



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

CURSOS INSTITUCIONALES

SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Del 03 al 26 de Octubre de 2006

APUNTES GENERALES

CI - 215

Instructor: Ing. Alfredo Nava Rodríguez
Instituto de Educación Media Superior
Octubre de 2006

SUBESTACIÓN

GENERALIDADES

Las características iniciales de donde debemos partir para una instalación son.

- 1.- Diagrama de conexiones adoptado .
- 2 - Tensión nominal.
- 3 - Intensidad de corriente máxima de que puede pasar por las instalaciones en condiciones normales de operación (corriente nominal)

1.- Diagrama de Conexiones.

En su caso está considerado de la siguiente forma.

DIAGRAMA S-1

2.- Tensión nominal.

- 1.- Las tensiones nominales consideradas en las subestación son:

Acometida de L y F 85 KV.

Voltaje de distribución 20 KV.

Voltajes de consumo 440 , 220 , 127 V.

- 2 - Considerar el voltaje del nivel de aislamiento.

Esto se hace con la finalidad de saber que las instalaciones están aisladas al nivel tal que al tener en estas la caída de un rayo o haber una sobre tensión en las instalaciones estas soporten dicho fenómeno , sin tener ningún deterioro.

3.- Corriente máxima.

- 1.- Es el valor máximo de corriente posible a demandar (Suma de los valores máximos de potencia de los bancos instalados).

Si este valor lo comparamos con el del aislamiento de las piezas que se encuentran en el interior de los aparatos todavía es superior lo que nos asegura un buen nivel de aislamiento o como se llama técnicamente la coordinación de aislamientos es buena

Ahora efectuemos el mismo trabajo para el aislamiento de 23 KV.

AYUDEMOS CON LA TABLA A-4 QUE NOS DA EL VALOR DE 23 KV
125 / 0.87 NO DA 144 KV QUE DESPUES COMPRAREMOS CON 150 KV QUE ES VALOR QUE NORMALMENTE USA
L Y F

DISTANCIA DE SEGURIDAD

El siguiente análisis de las distancias de seguridad en una subestación de alta tensión está basado en las conclusiones del Comité de Estudios # 23 de la Comisión Electrotecnia Internacional

Desde el punto de vista de la Seguridad del personal de Operación y Mantenimiento de una subestación , pueden hacerse las siguientes consideraciones .

1° .- Las partes con potencial (partes vivas) deben quedar fuera del alcance del personal , para lo cual puede recurrirse a los siguientes procedimientos :

A) .- Puede usarse el equipo auto-protégido , en el que las partes vivas quedan encerradas en cubiertas , concebidas de manera que , en servicio normal se impida cualquier acceso a dichas partes vivas .

B) .- Las partes con potencial pueden hacerse inaccesibles mediante barreras ó cercas que impidan acercarse a distancias peligrosas de las partes vivas .

TENSIÓN					
Valor del Sistema KV.	Máxima para equipo KV.	Nivel de aislamiento al Impulso		Nivel de aislamiento a Baja Frecuencia	
		Pleno de cresta KV.	Reducido cresta KV	Aislamiento pleno KV	Aislamiento reducido KV
69	72.5				
	100	450	380	185	150
115	123	550	450	230	185
138	145	650	550	275	230
161	170	750	650	325	275
230	245	1050	900	460	395
287	300		1175		510
345	362		1300		570
400	420		1675		740
500	525		1800		790
700 a 750	765				

Publicación de CEI

tabla A-1

Distancia mínima de no flameo			
Ten máxima entre fases sistema KV	Niv de aisla- miento impulso KV	Distancia mínima a tierra a menos de 1000 m en cm	Distancia mínima a tierra a menos de 2300 m en cm
3 6	45	6	7 0
7 2	60	9	10 5
12 0	75	12	14 0
17 5	95	16	18 6
24 0	125	22	25 6
36 0	170	32	37 2
52 0	250	48	55 8
72 5	325	63	73 3
100 0	380	75	87 2
100 0-123 0	450	92	107 0
123 0-145 0	550	115	133 7
145 0-170 0	650	130	160 5
170 0	750	162	188 4
245.0	825	180	209 3
245.0	900	196	227 9
245.0-300 0	1050	230	267 4
420 0	1425	305	354 6

