



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

“ ARAGON ”

**LOS RELEVADORES Y SU APLICACION EN LA PROTECCION
DE PLANTAS GENERADORAS DE ENERGIA ELECTRICA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

FERNANDO SOTELO TORRES

MEXICO, D. F.

1982



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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

Página

LISTA DE ILUSTRACIONES

Introducción -----	1
CAPITULOS	
I. Descripción General de las Plantas Generadoras que existen en México -----	4
A. Antecedentes Históricos -----	4
B. El Sector Eléctrico Mexicano -----	9
1. Tipos de Aprovechamientos que constituyen el Sector Eléctrico Mexicano --	12
a. Aprovechamientos Hidráulicos -----	13
b. Aprovechamientos Térmicos -----	21
C. Importancia y Aplicación de la Energía Eléctrica -----	38
II. Principio del Funcionamiento y Aplicación de los Relevadores -----	42
A. Clasificación de los Relevadores -----	43
1. Características Físicas -----	43
a. Relevadores Electromagnéticos -----	43
b. Relevadores Estáticos -----	54
2. Características Operativas -----	61
a. Función por realizar -----	62
b. Dependiendo de la cantidad característica -----	63

c. Tipo de Conexión -----	64
d. Forma de aislar la falla -----	65
8. Principio Básico de la Protección por - Relevadores -----	66
1. Cualidades Funcionales de las Protec- ciones -----	67
a. Confiabilidad -----	67
b. Sensibilidad -----	68
c. Selectividad -----	68
d. Velocidad de Operación -----	68
e. Cobertura Total -----	68
f. Simplicidad -----	68
g. Economía -----	68
2. Protección Primaria y de Respaldo--	71
a. Protección Primaria -----	71
b. Protección de Respaldo -----	72
III. Clasificación de las Fallas que afectan a - las Plantas Generadoras y sus Consecuencias--	74
A. En los generadores -----	76
1. Condiciones Normales -----	79
2. Condiciones Anormales -----	79
a. Pérdida de Excitación -----	79
b. Cargas Desequilibradas -----	80
c. Sobre carga -----	80
d. Reducción o Ausencia del Primomo- tor -----	80
e. Sobrevelocidad -----	81
f. Sobrevoltaje -----	81
g. Sobrecalentamientos -----	81
3. Condiciones de Falla -----	81
a. Fallas de Fase a Tierra -----	82
b. Fallas de Fase a Fase -----	82

B.	En los Transformadores -----	83
1.	Condiciones Normales -----	83
2.	Condiciones Anormales -----	83
a.	Bajo Nivel de Aceite -----	84
b.	Sobrecalentamiento -----	84
c.	Sobrecarga -----	84
3.	Condiciones de Falla -----	85
a.	Fallas en el Aislamiento -----	85
IV.	Presentación de un Esquema de Protección --	87
A.	Protección del Generador -----	87
1.	Condiciones Normales y Condiciones -	
	Anormales -----	88
a.	Sobrevoltaje -----	88
b.	Sobrecarga -----	90
c.	Cargas Desequilibradas -----	92
d.	Pérdidas de Excitación -----	95
e.	Sobrevelocidad -----	97
f.	Reducción o Ausencia del Primomo-	
	tor -----	98
g.	Sobrecalentamientos -----	99
h.	Vibraciones en los Cojinetes-----	100
2.	Condiciones de Falla -----	100
a.	Fallas de Fase a Tierra del Esta-	
	tor -----	101
b.	Fallas de Fase a Fase -----	107
B.	Protección del Transformador -----	114
1.	Condiciones Anormales -----	115
a.	Bajo Nivel de Aceite -----	115
b.	Sobrecalentamientos -----	115
2.	Condiciones de Falla -----	116
a.	Fallas Menores -----	116
b.	Fallas Severas -----	119

C.	Transformadores de Instrumentos-----	127
	1. Transformadores de Potencial -----	128
	2. Transformadores de Corriente -----	130
V.	CONCLUSIONES -----	139

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura		Página
1.1	Distribución de la Carga Instalada en - 1958, por Tipo de Servicio y Planta ----	8
1.2	Distribución de la Carga Instalada en - 1950, por Tipo de Servicio y Planta ----	10
1.3	Capacidad Instalada por Tipo de Genera- dor y Sectos Institucional -----	11
1.4	Diferentes Tipos de Cortinas utilizadas en los Aprovechamientos Hidráulicos ---	14
1.5	Representación de una Obra de Toma ----	16
1.6	Diferentes Tipos de Pozos de Oscila - ción -----	18
1.7	Ciclo Representativo de un Aprovecha - miento Térmico -----	22
1.8	Esquema Representativo de un Aprovecha- miento Térmico a base de vapor -----	24
1.9	Turbina de Acción -----	25
1.10	Turbina de Reacción -----	26
1.11	Aprovechamientos Geotérmicos -----	28
1.12	Fisión Nuclear, Reacción en Cadena ----	29
1.13	Diagrama Simplificado de una Planta Nu- cleoeléctrica -----	31
1.14	Generador Eléctrico de Turbina de Gas--	32
1.15	Representación Esquemática de una Plan- ta de Ciclo Combinado -----	35
1.16	Representación Gráfica de la cap cidad- del Sistema de Producción 1980-2000----	41

2.1	Diagrama de Bloques Generalizado del Comparador -----	44
2.2	Características Iniciales de un Comparador -----	47
2.3	Relevadores de Atracción Magnética--	51
2.4	Relevadores de Inducción -----	53
2.5	Relevador Traductor-----	55
2.6	Generador Básico de Hall -----	56
2.7	Relevador de Hall -----	57
2.8	Comparador de Puente Rectificador---	58
2.9	Circuito Básico de Relevadores Estáticos -----	60
2.10	Protección Diferencial -----	64
2.11	Representación Unifilar de un Sistema Eléctrico y sus Zonas de Protección -----	69
3.1.	Variación de la Rigidez Dieléctrica del Aceite Aislante -----	85
4.1	Circuito Utilizado para la detección de Sobrecalentamientos -----	91
4.2	Protección Contra Cargas Desbalanceadas -----	94
4.3	Protección contra Fallas a Tierra en el Estator -----	103
4.4	Protección Diferencial de Porcentaje -----	108
4.5	Zonas de Operación del Relevador Diferencial -----	109
4.6	Diagrama Esquemático de un Relevador Diferencial -----	110
4.7	Instalación y Funcionamiento del Relevador Buchholz -----	118

4.8	Conexión de los Transformadores de Corriente para la Protección Diferencial del transformador -----	122
4.9	Dispositivo de Alivio de Presión -----	125
4.10	Diagrama Unifilar Representativo del Esquema de Protección Presentado -----	136
4.11	Diagrama Trifilar Representativo del Esquema de Protección Presentado -----	137

Tabla		Página
4.1	Potencia Inversa Requerida para <u>Mo</u> torizar un Generador -----	98
4.2	Factores de Sobrecarga para Trans- formadores de Puesta a Tierra-----	105
4.3	Valores de Ajuste para el Releva - dor Buchholz -----	118
4.4	Amplitudes de Armónicas de la Co - rriente Magnetizante-----	121
4.5	Clasificación de los T.Ps., con - respecto al Burden -----	129
4.6	Clasificación de los T.Ps., con - respecto a la presición-----	129
4.7	Clasificación de los T.Cs. con <u>res</u> pecto al Burden-----	132
4.8	Clasificación de los T.Cs., con <u>res</u> pecto a la presición-----	132

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

Todo país en vías de desarrollo como el nuestro, establece complejos sistemas para lograr su desenvolvimiento socio-económico, para ello, preparan planes y programas específicos para cada sector productivo que permita la consecución de las metas establecidas.

México se encuentra actualmente en franca etapa de desarrollo, en que las innovaciones en los aspectos sociales, económicos y políticos son necesarias, por lo cual el Sector Eléctrico Mexicano es parte indispensable para la explotación racional de los recursos con que cuenta el país, en cuanto a generación y distribución de la energía eléctrica y de esta forma coadyuvar en la resolución de la problemática productiva nacional.

El desarrollo que han experimentado las organizaciones productivas en el país, demandan una fuente de energía confiable y barata, ya que tenemos que en México existe una demanda aproximada de 800×10^{12} kilocalorías anuales .

Tomando en cuenta que el petróleo es un recurso no renovable, así como el encarecimiento de los energéticos que se ha presentado desde 1973 a la fecha, ésto a raíz del llamado embargo del petróleo de los países Arabes al mundo Occidental, surge la necesidad de encontrar una nueva fuente de energía que sustituya a los hidrocarburos, siendo la

electricidad la mejor alternativa de solución .

Por lo anterior, se deduce la importancia de los sistemas eléctricos de potencia, así como la continuidad de su servicio. Estos sistemas se constituyen de tres partes esenciales que son: generación, transmisión y distribución.

En el caso del presente trabajo, solo se trata rá lo referente a las plantas generadoras, que es la parte más importante del sistema. Existen varios tipos de plantas, las que se clasifican dependiendo de la energía que requieren para su funcionamiento y su aportación dentro del sector eléctrico.

Ahora bien, dada la condición de que el suministro de energía eléctrica debe ser constante y carente de interrupciones, deberá de evitar los paros de las plantas generadoras innecesarios, ya que de otra manera, se tendrían graves transtornos en el país.

Por otra parte, las constantes alzas en la demanda de energía eléctrica, provocan que las plantas generadoras trabajen sobre su máxima capacidad instalada y a veces en condiciones de sobrecarga. Por lo cual, es necesario dotar a las mismas de un sistema que vigile su funcionamiento, además de protegerlas de las condiciones anormales y de falla que pudieran incidir durante su funcionamiento.

Tomando en consideración estos puntos de vista, la planeación realizada para desarrollar el presente trabajo, permitió ordenar la información recabada en cinco capítulos los mismos que exponen los resultados obtenidos en los términos siguientes :

El primer capítulo, tiene como objetivo principal dar a conocer las necesidades que propiciaron la utilización de la energía eléctrica, así como los diferentes tipos de

plantas generadoras que constituyen el sector eléctrico mexicano y su importancia en el desarrollo del país.

El segundo capítulo nos presenta de manera general los diferentes tipos de relevadores que se utilizan en la protección de los sistemas eléctricos de potencia, así como una clasificación.

Dado que el estudio de los relevadores es muy amplio y complejo el trabajo se encarga de dar solo los principios o bases de funcionamiento y aplicación de los mismos.

El tercer capítulo, denominado "Clasificación de las Fallas que afectan a las Plantas Generadoras y sus Consecuencias", tiene como propósito fundamental el poner de manifiesto los orígenes posibles de las perturbaciones que inciden en las plantas generadoras, así como los trastornos y daños que ocasionan .

En el cuarto capítulo, se presenta un esquema de protección para un conjunto generador transformador, el cual se basó en la clasificación de las condiciones de trabajo de los generadores y los transformadores, por lo que se puede tener tres tipos de condiciones que son: Normales, Anormales y de Falla .

El quinto capítulo, contiene de manera resumida, las conclusiones a que se ha llegado como resultado del trabajo con lo que se finaliza el mismo .

C A P I T U L O 1

DESCRIPCION GENERAL DE LAS PLANTAS GENERADORAS QUE EXISTEN EN MEXICO

A. ANTECEDENTES HISTORICOS.

El origen de la electricidad data del año de 1831, en el cual fue descubierto el fenómeno de inducción-electromagnética por el científico Ingles, Miguel Faraday; actividad que por su naturaleza puede considerarse el predecesor del generador eléctrico, cuyo estudio y desarrollo marcó el inicio de la producción de la energía eléctrica por medio de dispositivos electromecánicos rotativos, los cuales constituyen la parte esencial de los sistemas eléctricos de potencia.

A partir del descubrimiento de Faraday los avances que en este aspecto se obtuvieron, fueron decisivos para el inicio de la obtención y aplicación de la energía eléctrica para el desarrollo industrial de los países.

Paralelamente con lo anterior, en México surge la minería como una actividad industrial de gran relevancia en las últimas décadas del siglo XVIII, en la cual se obtenía una considerable producción de oro y plata principalmente.

Otro tipo de industria que floreció en nuestro país fue la industria textil. Las ciudades principales de la industria del tejido fueron: México, Texcoco, Puebla, Oaxaca, Tlaxcala, Querétaro y Celaya .

A final del siglo XVIII, había cerca de 2000 telares en el país, que inicialmente eran operadas con plantas de vapor, mientras que en las minas la totalidad del

trabajo era desarrollado por medio de los hombres que ahí la
boraban .

A medida que estas dos industrias se desarrollaban, crecía su demanda de energía para su operación, lo cual pro-
pició la utilización de la energía eléctrica dentro de la in -
dustria mexicana.

En el año de 1879, se tiene el principio de la apli-
cación de energía eléctrica en nuestro país, cuando una fábrica
textil instaló una planta generadora para su uso particular.

Posteriormente, las compañías mineras instalaron pe-
queñas plantas eléctricas, las cuales suministraban la energía a las bombas que se utilizaban en las minas para desalojar el-
agua de los tuneles. Tratando de obtener el mayor provecho de-
estas plantas generadoras, se les utilizó también en el sumi -
nistro de energía para alumbrado, la cual sirvió para que las-
mismas compañías mineras previeran una nueva necesidad de energía
eléctrica para uso público.

A medida que el desarrollo industrial en el país se consolidaba, el suministro del fluído eléctrico se iba hacien-
do cada vez más necesario, por lo que se crearon compañías de-
dicadas a la producción y venta de energía eléctrica.

En 1881 se crea en México la primer compañía eléc -
trica con fines lucrativos, considerándose éste como el inicio
de los sistemas de potencia en nuestro país. Posteriormente el
4 de septiembre de 1882, es construída por Thomas A. Edison, -
la Edison's Pearl Street en la ciudad de New York, la cual es-
considerada para algunos autores como el principio mundial ha-
cia la producción de la energía eléctrica.

Inicialmente, la transmisión y distribución se hacia a base de corriente continua, la que era generada por dinamos, los cuales fueron desarrollados por Gramme en 1870.

Esto presentaba ciertas limitaciones para el crecimiento de los sistemas de potencia, pudiendo hacer mención entre otras la siguiente: la distribución a grandes distancias no se podía lograr, ya que a medida que se incrementaba la distancia de transmisión, se afectaba de igual forma el diámetro de los conductores.

Mercel Deprez presentó una solución a esta limitante, cuando propuso la tesis de que se podía disminuir considerablemente las pérdidas con la transmisión de potencia a voltajes elevados. Estos sistemas de corriente continua fueron desplazados por los de corriente alterna monofásicos.

El rápido incremento en la demanda de energía eléctrica condujo al desarrollo de los sistemas polifásicos los que representaban ciertas ventajas sobre los sistemas monofásicos como por ejemplo: la potencia total suministrada es constante en los sistemas polifásicos equilibrados; mientras que en el monofásico es pulsante, otra muy importante es que para los sistemas polifásicos, los generadores o motores son más pequeños y como consecuencia menos costosos que los necesarios en los sistemas monofásicos.

Las primeras centrales de producción y distribución que se instalaron en México, eran termoeléctricas.

En los inicios del siglo XX se principió a utilizar la energía de las caídas de agua para la generación, en primera instancia se aprovechaban las caídas naturales, de gran altura, lo que representaba aprovechamiento de bajo costo.

El primer aprovechamiento hidroeléctrico de importancia, representó la construcción de la planta de Necaxa, en el estado de Puebla, la cual surtiría a la ciudad de México a través de una línea de 60 KV.

Como se mencionó anteriormente, la generación estaba en manos de compañías particulares lo que propiciaba una irregular distribución de la energía eléctrica.

Observando la necesidad de que existiera una mejor distribución del fluido eléctrico, el cual acarrearía grandes beneficios para los usuarios, el gobierno creó en 1933 la Comisión Federal de Electricidad la cual tendría como objetivo, el de satisfacer la demanda del fluido eléctrico a un cierto nivel de seguridad y costo mínimo, tomando en cuenta las posibilidades económicas y energéticas a fin de coadyuvar en el desarrollo integral del país. De manera general puede decirse que la consolidación de la industria en México, se lleva a cabo con la expropiación de las compañías petroleras y la nacionalización de la industria eléctrica en el año de 1958. Para este año la capacidad instalada en nuestro país era de 2560 KW y se encontraba distribuida de la manera como se muestra en la figura 1.1.

La nacionalización de la industria eléctrica, originó un desarrollo positivo en la generación, transmisión y distribución del fluido por lo que en 1979 se contaba con una capacidad instalada de 16,258,000 KW; es factible observar que el 86.5% de la totalidad de generación eléctrica en el país, está en manos de la Comisión Federal de Electricidad .

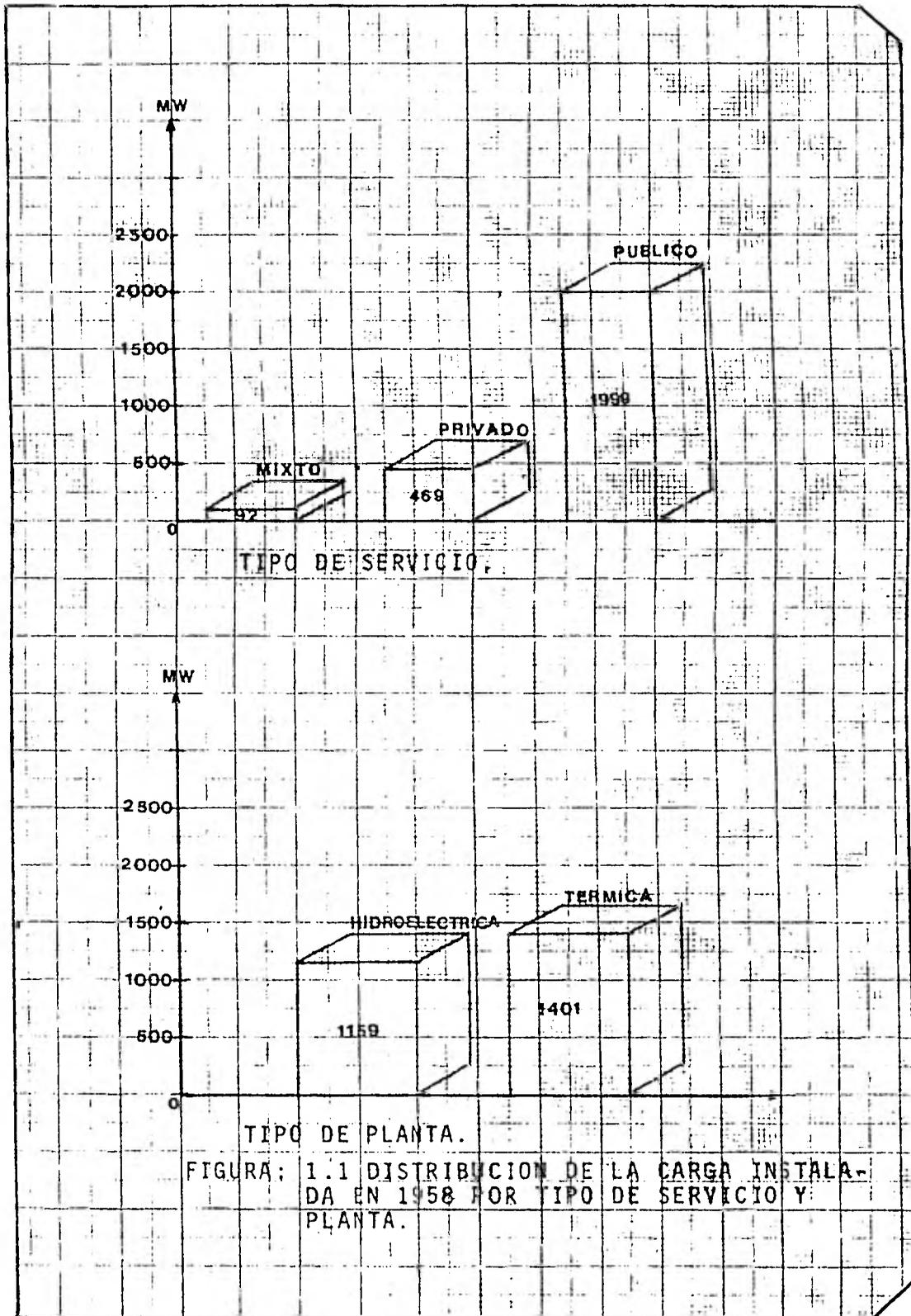


FIGURA: 1.1 DISTRIBUCION DE LA CARGA INSTALADA EN 1958 POR TIPO DE SERVICIO Y PLANTA.

B. EL SECTOR ELECTRICO MEXICANO .

Para la comunidad especializada el llamado Sector Eléctrico Mexicano agrupa a la Comisión Federal de Electricidad y a la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A. (en liquidación).

Es digno mencionar que desde su creación, la Comisión Federal de Electricidad ha proyectado y construido casi la totalidad del Sistema Eléctrico Nacional. Desde el punto de vista de Sector Productor de Energía Eléctrica y Suministrador del Servicio Público, éste es el organismo del estado encargada de dicha función y únicamente se menciona a la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A. (en liquidación), como otro organismo que solo en ciertos aspectos administrativos de importancia es representativa por si misma; ya que de hecho ésta es regida por la Comisión Federal de Electricidad, dentro de la planeación nacional.

Como anteriormente se mencionó la creación de la Comisión Federal de Electricidad se autorizó para 1933, pero en realidad fue creada en 1937, y fue hasta el año de 1944 - cuando principio a intensificar su labor. Para 1950 se tenían en servicio plantas con capacidad instalada de 1235 KW. El cual estaba distribuido en la forma que se ilustra en las gráficas de la figura 1.2.

Analizando la capacidad instalada y los tipos de generación de energía eléctrica de los años cincuenta y sesenta se encuentra que la generación térmica era prácticamente el 50% del suministro total y posteriormente se observa decrecer la proporción de la generación hidráulica en relación a la termoeléctrica; así como la incorporación al Sistema Eléctrico Nacional de otros tipos de aprovechamiento, esto se aprecia más claramente en la figura 1.3.

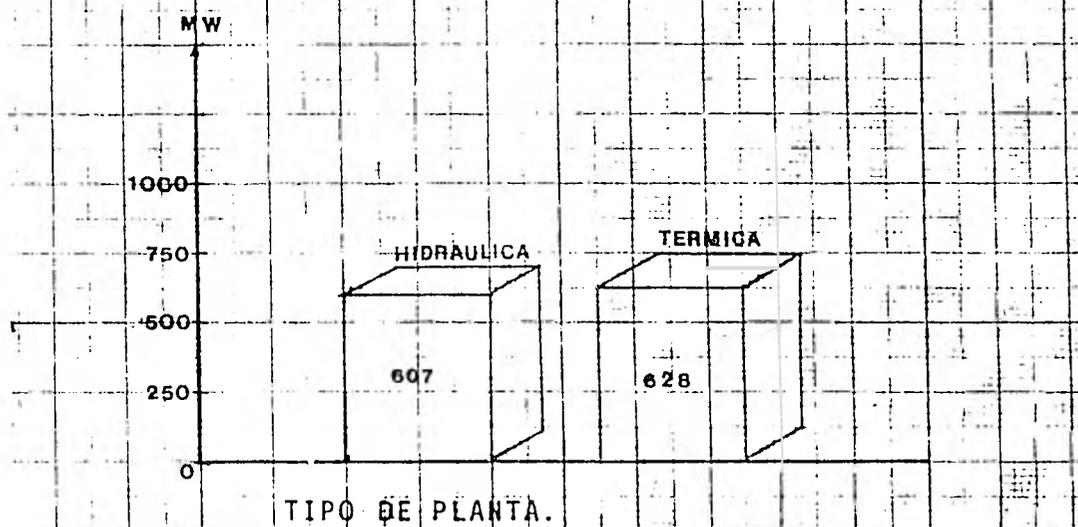
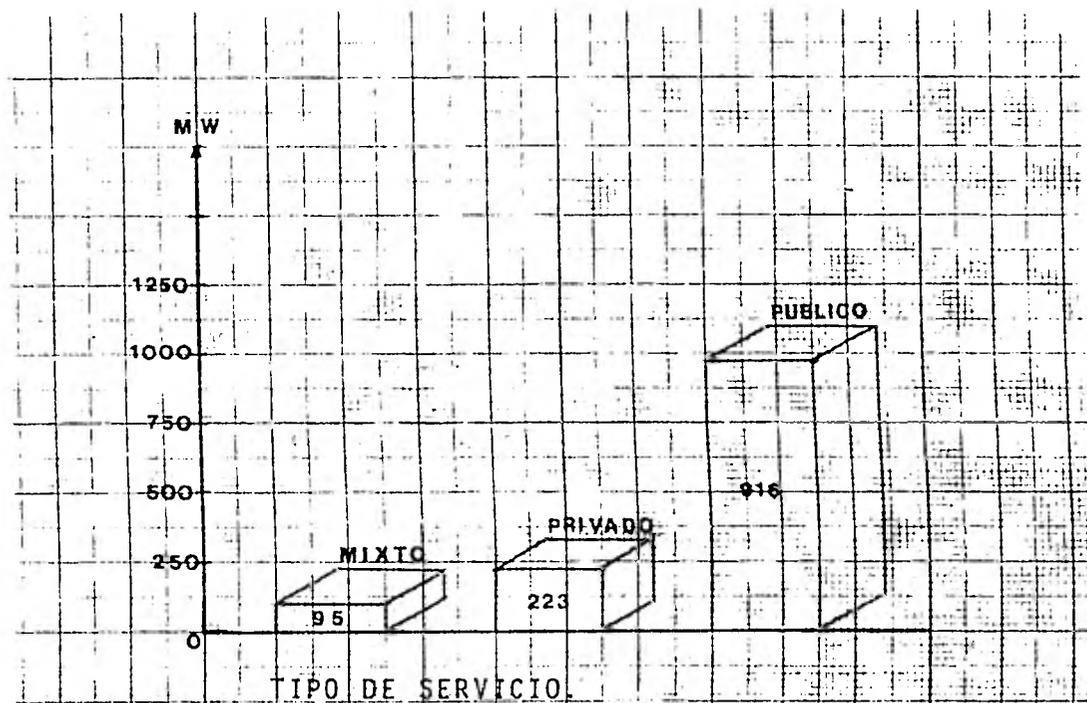
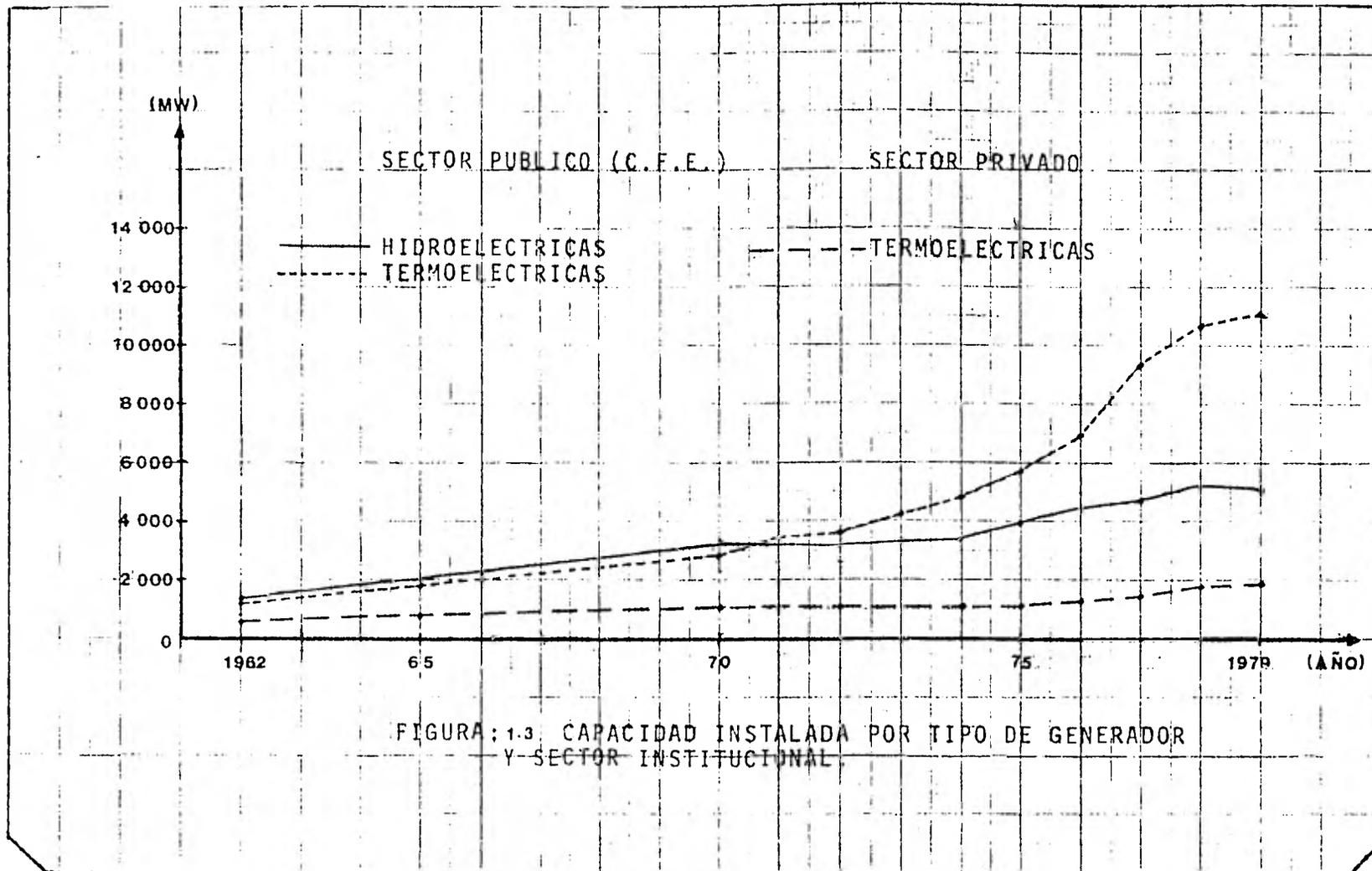


FIGURA: 1.2 DISTRIBUCION DE LA CARGA INSTALADA EN 1950 POR TIPO DE SERVICIO Y PLANTA.



A partir de los años sesenta hemos visto que se dedica ya un gran esfuerzo a desarrollar otros recursos naturales como se podría mencionar a los siguientes:

- a) La Geotérmica
- b) Carbón de piedra
- c) Las Mareas
- d) La Nucleoeléctrica
- e) Energía Solar

La explotación de estos recursos permitirá ahorrar anualmente cantidades muy importantes de combustibles - de hidrocarburos tan necesarios e importantes y que por ser un recurso no renovable se tiene la imperiosa necesidad de - tratar de racionalizarlos; sin embargo, no se puede dejar de considerar la necesidad de seguir construyendo plantas termoeléctricas de tipo convencional, es decir, que quemen gas natural, combustóleo y otros; para balancear y dar seguridad a la red nacional interconectada por las diversas fallas que - eventualmente pudieran incidir en ésta, tal sería el caso de una sequía intensa en el país, el cual produciría transtornos importantes en la generación de fluido eléctrico; ya que en el momento actual la generación hidroeléctrica instalada - representa el 36% y en generación el 30% del total.

