

2

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

OPERACION DE LAS PROTECCIONES Y ALARMAS DE UNA MINI-  
CENTRAL HIDRAULICA PARA LA HCJB

TESIS DE GRADO PREVIA A LA OBTENCION  
DEL TITULO DE INGENIERO ELECTRICO CON  
LA ESPECIALIZACION EN POTENCIA.

JOSE RODOLFO SALINAS SERRANO

QUITO, NOVIEMBRE 1981

CERTIFICO, que la presente tesis  
fue elaborada en su totalidad por  
el señor JOSE RODOLFO SALINAS SE-  
RRANO, bajo mi dirección

A handwritten signature in cursive script, appearing to read "Ing. Eric Moore".

Ing. Eric Moore  
Director de Tesis

A G R A D E C I M I E N T O :

AL INGENIERO ERIC MOORE, DIRECTOR DE TESIS  
A MI HERMANA, DOLORES SALINAS POR LA TRANS -  
CRIPCION DEL PRESENTE TRABAJO.

# I N D I C E

Pag.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION, DEFINICION, OBJETIVO

I.1	Introducción .....	1
I.1.1.	Tecnología aplicable .....	2
I.1.2.	Operación, mantenimiento y reparación..	3
I.2.	Definición general .....	4
I.2.1.	Tipo de central a ser instalada .....	4
I.2.2.	Descripción General de la obra .....	5
I.3.	Alcance y objetivo .....	7

## CAPITULO II

### DESCRIPCION DEL GENERADOR, SISTEMA DE EXCITACION Y TRANSFORMADOR

II.1.	Generador .....	9
II.1.1.	Eficiencia del generador .....	11
II.1.2.	Datos de diseño del generador .....	12
II.2.	Cubículo principal de control .....	15
II.2.1.	Equipo de control en el cubículo del generador .....	16
II.2.2.	Señalización y alarmas .....	18
II.3.	Conexión del neutro del generador a tierra .....	20

	Pag.
II.4. Sistema de excitación .....	21
II.4.1. Descripción y funcionamiento del sistema de excitación .....	23
II.4.2. Regulador de voltaje .....	25
II.4.2.1. Descripción y funcionamiento del regulador de voltaje .....	25
II.4.2.2. Compensador de variación de voltaje.	27
II.5. Transformador .....	28
II.5.1. Datos de diseño del transformador...	30

### CAPITULO III

#### DESCRIPCION Y PROTECCION DE LOS SERVICIOS AUXILIARES DE LA CENTRAL

III.1. Servicio eléctrico de la central ....	31
III.2. Alimentación a las cargas de la central .....	34
III.2.1. Alimentación a la barra de 24 VCD ...	35
III.2.2. Descripción del sistema de 24 VED ....	36
III.3. Protección del sistema de 24 VCD ....	38
III.3.1. Suspensión del voltaje de central ....	38
III.3.2. Falla a tierra en la barra de 24 VCD..	38
III.3.3. Protección de los circuitos de 24 VCD.	39
III.3.3.1. Falla en los circuitos $P_1N_1$ .....	39

	Pag.
III.3.3.2. Falla en el circuito $P_2N_2$ .....	40
III.3.3.3. Falla en el circuito $P_3N_3$ .....	41
III.3.3.4. Falla en el circuito $P_4N_4$ .....	41
III.3.3.5. Falla en el circuito $P_5N_5$ .....	42

#### CAPITULO IV

##### PROTECCION DEL GENERADOR-TRANSFORMADOR

IV.1.	Fallas que pueden presentarse ...	43
IV.2.	Dispositivos de protección para los generadores .....	46
IV.3.	Descripción y operación de las protecciones y alarmas .....	50
IV.3.1.	Protección contra sobretensiones atmosféricas .....	50
IV.3.1.1.	Condiciones que deben cumplir los pararrayos .....	51
IV.3.2.	Protección contra sobretensiones debido a maniobras normales de explotación	51
IV.3.2.1.	Operación del relé de máxima tensión (F <sub>2</sub> ) .....	52
IV.4.	Operación de los contactores principales K21 y K22 .....	54
IV.4.1.	Operación de los contactores principales K23 y K24 .....	55

	Pag.
IV.5	Falla a tierra en el estator ..... 56
IV.5.1.	Operación del relé contra fallas a tierra en el estator (FG) ..... 58
IV.6.	Protección contra potencia reversa ..... 58
IV.6.1.	Funcionamiento del relé contra potencia reversa ..... 59
IV.7.	Protección contra el exceso de temperatu <u>r</u> ra en el generador ..... 60
IV.7.1.	Funcionamiento de la protección contra excesos de temperatura ..... 60
IV.8.	Protección diferencial del grupo trans- formador generador ..... 63
IV.8.1.	Funcionamiento de la protección diferen <u>c</u> cial ..... 66
IV.9.	Protección contra el exceso de tempera- tura del transformador ..... 66
IV.10.	Relé Buchholz ..... 67
IV.10.1.	Funcionamiento del relé Buchholz ..... 68
4.10.2.	Análisis de los gases ..... 72

## CAPITULO V

### DESCRIPCION Y PROTECCION DEL SISTEMA HIDRAU LICO

V.1.	Reservorio de regulación ..... 73
V.1.1.	Compuertas y rejillas ..... 74
V.2.	Tubería de presión ..... 74
V.2.1.	Diámetro de la tubería ..... 75

	Pag.
V.2.2.2. Pérdidas de la carga .....	76
V.2.2.1. Pérdidas en la rejilla .....	76
V.2.2.2. Pérdidas en la entrada de agua en la tubería .....	77
V.2.2.3. Pérdidas en los codos y curvas .....	78
V.4.2.3.1. Apoyos y curvas .....	79
V.3. Tubería .....	80
V.3.1. Datos de diseño de la turbina .....	83
V.3.2. Cubículo de control de la tubería ...	84
V.4. Válvula mariposa .....	86
V.5. Central de velocidad .....	88
V.5.1. Funcionamiento .....	89
5.6. Protección contra sobrevelocidad ...	92
5.7. Falla en el sistema de lubricación de aceite .....	93
5.8. Falla en la bomba del gobernador ....	95

## CAPITULO VI

### COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

## C A P I T U L O I

### INTRODUCCION, DEFINICION, OBJETIVO

#### I.1. INTRODUCCION

A partir de la crisis energética desde 1973, y de la perspectiva del agotamiento de las reservas, se hizo patente que el modelo "petróleo intensivo" presentaba serias limitaciones para responder a la demanda consecuente de un crecimiento sostenido, acentuando así más la diferencia entre sectores sociales.

En base a estudios realizados, se sabe que las reservas de petróleo podrían ser insuficientes para cubrir la demanda hacia fines de éste siglo, por lo cual se ha emprendido una campaña mundial para ahorro de energía. Para lograr esto, conjuntamente con un desarrollo armónico del país, debe establecerse un modelo de aprovechamiento energético que ponga en juego toda la potencialidad de los recursos disponibles.

El desarrollo de pequeñas centrales hidráulicas podría ser uno de los desarrollos más efectivos de la energía hidráulica, y a la vez contribuir efectivamente a la resolución de una parte de los problemas del sector rural y de sectores que se encuentran marginados de la sociedad, en los cuales la no resolución de sus necesidades energéticas ha contribuido al mantenimiento de situaciones de extrema precariedad y miseria.

En los países subdesarrollados, un gran porcentaje de población humana está distribuída entre grandes concentraciones urbanas, mientras que en el hábit rural la población se encuentra dispersa o localizada en pequeños núcleos humanos; alrededor de 40% y 51% respectivamente.

En éstos años, debido a la falta de ayuda y recursos agropecuarios, falta de planificación y desarrollo agrícola, se está afrontando el gran problema de la emigración desde el medio rural hacia las ciudades principales, generando graves problemas socio económicos e institucionales.

El Ecuador posee un gran potencial de recursos hidráulicos inexplorados y no cuantificados, por lo que está comenzando el desarrollo de la hidroelectricidad el cual lo está orientando a la ejecución de grandes obras tendientes a satisfacer la necesidad de energía de las grandes concentraciones humanas.

La cuantificación y utilización de recursos hídricos disponibles para desarrollar la ejecución de pequeñas centrales hidráulicas, como una respuesta a las necesidades de dotación de energía a los habitantes y actividades de las comunidades, no ha sido generalmente consideradas en la planificación del país.

#### I.1.1. Tecnología Aplicable

Las pequeñas centrales hidráulicas están destinadas a servir a cargas pequeñas, tales como bombas de riego para agricultura, iluminación, refrigeración para almacenamiento de alimentos, aparatos electrodomésticos pequeños, y otros aparatos de pequeño consumo de energía, pero están sujetas a iguales consideraciones

de diseño que las plantas hidráulicas de gran capacidad, por lo cual el costo por Kw de potencia tiende a ser alto. Por ésta razón, el tipo de diseño de estas mini centrales hidráulicas, tiene que ser nuevo, de tal manera que resulte económicamente aplicable tanto para la construcción, operación y mantenimiento, tomando en cuenta que las hidroplantas son diseñadas para una vida útil de 40 a 50 años.

Las centrales de poca capacidad, rara vez pueden soportar el costo de diseños especiales de turbinas, generadores, válvulas, gobernadores. Por esto es de importancia particular tener en cuenta y mucho conocimiento del equipo disponible en el mercado para el diseño de éste tipo de centrales.

La expansión, en términos de difusión masiva de la construcción y puesta en funcionamiento de las pequeñas centrales hidráulicas, debe marchar a la par del desarrollo de la tecnología básica para su ejecución, y se debe tratar de adaptar una cierta clase de equipo para todo un grupo de centrales con el fin de facilitar su mantenimiento, y el suministro de repuestos.

### I.1.2 Operación, Mantenimiento y Reparación

Una de las ventajas más significativas de las plantas hidroeléctricas, sobre las plantas a base de combustible, son los bajos costos de operación, mantenimiento y reparación, así como la facilidad de operación de la planta, la cual posibilita que su manejo sea realizado por personal local con conocimientos básicos de mecánica y electricidad, luego de un corto período de entrenamiento.

La operación de pequeñas o grandes centrales pueden hacerse totalmente automática, con solamente un operador, por medio de un control remoto que opere diferentes plantas simultáneamente, de ésta manera, toda información tal como la temperatura de los cojinetes, aperturas del gobernador, armadura de la máquina, flujo de agua, el nivel de la superficie del agua del reservorio, alarmas preventivas, etc, puede ser transmitido remotamente, de tal forma que la operación de una mini central pueda ser menos costosa.

El sistema de operación y control de la unidad a ser instalada en la central hidroeléctrica de Papallacta deberá ser del sistema de control de un sólo hombre, quien será capaz de operar desde el tablero, la tubería, el generador y los equipos auxiliares.

## I.2. DEFINICION GENERAL

Una pequeña central hidráulica es una instalación donde se utiliza la energía hidráulica para generar reducidas cantidades de electricidad de hasta aproximadamente 5.000 Kw, por medio de uno o más conjuntos o grupos turbina-generador.(1)

### I.2.1 Tipo de Central a ser Instalada

Para la clasificación de las pequeñas centrales hidráulicas se han adoptado diferentes criterios con el fin de permitir una adecuada diferenciación desde un punto de vista tecnológico y constructivo.

La Organización Latinoamericana de Energía, OLADE adopta el siguiente criterio:

RANGO DE POTENCIA				
	Kw	SALTO m		
		BAJO	MEDIO	ELEVADO
Microcentrales	Hasta 50	menos de 15	15-50	mas de 50
Minicentrales	50-500	menos de 10	20-100	mas de 100
Pequeñas centrales	500-5000	menos de 25	25-130	mas de 130

(2)

NOTAS:

- Los rangos de potencia y salto son indicativos solamente.
- Los saltos bajos, medios y elevados corresponden a aproximadamente al empleo típico de turbinas axiales, Francis o Michell Banki y Pelton respectivamente.

La Norck Electrisk & Brown Boveri adopta otro tipo de clasificación, la cual las divide únicamente en micro y minicentrales ubicandola a la central en estudio en el grupo de las minicentrales, designación que se adopta en el presente estudio.

Debido a la falta de equipo y desarrollo de tecnología de pequeñas centrales hidráulicas en el país, se ha adoptado una tecnología convencional para su construcción, lo cual exige obras civiles de calidad en la toma, cámara de carga, desarenador, tuberías, de acero, equipo electromecánico diseñado según normas de países desarrollados, y un tablero ampliamente instrumental.

I.2.2. Descripción General de la Obra

La central de Papallacta (HCJB) se encuentra ubicada

en la región Noroccidental de la provincia de Pichincha, a una altura aproximada de 3500m sobre el nivel -- del mar; comprende por ahora de un generador 'marca -- Westinghouse de una potencia nominal de 2MVA, impulsado por una turbina tipo Pelton.

Un reservorio de 2.000 m<sup>3</sup> de capacidad, el cual se abastece del río Papallacta, descarga su potencial hidráulico hacia la turbina a través de una tubería de -- presión de 580 m. de longitud y de -- de diámetro. -- Con el fin de incrementar y rehabilitar la potencia generada por ésta unidad que ya lleva una vida útil de 70 años, para mediados del año 1.982 entrará en funcionamiento un nuevo grupo turbina-generator, que se conectará en paralelo con el grupo antiguo como se indica en plano No. I-1.

Esta nueva unidad fabricada por la Norsk Elektrisk & Brown Boveri (NEBB) es de una potencia de 4.44 MVA, impulsada por una turbina tipo Francis horizontal. Un nuevo reservorio de 18000 m<sup>3</sup> de capacidad se ha construido junto al anterior, alimentado desde el mismo río Papallacta, la tubería de presión es instalada paralelamente a la ya existente, con una longitud de 580m, 3/8" de espesor y un diámetro de 1,24 m.

Ambos generadores serán conectados en paralelo a una barra de 24KV, de la cual será alimentada la línea a Pifo, la que alimentará los nuevos transmisores de la HCJB, cuya carga se le cataloga como de clase crítica debido a la importancia de ésta emisora. De la misma barra, se alimentará también a todo éste sector rural.

La central de Papallacta se encuentra interconectada con el sistema Quito a través de la línea de transmisión Cumbayá-Pifo a un nivel de voltaje de 46KV en el tramo Cumbayá-Hcda. La Viña y de 24KV en el tramo hacienda La Viña Pifo.

### I.3. ALCANCE Y OBJETIVO

Debido a que en el sector rural de nuestro país, el servicio eléctrico es deficiente y discontinuo y en muchos casos se lo suministra parcialmente durante horas de mayor demanda, aprovechando el abundante recurso hidráulico existente en la región de Papallacta, la HCJB mantiene su central hidráulica con el fin de alimentar y dar continuidad de servicio a los transmisores de la emisora ubicados en Pifo, cuya carga es considerada de clase crítica, suministrando su energía sobrante a la Empresa Eléctrica Quito S.A. para suplir de energía eléctrica a toda la zona de Papallacta.

Los 1800 KW que genera la pequeña unidad de la central no alcanza a suplir la demanda que requieren los nuevos transmisores de la emisora, por lo que la HCJB ha decidido ampliar su central con una nueva unidad de 4.400 KW, con lo que se logrará además en conjunto con la EEQSA dar mejor servicio a todo el sector rural de Papallacta.

En esta tesis se analizará el estudio del funcionamiento de las protecciones y alarmas del nuevo grupo turbina-generador, tanto del sistema eléctrico y del hidráulico, tratando de explicar la secuencia de operación de las protecciones lo más simple posible, tomando muy en cuenta la continuidad y la confiabilidad en el servicio que demanda esta central.

el desarrollo de ésta tesis se desenvolverá enfocando cada problema o tipo de falla, primero de una manera ligeramente teórica, con el fin de conocer la forma de presentarse, el lugar y los daños que produce cada tipo de falla para luego explicar la manera de operación de sus protecciones.

La secuencia de operación de relés, desconexión o conexión de disyuntores, alarmas preventivas para casos de falla o de mala operación, será expuesto en diagramas de bloques tratando de lograr una mayor simplicidad de tal manera, que esta tesis sirva de ayuda para un entrenamiento básico y familiarización con los sistemas y procedimientos de control y operación de ésta central y de otras similares.

## CAPITULO II

### DESCRIPCION DEL GENERADOR, SISTEMA DE EXCITACION Y TRANSFORMADOR

#### II.1. GENERADOR

La selección y ubicación del generador depende de factores tales como el tipo de turbina y su orientación. Por ejemplo, el generador para una turbina tipo bulbo está colocado dentro del mismo bulbo y un generador con eje vertical es adecuado para la mayoría de las instalaciones Francis. Es posible adoptar la configuración horizontal o vertical del generador. La orientación se convierte en una función de la selección de la turbina y de la estructura de la planta de energía y el costo del equipo conforme a un diseño específico. Por ejemplo, una unidad vertical Francis ha de requerir una excavación más profunda y una estructura más elevada para la planta de energía. Una máquina horizontal ha de aumentar el ancho de la estructura de la planta y al mismo tiempo disminuye la excavación y la altura total de la unidad. Se debe notar que la orientación e instalación del generador son influenciadas por la compatibilidad con la selección de la turbina y un análisis del costo total de la planta.

Existen tres factores que afectan el tamaño del generador a saber, la orientación, los requisitos de KVA y la velocidad. La turbina que se escoja ha de determinar estos tres factores del generador.

El tamaño del generador para KVA fijo varía inversamente a la velocidad de la unidad. Esto se debe a la necesidad de mayor número de polos del campo del rotor para conseguir la velocidad sincronizada a reducidas revoluciones por minuto.

Para pequeñas centrales hidráulicas en general se utiliza generadores sincrónicos cuyo nombre se debe a que se encuentra sincronizado con el voltaje y frecuencia de la red antes de cerrar el interruptor que conecta el generador con la red (o generadores de la central) y cuando está conectado continúa operando a velocidad sincronizada.

Se estimula al generador mediante la aplicación de una fuente de corriente continua (d.c.) a través del bobinado de campo del rotor y la creación de un campo magnético, dentro del estator que induce un voltaje en las bobinas del estator. Los diseños modernos emplean un artefacto de excitación estática que convierte una corriente alterna (a.c.) a corriente continua (d.c.) por medio de un circuito de estado sólido. El sistema estático ha reemplazado los generadores de estímulo de corriente continua movidos por ejes con lo que se ha conseguido un costo relativamente menor y una respuesta más rápida.

No obstante, para los generadores de pequeñas centrales de 5.000 Kw o menos, todavía se usan estimuladores al eje sin carbones, en vez del sistema estático estimulante. El estimulador sin carbones es un generador rotatorio de corriente alterna con rectificadores sobre el eje principal para producir corriente directa.

### II.1.1. Eficiencia del Generador

La eficiencia de un generador eléctrico se la define como la proporción de energía de salida a la energía de ingreso. Hay cinco pérdidas mayores asociadas con un generador eléctrico. Diversos procedimientos de prueba (test) se utilizan para determinar la magnitud de cada pérdida. Estas pérdidas son:

1. Fricción del aire y viento
2. Pérdida del núcleo magnético
3. Pérdida en el cobre del inductor
4. Pérdida en el cobre de la armadura
5. Pérdida de la carga.

Las dos primeras pérdidas son fijas y en consecuencia independientes de la carga. La pérdida por fricción del aire y viento es afectada por el tamaño y la forma de las piezas rotatorias, el diseño del ventilador, di se ño del cojinete y la naturaleza de la caja.

