 4) En condiciones de demanda mínima con baja generación en la planta o con una sola unidad operando como condensador sincrónico no se ve ningún problema operativo.



F. E. S. CUAUTITLAN U. N. A. M.	
TESIS PROFESIONAL	
NOMBRES: J. HUMBERTO J. CEJADA L. UBLESTER AVILES D	
ESCALA:	LAMINA No. 12



CONEXION DE LA C.H. EL CARACOL Y S. E. MEZCALA

F. E. S. CUAUTITLAN U. N. A. M.	
TESIS PROFESIONAL	
NOMBRES: J. HUNBERTO J. CEBADA L. UBLESTER AVILES D.	
ESCALA:	LAMINA: No. 18

4. OPERACION COMO GENERADOR Y COMO CONDENSADOR SINCRONO

4.1. INTRODUCCION

La primera idea de la posibilidad de conversión de la energía eléctrica y mecánica fue predicha por Michael Faraday en 1831. Este es el germen del desarrollo del generador y motor eléctricos, el micrófono, el altavoz, el transformador, el galvanómetro, etc.

La conversión electromagnética de la energía, tal como se conoce hoy en día, relaciona las fuerzas eléctricas y magnéticas del átomo con las fuerzas mecánicas aplicadas a la materia y con el movimiento. Como resultado de esta relación, la energía mecánica puede convertirse en energía eléctrica y viceversa mediante dinamos. Aunque esta conversión también puede producir otras formas de energía como calor y luz, en la mayoría de las aplicaciones prácticas, la técnica se ha perfeccionado hasta un grado tal que estas pérdidas de energía se mantienen en su mínima expresión, con lo que se consigue una conversión casi total en ambos sentidos.

Así la energía mecánica de un salto de agua se convierte fácilmente en energía eléctrica mediante un alternador; la energía eléctrica producida es transformada por procedimientos electromagnéticos a una tensión superior para su transporte a largas distancias y en algún punto terminal es transformada de nuevo para la distribución a subestaciones centrales de carga en las que la energía eléctrica es redistribuida a instalaciones rurales, -

factorías, residencias y establecimientos comerciales. En estos lugares, la energía eléctrica puede ser convertida una vez más a energía mecánica por medio de motores, en energía calorífica mediante hornos eléctricos, en energía luminosa mediante lámparas eléctricas y en energía química mediante técnicas y procesos electroquímicos o bien puede ser convertida en otras formas de energía eléctrica mediante convertidores rotatorios, rectificadores y cambiadores de frecuencia.

La contribución singular del descubrimiento de Faraday en 1831 fue la generación de una tensión debido al movimiento relativo entre un campo magnético y un conductor de electricidad Faraday denominó a esta tensión, tensión "inducida" debido a que solo se produce cuando existe un movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético sin contacto físico real entre ellos.

El enunciado general de la Ley de Faraday puede expresarse así: " El valor de la tensión inducida en una sola espira de hilo es proporcional a la velocidad de variación de las líneas de fuerza que la atraviesan (o concatenan con ella). "

En 1845 se expresó cuantitativamente la Ley de Faraday en una ecuación en la que la magnitud de la fuerza electromotriz inducida generada (fem) era directamente proporcional a la velocidad del flujo concatenado :

$$E_{med} = \frac{\phi}{t} \times 10^{-8} \text{ v} \text{ ----- (2)}$$

En la que:

E_{med} es la tensión media generada en una sola espira (voltios / espira)

\emptyset Es el número de maxwells o líneas de fuerza magnética concatenados con la espira durante t . (en segundos)

t Es el tiempo en segundos en que son concatenadas \emptyset líneas.

10^8 es el número de líneas que una sola espira debe concatenar cada segundo a fin de inducir una tensión de 1 voltio.

De la definición y ecuación anteriores, es evidente que la tensión inducida generada puede incrementarse aumentando la intensidad del campo magnético (o sea, el número de líneas de flujo en movimiento relativo respecto al conductor) o reduciendo el tiempo durante el que se produce la variación en la concatenación de flujo (o sea, aumentando la velocidad o el movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético).

La expresión cuantitativa de la Ley de Faraday (ecuación 2) es cierta, sólo únicamente cuando el circuito magnético es físicamente idéntico tanto al final como al principio y durante el periodo de la variación de la concatenación de flujo. En las máquinas eléctricas, sin embargo la variación de concatenación de flujo no queda claramente definida o no es fácilmente medible en cada espira individual a causa de la rotación (tanto del indu

cido como de la excitación). Por consiguiente, es más conveniente expresar esta velocidad de variación en relación con la densidad de flujo media (supuesta constante) y la velocidad relativa entre este campo y un conductor único que se desplaza a través de él como se ilustra en la figura siguiente:

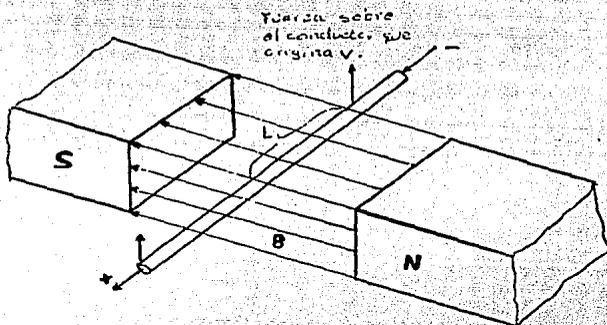


FIGURA.14 Conductor de longitud L que se mueve a través de un campo magnético B generando una fem.

Para el conductor de longitud activa L la fem. inducida instantánea puede expresarse como:

$$e = BLv \cdot 10^{-8} \text{ V} \dots\dots\dots (3)$$

en la que B es la densidad de flujo en gauss (líneas/cm²) o en líneas/pulg², L es la longitud de la parte activa del conductor que concatena el flujo en cm o en pulgadas, v es la velocidad relativa entre el conductor y el campo en cm. o pulg/seg.

La ecuación (3) puede deducirse de la ecuación (2) así:

Si el conductor de la figura recorre una distancia ds en un tiempo dt , la variación de la concatenación de flujo puede expresarse como $d = BLds$. Pero puesto que $e = (d/dt) 10^8$ V, sustituyendo $e = BL(ds/dt) 10^8$ V. Pero ya que ds/dt es igual a la velocidad v del conductor con respecto al campo magnético, $e = BLv 10^8$ V.

En una forma muy somera y elemental este es el principio en el cual se basa el funcionamiento de cualquier generador.

En la actualidad debido a la gran necesidad que se tiene de energía eléctrica disponible para utilizarla en el momento oportuno y para diversas actividades, se ha buscado la mejor manera de generar energía eléctrica, lo cual se ha hecho por medio de generadores acoplados a turbinas de vapor (termoeléctricas) o generadores acoplados a turbinas hidráulicas como es el caso del que nos estamos ocupando.

4.2 CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS GENERADORES DE LA CENTRAL-HIDROELECTRICA EL CARACOL

La planta el caracol esta localizada en el estado de Guerrero y consta de 3 unidades generadoras.

La casa de máquinas es subterránea y diseñada para alojar turbinas Francis de eje vertical, con una caída neta de diseño de 91.20 m. la descarga del tubo de aspiración, es llevada al río a través de un túnel.

Los generadores son directamente acoplados a las turbinas y

tienen una potencia de 208 000 KVA cada uno.

La planta opera como una planta pico con un factor de carga de 0.26. Para los servicios auxiliares, circuitos de control, - señales, etc. se dispone de una fuente de corriente continua a - 250 volts.

El alternador instalado es de eje vertical para acoplamiento directo a hidroturbina (Francis) y ha sido previsto para instalación en fosa, en construcción cerrada con ventilación de circuito cerrado mediante araña y enfriamiento por aire con refrigeradores de agua colocados en el circuito de ventilación.

4.2.1 ESTATOR

En este caso el inducido de la máquina es el estator (parte fija de la máquina).

El estator incluye:

- LA CARCASA
- EL NUCLEO MAGNETICO
- EL BOBINADO ESTATORICO
- LOS CIERRES DE AIRE
- LOS BORNES DE LINEA Y PUNTO NEUTRO.

Cargas en % de la potencia nominal	Pérdidas totales	Eficiencias
	a 0.95 de F.P.	a 0.95 de F.P.
208MVA= 100%	2429 KW	98.786 %
80%	2096 KW	98.691 %
60%	1827 KW	98.482 %
25%	1512 KW	97.030 %

Chumacera gufa

Volúmen de aceite de la chumacera gufa 2000 litros

Tipo de aceite recomendado 6°E a 50°C

Cantidad de agua requerida para el enfriamiento de la chumacera gufa 9.4 m³/hora

Presión del agua a la entrada de los enfriadores de las chumaceras Desde 14.2 Kg/cm² hasta 7 Kg/cm²

Caída de presión en los enfriadores de la chumacera 0.7 Kg/cm²

Dimensión de los orificios para los filtros del agua de enfriamiento de las chumaceras Diámetro de 1 a 2 mm.

Enfriadores

Número de enfriadores del generador 12

Gradiente entre el agua de enfriamiento y el aire frío de los enfriadores. 10°C

Cantidad de agua requerida para los enfriadores 520 m³/hora

Presión del agua a la entrada de los enfriadores del generador Desde 14.2 Kg/cm² hasta 7 Kg/cm².

Dimensión de los orificios para los filtros del agua a los enfriadores del generador Diámetro de 1 a 2 mm.

4.3 DATOS TECNICOS

Tipo:	ATBW-56-208000-128.6-16000 (Baja velocidad Polos salientes)
Rotación:	En la dirección de las manecillas del- reloj visto el generador desde arriba.
Voltaje nominal del generador entre fases.	16 KV
Frecuencia	60 c.p.s.
Factor de potencia	0.95 (atrasado)
Velocidad nominal	128.571 r.p.m.
Velocidad de desboque	250 r.p.m.
Tiempo que la máquina soportará la velocidad de desboque	30 min.
Capacidad nominal a 0.95 F.P. con 80°C de elevación de temperatura con varia- ción de $\pm 5\%$ del voltaje nominal.	208000 KVA
Con 86°C de elevación de temperatura - con voltaje nominal	223000 KVA
Con 97°C de elevación de temperatura - (máxima permitida con aislamiento cla- se F) con voltaje nominal.	239200 KVA
Aumento de sobre temperatura	40°C
Para 208000 KVA (capacidad nominal del generador) con voltaje nominal	Rotor 80°C GAR Estator 80°C GAR
Para 223000 KVA (potencia del genera- dor, cuando se tenga en la flecha de - la turbina 214249 KW) con voltaje nomi- nal.	Rotor 80°C GAR Estator 86°C GAR

Eficiencia del generador

Pérdidas y eficiencias convencionales de acuerdo con las normas-
IEC del generador a FP = 0.95 con voltaje y frecuencia nominal -
(sin incluir las pérdidas de la excitación y su redstato)

Calentadores

Número de calentadores eléctricos para evitar la condensación de humedad en los devanados de la máquina.

4

Capacidad total

18000 W

Pesos

Peso del rotor completo para su izaje

515 Ton.

Peso de los dispositivos especiales necesarios para el izaje del rotor completo

25 Ton.

Izaje mínimo requerido sobre el piso de generadores a partir del gancho de la grúa.

7.4 m.

Características mecánicas calculadas.

Tabulación de esfuerzos (stresses) en las partes de acero siguientes:

Concepto	Punto de cedencia. (yield point)	Máximo esfuerzo desarrollado	
		a velocidad Nominal	a velocidad de desboque
1) Araña	27 Kg/cm ²	4.8 Kg/cm ²	18 Kg/cm ²
2) Polos	34 Kg/cm ²	6.2 Kg/cm ²	22 Kg/cm ²
3) Lianta del rotor	45 Kg/cm ²	8 Kg/cm ²	30 Kg/cm ²
4) Cola de milano	34 Kg/cm ²	6.2 Kg/cm ²	22 Kg/cm ²

4.4 LIMITES DE OPERACION

4.4.1. CAPACIDAD DE CARGA.

La capacidad de carga eléctrica de la máquina está sintetizada en el diagrama de las Figs. (A, B, C, D.)

En el semieje positivo de las abscisas, se reproducen las potencias activas; en el semieje positivo de las ordenadas, las potencias reactivas en sobreexcitación; en el semieje negativo, las potencias reactivas en subexcitación; en el semieje negativo las potencias reactivas en subexcitación. Las escalas de los dos ejes son iguales; los valores son en por unidad relacionados a la potencia de carga.

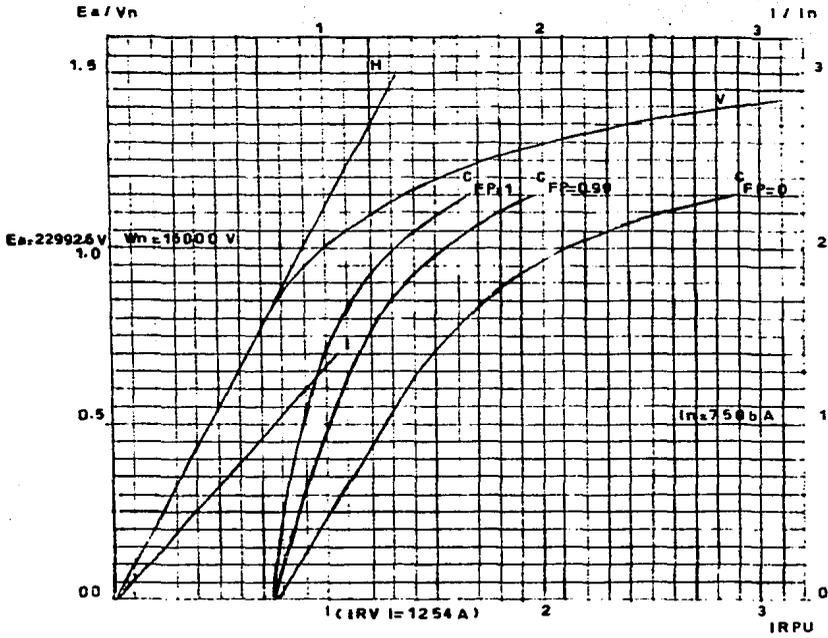
La carga eléctrica se considera equilibrada y el sistema de los voltajes de máquina es simétrico.

Cada curva trazada en este diagrama se refiere al voltaje, a la frecuencia y a las condiciones del fluido refrigerador, constantes y claramente indicadas en el mismo diagrama.

Cada curva consta de tres trechos. El trecho superior representa el límite de máximo calentamiento del devanado rotórico (corriente de excitación máxima y constante).

El trecho intermedio representa el límite de máximo calentamiento del bobinado estatórico (corriente estatórica máxima y --

**CURVA DE SATURACION Y CORTO CIRCUITO
(VALORES ESTIMADOS)**



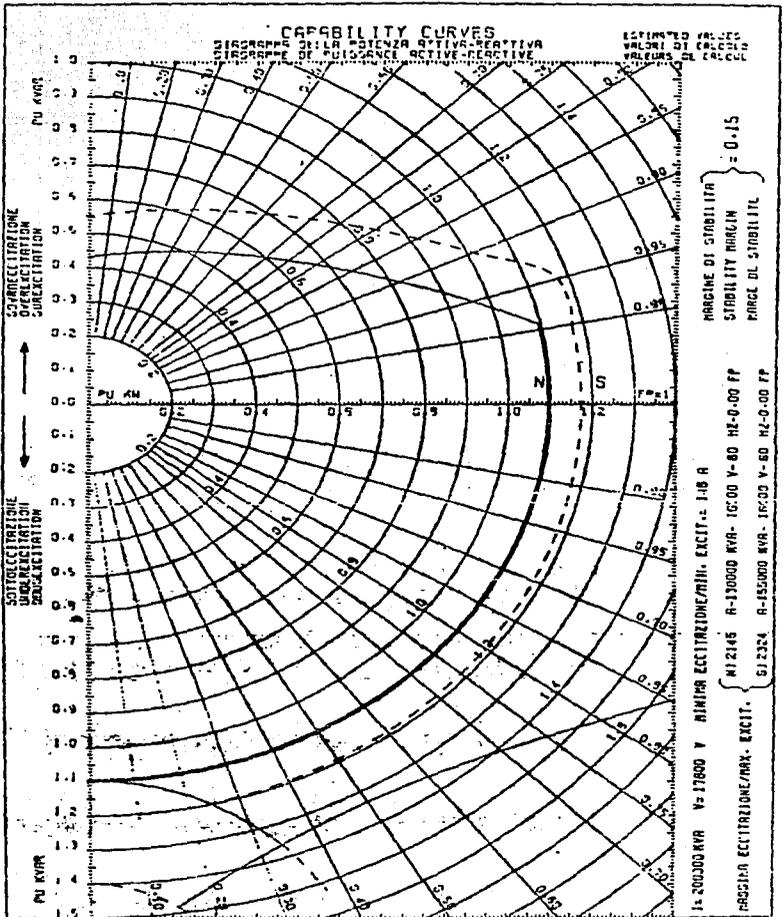
H CURVA DEL ENTREHIERRO

V CURVA SIN CARGA

I CURVA DE CORTO CIRCUITO

C CURVA DE SATURACION

Limites Operatives



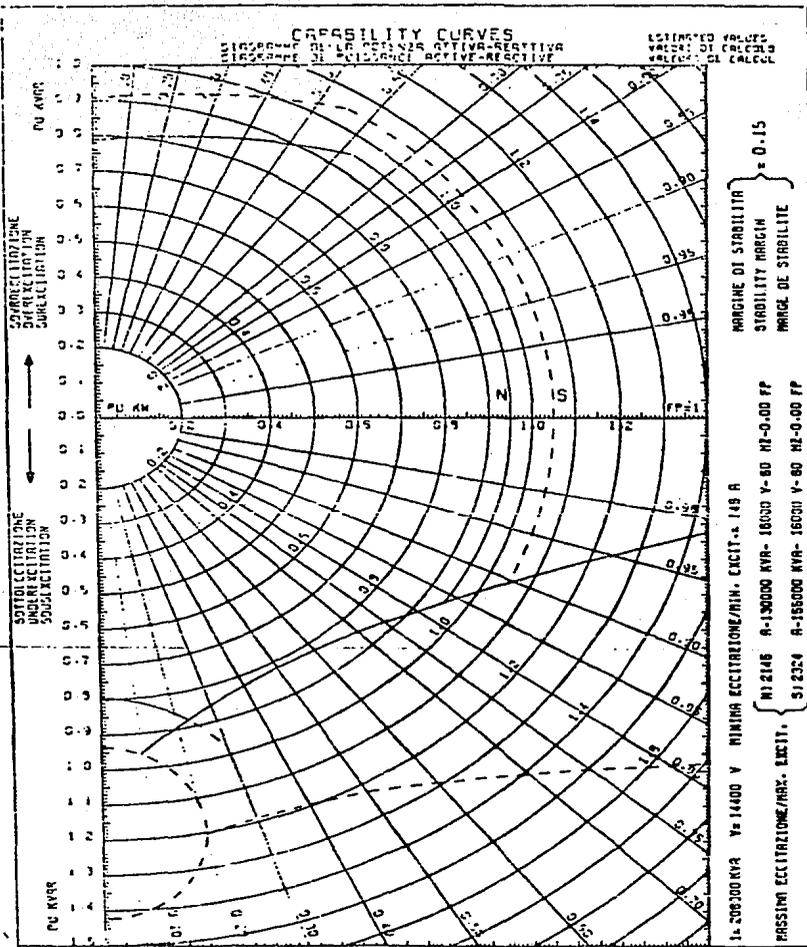
Centralista
Ansaldo S.p.A.
 Genova - Italy

EL CARACOL
 Generadores Hidroelectricos



COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Limites Operatives



Contrattista
Ansaldo S.p.A.
 Genova - Italy

EL CARACOL
 Generadores Hidroelectricos



COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

constante).

El trecho inferior representa el límite de máximo calentamiento localizado en la extremidad de la estructura del conjunto estator.

En el diagrama se encuentran algunas rectas que pasan por el origen de las coordenadas y están contramarcadas por los correspondientes valores del factor de potencia: estas rectas han sido trazadas considerando que:

$$\text{Factor de potencia} = \frac{P_{act}}{\sqrt{P_{act}^2 + P_{react}^2}} \quad (4)$$

En el diagrama han sido también trazados algunos círculos - cuyo centro es el origen de las coordenadas y han sido contramarcados por los correspondientes valores de la potencia aparente; - estos círculos han sido trazados considerando que:

$$P_{aparente}^2 = P_{act}^2 + P_{react}^2 \quad (5)$$

El área interior y delimitada por los trechos de la curva y por el eje de las ordenadas, representa el conjunto de los posibles puntos de servicio continuo de la máquina; las sobretemperaturas de los bobinados de la máquina empleada de tal manera que cumplen con los límites de operación y los acuerdos Cliente-constructor a que se refiere el proyecto de la máquina.

Puede que la máquina empleada en servicio continuo a los límites de la capacidad de carga y al voltaje, frecuencia y condiciones del refrigerador previstos, presente sobretemperaturas de los bobinados inferiores a los límites previstos; este hecho no implica la posibilidad de superar los límites de la capacidad de carga de la máquina.

4.4.2 VARIACIONES DE VOLTAJE Y FRECUENCIA

El servicio continuo con voltajes de máquina diferentes del 5% del nominal, es siempre permitido para las cargas incluidas - según los límites de la capacidad de carga; las sobretemperaturas de máquina que derivan de esto, satisfacen los límites de operación y los acuerdos cliente-constructor.

No se admite el servicio continuo con voltajes superiores a 1.05 del voltaje nominal.

se admiten transitorios con voltajes superiores en 1.05 veces el voltaje nominal:

- Por duraciones del orden de 1' min. por valores no superiores a 1.1 veces el voltaje nominal
- Por duraciones del orden de 1 seg. por valores próximos a 1.2 veces el voltaje nominal.

En la instalación tendrfa que preverse una protección que interrumpe automáticamente el servicio en el momento de la superación de los voltajes y duraciones sobredichas.

El servicio continuo con voltajes inferiores a 0.95 veces el voltaje nominal es permitido pero con adecuados límites de capacidad de carga; en general estos límites se logran cuando se alcanza la corriente rotórica y/o estática máxima permitida, correspondiente al diagrama de capacidad de carga relacionado al voltaje nominal.

Se admite el servicio continuo con frecuencias de máquina diferentes de aquélla nominal según los límites de las normas -- y/o acuerdos cliente-constructor, a los cuales hay que consultar.

Si generalmente el caso es muy raro, puede ocurrir que la máquina conectada a la red se hace funcionar a velocidades que no son permitidas en la operación, o bien que la carga pedida -- por la red reduzca la velocidad de la máquina a los valores que no son permitidos para la operación.

En ambos casos, el comportamiento de la máquina depende antes de todo del motor primero: de cualquier modo, desde el punto de vista del mantenimiento de la máquina, no se admiten servicios de este tipo. La instalación tendrfa que prever una adecuada protección que interrumpe automáticamente operaciones de este tipo.

4.5 PUESTA EN MARCHA Y PARADA

4.5.1 CONTROLES ANTES DE LA PUESTA EN MARCHA

Se hace referencia a la máquina ya montada completamente según el orden general previsto por los relativos dibujos de construcción, eventuales operaciones de mantenimiento se consideran ya enteramente terminadas.

Los sistemas de enfriamiento, lubricación, protección, vigilancia y control de lejas, y de medida se consideran ya instalados, verificados, calibrados y funcionantes según el proyecto definitivo de la instalación.

En fin, se supone que la máquina haya sido anteriormente parada, después de un servicio regular y que la duración de parada haya sido como máximo del orden de algunos meses.

Empezando conforme a esta situación, se necesita:

- 1.- Asegurarse de que los calefactores de la máquina hayan quedado alimentados durante toda la parada; el calor que éstos desarrollan permite mantener el ambiente interior de la máquina a una temperatura un poco superior a la del ambiente exterior, evitando la formación de humedad y condensado en los bobinados y en los aisladores.

Si los calefactores han quedado desalimentados para un pe-

ríodo bastante largo (algunos días), se necesita medir el índice de polarización y la resistencia de aislamiento de los bobinados y confrontarlos con aquellos mínimos aconsejados por el constructor de la instalación; si se logran valores insuficientes, un procedimiento de secado de los bobinados permite el alcance de valores aceptables.

Hay que quitar la alimentación a los calefactores solo inmediatamente antes de la puesta en marcha efectiva de la máquina.

- 2.- Asegurarse de que los sistemas de protección, vigilancia, control de lejes y medida, funcionen y estén listos para intervenir.
- 3.- Verificar que el sistema de excitación sea alimentado según las previstas condiciones de la máquina parada (véanse las instrucciones del Regulador de Voltaje Ansaldo)
- 4.- Verificar el correcto orden de servicio del sistema de lubricación de las chumaceras; especialmente hay que controlar la presión, el caudal y/o la circulación, la temperatura, los niveles del aceite de lubricación de las chumaceras y de los soportes.
- 5.- Controlar el correcto orden de funcionamiento del sistema de ventilación de la máquina. De modo particular hay que verifi

ficar la posición de las ventanillas de inspección y/o de la instalación anti-incendio.

- 6.- Verificar la correcta disposición de servicio del sistema de los refrigeradores aire-agua; especialmente hay que controlar la presión, el caudal y/o la circulación y la temperatura del agua a la entrada de los refrigeradores.
- 7.- Asegurarse del correcto orden de funcionamiento de las eventuales escobillas y portaescobillas; de modo particular hay que controlar el desgaste de las escobillas, la solidez de las conexiones eléctricas, la fuerza de los muelles de los portaescobillas y la posibilidad de movimiento de las escobillas.

4.5.2 PUESTA EN MARCHA

Generalmente no existen límites (excepto aquéllos puestos por el motor primero) para la aceleración de la velocidad del rotor de la máquina.

La puesta en marcha se considera en vacío, ésto sin la carga eléctrica exterior conectada con la máquina.

Para las modalidades de la puesta en marcha, hay que relacionarse a las instrucciones correspondiente al motor primero.

Durante la puesta en marcha (y durante la marcha sucesiva) hay que controlar con intervalos de tiempo regulares:

- 1.- Que la temperatura de las chumaceras de la máquina y el nivel del aceite de lubricación de las chumaceras y de los soportes queden en los límites aconsejados por el constructor de la máquina.

En caso de que la temperatura de la chumacera o el sistema de lubricación mostraran anomalías, se necesita interrumpir inmediatamente la puesta en marcha (o la marcha); sucesivamente se tendrá que buscar y eliminar la causa de la anomalía con eventuales inspecciones en las chumaceras y pruebas de funcionamiento en el sistema de lubricación.

- 2.- Las vibraciones mecánicas en las zonas alrededor de las chumaceras no tienen que superar los límites aconsejados por el constructor de la máquina.

Si el valor de estas vibraciones fuese "excesivo", se aconseja interrumpir la puesta en marcha (o la sucesiva marcha) verificar y eliminar las causas antes de poner otra vez la máquina en marcha.

La sensibilidad manual a las vibraciones es notable: en este sentido un operador puede hacerse una experiencia personal comparando la actual sensación con aquellas correspon--

dientes a anteriores puestas en marcha y operaciones que resultaron satisfactorias.