1. Tipos de aprovechamientos que constituyen el Sector Eléctrico Mexicano.

El Sector Eléctrico Mexicano, es el encargado - de satisfacer la demanda de energía eléctrica para lo cual , proyecta, construye y controla los aprovechamientos necesarios que le permitan obtener la energía que nuestro país demanda - para su desarrollo integral.

Al haberse nacionalizado la industria eléctrica en México, la Comisión Federal de Electricidad ha sido la -

encargada de prever, proyectar, financiar, construir y mantener en funcionamiento las plantas generadoras, así como, los sistemas de transmisión y distribución de energía para abastecer las demandas presentes y futuras de México. Por lo que el Sector Eléctrico Mexicano cuenta con dos principales tipos de aprovechamiento que son:

- a. Aprovechamientos Hidráulicos.
- b. Aprovechamientos Térmicos.

a. Aprovechamientos Hidráulicos. Este tipo de aprovechamientos se pueden definir como, el conjunto de obras que permite aprovechar la energía hidráulica de un río.

En el caso de las hidroeléctricas esta energía es aprovechada para producir trabajo, el cual, mediante los generadores se transforma en energía eléctrica.

En el siglo XVIII apareció la rueda aplicada a los transportes y la producción de energía para molinos, aunque un siglo antes, Leonardo De Vinci había diseñado un tipo de turbina para el aprovechamiento hidráulico el cual no fue utilizado. Estas fueron las predecesoras de las turbinas actuales, y se considera el descubrimiento de la turbina o rueda hidráulica como el inicio de los aprovechamientos hidráulicos, ya que es ésta la que transforma la energía del agua en trabajo, principio que es utilizado en los aprovechamientos hidroeléctricos.

A continuación se hará una descripción general de las partes más importantes de un aprovechamiento hidroeléctrico.

En la descripción se excluyen algunos componentes; no por carecer de importancia, sino por que no es el objetivo del presente trabajo.

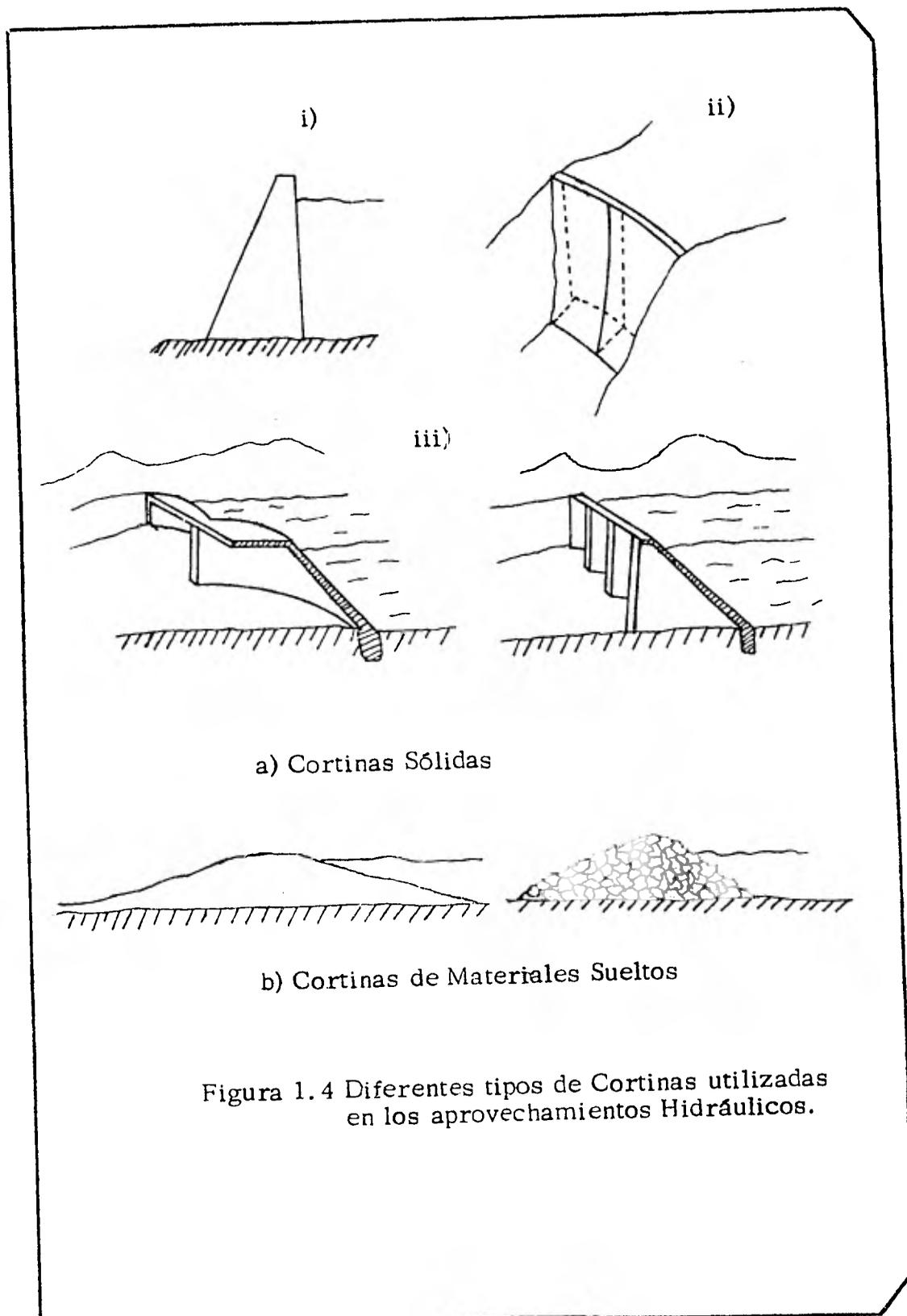


Figura 1.4 Diferentes tipos de Cortinas utilizadas en los aprovechamientos Hidráulicos.

(1). Obra de retención. Consiste de un dique o cortina la cual puede ser transversal o diagonal, algunas presentan vertedor de excesos. El objetivo de esta obra es el de represar el agua aumentando su nivel y su energía potencial, existen varios tipos de diques y cortinas las cuales se clasifican en base al material con que se construyen en :

(a). Sólidas. Este tipo de cortinas están construídas de concreto o mampostería y comprenden los tipos siguientes; i) De gravedad, ii) De arco cúpula, iii) De arcos-múltiples.

(b). De materiales sueltos. Como su nombre lo indica estas cortinas están constituídas a base de materiales sueltos amontonados en el lecho del río, dentro de éstas tenemos dos tipos que son: i) Dique de tierra, ii) Cortinas de enrocamiento, la figura 1.4 nos muestra los diferentes tipos de cortinas descritos con anterioridad.

(2). Obra de Toma. Por medio de ésta, es posible tomar la cantidad de agua requerida para la generación de energía eléctrica. En la figura 1.5 es posible apreciar la representación de una obra de toma .

(3). Obra de conducción. Mediante esta obra se transporta el agua desde la obra de toma, hasta la central hidroeléctrica, la obra de conducción está constituída por :

(a). Canales de alimentación. Es el conducto abierto o cerrado que transporta el agua de la obra de toma a el tanque de reposo, el criterio para determinar si el conducto será abierto o cerrado (escurrimiento libre o a presión) dependende de la función de la central.

Si la central cumple con una función de regulación de potencial, tendrá canales cerrados, los cuales le

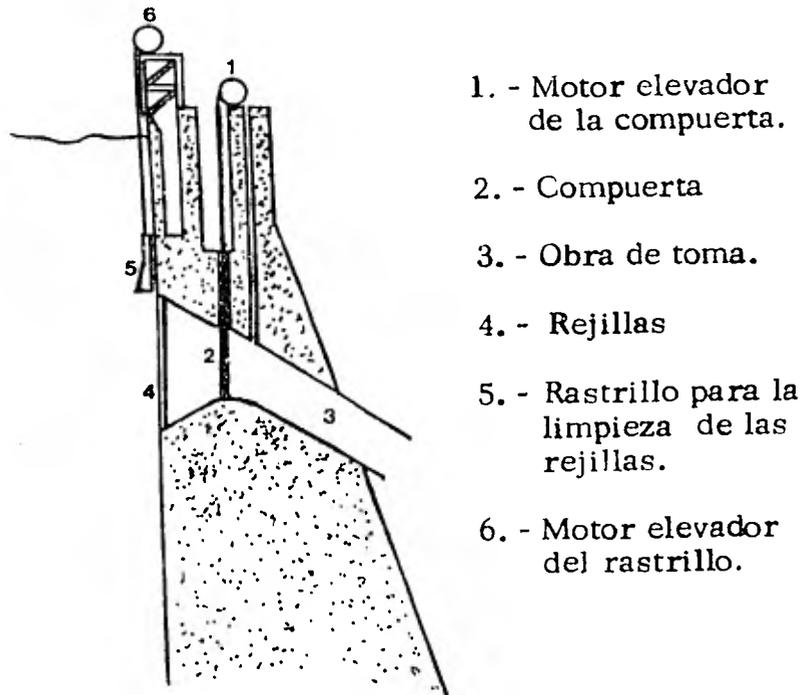


Figura 1.5 Representación de una Obra de toma.

permitirán modificar el gasto demandado por la central instantáneamente, lo que conlleva una variación rápida de la potencia generada.

Cuando la central es de producción fija podrá tener canales abiertos, ya que no requerirá de variaciones bruscas en el gasto.

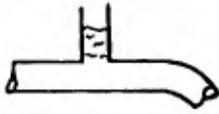
(b). Tanque de reposo. Es un depósito que sirve de unión entre la tubería de presión y el canal, posee las dimensiones adecuadas para propiciar la decantación de elementos sólidos que pudiera llevar el agua. Los tanques de reposo solo se utilizan para los aprovechamientos con canales de alimentación abiertos.

(c). Tubería de presión. Esta sirve de unión entre la obra de alimentación y las turbinas. Por lo general se construye de concreto armado o acero, cuando son de éste último tipo, deben de ser de un diámetro superior a los 45 cm, a menos que sean de acero inoxidable se usarán diámetros menores.

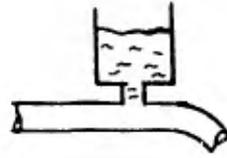
(d). Pozo de oscilaciones. La inmovilización de una columna de agua en la tubería de presión, trae consigo un efecto llamado golpe de ariete, ésto da lugar a un esfuerzo considerable en la tubería de presión, lo cual podría sobrepasar la capacidad de resistencia de la obra provocando serios desperfectos. Por lo anterior se hace necesario instalar un pozo de oscilaciones, el cual servirá de dispositivo amortiguador del golpe de ariete, existen varios tipos de pozos de oscilaciones los cuales se muestran en la figura 1.6.

(4). Central. En ésta se encuentran los mecanismos encargados de transformar la energía potencial del agua en energía eléctrica, así como, dar al fluido eléctrico

Salto Pequeño

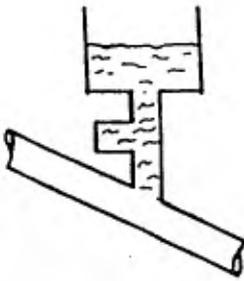


Simple

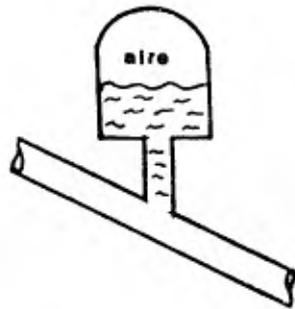
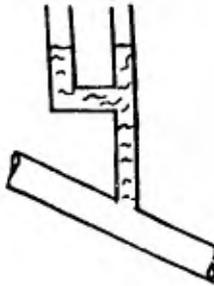


Con estrangulador

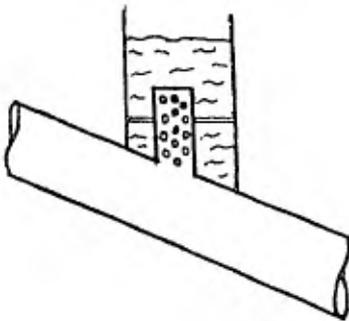
Salto mediano y grande



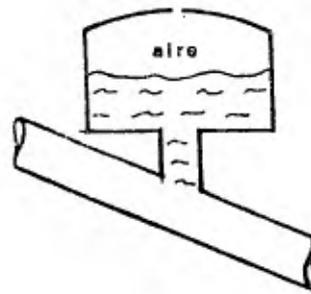
Doble cámara



Neumático



Diferencial



Semineumático

Figura 1.6 Diferentes tipos de pozos de oscilaciones.

las características necesarias para su óptimo aprovechamiento y está constituida por :

(a). Turbinas. Son los elementos encargados de transformar la energía potencial contenida en el agua a energía mecánica. Existen tres tipos principales de turbinas hidráulicas, las cuales se utilizan dependiendo la altura de caída por lo cual tenemos lo siguiente :

i). Turbinas Pelton. Este tipo de turbinas se utilizan para alturas de saltos grandes dentro del margen de 100 a 1000 m.

ii). Turbinas Francis. Son las utilizadas para saltos de altura medianos, comprendidos entre los 400 a 15 m.

iii). Turbinas Kaplan. Estas se utilizan para saltos de altura pequeños los cuales varían entre los 50 a 15 m.

(b). Generadores y Excitadores o Excitatrices. Este es el conjunto mediante el cual se transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

(c). Transformadores. Estos se usan para elevar o disminuir la tensión hasta el rango que permita su mejor distribución, además de económica.

(d). Controles y protectores. Son los encargados del control y supervisión de cada una de las partes constitutivas de la planta hidroeléctrica, así como, evitar las graves consecuencias en caso de que se presente una falla .

Ahora bien, es en la anterior descripción en donde casi todos los autores especialistas en la materia

coinciden, ya que en la clasificación de los aprovechamientos hidráulicos existen varias opiniones como por ejemplo se cita a Carlos Luca M.¹ el cual, hace su clasificación en base a la forma en que se presenta la tubería de presión y la obra de toma.

Otra forma de clasificar o tipificar a las plantas hidroeléctricas, que desde un punto de vista general y que parece más acertado que el anterior sería, el que se basa en la altura de caída y el gasto, ya que son éstas, las características principales para determinar la construcción y operación de las hidroeléctricas. Los diferentes tipos que se tienen tomando en cuenta lo anterior son:

(a). Centrales de Gran Salto y Gasto Pequeño.- En este tipo la altura de caída es grande (alrededor de 1000-m.) lo que hace que se utilice un gasto pequeño para su funcionamiento. Ejemplo de este tipo de planta es la que se encuentra en Reisseck, Australia con una altura de caída de 1765 m., en nuestro país tenemos la de Mazatepec con una altura aproximada de 600 mts.

(b). Centrales de Salto y Gasto Mediano. Como se puede deducir estas centrales tienen la característica de que su altura de caída, así como su gasto son medianos. Ejemplo de este tipo es la planta de Durazno, con una altura de caída de 108 mts.

1

Carlos Luca M. Plantas Eléctricas. (8a. Edición; México: Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. 1980) .

(c). Centrales de Saltos Pequeños y Gasto Mayores. A este tipo de centrales se les conoce también como centrales de llanura o agua fluyente; puesto que tiene que adaptar su producción al caudal disponible son de producción irregular. La altura de caída de este tipo de centrales varía entre algunas decenas de metros.

Las plantas hidroeléctricas fueron las que proporcionaban la mayor parte de la energía eléctrica durante la primera mitad del siglo XX, pero a partir de los años cincuenta de nuestro siglo se tuvo un importante desarrollo en los aprovechamientos térmicos, los cuales siguen siendo los principales productores de la energía que se consume en nuestro país.

b. Aprovechamientos Térmicos. Este tipo de aprovechamiento se puede definir como; el conjunto de instalaciones diseñadas y construídas para utilizar la energía calorífica proveniente por lo general de la ignición de combustibles fósiles .

Los principales aprovechamientos térmicos se tienen en las máquinas de vapor. Estas utilizan la energía calorífica para producir vapor, el cual posteriormente cede su energía para ser transformada en trabajo mecánico.

La aplicación de la energía contenida en el vapor fue un importante descubrimiento de Eduardo Somerset en el siglo XVII. Por la importancia y aplicación que tuvo en la industria, se considera a la máquina de vapor como el símbolo de la Revolución Industrial.

En la figura 1.7 se puede apreciar gráficamente la secuencia que se sigue en los aprovechamientos térmicos así como, la forma en que se transforma la energía a través del proceso.

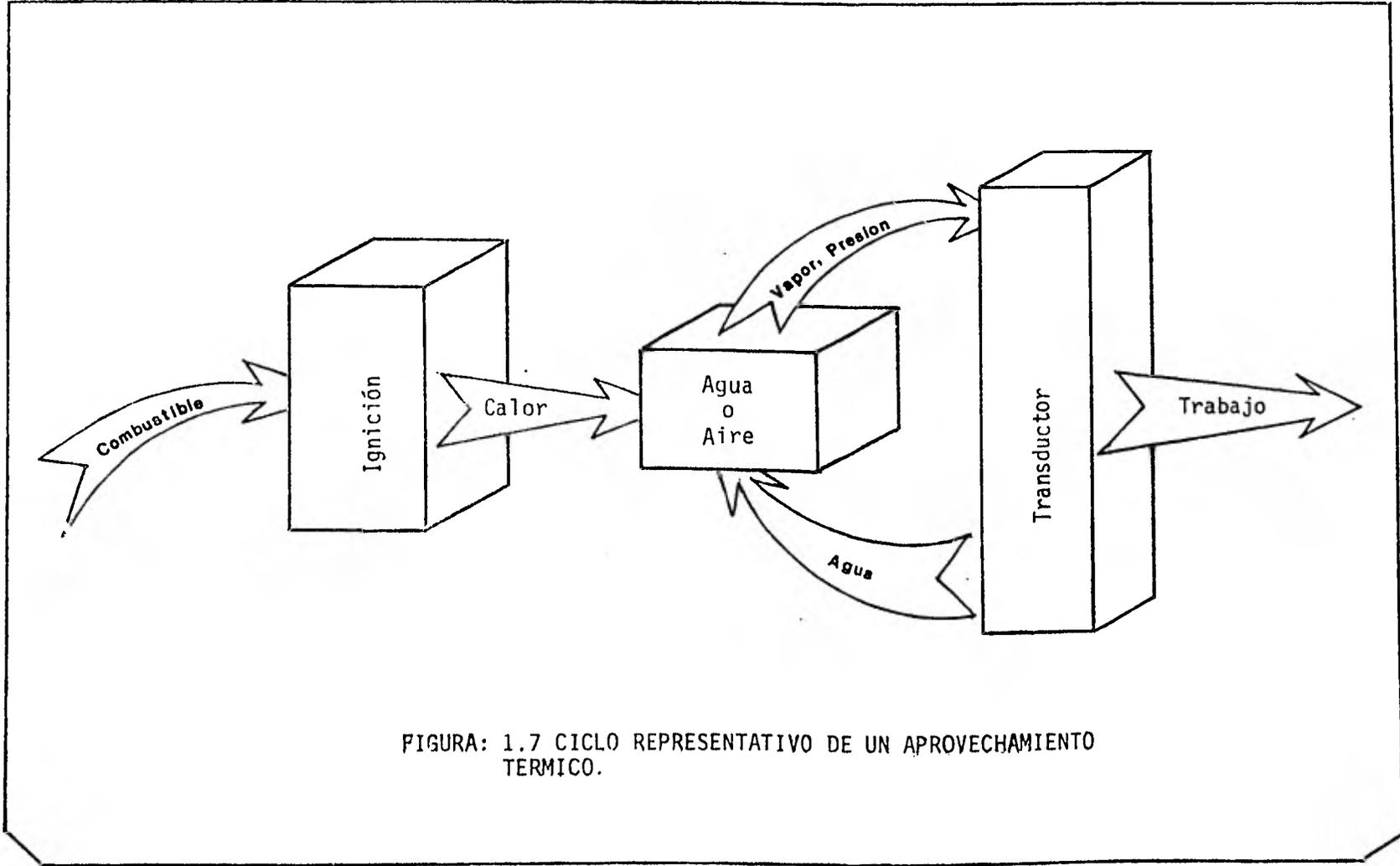


FIGURA: 1.7 CICLO REPRESENTATIVO DE UN APROVECHAMIENTO TERMICO.

Los aprovechamientos térmicos para la generación de energía eléctrica en México como en el mundo, fueron los primeros en utilizarse, un ejemplo de esto se tuvo en la ciudad de New York con la instalación de la primera central generadora importante, por Tomas A. Edison, dicha planta utilizaba calderas acuatubulares las cuales generaban vapor para 6 generadores bipolares.

En México, los aprovechamientos térmicos para la generación de energía eléctrica están distribuidos en los diferentes tipos que a continuación se mencionan :

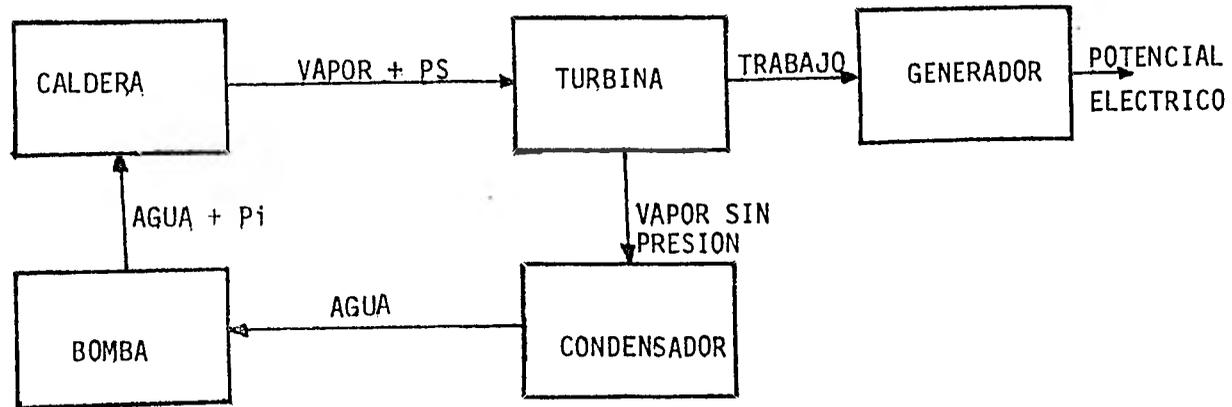
1). Vapor. Este tipo de aprovechamiento utiliza la energía del vapor para producir energía eléctrica. Es uno de los principales aprovechamientos en México², ya que representa el 47.2% del total de la capacidad instalada.

El principio de funcionamiento de las termoeléctricas de vapor se representa en la figura 1.8.

Como es posible observar en la figura, éstos aprovechamientos constan de cinco partes principales que son :

(a). Caldera. Es el dispositivo en el cual se lleva a cabo la ignición del combustible que puede ser; carbón, petróleo crudo o gas natural. Este primer paso se realiza en el horno u hogar de la caldera, para posteriormente suministrar el calor de la combustión a el agua y obtener así el vapor.

² Secretaría de Programación y Presupuesto. El Sector Eléctrico en México. (México: Coordinación General de los Servicios Generales de Estadística Geográfica e Informática, C.F.E. 1981).



P_i . PRESION DE ENTRADA A LA CALDERA.

P_s . PRESION DE SALIDA DE LA CALDERA.

FIGURA; 1.8 ESQUEMA REPRESENTATIVO DE UN APROVECHAMIENTO TERMICO A BASE DE VAPOR.

Existen dos tipos de calderas las cuales se describen en los rubros siguientes :

i) Acuatubulares. En este tipo de caldera el agua circula por medio de tubos en el interior de la caldera, éste es el tipo clásico que se utiliza en las centrales termoeléctricas de vapor .

ii) Piro tubular. En éstas, el aire caliente circula en tubos sumergidos en agua produciendo así el calentamiento de la misma, obteniéndose de esta forma el vapor.

b). Turbinas. Son éstas las encargadas de aprovechar la energía del vapor y transformarla en trabajo mecánico rotatorio, el cual transmite a el generador eléctrico. Principalmente se utilizan dos tipos de turbinas las cuales se conocen con el nombre de :

i). Turbinas de Acción. Para el caso de estas turbinas, el vapor es proyectado por medio de toberas a las paletas móviles montadas en una rueda , la cual mediante la fuerza del vapor que incide sobre las paletas obtiene un movimiento giratorio, éste se puede observar en la figura 1.9.

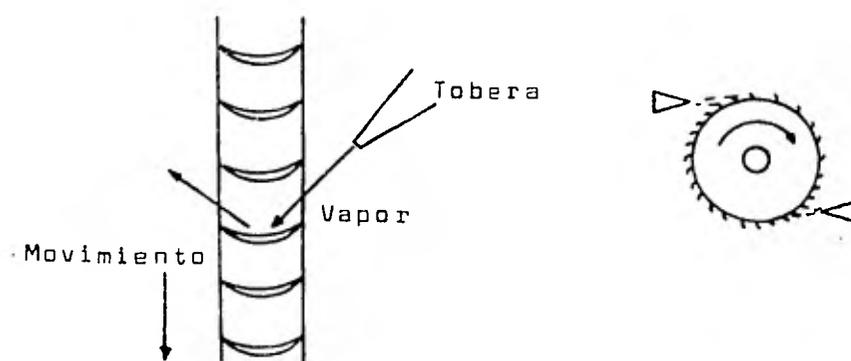


Figura 1.9. Turbina de Acción

ii). Turbinas de Reacción. En este tipo de turbinas no existen las toberas, la proyección del vapor se hace a través de paletas fijas hacia las paletas móviles, las cuales se encuentran montadas en una rueda o rotor. En este tipo de turbinas la expansión del vapor se hace gradualmente en varios pasos, a diferencia del anterior que es en un solo paso. En la figura 1.10 se ilustra la forma de acción de las turbinas de reacción.

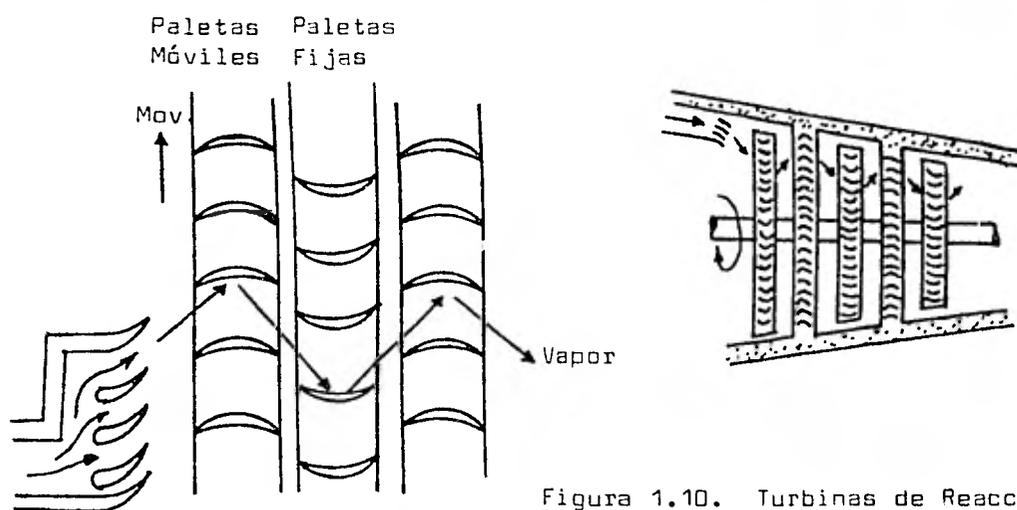


Figura 1.10. Turbinas de Reacción

(c). Generador. Es el encargado de transformar el trabajo mecánico rotatorio en energía eléctrica.

(d). Condensador. En esta parte del aprovechamiento se enfría el vapor para pasar el agua, del estado gaseoso a líquido .

(e). Bombas. Son las encargadas de proporcionar a el agua la presión (P_i) de entrada a la caldera y enviarla a la misma .

Ahora bien, existen en México otros tipos de plantas generadoras que pueden situarse dentro de las termoeléctricas de vapor, éstas son :

(a). Geotérmicas. Una planta geotérmica es la que utiliza el vapor natural proveniente del subsuelo para alimentar las turbinas. Este tipo de aprovechamientos es similar al de vapor, en lo único que difieren es que las plantas geotérmicas no requieren de calderas, sino que, aprovechan el vapor natural producido por el calor de la tierra, y que sale al exterior por medio de fallas en la corteza terrestre.

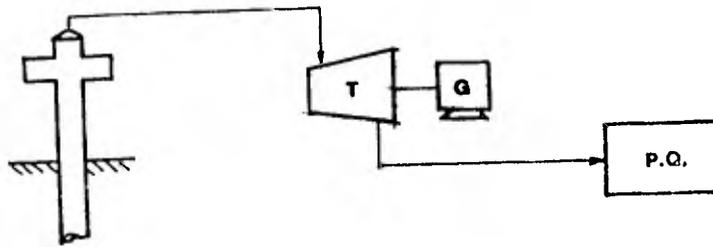
Actualmente se encuentra operando una planta geotérmica en Baja California Norte, con una capacidad instalada de 150 MW. Otras zonas factibles de aprovechamiento de este tipo lo presentan: Ixtlán de los Hervores, Mich., Santiago Papasquiaro, Ogo. Ixtapan de la Sal, Edo. de México, Pathé, Hidalgo.