Seguridad							
Tensión nominal del sistema KV	Distancia mínima a tierra a 2300 m en m.	Zona de trabajo del personal					
		Distancia adicional en m.	Altura mínima de partes vivas m.	Distancia adicional m.	Distancia mínima horizontal m.	Distancia adicional m	Distancia mínima vertical m.
23	125	0 282	2 25	1 75	3 00	1 25	3 00
85	450	1 177	2 25	1 75	3 43	1 25	3 00
230	900	2 507	2 25	1 75	4 76	1 25	3 76
400	1425	3 759	2 25	1 75	6 01	1 25	5 01

tabla A-5

Protección contra las sobretensiones.

La práctica actual en el diseño de subestaciones de alta tensión es proteger las instalaciones tanto de las sobretensiones de origen externo, debidas a rayos, como de las sobretensiones de origen interno, debidas a la apertura o cierre de interruptores, de manera que estas sobretensiones no alcancen valores que excedan el nivel de aislamiento adoptado.

La protección contra sobretensiones comprende los siguientes aspectos .

A).- Protección de los transformadores de potencia mediante pararrayos, colocados lo más cerca posible de los transformadores y cuyas características de protección deben seleccionarse de acuerdo con las condiciones específicas de cada sistema y coordinarse con las características de aislamiento de los transformadores.

Estos pararrayos proporcionan también una protección contra las sobretensiones a la zona de las barras colectoras y del equipo terminal de las líneas, pero debido a la distancia entre los pararrayos y ese equipo y a los fenómenos asociados con la propagación y reflexión de las ondas de tensión, el equipo más alejados de los pararrayos puede quedar sometido a sobretensiones más altas que las que se alcanzan en el lugar donde están instalados los pararrayos.

B).- Protección contra las descargas directas de rayos, prolongando los cables de guarda de las líneas de transmisión sobre las instalaciones de la subestación o, en los casos en que ésto no sea posible, rematando dichos cables de guarda en las estructuras de entrada y prolongando las estructuras de la subestación con mástiles metálicos, de altura suficiente para conseguir una protección eficaz.

C).- Protección contra las sobretensiones incidentes por las líneas de transmisión que llegan a la subestación, mediante explosores colocados a la llegada de cada línea. Cuando se produce el flameo o cebado de un explosor, producido por una sobretensión transitoria, la protección automática de la línea abre el interruptor correspondiente, para interrumpir la corriente consecutiva de frecuencia fundamental.

Este tipo de protección contra ondas incidentes mediante explosores, se utiliza mucho en Europa asociada con la operación monofásica de los interruptores (o sea que sólo abre el polo del interruptor correspondiente a la fase afectada por la falla) y al recierre automático después de un tiempo suficiente para permitir la deionización del aire en la zona donde se produjo el arco. En nuestro sistema no se ha utilizado, hasta ahora, este tipo de protección.

los interruptores neumáticos, donde la energía utilizada para la interrupción es independiente de la intensidad del arco; en los interruptores en aceite, en cambio, es necesario disponer de dispositivos especiales en las cámaras del interruptor para obtener una deionización por eficaz del medio entre los contactos en el caso de corrientes de poca intensidad, que permitan su interrupción al primero paso por cero; en los interruptores de pequeño volumen de aceite para 85 KV que existen normalmente en el mercado, y esto se logra mediante la inyección de aceite transversalmente a la trayectoria del arco.

En el segundo caso, o sea, en la interrupción de débiles corrientes inductivas (por ejemplo, la corriente de excitación de un transformador), cuya magnitud es una fracción muy pequeña de la capacidad interruptiva de interruptor, el arco eléctrico que aparece entre los contactos puede ser interrumpido antes del paso por cero de la corriente.