Si la velocidad de operación de la máquina fuese superior a uno o más velocidades críticas del grupo (partes rotatorias, estructuras de los soportes, fundaciones), podría ser que las vibraciones lleguen a unos valores máximos conformemente a particulares velocidades de la máquina. Este comportamiento se repite para un determinado grupo y hay que tomarlo en consideración: después de haber identificado las velocidades a las cuales corresponden las máximas vibraciones, hay que acelerar o desacelerar constantemente alrededor de éstas.

- 3.- El ruido de la máquina y de sus piezas tiene que resultar normal, es decir como lo que el operador ha oído durante anteriores puestas en marcha y operaciones que han sido satisfactorias.

La fase de puesta en marcha termina cuando se alcanza una velocidad muy cerca a aquella nominal.

4.5.3 EXCITACION EN VACIO.

Generalmente la excitación de la máquina se hace gradualmente después que ésta ha llegado a una velocidad muy próxima a la velocidad nominal; aunque las modalidades de excitación pueden ser diferentes a medida del tipo y de la alimentación del siste-

ma de excitación (veáanse las instrucciones correspondientes al - Regulador de Voltaje Ansaldo).

De todas maneras, excitando en vacío la máquina hay que con siderar que:

- 1.- La relación entre el voltaje de máquina y la velocidad (o - bien entre el voltaje y la frecuencia) correspondiente no - tiene que superar aquélla correspondiente a los valores no - minales.

Para los valores de la relación sobredicha alrededor de 1.2 veces aquél correspondiente a los valores nominales, la du - ración admisible es del orden de 1 ó 2 seg.

La relación sobredicha es enlazada con el flujo hacia el en trehierro y, por consecuencia, con el recalentamiento del - conjunto del estator.

La instalación tendría que tener una adecuada protección -- que identificando la anomalía, pueda intervenir con la alar ma y desexcitar la máquina.

- 2.- Las máquinas autoventiladas tienen una capacidad reducida - de enfriamiento con bajas velocidades, por lo tanto la co - rriente de excitación tiene que estar en correlación a la - velocidad inferior a aquélla nominal, con la duración y las

temperaturas logradas por el bobinado del rotor. De todas maneras el voltaje en vacfo no tiene que superar (excepto - por duraciones muy cortas) 1,05 veces aquél nominal.

4.5.4 SINCRONIZACION.

Se supone que la instrumentación correspondiente haya sido controlada y resulte eficiente y no haya sido manumisa desde la última maniobra de sincronización efectuada con resultado positivo; especialmente tiene que haberse controlado: la concordancia de secuencia de las fases, de la red y la exactitud de la indicación del ángulo de fase del sincronoscopio.

El voltaje y la frecuencia de la red o concatenarse con el generador, tiene que compararse con el campo de voltajes y frecuencias permitidas para el servicio de la máquina.

Obrando por medio de la excitación, el voltaje de la máquina puede diferir no más del 5% respecto aquél de la red.

Obrando por medio del motor primero, la frecuencia de la máquina puede diferir poco de aquélla del voltaje de red.

Cuando el ángulo de fase indicado por el sincronoscopio resulta igual a cero o muy pequeño (5° - 10°) y se efectua el cierre del interruptor que conecta a la máquina con la red, la operación de sincronización puede considerarse terminada.

La operación puede hacerse manualmente o bien de manera semiautomática o enteramente automática, según la instrumentación existente en la planta.

En una operación hecha manualmente, el índice del sincronoscopio tendría que rodar bastante lento (un giro cada 10-15 seg.) el operador tiene que anticipar el mando del cierre del interruptor respecto al instante en que el índice del sincronoscopio señala 0° , considerando el tiempo de maniobra de cierre del interruptor. Además, generalmente se prefiere efectuar la sincronización cuando la máquina genera una frecuencia poco superior a la de la red.

Sin considerar los detalles de las instrumentaciones semiautomáticas o automáticas, se puede decir que éstas facilitan la sincronización, ya que calculan automáticamente el tiempo de maniobra y permiten cerrar el interruptor solamente cuando los ángulos de fase son muy pequeños (5° o menos), aún con diferencias de frecuencias máquina red bastante altas (1-2%).

En caso de que la máquina sea sincronizada en condiciones de voltaje, frecuencia y ángulo de fase diferentes de aquéllas sobreenindicadas, pueden manifestarse averías en la máquina y en toda la instalación; la cantidad de estas averías depende de las condiciones en el momento de la sincronización.

Muchas veces es muy difícil reconstruir enseguida las con-

diciones en el momento de una sincronización equivocada: esto -- evidencia el cuidado con que hay que ejecutar esta operación.

Después de las sincronizaciones efectuadas con ángulos de de fasaje del orden de 120° (o más) o con diferencias de voltaje -- del orden del 100%, no cabe duda que el personal calificado tenga que controlar e inspeccionar la máquina; ésta puede volver a funcionar solamente después del éxito de estas inspecciones y -- controles.

4.5.5. TOMA DE CARGA

Después de la sincronización se pueden regular los dos elementos que componen la carga eléctrica: la potencia activa se regula obrando por medio del motor primero a cuyas instrucciones -- hay que relacionarse.

La regulación de la potencia reactiva se efectúa obrando -- por medio de la excitación, es decir del regulador de voltaje An saldo a cuyas instrucciones hay que hacer referencia.

La carga eléctrica se regula según las necesidades de ejercicio pero dentro de los límites permitidos por el constructor -- de la máquina.

Solamente por lo que concierne a la máquina, para que el -- ejercicio se mantenga más, hay que variar la carga (activa y --

reactiva) con una cierta lentitud, para lograr lentas variaciones en las diferencias térmicas entre los bobinados y las partes circunstantes.

El caudal de agua de los refrigeradores, es adecuado a la carga, de modo que el aire de refrigeración se mantenga a una temperatura constante de casi 35-40°C; esto permite no solamente de evitar frecuentes y amplios ciclos térmicos en el interior de la máquina, sino que también posibles daños como pueden ser formaciones de condensado en las partes interiores de la máquina que tiene temperatura inferior a aquella del ambiente; cargas muy bajas o bajas temperaturas del agua en los refrigeradores facilitan la formación de condensado.

Durante la marcha de carga, además de lo que ha sido ya indicado con respecto a la fase de puesta en marcha, se necesita verificar que:

- 1.- La temperatura del aire de refrigeración quede dentro de los límites permitidos.

Puede ocurrir que la temperatura de aire de refrigeración exceda los límites permitidos a causa de anomalías relativas a los refrigeradores: por ejemplo escaso caudal de agua, temperatura excesiva del agua, obstrucciones o averías interiores a los refrigeradores, suciedad externa acumulada en los tubos de los refrigeradores. En éstos casos se necesitará eliminar lo más pronto posible las anomalías,

si no será necesario reducir la carga hasta cuando la temperatura del aire vuelva adentro de los límites permitidos.

- 2.- Las sobretemperaturas de los bobinados (estatóricos y rotóricos) no tienen que superar los límites permitidos respecto al aire de refrigeración.

Por una determinada condición de régimen térmico, estas sobretemperaturas son aproximadamente funciones lineales del cuadro de corriente fluyente en los bobinados.

Se puede evidenciar este comportamiento térmico de la máquina a través de un apósito diagrama a efectuarse con medidas relevadas directamente en la instalación durante varias cargas.

Las sobretemperaturas de régimen térmico relevadas en sucesivas ocasiones y cargas, tendrían que corresponder al diagrama sobredicho, marchas que se alejan sensiblemente de éste, indican condiciones variadas de refrigeración de la máquina, por ejemplo: suciedad en los bobinados o en los canales de ventilación, escaso caudal de aire de enfriamiento debido a obstrucciones en el circuito de aire o a obstrucciones de los eventuales filtros.

En estos casos, se necesitará eliminar lo más pronto posible las anomalías, si no será necesario reducir la carga hasta cuando las sobretemperaturas de los bobinados vuelven por lo menos dentro de límites permitidos.

4.5.6 PARADA

Se efectua la reducci3n gradual de la carga activa (obrando en el motor primero) y de la carga reactiva (obrando en la excitaci3n).

Despu3s de la apertura del interruptor que conecta la m3quina a la red, antes de todo hay que efectuar la desexcitaci3n gradual hasta cero; sucesivamente la parada de la m3quina.

Por lo que concierne a la corriente de excitaci3n, en fase de desaceleraci3n, v3ase lo que se ha dicho en el p3rrafo "Puesta en Marcha"

La parada de la m3quina puede tambi3n ocurrir mediante un automatismo puesto en marcha a trav3s de la intervenci3n del sistema de protecciones de la instalaci3n o por voluntad del operador (parada de emergencia): en este caso la alimentaci3n es quitada muy bruscamente y por consecuencia hay generalmente sobre-velocidades y sobrevoltajes de m3quina que tienen que contenerse en los l3mites permitidos por el constructor de la m3quina, y -- que de cualquier modo tienen que considerarse como transitorios y no como prestaciones continuas a las cuales la m3quina puede someterse.

Terminando el transitorio, velocidad y voltaje tienen que -- llevarse (o ser llevados por el operador) dentro de los valores normales.

Por lo que concierne al mantenimiento de la máquina, se aconseja que no se efectúen sistemáticamente (aún cuando no sea necesario) paradas de emergencia de la máquina.

4.6 CONDICIONES DE MAL FUNCIONAMIENTO

4.6.1 PERDIDA DE PASO

La máquina ya sincronizada y conectada con la red, aunque mantenga por lo menos en parte su excitación, puede perder el sincronismo con la red por graves perturbaciones o fenómenos sea interiores a la instalación correspondiente a la misma red.

Esta anomalía es grave entre las que conciernen a la máquina; la entera instalación (motor primero, fundaciones, conducciones eléctricas de potencia ...) puede ser dañada notablemente.

En el bobinado de armadura, se producen corrientes muy altas con consiguientes esfuerzos dinámicos: el rotor está sometido a pares electromagnéticos alternos más grandes que corresponden a la carga nominal; muchos voltajes fuertes son inducidos en el devanado rotor y altas corrientes parásitas se desarrollan en las partes metálicas y macizas del rotor.

En la instalación, generalmente tendrán que estar previstas adecuadas protecciones que interrumpan automáticamente el funcionamiento de la máquina, antes de que ésta pueda dañarse

por esta anomalía.

En caso de que se hayan verificado que la máquina ha tenido una pérdida de paso, ésta tiene que ser revisada y controlada con mucho cuidado por personal muy calificado. Solamente después del éxito de estos controles e inspecciones, se puede volver a poner la máquina en marcha.

4.6.2. PERDIDA DE EXCITACION

La pérdida de excitación (después de que la máquina ha sido conectada a la red) produce sobrecalentamiento, especialmente en el rotor, el comportamiento de la máquina depende mucho de la carga activa en el momento de la pérdida de excitación del tipo de circuito exterior que queda conectado al bobinado de excitación. La máquina tiende a comportarse como un asincrónico de inducción el rotor es la parte que experimenta más rápidamente la anomalía; considerables voltajes son inducidos en el bobinado rotor y altas corrientes parasitas se desarrollan en las partes metálicas del rotor.

En la instalación tendrían que ser previstas adecuadas protecciones que interrumpan automáticamente estas operaciones.

En caso de que se hayan verificado que la máquina ha funcionado como asincrónica por periodos notablemente más largos que aquéllos, previstos para la intervención de las protecciones de la instalación la máquina tiene que ser cuidadosamente controla-

da y revisada por personal calificado (especialmente en el rotor); solamente después del éxito de estos controles e inspecciones, la máquina puede volver a funcionar.

4.6.3 OPERACION CON UN UNICO PUNTO DE MASA EN EL CIRCUITO DE EXCITACION

Normalmente todo el circuito de excitación (devanado rotor y su sistema de alimentación) está aislado de la masa y entonces es teóricamente posible la operación con un único punto de masa en este circuito.

Con todo esto, la continuación del funcionamiento, perdurando dicha anomalía, es una situación arriesgada: en efecto si un segundo punto del circuito de excitación estuviese en masa, podrían verificarse daños al mismo circuito, así como: sobrecorrientes, fuertes desequilibrios electromagnéticos, insuficiente excitación de la máquina.

(En la instalación tendría que ser prevista una protección para que por lo menos indicara al operador dicha anomalía).

A consecuencia de esta señalización, se aconseja parar la máquina y eliminar la anomalía antes de continuar la operación.

4.6.4 AVERIAS EN EL AISLAMIENTO DEL BOBINADO DE ARMADURA.

Esencialmente estas averías pueden afectar el aislamiento:

- de una fase hacia la masa
- de una fase hacia otras fases.
- de espira de cada fase.

Cada una de estas eventualidades tendría que ser señalada a través de oportunas protecciones colocadas en la instalación - (por ejemplo: tierra del estator; protección para corrientes diferenciales, protección para espiras de corto circuito). La inmediata y automática intervención para la máquina de separarla de la red, la desexcita y la protege de daños probablemente más grandes.

Tal vez puede ocurrir que una escasa selectividad de las protecciones, o averías y perturbaciones que se refieren a la red (por lo tanto exteriores a la máquina) puedan producir intempestivas intervenciones de estas protecciones.

Por lo tanto después de la intervención, la eventual avería tiene que ser verificada a través de cuidadosos controles en las bobinas.

Averías de aislamiento hacia la masa o entre las fases pueden manifestarse a través de las medidas de resistencia de aislamiento en el bobinado de cada fase separada de las otras.

Averías de aislamiento de espira pueden evidenciarse con la máquina en marcha por medio de las medidas de simetría de los voltajes de máquina, empezando de la excitación cero y aumentándola gradualmente y prudentemente poco a poco.

Estos controles tendrían que ser efectuados por el personal con suficiente experiencia y calificación. Lógicamente la máquina podrá continuar su ejercicio solamente después de la reparación de la avería eventualmente identificada.

4.6.5. SERVICIOS CON DESEQUILIBRIOS DE CORRIENTE DE ARMADURA.

El ejercicio de la máquina con fuertes desequilibrios de corriente de armadura es anormal y dañino. Generalmente la conexión entre el neutro de la armadura y la masa se efectúa a través de impedancias de valor muy alto (en por unidad), entonces los desequilibrios de corriente son debidos esencialmente a componentes de secuencia negativa del sistema de corrientes de armadura de la máquina; estas componentes son originadas por desequilibrios de carga en las fases de la red.

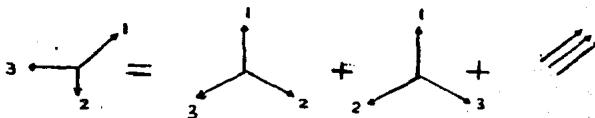


FIGURA 15.

El campo contrario que deriva induce en las partes metálicas macizas y periféricas y en los bobinados apagadores del ro-

tor, fuertes corrientes parásitas y frecuencia doble de aquélla de la red. De ésto derivan intensos recalentamientos rotóricos-localizados, pares electromagnéticos alternos, desagradables vibraciones del conjunto estator.

La cantidad de desequilibrio de secuencia negativa de las corrientes de armadura que la máquina puede soportar, depende de los acuerdos entre el cliente y el constructor a los que hay que relacionarse.

En el campo de los desequilibrios pequeños y persistentes - (componente de secuencia negativa del orden del 10% de la corriente nominal), el mismo operador puede disminuir el desequilibrio reduciendo la potencia reactiva y/o activa; en este mismo campo hay que notar que la componente de secuencia negativa es aproximadamente la más grande de las diferencias, en el valor absoluto, entre el valor medio y los valores de las corrientes de las tres fases.

En la instalación tendrían que ser previstas adecuadas protecciones para que intervengan automáticamente para interrumpir los servicios con desequilibrios superiores a aquéllos permitidos por el constructor o por lo menos, que señalen por medio de alarma el servicio anormal.

En caso de que se haya verificado que la máquina ha funcionado con desequilibrios notablemente superiores, respecto a su duración, a aquéllos permitidos por el constructor, la máquina -

tiene que ser cuidadosamente revisada y controlada (especialmente en la parte de rotor) por personal muy calificado.

Solamente después del éxito de éstos controles la máquina puede continuar su ejercicio.

4.7 GENERADOR SINCRONO DE POLOS SALIENTES

4.7.1 GENERALIDADES

De acuerdo a su velocidad, las máquinas sincronas son, de alta velocidad y de baja velocidad. Las primeras son de ROTOR CILINDRICO (llamado también Máquinas de polos lisos), éstos son de reluctancia constante, esto es su entrehierro es prácticamente constante. Las segundas son de polos salientes y son de reluctancia variable, puesto que su entrehierro frente a las zapatas polares, eje directo, es mucho menor que el que existe en el Centro Interpolar, Eje en Cuadratura.

La reactancia sincrónica es la consolidación, de los efectos de la reacción de armadura y de la dispersión del flujo que induce la tensión en la propia armadura. Comúnmente se valga como la suma de dos reactancias; la correspondiente a la reacción de armadura (X_a) y la que toma en cuenta la dispersión (X_1). La reactancia (X_a) es bastante más grande que la reactancia (X_1).

Las máquinas de polos salientes, tienen dos reactancias una en eje directo (x_d) y otra en eje en cuadratura (x_q); debido a sus dos valores de reluctancia antes mencionada. Las características de comportamiento en estado estable son muy populares cuando se refieren a los límites térmicos de determinada máquina sincrónica, especialmente generadores. En la literatura Inglesa se le da el nombre de "CAPABILITY".

Es muy útil que los operadores conozcan la característica -

de " Capability " de sus máquinas, puesto que marca las condiciones límites de operación. Sin embargo esto puede simplificarse marcando estos límites en los instrumentos de medición de la unidad tales como volmetros, ampermetros de C.A. y C.D., Wattmetros y varmetros.

La palabra " Capability " se españoliza aunque no adecuadamente con el nombre de " CAPABILIDAD ".

La característica de comportamiento en estado estable sin que sea necesario referirla al límite térmico, es muy útil para estudiar la generación de potencia activa y reactiva y la interacción que existe entre ambas. Adicionalmente es indispensable para conocer la influencia que tienen los parámetros de la unidad en su operación y que a veces son determinantes en su costo.

4.7.2 DIAGRAMA FASORIAL Y DIAGRAMA CIRCULAR DE UN GENERADOR SIN CRONO DE POLOS SALIENTES.

La ecuación de un generador sincrónico sobreexcitado, de polos salientes; en estado estable es:

$$\vec{E}_a = \vec{V}_a + \vec{I}\vec{R} + j\vec{I}\vec{X}_l + j\vec{I}_d\vec{X}_d + j\vec{I}_q\vec{X}_q \text{ ----- (6)}$$

En cual:

\vec{E}_a = La tensión que induciría el campo de C. D. si no hubiese reacción de la armadura ni saturación.

\vec{V}_a = La tensión terminal del generador que se considera - - constante porque se estudia el generador sincrónico conectado a un "BUS" infinito (puede interpretarse como la tensión inducida por el flujo resultante del campo inductor y la reacción de armadura).

X_d = La reactancia sincrónica en eje directo.

X_q = La reactancia sincrónica en eje en cuadratura.

R = Resistencia efectiva de la armadura.

i = Corriente de excitación

I = Corriente de armadura

X_1 = Reactancia de dispersión de la armadura

I_d = Componente en eje directo de la corriente de armadura.

I_q = Componente en eje en cuadratura de la corriente de armadura.

Simplificando la ecuación anterior al incorporar la reactancia de dispersión en las otras reactancias se obtiene:

De el diagrama de la figura siguiente:

$$\vec{E}_a = \vec{V}_a + I\vec{R} + jI_d\vec{X}_d + jI_q\vec{X}_q \quad \text{----- (7)}$$

$$E_a e^{j\epsilon_a} = V_a e^{j\varphi} + IR e^{j\varphi} + jX_d I_d e^{j\varphi} + jX_q I_q e^{j\varphi} \quad \text{----- (8)}$$

$$\text{Pero } I_d = -\frac{I}{2} \text{ rad} = -90^\circ$$

$$e_a = 0^\circ$$

$$I_q = e_a = 0^\circ$$

$$V_a = -\delta$$

$$I_a = -\delta - \theta$$

Entonces:

$$E_a = V_a \hat{1} + I R_e \hat{1} + j X_d I_d + j X_q I_q \quad \text{----- (9)}$$

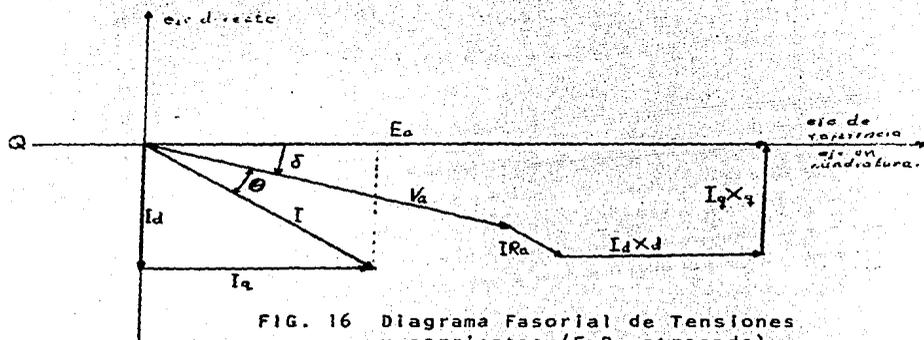


FIG. 16 Diagrama Fasorial de Tensiones y corrientes (F.P. atrasado)

Ya sabemos que:

$$\bar{S} = V_a \hat{1}, \hat{1} = \text{Conjugado de la corriente} \quad \text{----- (10)}$$

$$V_a = V_a \hat{1} = V_a \hat{1} \cos(\epsilon a - \delta)$$

$$\hat{I} = I \hat{1} = I \hat{1} \cos(\epsilon a - \frac{\pi}{2}) + I \hat{1} \sin(\epsilon a - \frac{\pi}{2})$$

$$\hat{1} = I \hat{1} = I \hat{1} \cos(\epsilon a - \frac{\pi}{2}) + I \hat{1} \sin(\epsilon a - \frac{\pi}{2})$$

Pero $\epsilon a = 0^\circ$ según la figura anterior

Entonces resulta:

$$\bar{S} = V_a \hat{1} \cos(\delta) (I \hat{1} \cos(\frac{\pi}{2}) + I \hat{1} \sin(\frac{\pi}{2})) \quad \text{----- (11)}$$

De acuerdo con el diagrama de la figura anterior:

$$|\bar{E}_a| = E_a = V_a \cos \delta + I R_a \cos(\theta + \delta) + I_d X_d \quad \text{----- (12)}$$

$I R_a \cos(\theta + \delta)$ se desprejia por ser pequeño y para simplificar cálculos:

$$E_a = V_a \cos \delta + I_d X_d \text{ ----- (13)}$$

De donde despejamos I_d :

$$I_d = \frac{E_a - V_a \cos \delta}{X_d} \text{ además } I_q = \frac{E_a \sin \delta}{X_q} \text{ (ver figura anterior)}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (11)

$$\vec{S} = V_a e^{-j\delta} \left(\frac{E_a - V_a \cos \delta}{X_d} e^{j\frac{\pi}{2}} + \frac{V_a \sin \delta}{X_q} \right) \text{ ----- (14)}$$

$$\vec{S} = \frac{V_a E_a}{X_d} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)} - \frac{V_a^2}{X_d} \cos \delta e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)} + \frac{V_a^2 \sin \delta}{X_q} e^{-j\delta} \text{ ---- (15)}$$

En lo que sigue se hará uso de las siguientes identidades:

$$e^{-j\delta} e^{j\frac{\pi}{2}} = e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)} = j e^{-j\delta}$$

$$e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2} = 0 + j = j$$

$$e^{-j2\delta} = \cos 2\delta - j \sin 2\delta$$

$$e^{-j\delta} \cos \delta = \cos^2 \delta - j \sin \delta \cos \delta$$

$$e^{-j\delta} \sin \delta = \sin \delta \cos \delta - j \sin^2 \delta$$

$$\cos^2 \delta = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\delta)$$

$$\sin \delta \cos \delta = \frac{1}{2} \sin 2\delta$$

$$\sin^2 \delta = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\delta)$$

Aplicándole estas identidades donde correspondan a la ecuación -

*10 tenemos :

$$\vec{S} = \frac{V_a E_a}{x_d} e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} - j \frac{V_a^2}{2x_d} (e^{j2\delta} + 1) + j \frac{V_a^2}{2x_q} (e^{j2\delta} - 1) \quad \text{--- (16)}$$

$$\vec{S} = \frac{V_a E_a}{x_d} e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} + j \frac{V_a^2}{2} \left[-\frac{e^{j2\delta}}{2x_d} - \frac{1}{x_d} + \frac{e^{j2\delta}}{x_q} - \frac{1}{x_q} \right] \quad \text{--- (17)}$$

$$\vec{S} = \frac{V_a E_a}{x_d} e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} + j \frac{V_a^2}{2} \left[e^{j2\delta} \left(-\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q} \right) + \left(-\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_q} \right) \right] \quad \text{--- (18)}$$

$$\vec{S} = \frac{V_a E_a}{x_d} e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} + j \frac{V_a^2}{2} \left[e^{j2\delta} \left(\frac{-x_q - x_d}{x_d x_q} \right) + \frac{-x_q - x_d}{x_d x_q} \right] \quad \text{--- (19)}$$

$$\text{Pero } j = e^{j\frac{\pi}{2}}$$

$$\vec{S} = \frac{V_a E_a}{x_d} e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} + \frac{V_a^2}{2} \left[e^{j(\frac{\pi}{2} - 2\delta)} \left(\frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \right) + e^{-j\frac{11}{2}} \frac{x_d + x_q}{x_d x_q} \right] \quad \text{--- (20)}$$

Llamando:

$$\frac{x_d - x_q}{x_d x_q} = \frac{\Delta}{\pi} (x_d, x_q)$$

$$\frac{x_d + x_q}{x_d x_q} = \frac{\Sigma}{\pi} (x_d, x_q)$$

Se obtiene finalmente (acomodando los términos):

$$\vec{S} = \frac{1}{2} V_a^2 \frac{\Sigma}{\pi} (x_d, x_q) e^{j\frac{\pi}{2}} + \frac{1}{2} V_a^2 \frac{\Delta}{\pi} (x_d, x_q) e^{j(\frac{\pi}{2} - 2\delta)} + \frac{V_a E_a}{x_d} e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} \quad (2)$$

Para simplificar más la forma de esta ecuación hacemos:

$$A = \frac{1}{2} V_a^2 \frac{\Sigma}{\pi} (x_d, x_q) \quad \text{y} \quad a = -\frac{\pi}{2}$$

$$B = \frac{1}{2} V_a^2 \frac{\Delta}{\pi} (x_d, x_q) \quad \text{y} \quad b = \frac{\pi}{2} - 2$$

$$c = \frac{V_a E_a}{x_d} \quad \text{y} \quad c = \frac{\pi}{2}$$

Entonces la ecuación queda:

$$\vec{S} = P + jQ = A e^{j\alpha} + B e^{j\beta} + c e^{j\gamma} \quad \text{----- (22)}$$

El comportamiento del generador síncrono, ya sea de ROTOR CILINDRICO o de POLOS SALIENTES. Se describe por diagramas circulares. Uno para la armadura y otro para el campo inductor.