Existen dos tipos de aprovechamientos del vapor natural que son :

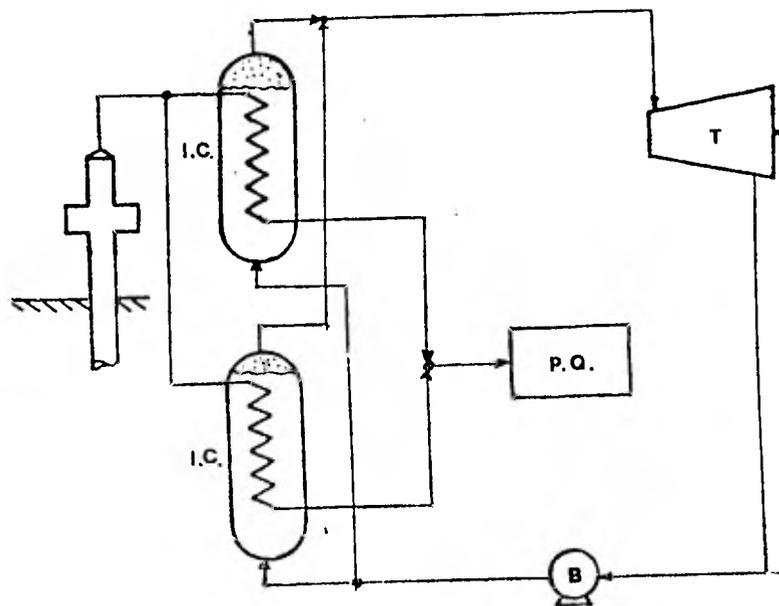
1). Aprovechamiento Directo. En éste tipo se suministra directamente el vapor de las turbinas para posteriormente llevarse a una planta química en la cual es tratada para obtener productos químicos.

ii). Aprovechamientos Indirectos. Para éstos tipos de aprovechamientos solo se utiliza la temperatura del vapor, el cual es llevado a un cambiador de calor para calentar agua y producir vapor, mismo que se suministra a las turbinas, posteriormente el vapor natural es llevado a una planta química para su utilización. En la figura 1.11 se muestran los dos tipos de plantas.

(b). Nucleoeléctricas. Este tipo de plantas aprovechan la energía nuclear, la cual se obtiene mediante la fisión de los elementos pesados tales como el uranio, así como la fusión de los elementos ligeros como el hidrógeno .



(i)



(ii)

I.C. INTERCAMBIADOR DE CALOR. C. CONDENSADOR.
 T. TURBINA. B. BOMBA.
 P.Q. PLANTA QUIMICA.

FIGURA. 1.11 : APROVECHAMIENTOS GEOTERMICOS, (i) UTILIZACION DIRECTA (ii) UTILIZACION INDIRECTA.

El proceso que generalmente se utiliza para la producción de energía nuclear es la fisión de materiales tales como: uranio natural U-235, uranio U-238, torio T-232. Estos últimos son llamados materiales fértiles. En 1905 Einstein establece que la energía es igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz mediante la fórmula $E=MC^2$. Esto quiere decir que la energía liberada por una onza de masa, bastaría para cambiar un millón de toneladas de agua en vapor.

Posteriormente en 1939 Lise Meinter y Otto Frisch postularon que, el uranio tiene solamente una pequeña estabilidad y puede después de capturar un neutrón, dividirse en dos núcleos a la vez que libera una gran cantidad de energía (fisión del núcleo de un átomo). De esta forma se comprobó la veracidad de la teoría de Einstein, iniciándose así el estudio de la energía nuclear.

En la figura 1.12 se puede observar el principio del funcionamiento de los reactores nucleares para la obtención de energía, la cual consiste en una reacción en cadena desatada por la fisión de un núcleo de uranio.

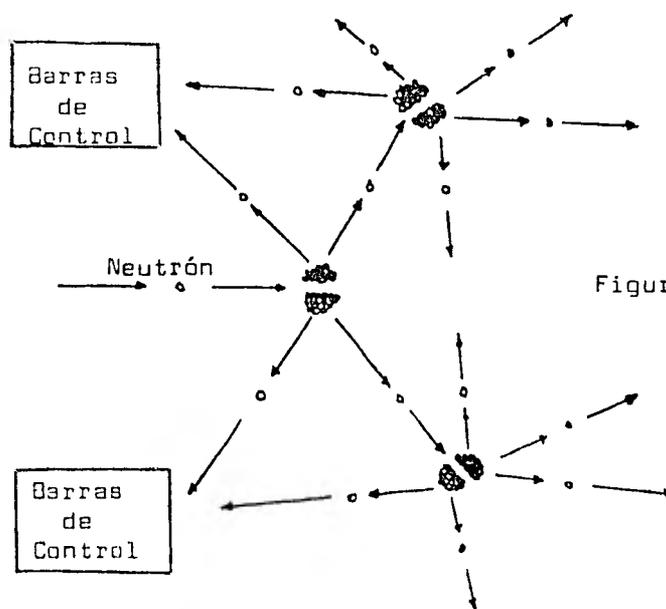


Figura 1.12. Fisión Nuclear reacción en cadena.

Para el caso del presente trabajo, solo es importante notar la gran cantidad de energía calorífica que se desprende de la fisión del núcleo de los materiales radiactivos, la cual es obtenida en los reactores nucleares y se utiliza para producir vapor. Por esto las plantas nucleoelectricas se consideran dentro de las termoelectricas de vapor, ya que su funcionamiento es similar a estas diferenciándose solo en el reactor nuclear el cual vendría haciendo las veces de caldera.

Existen varios tipos de reactores nucleares los cuales han dado resultados positivos, tanto experimental como comercialmente, siendo éstos :

- Reactor de agua a presión (PWR)
- Reactor de agua en ebullición (BWR)
- Reactor sodio - Grafito
- Reactor fast - Breeder (Reactor de cría)
- Reactor homogéneo
- Reactor con refrigerante y moderador orgánico
- Reactor enfriado con gas
- Reactor enfriado con gas a alta temperatura.

La clasificación anterior, se hace en base al refrigerante o medio de extraer la energía calorífica del interior del reactor, para posteriormente ser conducida a un cambiador de calor, en el cual se produce el vapor con el que se alimentan las turbinas.

En la figura 1.13 se aprecia el diagrama simplificado de un reactor nuclear, así como la forma de utilizar la energía calorífica.

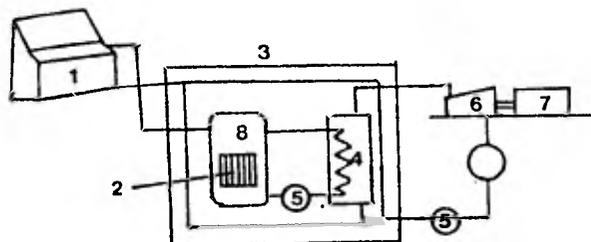
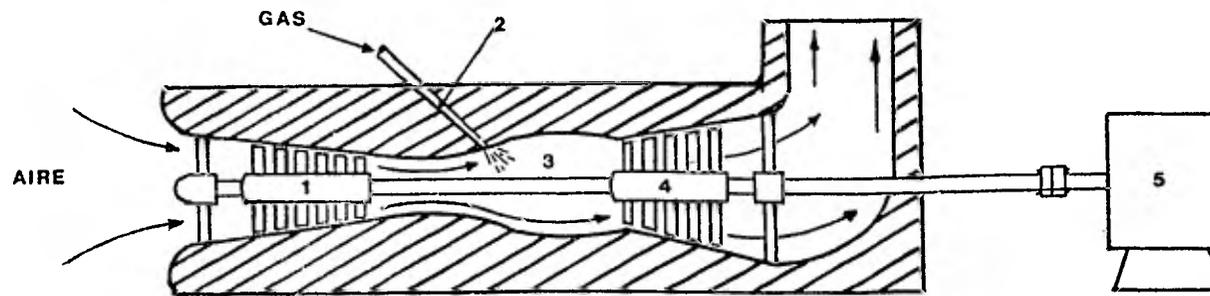


Figura 1.13 Diagrama simplificado de una planta

1. Tablero de control
2. Núcleo del reactor
3. Protección biológica
4. Generador de vapor
5. Bombas
6. Turbina de vapor
7. Generador eléctrico
8. Reactor nuclear

En México, se proyectó la utilización de la energía nuclear para producir energía eléctrica mediante el plan nuclear en el cual se contempla la construcción de 20 nucleoelectricas en todo el país para antes del año 2000. La primera de estas plantas es la nucleoelectrica de Laguna Verde, Veracruz, la cual se tenía pensado que entrara en operación el año de 1978 con una capacidad de 654 MW., lo cual no fue factible lograr, afectando así, todo el plan antes mencionado. Se pretende que en los primeros 200 días de 1982 se coloquen las cargas de uranio enriquecido en el reactor para concluir así, con las obras de la primer nucleoelectrica en México.



- | | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| 1. COMPRESOR AXIAL TIPO CENTRIFUGO. | 4. TURBINA DE GAS. |
| 2. BOQUILLA DE COMBUSTIBLE | 5. GENERADOR ELECTRICO. |
| 3. CAMARA DE COMBUSTION. | |

FIGURA: 1.14 GENERADOR ELECTRICO DE TURBINA DE GAS ELEMENTAL.

2) Turbinas de Gas. Las plantas eléctricas de turbogas, son aquellas que aprovechan el incremento de presión debido a la combustión de gas para mover una turbina, la cual se encuentra acoplada a los generadores eléctricos. Lo anterior se puede observar en la figura 1.14, donde se muestra el principio del funcionamiento de las plantas de turbinas de gas.

La Secuencia del funcionamiento de las plantas turboeléctricas es como se describe a continuación. El compresor (1) toma aire atmosférico y lo comprime para suministrarlo a la cámara de combustión (3), en donde se inyecta el combustible mediante una boquilla (2), lo cual hará posible una expansión brusca de la mezcla aumentando así la presión, característica que es aprovechada por la turbina para producir energía mecánica la cual a su vez, se suministra a los generadores de energía eléctrica.

La generación de electricidad por medio de turbinas de gas, posee una eficiencia muy baja alrededor del 22%, por lo cual en los gases de escape se tiene una importante pérdida o desperdicio de energía calorífica, ya que estos poseen una temperatura aproximada a los 1000^oF.

En México, existen plantas de turbina de gas con una capacidad instalada de 1218 MW., lo que representa un 8.6% de la capacidad total en nuestro país. Se considera que este tipo de plantas generadoras ocupa el tercer lugar en importancia.

3) Plantas Generadoras de Ciclo Combinado. Como se hizo mención anteriormente, existe una fuente de energía calorífica en los gases de escape de la turbina de gas, los cuales son liberados a la atmósfera, lo que representa una importante pérdida de energía. Por tal motivo se pensó en la utilización de dicha energía mediante un módulo recuperador de calor, éste utiliza los gases del escape de la turbina de gas para

calentar agua, obteniendo así, el vapor necesario para la operación de otro tipo de generadores de energía eléctrica.

El módulo recuperador de calor, posee muchos de los elementos de una caldera de combustible fósil convencional tales como: El economizador, un evaporador y un sobrecalentador entre otros, por otra parte, este módulo debe ser diseñado para arrancar y tomar plena carga en un intervalo de tiempo corto, - así como, soportar el choque térmico producido por los gases - del escape cuando son suministrados.

Este tipo de aprovechamiento se le conoce con el nombre de plantas generadoras de ciclo combinado, ya que conjugan la turbina de gas con la de vapor.

Algunas plantas de ciclo combinado poseen un mecanismo selector, el cual permite la salida de operación del módulo recuperador de calor, acomodar en forma independiente los requerimientos de potencia y vapor, la operación independiente de la turbina de gas durante la salida del módulo recuperador de calor y disponer de un control para flujo de vapor.

Una planta de ciclo combinado es representada mediante el diagrama esquemático de la figura 1.15, en la cual se aprecia la secuencia que se sigue en este tipo de aprovechamiento .

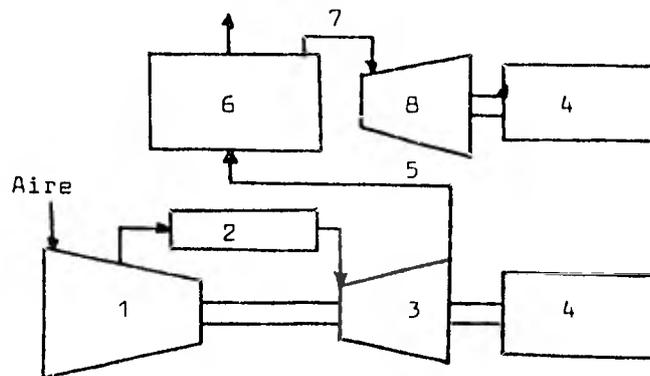


Figura 1.15 Representación Esquemática de una Planta de Ciclo Convinado, partes que la constituyen :

1. Compresor.
2. Cámara de Combustión.
3. Turbina de Gas.
4. Generadores eléctricos.
5. Gases de escape de la Turbina de Gas.
6. Módulo recuperador de calor.
7. Vapor sobrecalentado.
8. Turbina de Vapor .

Plantas modulares iguales a las mostradas en la figura han sido seleccionadas para ser usadas en el sistema de generación de potencia pico. Por la facilidad en el montaje de este tipo de plantas, se tiene un importante plan para su desarrollo y aprovechamiento, considerándose éstas, como una de las principales plantas generadoras para el futuro.

4) Plantas de Combustión Interna. Este tipo de plantas aprovechan la energía mecánica suministrada por un motor de combustión interna. Los principales combustibles utilizados son la gasolina y el diesel. Las plantas de combustión interna constan de tres partes importantes las cuales se enumeran en los rubros siguientes :

a) Motor de Combustión Interna. Es el encargado de suministrar la energía mecánica, la cual obtiene de la ignición del combustible para proporcionarla al generador.

b) Servicios Auxiliares del Motor. Son los encargados de proporcionar las condiciones propicias al motor para su funcionamiento.

c) Generador y Excitatriz. Estos son los encargados de convertir la energía mecánica en eléctrica para su aprovechamiento.

Este tipo de plantas es poco utilizado en nuestro país, solo se tiene en los sistemas aislados como por ejemplo; División Baja California, División Peninsular y pequeños sistemas independientes, con una capacidad instalada de 149 MW, lo que representa un .9% del total.

Otro tipo de generación eléctrica que se está estudiando en México es el aprovechamiento de energía solar.

Este tipo de aprovechamiento no se ha logrado a niveles comerciales en nuestro país, pero se encuentran varias instalaciones prototipo para su estudio. Uno de los proyectos³ más importantes que se tiene en México, sobre el aprovechamiento de la energía solar para la generación de energía eléctrica es, el creado mediante el esfuerzo conjunto del Instituto Politécnico Nacional, el Centro de Estudios Avanzados del I.P.N., la Secretaría de Educación Pública y El Instituto Nacional Indigenista. Para dotar a 122 alberges escolares de zonas indígenas de energía eléctrica para iluminación-

³ Excelsior. México, Noviembre 18 de 1981.
Sección A., p.33.

refrigeración de alimentos y para los servicios de televisión y radiotelefonía por medio de energía solar. Este proyecto requiere la inversión de 18 millones de pesos, los cuales serán aportados por el Instituto Nacional Indigenista.

A través de este capítulo se presentó en forma general, los diferentes tipos de plantas generadoras que constituyen el Sector Eléctrico Mexicano, el cual tiene una generación bruta de 58 070 GWh., de los cuales, los aprovechamientos hidroeléctricos aportan 17 839 GWh. y los 40 231 GWh. restantes son generados por las termoeléctricas .

El Sector Eléctrico Mexicano está integrado - por dos tipos de aprovechamientos, como anteriormente se mencionó, los cuales se dividen en regiones de generación, éstos son :

Hidroeléctricas. Se encuentra dividida en las regiones siguientes: Yaqui-Maya, Balsas-Santiago, Ixtapantongo, Papaloapan y Grijalva.

Termoeléctricas. Las regiones de generación - que corresponde a este tipo de aprovechamientos son: Pacífico Norte, Centro-Norte, Noreste, Central y Golfo. Por otra parte existen en México dos sistemas aislados que los constituyen - la División Baja California y División Peninsular.

C. IMPORTANCIA Y APLICACION DE LA ENERGIA ELECTRICA.

La energía eléctrica es indispensable en las fábricas, comercios, hogar y en la mayor parte de las instalaciones y servicios. Esta es una parte integral de nuestra vida .

La generación bruta de 58 070 GWh., se distribuye de la siguiente manera: 18.7% para el servicio doméstico, - 56% para uso industrial y el restante para los servicios tales como; alumbrado público, bombeo de aguas negras o potables, - riego agrícola, alta tensión para reventa, alta tensión para - minas, etc.

Es importante ver que las grandes industrias - ubicadas en nuestro país y que utilizan la tarifa No. 12 (General para 5 000 Kw. o más, a 60 KV. o más), las cuales son únicamente 94, consumen el 22% de la energía total.

Esta estructura del consumo de energía de nuestro país muestra las condiciones de desarrollo en que nos encontramos, así como, el papel tan importante que tiene la generación y utilización del fluido eléctrico.

Por otra parte, cabe hacer notar el encarecimiento de los energéticos que se ha presentado desde 1973 a la fecha, cuando se dio el llamado embargo del petróleo de los países Arabes del mundo Occidental. Iniciándose así una tendencia hacia el ahorro de los energéticos.

En nuestro caso las fuentes energéticas son propiedad de la nación y son administradas por el estado. Por lo que los precios se fijan no como resultado de los costos de producción, sino tomando en cuenta la función social de desarrollo que representan, lo que nos permite disponer de combustibles y energía eléctrica a precios inferiores del nivel -

internacional contando con disponibilidad y seguridad de abastecimiento, lo que se explica mediante el criterio de servicio y no de lucro.

El Sector Eléctrico Mexicano, consume el 30.6% del total de los hidrocarburos vendidos por PEMEX para la operación de sus plantas generadoras termoeléctricas, las cuales producen 40 231 GWh. lo que representa el 70% del total de la generación bruta. Por lo cual en nuestro país se implementó, - también, la política de conservación de los recursos naturales para la cual, se inició el estudio y aplicación en mayor escala de aquellos recursos que sustituyan a los hidrocarburos, como en el caso de la generación de energía eléctrica a través - de recursos hidráulicos, carbón, geotérmica, energía nuclear y la energía solar.

En el caso de México, la economía y la conservación de los recursos naturales se impone como una obligación - para lograr así, contar con la disponibilidad de estos recursos el mayor tiempo posible, mientras que la ciencia y la tecnología logran encontrar y aplicar sustitutos de estos energéticos.

Hoy en día, nuestro país se enfrenta a uno de - sus más grandes retos: Producir más energía eléctrica ahorrando el máximo de petróleo. Para tal efecto, la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) previó la necesidad de utilizar carbón mineral no coquizable para generar energía eléctrica.

Esta alternativa se ha hecho realidad, con la - puesta en operación de la primera unidad de la termoeléctrica de carbón "José López Portillo", en Piedras Negras, Coahuila , la cual genera 1 200 000 KW. Esta central en sus 30 años de - vida útil transformará en electricidad 170 millones de toneladas de carbón no coquizable, con un consumo anual máximo de 4.5 millones de toneladas lo que permitirá una generación -

anual de 8 millones de Kilowatts/hora, los cuales producidos por una termoeléctrica convencional representarían un insumo de 12.5 millones de barriles de combustóleo al año, a un precio en los mercados internacionales de casi diez mil millones de pesos.

En un estudio mundial formulado el año pasado por 16 países, se llegó a la conclusión de que el carbón mineral no-coquizable es, ahora, puente a disposición de la humanidad para salvar la actual crisis energética y satisfacer una alta proporción de sus necesidades, en tanto se ponen a su alcance otras fuentes que, como la energía solar, que ya se vislumbra en el horizonte tecnológico.

En nuestro país, se ha detectado que un 28% de la población carece de los beneficios que conlleva la utilización de la energía eléctrica y que la demanda continuará incrementándose en un 40% aproximadamente en las décadas restantes de nuestro siglo, para la cual la Comisión Federal de Electricidad ha proyectado un sistema de producción que permitirá satisfacer dicha demanda, en la figura 1.16 se puede apreciar la composición de este sistema para el período comprendido entre el año de 1980 al año 2000. En la figura anterior se muestra la tendencia hacia la producción de más energía eléctrica tratando de minimizar al máximo el uso de hidrocarburos.

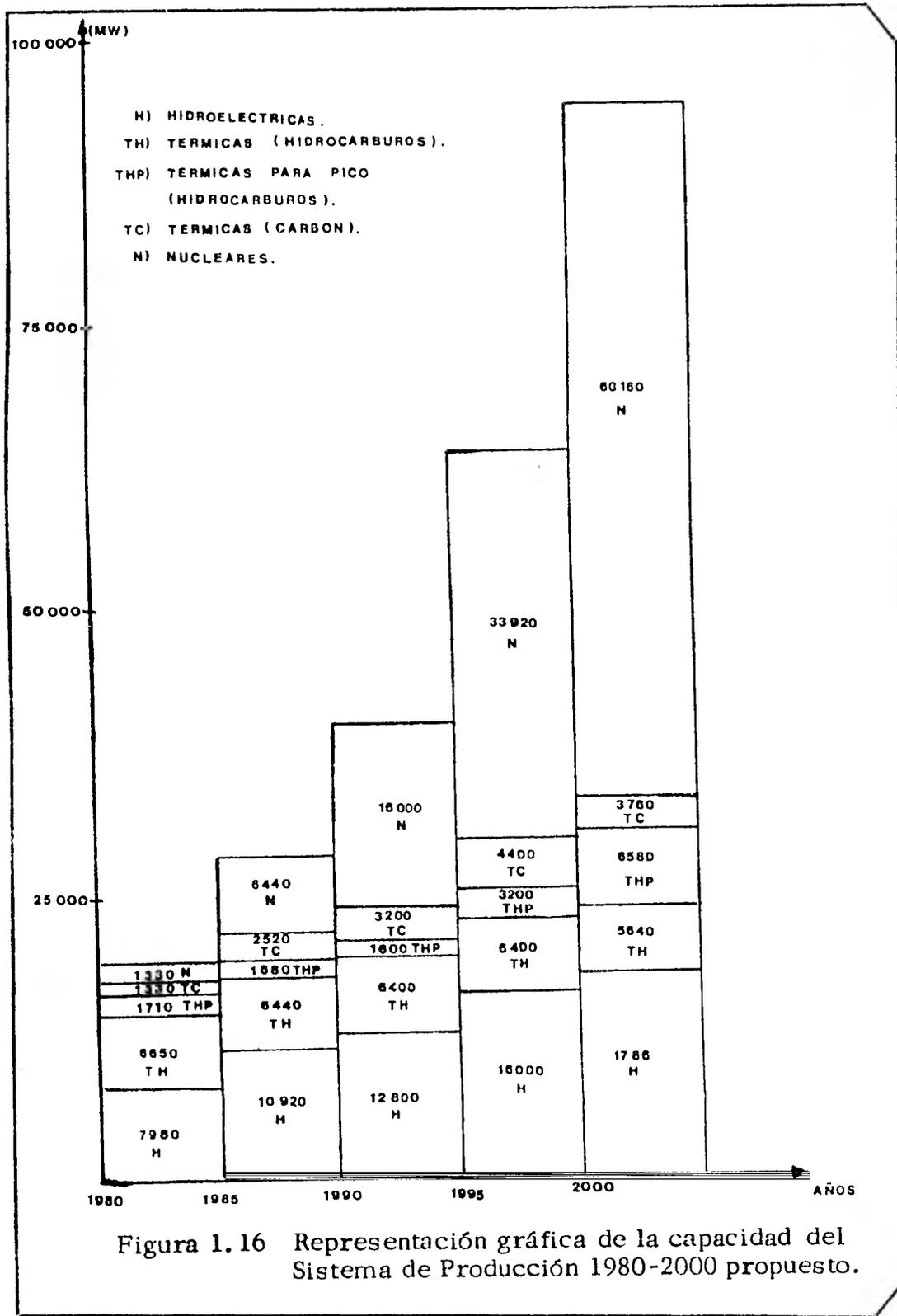


Figura 1.16 Representación gráfica de la capacidad del Sistema de Producción 1980-2000 propuesto.

C A P I T U L O I I

PRINCIPIO DEL FUNCIONAMIENTO Y APLICACION DE LOS RELEVADORES

El consumo de energía eléctrica de servicio público en México que se inició por los años de 1880, ha presentado un incremento muy importante a partir de los últimos 40-años, ésto en relación al inicio en firme del proceso de industrialización y el incremento en las necesidades agrícolas comerciales y residenciales del país .

Debido a la expansión eléctrica, así como la construcción e incorporación al sistema eléctrico mexicano de centrales eléctricas de mayor capacidad y complejidad, se ha despertado un interés especial sobre las protecciones de los sistemas eléctricos.

En el caso del presente trabajo solo se tratará lo referente a la protección de la parte más importante de un sistema eléctrico que es la generación o planta generadora. Dada la importancia y los grandes trastornos que ocasiona la falta de energía eléctrica, se considera que la protección de la planta generadora constituye una parte importante en el diseño y construcción de las mismas.

Los generadores de las centrales eléctricas, se proyectan y construyen para trabajar a un alto porcentaje de carga durante un lapso de tiempo bastante considerable, por lo cual no se encuentran exentos de la incidencia de condiciones anormales de trabajo. Las protecciones eléctricas tienen como objetivo primordial el mantener una constante vigilancia de todas y cada una de las partes que constituyen la planta generadora, para asegurar máxima continuidad del servicio eléctrico y minimizar los daños del equipo cuando se presente una falla .

A. CLASIFICACION DE LOS RELEVADORES

Los relevadores de protección tienen como función detectar las fallas y condiciones anormales en los sistemas eléctricos de potencia, para que automáticamente y en el menor tiempo posible aislar el defecto mediante los interruptores, tratando siempre de obtener un mínimo de interrupción del servicio; evitando de esta manera la propagación de la falla y las perturbaciones al sistema.

Existen varios tipos de relevadores con características variadas, esto se detallará más adelante. Pero englobándolos en términos generales los relevadores para protección eléctrica se clasifican de acuerdo a lo siguiente :

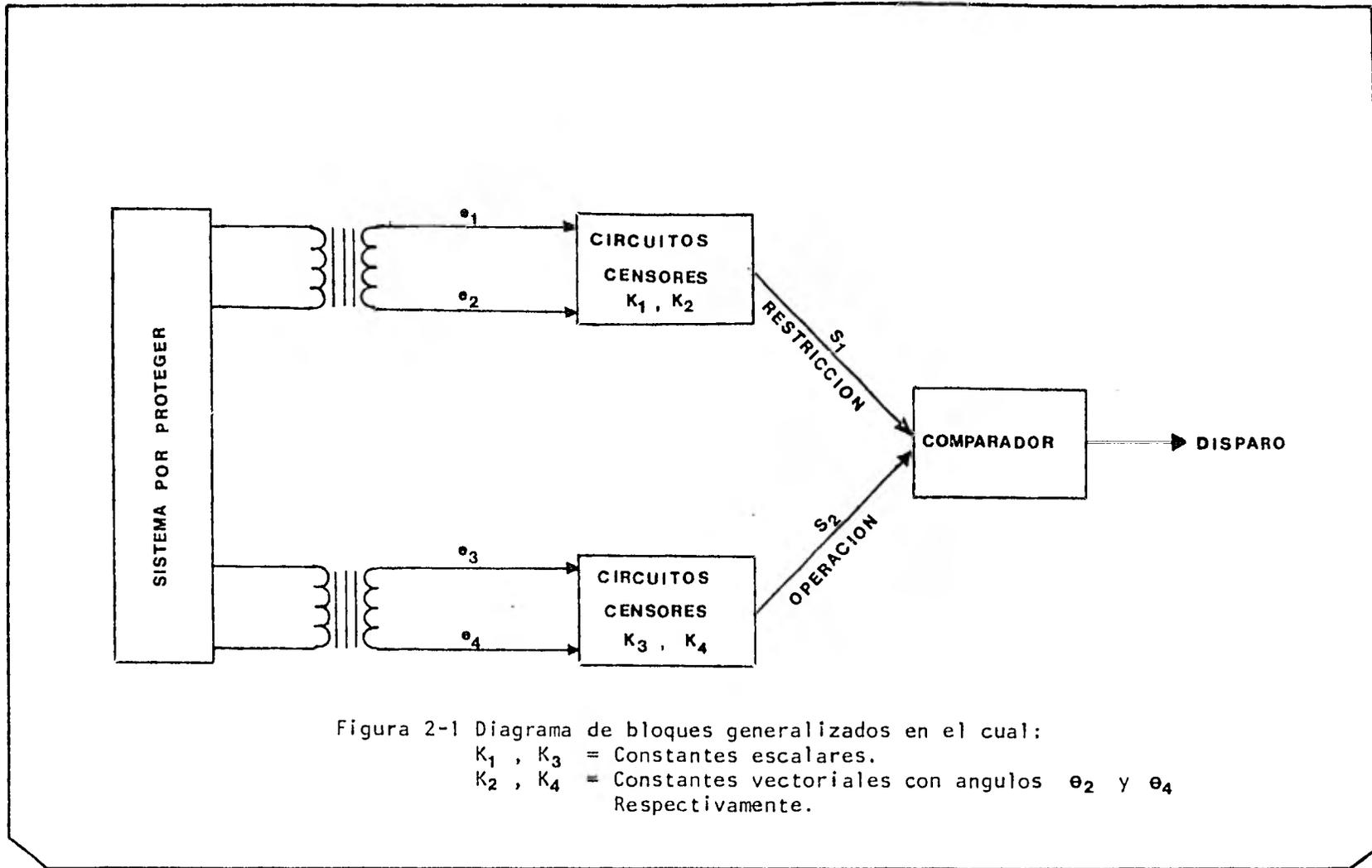
1. Características Físicas
2. Características Operativas

1. Características Físicas.- Tomando en cuenta esta característica los relevadores se dividen en :

- a). Relevadores Electromagnéticos.

La base de los llamados relevadores electromagnéticos la constituye el empleo de circuitos que constan de dos partes características, siendo una de éstas el circuito magnético; el cual es el encargado de establecer o comparar las características a la cual responderá el relevador. La segunda parte la constituye un elemento netamente mecánico en el cual se encuentran los contactos del relevador.

En general, se espera que un relevador pueda diferenciar entre condiciones normales y las de falla para obtener así una señal cuando la falla ocurre. La comparación antes mencionada, constituye el principio del funcionamiento de



los relevadores, lo usual es comparar dos características específicas que son: magnitud y fase, A los dispositivos encargados de estas comparaciones se les conoce como comparadores.

Para el estudio de estos comparadores nos auxiliamos con un diagrama de bloques, figura 2.1., el cual nos permitirá obtener las ecuaciones características que se ajusten a toda clase de relevadores.

De la figura (2.1) se obtiene la siguiente expresión .

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= K_1 \dot{A} + K_2 \dot{B} \\ \dot{S}_2 &= K_3 \dot{A} + K_4 \dot{B} \end{aligned} \quad \text{----- 2.1}$$

B. Rabindranath⁴ nos presenta el análisis matemático de los comparadores sirviéndose de A como un vector de referencia y de B como un vector atrazado en un ángulo θ con respecto de A, la ecuación (2.1) se escribe como sigue :

$$\begin{aligned} S_1 &= K_1 |A| + K_2 |B| \left\{ \cos (\theta_2 - \theta) + j \operatorname{sen} (\theta_2 - \theta) \right\} \\ S_2 &= K_3 |A| + K_4 |B| \left\{ \cos (\theta_4 - \theta) + j \operatorname{sen} (\theta_4 - \theta) \right\} \end{aligned} \quad \text{----- 2.2}$$

4

B. Ravindranath, M. Chander, Protección de Sistemas Potencia e Interruptores (1a. Edición, México: Editorial Limusa, S.A., 1980) pp.67-71.