Los valores típicos de la eficiencia varían de 96 a 98%. Este valor de la eficiencia es representativo a través de la capacidad total de carga de una máquina específica. Por ejemplo, la eficiencia es aproximadamente la misma a 1/4 de la capacidad o a 3/4 de la capacidad.

El costo del generador se incluye en los costos de la turbina. Los costos del generador varían con la capacidad en KVA, velocidad y configuración. El costo ha de aumentar con el aumento de KVA o la disminución de la velocidad. Los generadores verticales cuestan más que los generadores horizontales debido a la adición de un cojinete de empuje para las unidades verticales.

### II.1.2. Datos de diseño del Generador

El generador es de construcción compacta, diseñada para cumplir con todas las consideraciones especiales que exige una turbina hidráulica que actúa como impulsora.

Es capaz de soportar cortocircuitos, y es del tipo de generador con excitación sin escobillas y refrigerado por aire. La excitación sin escobillas consiste en un generador de corriente alterna con diodos rotatorios montados sobre el mismo eje del rotor.

Tanto el generador como la excitación se encuentran soportados sobre la misma estructura, existiendo un acoplamiento tipo rígido entre el eje del generador y la excitación.

El generador se encuentra sostenido mediante dos cojinetes guías soportes, empotrados en las paredes del cubículo del generador.

El sistema del generador-excitación es preensamblado en fábrica y posee incorporados varios auxiliares como los transformadores de corriente y de potencial, el equipo de puesta a tierra del neutro etc.

En el estator del generador se encuentran incorporados 6 detectores de temperatura tipo resistencia de  $10\ \Omega / ^\circ\text{C}$ , los cuales se los emplea para detectar incrementos de temperatura en los bobinados del estator. (3)

Los cojinetes se encuentran aislados de la estructura del generador, mediante una película de materia aislante de MICARTA, con el objeto de evitar la circulación de corrientes producidas por inducciones parásitas en el rotor. Estas corrientes deben ser evitadas debido a que al circular del rotor a la carcasa a través de los cojinetes producen daño en la superficie del material antifricción del cojinete.

DATOS:

Generador trifásico sincrónico (tipo sin escobillas)

TIPO: WAB 1000 H12 H

POTENCIA DE SALIDA (KVA): 4,44

FACTOR DE POTENCIA: 0,9

VOLTAJE (KV) : 4,16

VELOCIDAD SINCRONICA (RPM): 600

FRECUENCIA (HZ) : 60

VELOCIDAD DE EMBALAMIENTO (RPM) : 1000

EFICIENCIA:	<u>100%</u>	<u>75%</u>	<u>50%</u>
	0,97	0,97	0,965

CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO: 0,95

REACTANCIAS

REACTANCIA SINCRONICA  $X_D$  (pu) : 1,16

REACTANCIA TRANSITORIA  $X_d'$  (pu) : 0,26

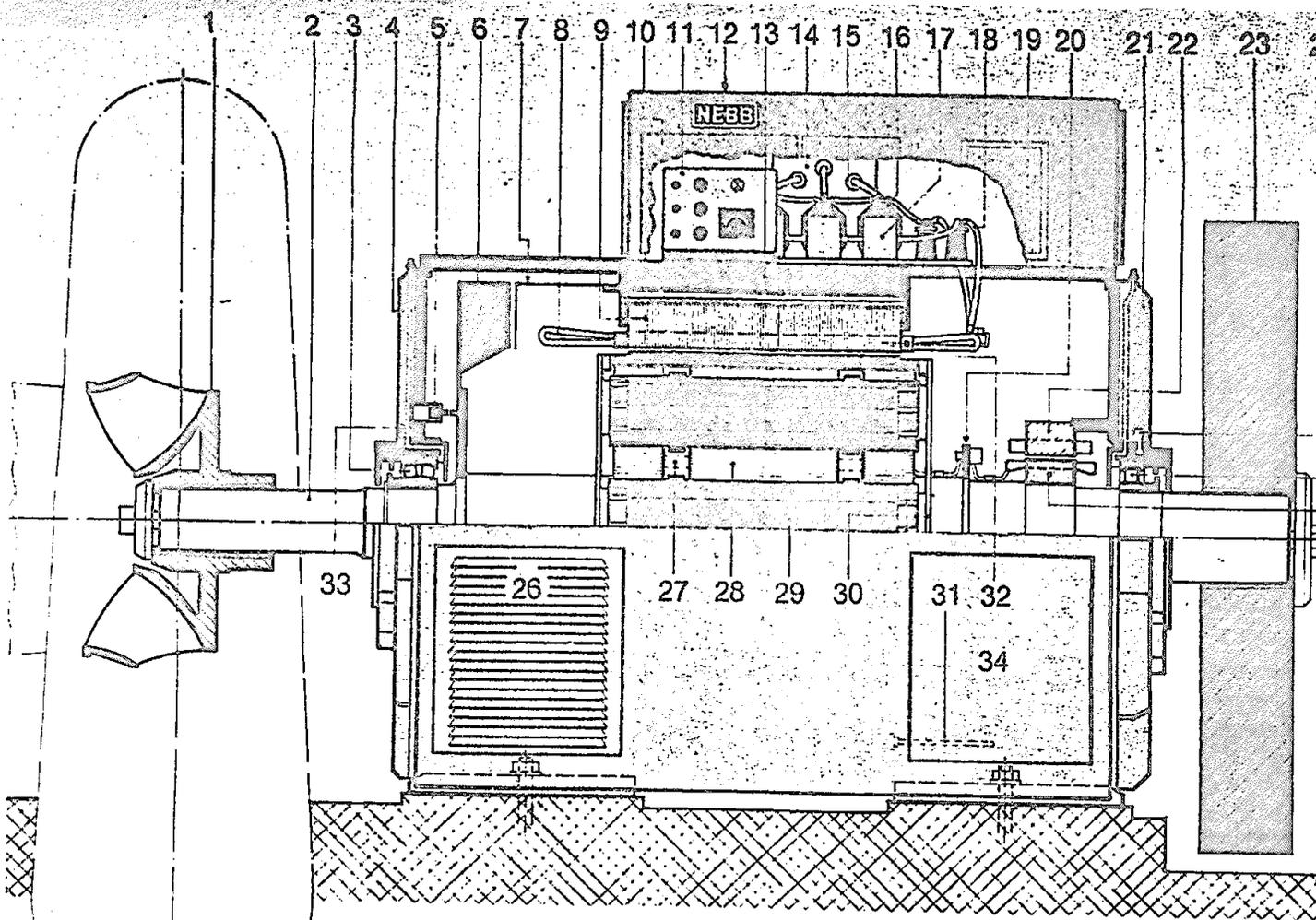
REACTANCIA SUBTRANSITORIA  $X_d''$  (pu): 0,19

CONSTANTES DE TIEMPO

TRANSITORIA  $t'$  (seg) : 0,53

SUBTRANSITORIA  $t''$  (seg): 0,04

El rotor y el estator tienen aislamiento clase F.



MINI HYDRO POWER

BBC  
BROWN BOVERI

- |  |  |
|--|--|
| 1. Turbina                                   | 18. conexión de cables para<br>debanados del estator |
| 2. eje del generador                         | 19. caja de conexiones para<br>control y protección  |
| 3. Cojinete (lado de la máquina)             | 20. juego de diodos rotatorios                       |
| 4. Escudo                                    | 21. escudo   |
| 5. indicador de velocidad                    | 22. excitador, estator con de-<br>banados            |
| 6. ventilador                                | 23. volante  |
| 7. compartimento para circulación<br>de aire | 24. cojinete   |
| 8. debanado del estator                      | 25. excitador, rotor con debana-<br>dos              |
| 9. estator                                   | 26. cubierta de salida de aire                       |
| 10. compuerta de inspección                  | 27. soporte de debanados                             |
| 11. regulador de voltaje                     | 28. debanados  |
| 12. cubierta                                 | 29. polo   |
| 13. caja del estator                         | 30. debanado de amortiguamiento                      |
| 14. caja de conexiones (U-V-W)               | 31. elementos calentadores                           |
| 15. cables para punto neutro (U-V-W)         | 32. detector de temperatura                          |
| 16. transformadores de tensión               | 33. detector de temperatura de co-<br>jinetes        |
| 17. transformadores de corriente             | 34. compuerta de inspección                          |

## II.2. CUBICULO PRINCIPAL DE CONTROL

La función del cubículo principal de control es operar como control y monitor de todas las funciones de la planta. En las centrales mini y pequeñas que por lo general no son atendidas, la función principal del tablero de control es la de dar una indicación del estado de funcionamiento de la planta después de haber sonado una alarma. Mediante la lectura de los controles el operador puede determinar la naturaleza de la falla de operación para casos de falla de planta, y con frecuencia, para volver a arrancar la unidad.

El tablero de control consiste en medidores, indicadores, llaves de control, luces, anunciadores, diagramas mímicos, relays, interpuestos, relays de protección e instrumentos indicadores. Los medidores indicadores su ministran información sobre el nivel de voltaje, nivel de la corriente, watts, voltamperios reactivos, temperatura y velocidad de la unidad. Las luces indican estados, tales como bomba conectada "on" o desconectada "off" o válvula abierta o cerrada, los anunciadores notifican condiciones específicas de alarma o falla en toda la planta. Generalmente los puntos anunciadores se agrupan de acuerdo a la función. A menudo, y en nuestro caso se utiliza un diseño que tiene los anunciadores en: generadores, turbina, línea de transmisión, etc.

El anunciador puede ir acompañado por una alarma local y facilidades para iniciar la alarma remota (para centrales controladas remotamente). Los relés de protección están montados muchas veces en un área del cubículo del generador y son visibles desde el frente para poder ins

peccionarlos y resetearlos

Los medidores que indican watts, vars, voltios además de los medidores de flujo y nivel de agua están colocados en la vecindad de los relés de protección.

El cubículo de control del generador de la central en estudio se encuentra ubicado junto al cubículo de la turbina (fig II-1). Los relés e instrumentos se encuentran ubicados sobre puertas con bisagras, los interruptores y pulsantes se encuentran agrupados en conjunto con el objeto de dar mayor funcionalidad y obtener una fácil y segura operación.

#### II.2.1. Equipo de Control en el Cubículo del Generador:

##### a) Lista de Instrumentos

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SIMBOLO
AMPERIMETRO		P8
VOLTIMETRO		P11
MEDIDOR DE FACTOR DE POTENCIA		P12
VATIMETRO	Con un contacto para señal de retorno de potencia	P13
DOBLE VOLTIMETRO		P14
SINCRONOSCOPIO		P16
MEDIDOR DE TEMPERATURA		P17
MEDIDOR DE KW-H		P18
VOLTIMETRO		P20
MEDIDOR DE VAR		P21

b. Lista de Relés

Relé de máximo voltaje	F2
Relé diferencial	F3
Relé de falla a tierra	F6
Relé de secuencia negativa	F7
Relé de falla a tierra	F9

c. Lista de Pulsantes e Interruptores

Pulsante para relés de contactores principales	S2
Pulsante de paro	S3
Conmutador de fases para amperímetro del generador	S4
Conmutador de fases para voltímetro del generador	S5
Interruptor de sincronización	S27
Conmutador para medición de temperatura del generador	S10
Conmutador de fases para voltímetro	S11

Además, en este cubículo se encuentran incorporados un panel de alarmas A2, una bocina H1 y un diagrama mímico que será explicado en el capítulo No. III .

## II.2.2 SEÑALIZACION Y ALARMAS

Es necesario, luego de una desconexión automática saber el motivo de la falla y saber además cual es el relé que ha accionado ante esta anormalidad.

Por lo general, los relés de protección están provistos de dispositivos ópticos indicadores, los cuales están directamente accionados por el relé y en algunos casos están montados sobre el contactor auxiliar del dispositivo de protección. De ésta manera, resulta fácil apreciar, después de una desconexión automática cual es el relé que lo ha provocado.

El circuito de desconexión está previsto de tal manera que, en caso de operación de salida normal de la unidad con el pulsante de paro S3, automáticamente sigue la secuencia de paro normal, mientras que en caso de falla, dependiendo del tipo, sigue una secuencia de paro instantáneo (emergente) o normal.

Por lo general, el funcionamiento de un relé de protección acciona una lámpara de señalización y en ciertos casos también una alarma acústica (bocina). Para estos casos, la señal acústica puede ser desconectada por medio de un pulsante de señalización, mientras que la indicación optica del peligro persiste encendida hasta que el operador haya puesto solución al mismo.

Las señales de alarmas son comandadas por contactores auxiliares de los relés de protección, alimentan al circuito impreso A1 para el generador y A2 para la turbina, los cuales se encargan de energizar cualquiera de las alarmas que se indica en la figura No. II-2.

TABLERO DE ALARMAS

Temperat cojinet.	Temperat Estator	Transfor. Princip.	Relé de secuen - cia Negativa	Relé Diferen- cial	falla a tierra en el astator
1	2	3	4	5	6
Sobrecorriente en genera- rador	Sobrevol- taje en genera- dor	Relé contra motori- zación	Falla a tierra de lí- nea	Bajo voltaje 24 VDC	Falla a tierra 24 VDC
7	8	9	10	11	12
Fusibles 24 VDC	Falla sistema lubrica- ción de generad.	Sobre veloci- dad	Falla de bomba del goberna- dor	Bajo ní- vel de agua	Reji- llas ta- padas
13	14	15	16	17	18
Sin Cumbayá					
19					

FIGURA II-2

### II.3.2 CONEXION DEL NEUTRO DEL GENERADOR A TIERRA

La puesta a tierra del generador de la central de Papallacta, se lo hace por medio de una resistencia, la que sirve para dar una buena seguridad y protección al equipo, de acuerdo al tamaño y capacidad. Generalmente -- la mejor manera o método que se puede conseguir para -- una conexión del neutro del generador a tierra es aquel que llena ciertos requerimientos de limitación de la corriente de falla y la mínima distorsión de voltaje cuando ocurre una falla fase a tierra. Este tipo de conexión a tierra a través de una resistencia provee de ciertas ventajas tales como:

- a. Es un medio sencillo para el retorno de la corriente de falla
- b. Usando una resistencia para conexión del neutro del generador a tierra, logramos reducir el valor de la corriente de tal manera que el daño en el equipo se reduzca al mínimo bajo condiciones de falla.
- c. Las consideraciones del gradiente de potencial son bastante bajas para este tipo de pequeñas centrales.
- d. Se evitan posibilidades de que sucedan fenómenos de arcos a tierra, puesto que la corriente de falla, tendrá un camino de retorno fácil durante condiciones de falla.
- e. La posibilidad de que ocurra una segunda falla a causa de la primera es pequeña, al menos que la resistencia tenga un valor excesivamente alto y el aislamiento del equipo sea débil.

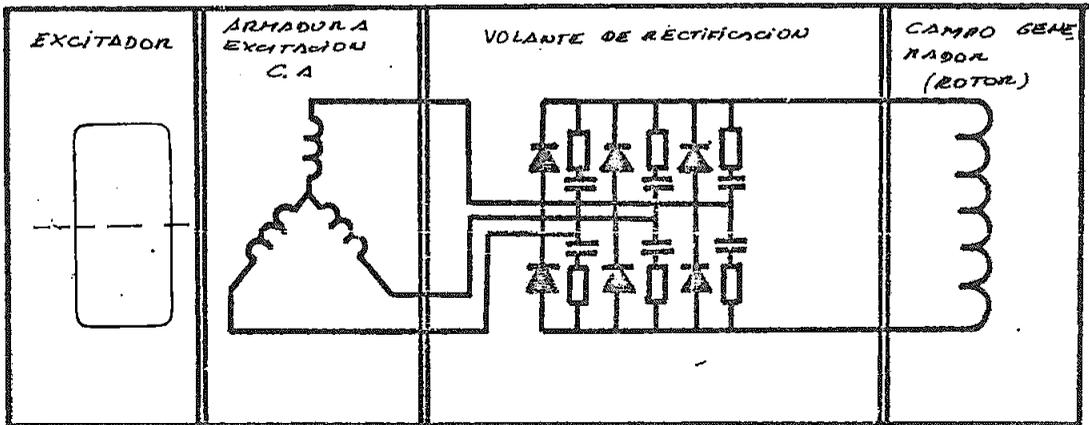
#### II.4. SISTEMA DE EXCITACION

El procedimiento clásico para la excitación de los generadores consiste en un generador de continua cuya potencia de salida se envía al debanado inductor del generador a través de escobillas y anillos rozantes: de esta manera inevitablemente aparecen problemas de enfriamiento y desgaste en los anillos, colector y escobillas. Este acoplamiento crítico en la máquina, se ha evitado mediante los nuevos procedimientos de excitación sin escobillas y contactos deslizantes.

La figura II-3 muestra el diagrama esquemático de este tipo de sistema. El punto clave del sistema son los rectificadores de silicio, que van montados sobre el mismo eje del rotor del generador, y suministran al inductor la corriente continua de excitación necesaria. Estos rectificadores se alimentan, a lo largo del eje de una excitatriz de corriente alterna en la que el inducido está en el rotor, y cuyo campo inductor situado en el estator se alimenta a su vez a través de un amplificador magnético, que controla y regula la tensión de salida del generador principal, para formar un conjunto único carente de contactos deslizantes. La potencia de excitación del amplificador magnético procede del estator de un pequeño generador de imanes permanentes que gira arrastrado también por el eje principal. (5).

El sistema de excitación de la central en estudio, consta únicamente de un generador excitatriz de alterna, en la que el inducido está en el rotor, y su campo inductor situado en el estator se basa en el magnetismo residual del generador, mas no es alimentado por un

PARTE MOVIL



PARTE FIJA

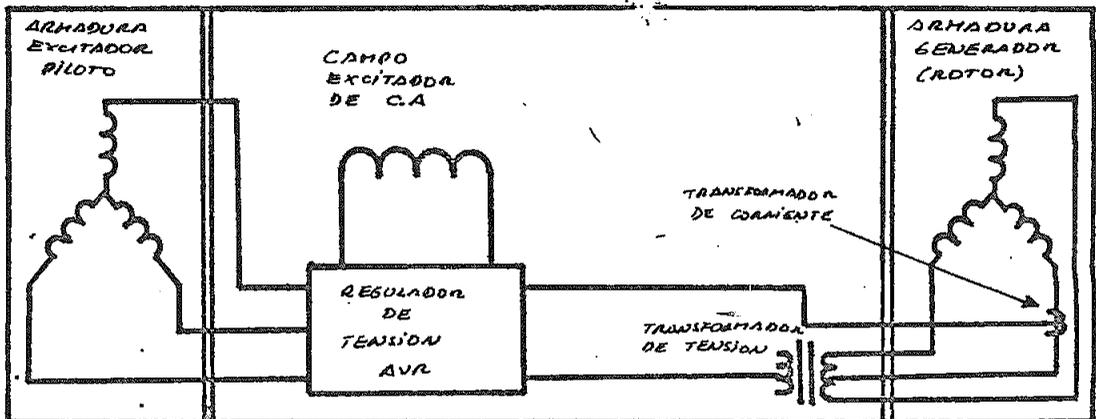


FIGURA II-3

amplificador magnético de imanes permanentes. Por ésta razón, en caso de fallo de la excitación durante la puesta en marcha de la unidad se debe alimentar al generador de la excitación mediante corriente continua proveniente de baterías, debido a que el campo inductor ha estado carente de magnetismo remanente.