La ecuación del campo inductor es (para POLOS SALIENTES):

$$\vec{S} = P + jQ = A e^{j\alpha} + B e^{j\beta} + c e^{j\gamma} \quad \text{----- (23)}$$

EL DIAGRAMA DE LA ARMADURA (para polos lisos y polos salientes) es el mostrado en el primer y cuarto cuadrante de la siguiente figura:

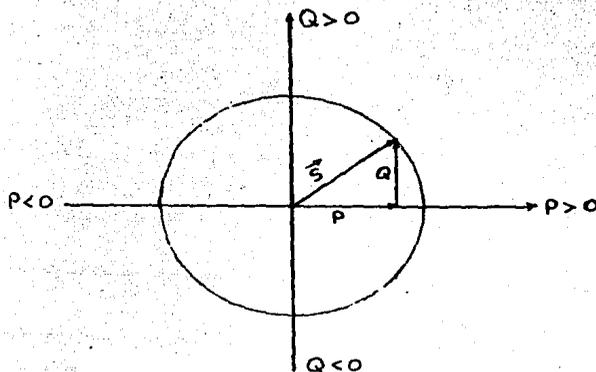


FIGURA 17.

La potencia aparente generada por la MAQUINA SINCRONA (ya sea polos lisos o polos salientes) es:

$$\vec{S} = \vec{V}_a \hat{I} = S e^{j\theta} = s (\cos \theta + j \operatorname{sen} \theta) \text{ ----- (24)}$$

$$\vec{S} = s (FP + jFR) = P + j \theta \text{ ----- (25)}$$

$\cos \theta = FP = \text{Factor de Potencia}$

$\operatorname{sen} \theta = FR = \text{Factor Reactivo.}$

El diagrama fasorial de tensiones y corrientes se transforma en otro diagrama también fasorial de potencias, activa y reactiva siendo este último lo que se llama DIAGRAMA CIRCULAR DE LA MAQUINA SINCRONA.

Se puede interpretar la potencia activa \vec{P} como un fasor especial de dos argumentos únicamente : 0 y π .

Si trabaja como generador, produce potencia activa y su argumento es igual a 0.

$$\vec{P} = P e^{j0} = P (\cos 0 + j \operatorname{sen} 0) = P (1 + j0) = P$$

Si trabaja como motor absorbe potencia activa y su argumento es igual a π .

$$\vec{P} = P e^{j\pi} = P (\cos \pi + j \operatorname{sen} \pi) = P (-1 + j0) = -P$$

La potencia reactiva \vec{Q} , por su parte, también se puede interpretar como un fasor especial de dos argumentos: $+\frac{\pi}{2}$ y $-\frac{\pi}{2}$

La máquina síncrona ya sea operando como generador o como motor puede generar o absorber potencia reactiva.

Cuando produce potencia reactiva su argumento es $+\frac{\pi}{2}$

$$\vec{Q} = Q e^{j\frac{\pi}{2}} = Q (\cos \frac{\pi}{2} + j \operatorname{sen} \frac{\pi}{2}) = Q (0 + j1) = +jQ$$

Cuando absorbe potencia reactiva su argumento es $-\frac{\pi}{2}$

$$\vec{Q} = Q e^{-j\frac{\pi}{2}} = Q (\cos \frac{\pi}{2} - j \operatorname{sen} \frac{\pi}{2}) = Q (0 - j1) = -jQ$$

Cuando la máquina síncrona no produce ni absorbe potencia activa (excepto aquélla muy pequeña, que necesita para mantenerse a la velocidad de sincronismo) y se usa únicamente para generar o absorber potencia reactiva es UN CONDENSADOR SINCRONO o REACTOR SINCRONO.

En la ecuación *16 el ángulo δ es el ángulo de potencia, es el ángulo que existe entre V_a (tensión terminal del generador) y E_a (tensión que induciría el campo de C.D. si no hubiese reacción de la armadura, ni saturación) o sea entre los dos campos magnéticos principales de la máquina síncrona. El del campo inductor de corriente directa y el resultante entre este campo y el de la reacción de armadura.

Este ángulo δ es representativo de la potencia activa que la máquina síncrona genera o absorbe. Si opera como generador síncrono ($\delta > 0$). En cambio si opera como motor síncrono, ($\delta < 0$) y si opera como condensador síncrono $\delta = 0$ (prácticamente).

El diagrama circular de la máquina síncrona se representa en dos ejes coordenados. El eje de las magnitudes reales es la potencia activa. Si ($P > 0$) se trata de un generador, si ($P < 0$) se trata de un motor.

El eje de las magnitudes imaginarias es la potencia reactiva. Si la máquina síncrona produce potencia reactiva ($Q > 0$). Si por el contrario la máquina absorbe potencia reactiva ($Q < 0$).

Ya se indicó que tanto un generador síncrono como un motor síncrono puede generar o absorber potencia reactiva y que cuando la máquina opera como CONDENSADOR SÍNCRONO, únicamente genera o absorbe potencia reactiva.

4.7.3 GENERADOR Y CONDENSADOR SINCRONO.

Cuando la máquina sincrónica (ya sea motor o generador) no produce ni absorbe potencia activa (excepto aquella muy pequeña, que necesita para mantenerse a la velocidad de sincronismo) y se usa únicamente para generar o absorber potencia reactiva es un condensador sincrónico o reactor sincrónico.

La operación de un alternador como condensador sincrónico, es una forma correcta de explotación, cuando en un sistema eléctrico recargado con reactivos inductivos se abate la tensión de operación y por lo tanto los alternadores, que deben localizarse cerca de los centros de carga, son puestos a generar carga reactiva (sobreexcitados) para compensar la caída de tensión del sistema, ayudando con ello a regular la tensión al valor establecido como aceptable $\pm 10\%$ del estandarizado para dicho sistema.

Con frecuencia ésta no es la situación en la que trabajan los generadores hidroeléctricos cuando funcionan como condensadores sincrónicos, ya que existen varias Centrales Hidroeléctricas que operan como condensadores sincrónicos en puntos muy alejados de los centros de carga teniendo como propósito ayudar a contrarrestar los efectos capacitivos de las grandes líneas de transmisión o bien, solo para levantar ligeramente la caída de tensión en las líneas cuando se aprecian fuertes caídas de tensión.

Esta forma de explotación no tiene mayores dificultades si se pone el suficiente cuidado en que el primo motor (turbina) gire libremente (sin agua).

Muy a menudo los niveles de los desfuegos están lo suficientemente altos, de manera que los álabes de las turbinas palean sobre ella desarrollando trabajos innecesarios que se consumen del sistema.

4.7.4 DIAGRAMA FASORIAL DEL GENERADOR DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA CARLOS RAMIREZ ULLOA "EL CARACOL"

De 208 MVA, 16 Kv, 3 fases, 0.95 F.P. (atrasado)

$R_a = 0.1034\Omega$, $X_d = 0.866\Omega$, $X_q = 0.57\Omega$.

Debemos construir el diagrama vectorial constituido por los siguientes elementos:

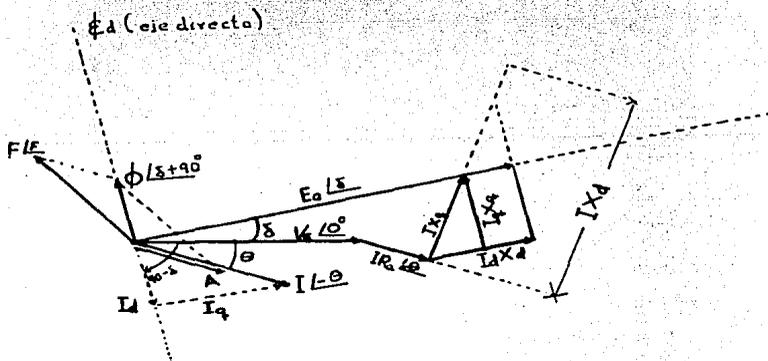


DIAGRAMA FASORIAL ILUSTRATIVO
FIGURA 18.

Necesitamos:

$$V_{LN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{16 \text{ Kv}}{\sqrt{3}} = 9.2376043 \angle 0^\circ \text{ Kv} \quad \begin{array}{l} \text{(el voltaje se to} \\ \text{ma como fasor de} \\ \text{referencia.} \end{array}$$

$$\theta = \text{ang } \cos \text{ F.P.} = \text{ang } \cos 0.95 = -18.19^\circ$$

$$\text{Pact/ef} = \text{F.P.} \times S = 0.95 \times 208\,000 \text{ KVA} = 1.976 \times 10^8 \text{ watts.}$$

De la fórmula:

$$\text{Pact/3f} = \sqrt{3} V_{LL} I \text{ F.P.}$$

Despejamos I:

$$I = \frac{\text{Pact/3f}}{\sqrt{3} 16 \text{ KV} \times 0.95} = \frac{1.976 \times 10^8}{\sqrt{3} 16 \text{KV} \times 0.95} = 7.5055535 \times 10^3 \angle -18.18^\circ \text{ amps.}$$

Para construir el diagrama fasorial (necesitamos el ángulo

. Para encontrar lo construimos de nuevo el diagrama anterior - con los detalles necesarios.

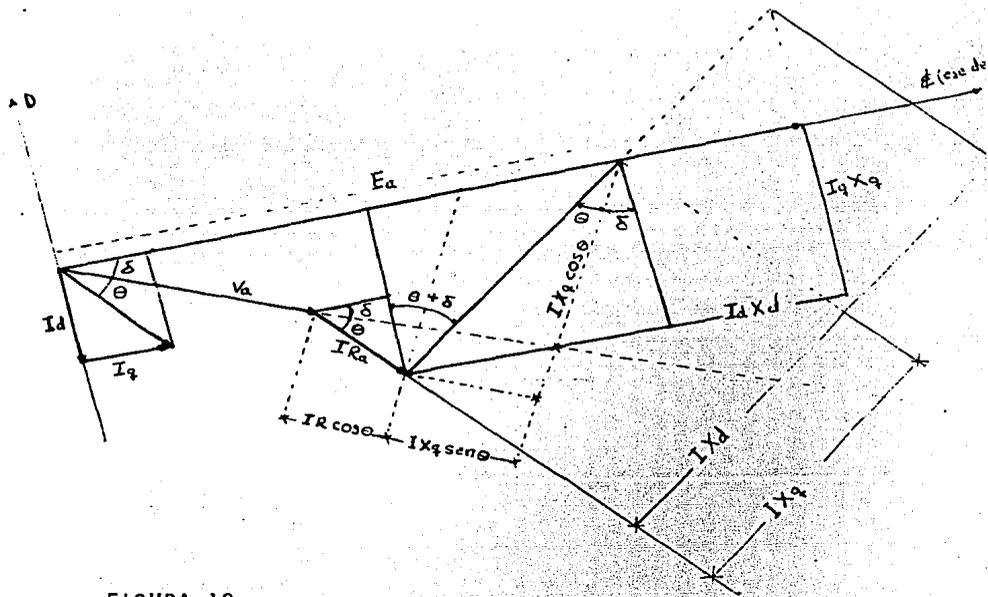


FIGURA 19

Observando el diagrama podemos ver que:

$$V_a \operatorname{sen} \delta = I_q X_q - I R \operatorname{sen} (\theta + \delta) = I X_q \cos (\theta + \delta) - I R \operatorname{sen} (\theta + \delta)$$

$$V_a \operatorname{sen} \delta = I_q X_q - I R (\operatorname{sen} \theta \cos \delta + \cos \theta \operatorname{sen} \delta) = I X_q (\cos \theta \cos \delta + \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \delta) - I R (\operatorname{sen} \theta \cos \delta + \cos \theta \operatorname{sen} \delta)$$

$$V_a = I X_q \left(\frac{\cos \theta}{\tan \delta} - \operatorname{sen} \theta \right) - I R \left(\frac{\operatorname{sen} \theta}{\tan \delta} + \cos \theta \right)$$

$$V_a = I X_q \frac{\cos \theta}{\tan \delta} - I X_q \operatorname{sen} \theta - \frac{I R \operatorname{sen} \theta}{\tan \delta} - I R \cos \theta$$

$$V_a + I X_q \operatorname{sen} \theta + I R \cos \theta = \frac{1}{\tan \delta} (I X_q \cos \theta - I R \operatorname{sen} \theta)$$

$$\tan \delta = \frac{I X_q \cos \theta - I R \operatorname{sen} \theta}{V_a + I X_q \operatorname{sen} \theta + I R \cos \theta}$$

$$IX_q \cos \theta - IR \sin \theta = 7.505535 \times 10^3 A (0.57) \cos (18.19^\circ) - 7.505535 \\ \times 10^3 A (0.1034 \Omega) \sin (18.19^\circ) = 4.0642572 \times 10^3 V \\ - 2.422664 \times 10^2 V = 3.8221044 \times 10^3 V$$

$$V_a + IX_q \sin \theta - IR \cos \theta = 9.237604 \times 10^3 V + 7.505535 \times 10^3 A (0.57 \Omega) \sin 18.19^\circ \\ + 7.505535 \times 10^3 A (0.1034 \Omega) \cos (18.19^\circ) \\ = 9.237604 \times 10^3 V + 7.3729112 \times 10^2 V + 1.3355111 \times 10^3 V = 1.1310407 \times 10^4 V$$

Entonces:

$$\delta = \text{ang tan } \frac{3.8221044 \times 10^3 V}{1.1310407 \times 10^4 V} = \text{ang tan } 0.337928 = 18.67^\circ$$

Para calcular E_a tenemos de analizar la figura que:

$$E_a = V \cos \delta + IR \cos (\theta + \delta) + I_d x_d$$

$$\text{donde: } I_d = 7.505535 \times 10^3 A \cos (90^\circ - 18.19^\circ - 18.67^\circ) = 4.5022948 \times 10^3 A$$

$$E_a = 9.2376043 \times 10^3 V \cos (18.67^\circ) + 7.505535 \times 10^3 A (0.1034 \Omega) \cos (18.19^\circ + 18.67^\circ) \\ + 4.5022948 \times 10^3 A (0.866 \Omega) \\ = 8.7507826 \times 10^3 V + 6.250580 \times 10^2 V + 3.8989873 \times 10^3 V \\ = 1.3274829 \times 10^4 V$$

Obtención de θ

$$\text{Necesitamos } E_{11} = \sqrt{3} E_a = \sqrt{3} \cdot 1.3274829 \times 10^4 = 2.29926 \times 10^4 V$$

Obtenemos para este voltaje de la curva de saturación.

$$I_{excit.} = 1254 \text{ amps. (aprox.)}$$

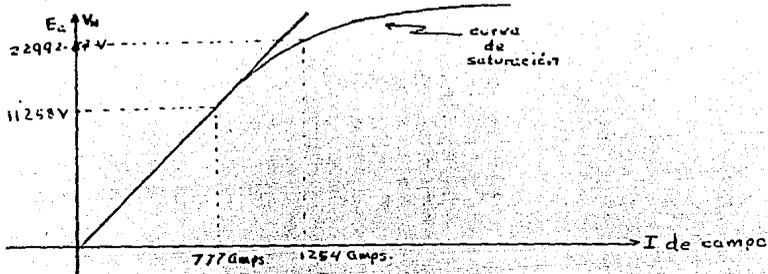


FIGURA 20

$$\theta = 1254 \frac{190^\circ + E_a}{1108.67^\circ} \text{ amps} = 1254 \frac{190^\circ + 18.67^\circ}{1108.67^\circ}$$

$$\theta = 1254 \frac{1108.67^\circ}{1108.67^\circ} \text{ amps. de excitación.}$$

OBTENCION DE LA REACCION DE ARMADURA (A)

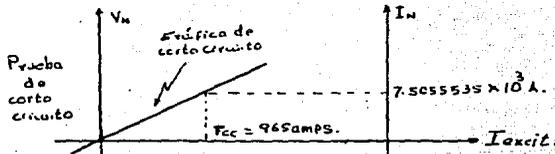


FIGURA 21

$$E_{acc} = I_n X_a = 7505.5535 \text{ amps.} \times 0.866 \Omega = 6499.8093 \text{ V} \quad | -18.1948^\circ$$

$$E_{lcc} = \sqrt{3} \times 6499.8093 \text{ V} = 11258 \text{ V} \quad | -18.1948^\circ$$

$\theta = 777$ amps. (de la gráfica de saturación) (amps. de campo - - equiv. al flujo)

$$A_{cc} = F_{cc} - \theta = 965 \text{ amps} - 777 \text{ amps} = 188 \text{ amps.}$$

$A_{cc} = 188$ amps. de excitación a 7505.5535 amps de línea

$$I = 7505.5535 \text{ amps.}$$

Tenemos también la siguiente proporción:

$$\frac{Acc}{A} \approx \frac{I_{nominal}}{I_{operación}}, \quad A = \frac{Acc \times I_{nominal}}{I_{operación}}$$

Pero para éste caso $I_{nominal} = I_{operación}$

$$A = \frac{188 \text{ amps} \times 7505.5535 \text{ amps.}}{7505.5535 \text{ amps.}} = 188 \text{ amps. de excitación.}$$

Se sabe también que:

$\vec{F} = \vec{\phi} - \vec{A}$ donde: ϕ = flujo Resultante del entrehierro

F = Flujo del Rotor

A = Reacción de armadura

$$\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y = \vec{\phi} - \vec{A} \quad \phi = 1254 \angle 108.67^\circ \text{ amps.}$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad A = 188 \angle -18.19^\circ \text{ amps.}$$

$$F_x = 1254 A \cos(108.67^\circ) - 188 A \cos(18.19^\circ) = 401.43A - 178.60A = -580.02A$$

$$F_y = 1254 A \sin(108.67^\circ) - 188 A \sin(-18.19^\circ) = 1188.012A + 58.867A = 1246.699A$$

$$\angle F = \text{Ang} \tan \frac{1246.699A}{-580.02A} = \text{Ang} \tan - 2.1494 = -65.05^\circ$$

$$\angle F = 180^\circ - 65.05^\circ = 114.949^\circ$$

* porque estamos en el 2do. cuadrante.

NOTA; Todos los vectores de flujos magnéticos se calcularon representandose por los amperes de corriente necesarios para producirlos.

4.7.5 DIAGRAMA FASORIAL DEL GENERADOR DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA
"CARLOS RAMIREZ ULLOA " EL CARACOL "

208 MVA, 16KV, 3 fases, 0.95 F.P. (adelantado)

$R_a = 0.1034\Omega$, $x_d = 0.866\Omega$, $x_q = 0.57\Omega$

Debemos construir un diagrama vectorial constituido por los siguientes elementos:

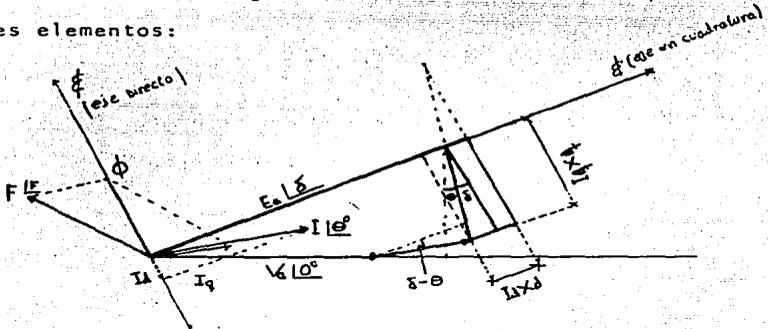


DIAGRAMA FASORIAL ILUSTRATIVO

FIGURA 23

Necesitamos:

$$V_{LN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{16KV}{\sqrt{3}} = 9.2376043 \angle 0^\circ \text{ KV (el voltaje se toma como fase de referencia.)}$$

$$\theta = \text{ang cos F.P.} = \text{ang cos } 0.95 = 18.19^\circ$$

$$P_{act/3f} = \text{F.P.} \times S = 0.95 \times 208 \text{ 000 KVA} = 1.976 \times 10^8 \text{ watts.}$$

De la formula:

$$P_{act/3f} = \sqrt{3} V_{LL} I \cdot \text{F.P.}$$

Despejamos I.

$$I = \frac{P_{act}/3f}{\sqrt{3}16KV \times 0.95} = \frac{1.976 \times 10^8}{\sqrt{3} \cdot 16KV \times 0.95} = 7.5055535 \times 10^3 \underline{18.19^\circ} \text{ amps.}$$

Del diagrama ilustrativo podemos ver que:

$$\tan \delta = \frac{IX_q \cos \theta + IR_{sen} \theta}{V_a + IR_{cos} \theta - IX_q \sen \theta}$$

$$IX_q \cos \theta + IR_{sen} \theta = 7.5055535 \times 10^3 A (0.57 \Omega) \cos (18.19^\circ) + 7.5055535 \times 10^3 A (0.1034 \Omega) \sen (18.19^\circ) = 4.3065236 \times 10^3 V$$

$$V_a + IR_{cos} \theta - IX_q \sen \theta = 9.2376043 \times 10^3 V + 7.5055535 \times 10^3 A (0.1034 \Omega) \cos (18.19^\circ) - 7.5055535 \times 10^3 A (0.57 \Omega) \sen (18.19^\circ) = 8.6393637 \times 10^3 V$$

$$\delta = \text{ang tan} \frac{4.3065236 \times 10^3 V}{8.6393637 \times 10^3 V} = \text{ang tan } 0.49847694 = 26.49^\circ$$

En el diagrama ilustrativo se puede ver que

$$E_a = V_a \cos \delta + IR_{cos} (\delta - \theta) + I_d X_d, \quad I_d = I \cos (90^\circ - (\delta - \theta))$$

$$I_d = I \cos (90^\circ - (\delta - \theta)) = 7.5055535 \times 10^3 A \cos (90^\circ - (26.49^\circ - 18.19^\circ))$$

$$I_d = 1083.473 \text{ amps.}$$

$$E_a = 9.2376043 \times 10^3 V \cos (26.49^\circ) + 7.5055535 \times 10^3 A (0.1034 \Omega) \cos (26.49^\circ - 18.19^\circ) + (1083.473 A) (0.866 \Omega)$$

$$E_a = 8.2677688 \times 10^3 V + 7.67945 \times 10^2 V + 938.287 V = 9974.00 V$$

OBTENCION DE \emptyset

$$\text{Necesitamos ELL} = \sqrt{3} E_a = \sqrt{3} 9974.00 V = 17275.475 V$$

Con este voltaje obtenemos de la curva de saturación l excitación

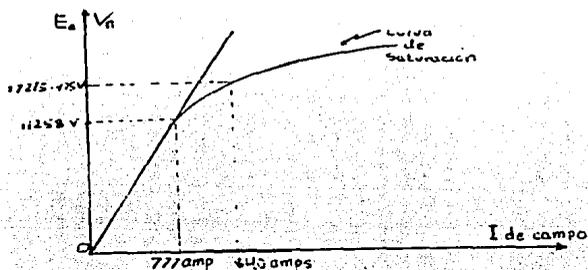


FIGURA 24

Entonces:

$$\theta = 840 \angle 90^\circ + \angle E_a = 840 \angle 90^\circ + 26.49^\circ \text{ A.}$$

$$\theta = 840 \angle 116.49^\circ \text{ A.}$$

OBTENCION DE LA REACCION DE ARMADURA

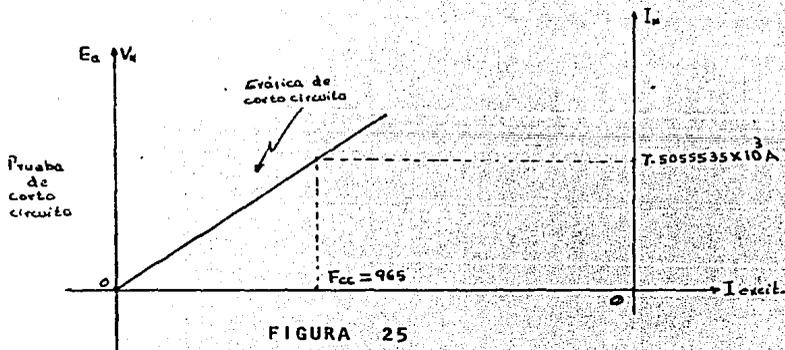


FIGURA 25

$$E_{acc} = I_n X_a$$

$$E_{acc} = 7.5055535 \times 10^3 \text{ amps} \times 0.866 = 6499.8093 \angle 18.1948^\circ \text{ V}$$

$$E_{LLcc} = \sqrt{3} \times 6499.8093 = 11258 \angle 18.1948^\circ \text{ V}$$

$$\theta = 777 \text{ amps (de la gráfica de saturación)}$$

(amperes de campo equivalente al flujo)

REACCION DE ARMADURA.

$$Acc = Fcc - \theta$$

$$Acc = 965 \text{ amps} - 777 \text{ amps} = 188 \text{ amps.}$$

$$Acc = 188 \text{ amps excitiva } 7505.5535 \text{ amps.}$$

$$I = 7505.5535 \text{ amps.}$$

Se tiene que:

$$\frac{Acc}{A} = \frac{7505.5535 \angle 90^\circ}{7505.5535 \angle 90^\circ}, \quad A = \frac{Acc \cdot 7505.5535 \angle 90^\circ}{7505.5535 \angle 90^\circ} = Acc$$

$$A = Acc = 188 \text{ amps de excit.}$$

Se tiene también que:

$$\vec{F} = \vec{\theta} - \vec{A} \quad \theta = 840 \angle 116.49^\circ$$

$$A = 188 \angle 18.1948^\circ$$

$$\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y = \vec{\theta} - \vec{A}$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$F_x = 840 \cos(116.49^\circ) - 188 \cos(18.19^\circ) = 374.67 - 178.60 \text{ A}$$

$$F_x = 553.2749 \text{ amps.}$$

$$F_y = 840 \sin(116.49^\circ) - 188 \sin(18.19^\circ) = 751.81 - 58.68 \text{ A}$$

$$F_y = 693.122 \text{ amps.}$$

$$F = \sqrt{(-553.2749)^2 + (693.122)^2} = \sqrt{786531.51 \text{ A}}$$

$$F = 886.866 \text{ amps.}$$

$$\angle F = \text{ang tan } \frac{F_y}{F_x} = \text{ang tan } \frac{693.122 \text{ A}}{-553.2749 \text{ A}} = \text{ang tan } -1.25276 = -51.40^\circ$$

$$\angle F = 180^\circ - 51.40^\circ = 128.59^\circ$$

* porque estamos en el 2° cuadrante.