Considerando $S_1 = S_2$ como condición inicial de operación, tenemos .

$$\begin{aligned} & \{K_1 |A| + K_2 |B| \cos (\theta_2 - \emptyset)\}^2 + \{K_2 |B| \operatorname{sen} (\theta_2 - \emptyset)\}^2 \\ & = \{K_3 |A| + K_4 |B| \cos (\theta_4 - \emptyset)\}^2 + \{K_4 |B| \operatorname{sen} (\theta_4 - \emptyset)\}^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto se obtiene la siguiente expresión.

$$\begin{aligned} & K_1^2 |A|^2 + 2K_1 K_2 |A| |B| \cos (\theta_2 - \emptyset) + K_2^2 |B|^2 \{ \operatorname{sen}^2 (\theta_2 - \emptyset) + \cos^2 \\ & (\theta_2 - \emptyset) \} = K_3^2 |A|^2 + 2K_3 K_4 |A| |B| \cos (\theta_4 - \emptyset) + K_4^2 |B|^2 \{ \operatorname{sen}^2 \\ & (\theta_4 - \emptyset) + \cos^2 (\theta_4 - \emptyset) \} \end{aligned}$$

Tomando en cuenta que, $\operatorname{sen}^2 (\theta - \emptyset) + \cos^2 (\theta - \emptyset) = 1$ tenemos :

$$\begin{aligned} & K_1^2 |A|^2 + 2K_1 K_2 |A| |B| \cos (\theta_2 - \emptyset) + K_2^2 |B|^2 = \\ & K_3^2 |A|^2 + 2K_3 K_4 |A| |B| \cos (\theta_4 - \emptyset) + K_4^2 |B|^2 \end{aligned}$$

o sea .

$$\begin{aligned} & (K_1^2 - K_3^2) |A|^2 + 2 |A| |B| \{ K_1 K_2 \cos (\theta_2 - \emptyset) - K_3 K_4 \cos (\theta_4 - \emptyset) \} + \\ & (K_2^2 - K_4^2) |B|^2 = 0 \end{aligned} \quad \text{----- 2.3}$$

Dividiendo la ecuación 2.3 entre $(K_2^2 - K_4^2) |A|^2$ se obtiene.

$$\left| \frac{|B|}{|A|} \right|^2 + 2 \frac{|B|}{|A|} \left\{ \frac{K_1 K_2 \cos (\theta_2 - \emptyset) - K_3 K_4 \cos (\theta_4 - \emptyset)}{K_2^2 - K_4^2} \right\} + \frac{K_1^2 - K_3^2}{K_2^2 + K_4^2} = 0$$

Desarrollando el $\cos (\theta - \emptyset)$ nos queda .

$$\left| \frac{|B|}{|A|} \right|^2 + 2 \frac{|B|}{|A|} \left\{ \frac{(K_1 K_2 \cos \theta_2 - K_3 K_4 \cos \theta_4) \cos \emptyset + (K_1 K_2 \operatorname{sen} \theta_2 - K_3 K_4 \operatorname{sen} \theta_4) \operatorname{sen} \emptyset}{K_2^2 - K_4^2} \right\} = 0$$

$$\left. \frac{K_3 K_4 \sin \theta_4 \sin \emptyset}{K_2^2 - K_4^2} \right\} + \frac{K_1^2 - K_3^2}{K_2^2 - K_4^2} = 0$$

considerando :

$$a'_0 = \frac{K_1 K_2 \cos \theta_2 - K_3 K_4 \cos \theta_4}{K_2^2 - K_4^2}$$

$$b'_0 = \frac{K_1 K_2 \sin \theta_2 - K_3 K_4 \sin \theta_4}{K_2^2 - K_4^2}$$

$$c'_0 = \frac{K_1^2 - K_3^2}{K_2^2 - K_4^2}$$

$$\text{Se tiene } \left| \frac{B}{A} \right|^2 + \left| \frac{B}{A} \right| (a_0 \cos \emptyset + b_0 \sin \emptyset) + c = 0 \quad \dots 1.4$$

Representada gráficamente la ecuación (2.4), nos da por resultado una circunferencia contenida en el plano β , con coordenadas $B/A \cos \emptyset$ y $j B/A \sin \emptyset$ como se representa en la figura 2.2

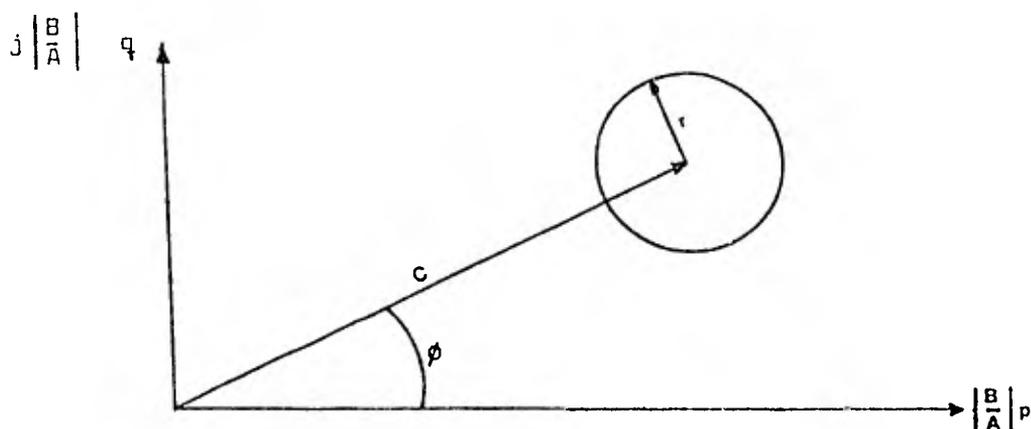


Figura 2.2 Características iniciales de un compresor donde el centro (c) y el radio (r) se expresan mediante las siguientes ecuaciones :

$$c = \frac{\sqrt{k_1^2 k_2^2 + k_2^2 k_3^2 - 2k_1 k_2 k_3 k_4 \cos(\theta_2 - \theta_4)}}{k_2^2 - k_4^2} \quad \text{--- 2.5}$$

$$r = \frac{\sqrt{k_1^2 k_2^2 + k_3^2 k_4^2 - 2k_1 k_2 k_3 k_4 \cos(\theta_2 - \theta_4)}}{k_2^2 - k_4^2} \quad \text{--- 2.6}$$

La expresión 2.4 es la ecuación característica del comparador de amplitud y de igual forma que se presentó - el análisis de ésta, a continuación se hará el análisis del - comparador de fase para la cual se tiene presente lo si - guiente; si consideramos S_1 y S_2 con ángulos de fase α y β respec- tivamente, el relevador operará cuando el producto de S_1 y S_2 sea positivo, por otra parte el producto es máximo cuando las dos cantidades se encuentran en fase. Pudiéndose obtener las- condiciones de los relevadores en un comparador simétrico de- fase con $(\alpha - \beta) = \pm 90^\circ$. Considerando lo anterior como condi- ción inicial se tiene :

$$\tan(\alpha - \beta) = \pm \infty \quad \text{--- 2.7}$$

Desarrollando la función anterior tenemos .

$$\frac{\tan \alpha - \tan \beta}{1 + \tan \alpha \tan \beta} = \pm \infty$$

Esto se cumple solo si

$$1 + \tan \alpha \tan \beta = 0$$

o sea

$$1 + \frac{k_2 |B| \sin(\theta_2 - \theta)}{k_1 |A| + k_2 |B| \cos(\theta_2 - \theta)} \times \frac{k_4 |B| \sin(\theta_4 - \theta)}{k_3 |A| + k_4 |B| \cos(\theta_4 - \theta)} = 0$$

donde

$$K_1 K_3 |A|^2 + \{K_1 K_4 \cos(\theta_4 - \emptyset) + K_2 K_3 \cos(\theta_2 - \emptyset)\} |A| |B| + K_2 K_4 |B|^2 \cos(\theta_2 - \theta_4) = 0 \quad \text{----- 2.8}$$

Dividiendo la ecuación (2.8) entre el termino $K_2 K_4 |A|^2 \cos(\theta_2 - \theta_4)$ se obtiene :

$$\left| \frac{B}{A} \right|^2 + \left| \frac{B}{A} \right| \left\{ \frac{(K_1 K_4 \cos \theta_4 + K_2 K_3 \cos \theta_2) \cos \emptyset + (K_1 K_4 \sin \theta_4 + K_2 K_3 \sin \theta_2) \sin \emptyset}{K_2 K_4 \cos(\theta_2 - \theta_4)} \right\} + \frac{K_1 K_3}{K_2 K_4 \cos(\theta_2 - \theta_4)} = 0$$

suponiendo que :

$$a'_0 = \frac{K_1 K_4 \cos \theta_4 + K_2 K_3 \cos \theta_2}{K_2 K_4 \cos(\theta_2 - \theta_4)}$$

$$b'_0 = \frac{K_1 K_4 \sin \theta_4 + K_2 K_3 \sin \theta_2}{K_2 K_4 \cos(\theta_2 - \theta_4)}$$

$$c'_0 = \frac{K_1 K_3}{K_2 K_4 \cos(\theta_2 - \theta_4)}$$

se obtiene

$$\left| \frac{B}{A} \right|^2 + \left| \frac{B}{A} \right| \{ a'_0 \cos \emptyset + b'_0 \sin \emptyset \} + c'_0 = 0 \quad \text{----- 2.9}$$

Como se podrá observar la ecuación anterior es similar a la ecuación 2.4 y en igual forma se puede representar gráficamente por medio de una circunferencia en el plano β con :

$$r = \frac{\sqrt{K_1^2 K_4^2 + K_2^2 K_3^2 - 2 K_1 K_2 K_3 K_4 \cos(\theta_2 - \theta_4)}}{2 K_2 K_4 \cos(\theta_2 - \theta_4)} \quad \text{----- 2.10}$$

$$c = \frac{\sqrt{K_1^2 K_4^2 + K_2^2 K_3^2 + 2 K_1 K_2 K_3 K_4 \cos(\theta_2 - \theta_4)}}{2 K_2 K_4 \cos(\theta_2 - \theta_4)} \quad \text{----- 2.11}$$

En la realidad la mayoría de los relevadores tienen, por lo menos, una de las constantes K ; (K_1, K_2, K_3, K_4) igual a cero y dos de las restantes son iguales, por otra parte, los ángulos θ_2 y θ_4 generalmente son los mismos, lo que hace que en la práctica las ecuaciones: (2.5), (2.6), (2.10) y (2.11) se simplifiquen en gran medida.

De esta forma se ha explicado de manera general el principio del funcionamiento de los relevadores. Por otra parte se tiene que los relevadores electromagnéticos se dividen a su vez en:

- (1) De atracción magnética o de armadura
- (2) De inducción magnética

(1) De atracción magnética o armadura. Este tipo de relevadores basan su funcionamiento en el flujo magnético el cual produce una fuerza electromagnética que es la encargada de poner en funcionamiento al relevador.

Dentro del tipo de atracción magnética se encuentran definidos los de tipo núcleo, los de armadura articulada o bisagra y los tipo balancín.

Algunos autores consideran un cuarto tipo que es, el polarizado de hierro móvil. Los relevadores mencionados anteriormente son simples, y se pueden utilizar tanto en corriente directa y alterna según se requiera.

En la figura 23 se ilustran los relevadores de atracción magnética.

(2) De inducción magnética. Este tipo de relevadores funcionan con el mismo principio que el motor de inducción magnética, esto es, cuentan con un estator y un rotor.

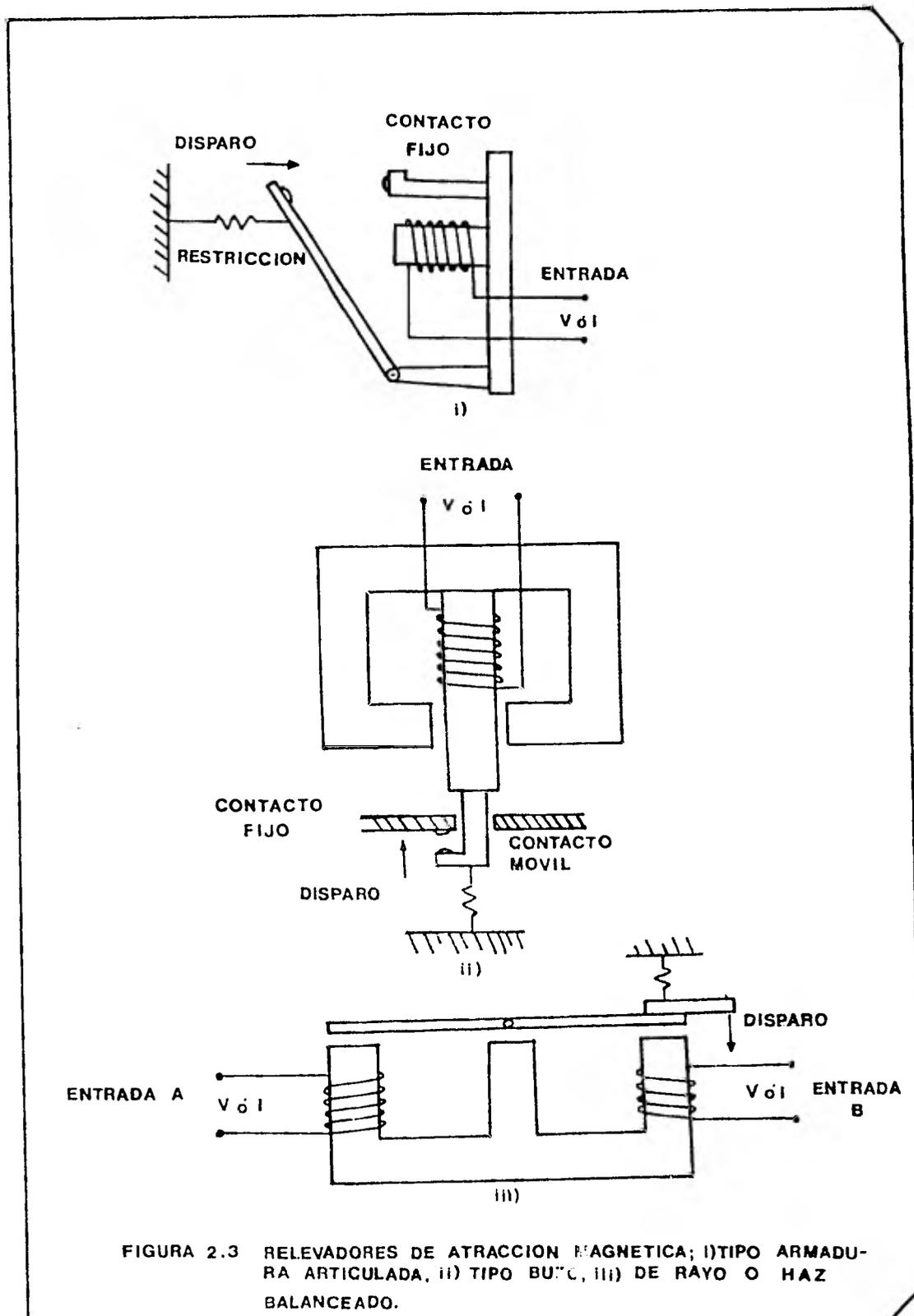


FIGURA 2.3 RELEVADORES DE ATRACCION MAGNETICA; i) TIPO ARMADURA ARTICULADA, ii) TIPO BÚLBO, iii) DE RAYO O HAZ BALANCEADO.

El giro del rotor se da a través del par de torsión que se produce en el momento en que el flujo alterno del estator, reacciona con la corriente inducida en el rotor, el cual gira en el mismo sentido que el campo rotatorio, los contactos se encuentran instalados sobre un brazo, el cual está integrado al rotor del relevador.

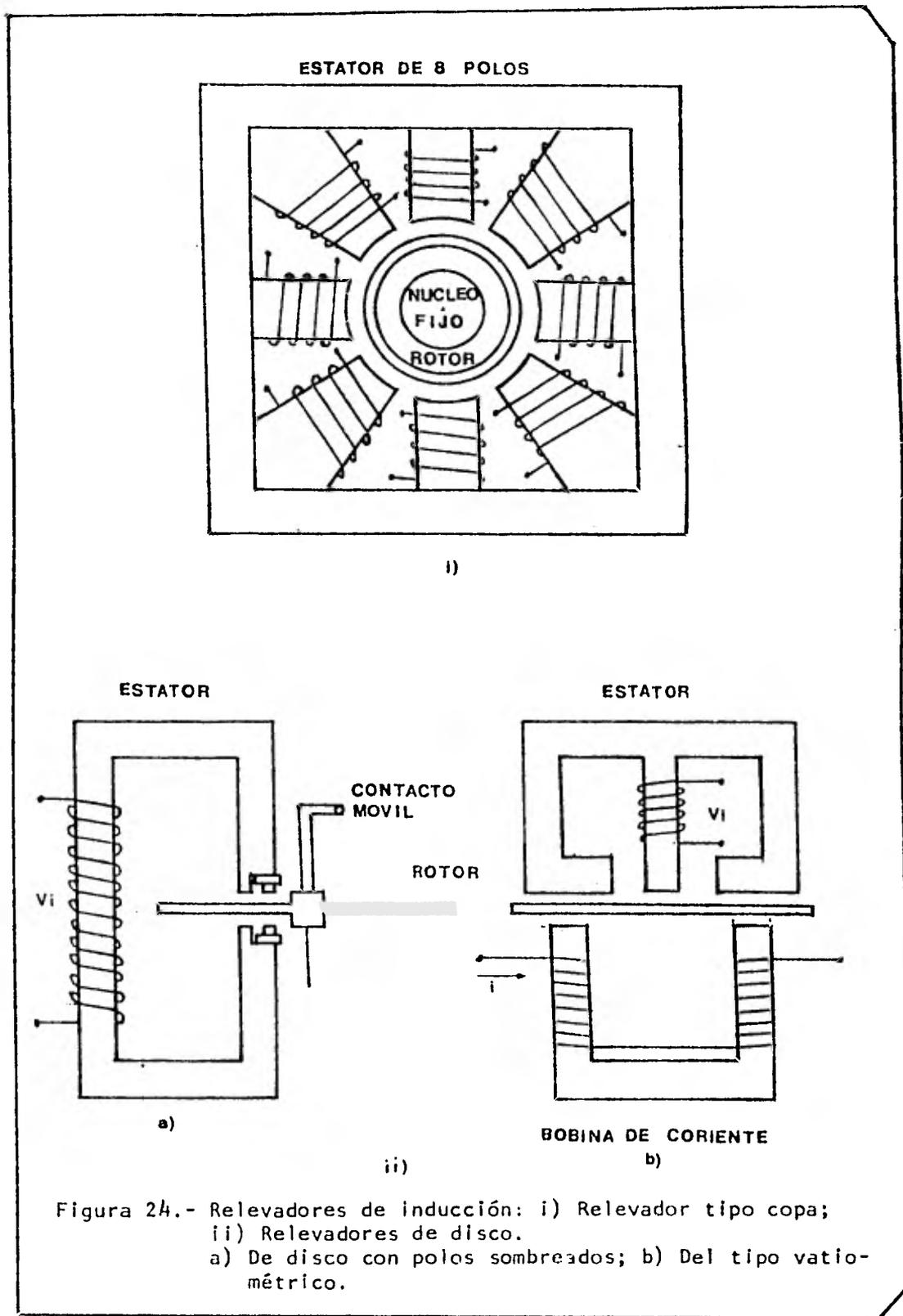
Dentro del tipo de inducción se puede mencionar a los; i) de copa de inducción, ii) los de disco de inducción. De estos últimos se puede tener dos variantes que son: los de polos sombreados y el tipo wattmetro.

Por la necesidad de que exista un flujo alterno para el funcionamiento de estos relevadores, éste tipo solo se usa con corriente alterna.

La figura 2.4 nos representa los diferentes tipos de relevadores de inducción antes mencionados.

En los párrafos anteriores se ha hecho mención a lo relacionado a la protección electromagnética o se podría llamar protección tradicional, ya que ha sido la usada desde el inicio de las protecciones aplicadas a los sistemas de potencia eléctrica en México. Estos se han venido modificando a través de los años pero el principio siempre fue el mismo, centrado en los elementos electromecánicos.

En los principios de 1928 se desarrolló el primer circuito electrónico aplicado a las protecciones de una línea de transmisión. Iniciándose así el estudio y aplicación de las protecciones estáticas.



b. Relevadores Estáticos .

Este tipo de relevadores basan su funcionamiento en circuitos estáticos, diseñados para proporcionar una señal de salida en dirección del disparo.

En el caso del presente trabajo, solo se tratará los distintos tipos de relevadores estáticos que existen - así como el principio de su funcionamiento. Por motivo de que un análisis detallado, nos remitiría a un estudio profundo y extenso de la electrónica, el cual no es el objetivo del trabajo; sino, lo que se pretende es presentar un panorama general de los relevadores estáticos, sus ventajas sobre los relevadores electromagnéticos y su aplicación en la protección de las plantas generadoras. Una vez que se hizo la delimitación del tema en cuanto a la profundidad con que será tratado, continuaremos tratando el tema de los relevadores estáticos los cuales se dividen en :

- (1) Relevadores Transductores
- (2) Relevadores de Puente Rectificador
- (3) Relevadores Electrónicos

(1) Relevadores Transductores. Como su nombre lo indica, basan su funcionamiento en el principio de transformación de la energía, ya que obtiene la señal del disparo por medio de un transductor.

Casí siempre que se escucha la palabra relevador estático se piensa en circuito de transistores, diodos, etc., relacionados con la electrónica. Pero el relevador transductor es la excepción ya que se trata de un circuito magnético - el cual cuenta con un solo núcleo y cuatro devanados que son: devanado de operación, de acoplamiento, de restricción y el devanado de salida. En la figura 2.5 se muestra un relevador de transductores .

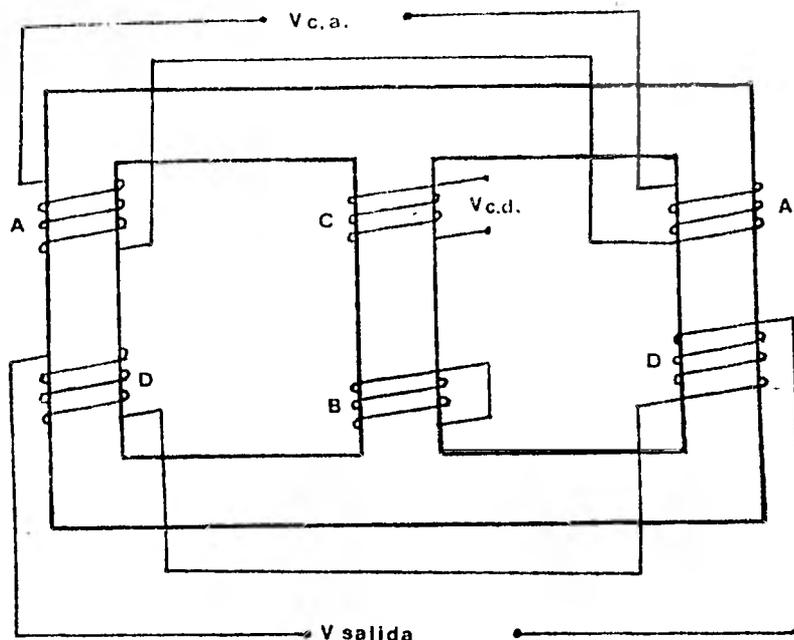


Figura 2.5 Relevador Transductor; A) devanado de operación, B) devanado de acoplamiento, C) devanado de restricción, D) devanado de salida.

Como se puede observar en la figura 2.5 el devanado A, se energiza con c.a. y los de restricción con c.d., ésto hace que se presente una impedencia variable a las corrientes que circulan por el devanado de operación, dicha impedencia se puede variar con el efecto de la corriente que por este devanado circula.

El devanado de operación está enrollado de manera que, los ampers-vuelta de operación en un miembro se oponen a los ampers-vuelta de restricción en el mismo miembro y se refuerzan en el otro.

Para el análisis del transductor, se desprecia la condición finita de la permeabilidad y se supone igual el número de vueltas en los devanados de operación y restricción.

Ahora bien, cuando la cresta de la corriente de restricción, saca de saturación al miembro del núcleo en el que la corriente de operación está en contra de los ampers-vuelta de restricción. En este momento se induce un voltaje en el devanado de salida, repitiéndose ésto en el otro miembro durante el siguiente ciclo. En consecuencia la corriente de salida se incrementa considerablemente para una variación pequeña en la corriente de operación.

Dentro de los relevadores transductores se tiene a los relevadores Hall y los relevadores Gauss.

Se conoce como relevadores Hall a los circuitos que utilizan el efecto Hall. Este efecto se da en cierto tipo de semiconductores tales como arseniuro de indio, antimonio de indio, etc.

El efecto Hall, es la generación de un voltaje a través de una corriente, la cual se le suministra a una placa semiconductora de algún material antes mencionado. Este efecto se ilustra en la figura 2.6.

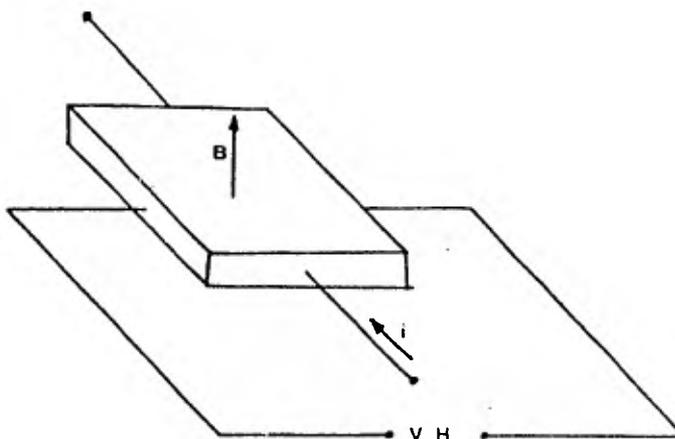


Figura 2.6

Figura 2.6 Generador Básico de Hall donde:

i = corriente suministrada c.a.

B = campo magnético

V_H = voltaje de Hall inducido

Una aplicación del generador de Hall como relevador se puede obtener con una conexión como la que se muestra en la figura 2.7.

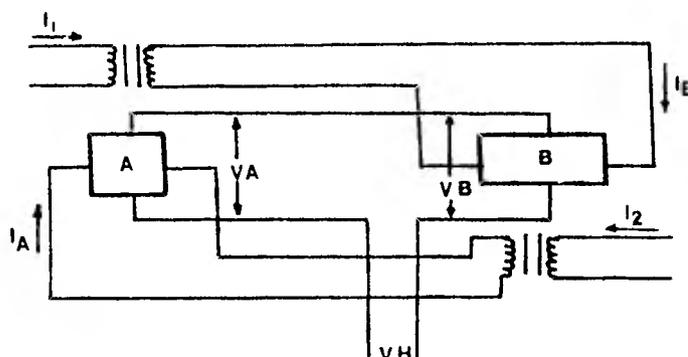


Figura 2.7 Relevador de Hall.

Como se puede observar en la figura 2.7, I_1 e I_2 son las dos señales que se van a comparar, éstas se suministran a dos cristales de Hall A y B, los cuales a su vez, inducen dos voltajes V_A y V_B los cuales se conectan de tal forma que se obtenga $(V_A - V_B)$, dicha diferencia será el voltaje de Hall resultante ó voltaje de disparo del relevador.

En forma similar es el funcionamiento de los relevadores de Gauss, en los cuales se obtiene una variación de resistencia cuando se aplica un campo magnético al cristal semiconductor. Aplicando éste efecto se obtiene el relevador de Gauss.

Por lo expuesto anteriormente se puede deducir que los relevadores transductores son muy sencillos en cuanto a su construcción, así como confiables en su aplicación ya que

las características de sus componentes se predeterminan y verifican con facilidad.

(2) Relevadores de Puento Rectificador.

Estos relevadores están constituidos a base de diodos semiconductores y consiste en dos puentes rectificadores éstos pueden disponerse como comparadores de fase o de amplitud.

En la figura 2.8 se ilustra el circuito de relevadores de puente rectificador .

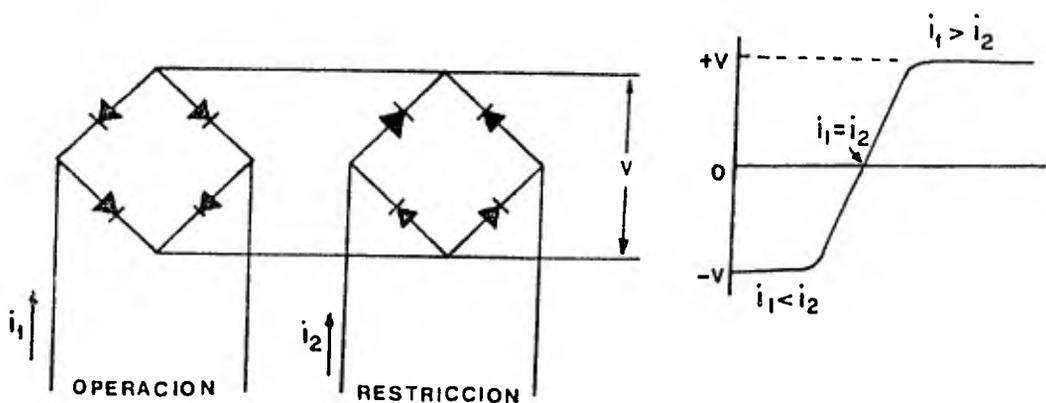


Figura 2.8 Comparador de Puento Recitificador:

- a) Circuito Básico
- b) Voltaje de Salida

Como anteriormente se dijo, éstos se pueden usar como comparadores de fase o amplitud, dependiendo de los circuitos que se conecten al comparador de puente rectificador. A continuación se mencionan los diferentes tipos de comparadores de puente rectificador que se utilizan en la protección de sistemas eléctricos.

Comparadores de Amplitud:

- i) integradores
- ii) instantáneos
- iii) de muestreo.

En los comparadores de fase se citan los de:

- i) productos vectoriales
- ii) del tipo de coincidencia.

(3) Relevadores Electrónicos.

Estos fueron los primeros relevadores estáticos que se desarrollaron. inicialmente se usó el tiratrón o válvula electrónica como principal componente, el cual hacia las veces de comparador de fase o amplitud según fuera el caso.