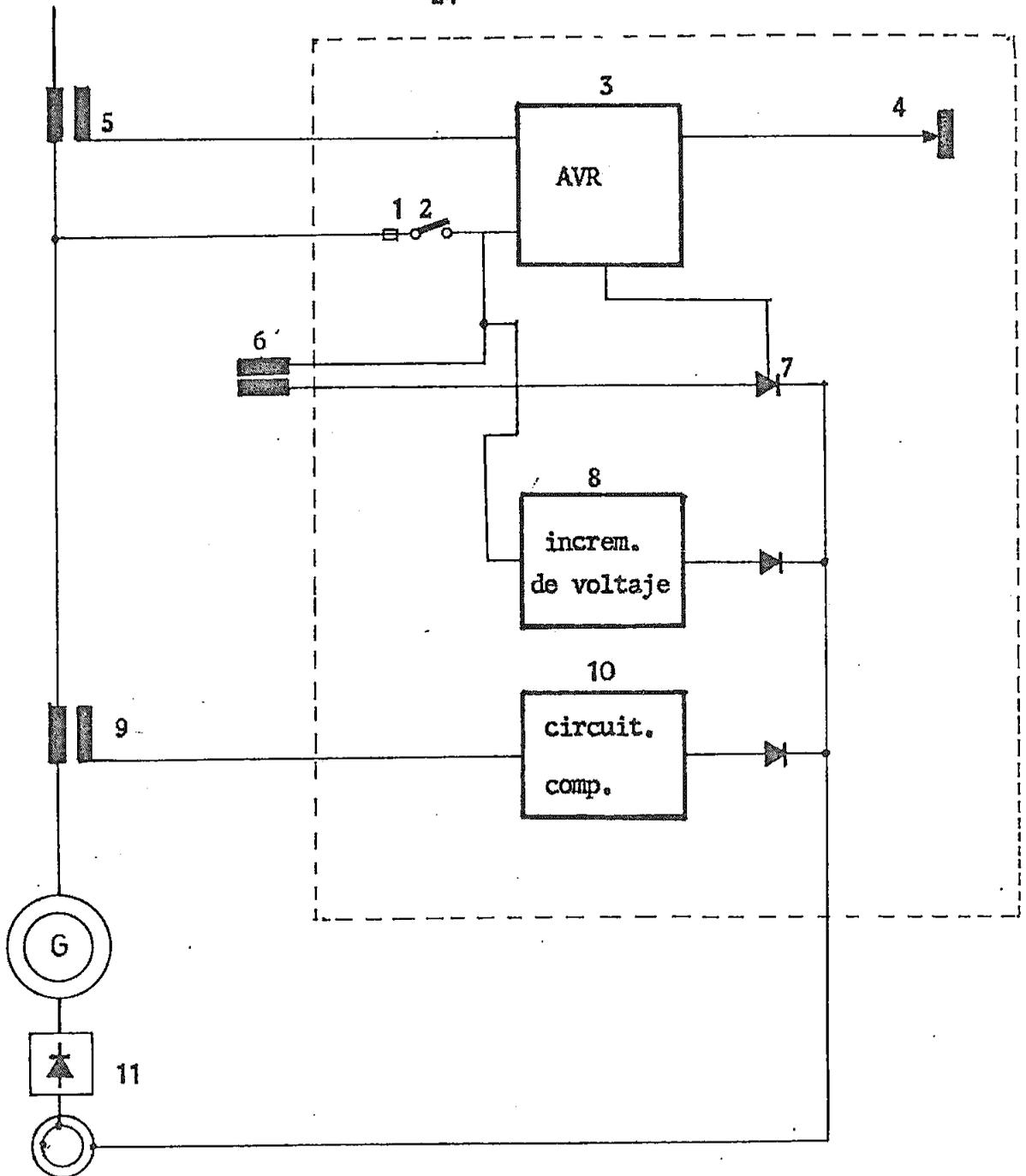
#### II.4.1. Descripción y funcionamiento del sistema de excitación

La fig. II-4 muestra el diagrama de bloques del principio del sistema de excitación. El voltaje del generador alimenta al regulador automático de voltaje AVR (3) el cual es protegido mediante un fusible (1), consta también de un switch de excitación (2).

El nivel de voltaje requerido se lo puede establecer mediante ajustes en el potenciómetro (4). La diferencia entre el valor de voltaje, y el valor del voltaje de referencia es amplificado y convertidos en pulsos que disparan a los tiristores (7). El voltaje de C.A. es suministrado hacia los tiristores, mediante un transformador (6).

Bajo condiciones normales, el voltaje permanece constante. Si hay una pérdida de velocidad mayor al 5%, la unidad AVR disminuye el voltaje en proporción con la frecuencia con el objeto que la relación:  $V/f = \text{constante}$ .

Para obtener una correcta repartición de carga entre otros generadores en paralelo, el voltaje del generador deberá depender de la corriente. Esta es obtenida mediante el transformador de corriente (5) y un circuito de registro interno del AVR (3).



1. fusibles
2. switch de la excitación
3. regulador automático de voltaje
4. ajuste de voltaje
5. transformador de corriente
6. transformador
7. juego de tiristores
8. circuito de de incremento y voltaje
9. transformador
10. circuito compound
11. juego de diodos rotatorios

DIAGRAMA II-4

Para la puesta en funcionamiento del generador, el regulador de voltaje automático utiliza el circuito de incremento de voltaje, el cual utiliza el voltaje de magnetismo remanente del generador.

El circuito en paralelo (10) y un transformador en paralelo (9) proveen al circuito de la corriente de excitación necesaria durante condiciones de cortocircuito. El circuito de excitación (fig II.5) comprende de fusibles principales el switch de excitación (b1), transformador de excitación (m2) y un juego de SCR (n4).

El transformador (m2) suministra potencia a los elementos (n4) los cuales consisten en 2 diodos y dos tiristores.

La energía de n4 es suministrada a los devanados de campo de excitador, con el switch (b1) en posición "0", se cortocircuita el transformador de corriente (m1).

(6)

#### II.4.2. Regulador de Voltaje

El regulador de voltaje trabaja en conjunto con el sistema de excitación. Después de excitar el campo para obtener el voltaje del sistema, y cuando el generador esté sincronizado al sistema el regulador de voltaje asegura el mantenimiento del voltaje a un punto fijo. Se suministra un dispositivo para ajustar el voltaje a fin de establecer el voltaje deseado dado por el generador.

##### II.4.2.1. Descripción y funcionamiento de regulador de voltaje

001955

LEYENDA

B1	SWITCH DE EXCITACION	
C1,2	RELE	
Q1	FUSIBLE	
Q2	RELE TERMICO	
K2	CAPACITOR	
M1	TRANSFORM. DE CORRIENTE	
M3,4	M2	TRANSFORMACION Reg.
M11, 72	M14, 72	TRANSFORM. DE VOLTAGE
N1-3	N5	RECTIFICADOR
N4	N4	THRISTOR
P1	P1	CIRCUITO IMPRESO
F1	F1	RESISTOR
R2	R2	COMPENSADOR DE CAIDA DE VOLTAGE
R3	R3	AJUSTE DE NIVEL DE VOLT.
R4	R4	AJUSTE DE VOLTAGE
R5,7	R9,10	RESISTOR

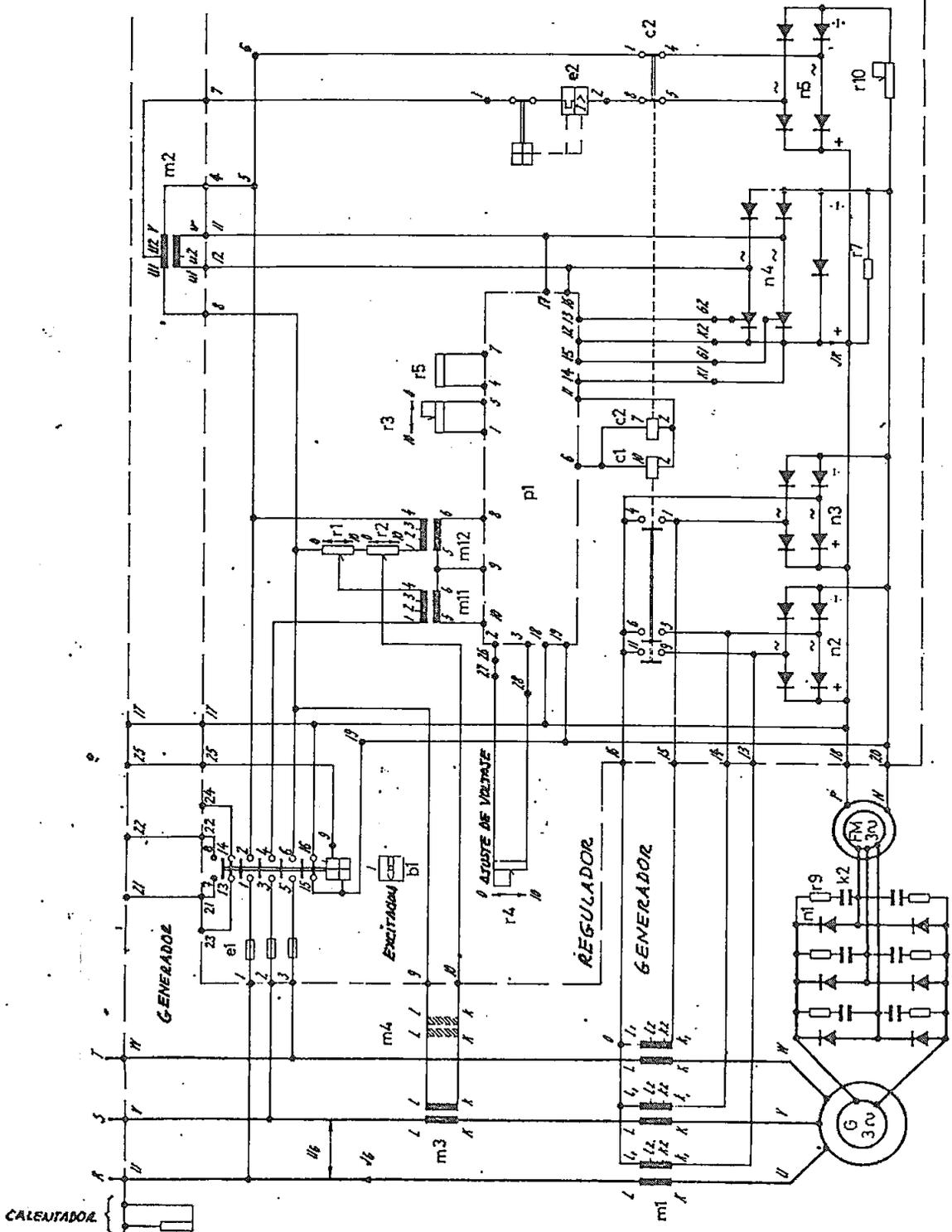


DIAGRAMA 2-5

SISTEMA DE EXCITACION

El circuito del regulador de voltaje para la central de Papallacta está compuesto de las siguientes partes:

- Circuito de medida de voltaje
- Amplificador
- Circuito de medida de frecuencia
- Circuito de sincronización y pulsos de disparo
- Estabilizador de suministro de potencia.

Todos los circuitos mencionados anteriormente son montados en una placa de circuito impreso (P1).

El voltaje del generador es transformado mediante los transformadores m11 y m12, antes de ser alimentado al circuito impreso. El voltaje es rectificado y luego una parte de este es alimentado a un amplificador operacional donde es comparado con un voltaje de referencia. La diferencia de voltaje es amplificado y controlado por un circuito de pulsos que dispara a los tiristores y de ésta manera regula la corriente de excitación. Un filtro estabilizador hace que el voltaje del generador sea estable y preciso.

Una señal de frecuencia proporcional a la frecuencia del voltaje del generador se usa para reducir el voltaje del generador si la frecuencia decrece más del 95% de la frecuencia nominal. (6)

#### II.4.2.2. Compensador de variación de voltaje.

Para obtener igual compartimiento de carga entre generadores en paralelo, el voltaje deberá disminuir para incrementar carga reactiva. Esto se obtiene suminis-



trando corriente desde el transformador de corriente  $m_3$ , a través del resistor  $r_1$  y parte del resistor  $r_2$ . El voltaje entregado a través de  $r_1$  y  $r_2$  se suma vectorialmente al voltaje del generador. La suma resultante depende del ángulo de fase entre la corriente y el voltaje del generador.

La caída de voltaje en el caso de carga reactiva pura es dada por la resistencia  $r_2$  y es independiente de la resistencia  $r_1$ .

Para una carga resistiva pura habrá una caída de voltaje dada por la resistencia  $r_2$ . Esta caída de voltaje puede ser compensada en parte o completamente por un incremento del valor de  $r_1$ . Para un valor bajo de  $r_2$  es posible obtener voltaje máximo para carga resistiva pura, pero con esto se puede llegar a inestabilidad. Esto dependerá del regulador de velocidad del sistema si tal voltaje máximo puede o no ser permitido.

Por ajuste de ambas resistencias ( $r_1$ ) y ( $r_2$ ) se obtiene una caída de voltaje del 2 al 4% para el 100% de carga reactiva, y aproximadamente voltaje constante para factor de potencia de 0,8 a 1. (6)

## II. 5. TRANSFORMADOR

El transformador de potencia es un dispositivo altamente eficiente para transformar el voltaje del nivel de generación al de transmisión. Las eficiencias caen por lo general al nivel del 99 por ciento. Para las instala-

ciones mini y pequeñas se requieren un solo transformador a dos bobinas tipo de subestación sumergido en aceite. El tanque principal es a presión de nitrógeno para inspeccionar la ruptura del recipiente y con pérdida de la presión para ocasionar que suene la alarma. La entrada y salida de la barra colectora al transformador se realiza mediante bujes de porcelana que pueden ser suministrados con corriente y transformadores potenciales para medidores, relevo e instrumentación. Las instalaciones hidroeléctricas pequeñas normalmente están limitadas a transformadores al aire libre con enfriamiento de aire forzado, sólo para días extremadamente calurosos o para condiciones de sobrecarga a corto plazo.

La variante principal para el costo de los transformadores es la capacidad de la unidad para transferencia de energía (KVA). Los niveles del voltaje constituyen la siguiente variante en el costo ya que los voltajes más elevados requieren más material de aislamiento. Cada transformador va provisto con una cabina de control y relevo de presión súbita. El voltaje normal para las plantas hidroeléctricas mini y pequeñas es de 4160 voltios o menos dependiendo del sistema. El costo de los transformadores se incluyen con los costos del patio de distribución (7).

### 2.5.1. Datos de Diseño del transformador

Transformador 3  $\emptyset$  de 4.440 KVA, sumergido en aceite ~~cons-~~  
~~truido~~ para uso a 3.300 m.s.n.m., a la intemperie, con una  
capacidad máxima de 55° C promedio de operación continua sin  
pérdida de vida útil de sus debanados.

- Voltaje nominal primario 4.160 voltios conexión  $\Delta$
- Voltaje nominal secundario 23900 voltios conexión  $Y$
- BIL en el primario 110 KV mínimo
- BIL en el secundario 200 KV mínimo
- Frecuencia 60 HZ
- Impedancia 6% (dato de placa)
- Derivaciones sin carga en -2 1/2%, +2 1/2%, +5% y 7 1/2%
- Defasaje de 30° entre alta y baja

Será suministrado completo, con aceite aislante, bushings  
del neutro a 34,5 KV, transformadores de corriente etc.

### C A P I T U L O    I I I

#### DESCRIPCION Y PROTECCION DE LOS SERVICIOS

#### AUXILIARES DE LA CENTRAL

##### III.1. SERVICIO ELECTRICO DE LA CENTRAL

Los servicios auxiliares en una planta eléctrica consisten en todos los instrumentos, máquinas y equipos que sirven para mantener en operación, puesta en servicio y controlar el paro (normal o de emergencia) de la central.

La capacidad de los servicios auxiliares varía según el tipo de planta eléctrica que se trate; por ejemplo: (8)

TIPO DE PLANTA	% DE LA CAPACIDAD INSTALADA
Termoeléctrica convencional	7 a 10%
Hidroeléctrica convencional	3%
Con reactor nuclear	15%
Turbina a gas tipo Jet	0,03%
Turbina a Gas tipo industrial	2%

En caso de la unidad en estudio, la capacidad instalada para servicios auxiliares es de 1.6% de la capacidad total de la planta.

Para centrales de gran capacidad, el equipo eléctrico de la estación tiene diferentes niveles de tensión por lo que es necesario tener para el servicio tantos

valores de tensión como exija el equipo, para pequeñas centrales el equipo es estandarizado por lo que no es necesario implementar sistemas de diferentes niveles de tensión.

Para la central en estudio se empleará los siguientes niveles de tensión:

230 volts	3 fases	c.a.
115 volts	1 fase neutro	c.a
24 volts		c.d.

Estos valores de tensión se los obtiene a través de un transformador de tensión T2 de 24/0.23 Kv, 75 KVA que se alimenta desde la barra de 24 KV a través de un seccionador fusible tripolar bajo carga, y alimenta a la barra de 230 volts por medio de otro seccionador del mismo tipo y de 125 amp en el lado de baja.

Para que el operador verifique la posición de los seccionadores, se ha implementado en el diagrama mímico que se encuentra sobre el cubículo del generador y que se lo indica en el diagrama II-1, indicadores de posición H3 y H4 de los seccionadores Q3 y Q4 respectivamente, así como también el indicador de posición de la línea a Pifo. Estos indicadores dan al operador la señal de cierre o apertura de cada uno de los seccionadores y disyuntor del generador.

El S23 de éste diagrama es un switch de control de dos posiciones, 0 - I, el cual sirve para energizar al

contactor K26 (plano 4-6) en la posición 0, con lo cual se abre el disyuntor Q2 del generador. En la posición I opera el contactor K27 siempre y cuando el bloqueo de K22 no exista, y hace operar al contactor IN de cierre del disyuntor Q2 del generador. En caso de que exista bloqueo por parte del contactor principal K22 y no accione el contacto IN, el reset S2 de los contactores debe ser pulsado hasta que se encienda la señal luminosa S2 del cubículo de control (diagrama II-4), si esto sucede, es posible cerrar el disyuntor del generador, caso contrario se debe corregir la falla existente.

Para centrales de gran capacidad, que tienen gran significado en el sistema, con el objeto de mantener a la unidad con un nivel alto de disponibilidad de operación, se prevee de dos o más tipos de alimentación para los servicios auxiliares de la estación. El un tipo considerado normal que se alimenta desde la barra principal, y el otro podría ser el considerado como emergente y se lo toma desde una línea proveniente de alguna otra central por medio de otro transformador, ciertas centrales importantes utilizan además plantas termoeléctricas emergentes para caso de falla de las dos alimentaciones enunciadas anteriormente.

Debido a que la central de Papallacta es de poca capacidad y no tiene importancia en el sistema, con el fin de minimizar costos, se ha previsto únicamente alimentación a los servicios auxiliares a través del transformador T2 descrito anteriormente. Debe notarse que en caso de paro de la unidad, o de ambos generadores de la central de Papallacta, los servicios auxiliares siguen alimentados, debido a que la cen -

tral está interconectada con la central de Cumbayá, la barra de 24KV de la central de Papallacta seguirá alimentada aún en caso de salida de ambos generadores.

### III.2. ALIMENTACION A LAS CARGAS DE LA CENTRAL

Las cargas de la central se alimentan de la barra de 230 volts, a través de sus respectivas protecciones. Los motores están protegidos con fusibles y protección térmica como se indica en el siguiente cuadro.