4.7.6 DIAGRAMA FASORIAL DEL GENERADOR DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA

"ING. CARLOS RAMIREZ ULLOA " EL CARACOL"

De 208 MVA, 16 KV, 3 fases, 0.0 F.P. (atrasado)

$R_a = 0.1034\Omega$, $X_d = 0.866\Omega$, $X_q = 0.57\Omega$

Debemos construir un diagrama vectorial constituido por los siguientes elementos:

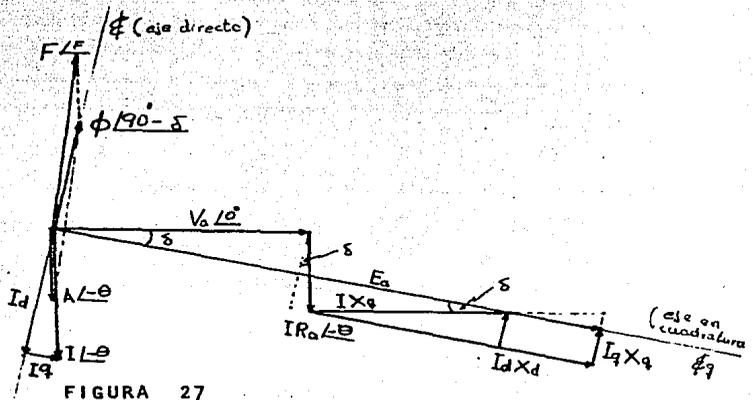


FIGURA 27

(DIAGRAMA FASORIAL ILUSTRATIVO)

Necesitamos:

$$V_{LN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{16KV}{\sqrt{3}} = 9.2376043 \angle 0^\circ \text{ KV (el voltaje se toma como) fador de referencia}$$

$$\theta = \text{ang cos F.P.} = \text{ang cos } 0 = 90^\circ \text{ (atrasado)}$$

$$P_{act}/3f = \text{F.P.} \times S = 0 \times 208000 \text{ KVA} = 0W$$

$$Q_{react}/3f = \text{sen}\theta \times S = \text{sen} -90^\circ \times 208000 \text{ KVA} = -208000 \text{ KVA}$$

De la fórmula:

$$Q_{react} = \sqrt{3} V_{LL} \text{sen}\theta = -208000 \text{ KVA}$$

Despejamos I.

$$I = \frac{-208000\text{KVA}}{\sqrt{3} \cdot 16\text{KV} \times \sin(90^\circ)} = \frac{-208000\text{KVA}}{3 \cdot 16\text{KV} \times (-1)} = 7505.5535 \angle -90^\circ \text{ amps.}$$

Del diagrama ilustrativo podemos ver que:

$$\tan \delta = \frac{-IR}{V+IX_q} = \frac{-7505.5535\text{A} (0.1034\Omega)}{9237.6043\text{V}+7505.5535\text{A} (0.57\Omega)} = \frac{776.0742\text{V}}{13515.77\text{V}}$$

$$\tan \delta = -0.05741$$

$$\delta = \text{ang tan } -0.05741 = -3.28^\circ$$

también de la figura vemos que:

$$E_a = V \cos \delta + IR \sin \delta + I_d x_d$$

$$I_d = I \cos \delta = 7505.5535 \text{A} \cos(3.28^\circ) = 7493.2583 \text{A}$$

$$E_a = 9237.6043 \text{V} \cos(3.28^\circ) + 7505.5535 \text{A} (0.1034\Omega) \sin(3.28^\circ) + 7493.2583 \text{A} (0.866\Omega)$$

$$E_a = 9222.4717 \text{V} + 44.40 \text{V} + 6489.1617 \text{V} = 15756.033 \text{V}$$

OBTENCIÓN DE θ

$$\text{NECESITAMOS ELL: } E_{LL} = \sqrt{3} E_a = \sqrt{3} \cdot 15756.033 \text{V} = 27290.25 \angle -3.28^\circ \text{ Volts.}$$

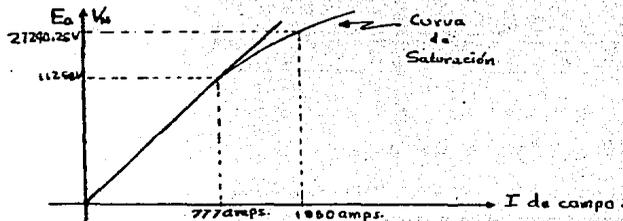


FIGURA 28

$$\theta = 1880 \frac{90^\circ - 328^\circ}{360^\circ} \text{ amps} = 1880 \frac{86.72^\circ}{360^\circ} \text{ amps.}$$

$$\theta = 1880 \frac{86.72^\circ}{360^\circ} \text{ amps. de campo}$$

OBTENCION DE LA REACCION DE ARMADURA

$$E_{acc} = I_n X_a$$

$$E_{acc} = 7505.5535 \frac{-90^\circ}{360^\circ} A \times 0.866 A = 6499.8093 \frac{-90^\circ}{360^\circ} V$$

$$E_{LLcc} = \sqrt{3} \times 6499.8093 V = 11258 \frac{-90^\circ}{360^\circ} V$$

$\theta = 777$ amps (de la gráfica de saturación) (amperes de campo equivalente al flujo)

$Acc = F_{cc} - \theta$, $F_{cc} = 965A$ de la gráfica de corto circuito para nominal.

$$Acc = 965A - 777A = 188 A$$

$Acc = 188$ excitación 7505-5535 amps de corriente nominal

$$\frac{Acc}{A} = \frac{7505.5535A}{7505.5535A}, A = \frac{Acc \times 7505.5535A}{7505.5535A} = Acc = 188 \text{ amps. de excit.}$$

Tenemos también que:

$$\vec{F} = \vec{\theta} - \vec{A} \quad \theta = 1880 \frac{86.72^\circ}{360^\circ} \text{ amps de campo.}$$

$$A = 188 \frac{-90^\circ}{360^\circ} \text{ amps. de excit.}$$

$$F_x = 1880 \cos 86.72^\circ - 188 \cos(-90^\circ) = 107.56 \text{ amps.}$$

$$F_y = 1880 \sin 86.72^\circ - 188 \sin(-90^\circ) = 2064.92 \text{ amps.}$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{107.5^2 + 2064.9^2} = \sqrt{4275368.3}$$

$$F = 2067.69 \text{ amps.}$$

$$\angle F = \text{ang tan } \frac{F_y}{F_x} = \text{ang tan } \frac{2064.92}{107.56} = \text{ang tan } 19.1978.$$

$$\angle F = 87.01^\circ$$

$$\vec{F} = 2067.69 \frac{87.01^\circ}{360^\circ} \text{ amps.}$$

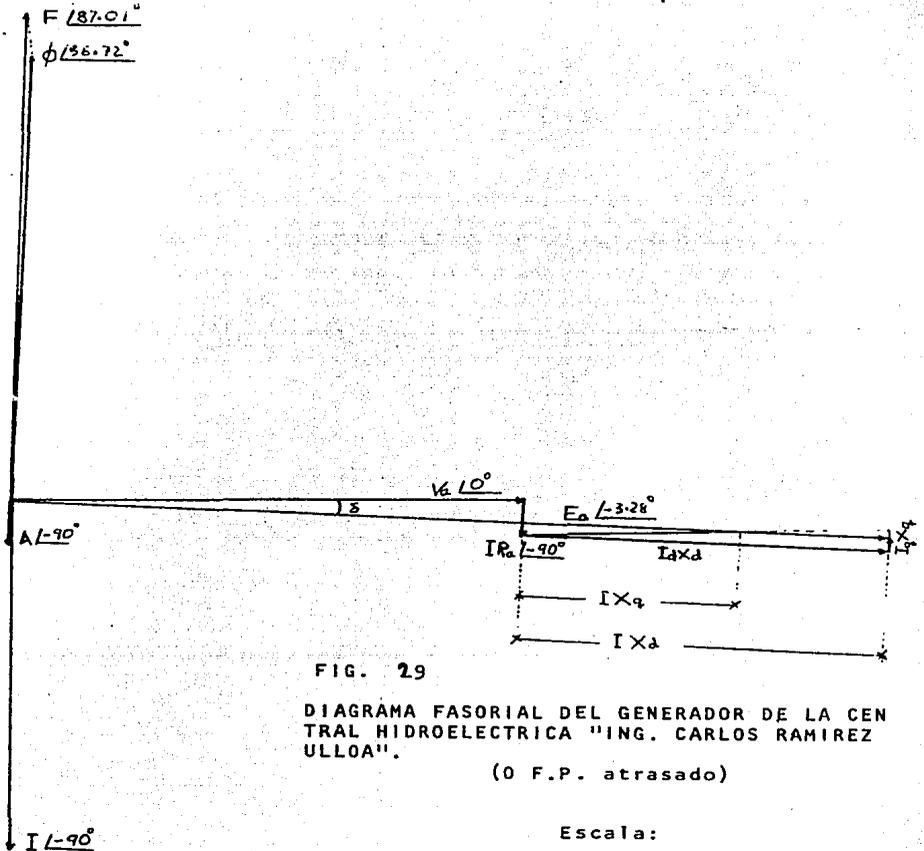


FIG. 29

DIAGRAMA FASORIAL DEL GENERADOR DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA "ING. CARLOS RAMIREZ ULLOA".

(0 F.P. atrasado)

Escala:
 Diagrama eléctrico
 1 cm = 1000V
 1 cm = 1000A
 Diagrama Magnético
 5 cm = 1000A

4.7.7 DIAGRAMA FASORIAL DEL GENERADOR DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA - -
 " ING. CARLOS RAMIREZ ULLOA " EL CARACOL "

De 208 MVA 16 Kv, 3 fases, 0.0 F.P. adelantado

$R_a = 0.1034\Omega$, $X_D = 0.866\Omega$, $X_q = 0.57\Omega$.

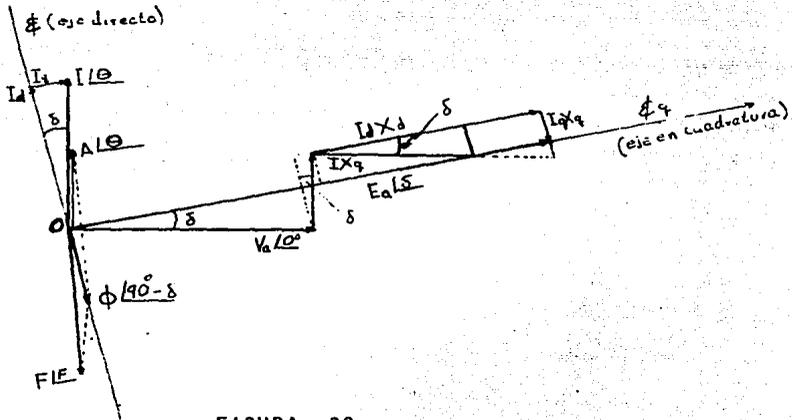


FIGURA 30

Necesitamos:

$$V_{LN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{16 \text{ KV}}{\sqrt{3}} = 9.2376043 \angle 0^\circ \text{ KV} \quad (\text{El voltaje se toma como, fasor de referencia})$$

$$\theta = \text{ang } \cos \text{ F.P.} = \text{ang } \cos 0 = 90^\circ \text{ (adelantado)}$$

$$\text{Pact}/3f = \text{F.P.} \times S = 0 \times 208 \text{ 000 KVA} = 0 \text{ watts.}$$

$$Q = \text{sen } 90^\circ \times 208 \text{ 000 KVA} = 208 \text{ 000 KVA}$$

DE LA FORMULA:

$$Q \text{ react}/3f = \sqrt{3} V_{LL} I \text{ sen } \theta = 208 \text{ 000 KVA}$$

Despejamos I.

$$I = \frac{Q \text{ react}/3f}{\sqrt{3} V_{LL} \text{ sen } \theta} = \frac{208 \text{ 000 KVA}}{\sqrt{3} 16 \text{ KV sen } 90^\circ} = 7505.5535 \text{ amps.}$$

$$I = 7505.5535 \angle 90^\circ \text{ A.}$$

Del diagrama fasorial ilustrativo, podemos ver que.

$$\tan \delta = \frac{IR}{V+IX_q} = \frac{7505.5535A (0.1034\Omega)}{9237.604V+7505.5535A(0.57\Omega)} = \frac{776.074V}{13515.77V}$$

$$\delta = \text{ang tan } \frac{776.074V}{13515.77V} = \text{ang tan } 0.05841 = 3.28^\circ$$

Cálculo de E_a .

$$E_a = V_a \cos \delta + IR \sin \delta + I_d x_d$$

$$I_d = I \cos \delta = 7505.5535A \cos 3.28^\circ = 7493.2583A$$

$$E_a = 9237.6043V \cos(3.28^\circ) + 7505.5535A(0.1034\Omega) \sin(3.28^\circ) + 7493.2583(0.866\Omega)$$

$$E_a = 9222.4717V + 44.4V + 6489.1617V = 15786.033V$$

OBTENCION DE θ

Necesitamos $E_{LL} = E_{LL} = \sqrt{3} E_a = \sqrt{3} 15756.033V = 27290.25 \angle -3.28^\circ$ volts.

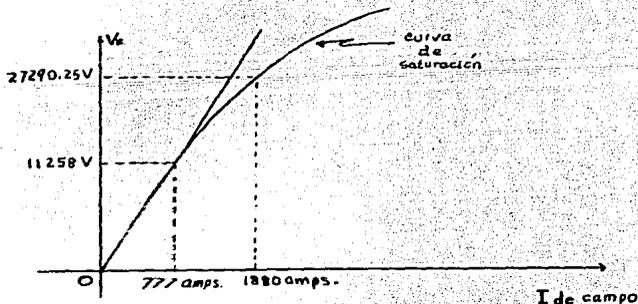


FIGURA 31

Entonces:

$$\theta = 1880 \angle -90^\circ + 3.28^\circ \text{ amps} = 1880 \angle -86.72^\circ \text{ amps.}$$

$$\theta = 1880 \angle -86.72^\circ \text{ amps. de campo.}$$

OBTENCION DE LA REACCION DE ARMADURA

$$E_{acc} = I_n X_a = 7505.5535 A \times 0.866 = 6499.8093 \angle +90^\circ$$

$$E_{LLcc} = \sqrt{3} \cdot 6499.8093 = 11258 \angle 90^\circ V$$

$\emptyset = 777$ amps. (de la gráfica de saturación)

(amperes de campo equivalente al flujo)

$Acc = F_{cc} - \emptyset$ $F_{cc} = 9650$ amps. (amps. de excitación para obtener la corriente nominal.
De la gráfica de corto circuito.

$$Acc = 965 \text{ amps} - 777 A = 188 \text{ amps.}$$

$Acc = 188$ amps de excitación a 7505.5535 amps.

Se sabe que:

$$\frac{Acc}{A} = \frac{7505.5535 A}{7505.5535 A} ; A = \frac{Acc \times 7505.5535 A}{7505.5535 A} = Acc = 188 \text{ amps. de excit.}$$

Tenemos también:

$$\vec{F} = \vec{\emptyset} - \vec{A} \quad \emptyset = 1880 \angle -86.72^\circ \text{ amps.}$$

$$A = 188 \angle 90^\circ \text{ amps.}$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$F_x = 1880 \cos(-86.72^\circ) - 188 \cos(90^\circ) = 107.56 \text{ amps.}$$

$$F_y = 1880 \sin(-86.72^\circ) - 188 \sin(+90^\circ) = 1876.92 - 188 = 2064.92 \text{ amps.}$$

$$F = \sqrt{107.56^2 + (-2064.92)^2} = \sqrt{4275463.8} = 2067.7195 \text{ amps.}$$

$$\angle F = \text{ang tan } \frac{-2064.92}{107.56} = \text{ang tan } -19.1978 = -87.01^\circ$$

$$\vec{F} = 2067.69 \angle -87.01^\circ \text{ amps.}$$

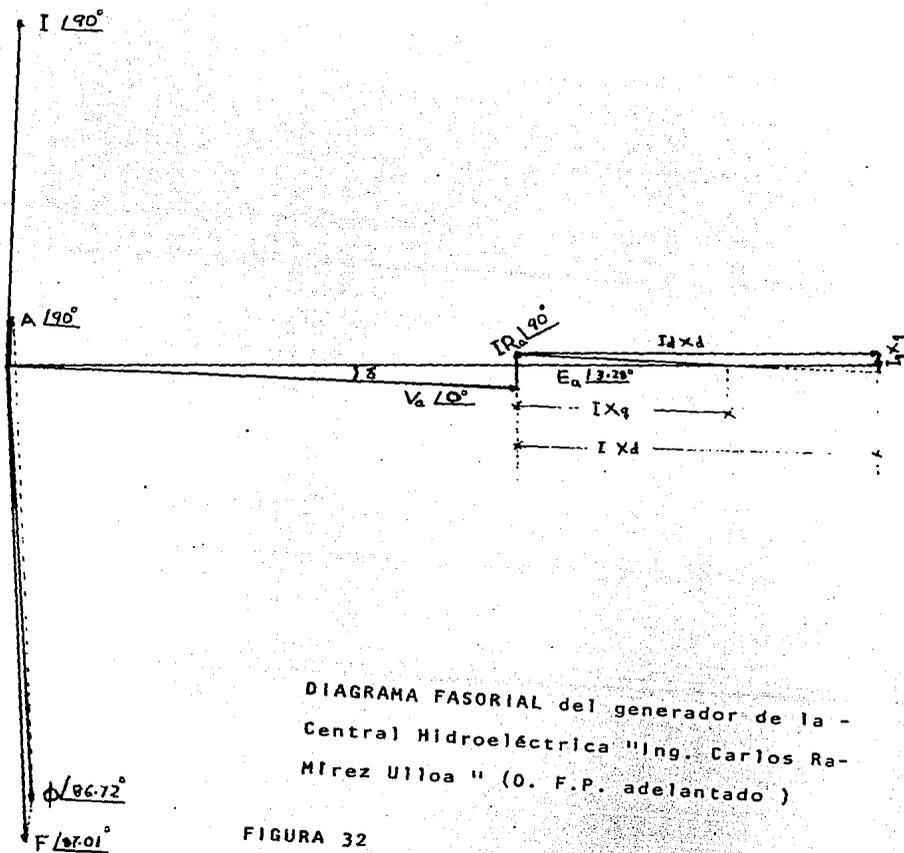


DIAGRAMA FASORIAL del generador de la -
 Central Hidroeléctrica "Ing. Carlos Ra-
 mirez Ulloa" (O. F.P. adelantado)

FIGURA 32

Escala:

Diagrama Eléctrico

1 cm = 1000V

1 cm = 1000A

Diagrama Magnético

5 cm = 1000A

4.7.8 EXCITACION NEGATIVA (Para un generador sincrónico de Polos Salientes)

La corriente directa (CD) que el excitador suministra al circuito inductor de la unidad durante su operación de estado permanente, establece determinada polaridad de excitación.

En esta condición, se interpretan como positivas, tanto la "Fuerza Magneto Motriz" (FMM) como la "Fuerza Electro Motriz" - (FEM) que induce.

Si la conexión anterior se invierte (previamente reduciendo la (CD) a cero, para después aumentarla), la polaridad del circuito de excitación se invierte, resultando negativas tanto la (FMM) como la (FEM). Se puede decir (aunque no con todo rigor) - que si la corriente de excitación (i) es positiva, también lo es la (FEM) o tensión inducida (E_a), así: $i > 0$ induce $\vec{E}_a = E_a e^{j0}$. Se mejantemente, si: $i < 0$ la tensión es $\vec{E}_a = E_a e^{-j}$. El fasor \vec{c} a su vez sufre modificaciones:

$i > 0$

$$\vec{c} = \frac{E_a e^{j0} V_a}{X_d} e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} = \frac{E_a V_a}{X_d} e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} \quad (26)$$

$$\vec{c} = c e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} = c e^{j\phi} \quad (27)$$

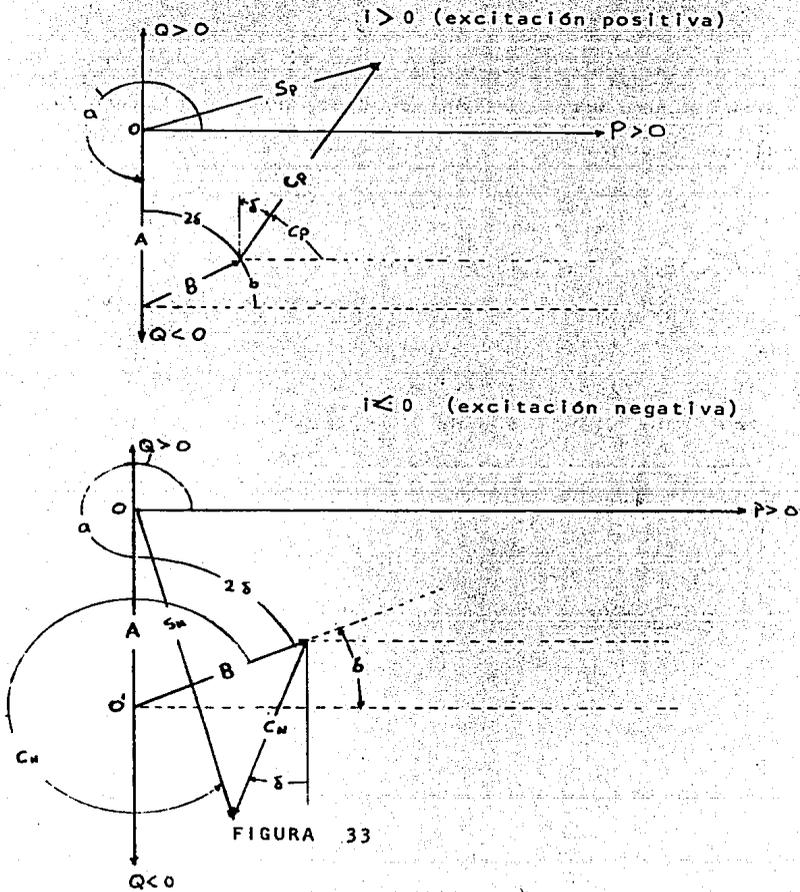
$i < 0$

$$\vec{c} = \frac{E_a e^{-j\pi} V_a}{X_d} e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} = \frac{E_a V_a}{X_d} e^{-j} e^{j(\frac{\pi}{2} + \delta)} \quad (28)$$

$$\vec{c} = c e^{-j} e^{j(\frac{\pi}{2} + \delta)} = c e^{-j} e^{j(\frac{3}{2}\pi - \delta)} \quad (29)$$

Lo anterior indica que el cambio que experimenta es en el -

argumento, o sea el ángulo (C_p). El módulo de \vec{C} no cambia con la polaridad de excitación. Obviamente del cambio del ángulo C_p resultan diferentes magnitudes de \vec{S} , \vec{P} y \vec{Q} que a continuación se presentan: (ver la figura 33)



$i > 0$ (ver la figura anterior No.33)

$$\vec{s} = A \vec{e}^a + B \vec{e}^b + c \vec{e}^{cP} = p + j Q \quad \text{-----} (23)$$

$$\vec{e}^a = e^{-j \frac{\pi}{2}} = \cos \frac{\pi}{2} - j \sin \frac{\pi}{2} = 0 - j \cdot 1 \quad \text{NOTA: } e^{-j \frac{\pi}{2}} = e^{j \frac{3}{2} \pi}$$

$$\vec{e}^b = e^{j(\frac{\pi}{2} - 2\delta)} = \cos(\frac{\pi}{2} - 2\delta) + j \sin(\frac{\pi}{2} - 2\delta) = \sin 2\delta + j \cos 2\delta$$

$$\vec{e}^{cN} = e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} = \cos(\frac{\pi}{2} - \delta) + j \sin(\frac{\pi}{2} - \delta) = \sin \delta + j \cos \delta$$

entonces:

$$P = B \sin 2\delta + c \sin \delta \quad \text{-----} (30)$$

$$Q = -A + B \cos 2\delta + c \cos \delta \quad \text{-----} (31)$$

$i < 0$ (excitación negativa) (ver la figura 33)

$$\vec{s} = A \vec{e}^a + B \vec{e}^b + c \vec{e}^{cN} = P + j Q, \quad cN = \frac{3}{2} - \delta$$

$$\vec{e}^a = 0 - j \cdot 1$$

$$\vec{e}^b = \sin \delta + j \cos 2\delta$$

$$\vec{e}^{cN} = e^{j(\frac{3}{2}\pi - \delta)} = \cos(\frac{3}{2}\pi - \delta) + j \sin(\frac{3}{2}\pi - \delta) = -\sin \delta - j \cos \delta$$

entonces:

$$P = B \sin 2\delta - c \sin \delta \quad \text{-----} (32)$$

$$Q = -A + B \cos 2\delta - c \cos \delta \quad \text{-----} (33)$$

Como puede verse los fasores \vec{A} y \vec{B} (sus modulos A y B), - así como sus argumentos (a, b) no se afectan por el cambio de polaridad de la corriente de excitación (i) puesto que son independientes de (\vec{E}^a)

4.7.9 VALORES MÁXIMOS DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA

Las potencias activas y reactivas que estas unidades (POLOS SALIENTES) pueden generar, son las partes reales e imaginarias - del fasor de potencia aparente: $\text{Re}\{\bar{S}\}$, y $\text{Im}\{\bar{S}\}$ respectivamente.

POTENCIA ACTIVA

La potencia activa será máxima a determinado δ_m .

Tenemos que:

$$P = \text{Re}(\bar{S}) = A \cos\left(\frac{3}{2}\pi\right) + B \cos\left(\frac{\pi}{2} - 2\delta\right) + c \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)$$

$$P = A(0) + B \sin 2\delta + c \sin \delta = B \sin 2\delta + c \sin \delta \text{ ----- (30)}$$

Para obtener el ángulo m al cuál ocurre la POTENCIA ACTIVA MAXIMA (P_m) derivamos a (P) con respecto a (δ) e igualamos a cero:

$$\frac{dP}{d\delta} = 2B \cos 2\delta + c \cos \delta \text{ ----- (34)}$$

$$\text{Pero } \cos 2\delta = 2 \cos^2 \delta - 1$$

$$\frac{dP}{d\delta} = 2B(2 \cos^2 \delta - 1) + c \cos \delta \text{ ----- (35)}$$

haciendo operaciones e igualando a cero:

$$4B \cos^2 \delta + c \cos \delta - 2B = 0$$

cuya solución es:

$$\cos \delta = -\frac{c}{8B} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{8B}\right)^2 + \frac{1}{2}} \text{ ----- (36)}$$

En el segundo término, el radical es mayor que el primero, por lo que se toma su signo positivo como única solución para la condición planteada, en la que existe un sólo valor máximo de potencia P_m . Por lo tanto, $(\cos \delta)$ resulta positivo y menor que -- uno.

Consecuentemente, su ángulo que corresponde a (P_m) es :

$$\delta_m = \cos^{-1} \left[-\frac{c}{8B} + \sqrt{\left(\frac{c}{8B}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] \text{ ----- (37)}$$

o sea que:

$$m < \frac{\pi}{2}$$

LA POTENCIA ACTIVA MAXIMA que la máquina desarrolla es:

$$P_m = B \sin 2 \delta_m + c \sin \delta_m \text{ ----- (38)}$$

Como puede verse el ángulo δ_m es diferente para cada valor de c y siempre menor que $(\frac{\pi}{2})$. Además, como ya se ha indicado, el ángulo depende de la polaridad de la excitación.