Este tipo de relevadores hicieron su aparición en los inicios de 1928, tiempo más tarde se empezó a utilizar el transistor, el cual supliría a las válvulas electrónicas. El transistor utilizado como válvula electrónica, presenta entre otras ventajas la de ser de un tamaño pequeño y robusto, la carencia de un filamento incandescente; por lo cual no requiere de potencial para el calentamiento del mismo, etc. lo cual ha hecho posible el rápido desarrollo de los relevadores estáticos a base de transistores.

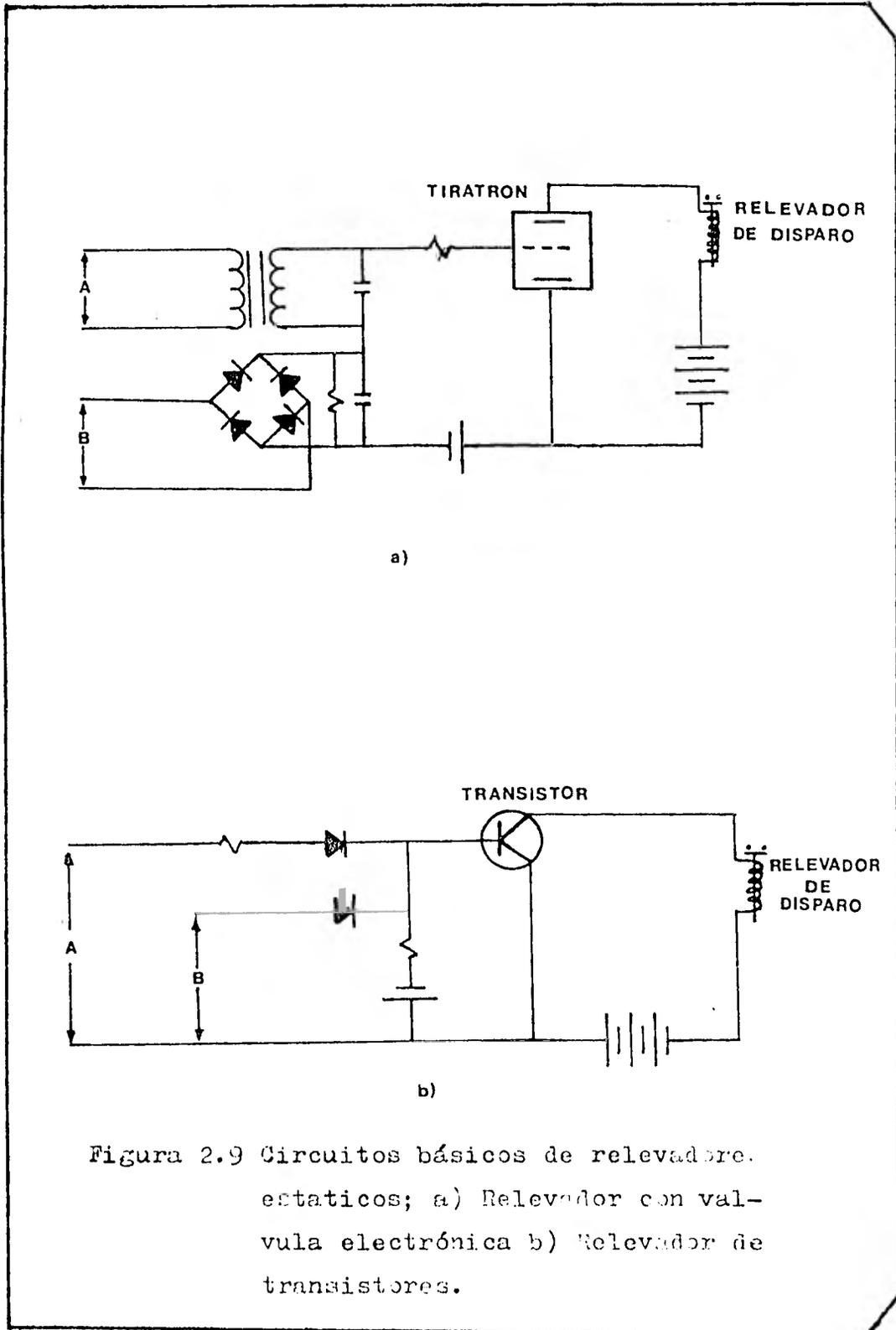


Figura 2.9 Circuitos básicos de relevadore. estaticos; a) Relevador con val- vula electrónica b) Relevador de transistores.

B. Ravindranath⁵ considera los relevadores de - válvulas electrónicas y los de transistores como dos clasificaciones diferentes, pero para el caso de este trabajo se considerará como relevadores electrónicos tanto a los de válvula electrónica y a los de transistores. En la figura 2.9 se muestran - dos circuitos de relevadores electrónicos.

Como es posible observar en la figura 2.9 los - circuitos son similares, diferenciándose solo en la parte más - importante, tomándose ésta como el corazón de los relevadores - electrónicos; nos referimos a la válvula electrónica y el transistor respectivamente.

Lo expuesto en los párrafos anteriores, nos presentan las características físicas de los dispositivos utilizados en la protección de los sistemas eléctricos de potencia. Medante éstas características se clasificó a los relevadores en - electromagnéticos y estáticos.

Normalmente, en la protección de los sistemas - eléctricos se utilizan los dos tipos de relevadores, según sea - la función encomendada en el esquema de protección.

2. Características Operativas .

Normalmente es variable el número y tipo de los relevadores utilizados en la protección en un sistema eléctrico, ya que no existe una reglamentación que se encargue del uso de - los relevadores como sería el caso de las instalaciones eléctricas, para las cuales si existe un reglamento encargado de éstas.

⁵B. Ravindranath, M. Chander, Protección de Sistemas de Potencia e Interruptores (1a. Edición; - México: Editorial Limusa, S.A. 1980)

A diferencia de lo anterior, los esquemas de protección para los sistemas eléctricos son estructurados con un criterio personal, dependiendo del criterio y experiencia de la persona o personas encargadas de la estructuración del esquema. Otro de los factores importantes a considerar en la conformación del esquema es la operación asignada a cada uno de los relevadores.

Considerando lo expuesto anteriormente, se puede clasificar a los relevadores en base a características operativas, siendo éstas las que se describen a continuación:

a. Función por realizar. Esto se refiere a la forma en que se utiliza la señal de disparo del relevador, con lo cual se dividen a éstos en:

(1) Relevadores Principales. Estos son los que directamente influyen en la eliminación de la falla, incidiendo directamente en los elementos encargados de dicha separación - tales como interruptores.

(2) Relevadores Auxiliares. A este tipo de relevadores se les utiliza principalmente para introducir atrasos en el disparo, para aumentar el número de contactos, interrupción de los contactos de otro relevador, etc.

Todas estas funciones no afectan directamente sobre la separación de la falla, ya que siempre los relevadores auxiliares están controlados por otros relevadores.

(3) Relevadores de Señal. Son los encargados de registrar o mostrar la operación de algún relevador, esto se da mediante un indicador de bandera, accionando una alarma audible o una combinación de ambas. El método utilizado depende de la importancia del sistema protegido.

b. Dependiendo de la cantidad característica a la cual reacciona el relevador se puede diferenciar en:

(1) Relevadores de Corriente. Estos relevadores reaccionan a las variaciones de corriente en el sistema protegido .

(2) Relevadores de Voltaje. Son los que reaccionan a las variaciones de voltaje en el sistema a proteger .

(3) Relevadores Direccionales. Este tipo de relevadores reaccionan al cambio de dirección del flujo de la cantidad actuante.

(4) Relevadores de Distancia. Estos relevadores se usan exclusivamente en la protección de las líneas de transmisión de potencia eléctrica, ya que su funcionamiento , se basa en características propias de los conductores, las cuales varían con la longitud de los mismos. Estas características son:

- i) impedancia
- ii) reactancia
- iii) admitancia (mho)

(5) Relevadores Diferenciales. Estos relevadores basan su funcionamiento en la diferencia vectorial de dos cantidades eléctricas como se muestra en la figura 2.10 .

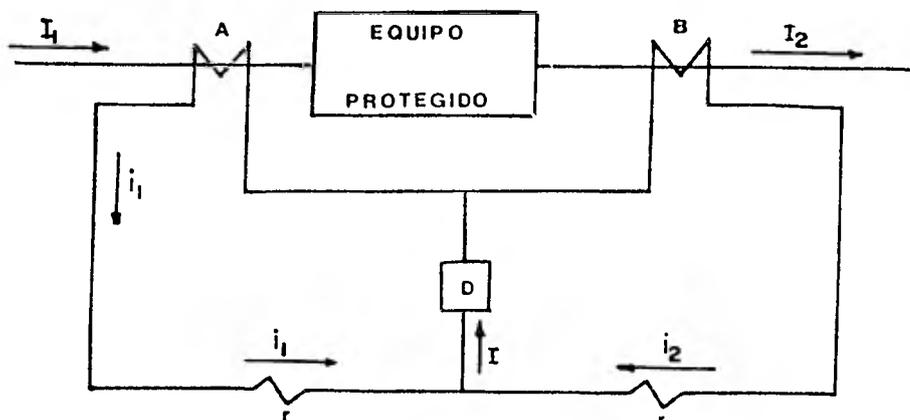


Figura 2.10 Protección Diferencial

Como es posible apreciar en la figura 2.10, I_1 é I_2 son iguales en sentido, cuando no existe falla en el equipo protegido, lo cual induce una corriente en los transformadores A y B, debido a la conexión de éstos, la corriente en el relevador D es :

$$I = i_1 - i_2 \text{-----} 2.12$$

En el momento que ocurre una falla en el elemento protegido, I_2 cambia de sentido por lo que la corriente en el relevador D es:

$$I = i_1 + i_2 \text{-----} 2.13$$

Lo cual iniciaría el funcionamiento del relevador D. La corriente I es la corriente de operación del relevador diferencial .

c. Tipo de conexión. Dependiendo de la forma en que se conectan los relevadores al sistema, por proteger se dividen en :

(1) Relevadores Primarios. Son aquellos que se encuentran conectados directamente al elemento o sistema por proteger .

(2) Relevadores Secundarios. Estos relevadores se conectan a elemento o sistema que protegen, por medio de transformadores de voltaje o corriente. Este tipo de relevadores son los más utilizados en la protección de los sistemas de potencia, en base a los altos valores de corriente y voltajes que se manejan.

d. Forma de Aislar la Falla. Dependiendo de la forma en que el relevador incide sobre los elementos o sistemas protegidos se dividen en :

(1) Relevador de Acción Directa. Estos son los que actúan directamente desconectando el elemento o sistema que presenta la falla.

(2) Relevador de Acción Indirecta. Este tipo de relevadores son los encargados de proporcionar una señal de disparo a otros elementos de control, los cuales a su vez son los encargados de aislar la falla.

Una vez presentada la clasificación de los relevadores en base a sus características operativas y físicas, la cual nos servirá para la selección del tipo de relevador por utilizar en los esquemas de protección. Podemos concluir ; que la protección de los sistemas eléctricos está a cargo de mecanismos electromecánicos o estáticos, los cuales vigilan las características operativas de los sistemas, con el fin de evitar daños mayores en el momento en que se presente una condición anormal de trabajo, ésto a través de la separación del elemento o sistema que contenga la falla .

B. Principios Básicos de la Protección por Relevadores .

El objetivo principal de una protección es, mantener una vigilancia constante de las condiciones de trabajo en un sistema eléctrico de potencia, a fin de asegurar máxima continuidad del servicio eléctrico proporcionado por el sistema, y en su caso, minimizar los daños al equipo cuando se presente una falla.

Los relevadores son los elementos de la protección encargados de diferenciar entre las condiciones normales y anormales de trabajo, por lo cual son una pieza importante de las protecciones, éstos a su vez están auxiliados por los interruptores para que sean capaces de aislar el elemento defectuoso cuando el relevador lo demanda.

Una falla es simplemente una condición anormal de trabajo, que puede ocasionar un sin número de trastornos al sistema, según sea el tipo de falla y lugar en que se presente. Estos se explicará con más detalle en el capítulo siguiente de este trabajo.

Es inevitable que en un sistema de generación eléctrica incidan condiciones anormales de trabajo, la probabilidad de que éstas se presenten siempre estará latente, por lo cual deberá de diseñarse un esquema de protección apropiado al sistema de generación y sus condiciones de trabajo.

Es recomendable no sobreproteger en un 100% ya que, esto traería como consecuencia un esquema de protección demasiado complicado, lo cual aumenta los riesgos de incidencia de fallas en el sistema.

En el diseño o implementación de cualquier sistema de protección, deberá observarse cierto número de calidades funcionales, las cuales nos marcan las pautas a seguir para obtener así un máximo rendimiento de la protección. Dichas calidades se describen a continuación en los siguientes rubros :

1) Calidades Funcionales de la Protección.

Como anteriormente se mencionó, todo sistema de protección encargado de vigilar las condiciones de trabajo y retirar el elemento que presenta la falla, deberá de cumplir con un cierto número de calidades.

Algunos autores consideran que son cuatro las calidades, mientras que otros más consideran como seis las calidades necesarias.

Para el caso específico de este trabajo se considerarán siete las calidades, no proponiéndonos con esto establecer una regla general, sino presentar un punto de vista particular, estas calidades se describen a continuación .

a. Confiabilidad. Teniendo presente que las protecciones operan con poca frecuencia, ya que la probabilidad de falla en un sistema eléctrico es muy pequeña. Los sistemas de protección deberán ofrecer un máximo de seguridad, que no fallarán en el momento en que se requiera su operación. Esto se logra mediante las características de diseño y manufactura de los relevadores, estas características son: alta presión de contacto, cajas o alojamientos a prueba de contaminación, juntas perfectamente ajustadas, etc.

Nos referimos directamente a los relevadores por que las estadísticas indican que son los elementos del sistema de protección que con frecuencia fallan.

b. Sensibilidad. La protección debe ser lo bastante sensible como para entrar en operación confiablemente, - aun con valores mínimos de falla .

c. Selectividad. Mediante esta propiedad se seleccionan las condiciones en que debe operar o dejar de hacerlo así como también diferenciar los casos en que debe actuar - instantáneamente o con retardo .

d. Velocidad de Operación. Se requiere que los sistemas de protección sea de acción rápida, para así, limitar los daños y costos de reparación de los elementos dañados por la falla .

Por otra parte se debe de tener presente que la velocidad de operación dependerá de la magnitud de la falla, - así como de la coordinación con otras protecciones.

e. Cobertura Total. Esta cualidad se obtiene dividiendo a la protección por zonas, las cuales resguardarán - uno o como máximo dos elementos del sistema protegido. Las zonas de protección se dispone de manera que se traslapen, para lograr así la protección total del sistema. En la figura 2.11- se presenta un sistema eléctrico y sus zonas de protección.

f. Simplicidad. Como ya se mencionó anteriormente en este trabajo no se debe perseguir una sobre protección, - ya que ésto implica una mayor complejidad en los sistemas de - protección. Por lo tanto debe de hacerse el diseño de las protecciones lo más simple posible, con el objeto de disminuir al mínimo el equipo y los alambrados, ya que un aumento de ésto - representa un mayor riesgo de falla.

g. Economía. Con ésto se define la necesidad de obtener una protección máxima a un costo mínimo. Teniendo en -

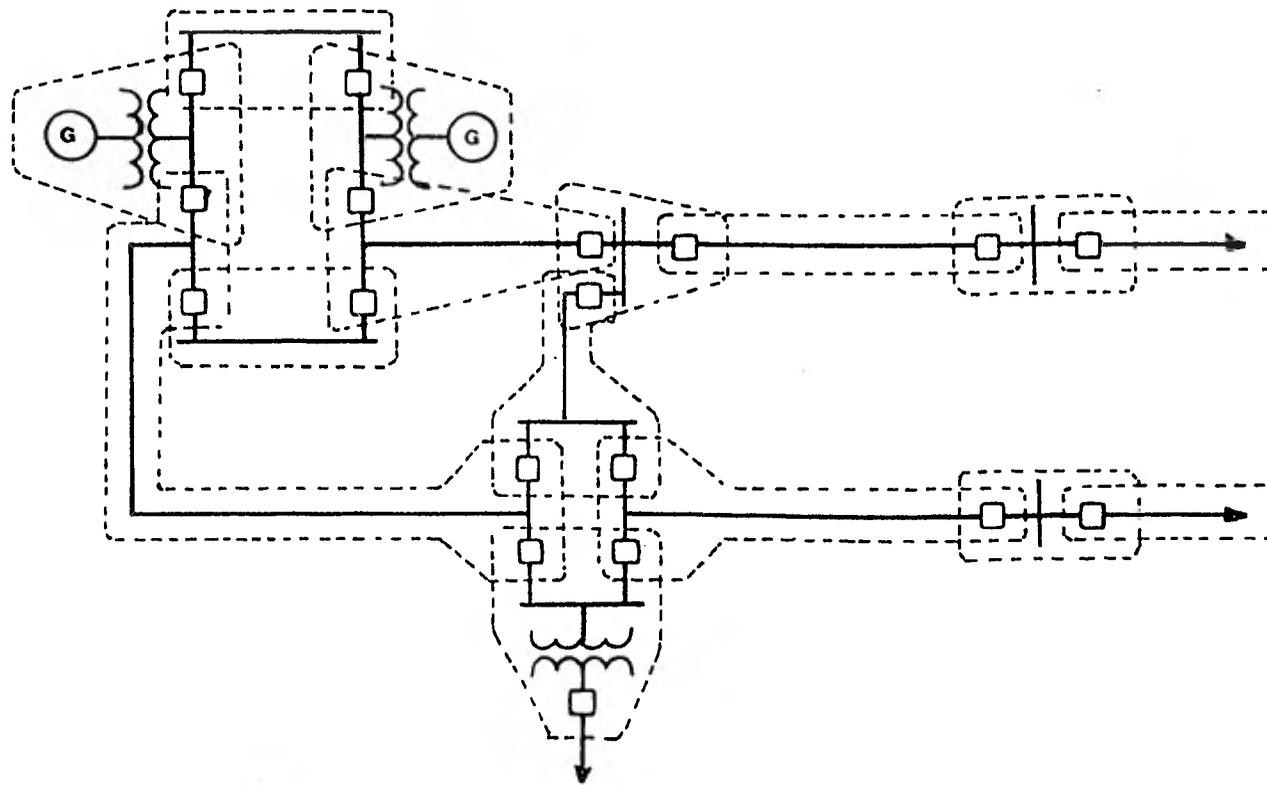


Figura 2.11. Representación unifilar de un Sistema Eléctrico y sus Zonas de Protección .

- Sistema Eléctrico
- - - Zona de Protección
- Interruptores

cuenta que en un sistema de suministro de energía, se tiene un límite en la cantidad de dinero que puede disponerse para la protección del mismo. Por lo tanto el costo de la protección de una planta está relacionado con el costo de la misma.

En resumen se recomienda que en el diseño del esquema de protección se tenga presente las características antes mencionadas, tratando con ésto de obtener una protección completa y confiable.

2. PROTECCION PRIMARIA Y DE RESPALDO

Anteriormente se explicó que una de las cualidades de la protección, es la de estar dividida en zonas de protección, las cuales cuentan con sus propios relevadores para que en el caso de existir una falla, retirar la zona afectada del sistema.

Por lo general, la operación de los relevadores se da a través de corriente y voltajes derivados de los transformadores de instrumentos utilizados para la protección, aunque también son usuales los dispositivos independientes como son las baterías de la estación. Como podemos observar, la protección de una zona depende de varios elementos como son: los transformadores de instrumentos, relevadores, interruptores, fuentes de energía, etc., los cuales no se encuentran exentos de falla, lo que en caso de presentarse, no funcionaría la protección en el momento requerido, ocasionando en el sistema severos trastornos. Por lo cual deberá preverse esta situación mediante la protección primaria y de respaldo.

a. Protección Primaria. Esta protección la constituyen propiamente los relevadores instalados en la zona referida y se diseña para desconectar la mínima porción posible del sistema de potencia, que solo separe el elemento que ha fallado tomando en cuenta lo siguiente:

(1) Con el objeto de desconectar solo el elemento que falle, los relevadores se localizarán en las interconexiones de los distintos elementos del sistema.

(2) Podrá omitirse un interruptor entre dos elementos adyacentes, lo cual implica que si se presenta una falla en cualquiera de los dos, deberán desconectarse ambos elementos.

(3) Los relevadores pertenecientes a una zona, se deberán de graduar de tal manera que cuando incida una falla en dicha zona se tenga el disparo simultáneo de todos los relevadores pertenecientes a ésta.

(4) En las zonas de protección existen regiones de traslape, que por lo general están representadas por interruptores.

(5) Los interruptores de dos zonas trasladadas deberán de disponerse de manera que cuando se presentara una falla en la zona de traslape, deberán de dispararse los relevadores de las dos zonas.

b. Protección de Respaldo. Debido a la proporción que alcanzarían los daños en el caso de que la protección primaria fallará, así como las graves consecuencias que esto conlleva, crea la necesidad de proveer a la protección primaria de relevadores suplementarios conocidos como relevadores o protección de respaldo.

La protección de respaldo a diferencia de la primaria, en caso de falla, desconecta una porción mayor del sistema, aunque por lo general ésta no es tan rápida ni discriminativa como la protección primaria.

Las medidas que se consideran para proporcionar la protección de respaldo a un sistema varía mucho, ya que esto depende del valor y de la importancia del sistema eléctrico así como las consecuencias de la falla.

Dentro de la protección de respaldo podemos diferenciar dos tipos que son :

(1) Protección de Respaldo Remoto. Este tipo de protección de respaldo se dispone para librar fallas de elementos contiguos cuya protección primaria no opera.

(2) Protección de Respaldo Local. Para este tipo de protección se dispone de un juego de relevadores independientes, los cuales se utilizan única y exclusivamente para las fallas en los interruptores, y ésto hace independientemente de los relevadores de la protección primaria y de respaldo.

Analizando lo expuesto con anterioridad, se puede observar la diferenciación o clasificación que se hizo de los relevadores para la protección de sistemas eléctricos. Cabe señalar que existen varias clasificaciones de los relevadores como por ejemplo: la que nos presenta Carlos Luca M⁶, el cual hace su clasificación basada en las características de operación de los relevadores.

⁶ Carlos Luca M., Plantas Eléctricas (8a. Edición México: Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. 1980) .

C A P I T U L O I I I

CLASIFICACION DE LAS FALLAS QUE AFECTAN A LAS PLANTAS GENERA
DORAS Y SUS CONSECUENCIAS

Los hidrocarburos, son la principal fuente - de energía que los países requieren para su desarrollo, por - tal motivo, es imposible prescindir de éstos ya que forman par - te integral de nuestra vida.

En el Capítulo I de este trabajo, se habló - acerca del encarecimiento de los energéticos que se inició en el año de 1973, con el embargo del petróleo de los países ara - bes al mundo occidental. Por otra parte tenemos que en México se requieren anualmente 800×10^{12} kilocalorías aproximadamen - te⁷, las cuales se distribuyen porcentualmente de la siguien - te forma: Sector Industrial 26.4%, Transporte 29.8%, Sector - Público, Comercial y Doméstico 13.2%, el 30.6% restante lo - consume el Sector Eléctrico. Con lo cual se puede entender el papel tan importante que desempeñan los hidrocarburos en nues - tro país.

Tomando en cuenta que el petróleo es un recur - so no renovable, así como la contaminación producto de la uti - lización de éste, como aspectos principales que provocan una - tendencia hacia el ahorro de hidrocarburos, se vio la necesi - dad de buscar una nueva fuente de energía, la cual supliría - en gran escala a los mismos. La electricidad representa una - alternativa en cuanto a fuente de energía confiable requerida por cualquier país para su existencia y desarrollo .

⁷ Consejo del Sistema Nacional de Educación -
Tecnológica. La Conservación de la Energía y -
sus Efectos Sobre los Precios de la Misma. -
(México, Mayo de 1980).

De lo anterior se deduce la importancia de los sistemas eléctricos de potencia, los cuales están constituidos por tres partes fundamentales que son:

- Generación. Esta es la parte más importante de un sistema eléctrico, ya que por medio de los aparatos que la constituyen se genera y se le dan las características necesarias a el fluido eléctrico, para su óptimo aprovechamiento .

- Transmisión. Mediante esta parte del sistema, se transporta la energía eléctrica de las plantas generadoras a los centros de consumo.

- Distribución. Esta es la parte que permite conectar a los usuarios con el sistema eléctrico para obtener así la energía requerida.

Dada la importancia de los sistemas de potencia eléctrica, así como los grandes trastornos que representaría la incidencia de una falla o condición anormal de trabajo, éstos se construyen de tal forma que representen una fuente de energía confiable, lo cual no las exenta de la presencia de las fallas. En los sistemas eléctricos, los generadores y transformadores son las partes más importantes y en los cuales las fallas ocurren con menor frecuencia a diferencia de las líneas de transmisión, en las que se tiene el 50% del total de las fallas que se representan en un sistema de potencia eléctrica; pero a diferencia de éstas, las fallas que inciden en los elementos de las plantas generadoras requieren de una atención especial, ya que las consecuencias que se derivan de dichas fallas requieren mucho más tiempo y dinero que lo que se necesita para reparar los daños debido a fallas en las líneas .

A. En los Generadores.

Una falla se puede definir como el defecto que presenta la planta generadora en uno de sus componentes, la cual trae consigo graves daños si no se aísla rápidamente. La falla puede ser consecuencia de una condición anormal de trabajo o puede darse por sí sola.

Existen muchas clasificaciones de fallas, esto depende del criterio de las personas o persona que esté tratando el tema, por lo cual no se puede hablar de una clasificación definitiva.

La clasificación de fallas más conocida, es la que nos presenta tres tipos que son:

- Fallas eléctricas. Este tipo son denominadas eléctricas, por tener su origen relacionado con una característica de esta naturaleza, siendo éstas entre otras las siguientes.

- a. Sobrecorriente.
- b. Fallas a Tierra.
- c. Fallas Entre Fase.
- d. Pérdidas de Excitación.
- e. Sobrevoltajes.
- f. Potencia Inversa.

- Fallas Mecánicas. Son las relacionadas con alguna parte mecánica del sistema, teniendo como ejemplo las siguientes .

- a. Vibración en los cojinetes.
- b. Error de sincronismo.
- c. Pérdida del Primotor.
- d. Pérdida de Presión de Aceite.

- e. Falta de Lubricación.
- f. Sobrecalentamientos Locales.
- g. Sobrevelocidad.

- Fallas del Sistema. Son las originadas por la operación anormal del propio sistema, por ejemplo citamos a las siguientes.

- a. Desequilibrio de Corrientes de Armadura.
- b. Pérdida del sincronismo.
- c. Frecuencia Anormales de Operación.
- d. Fallas de Contactos.
- e. Maniobra de Interruptores.

Por otra parte tenemos a Carlos Luca M., autor del libro Plantas Eléctricas, el cual nos presenta otro tipo ó forma de clasificar las fallas, el cual se basa en el origen y naturaleza de las mismas con lo cual tenemos que éstas pueden ser de tres tipos.

- Fallas de Aislamientos. Este tipo de fallas se tiene cuando el material que separa los conductores pierde sus propiedades aislantes y deja pasar cantidades indefinidas de corriente eléctrica, dentro de este tipo de fallas se encuentran las siguientes.

- a. Entre Conductores Aereos y Tierra.
- b. Entre Cables Subterráneos y Tierra.
- e. Entre Equipo de Barras y Tierra.
- d. Entre el Devanado de un Transformador o sus Terminales y el Tanque.
- e. Entre el Devanado de un Generador y su Armazón o Núcleo.
- f. Entre Polos Opuestos de Transformadores.
- g. Entre Polos Opuestos en los Generadores.

- Fallas de Conducción. Estas existen cuando los elementos conductores de un sistema reducen o pierden su conductancia longitudinal, causando la interrupción del flujo eléctrico así como, la caída de potencia, éstas se pueden dar en :

- a. Entre los Cables de Transmisión.
- b. Entre la unión y Terminales de los cables.
- c. Entre los Elementos del Equipo de Barra.
- d. En Transformadores y Reactores.
- e. En los Generadores y Excitadores o Excitadoras.

- Fallas de Operación. Este tipo de fallas son provocadas por las modificaciones del funcionamiento de los elementos de un sistema, con lo cual se apartan de unas condiciones de trabajo preestablecidas, las fallas de operación se presentan en.

- a. Líneas de Transmisión y Distribución.
- b. En Equipos de Control.
- c. En Transformadores.
- d. En Generadores y Excitadores o Excitadoras.

Como hemos visto anteriormente, existen varios criterios para clasificar o tipificar a las fallas que afectan un sistema eléctrico de potencia, con lo cual se puede tener un sin número de fallas.

El presente trabajo se encarga de plantear una conjugación de las características antes mencionadas, basándose en las condiciones o estados que adquieren las plantas generadoras durante su operación, con lo cual tenemos la siguiente clasificación.

1. Condiciones Normales de Trabajo. Se tienen estas condiciones cuando la planta generadora se encuentra actuando de una manera satisfactoria, por lo cual se puede obtener una generación óptima, por lo tanto es importante dotar al sistema de aparatos que vigilen dichas condiciones de trabajo, por ejemplo .

- a. Velocidad .
- b. Voltajes.
- c. Lubricación.
- d. Temperatura.
- e. Frecuencia.
- f. Excitación.

2. Condiciones Anormales de Trabajo. Aunque - los sistemas de generación están diseñados y construidos para trabajar bajo condiciones de carga máxima durante un lapso de tiempo considerable, no se puede evitar la presencia de este tipo de condiciones de trabajo, los cuales evitan el óptimo - aprovechamiento de las plantas, además de crear situaciones - de peligro para el sistema, ya que si las condiciones anormales no se eliminan dentro de un período de tiempo razonable, - el cual estará determinado por los proveedores de cada uno de los elementos que constituyen la planta generadora, pueden - provocar severos daños a la misma.