MOTOR	ITEM	P	V	# FASES	FUSIB.	TERMIC.	In
Bomba del sistema de lubricación de aceite	W60	370W	230V	3F+N	10A	2.8-4 A	3.4 A
Bomba del gobernador	W46 88QP	2200W	230V	3F+N	25A	7-10A	8.7A
Bomba de la valvula mariposa	W40	550W	230V	3F+N	10A	2.2-3.3A	2.7A
Motor del gobernador	W47 65M	370W	230V	2F+N	2 fusib.	--	--
Límite de apertura de los alabes	W48 65ML	--	115V	1F	2 fusib.	--	--
Ajuste de velocidad	65MS	--	115V	1F	2 fusib.	--	--

De la barra de 230 volts. también se derivan cuatro alimentaciones bifásicas protegidas mediante protecciones termomagnéticas Q1, Q2, Q3, Q4 de 10 amp, las cuales les alimentan a:

CIRCUITO	PROTECCION	CARGA CONECTADA
1	Q 1	Selenoide de válvula mariposa
2	Q2	Calentador del estator
3	Q3	Reserva
4	Q4	Reserva

### III 2.1. ALIMENTACION A LA BARRA DE 24 VCD

La carga más importante de la central que se alimenta desde la barra de 230 volts es el banco de baterías de 24 volts dc y 90 Ah, el cual se alimenta a través de un cargador de 230 volts, 60 c/seg y dos fases, operado por rectificadores de silicón controlados, que se encargan de mantener completamente cargado el banco de baterías y proveer de alimentación continúa a toda la unidad.

El banco de baterías de una central sirve para alimentar a la barra de corriente continúa en caso de pérdida total de corriente alterna, con el fin de mantener el control e iluminación de la planta por un determinado tiempo hasta corregir la falla o - parar automáticamente la unidad, manteniendo una normal condición de operación. El banco de baterías de la central en estudio es capaz de proveer de suficiente mayoría para tres horas de iluminación de emergencia y sistema de control en caso de pérdida completa del sistema de corriente alterna.

### III.2.2. Descripción del Sistema de 24 VCD

La barra principal de corriente continua que está conectada a las baterías es la denominada barra P-N, de la cual se derivan cinco circuitos: P1-N1, P2-N2, P3-N3, P4-N4, - P5-N5. los cuales alimentan al sistema de control, protección y alarmas de la central.

Al dividir el sistema de 24 VCD en cinco circuitos, además de repartir la carga, se consigue que en caso de una posible falla en alguno de los circuitos, no pierda instantáneamente todo el control de la central, sino solamente se desconecte la parte fallosa, quedando alimentados los demás circuitos, para así lograr una salida normal de la unidad. Para lograr esto, los diferentes circuitos, están agrupados de la siguiente manera:

#### a. Circuito P1-N1

- Control de la bomba del sistema de lubricación de aceite del gobernador
- Protección contra fallas en el sistema de lubricación de aceite
- Protección contra sobrevelocidad
- Protección contra fallas en la bomba del gobernador
- Protección de mínima presión
- Diferencial de presión en las rejillas
- Apertura del breaker por incremento del factor de potencia.
- Protección contra mínimo voltaje en el sistema de 24 VCD
- Protección contra falla a tierra en el sistema de 24 VCD
- Protección para apertura de fusibles en el sistema de 24 VCD
- Protección contra sobretemperaturas en los cojinetes y en los devanados del estator del generador
- Protección contra sobretemperaturas en el transformador
- Protección contra secuencia negativa

- Protección diferencial
- Protección contra máxima corriente y máximo voltaje en el generador
- Protección contra potencia reversa
- Medición en el lado de 24Kv y 4.16 Kv.
- Alimentación a los relés de protección

b. Circuito P2-N2

- Indicadores de posición de los alabes
- Panel de alarmas en el cubículo del generador
- Panel de alarmas en el cubículo de la turbina
- Indicación de la posición de apertura y cierre de la válvula mariposa
- Indicación de la apertura y cierre de los contactores principales.
- Prueba de lámparas S2, S30, S31.

c. Circuito P3-N3

- Indicadores de posición de breakers Q2, Q3, Q4 en el diagrama mímico del cubículo del generador
- Control de contactores K26, K27 y rele de tiempo K25 para mando del disyuntor Q2 del generador.

d. Circuito P4-N4

- Operación de la válvula mariposa y control de apertura y cierre del motor del límite de los álabes, de la turbina (65ML)
- Control de motor de control de velocidad 65MS
- Control de la apertura y cierre de la válvula mariposa.

e. Circuito P5-N5

- Operación del motor de la bomba del sistema de lubricación de aceite
- Operación del motor de la bomba del gobernador
- Operación del motor de la bomba de la válvula mariposa

De estos cinco circuitos, se puede ver que el más importante es el P1-N1, debido a que comanda toda la protección y control de la unidad, por lo que a continuación se va a analizar las consecuencias en caso de fallo en éste circuito y los demás.

### III.3. PROTECCION DEL SISTEMA DE 24 VCD

Este sistema es lo más crítico de la central, debido a su simplificación por lo que no garantiza una alta continuidad de servicio en caso de falla. Lo más crítico que puede suceder es una ruptura de los fusibles de 35 amp. de la barra principal (P-N) con lo que se desconectaría instantáneamente todo el control de la central.

#### III.3.1. Supervisión del Voltaje de Control

La supervisión del voltaje de control lo hace el relé de control de baterías F1, el cual detecta pérdidas de voltaje o mínimo voltaje de control. Este relé está conectado directamente a la barra P-N (Diag. III-1) Al haber pérdida o mínimo voltaje de control, los contactos del relé F1 cierran y energizan al contactor K11, el cual acciona la alarma No. 4 BAJO VOLTAJE 24 Volts D.C. a la vez que hace funcionar los contactores principales K21 y K22, para luego seguir la secuencia de operación descrita en el capítulo 4, apartado 4.

#### III.3.2. Falla a tierra en la Barra de 24 VCD

Este tipo de falla también es detectado por el relé F1, el cual al detectar la falla cierra sus contactos y alimenta al contactor K12. el cual energiza la alarma No.12 FALLA A TIERRA 24 VCD a la vez que hace funcionar los contactores K21 y K22 para luego seguir la secuencia de operación descrita en el Capítulo 4 apartado 4.

### III.3.3. Protección de los Circuitos de 24 VCD

Los cinco circuitos que se derivan de la barra P-N están protegidos por fusibles automáticos de 6 amp. Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 respectivamente, con contactos auxiliares, los cuales comandan las alarmas y en ciertos casos la salida de la unidad.

#### III.3.3.1. Falla en el circuito P1-N1

Al suceder un cortocircuito en P1, N1, desconecta el interruptor fusible Q1, con lo que abre su contacto auxiliar 13-14 como indica el plano III-1.

Debido a que el sistema de control comandado por este circuito se desconecta instantáneamente al cortarse su alimentación, se desenergizan entonces todos los contactores comandados por los relés de protección, además de los contactores principales que también están conectados a este circuito, por lo que la secuencia de operación de paro de la unidad y alarmas, no sucederá como en las demás fallas. Al desconectarse el contacto auxiliar 13-14 de Q1, se desenergizan los contactores K13 y K14, los cuales se encuentran alimentados mientras no exista fallo en los fusibles, al suceder esto, el contactor K13 cierra su contacto normalmente cerrado 21-22, y acciona la alarma No. 13 fusible 24 V.C.D., sin accionar los contactores principales K21, y K22, debido a que se encuentran desenergizados por falla en P1-N1.

El contactor K13 al abrir su contacto normalmente abierto 31-34, desenergiza el contactor de bajo voltaje, con lo que se desconecta el disyuntor del generador (Plano 4-6) al desenergizarse el contactor K14, desenergiza el contactor K5H, el cual se encuentra alimentado por el circuito P4-N4, con lo que se cierra la válvula mariposa

y se desconecta también la bomba de esta misma válvula, como indica el diagrama de bloques 4-7. Además desconecta instantáneamente la bomba del sistema de lubricación de aceite del gobernador.

### III.3.3.2. FALLA EN EL CIRCUITO P2-N2

Al haber un cortocircuito en P2-N2, desconecta el interruptor fusible Q2 abriéndose su contacto auxiliar 13-14 como indica el plano 3-1, este contacto auxiliar desenergiza instantáneamente los contactos K13 y K14, los cuales se encuentran alimentados mientras no exista fallo en los fusibles. El contactor K13 cierra su contacto normalmente cerrado 21-22 sin accionar la alarma No. 13 FUSIBLE 24 VDC debido a que el circuito de alarmas es alimentado por P2-N2, pero en este caso acciona los contactores principales K21 y K22 ya que el circuito P1-N1 si se encuentra energizado, por lo que se sigue la secuencia de operación dado por estos contactores como se describe en el capítulo 4, apartado 4.

Al desenergizarse el contactor K14, desenergiza al contactor K5H (plano 4-6) el cual se encuentra alimentado por el circuito P4-N4, con lo que se cierra la válvula mariposa y se desconecta también la bomba de ésta misma válvula, como indica el diagrama de bloques 4-7. Además desconecta también la bomba del sistema de lubricación de aceite del gobernador.

Al abrirse el interruptor fusible Q2, desconecta instantáneamente las partes alimentadas por el circuito P2-N2 descrito anteriormente en el apartado 3-2, el cual alimenta principalmente al panel de alarmas y a los indicadores de posición de los seccionadores y disyuntor del generador, por lo que se pierde esta información al abrirse Q2.

#### III.3.3.3. Falla en el Circuito P3-N3

En caso de falla de P3-N3, se desconecta el interruptor fusible Q3, abriéndose su contacto auxiliar 13-14 como indica el plano 5-1, y luego sigue igual secuencia de operación para falla en el circuito P2-N2 descrita en el apartado anterior. Para este caso al desconectarse Q3 desenergiza las partes de P3-N3, entre las cuales se encuentran principalmente los contactores K26, K27 y el relé de tiempo K25 (plano 4-6) que comandan el disyuntor del generador Q2, el cual para este caso se desconecta comandado por el contactor 31-34 de K13, que acciona el relé de bajo voltaje, el cual dispara al disyuntor del generador Q2.

Para esta falla funciona la alarma No. 13 FUSIBLE DE 24 VDC ya que el circuito P2-N2 se encuentra energizado.

#### III.3.3.4. Falla en el circuito P4-N4

Al abrirse el interruptor fusible Q4 se pierde la alimentación a los contactores para control de turbina y válvula mariposa, por lo que se desenergizan;

accionando instantáneamente por medio del contactor K5 (plano 4-6) el cierre de la válvula mariposa, para luego seguir la secuencia de operación descrita en el apartado anterior

#### III.3.3.5 Falla en el circuito P5-N5

Al desconectar el interruptor fusible Q5, desenergiza instantáneamente los motores de las bombas descritas en la parte C del apartado 3-2.2. La secuencia de operación para esta falla es igual a la descrita en el apartado 3-2

C A P I T U L O    I V  
P R O T E C C I O N   D E L   G E N E R A D O R   -   T R A N S F O R M A D O R

4.1.    F A L L A S   Q U E   P U E D E N   P R E S E N T A R S E

Para elegir el tipo de protección que puede hacerse a un generador, se lo hace pensando en el tamaño de la máquina, la localización y la importancia que la máquina a protegerse significa en el sistema. - En todo caso, hay que tratar de dar toda clase de - seguridad a la máquina, ya que el empleo de protecciones no solamente evita con el tiempo gastos de reparación en el caso de una avería, sino que evita la pérdida de producción debido a una prolongada pues ta fuera de servicio de la unidad.

Para proteger al generador, se debe averiguar las causas que pueden producir averías, para así evitar las o detectarlas tan pronto ~~sea~~ sea posible.

Algunas causas principales son:

1. Sobretensiones de origen atmosférico
2. Sobretensiones debido a maniobras normales de explotación u otras causas internas
3. Materias primas defectuosas
4. Fenómenos de envejecimiento en los aislamientos
5. Introducción de cuerpos extraños en la máquina

## 6. Sobrecargas de larga duración.

Por esta causa, se puede dividir a éstos defectos, como de origen interno y de origen externo, por lo que se debe seleccionar de acuerdo a esto las protecciones.

Entre las causas más frecuentes de fenómenos externos, están las siguientes:

1. Sobretensiones de origen atmosférico
2. Sobrecalentamiento exagerado a causa de una sobrecarga o de un cortocircuito exterior.
3. Sobretensiones debido a maniobras normales de explotación.
4. Posible carga asimétrica
5. Funcionamiento del generador como motor sincrónico

Entre los defectos de origen interno están los siguientes:

1. Cortocircuitos entre fases diferentes
2. Defectos a masa en el arrollamiento del estator
3. Defectos a masa en el arrollamiento del rotor
4. Cortocircuitos entre espiras de una misma fase
5. Desconexión accidental del circuito de excitación.

Además de estas fallas, pueden suceder ciertas fallas mecánicas, las cuales también dependen del tipo de generador, así por ejemplo si es refrigerado por agua, gas, etc. Por lo cual el generador, también debe estar protegido para este tipo de fallas, para lo cual se utilizan indicadores de circulación de fluidos de refrigeración, termostatos para prevenir el calentamiento de los cojinetes y soporte de cojinete, así como también

para el caso de incendio se utilizan dispositivos extintores de incendios, ya sea en base de  $\text{CO}_2$ , agua y en algunos casos vapor a presión.

En el diagrama 4.1. se puede apreciar el lugar de los diferentes tipos de fallas que puede ocurrir en el sistema de aislamiento de los devanados del generador.(9)

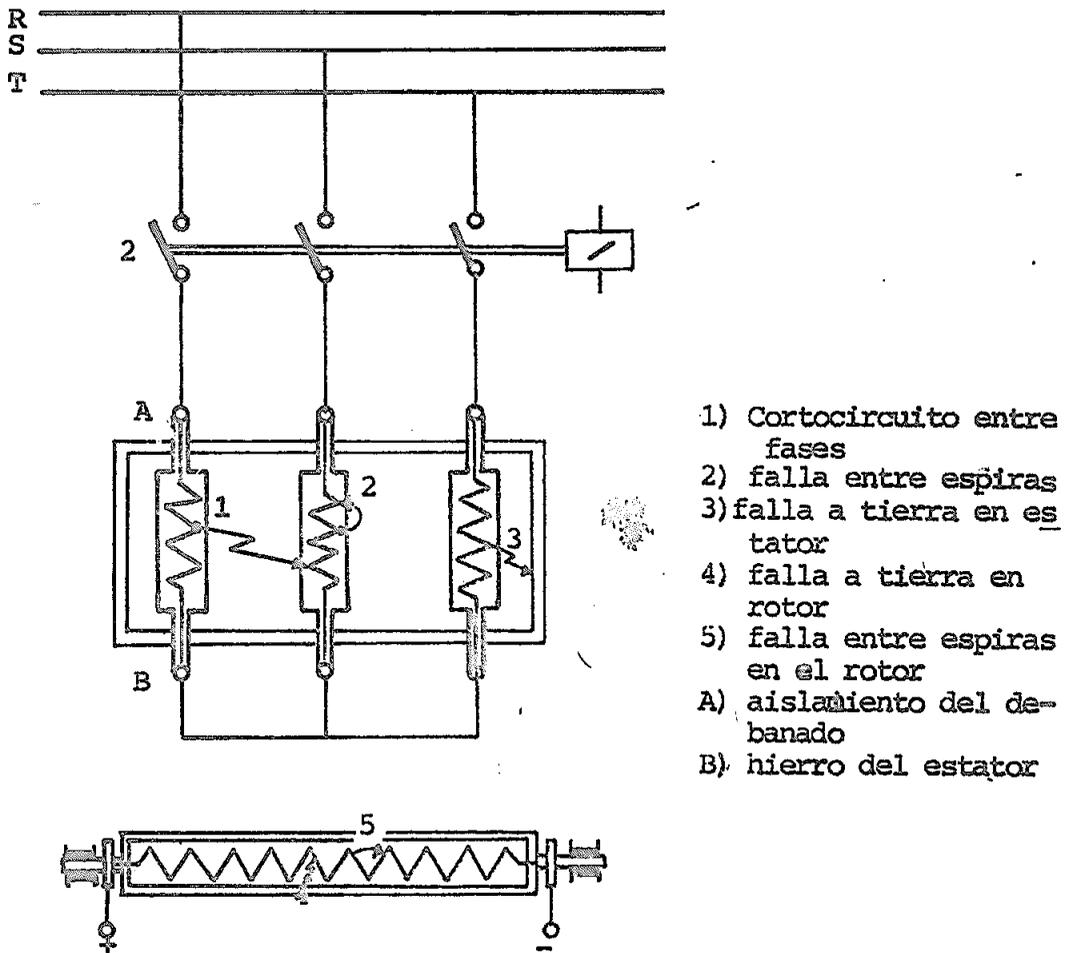


DIAGRAMA 4.1.

Todo tipo de efecto eléctrico en una máquina es como resultado de una ruptura en el aislamiento, o debido a un arco a través del aislamiento. Esto produce conducción entre partes a diferente potencial en condiciones normales. Si el circuito así formado tiene una alta resistencia, la falla produce un desplazamiento del voltaje del sistema afectado, si la resistencia es baja, conducirá una corriente alta, lo cual puede causar serios daños en el punto concerniente, debido al arco que usualmente se produce. El fin del sistema de protección es el detener una falla al instante, e inmediatamente operar interruptores para cortar el flujo de potencia a la falla.

#### 4.2. DISPOSITIVOS DE PROTECCION PARA GENERADORES DE PEQUEÑA Y MEDIANA POTENCIA.

Como anteriormente se dijo, las centrales de pequeñas y medianas potencias, deben tener un diseño lo más simplificado, con el fin de lograr un costo bastante bajo, y a la vez garantizar un buen funcionamiento.

Los fabricantes de equipo de protección luego de estudios y experiencias obtenidas en el diseño y construcción de diferentes tipos de centrales han logrado hacer ciertas simplificaciones para la protección de pequeños y medianos generadores.

En lo que se refiere a la protección contra los defectos externos, los pequeños generadores se equipan solamente con relés de máxima intensidad y con relés térmicos que pueden preverse como relés directos en caso de que la instalación no tenga fuente auxiliar independiente. En el caso de generadores que funcionen

Tamaño del r  
Protecc:  
Diod:  
s

solos, sin acoplarse en paralelo con otros generadores o con la red, los relés de máxima intensidad es aconsejable que estén instalados, si es posible en el punto neutro del generador, con objeto de que también entren en funcionamiento en presencia de defectos internos.

En el caso de un pequeño generador funcionando en paralelo con una red, los dispositivos de protección se instalan del lado del juego de barras; en éste caso, el dispositivo de desconexión instantánea puede emplearse para la protección contra los defectos internos ajustándolo a una corriente superior a la corriente instantánea de corto circuito del generador. En el caso de un defecto interno, su corriente de cortocircuito por regla general es mucho mayor a la corriente de cortocircuito del generador, por lo cual estaría determinado por la red y al suceder este defecto interno, accionaría el dispositivo de desconexión instantánea.

Si el generador tiene la posibilidad de embalsarse se lo equipa además con relés de máxima tensión, los cuales no necesitan una fuente auxiliar independiente.