POTENCIA REACTIVA

La potencia reactiva para la máquina de polos salientes es:

$$Q = \text{Im}(\mathcal{Z}) = A \sin \frac{3}{2} \pi + B \sin \left(\frac{\pi}{2} - 2\delta \right) + C \sin \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) \dots (39)$$

$$\text{Pero: } \sin \left(\frac{\pi}{2} - 2\delta \right) = \cos 2\delta$$

Entonces:

$$Q = A (-1) + B \cos 2\delta + c \cos \delta$$

$$Q = -A + B \cos 2\delta + c \cos \delta \text{ -----(31)}$$

Existen dos VALORES MAXIMOS DE POTENCIA REACTIVA en estado estable para el Generador Sincrono de Polos Salientes, uno es positivo y el otro es negativo. El primero se presenta para EXCITACION POSITIVA y el segundo para EXCITACION NEGATIVA.

Excitación Positiva.

El valor máximo positivo de potencia reactiva (Q_m) se da cuando la potencia real es cero ($P=0$) y esto último sucede cuando $\delta = 0$.

Entonces:

$$\text{Si } Q = Q_m(>0), P = 0 \text{ y } \delta = 0$$

Por lo tanto:

$$Q = -A + B \cos 2\delta + c \cos \delta \text{ -----(31)}$$

Resulta:

$$Q_m(>0) = -A + B \cos 0 + c \cos 0$$

$$Q_m(>0) = -A + B + c \text{ -----(40)}$$

Excitación Negativa:

El valor máximo negativo de potencia reactiva ($Q_m < 0$) se da

cuando la potencia real es cero ($P=0$) y ésto último sucede cuando $\xi = 0$.

Entonces:

$$\text{Si } Q = Q_m (< 0), P = 0 \text{ y } \xi = 0$$

Por lo tanto:

$$Q = -A + B \cos 2\xi - c \cos \xi \text{ ----- (33)}$$

Resulta:

$$Q_m (< 0) = -A + B \cos 0 - c \cos 0$$

$$Q_m (< 0) = -A + B - c \text{ ----- (41)}$$

Después se verá que $c = 2B$. Entonces:

$$Q_m (<) = -A + B - 2B = -A - B \text{ ----- (42)}$$

4.7.10 CURVA DE CAPABILIDAD

La CURVA DE CAPABILIDAD que más adelante se construirá, discrepa de las que presentan los fabricantes debido a las simplificaciones que se han hecho:

- 1.- Para expresar la caída interna se usan la reactancia --sincrona en eje directo (x_d) y la reactancia de eje en cuadratura.
- 2.- La resistencia y la capacitancia en parte se ignoran.

Estas últimas, no obstante que tienen la indicación de que son calculadas, sirven de guía para la operación de las máquinas que ellos suministran. Las curvas que aquí se trazan, son únicamente ilustrativas y explican conceptualmente su operación.

Las curvas que presentan los fabricantes europeos, incluyen en el cuarto cuadrante en la parte que corresponde a ($Q < 0$), un margen de operación, cuyo objetivo se explica a continuación:

Durante los períodos de carga reducidos en el sistema, frecuentemente se presenta la necesidad de operar las unidades generadoras a excitación reducida. Esto es, absorbiendo potencia --reactiva que líneas de transmisión y especialmente cables subterráneos producen y que no pueden utilizar, precisamente por --operar descargados.

En estas condiciones existe el peligro de que la unidad opere muy cerca de su límite de estabilidad de estado permanente. Con cualquier oscilación este límite se puede alcanzar, incapacitando a la unidad y provocando un disturbio en el sistema, que pueden, en ocasiones, ser de graves consecuencias.

Para evitar esta contingencia, se reducen las potencias máximas, activa y reactiva negativa, que la unidad deba generar -- cuando opere en esa región de subexcitación. En consecuencia se traza la curva que se conoce como el "LÍMITE PRACTICO DE ESTABILIDAD PERMANENTE", para diferenciar lo del "LÍMITE TEORICO".

La diferencia entre estas dos curvas se conoce como el margen de operación mencionado.

El procedimiento para concluir "EL LÍMITE PRACTICO DE ESTABILIDAD PERMANENTE ES EL SIGUIENTE":

con centro en el punto O' se trazan circunferencias de excitación constante de diferente radio (C) en el punto donde estas circunferencias corten al eje de referencia (E_r) se traza un segmento de magnitud del margen escogido (5 a 10% de la potencia activa nominal (P_n), en el extremo de ese segmento se levanta una vertical que corta al círculo de excitación correspondiente el punto donde se cortan forma parte de la curva límite práctico de estabilidad permanente. Repitiendo lo anterior para varios valores de C se encuentran otros tantos puntos que determinan la curva. (ver la figura 35).

En la CURVA DE CAPABILIDAD de la unidad de polos salientes para cada valor de excitación corresponde un ángulo de potencia máximo, que además de establecer la potencia activa máxima, la potencia reactiva negativa que la unidad produce.

Para dibujar e interpretar correctamente el diagrama circular del comportamiento de la unidad de polos salientes y consecuentemente su curva de capacidad, en lo que sigue se cambiará un poco la notación que hasta ahora se ha usado.

Se usarán dos índices, uno superior y otro inferior. Los valores de potencia máxima se expresan poniendo una (m) como índice superior (P^m). Los índices inferiores (n, K, P, O, N y PO) corresponden a los valores característicos de las corrientes de excitación.

Por ejemplo, (δ_n^m) es el ángulo (δ) que corresponde a la potencia máxima cuando los parámetros usados son los nominales -- (A_n , B_n y C_n).

Los fasores no son igualmente afectados por la magnitud, ni polaridad de la excitación, como se puede observar en las ecuaciones empleadas.

El primero, (A) es totalmente independiente de la corriente de excitación (i), y en todas las condiciones es ($A_n e^{j\alpha_n}$). En cambio el fasor (c) no es independiente de la excitación, magni-

tud y polaridad, por ejemplo, para la corriente (i_p), su expresión es: ($\vec{C}_p = C_p \vec{i}^{\delta_p^m}$), finalmente, el fasor (\vec{B}) su módulo es también en todos los casos (B_n), pero su ángulo varía con la corriente, que para el valor dado arriba, es b_p^m .

Existen cinco valores característicos que es necesario describir:

$$I) \quad i > 0 ; i = i_n ; c = c_n = \frac{E_{an} V_{an}}{X_d} ; \delta = \delta_n^m$$

$$P_n^m = B_n \sin 2 \delta_n^m + C_n \sin \delta_n^m \quad \text{-----} (43)$$

$$\delta_n^m = \cos^{-1} \left[-\frac{C_n}{B_n} + \sqrt{\left(\frac{C_n}{B_n}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] \quad \text{-----} (44)$$

$$Q_n^m = -A_n + B_n \cos 2 \delta_n^m + C_n \cos \delta_n^m$$

$$II) \quad i > 0 ; i = i_p < i_n ; c = c_p = \frac{E_{fp} V_{an}}{X_d} ; \delta = \delta_p^m$$

$$P_p^m = B_n \sin 2 \delta_p^m + C_p \sin \delta_p^m \quad \text{-----} (45)$$

$$\delta_p^m = \cos^{-1} \left[-\frac{C_p}{B_n} + \sqrt{\left(\frac{C_p}{B_n}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] \quad \text{-----} (46)$$

$$Q_p^m = -A_n + B_n \cos 2 \delta_p^m + C_p \cos \delta_p^m \quad \text{-----} (47)$$

$$III) \quad i = 0 ; c = 0 ; \delta = \delta_0^m$$

$$P_0^m = B_n \sin 2 \delta_0^m + 0 \quad \text{-----} (48)$$

$$\delta_0^m = \cos^{-1} \left[\sqrt{\frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.7071 = \frac{\pi}{4} \quad (\text{rd}) \quad \text{-----} (49)$$

$$P_o^m = Bn \operatorname{sen} \frac{\widetilde{I}}{2} = Bn \quad \text{----- (50)}$$

$$Q_o^m = -An + Bn \cos \frac{\widetilde{I}}{2} + 0 = -An$$

$$Q_o^m = -An \quad \text{----- (51)}$$

IV) $I = 0$; $I = I_n$; $c = C_N = \frac{Ean \operatorname{van}}{XD}$.. $\delta = \delta_n^m$

$$P_n^m = Bn \operatorname{sen} 2 \delta_n^m - C_N \operatorname{sen} \delta_n^m \quad \text{----- (52)}$$

$$\delta_n^m = \cos^{-1} \left[+ \frac{C_N}{8Bn} + \sqrt{\left(\frac{C_N}{8Bn}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] \quad \text{----- (53)}$$

$$Q_n^m = -An + Bn \cos 2 \delta_n^m - C_N \cos \delta_n^m \quad \text{----- (54)}$$

V) $I < 0$; $I = i_{p0}$; o sea cuando ($p = 0$)

$$c = C_{p0} ; \delta = \delta_{p0}^m = 0$$

$$P_{p0}^m = Bn \operatorname{sen} 2 \delta_{p0}^m - C_{p0} \operatorname{sen} \delta_{p0}^m = 0 \quad \text{----- (55)}$$

$$P_{p0}^m = 2 Bn \operatorname{sen} \delta_{p0}^m \cos \delta_{p0}^m - C_{p0} \operatorname{sen} \delta_{p0}^m = 0 \quad \text{----- (56)}$$

Ejecutando operaciones resulta:

$$C_{p0} = 2 Bn \cos \delta_{p0}^m \quad \text{----- (57)}$$

y como, $\delta = \delta_{p0} = \delta_{p0}^m = 0$ (porque $p = 0$ queda:

$$C_{p0} = 2 Bn \quad \text{----- (58)}$$

entonces:

$$\delta_{po}^m = \cos^{-1} \left[+ \frac{C_{po}}{8Bn} + \sqrt{\left(\frac{C_{po}}{8Bn}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] \text{-----} (59)$$

sustituyendo $C_{po} = 2 Bn$ y ejecutando operaciones:

$$\delta_{po}^m = \cos^{-1} \left[\frac{1}{4} + \sqrt{\left(\frac{1}{4}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 1 = 0$$

$$Q_{po}^m = -An + Bn \cos 2 \delta_{po}^m - C_{po} \cos \delta_{po}^m \text{-----} (60)$$

$$Q_{po}^m = -An + Bn - 2 Bn \text{-----} (61)$$

$$Q_{po}^m = -An - Bn \text{-----} (62)$$

CONSTRUCCION DE LA CURVA DE CAPABILIDAD DE EL GENERADOR DE LA --
CENTRAL HIDROELECTRICA "ING. CARLOS RAMIREZ ULLOA".

Capacidad Nominal $S_n = 208\ 000\ \text{KVA}$

Tensión Terminal Nominal $E_n = 16000\ \text{V}$.

Factor de potencia F.P. = $\cos\theta_n = 0.95$

Reactancia de eje directo $X_d = 0.866\ \Omega$

Reactancia en cuadratura $X_q = 0.57\ \Omega$

$$\theta_n = 18.19^\circ$$

$$\delta_n = \angle E_a$$

Necesitamos los parametros para formar el diagrama de capabili--
dad:

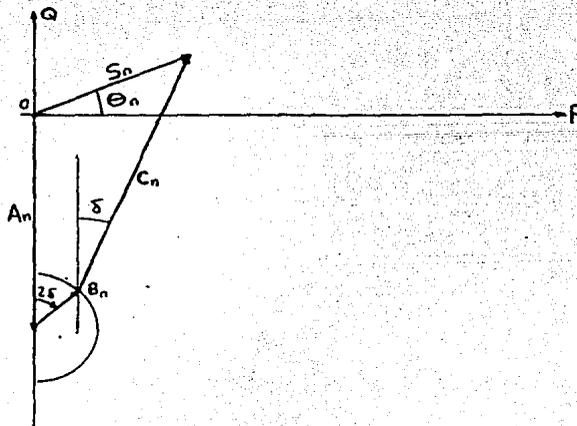


FIGURA 34

En forma general tenemos que:

$$S = P + j Q$$

$$S = Ane^{ja} + Be^{jb} + ce^{jc}$$

$$S = \frac{1}{2} V_a^2 \sum_{\pi} (X_d, X_q) e^{-j\frac{\pi}{2}} + \frac{1}{2} V_a^2 \frac{\Delta}{\pi} (X_d, X_q) e^{j(\frac{\pi}{2} - 2\delta)} + \frac{V_a E_a}{X_d} e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)}$$

$E_n = V_a$

Cálculo de A_n y su ángulo a_n

$$\vec{A}_n = \frac{1}{2} V_a^2 \sum_{\pi} (x_d, K_q) e^{-j\frac{\pi}{2}} = A_n e^{ja_n}$$

$$\text{Pero } \sum_{\pi} (X_d, X_q) = \frac{x_d + x_q}{x_d X_q}$$

$$A_n = \frac{1}{2} V_a^2 \left(\frac{x_d + x_q}{x_d x_q} \right) = \frac{1}{2} (9.2376049 \text{ Kv})^2 \left(\frac{0.866\Omega - 0.57\Omega}{0.866\Omega \times 0.57\Omega} \right)$$

$$A_n = 1.2412245 \times 10^8 \frac{\text{V}^2}{\Omega} = 1.2412245 \times 10^8 \text{ VA}$$

$$\angle a_n = -\frac{\pi}{2} \text{ (rad)} = -90^\circ$$

Cálculo de B_n y su ángulo b_n

$$\vec{B}_n = \frac{1}{2} V_a^2 \frac{\Delta}{\pi} (x_d, x_q) e^{j(\frac{\pi}{2} - 2\delta)} = B_n e^{jb_n}$$

$$\text{Pero: } \frac{\Delta}{\pi} (x_d, x_q) = \frac{x_d - x_q}{x_d X_q}$$

$$B_n = \frac{1}{2} V_a^2 \frac{\Delta}{\pi} (x_d, x_q) = \frac{1}{2} (9.2376043 \text{ Kv})^2 \left(\frac{0.866\Omega - 0.57\Omega}{0.866\Omega \times 0.57\Omega} \right)$$

$$B_n = 2.5585133 \times 10^7 \text{ VA}$$

$$\angle B_n = \left(\frac{\pi}{2} - 2\delta \right) = (90^\circ - 2(18.67^\circ)) = 52.66^\circ$$

$$\angle B_n = 52.66^\circ$$

Cálculo de C_n y su ángulo α_n

$$\bar{C}_n = \frac{\bar{V}_a \bar{E}_a}{X_d} = c_e i_c = \frac{V_a E_a}{X_d} e^{j \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right)}$$

$$C_n = \frac{V_a E_a}{X_d} = \frac{9.2376043 \text{ Kv} \times 1.3274829 \times 10^4 \text{ V}}{0.866 \Omega} = 1.4160233 \times 10^8 \text{ VA}$$

$$C_n = 1.4160233 \times 10^8 \text{ VA}$$

$$\alpha_n = \frac{\pi}{2} - \delta = 90^\circ - 18.67^\circ = 71.33^\circ$$

CALCULOS PARA TRAZAR LA CURVA " LIMITE TERMICO DEL CAMPO "

$$(i > 0, i = i_n, \delta = \delta_n^m)$$

Para encontrar S_n^m (La recta que representa S_n^m va de 0 al punto n^m)

$$S_n^m = A_n e^{j \frac{\pi}{2}} + B_n e^{j \left(\frac{\pi}{2} - \delta_n^m \right)} + C_n e^{j \left(\frac{\pi}{2} - \delta_n^m \right)}$$

Primero calculamos δ_n^m con la fórmula:

$$\delta_n^m = \cos^{-1} \left[- \frac{C_n}{8B_n} + \sqrt{\left(\frac{C_n}{8B_n} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right]$$

$$\delta_n^m = \cos^{-1} \left[- \frac{1.4160233 \times 10^8 \text{ V}}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{1.4160233 \times 10^8}{8(2.5585133 \times 10^7)} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right]$$

$$\delta_n^m = \cos^{-1} 0.2974 = 72.69^\circ$$

δ_n^m = ángulo δ máximo para la corriente nominal

i = corriente de excitación.

Punto de la curva donde $\delta = 0$ y $P = 0$

Desde el punto $P0^0$ del círculo de reluctancia, se coloca -- verticalmente ($\delta=0^\circ$) la magnitud C_n y encontramos el punto $P0^0$. La distancia del centro del círculo de reluctancia (0) al punto $P0^0$ es Q_n^m .

$$\text{Para } \delta = 0, Q = Q_n^m = -A_n + B_n + C_n$$

Hasta aquí se han hallado dos puntos de la curva de capacidad, los faltantes puntos intermedios se encuentran como sigue:

Tomando como origen el punto $P0^N$ y a partir del círculo de reluctancia, se trazan rectas que forman con el eje de las coordenadas, otros ángulos comprendidos entre $\delta=0^\circ$ y $\delta=72.69^\circ$ siendo estas rectas de magnitud C_n y sus extremos producen la curva deseada.

Los puntos de esta curva tienen por ecuación:

$$S_k = A_n e^{-j\frac{\pi}{2}} + B_n e^{j\left(\frac{\pi}{2} - 2\delta_k\right)} + C_n e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \delta_k\right)}$$

Cálculo del "LÍMITE TEÓRICO DEL CAMPO"

La curva de Capacidad de la unidad de polos salientes no termina en el punto n^m .

Ya se sabe que para la unidad de polos salientes para cada-

valor de i (corriente de excitación) se tiene un valor del ángulo δ y el vector \vec{C} en este caso para i_p tenemos un valor de C_p y δ_p^m .

Para dibujar esta parte de la curva ($i_p < i_n > 0$) se determinan algunos valores de C_p y δ_p^m . Un punto cualquiera de ellos -- tiene por ecuación: .

$$S_p^m = A n e^{-j \frac{\pi}{2}} + B n e^{j (\frac{5}{2} \pi - 2 \delta_p^m)} + C_p e^{j (\frac{\pi}{2} - \delta_p^m)}$$

$$C_p = \frac{E_{ap} E_{an}}{X_d}$$

$$\delta_p^m = \cos^{-1} \left[-\frac{C_p}{8 B n} + \sqrt{\left(\frac{C_p}{8 B n}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right]$$

Nota: se pone $\frac{5}{2} \pi$ en lugar de $\frac{\pi}{2}$ para que $\frac{\pi}{2} - 2$ no resulte negativo cuando $2\delta > \frac{\pi}{2}$.

Damos a i_p valores menores que la corriente nominal de excitación (i_n) pero sin que sean menores que cero y con estos valores nos referimos al diagrama de la curva de saturación, en vacío.

Tenemos que : $i_n = 1254$ amps. (excitación)

Entonces:

i_p excit (A)	V_{aLL} (V)	$V_{aLn} = \frac{V_{aLL}}{\sqrt{3}}$ (V)	I_{np} (A)
1200	15600	9000	6980
1000	13840	7990	6000
800	11200	6466	5250
600	8640	4988	3760
400	5760	3325	3000
200	2880	1662	1500
100	1600	923	750
50	400	230	370
0	0	0	0

Ya vimos que:

$$E_a = V_a \cos \delta + I_p R \cos(\theta + \delta) + I_p X_d \sin(\theta + \delta)$$

Entonces:

Para $i_{excit} = 1200A$; $V_{Ln} = 9000V$, $I_{np} = 6980 A$

$$E_a = 9000V \cos(18.67^\circ) + 6980A(0.1034\Omega) \cos(18.19^\circ + 18.67^\circ) \\ + 6980A(0.866\Omega) \sin(18.19^\circ + 18.67^\circ)$$

$$E_a = 8516.40V + 577.46V + 3625.97V = 12729.83 V$$

Para $i_{excit} = 1000A$, $V_{Ln} = 7990V$, $I_{np} = 6000 A$

$$E_a = 7990V \cos(18.67^\circ) + 6000A(0.1034\Omega) \cos(18.19^\circ + 18.67^\circ) \\ + 6000A(0.866\Omega) \sin(18.19^\circ + 18.67^\circ)$$

$$E_a = 7569.5V + 496.38V + 3116.88V = 11182.81V$$

$$\text{Para } i_{\text{excit}} = 800; V_{Ln} = 6466V, I_{np} = 5250A$$

$$E_a = 6466V \cos(18.67^\circ) + 5250A(0.1034\Omega) \cos(18.19^\circ + 18.67^\circ) \\ + 5250A(0.866\Omega) \sin(18.19^\circ + 18.67^\circ)$$

$$E_a = 6125.7V + 434.33V + 2727.26 = 9287.3016V$$

$$\text{Para } i_{\text{excit}} = 600A; V_{Ln} = 4988V, I_{np} = 3760A$$

$$E_a = 4988V \cos(18.67^\circ) + 3760A(0.1034\Omega) \cos(18.19^\circ + 18.67^\circ) \\ + 3760A(0.866\Omega) \sin(18.19^\circ + 18.67^\circ)$$

$$E_a = 4725.52V + 311.06V + 1953.24V = 6989.82V$$

$$\text{Para } i_{\text{excit}} = 400A; V_{Ln} = 3325V, I_{np} = 3000A$$

$$E_a = 3325V \cos(18.67^\circ) + 3000A(0.1034\Omega) \cos(18.19^\circ + 18.67^\circ) \\ + 3000A(0.866\Omega) \sin(18.19^\circ + 18.67^\circ)$$

$$E_a = 3150.03V + 248.19V + 1558.44V = 4956.66V$$

$$\text{Para } i_{\text{excit}} = 200A; V_{Ln} = 1662V, I_{np} = 1500A$$

$$E_a = 1662V \cos(18.67^\circ) + 1500A(0.1034\Omega) \cos(18.19^\circ + 18.67^\circ) \\ + 1500A(0.866\Omega) \sin(18.19^\circ + 18.67^\circ)$$

$$E_a = 1574.54V + 124.09V + 779.22V = 2477.85V$$

$$\text{Para } i_{\text{excit}} = 100A, V_{Ln} = 923V, I_{np} = 750A$$

$$E_a = 923V \cos(18.67^\circ) + 750A(0.1034\Omega) \cos(18.19^\circ + 18.67^\circ) \\ + 750A(0.866\Omega) \sin(18.19^\circ + 18.67^\circ)$$

$$E_a = 874.42V + 62.04V + 389.61V = 1326.07V$$

Para i excit=50A, VLn=400V, Inp=370A

$$E_a = 400V \cos(18.67^\circ) + 370A(0.1034\Omega) \cos(18.19^\circ + 18.67^\circ) \\ + 370(0.866\Omega) \sin(18.19^\circ + 18.67^\circ)$$

$$E_a = 378.95V + 30.61V + 192.207V = 601.76V$$

Para cada uno de estos valores de E_{ap} calculamos C_p :

$$C_p = \frac{E_{ap} V_{an}}{x_d}, \quad E_n = 9.2376043KV, \quad x_d = 0.866\Omega$$

$$C_{p1} = \frac{12729.83V \times 9237.604V}{0.866\Omega} = 1.3578883 \times 10^8 VA \quad \text{para } I_p = 6980A$$

$$C_{p2} = \frac{11182.81V \times 9237.604V}{0.866\Omega} = 1.192868 \times 10^8 VA \quad \text{para } I_p = 6000A$$

$$C_{p3} = \frac{9287.3016V \times 9237.604V}{0.866\Omega} = 9.9067415 \times 10^7 VA \quad \text{para } I_p = 5250A$$

$$C_{p4} = \frac{6989.82V \times 9237.604V}{0.866\Omega} = 7.4560265 \times 10^7 VA \quad \text{para } I_p = 3760A$$

$$C_{p5} = \frac{4956.66V \times 9237.604V}{0.866\Omega} = 5.2872589 \times 10^7 VA \quad \text{para } I_p = 3000A$$

$$C_{p6} = \frac{2477.85V \times 9237.604V}{0.866\Omega} = 2.6431174 \times 10^7 VA \quad \text{para } I_p = 1500A$$

$$C_{p7} = \frac{1326.07V \times 9237.604V}{0.866\Omega} = 1.4145161 \times 10^7 VA \quad \text{para } I_p = 750A$$

$$C_{p8} = \frac{601.76V \times 9237.604V}{0.866\Omega} = 6.4189614 \times 10^6 VA \quad \text{para } I_p = 370A$$

$$C_{p9} = \frac{0V \times 9237.604V}{0.866\Omega} = 0 \quad \text{para } I_p = 0A$$

Cálculo del ángulo δ_p^m para cada uno de los valores de C_p anterior
res.

$$\delta_p^m = \cos^{-1} \left[-\frac{C_p}{8 B_n} + \sqrt{\left(\frac{C_p}{8 B_n}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right], \quad B_n = 2.5585133 \times 10^7 \text{ VA}$$

$$\delta_{p1}^m = \cos^{-1} \left[-\frac{1.357883 \times 10^8}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{1.357883 \times 10^8}{8(2.5585133 \times 10^7)}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.3061 = 72.17^\circ$$

$$\delta_{p2}^m = \cos^{-1} \left[-\frac{1.192868 \times 10^8}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{1.192868 \times 10^8}{8(2.5585133 \times 10^7)}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.3335 = 70.61^\circ$$

$$\delta_{p3}^m = \cos^{-1} \left[-\frac{9.9067415 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{9.9067415 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.3728 = 68.10^\circ$$

$$\delta_{p4}^m = \cos^{-1} \left[-\frac{7.4560265 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{7.4560265 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.4311 = 64.45^\circ$$

$$\delta_{p5}^m = \cos^{-1} \left[-\frac{5.2872589 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{5.2872589 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.4944 = 60.36^\circ$$

$$\delta_{p6}^m = \cos^{-1} \left[-\frac{2.6431174 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{2.6431174 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.5896 = 53.86^\circ$$

$$\delta_{p7}^m = \cos^{-1} \left[-\frac{1.4145161 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{1.4145161 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.6413 = 50.10^\circ$$

$$\delta_{p8}^m = \cos^{-1} \left[-\frac{6.4189614 \times 10^6}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{6.4189614 \times 10^6}{8(2.5585133 \times 10^7)}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.6764 = 47.43^\circ$$

$$\delta_{p9}^m = \cos^{-1} \left[-\frac{0}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{0}{8(2.5585133 \times 10^7)}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.7071 = 45^\circ$$

NOTA: $C_p = 0$ cuando $\delta_p^m = 45^\circ$

Parte de la curva para $i = 0$, $c_o = 0$, $\delta = \delta_o^m$

$$C_o = \frac{E_{ao} \times V_{an}}{X_d} = \frac{0 \times V_{an}}{X_d} = 0$$

$$\delta_o^m = \cos^{-1} \left[-\frac{C_o}{8Bn} + \sqrt{\left(\frac{C_o}{8Bn}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} \sqrt{\frac{1}{2}} = 45^\circ = \frac{\pi}{4} \text{ radianes}$$

$$S_o^m = A n e^{j\frac{3\pi}{2}} + B n e^{j(\frac{\pi}{2} - 2\delta)} = A n e^{j\frac{3\pi}{2}} + B n e^{j\frac{3\pi}{2}} = A n e^{j\frac{3\pi}{2}} + B n = -A n + B n$$

O sea:

$$S_o^m = P_o^m + j Q_o^m$$

$$P_o^m = A n \cos \frac{3\pi}{2} + B n \cos 0^\circ = A n (0) + B n (1) = B n = 2.5585133 \times 10^7 \text{ VA.}$$

$$Q_o^m = A n \sin \frac{3\pi}{2} + B n \sin 0^\circ = A n (-1) + B n (0) = -A n = -1.2412245 \times 10^8 \text{ VA}$$

* i = corriente de excitación.