En el caso de los interruptores en aceite, en los que la energía que se emplea para lograr la interrupción del arco es suministrada por él mismo, y por lo tanto, proporciona a la magnitud de éste, la interrupción de las pequeñas corrientes inductivas ocurre a un valor próximo a cero y no da lugar a sobretensiones de importancia.

En las especificaciones que se utilizan para la adquisición de los interruptores para nuestro sistema de 85 KV se establece que en ningún caso debe producir la apertura de un interruptor una sobretensión mayor de 2.5 veces la tensión nominal.

Por lo que respecta a la tercera causa de sobretensiones o sea, el recierre automático de interruptores, pueden tomarse las siguientes medidas para limitar su magnitud:

En primer lugar, debe existir un medio para descargar rápidamente a tierra la carga eléctrica de la línea. Esto se logra cuando se utilizan reactancias para compensar la capacitancia de la línea, conectadas en estrella con el neutro conectado a tierra. Por esta misma razón es actualmente una práctica generalizada el utilizar transformadores de potencial del tipo inductivo, en lugar de divisores capacitivos de potencial o, como solemos llamarles, dispositivos de potencial, conectados en estrella con neutro a tierra, en la entrada de cada línea a la subestación.

En segundo lugar puede utilizarse resistencias, asociadas al interruptor, que se intercalan momentáneamente en el circuito durante el recierre de los interruptores.

E).- Como último aspecto de la protección contra las sobretensiones, debe disponerse en cada subestación una red de tierra, a la que se conectan los neutros de los aparatos, los pararrayos, los cables de guarda, las estructuras metálicas, los tanques de los aparatos y todas aquéllas otras partes metálicas que deben estar a potencial de tierra.

Los pararrayos de un porcentaje menor que 100% son aplicables en sistemas con el neutro conectado directamente a tierra y el valor nominal depende de la relación de las impedancias, según se observa en la gráfica P 1.

De esta manera, Si $X_0 / X_1 = 3$ y $R_0 / X_1 = 1$, el punto está comprendido dentro de la curva marcada con 80 y por lo tanto puede aplicarse un pararrayos del 80%.

Un punto importante a considerar en la selección de los pararrayos es que si por un lado se busca instalar pararrayos de un porcentaje bajo (75 u 80%) con lo cual, - en una subestación grande se ahorran varios miles de pesos, sin embargo se está expuesto a que haya operaciones con más frecuencia y por lo tanto más posibilidades de fallas. Por otro lado, si por evitar el fenómeno anterior, se selecciona un pararrayos con una tensión nominal mayor que la adecuada por ejemplo pararrayos del 110% en un sistema efectivamente conectado a tierra, pueden evitarse las operaciones frecuentes, pero lo más probable es que no se obtenga una protección adecuada, ya que las tensiones de operación del pararrayos estarían muy próximas a los niveles de aislamiento de los equipos por proteger y por tanto se tendría un margen de protección muy pequeño.

De acuerdo con lo anterior, es recomendable que para sistemas con neutro efectivamente conectado a tierra, la tensión nominal del pararrayos sea de un 5 o 10% mayor que la obtenida en la gráfica P 1 y para sistemas con el neutro aislado se empleen los pararrayos del 100 o 105%.

Otro punto importante a considerar es la tensión de operación del pararrayos por sobretensiones debidas a la operación de interruptores, ya que en este caso se deben coordinar el nivel de aislamiento por operación de interruptores de los equipos por proteger (0.83 del nivel de aislamiento al impulso, según normas ANSI), la sobretensión máxima originada por la operación de interruptores y el valor de operación del pararrayos por sobretensiones de este tipo.