Si existe peligro de que el fluido que acciona el primotor (para nuestro caso el agua que acciona la turbina) pueda suprimirse fortuitamente, también es aconsejable emplear relés de retorno de potencia aún para generadores de muy pequeña potencia.

Para pequeñas instalaciones que deben trabajar en paralelo con una red bastante importante, con el objeto de que un incidente que se produzca en esta red no ocasione perturbaciones en la pequeña central, se provee de un relé de frecuencia. La función de

este relé se basa en que durante el funcionamiento normal, la frecuencia de la red permanece constante en caso de anormalidad aparece una variación de esta frecuencia, entonces funciona el relé de frecuencia pro vocando la desconexión del disyuntor del generador.

En lo que se refiere a la protección contra los defectos internos, para generadores de pequeña y mediana potencia se utiliza como protección general, los relés de potencia inversa, en lugar de los relés diferenciales, así como de los relés de protección contra los defectos a masa y cortocircuitos entre espiras. El relé está influenciado por la componente inversa y la asimetría que aparece hacia la red en caso de defecto interno. De ésta manera, cuando la fuente de asimetría se encuentra en la máquina, el relé se excita y cierra su contacto de desconexión.

La protección resulta eficaz contra los cortocircuitos entre fases, en caso de alejamiento suficiente del punto neutro del generador, contra los cortocircuitos entre espiras y contra los defectos a tierra con la condición de que aparezca una asimetría suficiente. - No estaría comprendida la protección contra el cortocircuito trifásico debido a su simetría, pero debido a que en la práctica este defecto nunca aparece en una forma totalmente simétrica, el relé de potencia inversa también podría detectar este tipo de falla. (10)

La protección sensible a la potencia inversa provoca la desconexión del disyuntor del generador y del disyuntor de la excitación.

La compañía Brown Boveri ha publicado también ciertas recomendaciones para protección de generadores según su potencia (cuadro No. 4-1), y para la protección de generadores de medio tamaño conectados en bloque con el transformador de potencia y sin salida de alimentador intermedio sugiere extender la protección cubriendo también el transformador. La zona protegida por la protección diferencial está definida por los transformadores de corriente conectados en el neutro del generador y en la salida del transformador de potencia (lado de alta). La protección de fallas a tierra en el estator, la cual se extiende hasta los devanados del transformador del lado de la máquina (devanados de baja) es del tipo tripolar polarizado, la ventaja de éstos es que indica la fase afectada por la falla, y es insensible a las armónicas y fallas a tierra en el circuito de alta. Los cortocircuitos y sobrecargas térmicas son detectados por reles, conectados al neutro del generador, para lo cual es preferible preverlos para las tres fases. Recomienda además necesario en el caso de centrales hidroeléctricas conectar también protección contra sobrevoltajes. Para fallas a tierra en el rotor se prevee de relay para este tipo de fallas, el cual es opcional para centrales de hasta 4MVA. Si se produce un desbalance en la carga, la protección contra desbalances previene peligros de sobrecalentamientos en el rotor. La protección contra funcionamiento asincrónico desconecta al generador del circuito.(11)

Para la central de Papallacta se ha tomado en cuenta este tipo de protección, tratando de asumir todas las recomendaciones en cuanto a su potencia, lo cual se puede apreciar en el diagrama 4-2.

#### 4.3. DESCRIPCION Y OPERACION DE LAS PROTECCIONES Y ALARMAS

##### 4.3.1. Protección contra sobretensiones Atmosféricas

La dimensión del nivel básico de aislamiento (BIL) se basa en el voltaje de servicio, en las operaciones de maniobra, así como también en las elevaciones de voltaje que suceden por fallas a tierra en los arrollamientos de la máquina, en los cortocircuitos entre conductores de fases diferentes en las sobretensiones entre dos puntos distantes de un mismo conductor.

El BIL puede ser afectado cuando alcanza valores superiores a las tensiones de prueba, puesto que puede producirse un deterioro de los arrollamientos, que en un tiempo más o menos corto puede poner fuera de servicio a la máquina.

Las sobretensiones atmosféricas caracterizan por tener una brusca elevación de la tensión llamada frente de onda, hasta un máximo valor, llamado valor de cresta seguido de un decaimiento lento, llamado cola de la onda.

El aislamiento del generador depende del valor de cresta, mientras que el aislamiento entre espiras depende especialmente de la rapidez de la elevación de la onda de voltaje, o sea de la gradiente del frente de onda.

Para evitar daños en el estator se conecta pararrayos en cada fase, y para la reflexión de tales ondas se pone también un pararrayos entre el neutro y la tierra del generador. La disposición habitual de los pararrayos a la entrada de las líneas aéreas, no asegura una protección suficientemente eficaz de los generadores mas que en el caso de que la distancia de la máquina a proteger y la entrada de las líneas aéreas no sea demasiado grande y que los pararrayos estén adaptados al nivel de aislamiento de los generadores. En el caso contrario hay que preveer también un juego de pararrayos en los bordes de los generadores.

#### 4.3.1.1. Condiciones que Deben Cumplir los Pararrayos

1. Capacidad de operación para la potencia de interrupción seleccionada
2. Debe ser capaz de soportar la corriente de descarga tanto para una corriente de corta duración, demostrando así la capacidad mecánica, eléctrica y térmica
3. Debe ser capaz de soportar pruebas de aislamiento para demostrar que el superior al mínimo nivel exigido.

#### 4.3.2. Protección Contra Sobretensiones Debido a Maniobras Normales de Explotación.

Las sobretensiones debido a maniobras normales de explotación pueden aparecer en caso de embalamiento de la máquina motriz que acciona al generador o en caso de -

falla en el funcionamiento del regulador de tensión o de los elementos anexos a éste último (transformadores de tensión, fusibles, etc.).

Para el caso de generadores accionados con turbinas hidráulicas el peligro es grande debido a que la gran sobrevelocidad que adquieren estas máquinas motrices pueden producir un embalamiento de las mismas, y, si en éste caso falla el regulador de velocidad de la turbina puede producirse una sobretensión peligrosa; este peligro es mayor si la circunstancia anterior se produce en el caso de funcionamiento normal a un funcionamiento con carga capacitativa, lo cual se produce cuando el generador alimenta a líneas largas o a un gran sistema. Para proteger los generadores -- contra estas sobretensiones se lo hace por medio de un relé de máxima tensión, el cual debe estar alimentado por un diferente transformador de tensión, el regulador de tensión excita necesariamente al máximo al generador, pero como en éste caso el regulador de -- máxima tensión tendría que funcionar y desconectar el generador, esto no es posible más que si está conectado a un transformador de tensión independiente. Para pequeñas centrales, sin fuente auxiliar de energía se puede también utilizar para el funcionamiento del relé la tensión secundaria del transformador de tensión.(10)

#### 4.3.2.1. Operación del Relé de Máxima Tensión (F2)

Para proteger al generador de la central contra sobretensiones se lo ha hecho por medio del relé de sobretensión F2 (diagrama 4-3) el cual es conectado a un transformador de tensión de tres devanados m5.

El voltaje de disparo del relé puede ser de hasta 160 volts. Además el relé esta previsto de un relé de retardo de tiempo, con el objeto de poder regular el tiempo que puede durar una sobretensión, para que ño actúe en caso de un sobrevoltaje debido a manio-  
bras normales de explotación por ejemplo.

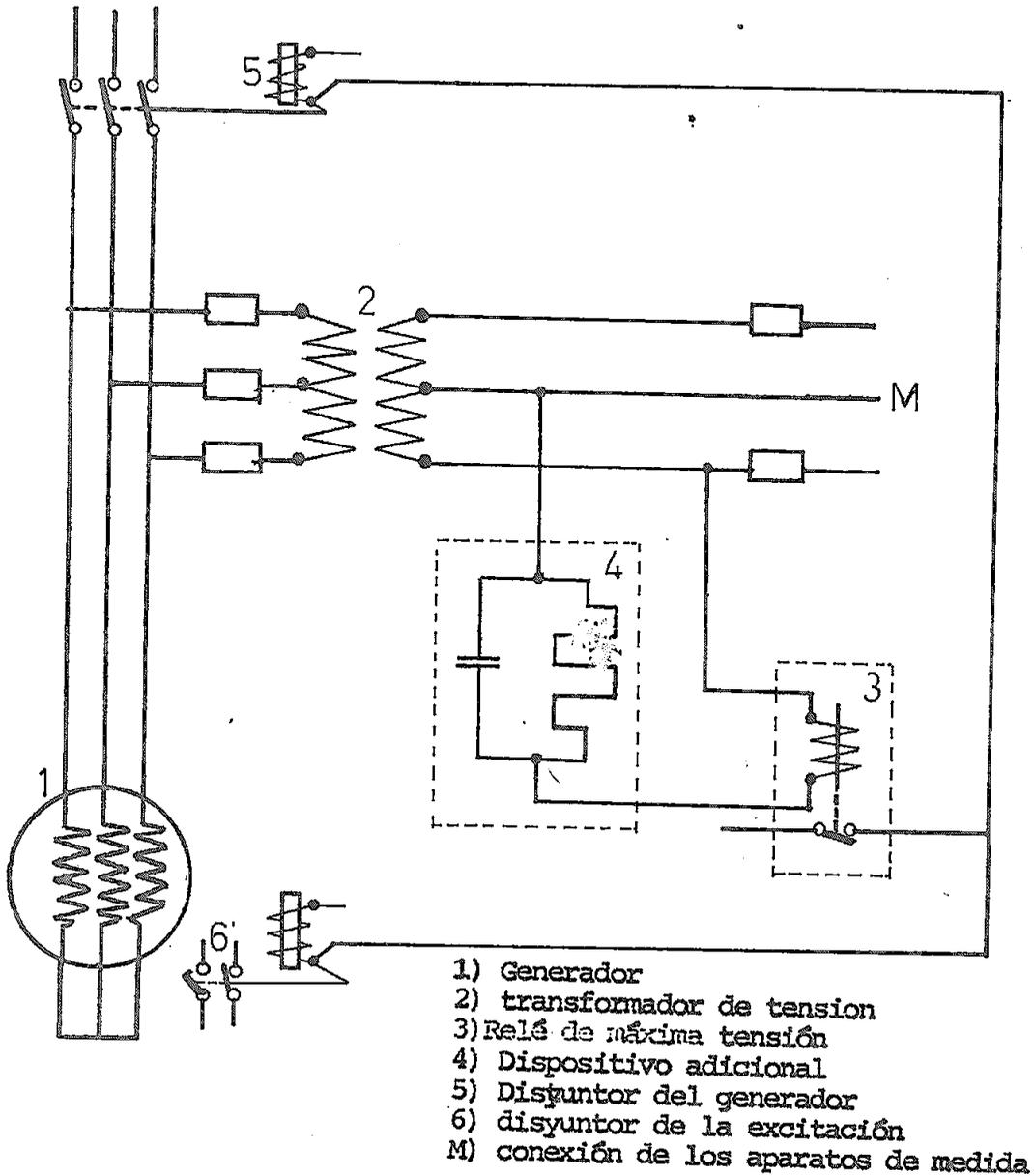


DIAGRAMA 4-3

Como se puede ver en el plano 4-4, al funcionar el relé F2, cierra el contacto normalmente abierto 3, 6 haciendo funcionar al relé K8. Al actuar este, alimenta por medio de su contacto 21,24 al relay de desexcitación K23, y al relay k24 (plano 4-5) así como también al contactor K21 y al relay k22, quedando éstos bloqueados hasta que el operador los quite el bloqueo por medio del reset de los contactos principales S2. Además K8 acciona la alarma No. 8 DISPARO POR - VOLTAJE DEL GENERADOR ( FIG II-2 )

#### 4.4. Operación de los contactores Principales K21 y K22

Estos contactores son llamados principales debido a la importancia que presentan en la operación de paro de la unidad. Son accionados ambos a la vez al haber una falla en la central, la cual implique necesariamente el paro de la unidad. También son accionados en caso de paro normal de la unidad por medio del pulsante de paro S3.

Su consecuencia de operación es la siguiente:

##### Contactor K21

- Desenergiza el contactor 65SD con lo que dispara el selenoide del gobernador.
  
- Denergiza el contactor K5 con lo que se desenergiza el relé 14 y cierra la válvula mariposa. Además K5 a la vez energiza el contactor K1A con lo que se cierra

rra el motor limite de los alabes.

- Energiza el relé de tiempo K25 el cual luego de un intervalo de tiempo energiza al contactor K26 que se encarga de conectar el calentador del estator y de accionar el contactor OUT para con este desconectar el disyuntor Q2 del generador.

#### Contactor K22

- Bloque al contactor K27 para evitar la posibilidad de accionamiento del contactor IN y así cerrar el disyuntor Q2 del generador.
- Energiza la señal S2 para indicar que han accionado contactores principales.

#### 4.4.1. Operaciones de los Contactores Principales K23 y K24

Los contactores K23 y K24 funcionan ambos a la vez y pueden ser accionados solamente con cierto tipo de fallas muy emergentes, que requieran un paro instantáneo de la unidad.

Su secuencia de operación es la siguiente:

- Contactor K23
  - Energiza los contactores K21 y K22 cuya secuencia de operación fue descrita en el apartado anterior.
  - Desconecta la excitación del generador
- Contactor K24
  - Energiza el relé k26 instantáneamente, sin esperar el retardo de tiempo dado por K25, disparado de esta manera el disyuntor Q2 del generador.

Es importante notar que para tipos de fallas no muy peligrosas actúan únicamente los contactores K21 y K22 produciéndose un paro normal de la unidad, para fallas peligrosas actúan además los contactores K23 y K24 produciéndose un paro instantáneo o emergente.

La operación de estos contactores está indicado en los planos 4-5 y 4-6 y en el diagrama de bloques 4-7. Y 4-11

#### 4.5. Falla a tierra en el Estator

Debido al deterioro de los arrollamientos del estator se puede producir un contacto entre una espira del arrollamiento y una ranura, lo cual puede afectar a todo el arrollamiento del estator y al hierro, al producirse corriente de fuga a tierra a través del estator.

Para éste caso, debido a que tenemos acoplado al generador en bloque con el transformador, para preveer las posibles fallas a tierra en el estator, basta controlar la tensión del punto neutro con relación a tierra, ayudándose de un transformador de tensión y un relé de mínima tensión.

En lugar de un simple relé de tensión se ha preferido utilizar un rele polarizado de tierra, tal como se representan en el diagrama 4-8

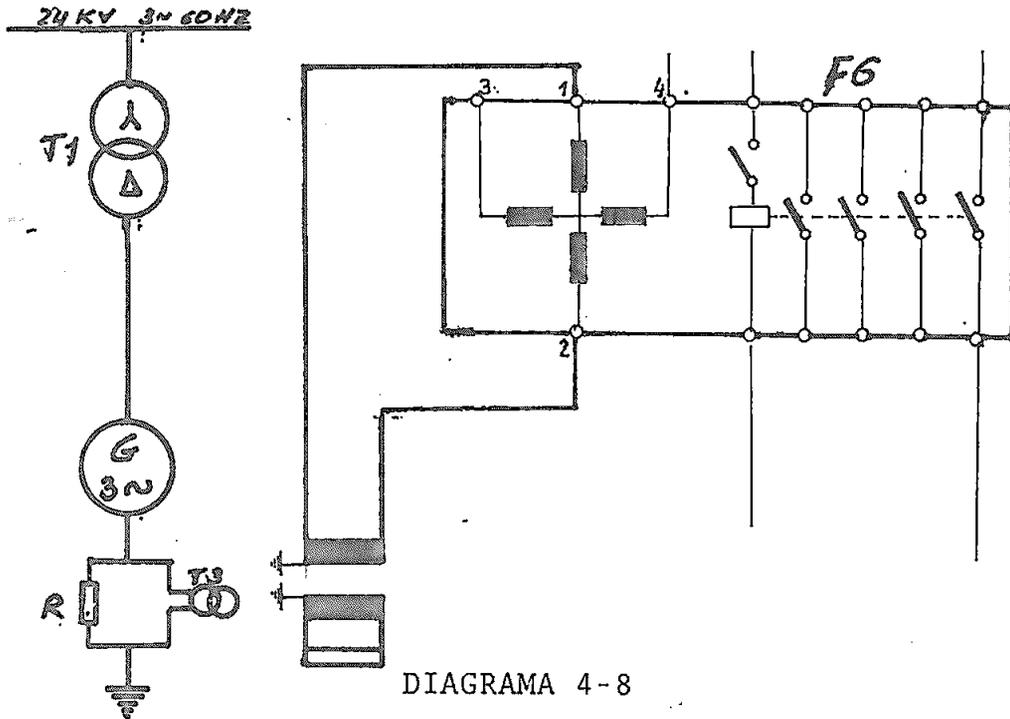


DIAGRAMA 4-8

Uno de los dos arrolamientos del relé se alimenta con la tensión compuesta (puntos 3,4), el otro arrolamiento vigila la tensión del punto neutro con relación a tierra, (puntos 1,2). Esta última tensión es suministrada por un transformador de tensión conectado entre el punto neutro y la tierra. El empleo del relé polarizado sirve para hacerlo insensible a las terceras armónicas, y permite extender la sensibilidad lo suficientemente lejos para proteger un 95% del arrolamiento del generador.

Para evitar desconexiones intempestivas en caso de un defecto a masa procedente del lado de alta tensión del transformador, se ha conectado la resistencia R10 de (de gran valor óhmico). sobre los bornes del

arrollamiento primario del transformador de tensión.

#### 4.5.1 Operación del Relé contra Fallas a Tierra en el Estator (F6)

Al operar el relé F6 por fallas a tierra en el estator, los contactos 15, 16 cierran y operan el relé K5 éste hace operar el relé K23 de la desexcitación y junto con este el K24, además operan los relés K21 y K22 y sigue la secuencia descrita anteriormente.

Al cerrarse el contacto 14,11 del relé K6, hace operar la alarma No. 6 de falla a tierra del estator.

#### 4.6. Protección Contra Potencia Reversa

Si por alguna razón se detiene el agua de entrada a la turbina. y el disyuntor del generador se encuentra cerrado, entonces el generador puede pasar a funcionar como motor sincrónico y accionar la máquina motriz que en este caso es la turbina.

Dado que en todos los casos, se trata de fenómenos simétricos, se utiliza un relé unipolar de retorno de potencia ajustable entre 1 y 5%.

Junto con este relé actúa un relé temporizado debido a que el funcionamiento como motor sincrónico es factible durante algunos segundos, y de ésta manera se logra evitar la desconexión intempestiva en caso de puestas en paralelo o como consecuencia de variación de carga durante el funcionamiento en vacío.

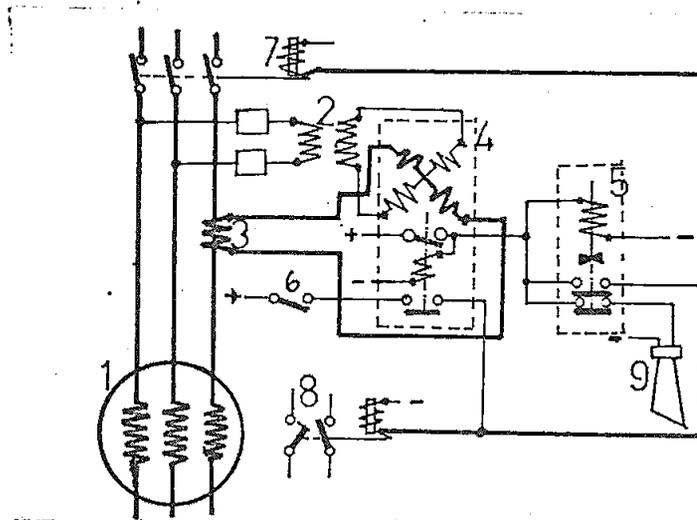


DIAGRAMA 4-9

1) Generador 2) Transformador de tensión 3) transformador de intensidad 4) relé de retorno de potencia 5) Temporizador 6) Contacto del dispositivo de desconexión rápida 7) disyuntor del generador 8) disyuntor de la excitación 9) dispositivo de alarma.