Dentro de este tipo de condiciones tenemos a - las siguientes.

a. Pérdida de Excitación. Esto se puede tener como consecuencia de falla del excitador o un interruptor del campo, cuando ésto sucede, el generador toma del sistema su - excitación con lo cual actúa como un generador de inducción y proporciona la energía con un factor de potencia adelantado . Por otra parte, la pérdida de la excitación provoca una caída

de voltaje el cual puede ocasionar la pérdida del sincronismo, poniendo en peligro la estabilidad del sistema.

b. Cargas desequilibradas. Una falla monofásica, cargas desbalanceadas, circuitos abiertos debido a líneas rotas o la falla de uno de los polos de un interruptor al cerrar provocan un desbalanceo. Una carga desequilibrada continúa igual o superior al 10% de la intensidad nominal, es causa de peligrosos calentamientos en los rotores cilíndricos de los alternadores, esto debido a las corrientes de secuencia negativa que se originan con el desbalanceo, las cuales producen un campo de reacción en la armadura que gira en dirección contraria al rotor, provocando un flujo que se desliza a través del mismo, con una velocidad igual al doble de la velocidad de rotación del rotor, por lo que se inducen falsas corrientes de una frecuencia igual a dos veces la frecuencia de la máquina en el cuerpo del rotor, campo y en los devanados de amortiguamiento, otra consecuencia debido al desbalanceo son las vibraciones excesivas. Las máquinas de polos salientes son menos sensibles a las intensidades de secuencia negativa.

c. Sobrecarga. Este tipo de condición anormal de trabajo trae consigo un sobrecalentamiento del estator, con lo cual se hace presente el peligro de daños en el aislamiento de los devanados del mismo, con lo que se tendría una falla que representaría graves daños al generador.

d. Reducción o Ausencia del Primotor. Un generador puede pasar a funcionar como motor, si la máquina de impulsión o el primotor que recibe se reduce por debajo del par resistente que presenta el conjunto turbina-alternador, o en su defecto por la ausencia total del mismo. En este caso se toma potencia del sistema en lugar de aportarla, lo cual se conoce también con el nombre de potencia inversa. Si dicha situación persiste, (más de 15 segundos) y la máquina no está preparada al efecto, pueden producirse sobrecalentamientos en los componentes de la turbina.

e. Sobrevelocidad. Si el generador se encuentra operando con plena carga y ésta es retirada súbitamente, se corre el peligro de que el generador se desboque. La peligrosa sobrevelocidad resultante del retiro súbito de la carga es controlada por la acción normal del regulador de turbina, pero si este dispositivo falláse se tendría una sobrevelocidad en la máquina, lo cual es más probable en los generadores impulsados por turbinas hidráulicas. Este tipo de anomalía provoca problemas en los embalamientos así como, trastornos en la frecuencia de generación.

f. Sobrevoltajes. Existen varias causas de las sobretensiones transitorias, las cuales afectan a los sistemas de potencia pudiéndose mencionar como ejemplo las siguientes: descargas atmosféricas en líneas de transmisión, por maniobra de los interruptores, desboque o sobre velocidad y por defectos en el regulador de voltaje.

g. Sobrecalentamientos. Como anteriormente se explicó, el calentamiento excesivo de alguna parte del generador puede tener varias causas, las que ya se mencionaron en los rubros anteriores, por otra parte tenemos como otro tipo de causas principales de sobrecalentamientos a la deficiente lubricación, averías mecánicas, las impurezas del lubricante, defectos en los circuitos de lubricación o problemas en la refrigeración .

3. Condiciones de Falla. Cuando en un sistema de generación se presenta una condición anormal de trabajo, éste puede seguir operando durante un período corto de tiempo dependiendo del tipo de construcción, por lo cual en algunas condiciones anormales no es necesario el retiro del generador. Sin embargo, para una condición de falla es muy importante el retiro del aparato afectado en el menor lapso de tiempo posible, con el fin de evitar mayores daños al sistema.

Como condiciones de falla de los generadores se describen las siguientes, dividiéndolas como sigue:

a. Falla de Fase a Tierra. Este tipo de fallas es el más común así como, los que provocan grandes y severos - daños a las unidades generadoras, provocando un calentamiento-excesivo en los conductores, lo que daña el aislamiento de los mismos, además de que existe la posibilidad de incendio.

Como otro efecto de las fallas a tierra tenemos el arqueo al núcleo, lo que ocasiona que los elementos laminados se suelden entre si, provocando que las reparaciones de estas situaciones representen gastos considerables de tiempo y - dinero.

b. Fallas de Fase a Fase o entre Espiras. Este tipo de fallas ocurren mucho más raramente, esto como consecuencia de que el aislamiento entre bobinas de fase diferentes por lo menos el doble que entre una bobina y el núcleo de - acero.

Las fallas internas o entre espiras de una bobina son al igual que las anteriores poco frecuentes y solo se - dan en los devanados de muchas vueltas. Si el devanado está hecho con una sola espira es desde luego imposible que ocurra esta falla.

Las fallas antes descritas se pueden dar tanto en el estator como en el rotor. Pero en realidad la mayoría de las fallas ocurren en los devanados del estator y sus conexiones.

Otra razón por la cual se tienen pocas fallas en el rotor, es que la práctica moderna se acostumbra que el generador trabaje con su devanado de campo aislado de tierra.

Como consecuencia general de las fallas tenemos una intensidad grande de corriente, así como severos calentamientos de los conductores los cuales dañan el aislamiento de los mismos, por otra parte, si la falla no se aísla rápidamente puede provocar la fundición de los conductores con riesgo de incendio, si los aislantes no son del tipo no inflamables y resistentes al fuego. Las fallas en el rotor pueden ocasionar severa vibración del mismo, con sus consecuentes daños a los cojinetes.

B. En los transformadores .

Ahora bien, en una planta generadora es importante la protección de los transformadores, ya que una falla en éstos provocaría la salida de operación de la unidad, por lo que a continuación se describen en forma general las fallas que afectan a los transformadores.

Los transformadores de fuerza por sus características de construcción, rara vez presentan fallas, pero las consecuencias de una falla pueden ser graves si no son aisladas rápidamente del sistema.

Los transformadores al igual que los generadores presentan condiciones normales, anormales y de falla, las cuales se describen a continuación.

1. Condiciones Normales. Estas condiciones son vigiladas por los operadores por medio de sensores, y se tienen cuando los transformadores se encuentran operando correctamente.

2. Condiciones Anormales. Al igual que en los generadores, este tipo de condiciones se pueden presentar sin que sea necesario el retiro de la unidad, entre éstas tenemos las siguientes.

a. Bajo Nivel de Aceite. Dada la condición de que las partes vivas y las terminales deben de estar sumergidos en aceite, resulta peligroso para el transformador el bajo nivel de aceite. Por otra parte se tiene que las funciones del aceite en un transformador son: actuar como aislante eléctrico, como refrigerante y como protector de los aislamientos sólidos contra la humedad y el aire, con lo cual es fácil apreciar la importancia que representa el buen nivel de aceite en los transformadores.

b. Sobrecalentamiento. El aumento de temperatura sobre el nivel de operación, el cual es de 55°C ó 65°C para el 100% de carga, es una indicación de la presencia de sobrecarga o alguna falla en el sistema de enfriamiento; por ejemplo, falla en la bomba de aceite o el paro de los ventiladores. Otras causas importantes del sobrecalentamiento son el sobrevoltaje y las bajas frecuencias.

El sobrecalentamiento en un transformador debe de cuidarse mucho, ya que daña los aislamientos sólidos y afecta las propiedades aislantes del aceite, en la figura 3.1 se puede apreciar la forma en que se comporta la rigidez dieléctrica del aceite ante la temperatura⁸.

c. Sobrecarga. Este tipo de anomalías puede sostenerse por períodos largos en un transformador sin que provoque daños a éste, los tiempos de operación de un transformador sobrecargado solo estará determinado por la elevación de la temperatura permitida en los devanados y el tipo de enfriamiento, la sobrecarga excesiva ocasiona

⁸ Raúl Mendez Albores, Aceites Aislantes para Transformadores e Interruptores: Imprenta Vega, Preedición, 1978.

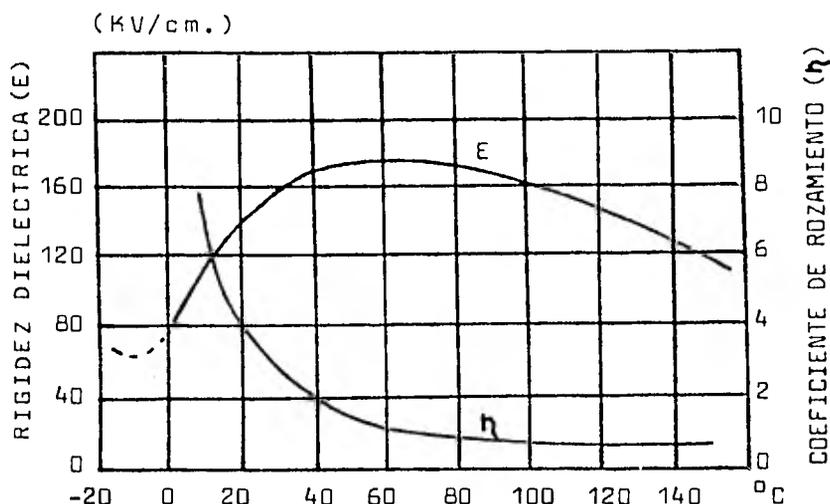


Figura 3.1. Variación de la rigidez dieléctrica del aceite aislante con el aumento de temperatura.

el deterioro del aislamiento así como la descomposición del aceite, además de que le resta su propiedad aislante, como se puede apreciar en la figura anterior.

3. Condiciones de Falla. En el transformador las fallas ocasionan graves daños inmediatos por lo cual se deben aislar el menor tiempo posible. Para los transformadores, por su misma construcción, presenta un solo tipo de falla que es:

a. Fallas en el Aislamiento de los Devanados y Núcleo. Un corto circuito entre vueltas puede iniciarse con un contacto de punto proveniente de esfuerzos mecánicos o del deterioro del aislamiento debido a sobrecargas excesivas, niveles bajos de aceite o una conexión floja. Inicialmente pueden presentarse fallas insipientes y como tales, no ocasionar interrupciones al servicio de suministros, pero es importante conocerlas y atenderlas cuando sea posible, ya que este tipo-

de fallas si no es atendida, puede degenerar en una falla a tierra, o entre una gran parte del devanado ocasionando valores grandes de las corrientes de falla y la emisión de grandes cantidades de gas por la descomposición del aceite, lo cual trae consigo un aumento considerable de presión dentro del transformador.

La integración de las grandes unidades de generación a la red de distribución nacional, se hace a través de los transformadores. por lo cual es preciso prestar la misma atención en cuanto a sus condiciones de trabajo y brindarles una protección adecuada, evitando así las interrupciones en la generación de energía eléctrica.

C A P I T U L O I V

PRESENTACION DE UN ESQUEMA DE PROTECCION .

Dentro de un sistema eléctrico de potencia, todos y cada uno de los elementos que lo constituyen poseen igual importancia en el funcionamiento de ésta, por lo cual, deberá de dotárseles de un esquema de protección adecuado .

En el capítulo anterior se describieron las condiciones en las cuales puede trabajar una planta generadora, éstas se dividieron en: condiciones normales, condiciones anormales y condiciones de falla. Considerando a las plantas generadoras como la parte que suministra la energía eléctrica, debe de vigilarse constantemente las condiciones de trabajo antes mencionadas .

A. Protección del Generador .

Dado que el generador es el elemento encargado de la transformación y aportación de la energía dentro de los sistemas eléctricos, así como la necesidad de que éste funcione las 24 horas del día, es fácil notar la importancia así como las graves consecuencias que traería consigo el que uno de estos elementos se dañara, por tal motivo debemos de dotarlos de los elementos y medios para la supervisión, medición y protección de cada una de sus partes. Para tal objeto se procederá tomando en cuenta primeramente a las condiciones normales y anormales de trabajo, para posteriormente analizar las condiciones de falla .

Cabe hacer notar que, el orden a seguir no está en función de la importancia en las condiciones de trabajo ya que cualquiera de las condiciones en que el generador esté trabajando requiere de igual atención .

1. Condiciones Normales y Condiciones Anormales.

Anteriormente se consideró a estas dos condiciones por separado, pero para la selección de las protecciones se considerarán solo a las condiciones anormales de trabajo. Tomando en cuenta que las plantas generadoras poseen instrumentos - que permiten conocer las condiciones normales, las cuales también registran cualquier variación de las mismas, con lo que se podrá conocer las condiciones anormales para su corrección .

Para la formación del esquema de protección se consideran las siguientes variables, las cuales se encuentran - asociadas al funcionamiento de los generadores, éstas son :

- Voltaje
- Corriente
- Temperatura
- Velocidad
- Excitación
- Carga

a) Sobrevoltaje. En el momento de poner en servicio un generador, antes de la sincronización, se obtiene la tensión correcta en las terminales del mismo mediante el regulador automático de tensión. Una vez logrado el acoplamiento a la red, esta tensión queda determinado por dicho regulador, por el nivel de tensión de la red y por los reguladores de tensión de las otras máquinas acopladas .

El efecto de la variación de tensión de una máquina es muy pequeño en comparación con el de una red interconectada, como es el caso del Sector Eléctrico Mexicano. Por lo que, no es posible causar un aumento considerable de la tensión en las terminales de una máquina, si ésta se encuentra acoplada a una red de gran extensión.

Por otra parte, supóngase que el regulador automático fallase, se tendría un aumento de excitación el cual se traduciría en un aumento de la energía reactiva cedida, lo que puede provocar el disparo de la máquina por sobrecorriente. Este sería el caso de los generadores que suministran los picos de potencia o en generadores sincrónicos, los cuales pueden necesitarse a su máxima capacidad en cualquier instante, en los cuales es común instalar limitadores de máxima excitación con lo que se evita que las corrientes del rotor y la carga reactiva excedan de los límites fijados, previendo así las salidas incorrectas de la máquina .

Si el interruptor de máquina dispara estando el grupo a plena carga con el factor de potencia nominal, implicaría un aumento de tensión en las terminales de la máquina el cual debe ser limitado por un regulador de tensión de acción rápida. En el caso de que este regulador fallase pueden resultar fuertes sobretensiones, las cuales se verían incrementadas por la sobrevelocidad que adquiriría el grupo. Para el caso de los generadores hidroeléctricos, la sobretensión puede alcanzar valores del 50 a 100% .

Con los modernos transformadores directamente unidos al generador, sus altas cualidades magnéticas dan un nivel de saturación bien definido, con lo que la sobretensión solo toma valores de 1.2 a 1.25 veces la tensión nominal. Por lo cual el campo de operación del relevador será de 1.15 a 1.2 veces la tensión nominal .

La protección contra sobretensión (59) comprende un relevador de inducción el cual presenta un alto valor de reposición ajustado entre 1.15 y 1.2 veces la tensión nominal y temporizado definido de 1 a 6 segundos. Este relevador acciona sobre el cierre de la válvula de la turbina y el interruptor principal .

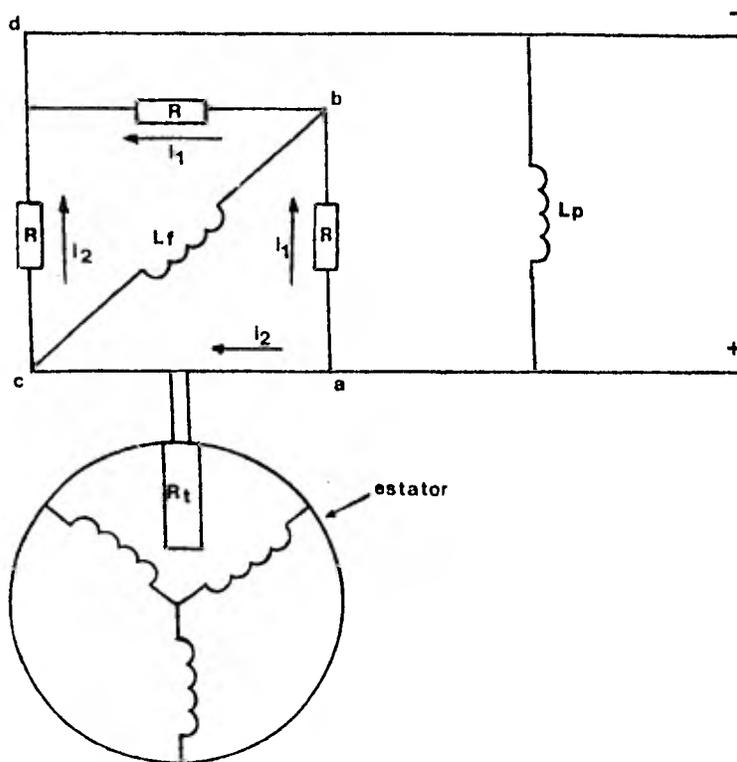
Por lo general, este tipo de protección se recomienda para los generadores hidroeléctricos y de turbina de gas, los cuales están sujetos a sobrevelocidades y en consecuencia a sobretensiones con la pérdida de carga.

El relevador (59) estará alimentado por un transformador de potencia (T.P.) distinto al que se utiliza para alimentar el regulador automático de tensión. El funcionamiento de este relevador origina primero resistencia adicional que va a insertarse en el circuito del campo del generador o excitador, al mismo tiempo que acciona una alarma. Solo en caso de persistir la falla se sacará la máquina del servicio.

b. Sobrecarga. Las sobrecargas cuya intensidad esté comprendida entre 1.2 a 1.6 veces la corriente nominal (I_n), no son detectadas normalmente por los relevadores de sobrecorriente. Una sobrecarga continua dentro de los límites antes mencionados provoca un sobrecalentamiento general del estator, el cual puede ser detectado fácilmente por sondas termoeléctricas repartidas por varios puntos del interior del estator, para lograr así una indicación de temperatura completa del estator.

Las sondas detectoras, son resistencias de platino de 100 a 200 ohms a 0°C . La figura 4.1 muestra la forma de protección la cual utiliza el principio del puente de Wheatstone con un relevador direccional.

El principio del funcionamiento de la protección de sobrecarga se basa en la diferencia de potenciales de los puntos a, b, c y d. La condición de funcionamiento de esta protección es que $R=R_t$ a la temperatura de trabajo del generador, con lo cual tendremos que $i_1 = i_2$, por lo que:



L_p = Bobina de polarización del relevador.

L_f = Bobina de funcionamiento del relevador.

R = Resistencia fija.

R_t = Resistencia variable con la temperatura.

Figura 4.1. Circuito utilizado para la detección de sobrecalentamientos en el estator.

$$V_{ab} = V_{ac}$$

$$V_{ab} - V_{ac} = 0 = V_{bc}$$

Con lo que se puede observar que no circulará ninguna corriente por L_f . En el caso de existir una variación de temperatura, implicaría un cambio en el valor de R_t lo que haría que :

$$i_1 \neq i_2$$

$$V_{ab} - V_{ac} \neq 0 \neq V_{bc}$$

lo que provocaría la circulación de una corriente en la bobina de funcionamiento L_f del relevador, esta corriente acciona dos tipos de niveles, uno de alarma y otro de disparo, éste último con efecto de retardado. La calibración del relevador se hace en base a las características de temperatura de operación del generador, así como la variación de la resistencia R_t con la temperatura .

Se utiliza el puente de Wheatstone por la precisión y rapidez en su respuesta, para las variaciones de la resistencia con la temperatura del estator.

c. Cargas Desequilibradas. Cuando se presenta ésta anomalía, se tiene un desbalance de voltajes en las terminales de la máquina, las cuales originan corrientes de secuencia positiva y negativa. Las corrientes de secuencia positiva produce un campo rotatorio que gira con el mismo sentido y velocidad que el rotor, por lo que no existen corrientes de secuencia positiva inducidas en el mismo .

Por otra parte, las corrientes de secuencia negativa producen un campo rotatorio en dirección opuesta al sentido de giro del rotor, con una velocidad igual al doble de

la velocidad del rotor, lo que induce corrientes de doble frecuencia en éste, tanto en su devanado como en el hierro, lo cual produce calentamientos y vibraciones en el rotor, con lo que puede dañarse el generador.

Estas corrientes de secuencia negativa, se producen también en las fallas a tierra y en los cortos circuitos bifásicos, pero en estos casos la magnitud total de esta corriente es muy superior a la corriente nominal (I_n), por lo que la falla se controlaría mediante relevadores de sobrecorriente. Pero en el caso del desbalanceo de cargas las corrientes son inferiores a la I_n , lo que hace imposible que los relevadores de sobrecorriente las detecten.

El tiempo que un generador puede trabajar con cargas desequilibradas se determina, mediante la siguiente expresión :

$$T = \frac{K}{I_2^2}$$

Donde K es constante propia de la máquina y ésta depende de las características térmicas de la misma, como por ejemplo: tipo de máquina, forma de refrigeración, aislamiento, etc., I_2 es el valor medio de la corriente de secuencia negativa en el intervalo de tiempo (T) en segundos.

En las máquinas con rotores lisos, la constante tiene un valor promedio de 30, mientras que para las de polos salientes tenemos que $K=40$. En algunos casos de generadores muy rápidos y de escasa refrigeración, el valor de K baja hasta 7, esto implica que en el caso de $I_2=1$ p.u., la duración de la carga desequilibrada sería de 7 segundos como máximo.

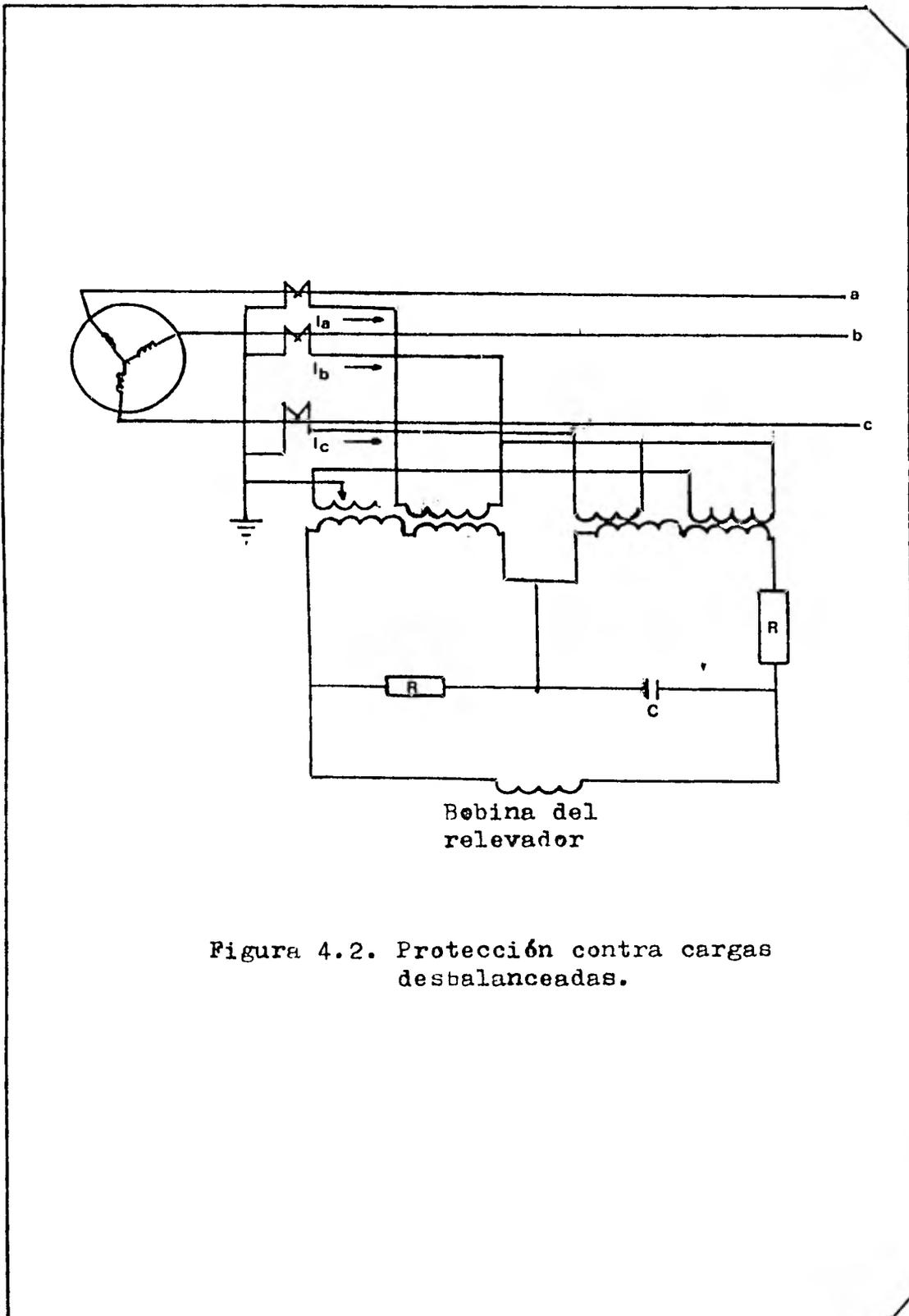


Figura 4.2. Protección contra cargas desbalanceadas.

El valor máximo continuo permisible de I_2 es de 0.08 a 0.13 p.u., en máquinas de rotores lisos o tubogeneradores y de 0.2 a 0.3 p.u. para máquinas de polos salientes.

La protección contra cargas desequilibras - consta de un filtro de secuencia negativa, el cual alimenta a un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso, como se muestra en la figura 4.2. El valor de K debe ajustarse entre 7, 30 o 40, según sea el tipo del rotor de la máquina.

El valor mínimo de disparo de I_2 , se ajusta entre 0.15 y 0.6 p.u., se añade también un circuito de alarma para un valor mínimo de I_2 variable entre 0.05 y 0.2 p.u., el relevador actúa primeramente sobre una alarma, la que avisa al operador de la existencia de la anomalía y en el caso de que no pueda ser arreglada, se sacará de servicio a la máquina.

d. Pérdidas de Excitación. La excitación reducida, es causa de un excesivo calentamiento en los bordes del núcleo del estator a causa del elevado flujo magnético que los recorre en dirección perpendicular a la laminación de los paquetes de las chapas.

En el caso de los generadores síncronos, éstos se encuentran sobreexcitados, con el propósito de suministrar potencia reactiva al sistema, de tal forma que si éste sufre una pérdida de excitación la potencia reactiva fluye hacia el generador.

Por otra parte, cuando el sistema es lo suficientemente grande como es el caso del Sector Eléctrico Mexicano, se puede suplir la deficiencia en la excitación a través del estator, por lo cual el generador síncrono funcionará

como un generador de inducción, entregando al sistema la misma potencia real que se tenía antes de la pérdida de excitación .

Cuando una máquina síncrona opera como una de inducción, pierde su sincronismo, por no estar diseñada para este tipo de operación, puesto que la potencia entregada varía de acuerdo a la velocidad del rotor en las máquinas de inducción. Esta pérdida de sincronismos no requiere un disparo de la máquina de inmediato a menos que conjuntamente se tenga una baja de voltaje en las terminales de la máquina, en la cual ocurriera la disminución del campo. Generalmente a una máquina le toma de 2 a 6 segundos para perder su sincronismo, por otra parte tenemos que un tubogenerador puede girar sin peligro, arriba de la velocidad síncrona y sin excitación durante 2 ó 3 minutos .

La protección contra esta anomalía consta de un relevador direccional (32) y un relevador de bajo voltaje (27). El relevador direccional se utiliza para accionar una alarma, la que avisará al operador de cualquier disminución o pérdida del campo, que pudiera ocasionar daños a la máquina o que provocara inestabilidad en el sistema .

Cuando se presenta una reducción en la excitación, existe una caída de voltaje terminal de la máquina, lo que causa que ésta consuma potencia reactiva del sistema, esto hace actuar al relevador direccional (32), reduciéndose además el voltaje del sistema .

La capacidad del sistema para mantenerse estable depende principalmente de :

- El tamaño de los generadores con respecto al sistema .

- La acción de los reguladores automáticos de tensión .

Una baja excesiva de voltaje, indica que el sistema se volverá inestable, teniéndose por lo tanto que ajustar el disparo de la máquina por medio del relevador de bajo-voltaje, a un valor determinado del cual el sistema pueda recuperarse después de la pérdida de campo . El valor de voltaje para el ajuste del relevador, es un valor difícil de determinar sin estudios previos de estabilidad del sistema, sin embargo la experiencia ha demostrado que el ajuste del relevador - (27) se hará a 0.85 p.u. de la tensión nominal de salida, este valor antisipa la ocurrencia de una falla, el relevador deberá accionar sobre el cierre de las válvulas de la turbina - y sobre el interruptor principal de la máquina .

e. Sobrevelocidad. Esta protección es más necesaria para los generadores hidráulicos en los cuales las variaciones de velocidad no se absorben rápidamente como en el caso de los generadores de las termoeléctricas. Con lo anterior no tratamos de excluir a éstos últimos, ya que la protección de sobrevelocidad debe suministrarse a todos los generadores eléctricos .

Para este tipo de anomalías, la protección - consta de un interruptor centrífugo calibrado para que funcione cuando la sobrevelocidad alcance el 10% de la velocidad nominal. La velocidad debe tomar directamente del eje del generador, mediante una rueda dentada, montada al rededor de éste.

Deberá hacer funcionar el gobernador de la velocidad, si la anomalía continúa aumentando, parará el primomotor cerrando las válvulas de paso, abrirá también el interruptor principal;ésto con el objeto de impedir el funcionamiento del generador como motor .

f. Reducción o Ausencia del Primomotor. Esta anomalía provoca que el generador deje de aportar energía, para tomarla de la red, lo cual hace que funcione como motor, con lo que puede resultar dañado el primomotor .

La potencia que toma la máquina en esta situación es muy pequeña en comparación de la capacidad nominal (P_n) de ésta; en la tabla 4.1 se presentan los porcentajes, dependiendo del tipo de la turbina o motor que acciona el generador .

Tipo del primomotor	Potencia absorbida en % de la P_n .	Desperfecto ocasionado
Turbina Hidráulica	2	Cavitación
Turbina de Vapor	3	Calentamiento de los Alabes
Turbina de Gas	10	Calentamiento de los Alabes
Motor Diesel	25	Esfuerzos en el cigüeñal

Tabla 4.1. Potencia inversa requerida para motorizar un generador

Para las turbinas de vapor, el tiempo requerido para que sufran un sobrecalentamiento varía de unos 30 segundos a 30 minutos en promedio, cabe hacer notar que este tiempo varía según el tipo de turbina y su funcionamiento, por lo que se debe pedir al fabricante de la turbina los datos completos de las mismas .

La protección contra la motorización consta de un relevador direccional (32) de potencia inversa, el cual se ajusta para detectar el 6% de la potencia absorbida, tomando como base las cantidades presentadas en el cuadro anterior. Este relevador envía una señal al cuadro de alarmas; el disparo de la máquina en caso de persistir la anomalía se hace a través de un relevador de tiempo, con una graduación en su escala de 20 segundos, lo que impide el funcionamiento indeseado por inversiones transitorias, como por ejemplo; en el caso de la sincronización o disturbios, del sistema.

g. Sobrecalentamientos en los Cojinetes. El aceite de lubricación y enfriamiento de los cojinetes se vigila y comprueba, en lo que respecta a presión, caudal y temperatura en varios puntos del circuito cerrado que comprende la refrigeración .