PARTE DE LA CURVA DE CAPABILIDAD PARA EXCITACION NEGATIVA.

$$i < 0 = -I_n, \delta_n^m.$$

Para excitación negativa tenemos que:

$$S = A n e^{j\frac{3\pi}{2}} + B n e^{j(\frac{\pi}{2} - 2\delta_n^m)} + C n e^{j(\frac{3\pi}{2} - \delta_n^m)} \quad \text{NOTA: } \frac{3\pi}{2} = -\frac{\pi}{2}$$

$$C_n = \frac{E_{an} V_{an}}{X_d}$$

$$\delta_n^m = \cos^{-1} \left[+ \frac{CN}{8B_n} + \sqrt{\left(\frac{CN}{8B_n} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right]$$

Para dibujar esta parte de la curva que corresponde a excitación negativa, es necesario determinar algunos valores de CN y δ_n^m , hasta el valor de CN para el cual $\delta_n^m = 0$ (punto final de la curva).

Tomamos los valores tabulados anteriormente que fueron sacados de la curva de saturación en vacío y gráfica de corto circuito.

Entonces:

$$\text{Para } CN_1 = 0, \delta_{N_1}^m = 45^\circ$$

$$\text{Para } CN_2 = 0.5721266 \times 10^7$$

$$\delta_{N_2}^m = \cos^{-1} \left[\frac{6.4189614 \times 10^6}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{6.4189614 \times 10^6}{8(2.5585133 \times 10^7)} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.7391 = 42.33^\circ$$

$$\text{Para } CN_3 = 1.4145161 \times 10^7$$

$$\delta_{N_3}^m = \cos^{-1} \left[\frac{1.4145161 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{1.4145161 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.7795 = 38.77^\circ$$

$$\text{Para } CN_4 = 2.6431174 \times 10^7$$

$$\delta_{N_4}^m = \cos^{-1} \left[\frac{2.6431174 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{2.6431174 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.8479 = 32.01^\circ$$

Para $CN_5 = 5.0000000 \times 10^7$ (este valor no es calculado y se supuso)

$$\delta_{N5}^m = \cos^{-1} \left[\frac{5.0000000 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\left(\frac{5.0000000 \times 10^7}{8(2.5585133 \times 10^7)} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} 0.9923 = 7.07^\circ$$

Para encontrar el punto final de la curva de capacidad -- (PO^N) donde $\delta_{po}^m = 0$ y $P = 0$ hacemos:

$$P = Bn \sin 2\delta - Cn \sin \delta = 0$$

adecuando indices,

$$P_{po}^m = Bn \sin 2\delta_{po}^m - C_{po} \sin \delta_{po}^m = 0$$

aplicando la identidad: $\sin 2A = 2 \sin A \cos A$.

$$P_{po}^m = 2Bn \sin \delta_{po}^m \cos \delta_{po}^m - C_{po} \sin \delta_{po}^m = 0$$

$$P_{po}^m = 2 Bn \cos \delta_{po}^m - C_{po} = 0$$

Pero $\delta_{po}^m = 0$, para $P = 0$

$$2 Bn \cos (0^\circ) - C_{po} = 0$$

$$2 Bn (1) - C_{po} = 0$$

$$C_{po} = 2 Bn$$

Para el valor de $C_{po} = 2 Bn$ sucede que $\delta_{po}^m = 0$

$$C_{po} = 2 Bn - 2 (2.5585133 \times 10^7) = 5.1170266 \times 10^7$$

entonces:

$$\delta_{po}^m = \cos^{-1} \left[\frac{2(2.5585133 \times 10^7)}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \sqrt{\frac{(2(2.5585133 \times 10^7))^2}{8(2.5585133 \times 10^7)} + \frac{1}{2}} \right]$$

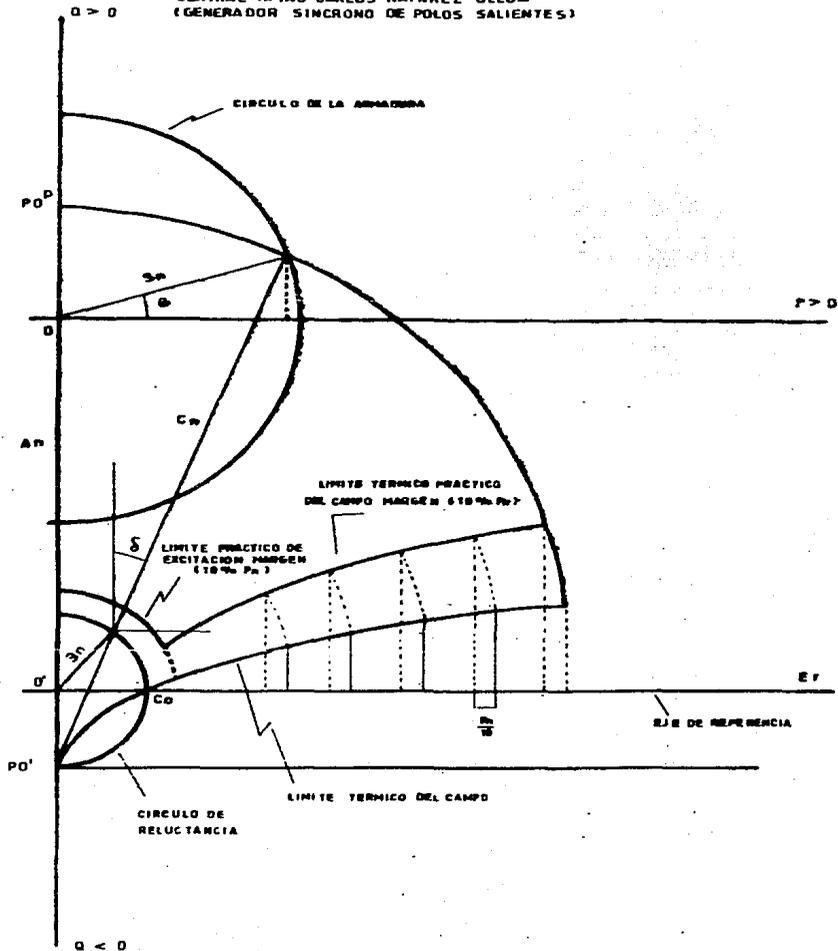
$$\delta_{po}^m = \cos^{-1} \left[\frac{2}{8} + \sqrt{\left(\frac{2}{8}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} \left[\frac{1}{4} + \sqrt{\left(\frac{1}{4}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right]$$

$$\delta_{po}^m = \cos^{-1} \left[\frac{1}{4} + \sqrt{\frac{1}{16} + \frac{1}{2}} \right] = \cos^{-1} \left[\frac{1}{4} + \sqrt{\frac{9}{16}} \right]$$

$$\delta_{po}^m = \cos^{-1} \left[\frac{1}{4} + \frac{3}{4} \right] = \cos^{-1} 1 = 0^\circ$$

Llegando así a la parte final de LA CURVA DE CAPABILIDAD.

CURVA DE CAPACIDAD DE UN GENERADOR DE LA
CENTRAL H. ING CARLOS RAMIREZ ULLOA
(GENERADOR SINCRONO DE POLOS SALIENTES)



FES CUAUTILAN U N A M

TESIS PROFESIONAL

NOMBRES: J.H.J. CEBADA LOPEZ

U. AVILES CUARTE

ESOLA. 5 CM= 0.9333333 X 10³ VA

LANINA No. 35

4.7.11 POTENCIA REACTIVA

CONVENCIÓN DE POTENCIA REACTIVA



Se requiere un balance de los MVAR.

$$\sum Q_{\text{gen}} = \sum Q_{\text{Consumida}}$$

Como las cap. e inductancias son diferentes el balance se logra mediante:

- 1.- Generadores Síncronos son F.P. atras. Si falta generación de reactivos (capacitor)
- 2.- Generaciones Síncronas con F.P. adelantado. Si falta consumo de reactivos (inductancia)
- 3.- SVS. Compensadores Estáticos
- 4.- Capacitores Serie
- 5.- Capacitores Paralelo.
- 6.- Reactores Paralelo.

Si el sistema está a máxima demanda.

- 1.- L.T. cargadas .
- 2.- Carga industrial en base a Motores de Inducción da consumo de reactancia. (Inductiva)

El exceso de carga Reactiva (Inductiva) produce BAJO VOLTAJE.

Si el sistema está en mínima demanda

- 1.- Las líneas no llevan corriente y la capacitancia de ellas - queda únicamente.
- 2.- Baja la Carga Industrial.

El deficit de carga reactiva provoca ALTO VOLTAJE. Esto es que hay exceso de Potencia Reactiva.

4.7.12 LA OPERACION DE LA MAQUINA SINCRONA PARA EL CONTROL DE -- REACTIVOS SE BASA EN TRES ASPECTOS.

- 1.- Operar dentro de su curva de capacidad.
- 2.- Operar al voltaje nominal del generador en una banda de \pm -
5%
- 3.- Operar con los voltajes de auxiliares en una banda máxima -
de \pm 10% en un voltaje sin variación de frecuencia $0 \pm 5\%$ -

con variación de frecuencia de $\pm 5\%$ (por normas).

La operación debe lograrse por medio de:

- 1.- Operación en automático del Sistema de Excitación.
- 2.- Mantener, un voltaje fijo de máquina o con mínima variación las 24 horas del día.
(no mover el ajuste de R.A.V.).
- 3.- Tener en posición adecuada los cambiadores de derivaciones de los transformadores auxiliares para que las variaciones estén dentro del $\pm 5\%$.

Sugerencias:

- 1.- Localizar la banda de operación de reactivos de un generador entre las horas de Demanda Mínima y las horas de Demanda Máxima (Madrugada de Domingo y 8:00 Hrs. p.m. del jueves) sin mover el voltaje nominal de la máquina.
- 2.- Buscar la posición óptima de los cambiadores de Derivaciones de los Transformadores de Auxiliares.
- 3.- Supervisar el voltaje de auxiliares en 4.16 KV y 440V con precisión en los Tableros de Control.
- 4.- Explicar a los operadores del Tablero de Control los límites de operación de los voltajes de auxiliares.

- 5.- No mover los ajustes de los RAV sin orden de operación Sistema o avisando a Operación Sistema.
- 6.- Tener como norma observar a las Máquinas con MVAR entrando en las madrugadas y MVAR en cero o saliendo a la hora del pico.
- 7.- Recordar que el voltaje elevado en el Sistema y en el equipo expone a fallas por aislamiento.
- 8.- Nunca permitir tener máquinas con F.P. atrasado unas y con F.P. adelantado otras, conectadas al mismo bus.

V.1 SISTEMA DE EXCITACION

V.1.1. DESCRIPCION DEL SISTEMA DE EXCITACION Y EL REGULADOR DE TENSION.

El regulador de tensión es el dispositivo que regula la excitación que indistintamente controla la tensión de salida del alternador y consecuentemente tiene una repercusión directa sobre el sistema eléctrico interconectado.

La excitación actúa en forma directa en el campo del generador de 2 maneras:

- 1) Mando directo sobre el proceso.

Consiste en un sistema unidad de control, amplificador, excitador, el cual proporcione una señal de excitación al campo del generador, dependiendo de una señal de mando aplicada a la unidad de control. Fig. 36.



FIGURA 36

En este caso, se tendría el mando directo sobre la excitación y es el caso cuando el regulador de tensión está en operación manual, o no se tiene prácticamente regulación de tensión. En este caso las variaciones en el sistema o por cambios de velocidad de la turbina no son alimentadas a la unidad de control

y por lo tanto no se regula la variable deseada. De ahí la necesidad de disponer de un sistema retroalimentado.

2) Sistema Retroalimentado

En este sistema se compara constantemente la señal de mando con la variable controlada, mediante el transductor adecuado, y el error que representa la desviación entre el valor deseado (señal de mando o referencia) y el valor real retroalimentado (variable a controlar), actúa directamente después de ser procesada por la unidad de control, sobre la excitación a efecto de corregir la desviación que se presente, anulando este error y manteniendo estable la variable controlada.

Si la tensión aumenta, el error es negativo y la unidad de control manda a reducir la excitación y a la inversa si la tensión disminuye; se manda a excitar más corrigiendo el error. Por lo tanto independientemente de las perturbaciones del sistema y para una misma señal de mando, se tiene una excitación única. - Fig. 37.

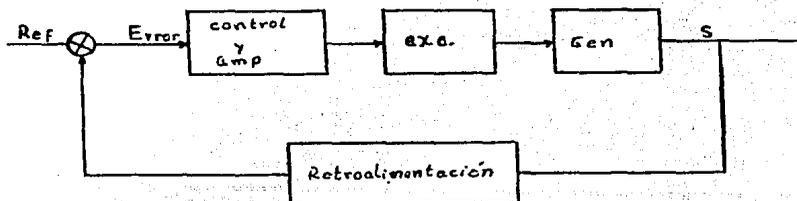


FIGURA 37

En la actualidad se tienen cuatro sistemas de excitación -- que son:

1) Con excitadores rotatorios de D.C., que pueden ser dos - (principal y piloto), que introducen las constantes de tiempo y las masas de los excitadores. Fig. 38.

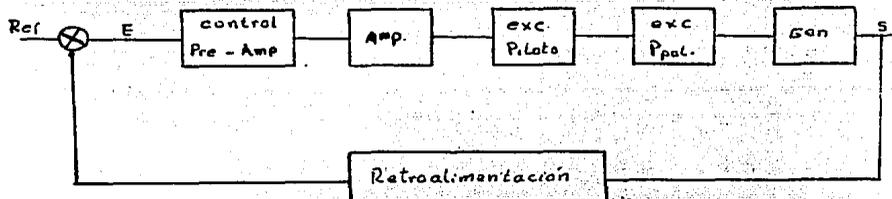


FIGURA 38

2) Con excitadores rotatorios de A.C., que es similar al -- punto anterior, con los inconvenientes de controlar con corriente alterna con rectificación externa al generador.

3) Excitación sistema Brushless, que elimina los inconvenientes de los excitadores rotatorios y los anillos colectores - (sistema sin escobillas) para la excitación, pero que contempla la masa y constante de tiempo del alternador auxiliar necesario en este tipo de excitación (convertidor DC/AC acoplado a la flecha). Fig. 39.

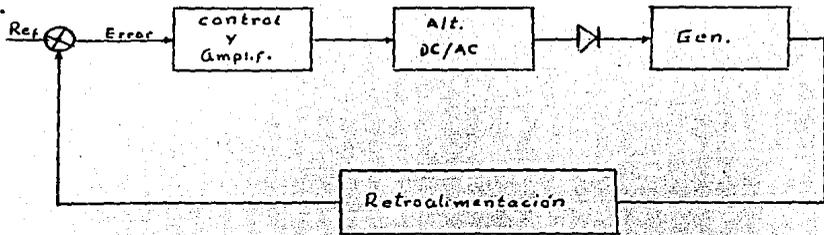


FIGURA 39

4) Sistema estático, que es el mejor y elimina las constantes de tiempo y las masas de los excitadores rotatorios y presenta características técnicas muy ventajosas con respecto a los -- otros sistemas. Figura 40.

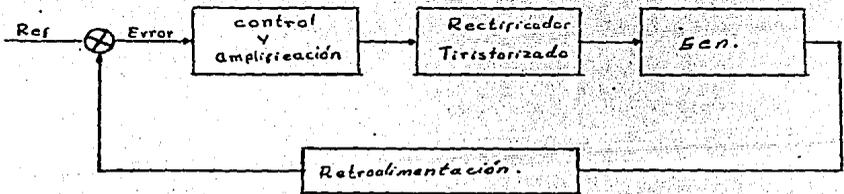


FIGURA 40

V.1.2 REGULADOR DE TENSION Y SISTEMA DE EXCITACION EN LA C.H. - "EL CARACOL"

El sistema de excitación en la C.H. "El Caracol" es de tipo estático como se mencionó en el inciso 4 y el regulador de tensión es electrónico como se muestra a continuación en el siguien

te diagrama a bloques.

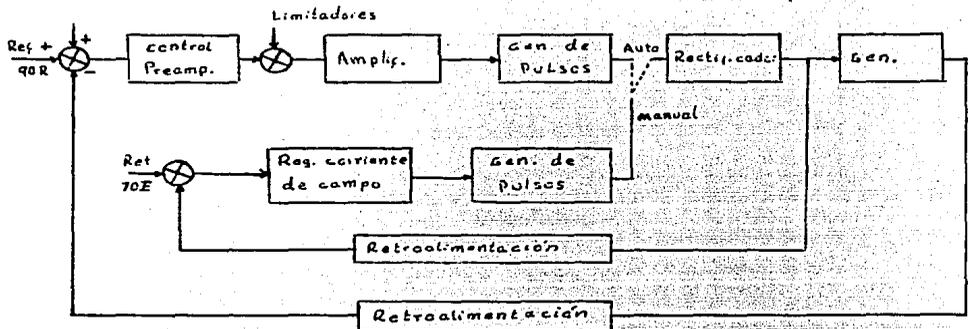


FIGURA 41

1) Formas de Operación.

a) Operación en manual.

La señal de referencia se suministra por medio del reostato de ajuste en manual (70E) y es la que suma algebraicamente con la señal de retroalimentación de corriente de campo y nos da a la salida del sumador una señal de error que se aplica al regulador de corriente, que se encarga de procesar y amplificar este error mandando al generador de pulsos la señal necesaria para aumentar o disminuir la excitación, de tal forma que se anule dicho error entre lo deseado y lo real.

b) Operación en Automático.

En este caso la referencia es proporcionada por medio del reostato de ajuste en automático (90R) y sumada algebraicamente con la retroalimentación de tensión del generador para producir

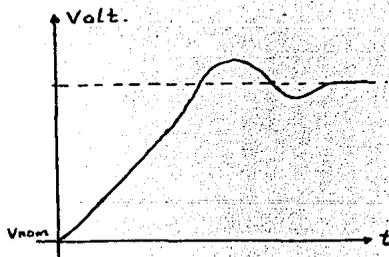
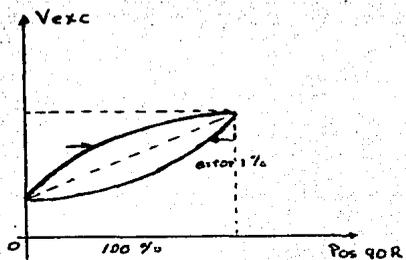
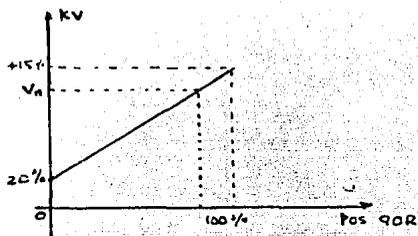
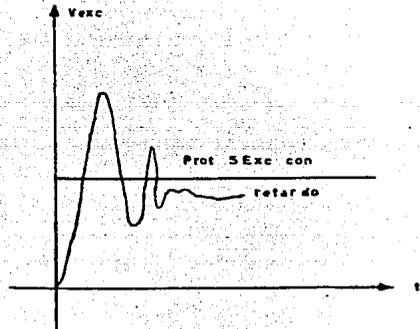
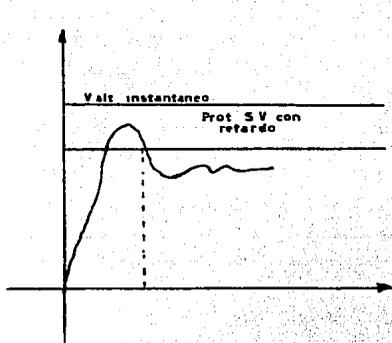


Fig. 42



PROTECCIONES CON RETARDO DE TIEMPO

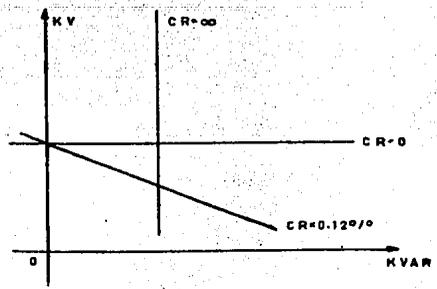
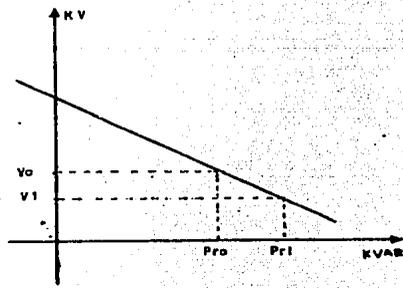


Fig. 43

la señal de error, la cual se procesa y amplifica. Adicionalmente a la referencia y retroalimentación, en el punto sumador se pueden introducir señales adicionales para mejorar las condiciones operativas del regulador en casos de disturbios (estabilizador de potencia, Joint Control, etc.) La señal de error ya preamplificada es introducida a otro sumador, en el cual se introducen también las señales de los limitadores (baja excitación, corriente de rotor, corriente del estator, etc) y la salida del sumador es amplificada y enviada al generador de pulsos para controlar los SCR's del rectificador, aumentando o disminuyendo la excitación al campo del generador, regulando de esta manera la tensión de salida del generador.

Es conveniente mencionar que lo antes expuesto es sobre la base de un sistema estático completamente y que para el caso de tener otro tipo de configuración (con excitatrices, brushless, amplificador magnético, etc), las características difieren un poco, pero las funciones del regulador son similares, excepto en la operación manual en donde no se regula y se necesita una mayor atención del operador de la unidad para compensar las variaciones de tensión que se produzcan.

2) Características Estáticas.

Desde el punto de vista del régimen estático, el regulador de tensión tiene las siguientes características:

A) Rango de Operación

El ajuste de la señal de referencia proporcionada por 90R,

debe permitir el ajuste de tensión en un rango de variación suficientemente amplio (15% arriba y 20% abajo) alrededor de la tensión nominal para poder trabajar al generador en todo el rango permitido por la curva de capacidad

B) Precisión (Histeresis de 90R)

A una misma posición del reostato 90R (señal de referencia), debe corresponder siempre la misma tensión de excitación cuando esté la unidad trabajando en vacío y sincronizada al sistema.

C) Sensibilidad.

El regulador es suficientemente sensible para detectar las pequeñas variaciones de tensión y corregirlas en tiempos reducidos, de tal forma que se tenga buena estabilidad en forma eficiente en la regulación de tensión de la red a la que esté conectado. Esta condición de sensibilidad del regulador de tensión, está íntimamente ligada con la ganancia, tiempo de respuesta, y amortiguamiento del regulador, que son parámetros ajustables y que podrían producir una 'banda muerta' apreciable si no son ajustados correctamente.

d) Compensación de reactivos.

La compensación de reactivos, debe ser posible ajustarse entre 0 y 12% y dependerá su ajuste, de la ubicación de la unidad dentro del sistema....

3) Características Dinámicas

A) Estabilidad.

Tanto en vacío como con carga, el regulador de tensión debe presentar una buena estabilidad para efecto de controlar adecuadamente los cambios bruscos de tensión producidos por disturbios en los sistemas o escalones de tensión en su operación en vacío.

El régimen transitorio que aparece, se debe traducir por la aparición de oscilaciones debidamente amortiguadas, tanto en la excitación como en la tensión del generador de la unidad.

Los ajustes necesarios para tener una buena estabilidad, están proporcionados por el amortiguamiento y ganancia del regulador, ajustes que difieren levemente con la unidad en vacío y luego con máquina sincronizada reajustar de nuevo para lograr una buena operación en régimen con carga.

B) Régimen Perturbado

Las perturbaciones fuertes que atañen al regulador de tensión son las provocadas por rechazos de carga, aperturas de líneas, rechazos de reactivos y corto circuitos en las líneas (transitorios).

1) Regulador de Tensión.

En los casos de operación en régimen perturbado, una de

las funciones del regulador es mantener la tensión del generador en rangos operativos sin llegar a condiciones de operación de las protecciones del propio regulador y de la unidad. Al haber rechazo de carga con la unidad sobreexcitada o subexcitada (rechazo de reactivos también), el regulador de tensión se encargará de controlar la tensión rápidamente y no llegar a condición de disparo por protecciones.

2) Estabilidad.

En régimen perturbado la acción del regulador de tensión ayuda en disminuir las oscilaciones dinámicas restableciendo a la normalidad en un tiempo más corto. Para este fin es necesario que se cuente con un sistema de excitación estática con regulador de tensión electrónico, con techo de máxima excitación alto y la señal adicional de estabilización de potencia. Estas características del regulador ayudan eficazmente en la estabilidad en régimen perturbado.

3) Desexcitación Rápida.

En casos de líneas a tierra o corto-circuito, el regulador de tensión cuenta con una desexcitación rápida y capaz de que su rectificador actúe como inversor (puentes completos de SCR's) el regulador ayudará en el transitorio desexcitando rápidamente (evitando la sobre-tensión y sobre-excitación), dando tiempo que se libere la falla y manteniendo la unidad en sincronismo.

4) Ajuste de las Protecciones.

El hecho de poder contar con una desexcitación rápida es uno de los argumentos que se tienen para contar con sistemas es táticos con puentes de diodos controlados (SCR's) que tienen la posibilidad de suministrar una tensión de excitación negativa y los ajustes correctos de ganancia y amortiguamiento, así como un techo de excitación alto son las condiciones necesarias para obtener una buena estabilidad en régimen perturbado.

Es necesario que las protecciones sobre-tensión y sobre-excitación, permitan al regulador actuar, es decir, que antes que operen las protecciones, se permita al regulador de tensión ejecutar su función de regulación.

V.1.3 FUNCIONES

1) El regulador de tensión permite llevar al grupo turbo-generador a la tensión adecuada para su sincronización y mantener esta tensión estable para la sincronización correcta.

2) Una vez sincronizada, la unidad permite controlar la ge neración de reactivos dentro de sus límites de operación, ayudando a mantener una tensión adecuada y estable. Para tal efecto el regulador de tensión establece una relación directa sobre los dispositivos que controla el operador (reostato de ajuste de tensión) y la tensión o corriente de excitación.

3) El regulador de tensión vigila la seguridad de la unidad (funciones de protección), durante disturbios y condiciones anormales de operación, mediante limitadores y señales adicionales de control al sistema de excitación. Durante variaciones de carga reactiva, controlara la excitación al generador, protegiéndolo de una sobretensión peligrosa, que operaría las protecciones sacando la unidad de sincronismo.

4) Repercusión sobre el Sistema.

a) Participación en la regulación de tensión del sistema.

En un sistema interconectado, es necesario mantener la tensión en los puntos de demanda entre valores óptimos de operación para una buena calidad de servicio a los usuarios.