#### 4.6.1 Funcionamiento del relé contra potencia reversa

El relé contra potencia reversa debe hacer accionar al contactor  $KQ$  del plano 4-4, el cual opera el contactor  $K21$  y  $K22$ , al mismo tiempo que hace funcionar la alarma N° 9 RELE CONTRA MOTORIZACION, y luego sigue igual secuencia de operación que la descrita en el capítulo 4 apartado 4.

Segun la compañía Brown Boveri (cuadro 4-1), para generadores de 0 a 4 MVA no es necesario utilizar ésta protección (en centrales hidráulicas), por lo que para la central en estudio por ahora, se conectará únicamente un contacto del watímetro  $P13$ , para detectar esta falla, dejando previsto la instalación del relé.

#### 4.7. PROTECCION CONTRA EL EXCESO DE TEMPERATURA EN EL GENERADOR

Dado que las propiedades físicas y químicas de los materiales usados para el aislamiento de los materiales usados para el aislamiento de los devanados tienden a deteriorarse cuando la temperatura incrementa, quiere decir que la vida del aislamiento de los devanados depende de las elevaciones, de la temperatura, por lo que con una hábil aplicación de refrigerantes utilizables, y el uso de elementos supervisores apropiados podemos prevenir la alta temperatura de los devanados para que no excedan ciertos límites.

Por experiencia se sabe que tales excesos de temperatura por un tiempo considerablemente largo pueden causar problemas serios en la máquina, además pueden resultar efectos nocivos debido a las expansiones térmicas de los diferentes materiales al apretarse el uno con el otro, por ejemplo el cobre de los devanados, el aislamiento y el núcleo de hierro, lo cual puede evitarse por la experiencia en el diseño.

##### 4.7.1. Funcionamiento de la protección contra excesos de temperatura

La temperatura de los cojinetes del generador se lo mide por medio de sensores de temperatura tipo PT100 en el drenaje de aceite del lado de la turbina como del lado de la excitación. La temperatura en los devanados del estator del generador se lo detecta por medio de 6 detectores de temperatura tipo resistencia para 10 a 25°C y de 100- $\Omega$ /°C, los cuales están ubicados en los puntos críticos de la máquina (Diag. 4-10)

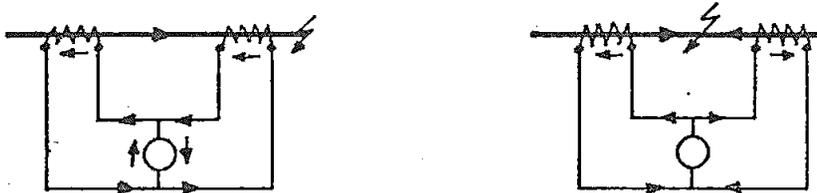
Estas medidas son aplicadas a los circuitos impresos U1, y U2, al primero las medidas de las temperaturas de los cojinetes y al segundo de las temperaturas del estator y amplificadas para luego ser mandadas al instrumento de medida de las temperaturas P17, por medio de un switch con el cual podemos elegir la temperatura a medirse en el instrumento. De los circuitos impresos U1 y U2 además sale una señal -- hacia los contactores K1 y K2 a través de los contactos normalmente abiertos comandados por U2 y U1.

Al detectar una alta temperatura en los cojinetes, funciona el contactor K1 por medio del contacto comandado por U2, de igual manera, al detectar una alta temperatura en los devanados del estator funciona el contactor K2 a través del contacto comandado por U1.

Al operar los contactores K1 o K2 funcionan los contactores K21 y K22 y sigue la secuencia descrita en el apartado 4-4, además operan las alarmas, ya sea la alarma No. 1 de TEMPERATURA EN LOS COJINETES DEL GENERADOR o la alarma No. 2 de TEMPERATURA EN EL ESTATOR.

#### 4.8 Protección diferencial del grupo transformador-generador

La protección diferencial utiliza el hecho de que durante el funcionamiento normal o en caso de un defecto exterior en la parte protegida (Diagrama 4-12), las corrientes a la entrada y a la salida del dispositivo protegido, tienen el mismo sentido y la misma magnitud. En el caso de que se produzca un defecto en el interior de la sección considerada, aparece una corriente diferencial que acciona el correspondiente relé, el cual actúa sobre el dispositivo desexcitador del generador.



Principio de la protección diferencial longitudinal a) funcionamiento normal con cortocircuito en el exterior de la parte protegida. b) Funcionamiento con cortocircuito en el interior de la parte protegida.

DIAGRAMA 4-12

El funcionamiento depende de la corriente que atraviesa éste relé o mejor dicho, de una cierta relación ajustable de la corriente diferencial a la corriente que atraviesa éste relé.

Este arreglo podría ser ideal y el relé de corriente podría ser ajustado muy senciblemente a la corriente diferencial y mejor con transformadores de corriente perfectos. Sin embargo, actualmente los transformadores de corriente no siempre darán exactamente la

misma corriente secundaria para la misma corriente primaria, aún si ellos son comercialmente idénticos. Esta diferencia se debe a variaciones en manufacturación y a diferencias en la carga secundaria, desigual longitud de la carga al relé y desigual capacidad de medidores o instrumentos que pueden ser conectados en uno o ambos secundarios.

La corriente secundaria producida fluye a través del relé, la misma que es pequeña y que puede ser apreciable cuando un cortocircuito es transmitido por una falla externa, pero el relé de sobrecorriente debe ser regulado premeditadamente para el máximo error de corriente que puede fluir a través de él durante una falla externa.

El estator del generador y el transformador pueden ser protegidos en grupo; conectando los transformadores de corriente en el neutro del generador y a la salida del secundario del transformador (diagrama 4-13).

Las condiciones debido al efecto de la corriente magnetizante de INRUSH difiere de la protección diferencial de un transformador no conectado en grupo con el generador debido a que el voltaje nunca es aplicado al transformador instantáneamente.

Sin embargo corrientes magnetizantes de Inrush pueden fluir debido a que el voltaje aplicado al transformador puede disminuir por algún cortocircuito externo, y recuperarse cuando se despeja la falla, por lo que se presentarían transitorios en el instante de recuperación del voltaje.

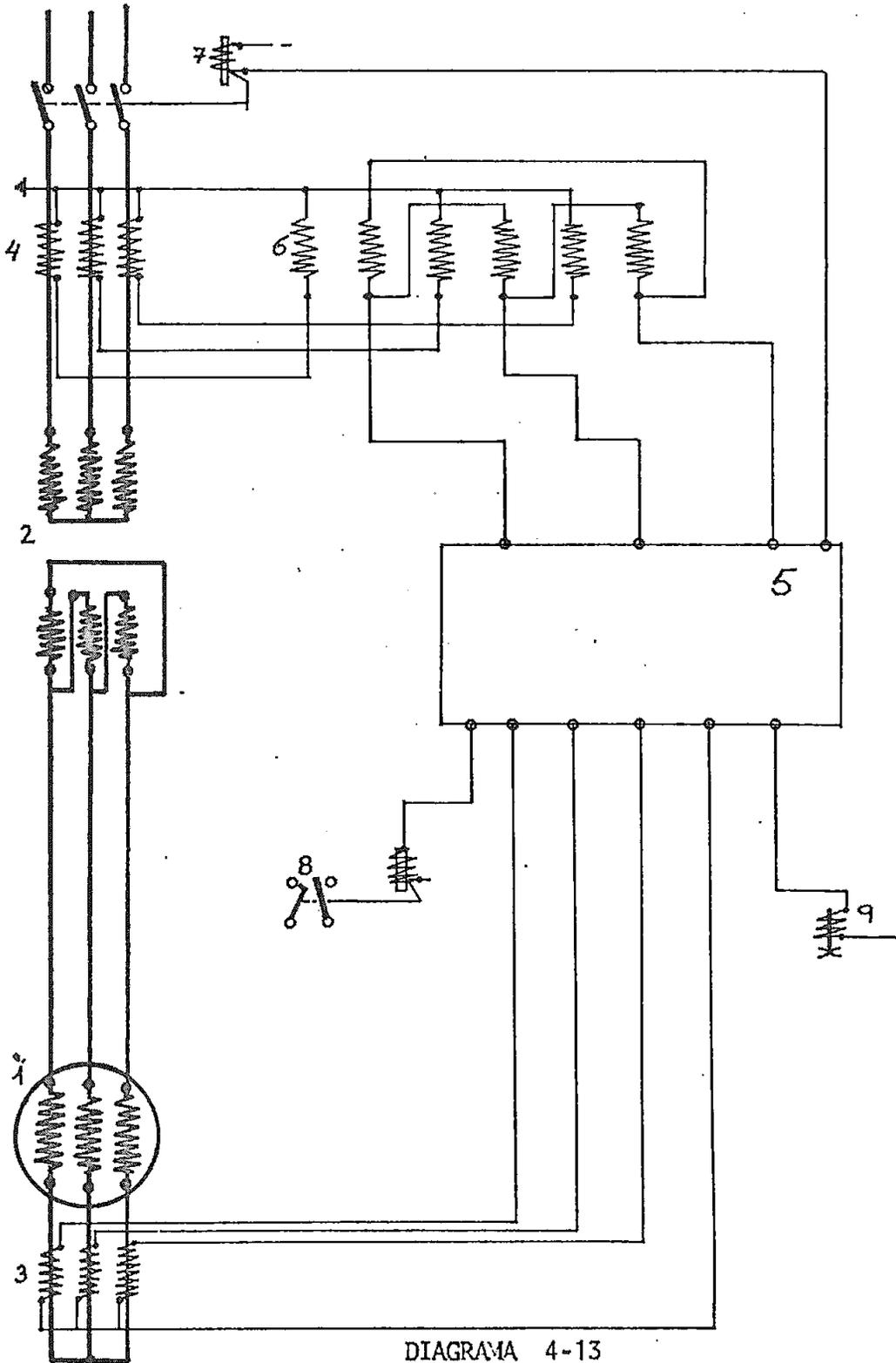


DIAGRAMA 4-13

- 1) Generador 2) Transformador 3) Transformadores de intensidad en neutro 4) Transformad. de corriente en lado de alta 5) relé diferencial 6) Transf. de corriente auxiliares 7) Disyuntor del generador 8) disyuntor de excitación 9) Dispositivo extintor

#### 4.8.1 Funcionamiento de la protección diferencial

Al operar el relé diferencial F3 acciona el contactor K5, el cual acciona las contactores principales K23 y K24 (diagrama 4-7) al mismo tiempo que acciona la alarma N° 5 RELE DIFERENCIAL y luego sigue la misma secuencia de operación descrita en el apartado 4 del capítulo 4.

#### 4.9 PROTECCION CONTRA EL EXCESO DE TEMPERATURA DEL TRANSFORMADOR

El calentamiento inadmisibles del transformador produce desgastes en los aislantes de los arrollamientos, lo cual se produce debido a sobrecargas de larga duración del transformador.

Como protección contra sobrecargas se utilizan:

- a) Imágenes térmicas
- b) relés térmicos primarios o secundarios

El procedimiento de protección por medio de imágenes térmicas es mas costoso, razón por la que se emplea en grandes transformadores en los cuales se considera importante poder medir o registrar a distancia las temperaturas en los arrollamientos.

Para transformadores de mediana potencia, autotransformadores y muchas veces también, transformadores de gran potencia (cuando no han sido construidos con imagenes térmicas) parece preferible emplear relés térmico.

Con una elección correcta de las constantes de tiempo, el calentamiento del relé térmico sigue las fluctuaciones de la temperatura del arrollamiento con una diferencia tan pequeña que con éste

medio tan sencillo, se obtiene una buena aproximación de una perfecta aproximación contra sobrecarga.

La compañía BROWN BOVERI (9) recomienda el empleo de relés térmicos directos para pequeñas centrales que, por regla general no se vigilan permanentemente y para las cuales, la protección contra cortocircuitos está prevista equipando los disyuntores con relés directos de máxima intensidad. En las centrales no vigiladas, se deja a los relés térmicos actuar directamente sobre el mecanismo de desconexión de los disyuntores.

#### 4.10 RELE BUCHHOLZ

El relé Buchholz está basado en que cualquier falla que sobrevenga a un transformador, está precedida de ~~una~~ serie de fenómenos, sin gravedad, pero que a la larga conducen a la destrucción del transformador. Por lo tanto bastará con detectar los primeros síntomas de la perturbación y avisar el hecho mediante una señal óptica preventiva, con el fin de tener en cuenta la circunstancia y desacoplar el transformador cuando lo permitan las condiciones de la explotación.

La protección Buchholz se utiliza en transformadores en aceite, equipados con depósitos de expansión. Es el medio más eficaz de protección contra defectos originados en el interior del transformador.

Este relé es un aparato compacto, de pequeño volumen y de fácil montaje, provisto generalmente de bridas de empalme de entrada y de salida, que permiten montarlo en serie sobre la canalización que une el transformador con el depósito conservador de aceite.

con el fin de recoger el gas acumulado, por medio del cual se puede conocer la importancia del defecto y su eventual agravación, - el relé esta provisto de una válvula de purga.

El nivel de aceite en el receptáculo lo detecta el flotador de alarma. Siendo este nivel función a su vez de la presión de los gases que contiene el aceite.

La velocidad del caudal de aceite y de gas que circulan desde el transformador al depósito conservador lo detecta el flotador de desconexión. Cada flotador está provisto de contactos de mercurio, los cuales dan la señal de alarma y de protección, dependiendo de la posición del flotador.

Una pequeña llave de paso situada en la parte superior del relé puede utilizarse para prueba de funcionamiento de los flotadores.

#### 4.10.1. Funcionamiento del relé Buchholz

Como se puede ver en la figura 4.14 el receptáculo A, normalmente lleno de aceite, contiene los flotadores  $b_1$  y  $b_2$ . Si debido a un defecto poco importante, se producen pequeñas burbujas de gas,

estas se elevan en la cuba del transformador, y se dirijen hacia el depósito conservador de acéite.

Estas burbujas son captadas por el aparato y almacenadas en el receptáculo, donde el nivel de aceite baja progresivamente, a medida que las burbujas llenan el espacio superior del receptáculo. Al suceder esto, el flotador  $b_1$  se inclina, y, cuando la cantidad de gas es suficiente el mercurio cierra los contactos  $C_1$ , que alimentan el circuito de la alarma  $d$  (fig.4.15)

Si continua el desprendimiento de gas, el nivel de aceite en el receptáculo baja hasta que los gases puedan alcanzar la tubería que los lleva al depósito conservador.

En caso que el defecto se acentúe, el desprendimiento se hace violento y se producen grandes burbujas, de tal forma que a consecuencia del choque el aceite refluye bruscamente a través de la tubería, hacia el depósito conservador de acéite. Este flujo de aceite encuentra el flotador  $b_2$ , lo cual provoca el cierre del contacto  $C_2$  accionando a su vez el mecanismo de desconexión  $f$  del disyuntor del grupo transformador-generador-poniendo fuera de servicio a la central.

La aparición de pequeñas burbujas gaseosas se debe solamente cuando la temperatura de las bobinas se eleva hasta el punto en que el aceite se volatiliza en el interior de los bobinados, por lo que

la temperatura de estas no puede elevarse mucho por encima de los 150° C, que es la temperatura de volatilización del aceite.

En caso de una sobrecarga esta temperatura será alcanzada por los bobinados en un tiempo más o menos rápido.

En este caso, las numerosas y pequeñas burbujas expulsadas de todo el bobinado consecuencia del calentamiento de los arrollamientos, actúa como si se tratara de algunas burbujas grandes, es decir, a la manera de un choque que obliga a refluir el aceite, el cual acciona el flotador. Esta acción es tan rápida que la desconexión de los disyuntores se producen antes de que el transformador haya quedado afectado por la sobrecarga. (fig. 4.16)

Para el caso de fallas tales como cortocircuitos o arcos de corta duración no funcionará el relé Buchholz ya que la temperatura del aceite no alcanzará los 150° C en el interior de las bobinas.

Esta protección no funciona por la acción del movimiento del aceite, que resulta de su calentamiento normal, o por acción de los esfuerzos electrodinámicos sobre las bobinas.

Los contactos C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub> también se cierran cuando baja por alguna razón el nivel de aceite de un límite determinado. También puede captar este relé el aire que pudiera encontrarse en el interior del transformador. Para la central en estudio los contactos de este relé activan al contactor K<sub>3</sub> (Plano 4.5) el cual ac-

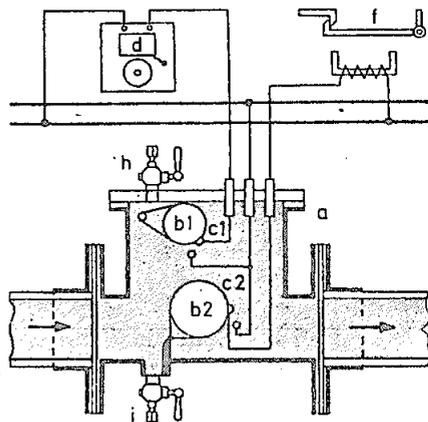


DIAGRAMA 4-14  
Funcionamiento del relé Buchholz  
en caso de servicio normal del  
transformador

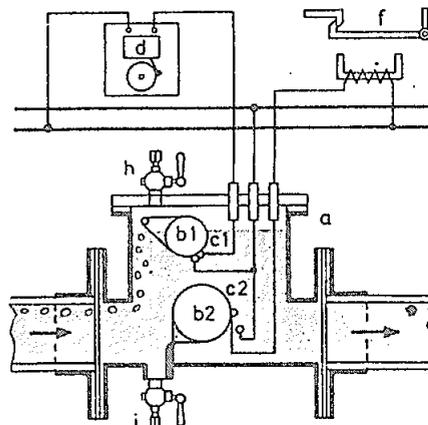


DIAGRAMA 4-15  
Funcionamiento del relé Buchholz  
en caso de aparición de pequeños  
defectos del transformador

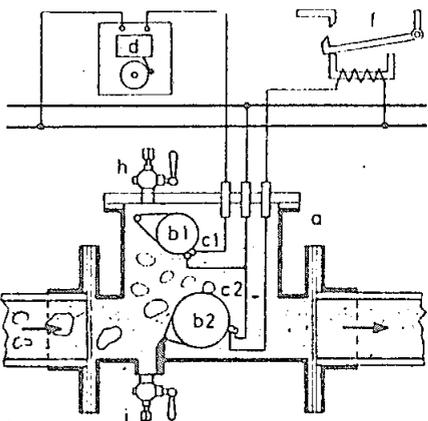


DIAGRAMA 4-16  
Funcionamiento del relé Buchholz  
en caso de aparición de un grave de  
defecto del transformador

ciona la alarma No. 3 TRANSFORMADOR PRINCIPAL, energiza los contactores K23, K24, y sigue la secuencia de operación descrita en el apartado 4

#### 4.10.2. Análisis de los gases.

Un análisis y aspecto de los gases desprendidos permite localizar la naturaleza y la gravedad del defecto. El color de estos gases da una buena indicación sobre el lugar donde se ha producido el defecto; por ejemplo: (10)

- Gases blancos = proceden de la destrucción del papel
- Gases amarillos = proceden de la deteriorización de las piezas de madera
- Gases negros o grises = proceden de la descomposición del aceite

## C A P I T U L O     V

### DESCRIPCION Y PROTECCION DEL SISTEMA

#### HIDRAULICO

##### 5.1. RESERVORIO DE REGULACION

El reservorio de una central hidráulica tiene el objeto de almacenar una gran cantidad de agua, obteniéndose así una energía potencial disponible la cual se la almacena en épocas u horas que no se requiere mucho caudal de agua, para luego poder utilizarla en el tiempo que la carga lo exija.