El calentamiento excesivo de los cojinetes puede estar producido por averías mecánicas, las impurezas del lubricante o defectos en el circuito de circulación o refrigeración del mismo. Por otra parte tenemos que existen pequeñas dimetrías magnéticas en los núcleos del circuito de campo, las cuales inducen fuerzas electromotrices de algunos volts en el eje del generador. Si las crucetas de apoyo de los cojinetes en los extremos del eje están a tierra, la intensidad resultante de esta fem inducida tiende a circular a través de la delgada película de aceite en los cojinetes pudiendo llegar a romperla, trayendo como consecuencia peligrosos sobrecalentamientos; por tal motivo se debe montar el soporte del primer coji-

nete aislado de tierra, además de unas sondas detectoras de temperatura alojadas en el cuerpo del cojinete y un relevador-direccional, los cuales actuarán con el principio del puente de Wheatstone, en forma similar a la protección recomendada en el inciso (b) de este capítulo; el relevador direccional acciona una alarma que indica el desperfecto al operador y el disparo de la máquina se hará por medio de un relevador auxiliar de tiempo con escala de 1 a 10 segundos, la graduación del tiempo se dispondrá en base a las características de operación del generador, el relevador deberá actuar sobre el interruptor principal de la máquina, así como en las válvulas de la turbina .

h. Vibraciones en los Cojinetes. Las vibraciones pueden ser causadas por cargas desequilibradas o por defectos mecánicos. Para proteger a los generadores de este tipo de anomalías se suelen instalar detectores de vibraciones, los cuales van montados sobre uno de los soportes de cojinetes para máquinas de eje horizontal, o sobre la cruceta del cojinete guía superior del generador en máquinas de eje vertical. El dispositivo provoca el disparo y paro de la máquina, si la deflexión radial permanece durante cierto tiempo por encima del valor mínimo pre-establecido .

Es importante señalar, la necesidad de conocer primeramente la existencia de una condición anormal para su posible corrección; esto dentro del límite de tiempo permitido , evitándose así las grandes pérdidas por el paro innecesario de una máquina. La salida de operación de una máquina durante la presencia de condiciones anormales solo se justifica si ésta no puede ser corregida dentro del tiempo de seguridad y si además se pone en peligro la máquina o al sistema.

2. Condiciones de Falla .

Como condiciones de falla en los generadores tenemos: las fallas a tierra del devanado del estator, corto -

circuito entre espiras de una misma fase o entre fases .

Por la conveniencia de limitar las corrientes de corto circuito a valores bajos prefijados, en las máquinas de gran potencia, los neutros se conectan a tierra. Por lo tanto en este trabajo, se presentará la protección para generadores conectados a tierra .

a. Falla de Fase a Tierra del Estator. Para el caso de la protección de fallas a tierra se consideran a los generadores cuya potencia es superior a los 30 MVA; los cuales se encuentran conectados a un transformador elevador de tensión .

Por la necesidad de controlar la corriente de falla dentro de unos límites pre-establecidos, se conecta el neutro a tierra a través de una resistencia de neutro, tal que la intensidad de falla a tierra varíe entre 5 y 15 amperes ésto con el objeto de reducir al mínimo los daños en las chapas del núcleo, además de que se puede permitir que esta corriente permanezca algunos minutos (práctica que no es recomendable) en caso de que la protección falle y se requiera que el operador retire la máquina en forma manual; sin que en ese tiempo pueda causar daños que obliguen a costosas reparaciones .

En el caso de unidades alternador-transformador, puede aparecer transiciones imprevistas en el neutro del alternador con motivo de una falla a tierra en la red de transmisión de alta tensión, a causa del acoplamiento capacitivo entre los devanados de alta y baja tensión del transformador, la magnitud de estas tensiones depende de :

- El método de puesta a tierra .

- La capacitancia entre los devanados del transformador
- El valor óhmico de la resistencia de puesta a tierra .

Por lo general se acostumbra que el neutro de alta tensión del transformador esté puesto a tierra directamente, con lo que, en el caso de una falla en las líneas de transmisión, ocasionará una tensión muy pequeña en la resistencia del neutro del generador por lo que se desprecia .

Para la protección de fallas a tierra en el estator se utiliza el arreglo mostrado en la figura 4.3, el cual nos muestra el caso de conexión a tierra por medio de resistencia de alto valor, en el que el neutro del generador se encuentra conectado a tierra a través de un transformador de distribución, los que tienen un valor estandarizado para esta protección de 120,220 ó 440 volts en el secundario, según sea la tensión de alimentación del relevador .

La aplicación de un relevador de sobrecorriente al neutro se dificulta conforme aumenta la impedancia a tierra; ya que, el bajo valor de corriente inicial de operación del relevador, lo mucho que este representa como carga para los transformadores de corriente (T.C.) y sobre todo, la imposibilidad de poder distinguir entre una falla a tierra y corrientes circulantes en el neutro debidas a terceras armónicas por desbalanceo en las fases del generador, las cuales pueden ser del orden de 10 a 15% de la corriente de generación máxima, por lo anterior, no se considera conveniente el uso de los relevadores de sobrecorriente, por lo que la protección presentada en la figura 4.3 se considera la más adecuada.

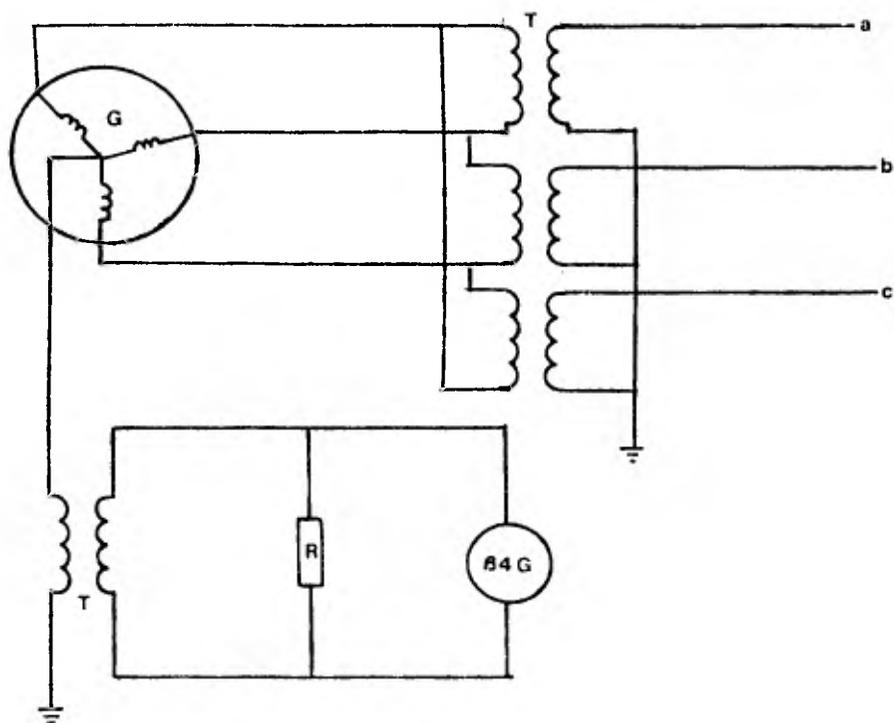


Figura 4.3. Protección contra fallas en el estator.

El arreglo anterior, ofrece una alta resistencia a tierra a la máquina, este tipo de protección requiere el uso de un relevador muy sensitivo que sin operar con la corriente - por tercera armónica, si detecta la más leve falla a tierra .

Mediante pruebas se ha encontrado que el valor-máximo de la resistencia para evitar la posibilidad de sobreten-sión transitoria, se obtiene mediante la expresión .

$$R_t = X_c \text{ ohms}$$

Donde: R_t es la resistencia de puesta a tierra .

X_c es la reactancia capacitativa del sistema en el lado de bajo voltaje .

Para el cálculo de X_c tenemos que :

$$X_c = \frac{1}{6\omega (C_g + C_b + C_t + C_s)}$$

Siendo: C_g = Capacitancia a tierra del generador

C_b = Capacitancia de los buses de fase aislada

C_t = Capacitancia de los devanados del trans - formador de bajo voltaje.

C_s = Capacitancia característica

En la práctica moderna con el fin de simplificar los cálculos se considera innecesario la determinación de X_c , se - leccionándose una resistencia la cual limitará la corriente de - falla a 15 amperes aproximadamente, por lo que la expresión para la resistencia nos queda.

$$R_t = \frac{V_g}{\sqrt{3} I_f} \text{ ohms}$$

Siendo V_g el voltaje entre fases de la máquina - en volts.

La expresión anterior nos proporciona el valor - de la resistencia de puesta a tierra, la cual limitará la corrien - te de falla a 15 amperes. El voltaje primario del transformador - de distribución será 1.3 veces el voltaje terminal de fase a tie - rra del generador, ésto con el fin de evitar las altas corrien - tes magnetizantes en el transformador de distribución cuando exis - ta la falla.

La capacidad del transformador así como la resistencia conectada al secundario se calcula de la siguiente forma.

La capacidad continua del transformador de - puesta a tierra es :

$$KVA = V_{pt} I_f / F.S.C.$$

Donde: V_{pt} = Tensión del transformador de puesta a tierra en KV .

I_f = Corriente de falla a tierra (valor pre-establecido) en amperes .

FSC = Factor de sobre carga

La selección del F.S.C. depende de la función del relevador. Si solo se pretende que éste solo haga sonar - una alarma, se podrá designar el transformador en forma contínua para un minuto, por lo cual el F.S.C. sería de 4.75 como se comprueba en la tabla 4.2 siguiente .

TIEMPO (MINUTOS)	0.5	1.0	5.0	30	60
F.S.C.	6.7	4.75	3.0	2.0	1.0

Tabla 4.2 Factores de sobrecarga para transformadores de puesta a tierra .

Por otra parte, si se desea que el relevador - dispare el interruptor principal y del campo de la máquina, se recomienda una capacidad de 1/2 minuto, ya que cuanto menor - sea la capacidad del transformador, mayor será la reactancia - inductiva que éste inducirá en serie con la resistencia de - puesta a tierra .

El valor de la resistencia conectada a el se - cundario del transformador de puesta a tierra es :

$$R = R_t / \sqrt{3} N^2 \text{ ohms}$$

siendo la N la relación de transformación del transformador de distribución, la tensión en la resistencia estará dado por :

$$V_R = V_G / \sqrt{3} N$$

Por lo tanto, la potencia continua de la resis - tencia conectada al secundario es :

$$P = V_R^2 / R \text{ KW}$$

Se considerará acertado el valor de la resis - tencia cuanto la corriente de falla a tierra se limite a valo - res entre 5 y 15 amperes, con lo cual se puede usar un releva - dor de acción lenta con el fin de hacer selectiva la protec - ción, evitando así, los disparos en falso por las fallas a tie - rra, en el lado de alta tensión de la red de transmisión .

Para la protección se utiliza un relevador de - sobretensión, calibrado con base a la tensión que se tendrá en los extremos de la resistencia conectada al secundario del - transformador de puesta a tierra. Este relevador acciona sobre el disparo de sierre de la válvula de la turbina, el interrup - tor principal, la excitatriz además de operar una alarma.

La protección de fallas entre espiras de la misma fase no se trata en este trabajo, debido a que las bobinas - de los grandes generadores modernos, están constituidos por una sola espira, con lo que se hace imposible la existencia de fallas entre espiras sin involucrar tierra .

b. Fallas de Fase a Fase. Estas fallas ocurren - muy rara vez, una de las causas es que, el aislamiento entre bobinas de fase diferente, es por lo menos el doble que el que - puede existir entre una bobina y el núcleo de acero .

La mejor forma de protección contra las fallas - entre fases en el estator del generador, la proporciona los relevadores diferenciales, además de brindar al mismo tiempo protección efectiva contra fallas de fase a tierra dentro del generador .

Es bien sabido que en un esquema de protección - diferencial simple; en el cual las corrientes que entran y salen del equipo protegido, se hacen circular en un circuito secundario, previa igualación mediante transformadores de corriente en condiciones normales de trabajo , cuya diferencia en caso de existir una falla se hace pasar por una bobina de operación; no funciona confiablemente por las siguientes razones .

i) Diferencia en las características de los - transformadores de corriente .

ii) Dificultad para igualar las corrientes en el circuito secundario .

iii) Relación de transformación variable con cambiador de taps.

Estos puntos tienden a hacer que el relevador - simple descrito tienda a operar innecesariamente. Por lo consi-

guiente los relevadores incorporan uno o más dispositivos para eliminar estas dificultades, siendo la protección diferencial de porcentaje la que resuelve estos problemas sin sacrificar sensibilidad. En la figura 4.4 se ilustra el principio de funcionamiento de este tipo de relevadores .

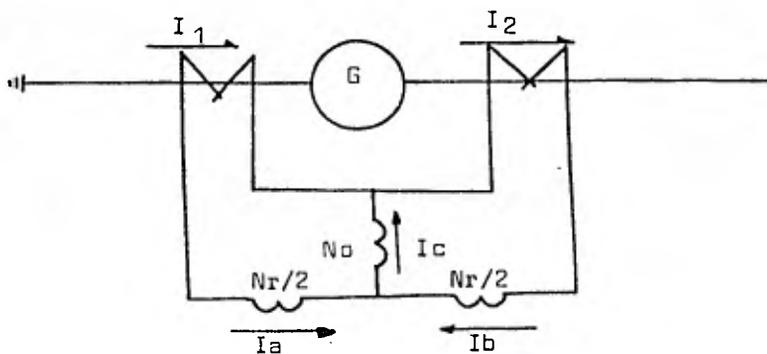


Figura 4.4 Protección diferencial de porcentaje .

De la figura anterior se deduce que :

$$I_c = I_a - I_b$$

El relevador opera cuanto $I_a \neq I_b$, lo cual hace a $I_c \neq 0$, desarrollándose fuerzas electromagnéticas que son proporcionales al cuadrado de las fuerzas magnetométricas; la condición para la operación será :

$$(N_0 I_c)^2 > [(N_r I_a / 2) + (N_r I_b / 2)]^2$$

Donde N_r = Número de espiras de la bobina de retención .

N_o = Número de espiras de la bobina en operación.

Considerando $N_r = K_e N_o$, siendo $0 < K_e < 1$; por lo que la ecuación del par operante es :

$$(N_o I_c)^2 > [K_e N_o (I_a + I_b)/2]^2$$

como los dos términos están elevados al cuadrado y afectados por N_o , se puede simplificar quedándonos :

$$I_c > K_e (I_a + I_b)/2$$

sustituyendo $I_c = I_a - I_b$ tenemos :

$$I_a - I_b > K_e (I_a + I_b)/2$$

Sumando I_b a los dos miembros de la ecuación - tenemos :

$$I_a > (2 + K_e) I_b / (2 - K_e)$$

$$I_b > (2 + K_e) I_a / (2 - K_e)$$

Las ecuaciones anteriores nos proporcionan las zonas de operación del relevador, como se puede apreciar en la figura 4.5.

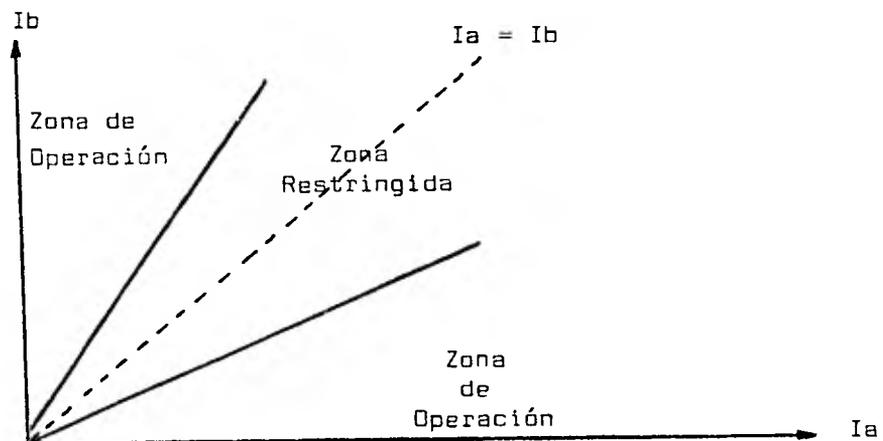


Figura 4.5. Zonas de Operación del Relevador Diferencial .

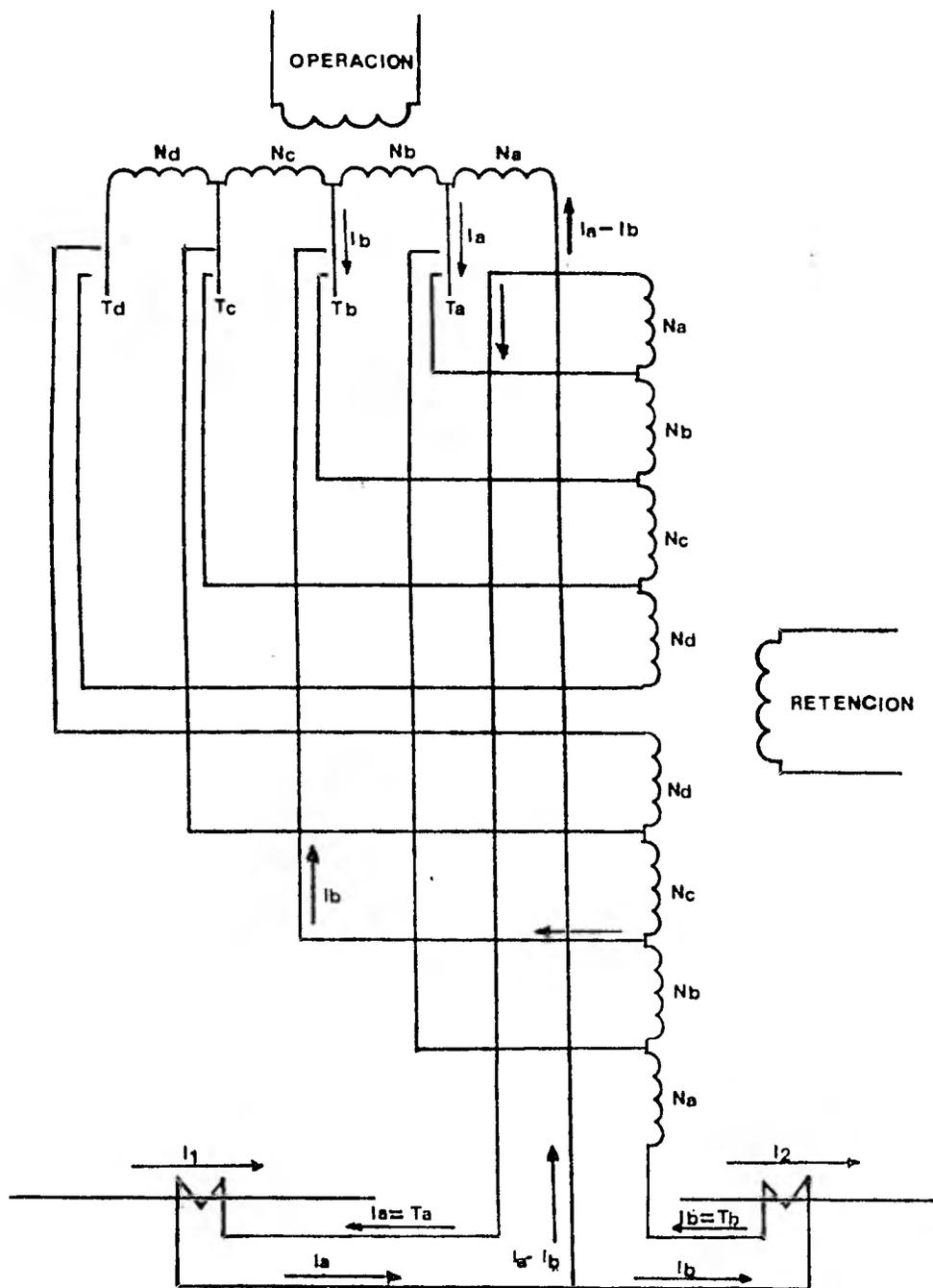


Figura 4.6. Diagrama esquemático de un relevador diferencial.

Es importante destacar la necesidad de que, en la protección diferencial se instalen transformadores de corriente de las mismas características para obtener así, $I_a = I_b$ lo que es el principio de operación de este tipo de protección.

Debido a que en la realidad las relaciones disponibles en los transformadores de corriente estandar no se pueden obtener las relaciones exactas se tiene en general que $I_a \neq I_b$. Los relevadores diferenciales generalmente tienen taps disponibles para absorber estas diferencias, según se indica en la figura 4.6.

Si las corrientes en los secundarios de los transformadores de corriente fueran I_a e I_b , desiguales entre sí, pero iguales a dos taps disponibles en el relevador, en la figura 4.6 se puede observar que :

$$I_a = I_{Ta}, e I_b = I_{Tb} \text{ con } I_{Ta} > I_{Tb}$$

Entonces los números de vueltas N_a, N_b, N'_a, N'_b son tales que los ampers-vueltas de operación sean cero.

$$N_b I_b - N_a (I_a - I_b) = 0$$

$$N_b I_b - N_a I_a + N_a I_b = 0$$

$$\therefore I_b (N_a + N_b) = I_a N_a$$

y los ampers-vueltas de retención producidos por I_a son iguales a los productos por I_b , ésto es :

$$I_a N'_a = I_b (N'_a + N'_b)$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene .

$$(N_a + N_b)/N_a = I_a/I_b = I_{Ta}/I_{Tb}$$

y

$$(N'_a + N'_b)/N'_a = I_a/I_b = I_{Ta}/I_{Tb}$$

Si $I_a > I_b$ pero se conectan al mismo taps, el porcentaje de desbalance o mismatch es la diferencia de corrientes entre la menor de ellas, lo que se puede representar de la siguiente manera :

$$M = (I_a - I_b)/I_b$$

Ahora bien si I_a se conecta por T_a e I_b se conecta por T_b , siendo $I_a = T_a$ pero $I_b \neq T_b$, los amperes-vueltas producidos por I_b serán $I_b (N_a + N_b)$, se puede calcular una I'_b equivalente que entrando al Tap T_a , produzca los mismos amperes-vueltas que produce la I_b al entrar por T_b .

$$I_b (N_a + N_b) = I'_b (N_a)$$

$$\therefore I'_b = I_b (N_a + N_b)/N_a$$

Calculando el desbalance con I'_b tendremos :

$$M = (I_a - I'_b)/I'_b \quad \text{si } I_a > I'_b, \text{ o bien}$$

$$M = (I'_b - I_a)/I_a \quad \text{si } I'_b > I_a$$

Para el primer caso se tiene :

$$M = \frac{I_a - I_b(N_a + N_b)/N_a}{I_b(N_a + N_b)/N_a} \rightarrow 0$$

Pero ya se vio anteriormente que :

$$(N_a + N_b)/N_a = T_a/T_b$$

$$M = \frac{I_a - I_b T_a/T_b}{I_b T_a/T_b} = \frac{(I_a/I_b) - (T_a/T_b)}{T_a/T_b} \rightarrow 0 \quad 1$$

Para el segundo caso tenemos :

$$M = \frac{-I_a + I_b (N_a + N_b)/N_a}{I_a} = \frac{-I_a + I_b T_a/T_b}{I_a}$$

$$\therefore M = \frac{(T_a/T_b) - (I_a/I_b)}{I_a/I_b} > 0 \dots\dots\dots 2$$

De 1 se observa que M es positivo para $I_a/I_b > T_a/T_b$, similarmente en 2 se tiene que M es positivo cuando $T_a/T_b > I_a/I_b$. Por lo tanto el desbalance de corrientes o mismatch se obtiene en forma general de la manera siguiente.

Primeramente se efectúan los cocientes I_a/I_b , T_a/T_b , lo que dará uno mayor que el otro, finalmente el desbalance de corrientes estará dado por :

$$M = \frac{\text{cociente mayor} - \text{cociente menor}}{\text{cociente menor}} \times 100$$

Este desbalance de corrientes se debe de comparar con el máximo desbalance permitido por el relevador (dato de instructivo); en caso de M sea mayor que el desbalance permitido por el relevador, se recalculará M para otros valores de T_a y T_b .

Para la protección diferencial del generador (87 G), se utiliza un relevador diferencial de porcentaje instantáneo, el cual posee alta velocidad de operación, aproximadamente 15 milisegundos.

Para proteger a las máquinas contra fallas externas, se usan relevadores de sobrecorriente de simple tiempo inverso o de tiempo definido, éstos van temporizados de 1 a 6 segundos. Las características de temporización se

determina en función del ajuste de los relevadores de sobrecorriente de la red de transmisión; ésto con el fin de hacerla selectiva.

Cabe hacer notar las fallas que se pueden tener en el rotor las cuales ocurren rara vez, ya que según datos de la práctica, los desperfectos o fallas se tienen en el estator de las máquinas .

Debido a que los circuitos del campo funcionan sin puesta a tierra una sencilla pérdida del aislamiento entre la espira y el hierro del rotor, no originará daño alguno o afectará el funcionamiento, por otra parte una segunda falla como la anterior, si podría tener efectos en el funcionamiento del generador lo que se traduciría en vibraciones en los cojinetes; por lo que la protección tratada en el inciso "h" de éste trabajo protege al generador de desperfectos .

Por otra parte, se podría tener calentamientos en el cuerpo del rotor debido a la sobre excitación. Este desperfecto está cubierto por el equipo de protección de sobrecalentamientos del estator o por el regulador de tensión .

B. Protección del Transformador .

El transformador es una máquina que falla poco en comparación a otros elementos del sistema lógicamente, requiere cuidados y atenciones, pero se puede decir que son mínimos a comparación de los requeridos por los generadores .

Cabe señalar que, cuando un transformador falla generalmente lo hace en forma aparatosa y grave, muchas veces con incendio. De ahí la importancia de contar con un esquema de protección rápido y seguro .

1. Condiciones Anormales .

De igual forma que para el generador , se - tratará primeramente las condiciones anormales de trabajo, para posteriormente hablar de las fallas .

a. Bajo Nivel de Aceite. Como ya se ha visto - el aceite cumple funciones importantes dentro del transforma - dor, entre las cuales destacan las de actuar como aislante, co - mo refrigerante y como protector de los aislamientos sólidos - de los devanados en contra de la absorción de humedad y tempe - raturas excesivas .

Para la supervisión del nivel de aceite en un - transformador, se utilizan indicadores de nivel; -el cual se - instala directamente en el transformador. El indicador de ni - vel de aceite se compone de dos conjuntos; el mecanismo trans - ductor y la parte indicadora. El primero es el encargado de - transformar los niveles del aceite en señales o movimientos - equivalentes, és en general un flotador con un conjunto de - engranes; el segundo es el encargado de registrar los movimien - tos o señales para que el operador pueda conocer fácilmente - los distintos niveles de aceite y casi siempre es en forma de - caratula, en el que existen varias graduaciones que represen - tan los diferentes niveles de aceite.

El indicador de nivel posee un contacto de alar - ma que está situado en la posición mínima del nivel de aceite - ésto con el fin de enviar una señal y dar a conocer la anomalía para que sea reparada .

b. Sobrecalentamientos. Una sobrecarga, el sobre - voltaje, las bajas frecuencias y las fallas en el sistema de en - friamiento, son las causas más comunes de un sobrecalentamiento en los transformadores, con lo que se puede deteriorar el aisla - miento sólido de los devanados .

Por tal motivo se deben instalar indicadores de temperatura que al igual que el anterior, consta de un transductor y un indicador. Estos mecanismos, además de proporcionar una lectura exacta de la temperatura están equipados con un contacto de alarma, que indicará cuando se tenga un sobrecalentamiento; un segundo contacto podrá sacar el transformador de operación por medio de un relevador auxiliar. La graduación de la alarma así como el disparo se hará en base a los datos de temperatura permitida para el transformador, evitando que ésta no cause daños graves .

2. Condiciones de Falla .

En un transformador solo existen fallas en los devanados o entre éstos y el núcleo , las cuales son fallas internas y se pueden dividir en :

a. Fallas Menores. En general todas las fallas internas son muy serias pero las fallas incipientes en su etapa inicial no son severas, pero pueden dar lugar a fallas mayores, si no se detectan desde su inicio. Entre éste tipo tenemos las siguientes :

- Conexiones de alta resistencia o defectuosas en los embobinados con producción de arqueos o calentamientos localizados .
- Fallas en el sistema de enfriamiento, nivel bajo de aceite, las cuales producen puntos calientes en los devanados, con el consecuente deterioro del aislamiento sólido .

Para la detección de las fallas menores además de la protección del transformador de sus efectos, se utiliza el relevador Buchholz. La cual es una práctica europea que en -

México se ha generalizado con resultados satisfactorios. Este relevador presenta una gran sensibilidad a las fallas menores aprovechando el principio de que; los aceites minerales producen gases inflamables al descomponerse a temperaturas superiores a los 350°C , tales como acetileno, hidrógeno y monóxido de carbono .

En la figura 4.6 se muestra la forma de instalarle y su principio de operación. El relevador Buchholz opera con gran rapidez para las fallas severas dentro del transformador, aprovechando que las fallas severas presentan una generación súbita de gases, los cuales causan movimiento de aceite y gas en el tubo que interconecta el tanque conservador y el transformador .

En la tabla 4.3 se muestran los valores de ajuste para el relevador Buchholz, dependiendo de la capacidad del transformador .

Cuando este tipo de relevador opera, se sugieren las siguientes reglas como seguridad para el transformador.

Operación de alarma, sin operación de disparo - el transformador debe de desenergizarse de inmediato y se procederá a un análisis de los gases desprendidos. Dependiendo del análisis se podrán tener los casos siguientes .

- El gas no es inflamable y/o pruebas de presencia de acetileno negativa; los gases son restos de aire con lo que el transformador puede entrar en operación. Si el relevador continúa alarmando sin la presencia de gases inflamables, se evidencia que existe entrada de aire al transformador la cual debe eliminarse .

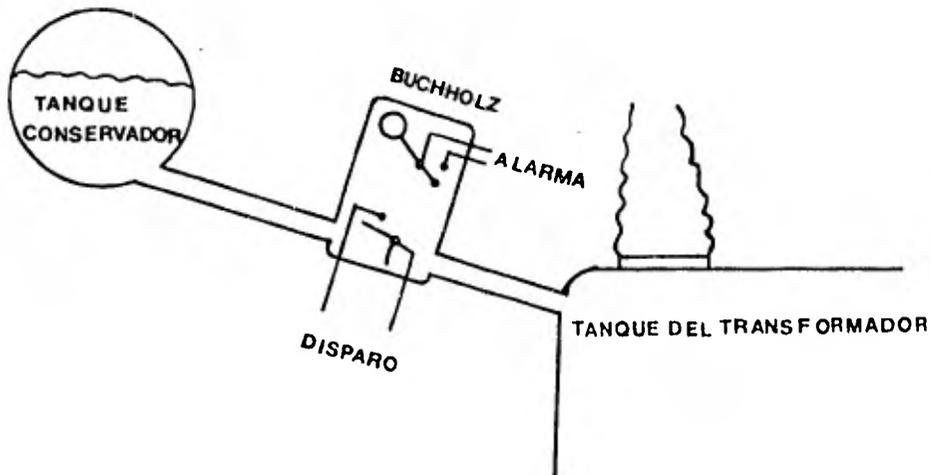


Figura 4.7. Instalación y funcionamiento del relevador Buchholz.