Debido a la configuración de los sistemas interconectados y con las variaciones de carga (activa y reactiva), se hace necesario que todas las unidades interconectadas participen en la regulación de frecuencia y tensión. Para este efecto el regulador de tensión detecta los cambios en el sistema y ayuda a conservar la tensión, variando la excitación al generador. Para tal efecto el regulador establece una ley entre las variaciones de reactivos y la tensión del sistema. Si la unidad funciona con una potencia reactiva 'pro' para una tensión en el sistema V_0 , a raíz de una disminución de tensión en el sistema V_1 , la unidad se sobre-excitará para tratar de mantener la tensión, suministrando una potencia reactiva de P_{r1} . Puede darse el caso de que a variaciones de tensión en el sistema la unidad

no varfe su suministro o absorción de reactivos en cantidades - considerables.

b) Participación para mejorar la Estabilidad.

El regulador de tensión ayuda en el mejoramiento de la estabilidad del sistema, sobre todo en condiciones dinámicas (disturbios), mediante su acción rápida sobre-excitando o sub-excitando de manera apreciable durante las condiciones críticas y logrando de esta manera estabilizar el sistema en el menor tiempo posible.

Para este efecto, se cuenta con un sistema de excitación - estático con regulador de tensión de tipo electrónico con señales adicionales, de tal forma que se tengan techos de excita-ción altos, posibilidad de desexcitación rápida (puentes completos de SCR's), tiempos de respuesta cortos.

c) Regulador de Tensión en automático o en manual.

El regulador de tensión por lo general tiene la opción de trabajar en automático o en manual. En operación manual, prácticamente el regulador de tensión esta fuera de servicio, aún - cuando en algunos casos se tiene una regulación de corriente. Con el regulador en manual no hay regulación de tensión y ésta - tiene que efectuarla el operador por medio del reostáto de excitación manual. En estas condiciones el regulador no ayuda al - sistema en los puntos anteriormente tratados, por lo que siempre debe estar operando en automático.

d) Repartición de cargas Reactivas.

Suponiendo que todas las unidades tienen sus reguladores de tensión en automático, a una variación de tensión en el sistema todas las unidades ayudarán a restablecer esta tensión, variando su generación de reactivos. Dependiendo de las características de las instalaciones (su ubicación en el sistema interconectado) dependerá la participación de cada unidad en la compensación de reactivos (que difiere de la regulación de Potencia-Frecuencia en donde la participación debe ser uniforme). Esta participación de cada unidad, nos proporciona la característica del compensador de reactivos del regulador de tensión.

e) Estatismo en Reactivos.

El estatismo en reactivos es la pendiente de la característica anterior

A raíz de una variación en la tensión de Bus V , la unidad responde con una variación de potencia reactiva PR.

El estatismo en reactivos se puede definir como:

$$\delta = \frac{\Delta V}{\Delta P_r} \text{-----(63)}$$

Expresado en KV/KVAR. Si se expresa V en valor relativo V_n - -
(V/V_n) y P_r en valor relativo de la potencia reactiva P_{rn} - -
(P_r/P_{rn}); el estatismo en reactivos se define por la variación.

$$\frac{V/V_n}{P_r/P_{rn}} = \frac{V \times P_{rn}}{\Delta P_r \times V_n} = \text{Est. en reactivos -----(64)}$$

El estatismo se expresa en %. El valor del estatismo varía entre 0 y 12% y depende su ajuste de las condiciones del sistema interconectado y la localización de la unidad dentro del sistema. Esto se puede ilustrar brevemente en el hecho de que en unidades situadas en colas del sistema se ajusta generalmente a 0% para evitar en lo posible las variaciones de tensión y mantener ésta en los valores de operación.

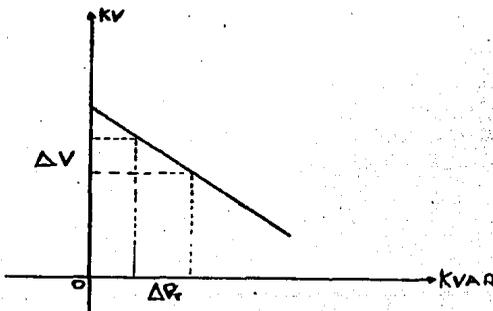


FIGURA 44

5.2 SISTEMA DE LUBRICACION

5.2.1. CHUMACERA DE GUIA

La chumacera de gufa garantiza, que a todas las velocidades, incluyendo también la velocidad de disparo, una rotación concentrica sin oscilación.

Esta absorbe las fuerzas radiales que tienen origen de una limitada excentricidad residual del rotor y de leves irregularidades magnéticas por tolerancias de fabricación y de ensamblaje.

La chumacera de gufa, colocada conforme al árbol (en forma de campana), está enteramente sumergida en el aceite del tanque del crucero.

La chumacera de gufa se compone de segmentos o zapatas uniformemente distribuidas en círculo alrededor del árbol, asegurado a una mensula anular del muñón de cruceta.

La superficie interna anular de los segmentos es de metal "babbitt" antifricción y obra en la superficie externa anular de la campana.

La posición de todas las zapatas puede ser arreglada por medio de un tornillo fijado al muñón de cruceta.

Durante la operación del generador, a consecuencia del bombeo del árbol del rotor, el aceite lubricante en las cunas entre las zapatas de gufa y el árbol se calientan.

Entonces, el aceite calentado es enfriado por medio de enfriadores de agua-aceite colocados en el aceite.

El árbol tiene unos orificios para la salida de vapores -- del aceite, los cuales se forman en el tanque entre el casquillo y el árbol.

Cierres, herméticos son previstos sobre y bajo del tanque de aceite, con emisión de aire sometidos a presión contra entrada de aceite y vapores en el circuito de ventilación de la máquina.

Ha sido también prevista la instalación, en la parte inferior del tanque, de un tubo para recoger las pérdidas de aceite.

Además, el soporte de gufa está aislado para evitar circulación de corriente en el árbol.

En fin completan el suministro del soporte de gufa los instrumentos así especificados en el pedido del cliente (termodetectores, termostatos, indicadores de nivel del aceite y de capacidad de agua).

5.2.2. CHUMACERAS Y SISTEMA DEL ACEITE DE LUBRICACION

El proyecto de la máquina prevee que algunos límites sean correspondientes a la temperatura del metal antifricción de la chumacera y correspondientes a las características del aceite de lubricación.

La máxima temperatura permitida en ejercicio del metal - antifricción de las chumaceras, está indicada en la Tabla 1.

En la tabla 1 se encuentran los valores siguientes, correspondientes al aceite de lubricación:

- Límites de viscosidad
- Valor máximo de la temperatura media del aceite durante el funcionamiento
- Nivel normal de aceite en la chumacera durante el funcionamiento.
- Temperatura máxima y caudal normal del agua de refrigeración.

En la instalación tendrá que ser provisto un adecuado sistema de medidas, controles, vigilancia a distancia y de protecciones que facilite al operador que tiene que respetar estos límites.

5.2.3 DATOS TECNICOS DE LA CHUMACERA GUIA

Chumacera Gufa

- Volúmen de aceite de la chumacera gufa 2000 litros
- Tipo de aceite recomendado 6°E a 50°C
- Cantidad de agua requerida para el enfriamiento de la chumacera gufa 9.4 m³/h
- Presión del agua a la entrada de los enfriadores de las chumaceras Desde 14.2 Kg/cm² hasta 7 Kg/cm²
- Caída de presión en los enfriadores de chumacera. 0.7 Kg/cm²
- Dimensión de los orificios para los filtros de agua de enfriamiento de las chumaceras diam. 1 y 2 mm.

5.2.4 ACEITE DE LUBRICACION

El aceite empleado para la lubricación de las chumaceras, debe tener la viscosidad aconsejada por el constructor de la máquina; se tienen que hacer eventuales rellenos con aceite de la misma calidad y del mismo proveedor.

Cuando se desea cambiar (manteniendo siempre la misma viscosidad), antes de todo, se necesita limpiar toda la instalación de lubricación, las chumaceras y los soportes, para eliminar las trazas de aceite empleado anteriormente.

Cada año, hay que presentar una muestra de aceite de pruebas de laboratorio, para determinar el estado de degradación química y de contaminación (especialmente viscosidad y acidez total); para los límites de aceptabilidad de acidez total, se aconseja que se sigan las indicaciones del proveedor del aceite; si se necesita el aceite tendrá que regenerarse o sustituirse.

Altos contenidos de agua en el aceite pueden ser debidos a pérdidas en los refrigeradores del aceite; éstos tienen que eliminarse por medio de adecuados tratamientos de centrifugación y filtrado de aceite. La contaminación por partículas sólidas, determinan la necesidad de lavado y de limpiadura de la instalación de lubricación y de un adecuado tratamiento de filtrado de aceite, y señalización de la ineficiencia de los eventuales filtros arriba de las chumaceras; la calidad de las partículas sólidas, puede también revelar la fuente de la contaminación. El nivel del aceite en el soporte tiene que mantenerse dentro de las cotas indicadas en los dibujos de construcción, siempre hay adecuados señaladores o indicadores del nivel en los soportes. Una disminución del nivel indica generalmente una pérdida de aceite hacia el exterior y, en este caso, hay como primera alternativa compensar enseguida esta pérdida con rellenos de aceite; un aumento del nivel puede indicar infiltraciones de líquido que provocan alteraciones en la viscosidad y contaminación del aceite (por ejemplo, pérdidas de agua de los refrigeradores de aceite ubicados eventualmente en el interior de los soportes).

5.2.5 LAS VIBRACIONES MECANICAS DE LA CHUMACERA

Los criterios empleados en la valuación de las vibraciones mecánicas de la chumacera y de las estructuras que se unen a éstas, son aquellas indicadas en el noto diagrama de Rathbone, empleado también en la norma Alemana V.D.I. 2056.

Si las vibraciones de la chumacera o de las estructuras de esta misma resultan "excesivas" la máquina tiene que ser parada y se necesita verificar y eliminar las causas de estas vibraciones.

Generalmente después de la fase de la primera puesta en --marcha, las vibraciones de las chumaceras resultan bastante inferiores a los límites sobredichos; es una costumbre común medir sistemáticamente las vibraciones en varias condiciones de --funcionamiento y durante todo el tiempo de duración de la máquina.

Un criterio muy bueno de verificación es la comparación de las actuales vibraciones (además que con los límites sobredichos) con condición de ejercicio y análogas: estas comparaciones evidencian las variaciones de comportamiento de la máquina y pueden ayudar a la identificación de las causas de las vibraciones y la intervención con preventivas acciones de corrección.

También hay que notar que la máquina eléctrica rotativa, -

es solamente una parte del sistema que vibra: también la estructura puede influir en el estado de las vibraciones de la máquina.

Los desperfectos que pueden originar excesos o aumentos de las vibraciones son muchos; aquí se indican los más comunes y probables:

- Desalineación entre las partes rotatorias o chumaceras del grupo.
- Fricción seca entre las partes rotatorias y fijas.
- Aflojamiento de las partes rotatorias o fijas.
- Desimetrías electromagnéticas.
(desuniformidad de entrehierro, espiras de corto circuito en el devanado del rotor)
- Insuficiencia rigidez de las funciones o estructuras de base de la máquina.
- Desequilibrios mecánicos de las partes rotatorias.

Los rotores enviados enteramente ensamblados son equilibrados en la fábrica del constructor; mientras puede ocurrir que los rotores, enviados en más piezas a ensamblarse en el sitio de montaje de la máquina, tengan que ser equilibrados en el sitio durante la primera puesta en marcha de la instalación.

Las desimetrías magnéticas se terminan cuando la máquina está desexcitada; a igual velocidad, la comparación entre las vibraciones con y sin excitación puede evidenciar los desperfectos de este tipo.

5.3 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.

5.3.1 VENTILACION

El enfriamiento de la máquina, se obtiene mediante circulación de aire en circuito cerrado. El circuito de ventilación ha sido estudiado de manera de conseguir una eficaz salida del calor de las partes activas del rotor y del estator, para evitar desuniformes recalentamientos y relativas sollicitaciones.

El flujo del aire de enfriamiento es activado por la particular conformación de la araña del rotor. Un oportuno número de canales de ventilación recavados en la flanta laminosa hace que todo el rotor constituya un único ventilador centrífugo.

El aire de ventilación después de haber rozado las bobinas polares atraviesa el núcleo estator recorriendo los canales de ventilación. Una parte del aire roza las partes terminales del núcleo y los cabezales del bobinado estator. Oportunas capacidades laterales, impiden la recirculación del aire. Transportado por la carcasa, el aire atraviesa los elementos refrigerantes de agua y transmite por oportunos conductos y guías para cerrar el circuito.

Todos los elementos del circuito de ventilación, están estudiados de manera de asegurar una justa distribución de los flujos de aire en las varias partes de la máquina y un flujo regular con las mínimas pérdidas.

5.3.2 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.

El aire de ventilación está enfriado por medio de elementos refrigerantes de agua montados en las bocas recavadas en la parte externa de la carcasa.

Los elementos refrigerantes están constituidos por un haz de tubos con placas y cajas de agua de material apto para el tipo de agua empleado, conteniendo bridas de conexión, llaves de descarga y válvulas de escape.

Las cajas de agua se pueden abrir para la inspección y limpieza de los tubos. Los tubos que constituyen el intercambiador, a sección circular, son de material resistente a la corrosión y están provistos de aletas.

Los refrigerantes están todos unidos hidráulicamente en paralelo a los colectores de envío y descarga de agua a través de válvulas que permiten excluir cada elemento en caso de desperfecto dejando en servicio los otros. Los colectores inician y terminan en las inmediatas proximidades de la máquina con bridas para la conexión a las tuberías de la central. Las tuberías están provistas de un revestimiento anticorrosión donde sea necesario.

El sistema refrigerante está dimensionado de manera de obtener la temperatura de aire en la salida (aire frío) constante cuando el generador funcione a plena carga con agua entrante en

los refrigerantes a la temperatura fijada.

La instrumentación (termómetros, detectores de temperatura, indicadores de temperatura, indicadores de circulación de agua) oportunamente dispuestos en los circuitos de agua y aire completa el sistema de refrigeración.

5.3.3 DATOS TECNICOS DE LOS ENFRIADORES.

Número de enfriadores del generador.	12
Gradiente entre el agua de enfriamiento y el aire frío de los enfriadores.	10°C
Cantidad de agua requerida para los enfriadores del generador.	520 m ³ /h
Presión del agua a la entrada del generador.	de 14.2 Kg/cm ² a 7 kg/cm ²
Dimensión de los orificios para los filtros del agua a los enfriadores del generador.	entre 1 y 2 mm.

5.3.4 ENFRIAMIENTO DE AGUA AIRE.

El proyecto de la máquina prevee algunos límites relativos al agua de enfriamiento.

Especialmente, en la tabla se indican los valores de:

- La temperatura máxima
- El caudal normal.

Del agua que entra en los refrigeradores durante la operación de la máquina; estos datos son muy relacionados a la capacidad de carga, a la sobre-temperatura permitida en los bobinados, a la máxima temperatura admitida para el aceite de refrigeración durante el funcionamiento de la máquina.

El operador tiene que controlar que se respeten los límites indicados por el constructor.

5.3.5 REFRIGERADORES DE MAQUINA DE AIRE-AGUA.

El agua que circula en los refrigeradores, tiene que ser lo más limpia posible; arriba de los refrigeradores los filtros tienen que limpiarse periódicamente o substituirse.

El agua del mar es químicamente ofensiva para los materiales del refrigerador y puede fácilmente causar obstrucciones e incrustaciones (algas microorganismos); también el agua sacada cerca de las descargas industriales puede ser dañosa. el agua del río causa generalmente peligrosos depósitos calcáreos.

La vida, la eficiencia, la frecuencia de mantenimiento del refrigerador, dependen principalmente del grado de solución del

agua empleada: generalmente se aconseja que se efectue una primera limpiadura completa de los refrigeradores, después del primer año de ejercicio sin interrupción desde la primera puesta en servicio de la máquina. Esto representa una válida indicación para establecer y programar los tiempos de las sucesivas y necesarias limpiaduras; con agua normalmente limpia, el refrigerador puede funcionar satisfactoriamente por algunos años.

Para una limpiadura periódica del interior de los tubos, no es necesario la remoción completa de los refrigeradores, pero es suficiente desmontar las cajas de agua e introducir por lo menos desde un lado, escobillones de adecuada longitud.

Durante esta operación, hay que predisponer de adecuadas protecciones (por ejemplo por medio de hojas de polietileno) -- contra las proyecciones de agua en el interior de la máquina.

Para una limpiadura total, hay que desmontar el refrigerador según las indicaciones que siguen:

- Cerrar las válvulas de las tuberías de impulsión y descarga.
- Abrir la válvula de desahogo de aire y después la de evacuación de agua, drenando el agua contenida en el refrigerador en una tubería de descarga o en un tanque provisional.
- Desconectar las tuberías del refrigerador (impulsión, descarga, desahogo, drenaje...)

- Instalar adecuados cables de levantamiento en los previstos agujeros u orejas de enganche.
- Poner los cables en posición de tiro por medio de una -- grua móvil o de un aparejo provisional.
- Quitar los tornillos de sujeción del refrigerador.
- Remover el refrigerador y depositarlo sobre los cables - de madera.

Después de haber desensamblado las cajas de agua, éstas -- tienen que limpiarse y desencrustarse sin quitar el revestimiento protector; eventuales ánodos de protección tienen que renovarse si estuviésemos consumados.

El interior de cada tubo debe limpiarse con escobillas de -- nylon de sección similar, pero un poco más grande de la de los -- tubos, derramando al mismo tiempo mucha agua de enjuague.

La operación termina cuando todas las incrustaciones han -- sido sacadas; la película verdosa que queda, protege el metal - de ulteriores corrosiones.

La superficie externa y los dispositivos de aletas de los -- tubos tienen que limpiarse con un chorro de aire comprimido.

La secuencia de remontaje es invertida respecto a la de re -- moción: se aconseja el uso de un nuevo juego de empaquetaduras.

Antes de volver a poner la máquina en servicio, asegurarse de que no hayan pérdidas de agua hacia el exterior y sacar el aire del interior por medio de las adecuadas válvulas de desahogo.

En caso de que sea previsto un período bastante largo de inactividad, se necesita evacuar el agua de los refrigeradores.

Si durante la operación de la máquina, un elemento refrigerador presenta pérdidas de agua hacia el exterior, hay que cerrar enseguida las válvulas de impulsión y de descarga y drenar el agua desde el interior; proyecciones o succiones de agua (o humedad) en el interior de la máquina son muy dañosos para las bobinas; la carga de la máquina tiene que limitarse al mismo tiempo, según los servicios previstos sin un elemento refrigerador.

Ya que los refrigeradores pertenecen al tipo doble tubular, la eventual pérdida de agua desde los tubos puede enviarse de un adecuado tubo de drenaje; esto permite una más fácil observación del desperfecto.

La pérdida de agua desde los tubos del refrigerador, puede eliminarse excluyendo los tubos del circuito de agua, y colocando adecuados tapones cónicos de latón o de madera dura en las dos extremidades de los tubos.

Ya que los tubos pueden extraerse singularmente, el tubo -

puede reemplazarse: la exclusión de algunos tubos de uno o más elementos refrigeradores, normalmente permite todavía la marcha de carga nominal de la máquina, a condición de que esta operación sea limitada al 5 o 10% máximo del total de los tubos del elemento refrigerante, no interese todos los elementos refrigerantes al mismo tiempo y sea contrabalanceada por un buen estado de limpieza interior y exterior de los refrigeradores y por una temperatura del agua de entrada en los refrigeradores, inferior al límite máximo previsto.

5.3.6 CONTROL DE LAS CONDICIONES DE OPERACION DE LOS REFRIGERADORES

Los siguientes datos corresponden a lo siguiente: los de la columna A cuando trabajan los 12 intercambiadores y los de la columna B cuando uno está fuera de servicio.

	A	B
- Máxima entrada de Agua	72.7 m/h	72.7 m/h
- Mínima entrada de agua	19.3 m/h	19.3 m/h
- Máxima velocidad del agua en los tubos	1.9 m/seg	1.9 m/seg.
- Promedio de la velocidad del aire	4.57 m/seg.	4.57 m/seg.
- Presión de la prueba hidráulica	120 psi	120 psi.
- Presión de trabajo	60 psi	60 psi

5.3.7 FUGA DE AGUA DE LOS REFRIGERADORES.

Es muy importante revisar el depósito o charola instalada en la parte inferior de cada radiador en servicio, para la detección de posibles fallas como lo es la acumulación de agua de bidas a fugas.

En caso de que en la operación de la máquina, un elemento refrigerante presente pérdidas de agua hacia el exterior, hay que cerrar enseguida las válvulas de impulsión y de descarga y drenar el agua desde el interior; proyecciones o succiones de agua (o humedad) en el interior de la máquina son muy dañosos para las bobinas. La carga de la máquina, al mismo tiempo, tiene que limitarse según los servicios previstos sin un elemento refrigerador.

Ya que los refrigeradores pertenecen al tipo de tubos que se pueden extraer singularmente, el tubo puede reemplazarse: la exclusión de algunos tubos de uno o más elementos refrigeradores, normalmente permiten todavía la marcha de carga nominal de la máquina, a condición de que esta operación se limite al 5 o 10% máx. del total de tubos del elemento refrigerante, no interresando todos los elementos refrigerantes al mismo tiempo y se contrabalancean por un buen estado de limpieza interior y exterior de los refrigeradores y por una temperatura de agua de entrada en los refrigeradores, inferior al límite máximo previsto.

5.3.9 POSIBLES DAÑOS CAUSADOS AL PANEL.

Cuando existe una fuga se recomienda lo siguiente. Después de haber localizado la fuga y haber determinado el área en que se encuentra, quitar los disipadores que obstruyen el acceso a dicha fuga. La fuga podrá deberse exclusivamente a una de dos razones empaque o tubo averiado. Repóngase cualquiera de las partes afectadas.

6. SERVICIOS PROPIOS DE LA CENTRAL

Los servicios propios de la Central, puede decirse que se clasifican en 2 sistemas:

- 1.- Sistema de Transmisión
- 2.- Sistema de Distribución.

Dentro del sistema de transmisión, la Central Hidroeléctrica cuenta con una línea de transmisión procedente de la subestación Teloloapan siendo ésta una subestación elevadora cuya capacidad es de 115 KV respectivamente y una longitud aproximadamente 50Km, teniendo como lado receptor una subestación cuya capacidad es de 13.8 KV respectivamente, siendo ésta una subestación reductora. Dando servicio por medio de alimentadores en 13.8 KV., por medio de una línea de distribución o los siguientes lugares:

- 1.- Yetla 1.
- 2.- Yetla 2.
- 3.- Charloa
- 4.- Teloloapan
- 5.- Central Hidroeléctrica.

La línea de Distribución comprende aquellos servicios en los cuales la energía eléctrica esta destinada a consumirse, en el caso de la Central Hidroeléctrica, se encuentran los siguientes servicios y tableros en los voltajes que se tienen a continuación.

- Tablero de Servicios Generales de Vertedor y Cortina -----	480 vca y 220 vca
- Tablero de Servicios Generales de Subestación -----	250 y 480 VCD 220 vca
- Servicios propios de la Subestación en Construcción -----	220 vca
- Tablero de Servicios Generales y Alumbrado de Obra de - toma -----	480 vca 220 vca

Existe entre la subestación y la casa de máquinas un tablero de enlace por medio de un transformador reductor cuya relación de transformación es 13.8/0.48 KV para los siguientes servicios:

- Tablero de Servicios en Plataforma	220 vca.
- Tablero de Servicios Generales de Casa de Máquinas -----	250 vcd 480 vca.
- Tablero de Alumbrado y Servicios Generales de Casa de Máquinas. -----	220 y 127 vca.
- Tablero de Servicios Propios U_3 y U_2	480 vca.
- Tablero de Servicios Propios de VI y V.A.	480 vca.

Cada unidad generadora cuenta con una derivación para sistemas auxiliares y por medio de un transformador (reductor) con la siguiente relación de transformación 16/0.48 KV para los servicios que se mencionaron anteriormente, cuando las unidades generan energía eléctrica.

Cada tablero y Servicio, cuenta con sus respectivos cargos como lo muestran los diagramas siguientes en los cuales se anexa al final una lista de los dispositivos y relevadores con indicación de las funciones que desempeñan.

Esta lista está basada en la norma N.E.M.A. para la interpretación de esquemas y diagramas de conexiones.

" LISTA DE DISPOSITIVOS Y RELEVACIONES CON INDICACION DE LAS FUNCIONES QUE DESEMPEÑAN".

NUMERO	DEFINICION	Y	FUNCION
1	Elemento maestro.		
2	Relé de arranque o cierre de tiempo retrasado.		
3	(Reservado para futuras aplicaciones).		
4	Relé o contactor maestro.		
5	Dispositivo de paro.		
6	Interruptor, contactor o conmutador de arranque.		
7	Interruptor de ánodo.		
8	Conmutador para control de potencia.		
9	Dispositivo inversor		
10	Conmutador para secuencia unitaria.		
11	Transformador de control de potencia.		
12	Dispositivo de sobre-velocidad.		
13	Dispositivo de velocidad síncrona.		
14	Dispositivo de baja velocidad.		
15	Dispositivo regulador de velocidad.		
16	Dispositivo de control del cargador de baterías.		
17	Interruptor o contactor para puentear el campo serie.		
18	Contactor interruptor o relé acelerador o retardador.		
19	Relé o contactor de transición de arranque o marcha.		
20	Válvula operada eléctricamente.		
21	Relé de impedancia.		
22	Contactor o interruptor igualador.		
23	Dispositivo Regulador de temperatura.		
24	Interruptor, contactor o cuchillas de enlace de barras.		
25	Dispositivo para sincronización o puesta en paralelo.		
26	Dispositivo térmico de un aparato.		
27	Relé de bajo voltaje de C.A.		
28	Dispositivo térmico resistivo.		
29	Interruptor, contactor o cuchillas de separación		
30	Relé anunciador.		
31	Dispositivo de excitación separada.		
32	Relé o dispositivo de potencia para C.D.		
33	Conmutador de posición.		
34	Conmutador de secuencia de operación con motor.		