Para el caso de pequeñas centrales, el construir un reservorio de esta magnitud para cumplir con este objetivo sería demasiado costoso, por lo que se construyen reservorios pequeños para regulación con el objeto de mantener el flujo de agua que requiere la carga con una cierta presión.

Estos reservorios de regulación están provistos de compuertas de limpia de material que se sedimentaría, rejillas fijas que evitan el paso de materiales sólidos y tienen una configuración tal que no produzcan remolinos ni espacios donde puedan quedar sedimentos que luego sea difícil extraerlos.

El reservorio de regulación de la central en estudio tiene una longitud de 66 m, un ancho de 30 y una profundidad de 9m. que da un valor de  $18.000\text{m}^3$ , su construc-

ción se lo lleva a cabo aprovechando la topografía del terreno que no exige demasiada excavación

### 5.1.1. Compuertas y rejillas

Las compuertas sirven para regular o cerrar la entrada y la salida de agua del reservorio, y serán colocadas en:

La toma

En la descarga a la tubería

En la descarga hacia el río (para limpieza)

Las rejillas, como se dijo anteriormente tienen la finalidad de evitar el paso de cuerpos flotantes que por su tamaño perjudicaría la turbina.

Las rejillas se suelen clasificar en gruesas y finas, pero en nuestro caso, las gruesas se las implementará en la toma del río, debido a que se presentan cuerpos grandes, mientras que las finas serán necesarias en el reservorio.

### 5.2. TUBERIA DE PRESION

La tubería de presión tiene como finalidad conducir el agua que impulsará las turbinas, desde el reservorio hasta la casa de máquinas, y que transformará la energía potencial o de posición en energía de presión, en las turbinas. A medida que aumenta la presión es corriente incrementar el espesor de la tubería y disminuir el diámetro interior de la misma. Generalmente, cuando se tiene la altura de caída bruta mayor a los

100 m. es aconsejable utilizar tubería de diámetro variable. La tubería de presión para nuestro caso tiene una longitud de 580m. con una caída de 140 m., está dividida en tres tramos de igual longitud los cuales tienen diferentes diámetros y espesores como se indica a continuación:

	DIAMETRO (m)	ESPESOR (pul)
TRAMO 1	1,29 m.	1/4"
TRAMO 2	1,24 m.	3/8"
TRAMO 3	1,19 m.	7/16"

La presión a la entrada de la tubería es de 13 lbs./pul<sup>2</sup>, mientras que a la salida es de 200 lbs/pul<sup>2</sup>.

#### 5.2.1. Diámetro de la Tubería

Para la selección del diámetro de la turbina se debe tomar en cuenta factores tanto técnicos como económicos puesto que el costo de la tubería representa un alto porcentaje del costo total de la central y más aún en el caso de una pequeña central. La velocidad del agua de la tubería de presión determina su diámetro, una velocidad alta da lugar a pérdida de carga mayores y por consiguiente a pérdidas mayores de potencia.

Una adecuada coordinación entre pérdidas y costo de la tubería de la pauta para una selección del diámetro óptimo. Un costo mínimo de la tubería puede ser obtenido en base a una disminución de la potencia de salida puede ser obtenida con un incremento en el costo; hay siempre para cada proyecto una dimensión de tubería que teóricamente puede dar máxima economía.

Técnicamente conviene que la velocidad del agua en la tubería sea pequeña, lo que permitirá obtener pérdidas mínimas por rozamiento, por consiguiente se obtendrá mayor salida aprovechable, mayor potencia generable y mayores ingresos por la venta de energía.

### 5.2.2. Pérdidas de Carga.

Todo volumen de agua que se encuentre en cierta posición elevada tiene una energía potencial con respecto a cierto nivel inferior al que el agua puede conducirse, pero esta energía mencionada no puede ser aprovechada por completo, ya que en la conducción y en el desague de dicho volumen de agua, se originan pérdidas que reducen la energía potencial.

Las pérdidas que se pueden encontrar a partir del nivel del agua en el tanque de presión son:(12)

1. Pérdidas en las rejillas
2. Pérdidas a la entrada del agua en la tubería
3. Pérdidas por rozamiento a lo largo de la tubería
4. Pérdidas por desviación en los codos y curvas
5. Pérdidas en las bifurcaciones
6. Pérdidas en la válvula mariposa

#### 5.2.2.1. Pérdidas en Las rejillas.

Estas pérdidas se producen principalmente debido a la contracción que sufre la vena líquida al pasar las rejillas o por la disminución de la sección debido a materiales que se depositan entre las rejas.

Las rejillas tienen como finalidad impedir la entrada de cuerpos flotantes a la tubería la que por su tamaño pueden perjudicarlas; por lo que hay que tomar en cuenta que el espaciamiento entre barrotes sea pequeño, pero no excesivamente, pues tomando en cuenta la contracción de la vena líquida al pasar entre los hierros da lugar a un aumento de velocidad y este aumento de velocidad origina mayores pérdidas de presión.

El espaciamiento entre los barrotes de las rejillas está dado por la distancia entre alabes de la turbina con el objeto que materiales más grandes no queden atrapados entre estos y produzcan pérdida de estabilidad de la turbina.

#### 5.2.2.2 Pérdidas a la entrada de agua en la tubería

Estas pérdidas se producen por creación de la velocidad necesaria para el paso de caudal, por la sección de entrada de las tuberías, y por la contracción que sufre el agua al pasar del reservorio que tiene un gran área, a la tubería que es reducida comparada con el área del tanque.

#### 5.2.2.3. Pérdidas en los codos y curvas

Cuando una vena líquida llega a un codo, las partículas en virtud de una inercia tienden a conservar su dirección.

Las que están proximas a las paredes interiores del angulo que forma el codo, se separan de ella contrayendo la sección eficaz del paso del agua o creando una zona de remolinos, esta perturbación no cesa al pasar el codo sino que conserva en algún trayecto siguiente a él.

Otra perturbación que aparece en los codos es debido a que, al ser las velocidades mayores en el centro de la vena líquida que en contacto con las paredes, la fuerza centrífuga también será mayor: con lo que incrementará la presión hacia la pared exterior de la curva, obligando a desplazarse el agua lateralmente produciendose un doble movimiento helicoidal con la siguiente pérdida de energía. Debido a la topografía irregular de la central de Papallacta se ha implementado 6 codos a la tubería.

### 5.2.3. Otras características de la tubería de Presión

La tubería de presión al sobrepasar de la temperatura ambiente, la que había en el momento de montaje de la tubería, sufre una dilatación, mientras que cuando desciende la temperatura sucede una contracción. Si la tubería fuese libre originaría en ella deformaciones que podrían hacerlo salir de sus apoyos hasta causar su rotura.

Para evitar los esfuerzos moleculares debidos a las variaciones de longitud de la tubería, por aumentos o disminuciones de temperatura de tuberías descubiertas, se utilizan las juntas de dilatación en cada tramo comprendidos entre dos bloques de anclaje, normalmente va situando bajo el bloque de anclaje superior de un tramo, en tal forma que se transfiera toda la fricción sobre los apoyos del anclaje inferior.

Como las juntas de dilatación no tienen igual resistencia mecánica que la del resto de la tubería, se le considera a éste como un punto débil, y por tal razón también conviene instalarla al extremo superior de cada alineación recta, en donde la carga del agua es lógicamente menor y facilitando a la vez el montaje.

Para la central en estudio, la tubería de presión está montada con 9 juntas de dilatación.

#### 5.2.3.1. Apoyos y Anclajes

Como se mencionó anteriormente la tubería consta de apoyos colocados de trecho a trecho para evitar la flexibilidad. Estos apoyos reciben a la tubería sobre una superficie lisa, la cual tiene la misma forma de la tubería que se apoya sobre ella.

El hecho de tener una superficie lisa de contacto con el apoyo se debe a que hay que darle facilidad para que se deslice sobre el, al variar la longitud por cambio de temperatura.

Los apoyos deben mantener a la tubería por lo menos 25cms. sobre el piso para poder ajustar las bridas y mantenimiento de las mismas.

Para el montaje de la tubería se utilizarán 20 apoyos separados entre sí 20 m.

Los bloques de anclaje se instalan en donde hay cambio de dirección, sea en horizontal o también cuando la tubería tiene una alineación muy larga con una pendiente tal que la componente del peso de la tubería en el sentido del eje del tubo, es mayor que la resistencia de deslizamiento.

Estos bloques de hormigón sirven para absorber todos - los esfuerzos que pueden producir en una tubería y en cualquier sentido que se desarrollen. Se diseña en tal forma que ellos simplemente por gravedad soporten en la tubería. Los bloques de anclaje son implementados en los sitios impuestos por la configuración del terreno para lo cual se utilizan 9 bloques.

### 5.3. TURBINA

La turbina hidráulica, que representa la máquina más importante de generación de energía eléctrica, así como

la turbina a gas, son máquinas basadas en principios de las dinámicas de flúidos. Actualmente son ejecutables turbinas hidráulicas con un orden de magnitud de potencia (dependiendo de su velocidad) de hasta 1.000.000 Kw.

Para miniproyectos hidroeléctricos, los generadores con capacidad de 1000 Kw o menos se compran por lo general incluídos con la turbina. Hay una variedad de diseños en el mercado que utilizan turbinas de tipo reacción o a impulso. La velocidad del generador es comunmente de 900 a 1200 como 1800 RPM para centrales de 60 ciclos. Si la caída efectiva de la turbina es suficientemente alta como para obtener estas velocidades se acopla el generador directamente. Con caídas menores se conecta el generador a través de un dispositivo para aumentar la velocidad o banda de propulsión en forma de V.

Para pequeñas centrales hidráulicas, que están sobre los 1000 Kw, los generadores se escogen por lo común para obtener las velocidades máximas de operación de la turbina, consistente con la caída, la instalación y la elevación del lugar.

Cuando la caída es de hasta 18 m. se utiliza por lo general una turbina de hélice o tipo-kaplan con o sin el dispositivo para aumentar la velocidad. La pérdida de la eficiencia del dispositivo para aumentar la velocidad varía de 1.5 a 3%. En éste rango de la caída hay disponibles en el mercado turbinas horizontales.

## C A P I T U L O     V

### DESCRIPCION Y PROTECCION DEL SISTEMA

#### HIDRAULICO

##### 5.1. RESERVORIO DE REGULACION

El reservorio de una central hidráulica tiene el objeto de almacenar una gran cantidad de agua, obteniéndose así una energía potencial disponible la cual se la almacena en épocas u horas que no se requiere mucho caudal de agua, para luego poder utilizarla en el tiempo que la carga lo exija.

Para el caso de pequeñas centrales, el construir un reservorio de esta magnitud para cumplir con este objetivo sería demasiado costoso, por lo que se construyen reservorios pequeños para regulación con el objeto de mantener el flujo de agua que requiere la carga con una cierta presión.

Estos reservorios de regulación están provistos de compuertas de limpia de material que se sedimentaría, rejillas fijas que evitan el paso de materiales sólidos y tienen una configuración tal que no produzcan remolinos ni espacios donde puedan quedar sedimentos que luego sea difícil extraerlos.

El reservorio de regulación de la central en estudio tiene una longitud de 66 m, un ancho de 30 y una profundidad de 9m. que da un valor de  $19.000\text{m}^3$ , su construc-

ción se lo lleva a cabo aprovechando la topografía del terreno que no exige demasiada excavación

### 5.1.1. Compuertas y rejillas

Las compuertas sirven para regular o cerrar la entrada y la salida de agua del reservorio, y serán colocadas en:

La toma

En la descarga a la tubería

En la descarga hacia el río (para limpieza)

Las rejillas, como se dijo anteriormente tienen la finalidad de evitar el paso de cuerpos flotantes que por su tamaño perjudicaría la turbina.

Las rejillas se suelen clasificar en gruesas y finas, pero en nuestro caso, las gruesas se las implementará en la toma del río, debido a que se presentan cuerpos grandes, mientras que las finas serán necesarias en el reservorio.

### 5.2. TUBERIA DE PRESION

La tubería de presión tiene como finalidad conducir el agua que impulsará las turbinas, desde el reservorio hasta la casa de máquinas, y que transformará la energía potencial o de posición en energía de presión, en las turbinas. A medida que aumenta la presión es corriente incrementar el espesor de la tubería y disminuir el diámetro interior de la misma. Generalmente, cuando se tiene la altura de caída bruta mayor a los

100 m. es aconsejable utilizar tubería de diámetro variable. La tubería de presión para nuestro caso tiene una longitud de 580m. con una caída de 140 m., está dividida en tres tramos de igual longitud los cuales tienen diferentes diámetros y espesores como se indica a continuación:

	DIAMETRO (m)	ESPESOR (pul)
TRAMO 1	1,29 m.	1/4"
TRAMO 2	1,24 m.	3/8"
TRAMO 3	1,19 m.	7/16"

La presión a la entrada de la tubería es de 13 lbs./pul<sup>2</sup>, mientras que a la salida es de 200 lbs/pul<sup>2</sup>.

#### 5.2.1. Diámetro de la Tubería

Para la selección del diámetro de la turbina se debe tomar en cuenta factores tanto técnicos como económicos puesto que el costo de la tubería representa un alto porcentaje del costo total de la central y más aún en el caso de una pequeña central. La velocidad del agua de la tubería de presión determina su diámetro, una velocidad alta da lugar a pérdida de carga mayores y por consiguiente a pérdidas mayores de potencia.

Una adecuada coordinación entre pérdidas y costo de la tubería de la pauta para una selección del diámetro óptimo. Un costo mínimo de la tubería puede ser obtenido en base a una disminución de la potencia de salida puede ser obtenida con un incremento en el costo; hay siempre para cada proyecto una dimensión de tubería que teóricamente puede dar máxima economía.

El costo del generador para una instalación horizontal es menor que el de una instalación vertical. Con este tipo de caída se debe considerar también turbinas con generadores protegidos en cajas impermeabilizadas y turbinas con el dispositivo para aumentar la velocidad colocados en ángulo recto.

En los casos en que la caída entre 18 y 36.5 m., las turbinas a hélice y tipo Kaplan deben ser instaladas verticalmente debido a la mayor velocidad. Las turbinas Francis operan a velocidades más bajas, no obstante para estas turbinas se puede considerar una instalación horizontal.

Cuando la caída es de 36.5 a 457.2m. rango en el que se encuentra la caída de la central en estudio se puede operar una turbina tipo Francis a velocidades mayores que una turbina de impulso y los costos serán menores tanto para la turbina como para el generador y la construcción de la planta de energía.

Cuando la caída es de 460 m. o más se utiliza una turbina a impulso. Para bajas capacidades entre 1000 Kw y 5000 se debe considerar turbinas de chorro horizontal simple o doble debido a la reducción en los costos del generador.

El cuadro No. 5.1. indica la selección de los diferentes tipos de turbinas de acuerdo a la altura y a la velocidad específica.

CUADRO 5.1.

	Tipo de turbina	Ns (RPM)	H neta (m)
PELTON	De un inyector	5-30	150 - 2.000
	De varios inyectores	30-50	150 - 2000
FRANCIS	Lentas	50-150	120 - 500
	Medias	150-250	50 - 120
	Rápidas	250-400	20 - 50
HELICE	Lentas	350-550	22 - 40
	Medias	550-750	12 - 22
	Rápidas	750-1000	5 - 12

En resumen, la selección de turbinas para pequeñas - centrales hidráulicas debe estar dada en base a equi po ya existente, para evitar mayores costos al mandar a fabricar la turbina como se suele hacer para centra les grandes. Se puede minimizar espacio y costos de construcción de la casa de máquinas al adoptar turbinas de tipo horizontal, se debe tomar en cuen ta que lá caída éfectiva disponible para la turbi na tiene gran influencia en el costo. Este aumento se debe a mayores tamaños y menor velocidad síncroni zada de las turbinas requeridas para la aplicación de bajas caídas.

### 5.3 .1. Datos de Diseño de la Turbina

La turbina para la central hidráulica de Papallacta tiene los siguientes datos de diseño:

FABRICANTE: Sorumsand Verksted A/S Sorumsand Norway

TIPO: Francis Lenta Horizontal

VELOCIDAD: 600 RPM

VELOCIDAD DE EMBALAMIENTO: 1000 RPM

FLUJO NOMINAL: 123 pies 3/seg

DIAMETRO DEL RODETE: 1.260 mm.

MATERIAL DEL RODETE: Acero inoxidable

NUMERO DE ALABES: 20

Una eficiencia máxima del 93.2% para una descarga de 3,18m<sup>3</sup>/seg. (graf V-1 )

### 5.3. 2. Cubículo de Control de la Turbina

El cubículo de control de la turbina se encuentra ubicado junto al cubículo del generador (fig. II-1) y consta del siguiente equipo:

#### a. Lista de Instrumentos:

INSTRUMENTO	SIMBOLO
Voltímetro	P1
Tacómetro	P2
Nivel de agua	P3
Contador de horas	P4
Indicador de posición de límite de los alabes	P5
Indicador posición de los alabes	P6

#### b. Lista de Reles

Relé de control de las baterías	F1
Relé de maxima corriente	F41
Relé de máxima corriente	F42
Relé de máxima corriente	F43

c. Lista de pulsantes e interruptores

Pulsante para bomba de gobernador	S8
Pulsante para bomba del sistema de lubricación de aceite	S39
Pulsante para motor de límite de los alabes	S8
Pulsante para ajuste de velocidad de motor	S12
Pulsante para prueba de lámparas	S15
Pulsante para cierre de válvula	S31
Pulsante para apertura de válvula	S30

En este cubículo además se encuentran ubicados un panel de alarmas A1, y un disyuntor Q4 para apertura y cierre de la alimentación de la barra de 230 para servicios auxiliares de la central.

#### 5.4. VALVULA MARIPOSA

El objetivo de la válvula mariposa es el actuar como elemento de protección y debe tener la posibilidad de efectuar cierres de emergencia y control de fuga, como actividades adicionales permite el mantenimiento y evita desperdicios de agua.

La válvula mariposa está compuesta de 3 partes principales:

- a) El cuerpo de la válvula, que tiene una superficie de sello de acero inoxidable, en la cual realiza contacto la parte móvil.
- b) La lenteja, que es un disco de espesor variable, con un caucho alrededor de todo el perímetro, para proporcionar un cierre hermético.
- c) Un peso el cual sirve para el cierre de la lenteja.

La apertura se la hace por medio de un sistema hidráulico que consiste en un reservorio de aceite a presión, el cual lo consigue por medio de una bomba eléctrica de 0.99 lts/min. de capacidad, 1750 rpm. Para casos de falla de esta bomba y provocar el cierre de la válvula sin que haya presión de aceite en el reservorio se suministra de una bomba manual.