La coordinación de los tres valores antes señalados debe hacerse de tal manera que la tensión de operación del pararrayos para este tipo de sobretensiones debe ser aproximadamente un 10% mayor que el valor de sobretensión originada por la operación de interruptores y menor que el nivel de aislamiento por operación de interruptores del equipo por proteger.

c).- para $L = 60 \text{ m.}$; $E_x = 600 + 2 \times 1000 \times 60 \text{ KV}$

d).- para $L = 90 \text{ M.}$; $E = 600 + 2 \times 1000 \times 90 = 1200 \text{ KV}$

Se puede deducir fácilmente que si se desea proteger un transformador de potencia que tenga un BIL de 450 KV y para tener un margen de protección consideramos que la tensión admisible en dicho transformador sea de 800 KV, los pararrayos deberán instalarse a una distancia máxima de 30 m., considerando el caso mostrado .

Para determinar la separación máxima entre el transformador y los pararrayos, partiendo de la tensión máxima admisible en dicho transformador, podemos emplear la fórmula siguiente:

$$L = \frac{300 (E_m - E_o)}{2 \frac{d \dots e}{dt}} \quad (2)$$

L = Separación máxima en metros.

E_m = Tensión máxima permisible en el equipo por proteger.

E_o = Tensión de operación del pararrayos.

$\frac{d \dots e}{dt}$ = Pendiente del frente de la onda incidente en KV/Micro-seg.

Ejemplo:

Cuál será la separación máxima entre un transformador y los pararrayos, considerando que la tensión máxima a la que debe ser sometido el transformador es de 700 KV, se tienen pararrayos que operan a 600 KV (para la onda de impulso) y se tiene una onda incidente de 1000 Kv/micro-seg.

Solución:

De la fórmula (2) tenemos:

$$L = \frac{300 (E_m - E_o)}{2 \frac{d \dots e}{dt}} = \frac{300 (700 - 600)}{2 \times 1000} = 15 \text{ m.}$$

mf = 0.85 para un cable con 6 hilos en la capa exterior.

mf = 0.9 para un cable con 12 a 30 hilos en la capa exterior.

ms = coeficiente de superficie.

ms = 0.9 para cables limpios o envejecidos.

ms = 0.8 para cables nuevos.

ms = 0.7 para cables sucios o engrasados.

ms = 0.5 para cables recubiertos de gotas de agua.

ρ = factor de densidad del aire.

$$\rho = \frac{3.92 b}{273 + t} \quad (4)$$

b = presión barométrica en cm de columna de mercurio.

T = temperatura ambiente en cm.

r = radio del conductor en cm.

n = número de conductores por fase

R = radio del círculo sobre el que están colocados los n conductores.

$$DMG = \sqrt[3]{d_{ab} \times d_{ac} \times d_{bc}}$$

$$RMG = \sqrt[n]{nr R^{n-1}}$$

d_{ab} = distancia entre centros de fases a y b

d_{ac} = " " " " " a y c

d_{bc} = " " " " " b y c

$$RMG = \sqrt[3]{h_a \times h_b \times h_c}$$

h_a = altura media de la fase a

h_b = altura media de la fase b

h_c = altura media de la fase c

- a).- Intensidad de corriente máxima que puede circular por las distintas partes conductoras de la instalación en las condiciones de operación más desfavorables.
- b).- Valor máximo de la corriente de cortocircuito.

1.- Intensidad de corriente máxima en las condiciones más desfavorables de operación.

Las corrientes máximas de operación determinan la sección de las barras colectoras y de los conductores de conexión y las características de conducción de corriente de las cuchillas desconectadoras, Interruptores y otros equipos eléctricos.

2.- Valor máximo de la corriente de cortocircuito.

El valor máximo de la corriente de corto-circuito determina los esfuerzos electrodinámicos máximos a los que podrán estar sometidas las barras colectoras y los tramos de conductores de conexión y es también un parámetro importante en el diseño de la red de tierra.

Ambos valores de corriente, pero especialmente la de cortocircuito, pueden aumentar a medida que se desarrolla el sistema eléctrico. Por lo tanto es conveniente diseñar las instalaciones tomando en cuenta los valores de corriente que pueden alcanzarse en la etapa final del desarrollo de la red.