NUMERO D E F I N I C I O N Y F U N C I O N

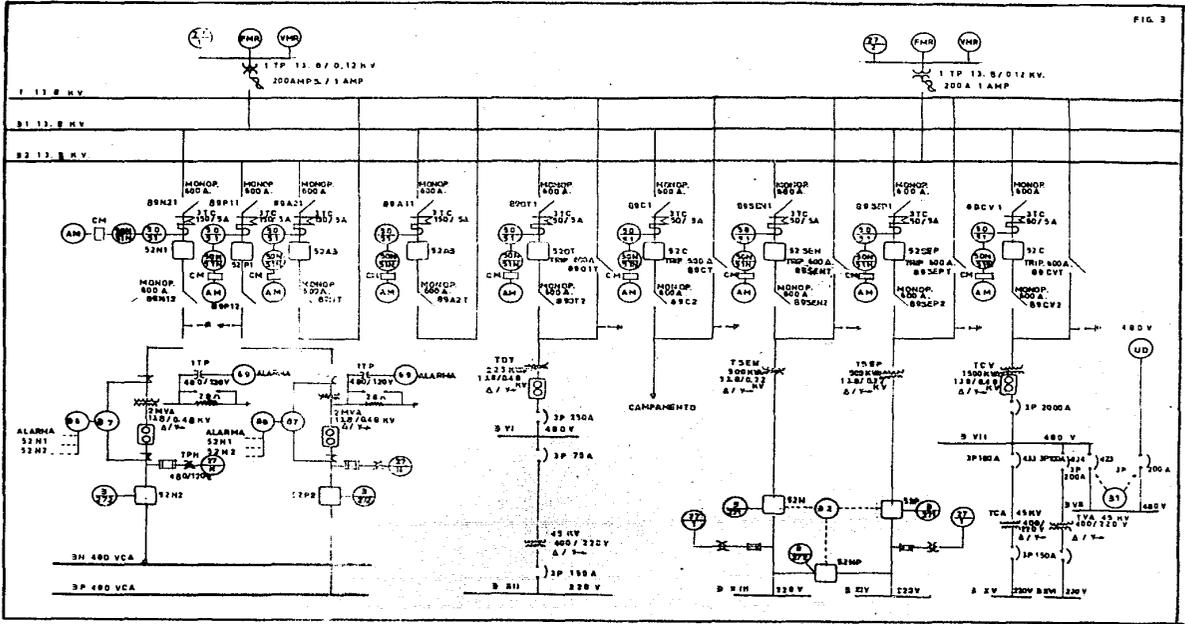
- 35 Dispositivo para poner en corto circuito los anillos rosantes o accionar los cepillos.
- 36 Dispositivo de polaridad.
- 37 Relé de baja corriente o baja potencia.
- 38 Dispositivo térmico de chumaceras.
- 39 Contactor reductor de campo.
- 40 Relé de campo.
- 41 Interruptor contactor o quebradora de circuito de campo
- 42 Interruptor, contactor o conmutador de marcha.
- 43 Dispositivo transferencia.
- 44 Contactor o relé de arranque de secuencia unitaria.
- 46 Relé de inversión de fase, corriente de fase equilibra-da o de protección en circuitos rectificadores de poten-cia.
- 47 Relé de tensión de fases invertidas o incompletas.
- 48 Relé de secuencia incompleta.
- 49 Relé o dispositivo térmico de C.A.
- 50 Relé o dispositivo selectivo de corto circuitos.
- 51 Relé de sobre corriente para C.A.
- 52 Interruptor o contactor para C.A.
- 53 Relé de excitatriz o generador.
- 54 Interruptor de alta velocidad
- 55 Relé de factor de potencia
- 56 Relé o dispositivo de aplicación del campo.
- 57 (Reservado para futuras aplicaciones).
- 58 (Reservado para futuras aplicaciones).
- 59 Relé de sobre-tensión para C.A.
- 60 Relé de tensión equilibrada.
- 61 Relé de corriente equilibrada.
- 62 Relé de tiempo retardado para paro o apertura.
- 63 Relé de presión nivel o gasto.
- 64 Relé de protección de fallas de tierra.
- 65 Gobernador.
- 66 Relé de traba.

NUMERO D E F I N I C I O N Y F U N C I O N

67	Relé de C.A. de potencia direccional o de potencia direccional y sobre-corriente.
68	Relé o dispositivo térmico para C.C.
69	Dispositivo de control permisible.
70	Interruptor o contactor de C.C. para línea de emergencia.
71	Reóstato operado eléctricamente.
72	Interruptor o contactor para línea de C.C.
73	Interruptor o contactor para resistencia de carga.
74	Relé de alarma
75	Mecanismo de cambio de posición
76	Relé de sobre-corriente para C.C.
77	Transmisor de impulsos
78	Relé de medición de ángulo de fase
79	Relé de recierre para C.A.
80	Relé o dispositivo de baja tensión de C.C.
81	Dispositivo de frecuencia
82	Relé de recierre para C.C.
83	Relé o contactor de control selectivo o de transferencia
84	Mecanismo de operación
85	Relé receptor del carrier o hilo piloto.
86	Relé o dispositivo de para total con seguro.
87	Relé de corriente diferencial.
88	Motor auxiliar o motor-generador.
89	Cuchillas de línea.
90	Dispositivo regulador.
91	Relé direccional de tensión para c.c.
92	Relé direccional de corriente y tensión para C.C.
93	Contacto o Relé cambiador de campo.
94	Relé o contactor para disparo o disparo libre.
95)	
96)	
97)-	(Reservados para aplicaciones especiales.
98)	
99)	

Los números anteriores son usados para designar dispositivos eléctricos, en todos los tipos de tableros manuales y automáticos, excepto en el equipo alimentador de recierre automático. Para tal equipo se usa una serie similar de números comenzando en 101 en vez de 1.

FIG. 3



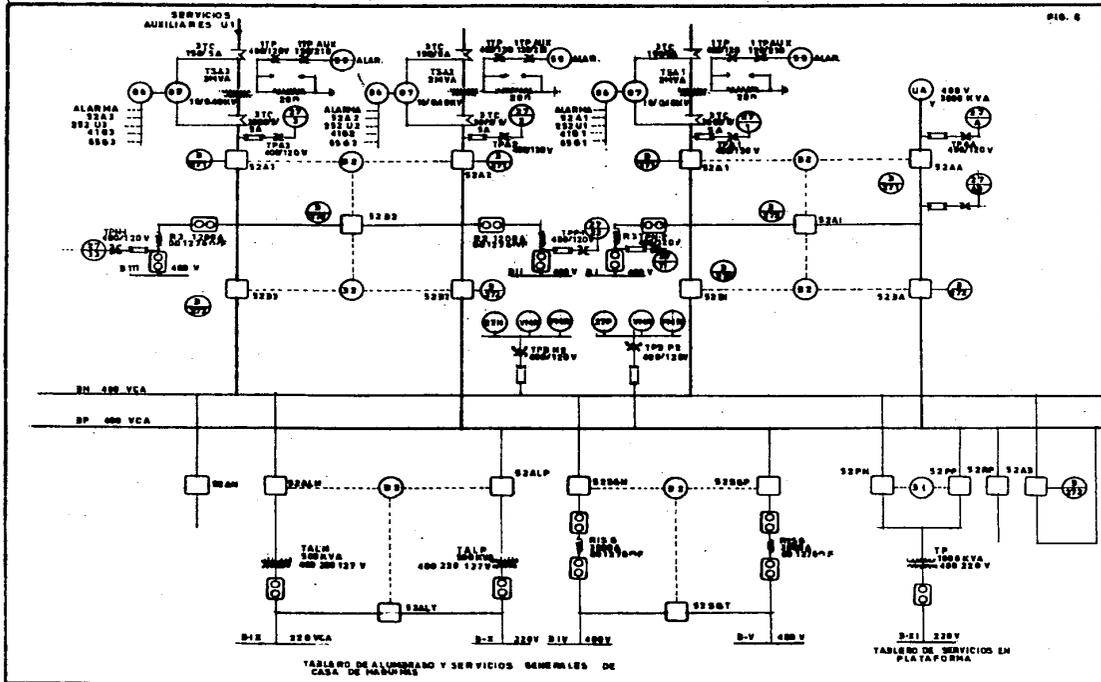
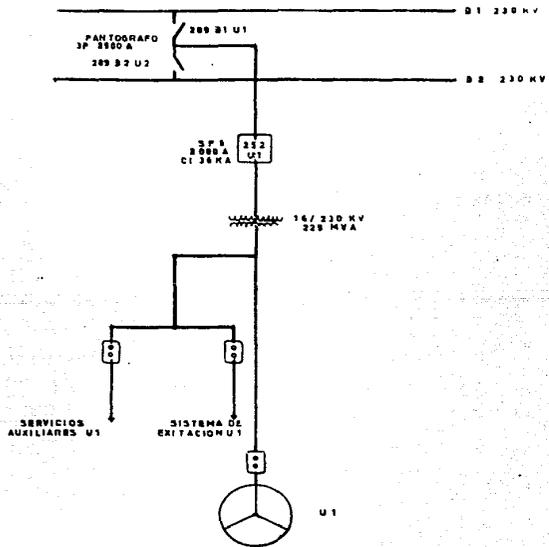


FIG D



7 SUBESTACION DE LA CENTRAL MIDROELECTRICA

7.1 INTRODUCCION

En el empleo de la energía eléctrica, ya sea para fines industriales, comerciales o de uso residencial interviene una gran cantidad de máquinas y equipo eléctrico.

Un conjunto de equipo eléctrico utilizado que entre otros forman parte en el proceso de generación consumo de energía eléctrica y que a su vez nos permiten cambiar las características de energía eléctrica (voltaje, corriente, frecuencia, etc.), o bien conservarle dentro de ciertas características.

Por razones técnicas (aislamiento, enfriamiento, etc.); los voltajes de generación en los controles generadores, son relativamente bajos en relación con los voltajes de transmisión, por lo que si la energía eléctrica se va a transportar a grandes distancias éstos voltajes de generación, resultarían anti-económicos debido a que se tendría gran caída de voltajes. De aquí se presenta la necesidad de transmitir la energía eléctrica a voltajes más elevados que resulten más económicos. Por ejemplo, si se va a transmitir energía de una central generadora a un centro de consumo que está situado a 1000 Kms. de distancia, será elevar el voltaje de generación para disminuir la corriente en las líneas y reducir al máximo las pérdidas de potencia en las líneas de transmisión y hacer posible la transmisión por líneas de un calibre manejable y es aquí donde empeza-

mos a darnos cuenta de la importancia de una SUBESTACION ELECTRICA que siendo lo que hemos mencionado la esencia de su utili zación tiene paralelamente otros fines e importancia.

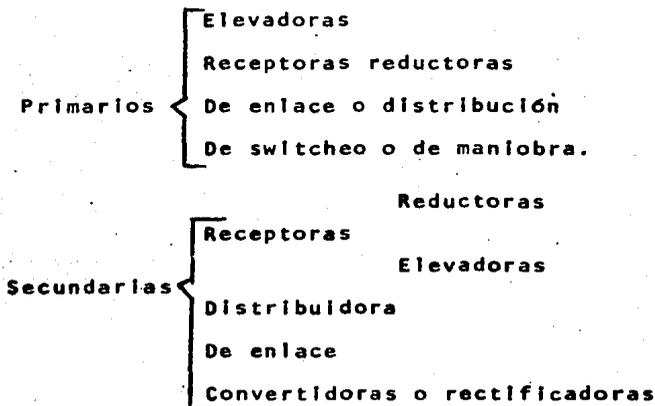
7.2 CLASIFICACION DE LAS SUBESTACIONES ELECTRICAS

Es difícil hacer una clasificación precisa de las subestaciones eléctricas, pero consideran como buena la siguiente clasificación.

a) Por su operación.

- 1.- De corriente alterna.
- 2.- De corriente continua.

b) Por su servicio



c) Por su construcción

- 1.- Tipo intemperie
- 2.- Tipo Interior
- 3.- Tipo blindado.

7.3 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UNA SUBESTACION

Los elementos que constituyen una subestación, se pueden - clasificar en elementos principales y elementos secundarios.

ELEMENTOS PRINCIPALES

- 1.- Transformador
- 2.- Interruptor de potencia
- 3.- Restaurador
- 4.- Cuchillas fusible.
- 5.- Cuchillas desconectadoras y cuchillas de prueba.
- 6.- Apartarrayos.
- 7.- Tableros Duplex de control.
- 8.- Condensadores.
- 9.- Transformadores de Instrumento.

ELEMENTOS SECUNDARIOS

- 1.- Cables de potencia
- 2.- Cables de control.
- 3.- Alumbrado
- 4.- Estructura
- 5.- Herrajes
- 6.- Equipo contra incendio.
- 7.- Equipo de filtrado de aceite.
- 8.- Sistema de tierras.
- 9.- Carrier
- 10.- Intercomunicación.
- 11.- Trincheras, ductos, conducto, drenajes.
- 12.- Cercas.

A continuación se describe en forma breve y elemental la función de algunos de los elementos que constituyen una subestación que sobresalen por su importancia.

TRANSFORMADOR

Un transformador es un dispositivo que:

- a) Transfiere energía eléctrica de un circuito a otro, conservando la frecuencia constante.
- b) Lo hace bajo el principio de inducción electromagnética
- c) Tiene circuitos eléctricos que están eslabonados magnéticamente aislados eléctricamente.
- d) Usualmente lo hace con un cambio de voltaje, aunque esto no es necesario.

INTERRUPTORES

Un interruptor es un dispositivo cuya función es interrumpir y restablecer la continuidad en un circuito eléctrico.

Si la operación se efectúa sin carga (corriente), el interruptor recibe el nombre de desconectador o cuchilla desconectadora.

Si en cambio la operación de apertura o cierre la efectúa con carga (corriente nominal) o con corriente de corto circuito (en caso de alguna perturbación), el interruptor recibe el nombre de DISYUNTOR O INTERRUPTOR DE POTENCIA.

Los interruptores, en caso de apertura, deben asegurar el aislamiento eléctrico del circuito.

RESTAURADOR.

En los sistemas de distribución, además del problema de la protección de los equipos eléctricos, se presenta el de la continuidad del servicio; es decir, la protección que se planea en las redes de distribución se hace pensando en los dos factores mencionados. Para satisfacer esta necesidad, se ideó un interruptor de operación automática que no necesita de accionamiento manual para sus operaciones de cierre o apertura (La operación manual se refiere al mando por control remoto), es decir - construido de tal manera que un disparo o un cierre está calibrado de antemano y opera bajo una secuencia lógica predeterminada y constituye un interruptor de operación automática con característica de apertura y cierre regulables de acuerdo con las necesidades de la red de distribución que se va a proteger. Este interruptor recibe por tales condiciones el nombre de RESTAURADOR.

Un restaurador no es más que un interruptor de aceite con sus tres contactos dentro de un mismo tanque y que opera en capacidades interruptivas relativamente bajas y tensiones no muy elevadas.

Los restauradores normalmente están constituidos para funcionar con tres operaciones de recierre y cuatro aperturas, con

un intervalo entre una y otra, calibrado de antemano en la última apertura el cierre debe ser manual, ya que indica que la falla es permanente.

CUCHILLA FUSIBLE.

La cuchilla fusible es un elemento de conexión y desconexión de circuitos eléctricos. Tiene dos funciones: como cuchilla desconectadora, para lo cual se conecta y desconecta, y como elemento de protección.

El elemento de protección lo constituye el dispositivo fusible, que se encuentra dentro del cartucho de conexión y desconexión. El dispositivo fusible se selecciona de acuerdo con el valor de corriente nominal que va a circular por él, pero los fabricantes tienen el correspondiente valor de corriente de ruptura para cualquier valor de corriente nominal.

Los elementos fusibles se construyen fundamentalmente de plata (en casos especiales), cobre electrolítico con aleación de plata, o cobre aleado con estaño.

CUCHILLA DESCONECTADORA (Seccionadores)

La cuchilla desconectadora es un elemento que sirve para desconectar físicamente un circuito eléctrico.

Por lo general se operan sin carga, pero con algunos aditamentos se puede operar con carga, hasta ciertos límites.

Clasificación de cuchillas desconectadoras

Por su operación:

- a) Con carga (con tensión nominal)
- b) Sin carga (con tensión nominal)

Por su tipo de accionamiento:

- a) Manual
- b) Automático

Por su forma de desconexión:

- a) Con tres aisladores, dos fijos y un giratorio al centro (Horizontal), llamado también de doble arco.
- b) Con dos aisladores (accionados con pértiga), operación vertical.
- c) Con dos aisladores, uno fijo y otro giratorio en el plano horizontal.
- d) Pantógrafo o separador de tijera.
- e) Cuchilla tipo "AV"
- f) Cuchilla de tres aisladores, el del centro móvil por cremallera.
- g) Cuchilla desconectadoras con cuernos de arco.
- h) Cuchilla tripolar de doble aislador giratorio.

APARTARRAYOS.

Las sobretensiones que se presentan en las instalaciones -

de un sistema pueden ser de dos tipos:

- 1.- Sobretensiones de origen atmosférico.
- 2.- Sobretensiones por fallas en el sistema.

EL APARTARRAYOS es un dispositivo que nos permite proteger las instalaciones contra sobretensiones de origen atmosférico.

Las ondas que se presentan durante una descarga atmosférica viajan a la velocidad de la luz y dañan el equipo si no se le tiene protegido correctamente; para la protección del mismo se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos.

- 1.- Descargas directas sobre la instalación
- 2.- Descargas indirectas.

De los casos anteriores, el más interesante, por presentar se con mayor frecuencia, es el de las descargas indirectas.

El apartarrayos, dispositivo que se encuentra conectado -- permanentemente en el sistema, opera cuando se presenta una sobretensión de determinada magnitud, descargando la corriente a tierra.

Su principio general de operación se basa en la formación de un arco eléctrico entre dos explosores cuya separación está determinada de antemano de acuerdo con la tensión a la que se va a operar.

EQUIPO CARRIER DE COMUNICACION

Algunas líneas largas llevan equipo carrier para comunicación, que es más confiable, más económico que el alambre piloto de comunicación, aún cuando el equipo terminal es más complicado que el requerido para intercomunicación con alambre piloto.

Hay instalaciones en que el costo del equipo carrier es elevado, por lo que a veces se reduce al uso del canal carrier o teléfono de emergencia para el control del supervisor.

En las mismas instalaciones, la ayuda de los capacitores de acoplamiento requeridos para el canal carrier pueden ser usados también como capacitores de potencial, tomando su poder expansivo de los transformadores (potencial expansivo), los cuales pueden otra vez ser utilizados para muestras de voltaje a través de los relevadores de protección.

Contrariamente a la práctica común, el alambre piloto de comunicación toma una comparación cuantitativa de la corriente en las dos terminales, lo cual no sucede en la comunicación por equipo carrier, existiendo la simple posibilidad de la señal -- transmitida, ésto es, el carrier puede estar en una de las dos posiciones: apagado o encendido.

El circuito carrier puede consistir de dos o tres alambres de línea o de un alambre con retorno a tierra. El circuito con retorno a tierra tiene una atenuación más grande e interferencias más altas que circuito metálico de dos o tres alambres; --

por otro lado, se requiere solo la mitad de capacitores de acoplamiento y trampas de onda. Sin embargo, para evitar el problema de las interferencias se prefiere para la comunicación el circuito de dos o tres alambres.

TRANSFORMADORES PARA INSTRUMENTO.

Se denominan transformadores para instrumento los que se emplean para alimentación de equipos de medición, control o protección. Los transformadores para instrumento se dividen en dos clases:

- 1.- Transformadores de corriente.
- 2.- Transformadores de potencial.

Transformadores de corriente.

Se conoce como transformador de corriente a aquél cuya función principal es cambiar el valor de la corriente de uno más o menos elevado a otro con el cual se puedan alimentar instrumentos de medición, control o protección como ampérmetros, wátt metros, instrumentos registradores, relevadores de sobrecorriente, etc.

Su construcción es semejante a la de cualquier tipo de transformador, ya que fundamentalmente consiste de un devanado primario y uno secundario. La capacidad de estos transformadores es muy baja, se determina sumando las capacidades de los instrumentos que se van a alimentar, y puede ser 15, 30, 50, 60 y 70 VA.

Estos transformadores normalmente van a estar conectados - en sistemas trifásicos, las conexiones que pueden hacerse con - ellos son las conexiones normales trifásicas entre transformadores (delta delta, delta estrella, etc.). Es muy importante en cualquier conexión trifásica que se hagan conectar directamente los devanados de acuerdo con sus marcas de polaridad, y siempre conectar el lado secundario a tierra.

Hay transformadores de corriente que operan con corrientes relativamente bajas; estos transformadores pueden construirse - sin devanado primario, ya que el primario lo constituye la linea a la que van a conectarse. En este caso a los transformadores se les denomina tipo dona.

Las relaciones de transformación son de diferentes valores, pero la corriente en el devanado secundario normalmente es de 5 amperes.

Transformadores de Potencial.

Se denomina transformador de potencia a aquél cuya función principal es transformar los valores de voltaje sin tomar en -- cuenta la corriente. Estos transformadores sirven para alimentar instrumentos de medición, control o protección que requieran señal de voltaje.

Los transformadores de potencial se construyen con un devana

nado primario y otro secundario; su capacidad es baja, ya que se determina sumando las capacidades de los instrumentos de medición que se van a alimentar y varían de 15 a 60 VA. Los aislamientos empleados son de muy buena calidad y son en general los mismos que se usan en la fabricación de los transformadores de corriente.

Se construyen para diferentes relaciones de transformación, pero el voltaje en el devanado secundario es normalmente 115 volts para sistemas trifásicos se conectan en cualquiera de las conexiones trifásicas conocidas, según las necesidades. Debe tenerse cuidado de que sus devanados estén conectados de acuerdo con sus marchas de polaridad.

Los transformadores de instrumento tiene diferente precisión de acuerdo con el empleo que se les dé. A esta precisión, se le denomina clase de precisión y se selecciona de acuerdo con la siguiente lista.

Clase de precisión.

0.1 Los pertenecientes a esta clase son generalmente transformadores patrones empleados en laboratorios para calibración por contrastación.

0.2 Los de esta clase pueden emplearse como transformadores patrones para alimentar instrumentos que requieran mucha precisión, como son instrumentos registradores, controladores,

aparatos integradores, etc.

0.5 Los transformadores pertenecientes a esta clase se emplean comúnmente para alimentar instrumentos de medición normal como son ampérmetros, volímetros, wáttmetros, vármetros, etc.

3. Los transformadores para instrumento que pertenecen a esta clase son empleados normalmente para alimentar instrumentos de protección como son relevadores; la tolerancia permitida en ésta clase es de 2.5 al 10%.

Especificaciones para transformadores de instrumento.

a) Transformador de corriente.

- 1.- Función a desempeñar.
- 2.- Relación de transformación (corriente primaria)
3. Tensión de operación.
4. Clase de precisión y tolerancia.

b) Transformador de potencial

- 1.- Función a desempeñar.
- 2.- Relación de transformación (voltaje primario).
- 3.- Colocación de las boquillas (en caso de subestación a la intemperie).
- 4.- Clase de precisión y tolerancia.

7.4 CARACTERISTICAS DE LA SUBESTACION DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA.

La subestación estará dividida en 2 secciones: subestación de transformación y subestación de distribución.

La subestación de transformación estará en una plataforma ubicada en la elevación 485 m.s.n.m. en el flanco norte de la margen derecha del río sobre la Casa de Máquinas, con una área de 3,300 m². La excavación seguida de varios recortes para completar una altura máxima de 80 m. con pendientes de 0.25: 1 y una excavación de 160,000 m³ de roca. En esta subestación se encuentran los transformadores de potencia que estarán conectados al generador por medio de unos ductos, conteniendo 3 líneas de 16 KV, estos ductos también servirán para la extracción e inyección de aire de la Casa de Máquinas.

La subestación de distribución estará a la elevación 570 m s.n.m. de esta subestación saldrá una línea de 230 KV c/u que vendrá de la subestación de transformación o sea de los transformadores de potencia que tienen las siguientes características:

TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Tipo de Unidad	monofásicos
Tipo de enfriamiento	OA/F0a1/F0a2
Capacidad nominal	225 MVA
Tensión Primaria (B.T.)	16 KV
Tensión Secundaria (A.T.)	230 KV.

La distribución del equipo de la subestación de la Central Hidroeléctrica Ing. Carlos Ramírez Ulloa (todavía en su fase - final de construcción) que se proyectó es el que se presenta en el plano que está a continuación.

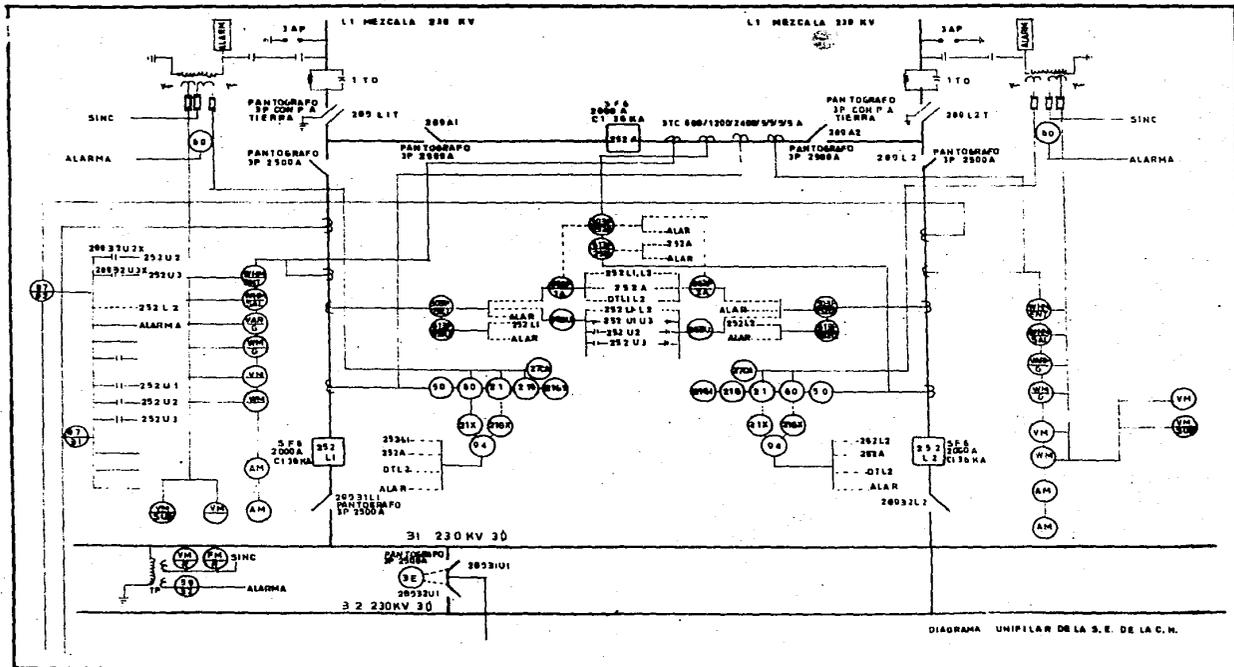


DIAGRAMA UNIPOLAR DE LA S.E. DE LA C.M.

8. CONCLUSIONES

La C.F.E. tiene como finalidad satisfacer las diferentes demandas de energía eléctrica que el país requiere basándose en las diferentes formas de generación que se conocen actualmente, y además buscar otras alternativas para desarrollar las que ya se conocen como son: La eólica, solar, maremotriz y a base de digestores, con la finalidad de economizar en combustible, ya que como se sabe en algunas formas de generación, éste juega un papel muy importante, esperando que llegado el momento ya se tengan otras alternativas.

En este caso, se escogió una Central Hidroeléctrica, debido a que no se utiliza un combustible (hidrocarburos) por el contrario utiliza un recurso natural como lo es el agua del cual podemos disponer y que deberíamos aprovechar, más ya que las condiciones geográficas de nuestro país lo permiten teniendo esto como consecuencia la construcción de unas Centrales Hidroeléctricas porque creemos que es la forma más económica de generación de Energía Eléctrica. Como ejemplos la C.H. "El Caracol" tendrá un período de servicio de 50 años aproximadamente, de los cuales los primeros 10 años se destinarán al costo de la construcción en su totalidad y los 40 restantes serán en beneficio para la C.F.E.