Los datos de diseño de la válvula mariposa son:

Marca: T.H. JANSEN

Clase de fluido: Agua fría no contaminada

Temperatura: 10°C

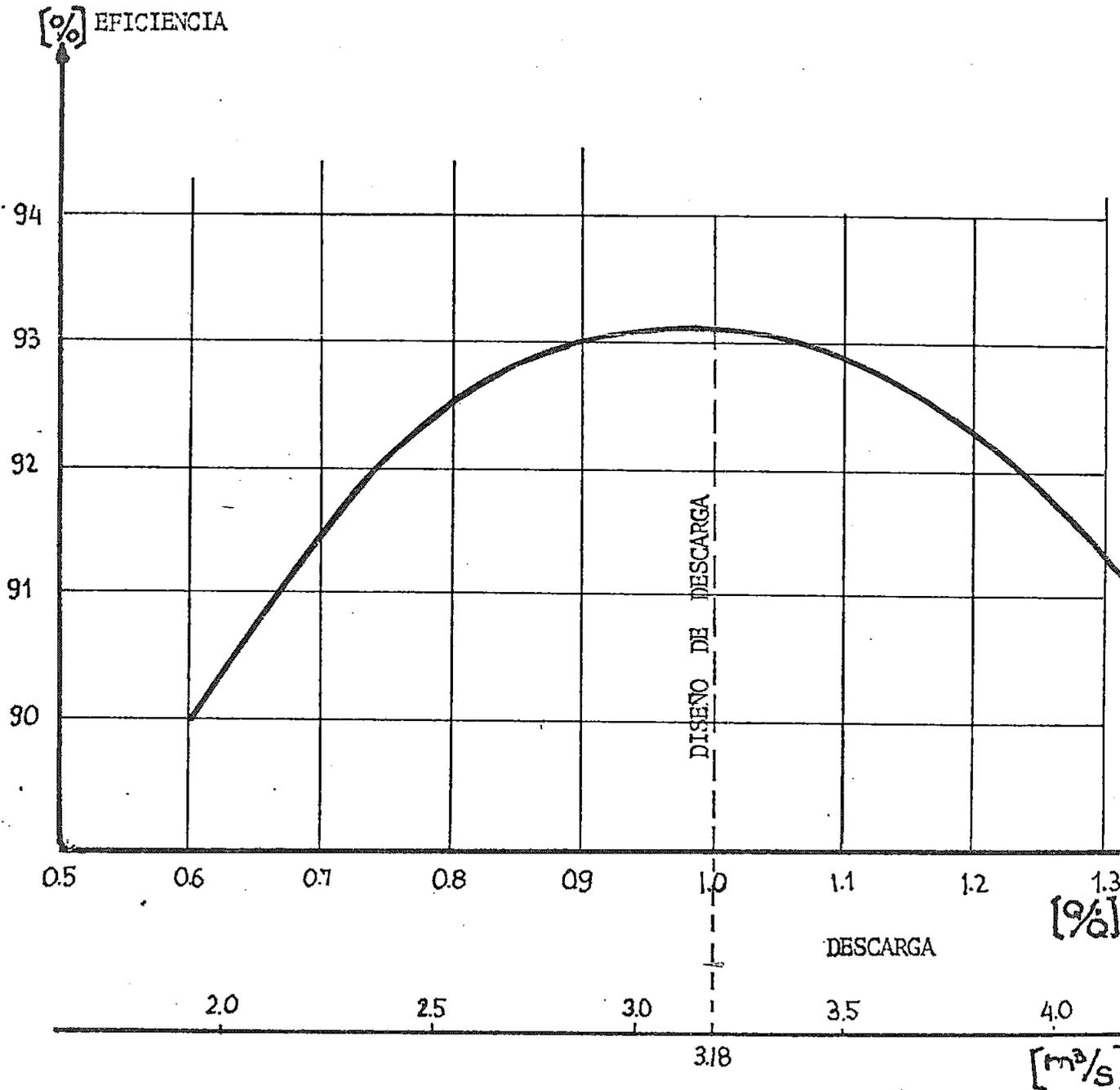
Presión de operación: 136 m WG normal - máx 178 m WG

Caudal: 3,4m<sup>3</sup>/seg

velocidad: 5,35m/seg

Distancia entre borde y borde: 510mm

cojinetes de bronce-teflón autolubricados



TURBINA FRANCIS

P= 4,85 MW

n= 514 r.p.m.

h= 132 m.

GRAFICO 5-1

## 5.5. Control de Velocidad

El control de velocidad de una turbina es un importante y complicado problema, y la magnitud de de es te varía con el tamaño, tipo de la máquina e inst lación, tipo de carga a la que alimenta, y si la má quina está o no conectada a un sistema eléctrico.

La frecuencia está íntimamente ligada con la veloci dad; por lo tanto, al variar la velocidad habrá una variación de la frecuencia.

La regulación de velocidad es hecha por medio de control de la inyección de agua hacia la turbina. Un control adecuado requiere de una suficiente inercia de las partes rotativas, lo cual se adquiere mediante el volante de inercia que se encuentra acoplado al eje de la turbina. Cuando hay un rechazo de carga, la potencia es absorbida, acelerándose el volante, y desalerándose cuando se aplica carga a la máquina. Así pues, es necesario poder regular la velocidad y mantenerla siempre constante a causa de la frecuencia que es forzoso mantenerla fija.

La central en estudio tiene un incremento de velocidad del 18% en caso de un 50% de salida de carga.

La velocidad de respuesta del gobernador debe ser seleccionada cuidadosamente, debido a que un cierre muy rápido puede causar una sobrepresión a la tubería de presión, originándose el golpe de ariete.

Existen diferentes tipos de gobernadores, los cuales varían con la capacidad de trabajo requerido y el grado de sofisticación de la central. Para pequeñas centrales existen gobernadores poco sofisticados para evitar problemas en su mantenimiento y operación, son de acción hidráulica y su función es la de traer a la turbina a una velocidad aproximada a la sincronización para el arranque, para regular la carga luego de haber obtenido la velocidad sincronizada y parar el funcionamiento de la unidad tanto dentro de condiciones normales como en caso de emergencia.

Las unidades deben estar equipadas con llaves mecánicas para el control manual de la velocidad y acumuladores de aire - aceite como fuente de energía independiente.

#### 5.5.1. Funcionamiento

Los elementos sensibles a la velocidad serán accionados por un motor de corriente alterna el cual va conectado a la salida del generador a través del transformador T14. Dichos elementos y los mecanismos de conexión serán lo suficientemente sensitivos y exactos para producir el movimiento correcto de los álabes de la turbina sobre variaciones del 1% de la velocidad de la turbina, la regulación se lo hace generalmente en un rango de más o menos 5%.

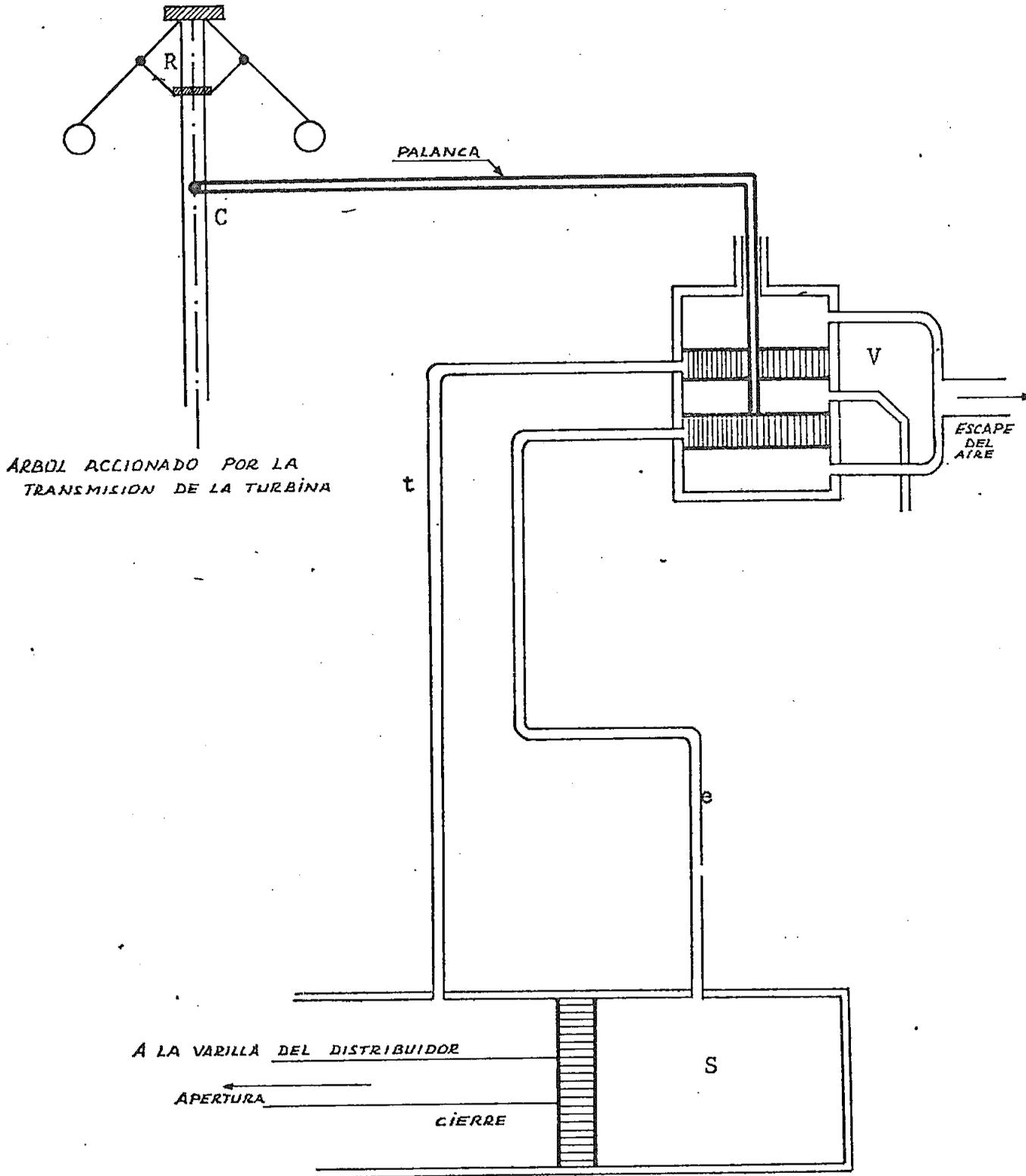
La velocidad de estos elementos varían directamente de acuerdo a la velocidad de la turbina. El accionamiento de los álabes se lo hace por medio de aceite a presión proveniente de la bomba del gobernador, el cual debe

ser capaz de mover las paletas directrices hacia cierre o apertura totales, el recorrido completo es generalmente de 5 segundos bajo condiciones máximas de operación. Sin embargo este tiempo es recomendable ajustarlo entre límites de 5 y 15 segundos.

Un regulador automático de velocidad debe cumplir con las siguientes condiciones: (13)

1. Sincronización de la frecuencia del grupo con la frecuencia de la red a la que tiene que conectarse.
2. Aumentar o disminuir la carga que suministra uno de los grupos conectados a la red de acuerdo a las exigencias del sistema.
3. Poner fuera de servicio al grupo
4. Control para cerrar total o parcialmente la admisión en los siguientes casos.
  - a. Embalamiento del grupo
  - b. Falta de presión en el aceite del regulador
  - c. Exceso de temperatura del eje y cojinetes de la turbina o en operación de cualquier protección automática en conexión con el grupo de turbina generador.

En el diagrama 5-2 , el aparato está en posición normal o sea cuando la velocidad del generador es la normal, impidiendo el pistón de la válvula de distribución V el acceso del aceite al servomotor, y además



ARBOL ACCIONADO POR LA  
TRANSMISION DE LA TURBINA

REGULADOR CENTRIFUGO  
DIAGRAMA 5-2

los embolos de este cilindro distribuidor cierran la turbina t y e.

Al aumentar el número de revoluciones de la turbina las bolas del regulador centrífugo se elevan, sube el collar o magneto C, ascendiendo también el pistón cilindro válvula, dando entrada al aceite por la tubería t, que luego llegará a la cámara izquierda del servomotor y a la derecha se pone en comunicación con el escape de aceite mediante la tubería e, entonces el émbolo se mueve de izquierda a derecha, cerrando el flujo de agua hacia la turbina. -- Cuando disminuye el número de revoluciones por exceso de carga sucede lo inverso.

#### 5.6 PROTECCION CONTRA SOBREVELOCIDAD.

Al producirse una descarga súbita del alternador se produce una sobrevelocidad que no puede ser controlada por su regulador, por consiguiente la máquina debe ser equipada con relés de velocidad que disparen el disyuntor del generador, pare la turbina y anuncie dicho accionamiento.

Para esto lo detecta el relé de máxima velocidad F1 y el contacto B1 del tacómetro P2 (diagrama 5-3), los cuales accionan al contactor K16 el mismo que a la vez acciona la alarma No. 16 SOBREVELOCIDAD, Además se energizan los contactores K21 y k22 y sigue la secuencia de operación descrita en el capítulo 4, apartado 4. El relé de sobrevelocidad acciona con el 145% de la velocidad nominal de la turbina, o sea a las 870 RPM.

principales K21 y K22 y sigue la secuencia de operación descrita en el capítulo 4 apartado 4.

#### 5.8. FALLA EN LA BOMBA DEL GOBERNADOR

El gobernador está provisto de una unidad de bombeo que consiste, en una bomba, una válvula de seguridad, un tanque de aceite y un acumulador de presión. La válvula de seguridad, se utiliza para mantener presiones al nivel requerido en el tanque de aceite para operar el sistema del amplificador de potencia. En caso de falla de la bomba debido a pérdida de potencia, un pistón de precarga tipo acumulador, para operación manual podrá suministrar el aceite a la presión necesaria para permitir el disparo de la unidad.

Para la protección de una posible falla en la bomba del gobernador se ha previsto de dos contactos; el 71Q de nivel de aceite y el 80Q de flujo de aceite (diagrama 5-5) En caso de apertura de alguno de estos contactos desenergiza al contador K2H el mismo que al cerrar sus contactos accionará al contactor K17 (diagrama IV-5) el cual accionará los contactores principales K21 y K22 y también en la alarma No 16 FALLA EN LA BOMBA DEL GOBERNADOR y la secuencia de operación seguira tal como fue descrita en el capítulo 4, apartado 4.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La nueva unidad generadora para la central de Papallacta es la solución necesaria para la HCJB, pues con ella se logrará dar la máxima continuidad de servicio a los transmisores de esta emisora cuya carga es considerada como clase crítica. También se lograrán los propósitos de adoptar los recursos hidráulicos a los consumos de todo este sector, ya que parte de la potencia generada será suministrada a la EEQSA para este objetivo, por lo que la central hidráulica de Papallacta significa además un aporte para la electrificación rural del país.

Para una buena operación de la central se debe capacitar a personal de esta región que tenga conocimientos básicos de mecánica y electricidad, de tal forma que tengal la capacidad de hacer el debido mantenimiento de la central y además resolver problemas o fallas leves que se presenten durante el funcionamiento.

La protección de la central esta de acuerdo a las recomendaciones dadas por la compañía Brown Boveri escogiendo la protección dada en el cuadro 4-1 para generadores de 4 MVA, de acuerdo a esto, no se exige protección de secuencia negativa, pero - para dar mayor seguridad a la central se ha dejado previsto este tipo de protección.

La forma compacta del grupo turbina-generador, y el alto grado de automatización de la central, lo hacen ideal para operación a control remoto.

La parte más delicada de la central es el sistema de 24 VCD, ya que en caso de cualquier falla para automáticamente la central, el caso más crítico de falla de este sistema es el de un cortocircuito en las barras P-N, ya que desconectaría todo este sistema. Para evitar esto se podría utilizar otro banco de baterías al cual se lo conectaría parte del sistema de 24VCD y además se lo puede conectar el equipo de radio y comunicación de la central.

Para que el operador de la central se percate de lo que sucede en el reservorio, se deberá instalar además una protección contra rejillas tapadas, lo cual consiste en una diferencial de presión colo-

cado entre uno y otro lado de la rejilla, como com  
plemento a esto se podría instalar un tipo de reji  
lla giratoria a base de cadenas, para poder hacer  
una fácil limpieza.

Las partes constitutivas de la turbina sufren daños  
y desgastes por operación debido principalmente a  
la cantidad de material extraño que llega a la mis  
ma. Este problema se puede disminuir dando aten --  
ción a metodos y obras que deberán realizarse en  
la toma para rebajar el material de arrastre.

En conclusión, la parte clave en la operación de  
la central tanto para caso de falla como para el  
mando de los contactores K21, K22, K23, K24 ya que a  
estos están conectados todos los relés de protec-  
ción. Al ser accionados con contactores K21 y K22  
el paro de la unidad, es dado en un cierto tiempo,  
o sea se suceden un paro normal, en caso de un fa-  
llo muy emergente, se accionan los contactores K23  
y K24 produciendo un paro instantáneo de la unidad.

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

1. DENALD J. GUILD/ ROBERTO E. IÑIGUEZ: "Generación Hidroeléctrica" Conferencias sobre pequeñas centrales hidráulicas ( Tudor Engineering Company-Sn. Francisco, California)
2. OLADE: "El desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en Latinoamérica y el Caribe"
3. NEBB A/S NORSK ELECTRISK & BRONN BOVERI: "Turbine Generator for Mini Hidropower Plants"
4. NEBB A/S NORSK ELEKTRISK & BRONN BOVERI: "Switch-gear And Control Sistem for Mini Hidropower Plants"
5. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. Tesis de grado, "Remodelación de la Central Hidroeléctrica Guangopolo". 1.979.
6. NEBB A/S NORSK ELEKTRISK & BRONN BOVERI: "Thiristor Voltage Regulator, SF7, For Brushless AC-Generators"
7. JHON J. CASSIDI: "Design, Operation, and Maintenance for Small Hidropower Facilities". State of Washington Water Research Center.
8. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL: Tesis de Grado, "Procedimientos de Control y Operación de Una Unidad Generadora, Operada con Turbina a Gas, Tipo Industrial en la EEQSA. 1979.

9. BROWN BOVERI & COMPANY LTD. "The Selection of Generation Protection Systems.
10. JOSE RAMIREZ VASQUEZ: "Proteccion de Sistemas Eléctricos Contra Sobreintensidades" Ediciones CEAC S.A., Barcelona 1979.
11. THE GENERAL ELECTRIC COMPANY LIMITED OF ENGLAND (GEC MEASUREMENTS) "Protection Relays Application Guide" Edición 1.975
12. ESCUELA POLITECNICA NACIONAL Tesis de Grado "Central Hidroeléctrica MICA" Raúl Oswaldo Cobillo Eguez - 1969
13. ESCUELA POLITECNICA NACIONAL: Tesis de Grado "Protección de la Central Sn. Miguelito, Proyecto Pisayambo " 1971.
14. INECEL: "Manual de Operación de la Central Hidroeléctrica Pisayambo.
15. WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION: Applied Protective Relaying" Newark, New Jersey USA 1976
16. WOODWARD GOVERNOR COMPANY: "Instruction Book World Radio Missionary Fellowship Papallacta Project Ecuador"
17. BROWN BOVERI & COMPANY LTD. "Boletines Descriptivos Actualizados de Relés de Protección."