ACCESORIOS DE LAS BARRAS COLECTORAS.

Son todos aquellos elementos que nos sirven para unir elementos conductores, fijarlos a los aisladores y absorber los esfuerzos mecánicos de los diferentes tipos que existen en instalaciones de barras conductoras.

1.- TIPOS.

Los tipos de accesorios más usados en la instalación de barras son los siguientes para instalación de tubo:

- a).- Conectores. - Sirven para conectar los diferentes tramos de tubos que forman una barra, entre el juego de barras y las derivaciones a los aparatos. Los

- 6.- **Baja resistencia de contacto, lo que se logra aumentando el número de puntos de contacto, cosa que se obtiene al aumentar la presión de contacto sobre materiales relativamente maleables**

Para conectores de presión atornillados, además de los requisitos anteriores, se necesita que:

- a).- **Los pernos estén lo más próximo posible a los conductores.**
- b).- **Los pernos estén en pares opuestos para obtener un apriete máximo.**
- c).- **El diámetro y número de pernos necesarios sean diseñados para producir el apriete deseado.**
- d).- **Siempre deben ser los pernos instalados con tuerca, contra tierra y, si es posible, rondana de presión y 2 rondanas planas, una de cada lado del perno.**

MATERIALES

Las características de un buen material para conectores, deben ser las siguientes:

- a).- **Alta conductividad.**
- b).- **Superficie maleable.**
- c).- **Ductilidad, que permita un contacto envolvente alrededor del conductor.**

Los materiales más utilizados son el cobre y el aluminio, utilizándolos en diferentes aleaciones cuyas características principales son las siguientes:

- 1).- **Aleaciones con alto contenido de cobre.**
Se usan para muy altas corrientes y pueden llevar hasta el doble de corriente de la normal del conductor que une.
- 2).- **Aleación de alta resistencia mecánica pero de baja conductividad eléctrica. Se usan para sujetar el conductor al aislador.**

- a).- **Aisladores tipo alfiler.** Cada elemento de este tipo de aislador está formado por una serie de aisladores concéntricos formando un conjunto que refuerza la distancia de flameo.

Su principal ventaja es que evita que entre sus pliegues penetre la contaminación.

Su desventaja es lo difícil de su limpieza.

Este tipo de aislador se usa solo, o en columna, sobreponiendo uno sobre otro hasta alcanzar el nivel de aislamiento deseado.

- b).- **Aisladores tipo columna.**

Este tipo de aislador está formado de una sola pieza de mayor longitud que el tipo anterior.

Actúa como una columna mecánica.

Sus principales ventajas son:

- a).- Alta resistencia mecánica.
- b).- Alta rigidez.
- c).- Mayor estabilidad.
- d).- Ofrece una superficie mayor a la atmósfera contaminante.
- e).- Aunque se contamina más, es más fácil de limpiar ya sea por lluvia o por algún medio artificial.

También se usan solos o ensamblados uno sobre otro.

1.2.- CADENAS DE AISLADORES.

Se usan para soportar barras de cable. La selección del aislador adecuado, se hace de acuerdo con los esfuerzos mecánicos a que se van a sujetar.

Se usan enlazando un aislador con otro formando una cadena hasta obtener el nivel de aislamiento deseado.

El número de piezas ensambladas una sobre otra para los diferentes niveles de voltaje adoptados en las subestaciones para las condiciones de altura sobre el nivel del mar de 2,300 m (Cd. de México), son las siguientes:

TIPO ALFILER: VOLTAJE	NIVEL DE AISLAMIENTO AL IMPULSO KV	NUMERO DE PIEZAS
23 KV	150	1
85 KV	550	3
230 KV	1300	7
400 KV	1800	10
TIPO COLUMNA: VOLTAJE	NIVEL DE AISLAMIENTO AL IMPULSO KV	NUMERO DE PIEZAS
85 KV	550	1
230 KV	1175	3
400 KV	1675	5

Las barras de tubo deben quedar selladas en sus extremos con tapones para evitar la acumulación de agua, la cual ocasiona un aumento en el peso del tubo y por tanto en la deflexión.