CAPACIDAD DEL TRANSFORMADOR	Ø DEL TUBO DE INTERCONEXION	GAS ACUMULADO (cm ³) ALARMA		VEL. DEL ACEITE cm/seg DISPARO	
		RANGO	AJUSTE	RANGO	AJUSTE
HASTA 1 MVA	2.5 cm	100-120	100	75-125	90
DE 1 A 10 MVA	5.0 cm	185-225	210	80-135	100
MAS DE 10 MVA	7.5 cm	220-280	250	95-115	110

Tabla 4.3. Valores de ajuste para el relevador Buchholz.

- Presencia de acetileno (gases inflamables) en este caso existen fallas menores internas, las que deben localizarse y eliminarse antes de volver a energizar el transformador.

Operación de disparo sin operación de alarma, - esto provocado por flujo excesivo debido a que el transformador fue sobrecargado térmicamente, en tal caso se dará el tiempo necesario para el enfriamiento para después energizar nuevamente.

Quando la alarma y el disparo se dan al mismo tiempo, se deberá llevar a cabo un análisis de gases para establecer las causas .

b. Fallas Severas. Entre este tipo de fallas se consideran a las siguientes :

- Arqueo entre un devanado y el núcleo o el tanque, debido a sobretensiones causadas por descargas atmosféricas, fallas externas o maniobras de cierre y apertura de interruptores en el sistema.
- Arqueo entre devanados o entre espiras contiguas de capas diferentes de un mismo devanado, debido a las causas anteriores o por movimiento de los devanados, bajo la acción de fuerzas electromagnéticas durante cortos circuitos externos.
- Fallas en los contactos de cambiadores de derivaciones, produciéndose calentamientos localizados o cortos circuitos de vueltas entre derivaciones.
- Fallas entre espiras o a tierra se presentan sobre todo, en transformadores viejos o transformadores cuyo aislamiento se encuentra deteriorado .

Una parte importante de la protección de los transformadores la constituyen los relevadores diferenciales cuyo principio de operación ya fue tratado con anterioridad. Para el caso de los transformadores se utiliza el relevador-diferencial de porcentaje con restricción de armónicas .

Este relevador tiene dos unidades diferentes; una diferencial normal de porcentaje y otra de restricción de armónicas. La condición para que haya disparo, es que deberán operar ambas unidades .

Las corrientes de fallas en los sistemas de potencia, contienen una componente senoidal casi pura y una componente transitoria de corriente directa. Por el contrario para el caso de los transformadores, se presenta la corriente magnetizante momentánea, la cual contiene porcentajes de corrientes armónicas, lo que suministra un medio excelente para distinguir una de otra .

El principio de operación de los relevadores-diferenciales de porcentaje, con unidad de bloqueo operadas por armónica, se presenta en los rubros siguientes :

- La corriente que proviene de los transformadores de corriente es pasada por las correspondientes bobinas de restricción. Exclusivamente la componente fundamental de la corriente diferencial se pasa por la bobina de operación, mientras que las componentes armónicas de esta corriente son pasadas también por la bobina de restricción .
- Cuando se hace pasar una corriente por uno de los devanados de restricción (igual a la

corriente diferencial) con un contenido alto de armónicas, simulando la energización de un transformador, la unidad de restricción de armónica no operará si el contenido de armónicas es superior al 15 ó 20% (típicamente la segunda armónica), mientras que la unidad diferencial de porcentaje si operará. En la tabla 4.4 se muestra las amplitudes de armónicas de una corriente magnetizante momentánea en transformadores .

CORRIENTE MAGNETIZANTE	
COMPONENTE	VALOR TIPICO
C.D.	55%
2a. ARMONICA	63%
3a. ARMONICA	26.8%
4a. ARMONICA	5.1%
5a. ARMONICA	4.1%
6a. ARMONICA	3.7%
7a. ARMONICA	2.4%

Tabla 4.4 Amplitudes de Armónicas de una corriente Mag.Momentánea.

- Para fallas externas la unidad diferencial de porcentajes no operará, mientras que la unidad con restricción de armónicas; podrá o no operar por tanto no hay disparo .

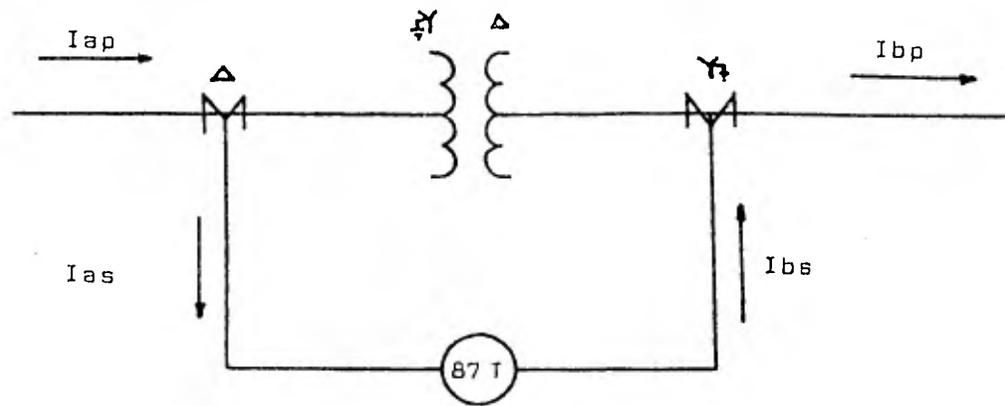


Figura 4.8 Conexión de los Transformadores de Corriente para la Protección Diferencial del Transformador de Potencia .

- En el caso de fallas internas ambas unidades operarán obteniéndose el disparo del relevador diferencial. Con lo anterior se asegura la confiabilidad de la protección .

Este tipo de relevadores tienen por lo general una unidad de sobre-corriente instánea que podrá disparar por si sola, en caso de que la corriente de falla interna sea de demasiado grande y sature los transformadores de corriente y los transformadores internos del relevador, originando que hubiera porcentajes altos de armónicas que pudieran bloquear la unidad con restricción de armónicas .

Por otra parte, es importante recordar que en los transformadores delta-estrella, existe un defasamiento de 30° en sus corrientes la cual se compensa mediante la conexión de los transformadores de corriente los que deben de conectarse en la forma siguiente .

En el lado delta del transformador protegido se conectarán en estrella los transformadores de corriente, mientras que para el lado estrella del transformador de potencia los transformadores de corriente se conectarán en delta.

Para corregir la diferencia en las corrientes de los transformadores de corriente en su secundario, se llevan a cabo las consideraciones que a continuación se mencionan .

En la figura 4.8 se muestra un transformador trifásico conectado en estrella-delta, en el que las corrientes del relevador (87 T) están dadas por :

$$I_{as} = \sqrt{3} I_{ap} / RTC_1$$

$$I_{bs} = I_{bp} / RTC_2$$

$$I_{cs} = I_{cp} V_a / V_b$$

Con lo que la relación de corrientes I_{as}/I_{bs} está dada por :

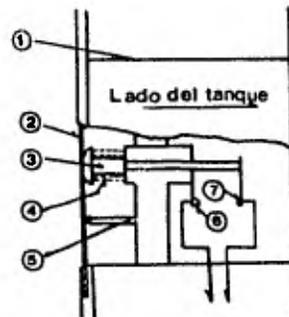
$$I_{as}/I_{bs} = \frac{\sqrt{3} I_{ap}/RTC_1}{I_{bp}/RTC_2}$$

Para posteriormente calcular el porcentaje de desbalance de corriente mediante la fórmula general descrita con anterioridad en este trabajo, para la protección diferencial del generador .

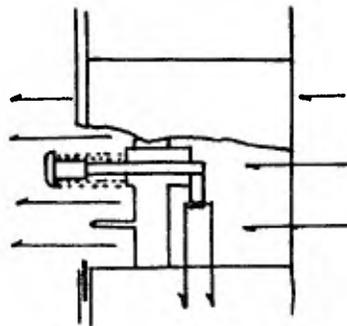
Finalmente, debido a que las relaciones de transformación de los transformadores de corriente (RTC) se hace tomando como base la relación en el tap central del transformador de potencia o elevador de tensión, a el porcentaje de desbalance de corriente obtenido se le deberá agregar la variación máxima en porcentaje para el tap mayor. Si el relevador presenta porcentaje de desbalance de corriente ajustable, deberá verificarse que el desbalance calculado sea inferior al máximo desbalance del relevador dado en el instructivo .

Como complemento a las protecciones anteriormente expuestas, se debe instalar en el transformador un dispositivo de alivio de presión. Cuando se presenta una falla en el transformador se presenta un desplazamiento súbito de aceite hacia el tanque conservador , lo que provoca el disparo del relevador Buchholz por otra parte la falla ocasiona una presión interna anormalmente elevada, la cual no se libera con el disparo del relevador .

La presión elevada dentro del transformador, puede dañar el tanque de éste, lo que representaría grandes costos de reparación o reposición, además de no poderse incorporar al servicio en un tiempo conveniente .



i) Condiciones normales



ii) Condiciones de falla

1. Caja
2. Placa de Ruptura
3. Barra Móvil
4. Resorte
5. Soporte
6. Contacto
7. Contacto

Figura 4.9 Dispositivo de Alivio de Presión.

Dentro del tanque, la presión de operación generalmente varía dentro del rango de 0.5 a 0.8 atmósferas, esta presión se incrementa gravemente en los casos de fallas severas. Con el dispositivo de alivio de presión, se libera la sobrepresión en un tiempo de operación de 1 a 6 ciclos, dependiendo de la velocidad del cambio de presión .

En la figura 4.9 se muestra el dispositivo, así como la forma de actuar; el dispositivo se monta en el extremo del orificio de desahogo de ventilación o en la plancha lateral de la pared del depósito de aceite .

Un transformador en operación, puede estar sometido a sobretensiones extremas ocasionadas por descarga atmosféricas, por fallas monofásicas o por operación de interruptores. Estos voltajes se presentan en forma de un impulso caracterizado por una rapidísima elevación a su nivel máximo y un lento descenso a cero .

La forma de protección contra fallas exteriores la proporciona los pararrayos o apartarrayos autovalvulares, los cuales se comportan como una resistencia variable con la tensión, tal que para voltajes bajos su resistencia es muy alta y para voltajes altos su resistencia es baja. La capacidad térmica de descarga en estos apartarrayos es muy limitada a algunas decenas de microsegundos .

La regla para seleccionar el voltaje nominal del apartarrayos se basa en la forma que se encuentra el sistema con respecto a tierra, ésto es, considerando un 84% del voltaje máximo de operación entre fases del transformador de potencia; para sistemas sólidamente conectados a tierra y del 105% para sistemas no aterrizados o conectados a tierra a través de una impedancia .

La tensión nominal de un apartarrayos es el valor eficaz del sobrevoltaje de baja frecuencia (50 ó 60 c.p.s.) para el cual puede interrumpir la corriente de descarga a tierra, volviéndose a su estado no conductor .

En el caso del transformador, podemos concluir que la protección fundamental la proporcionan los relevadores-diferenciales. Por otra parte tenemos que la protección de respaldo de las líneas adyacentes a un transformador, constituye también casi invariablemente la protección de respaldo del mismo transformador de potencia .

Para el caso de que el transformador no esté -conectado sólidamente a tierra, la protección diferencial debe ser complementada con una protección selectiva de fallas a tierra .

C. Transformadores de Instrumento .

Dada la importancia que tienen los transformadores de instrumentos en los esquemas de protección, es conveniente hacer notar la función tan importante que éstos desempeñan, entendiéndose por los mismos, los transformadores de corriente (T. Cs.) y los de potencial (T. Ps.)⁹

Los transformadores de instrumento, son parte -esencial en cualquier sistema de potencia eléctrica, ya sea -para el control, medición y protección. Como funciones principales de estos transformadores se tiene :

⁹ C. Russell Masson. El Arte y la Ciencia de la Protección por Relevadores. 8a. Impresión; México: Cía. Editorial Continental, S.A. 1980) pp. 145-169 .

- Proporcionar el aislamiento necesario, entre la alta tensión y los instrumentos de baja tensión, para que éstos puedan desempeñar las funciones encomendadas .

- Brindar una proporcionalidad entre las magnitudes de entrada y salida .

Dichas funciones se llevan a cabo, con el cambio de magnitudes de voltaje o corriente, por lo que es conveniente conocer la precisión con que se lleva a cabo el cambio.

En general se pueden mencionar los factores que influyen en la precisión de los transformadores de instrumento, éstas son :

- Diseño y construcción .
- Condiciones en el circuito, tales como la tensión, corriente, frecuencia.
- El burden o carga conectada al secundario del transformador .

Como se mencionó anteriormente, solo existen dos tipos de transformadores de instrumentos que son :

a. Transformadores de Potencial. Estos son diseñados para conectarse entre fases o de fase a neutro, mediante fusibles para su protección. Por lo general el valor de voltaje del secundario es de 120 volts.

En estos transformadores existe un error en relación de transformación y un error de fase o ángulo, el primero se expresa en por ciento y se calcula de la siguiente forma :

BURDEN *	VOLTS - AMPERES A 120 V.	FACTOR DE POTENCIA DEL BURDEN
w	12.5	.10
x	25.0	.7
y	75.0	.85
z	200.0	.85
zz	400.0	.85

Tabla 4.5 Clasificación de los T.Ps.,
con respecto al Burden.

PRESICION	ERROR DE RELACION EN %	LIMITE DEL F.P. DEL BURDEN
1.2	\pm 1.2	.6 - .1
.6	\pm 0.5	.6 - .1
.3	\pm .03	.6 - .1

Tabla 4.6 Clasificación de los T.Ps.,
con respecto a la precisión.

* BURDEN : Es carga conectada al secundario del T.P.

$$\eta = \frac{N V_a - V_b}{V_a} \times 100$$

Donde N = Relación de transformación

Va = Tensión del primario

Vb = Tensión del secundario

Para un T.P. es importante conocer la potencia de éste, la cual se calcula :

$$P = V_b I_b = V_b^2 / Z$$

teniendo que I_b es corriente en el secundario .

Z = Impedancia de la carga por alimentar .

La potencia es un factor que sirve para la clasificación de los T.Ps., esta clasificación se presenta en la tabla 4.5, la cual nos presenta el tipo de burden y el factor de potencia de éste, en función de la potencia .

Además de los datos anteriores, se deberá escoger la clase de precisión, esta característica se determina en función de la actividad que el transformador de potencial; en la tabla 4.6 se aprecia las diferentes clases de precisiones - que de acuerdo a las normas internacionales existen. Para el caso de las protecciones la precisión de 0.1 es la que se recomienda.

b. Transformadores de Corriente. Son diseñados para conectarse en serie con la fase de alta tensión y se utilizan para variar la magnitud de la corriente, obteniéndose así un valor adecuado para alimentar los aparatos de medición-control o protección. Los valores de corriente en el secundario de los T.Cs. se encuentra estandarizado para valores multiples de 5; en nuestro país el que generalmente se utiliza es el de 5 ampers .

Al igual que los transformadores de potencial, los de corriente presentan un error de relación de transformación y uno de ángulo o fase. Para el primer caso se expresa en por ciento y lo da la siguiente ecuación .

$$\% \text{ de error} = (I_e/I_s) 100$$

con I_s = corriente del secundario
 I_e = corriente de excitación

El error de ángulo al igual que en los T.Ps., es el ángulo que existe entre la magnitud de la variable en el primario y la magnitud de la variable en el secundario, que para este caso son, la corriente primaria y secundaria .

En los transformadores de corrientes el error de ángulo de fase puede tener una importante influencia, ya que propicia errores en las mediciones, por lo que se recomienda reducir al mínimo dicho error .

La potencia de un T.C. está en función de la carga por alimentar en el secundario, teniéndose para ésta la expresión :

$$P = V_b I = Z I_b^2$$

siendo Z = impedancia de la carga o burden
 I_b = corriente secundaria
 V_b = voltaje secundario

Los transformadores de corriente se normalizan de acuerdo a sus valores de clase de precisión, de acuerdo a las normas internacionales de la Comisión Internacional de Electrotécnica (CIE) y se tienen las tablas 4.7 y 4.8. Para las protecciones se recomienda una clase de precisión de 1.2 solo se usará la precisión de 0.3 para la medición.

DESIGNACION DEL BURDEN *	CARACTERISTICAS DEL BURDEN		BURDEN A 60 Hz. y 5 A		
	RESISTENCIA	INDUCTANCIA	IMPERANCIA	VA.	F.P.
B 0.1	.09	.116	.1	± 2.5	.9
B 0.2	.18	.232	.2	± 5.0	.9
B 0.5	.45	.580	.5	12.5	.9
B 1	.5	2.3	1.0	25	.5
B 2	1.0	4.6	2.0	50	.5
B 4	2.0	9.2	4.0	100	.5
B 8	4.0	18.4	8.0	200	.5

Tabla 4.7 Clasificación de los T.Cs. con respecto al Burden.

CLASE DE PRECISION	ERROR DE RELACION (EN % REFERIDO A LA I. NOMINAL).	ERROR COMPUESTO (REFERIDO A LA I. NOMINAL LIMITE EN %)	ERROR DE ANGULO (MINUTOS)
5P	± 1	5	± 60
10P	± 3	10	--

Tabla 4.8 Clasificación de los T.Cs. con respecto a la Precisión.

*BURDEN : Carga conectada al secundario del T.C.

Finalmente, considerando que los relevadores diferenciales son la médula de la protección de aparatos en un sistema de potencia eléctrica, se deberá tener muy en cuenta los posibles errores del comportamiento de los transformadores de corriente .

Existen dos condiciones fundamentales que deben de ser previstas y evitadas en la operación de un relevador diferencial debidas a la saturación de los transformadores de corriente que son :

- Operación erróneas por fallas externas
- No operación o bloqueo en fallas internas, por generación excesiva de armónicas.

Una forma de evitar la primera, consiste en calcular y chequear que el error en la relación de transformación del T.C., sea inferior al 10% para valores máximos de corriente de la falla externa, con lo cual se consigue una generación muy baja de armónicas.

La forma de evitar la segunda condición consiste en verificar que el error en la relación de transformación del T.C. sea menor al 20% para un valor de corriente igual a la corriente mínima de operación (pick-up) de la unidad instantánea, 8 veces el tap escogido en relevadores diferenciales de porcentaje con restricción de armónica y 10 veces el tap escogido en relevadores diferenciales de porcentaje con unidad de bloqueo, operada por armónicas.

Calculando la tensión secundaria requerida en el transformador de corriente se tiene :

$$E_s = I_s Z .$$

De la curva de excitación correspondiente al tap usado en el T.C., se determina la corriente de excitación requerida (I_e) .

Como en cualquier proyecto, el punto de vista económico juega un papel muy importante, ya que cada día se tiene más conciencia de que existe un límite económico en el costo del esquema de protección aplicado a cada planta generadora .

Muchas veces los componentes del esquema se instalan sobre la base de una práctica normalizada, con lo que el costo pasa a segundo término .

Para la elección de un esquema de protección así como sus componentes se deberán tener presentes los siguientes puntos :

- El costo de la reparación del equipo dañado.
- La posibilidad de que la falla pueda extenderse a otros equipos .
- Tiempo que el equipo está fuera de servicio, lo que representa una pérdida en ingresos .
- La carga que alimenta el equipo .

En términos generales se puede decir que, la evaluación económica de un esquema de protección es un asunto muy complejo el cual no será tratado a detalle en el presente trabajo. Pero se puede mencionar que, la evaluación se deberá hacer en base de su contribución en la continuidad y un mejor servicio para los consumidores .

El costo del sistema de protección, también se encuentra en función del costo de la planta que se va a proteger en la práctica se ha designado un valor promedio al costo de las

protecciones, éste es de un 8 a 10% del costo total de la planta, para cuestión de diseño solamente. Como se menciona anteriormente, dependiendo de la importancia y varios aspectos más, es el porcentaje asignado, por lo que el porcentaje anterior se toma como medida inicial variable, nunca como verdadera y definitiva.

Otro aspecto positivo de la correcta selección de las protecciones, es el ahorro que representa en las refacciones de los equipos del sistema que se requieran en almacén.

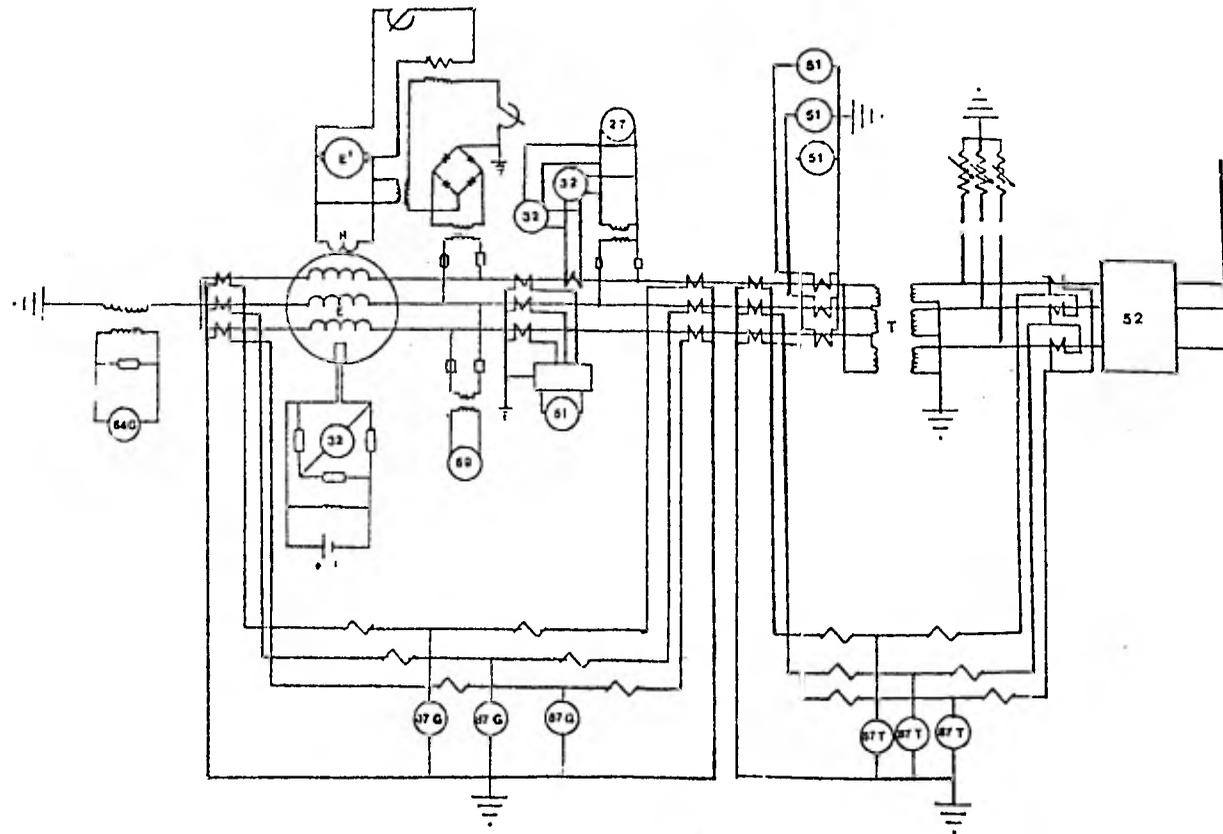


Figura 4.10. Diagrama Trifilar Representativo del Esquema de Protección presentado .

SIMBOLOGIA DE LOS DIAGRAMAS

G	Generador
E	Devanado del Estator del Generador
R	Devanado del Rotor del Generador
E'	Excitatríz
T	Devanados del Transformador
27	Relevador de Bajo Voltaje
32	Relevador Direccional de Potencia
51	Relevador de Sobrecorriente
52	Interruptor de Corriente Alterna
59	Relevador de Sobrevoltaje
64G	Relevador de Fallas a Tierra del Devanado del Estator
87G	Relevador Diferencial del Generador
87T	Relevador Diferencial del Transformador

Apartarayos Autovalvular



C A P I T U L O V

C O N C L U S I O N E S

Al finalizar el siglo XVIII, en nuestro país - se consolidó un desarrollo industrial considerable, lo cual - demandaba una fuente de energía que remplazara a la ya exis - tente. Esta necesidad trae consigo la instalación de la primera planta de energía eléctrica, lo que marcó el inicio mun - dial de la producción de energía eléctrica con fines lucrati - vos.

Dado que las compañías de generación eléctrica perseguían beneficios particulares existía una irregular dis - tribución de estos servicios, dándoseles prioridad a los cen - tros de consumo que presentaban grandes ganancias, sin poner - atención a la consolidación industrial del país ni al benefi - cio social que representaría una mejor distribución del fluí - do eléctrico. Es por lo anterior que fue creada la Comisión - Federal de Electricidad, con lo cual se inicia la nacionaliza ción de la industria eléctrica, la que se llevo a cabo en el - año de 1958; lo que conllevaría a una mejor distribución de la energía eléctrica y los beneficios que ésto representaba.

Desde el inicio de las plantas generadoras en - México, se ha aprovechado el potencial hidráulico del país, - que al principio representaban instalaciones de bajo costo ;

a medida que las grandes caídas naturales se escaseaban, se incrementaban los costos de las plantas hidroeléctricas, lo que - propició el desarrollo de las termoeléctricas, dado que en México existía un enorme potencial energético en los años sesenta. La generación a base de las hidroeléctricas aportan hoy en día 17,839 GWh, mientras que las termoeléctricas aportan 40,231 GWh.

La energía eléctrica forma parte integral de la vida de los países industrializados. En nuestro país el 56% de la energía total es aprovechada por el sector industrial, demostrándose así el papel tan importante que desempeña en el nivel de desarrollo en que nos encontramos.

La escasez y encarecimiento de los energéticos - a nivel mundial crearon la tendencia hacia el ahorro de éstos. Por lo que la Comisión Federal de Electricidad previó la necesidad de encontrar otras fuentes de energía, a través de las - cuales obtener el fluido eléctrico tan necesario e importante, encontrándose como alternativas las siguientes :

- La Geotérmica
- Carbón de Piedra
- Nucleoeléctrica
- Energía Solar

En México ya se encuentran operando plantas geotérmicas con una capacidad instalada de 150 MW., y ésta se encuentra en Baja California Norte. En Piedras Negras, Coahuila, se encuentra la termoeléctrica "JOSE LOPEZ PORTILLO", ésta utiliza el carbón para su funcionamiento.

Por otra parte se tiene proyectado que la segunda mitad de 1982 se ponga en operación la planta nucleoeléctrica de Laguna Verde, Veracruz, mientras que la generación de - electricidad por medio de la energía solar se encuentra toda - vía en etapa de investigación .

Con lo anterior, México está superando uno de sus retos que impone el desarrollo industrial, ésto es, producir más energía eléctrica con un ahorro máximo de su petróleo y sus derivados .

Considerando los transtornos que ocasionaría la pérdida de fuentes de energía eléctrica nace la necesidad de proteger a las plantas generadoras. Los relevadores proporcionan el método adecuado para la supervisión y protección, dentro de las 5 ventajas que proporciona la protección por elevadores tenemos :

- La imposibilidad de las interrupciones monofásicas .
- Disponibilidad de ajustes y selección de las características actuantes .
- No se requiere el reemplazo del relevador para cada operación .
- Sensibilidad y selectividad de la protección .
- Tiempo de disparo ajustable a las necesidades .

En las protecciones no existen normas que rijan la selección y aplicación de los relevadores, por lo cual ésto queda regido por el criterio de las personas encargadas de las protecciones, así como las costumbres del país. Una de las características principales consiste en la importancia que la planta representa para el sistema, así como la carga por alimentar .

El esquema de protección presentado, no contempla los aspectos de servicios propios y servicios auxiliares de estación ; abocándose solo a el conjunto generador transformador de potencia. Lo anterior es en base a que los

servicios propios y auxiliares de estación requieren de la misma atención que cualquier componente de una planta generadora, lo que haría el trabajo demasiado extenso y con el consiguiente riesgo de confusiones .

La demanda de energía eléctrica se incrementará a razón de 40% en las décadas restantes de nuestro siglo , con lo cual se requiere que los sistemas eléctricos de potencia existentes y los proyectados, trabajen a su máxima capacidad, por lo que es necesario preveer las consecuencias de las fallas en las plantas generadoras, tranto de evitar con la protección por medio de los relevadores, los daños que pudieran derivarse de las mismas, así como las pérdidas de fuentes de energía .

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

- B. Ravindranath, M.Chander. Protección de Sistemas de Potencia e Interruptores. Primera Edición; México: Editorial Limusa, S.A. 1980. 505 pp.
- Ballesteros Weis Luis. Diccionario Técnico de Electromecánica, Inglés - Español. Tercera Reimpresión; México: Editorial Limusa, S.A., 1980. 292 pp.
- Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas. Planeación de la Industria Eléctrica Mecánica en México para los próximos 25 años. CANAME; México, 1979. 52 pp.
- Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística Geográfica e Informática, C.F.E. El Sector Eléctrico en México; México: Secretaría de Programación y Presupuesto, 1981.
- Enriquez Harper Gilberto. Fundamentos de Protección de Sistemas Eléctricos por Relevadores. Primera Pre-edición; México: Editorial Limusa, S.A., 1981. 534 pp.
- Mendez Albores Raúl. Aceites Aislantes para Transformadores e Interruptores. Pre-edición; México: Imprenta Vega 1978.
- General Electric Co. Electric Utility Systems & Practices. Tercera Edición; New York: General Electric Co. 1974. 260 pp.

Gerencia de Generación y Transmisión. Síntesis de Fallas en -
Líneas de Transmisión 1980; México: Comisión Fe-
deral de Electricidad 1981. 20 pp.

González Apaolaza Raúl. Plantas Eléctricas. Primera Edición;-
México: Editorial Trillas, 1979. 597 pp.

Luca M. Carlos. Plantas Eléctricas. Octava Edición; México: -
Editorial Representaciones y Servicios de Inge -
nería,S.A. 1980. 447 pp.

Russell Mason C. El Arte y la Ciencia de la Protección por Re -
levadores. Octava Impresión; México: Compañía -
Editorial Continental,S.A. 1980. 480 pp.

University of Miami. Diccionario Inglés-Español, Español-In -
glés. Rep. de Panamá: Editorial América,S.A., -
1981. 540 pp.

Viqueira Landa Jacinto. Redes Eléctricas. Segunda Edición; Mé -
xico: Representaciones y Servicios de Ingeniería
S.A., 1975. 415 pp.