Estos tapones deben tener forma esférica, para reducir las pérdidas por efecto corona.

Aunque el módulo de elasticidad del aluminio es aproximadamente $\frac{2}{3}$ del valor del módulo de elasticidad del cobre, los tubos de aluminio tienen menor deflexión debido a que el peso, para igual volumen, es de $\frac{1}{3}$ del de cobre. Pero en caso de acumular hielo, a mayor espesor de éste, el tubo de aluminio se deflexiona más que el de cobre.

Además, cuando se tienden uno o varios tramos horizontales de tubo se requiere instalar algún elemento (tramo de cable del mismo material) que no permita el galopeo.

CARGAS DINAMICAS.

Hay otros esfuerzos en las barras que pueden causar ruptura de los aisladores. Estos esfuerzos son de tipo mecánico a saber:

- a).- Impactos debido a la operación de interruptores.**
- b).- Esfuerzos mecánicos debido a tormentas o huracanes.**
- c).- Esfuerzos diferenciales debido a asentamientos de las cimentaciones del equipo pesado.**

Debido a lo anterior el diseño de las barras colectoras debe hacerse en tal forma que los esfuerzos no se transfieran a los aisladores soporte o a las boquillas de porcelana del equipo pesado. Para esto, los esfuerzos deben ser absorbidos por juntas de expansión y apoyos deslizantes.

ESFUERZOS ELECTROMAGNETICOS.

Estos esfuerzos son producidos por las corrientes de circuito corto en el sistema que se trate. Un conductor debe tener suficiente resistencia mecánica para soportar también los circuitos cortos que producen una interacción entre la corriente de circuito corto y su campo magnético produciendo fuerzas que son proporcionales al cuadrado de la corriente de circuito corto e inversamente proporcional a la separación entre fases.

FACTORES SECUNDARIOS EN EL DISEÑO DE LAS BARRAS COLECTORAS.

Existen varios factores inherentes a la forma y condiciones de las barras mismas que no dependen de las condiciones externas y que son importantes para determinar la capacidad de corriente que pueden llevar un grupo de barras colectoras. Entre estos factores se encuentran los siguientes:

- 1).- Efecto corona.**
- 2).- Radio interferencia.**
- 3).- Efecto superficial.**
- 4).- Efecto de proximidad.**
- 5).- Emisividad térmica.**



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISION DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS INSTITUCIONALES

SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Del 03 al 26 de Octubre de 2006

APUNTES GENERALES
—PRUEBAS A TRANSFORMADORES—

CI - 215

Instructor: Ing. Alfredo Nava Rodríguez

Instituto de Educación Media Superior

Octubre de 2006

PRUEBAS A TRANSFORMADORES

1 INTRODUCCION

Las pruebas se hacen en los transformadores y sus accesorios por distintas razones, durante su fabricación, para verificar la condición de sus componentes, durante la entrega, durante su operación como parte del mantenimiento, después de su reparación, etc

Algunas de las pruebas que se hacen en los transformadores se consideran como básicas y algunas otras varían de acuerdo a la condición individual de los transformadores y pueden cambiar de acuerdo al tipo de transformador, por lo que existen distintas formas de clasificación de las pruebas a transformadores, por ejemplo algunos las clasifican en pruebas de baja tensión y pruebas de alta tensión, también se pueden agrupar como pruebas preliminares, intermedias, de verificación (finales) y mantenimiento

Las *pruebas preliminares* se realizan cuando un transformador se ha puesto fuera de servicio para mantenimiento programado o para revisión programada o bien ha tenido alguna falla, las pruebas se realizan antes de "abrir" el transformador y tienen el propósito general de encontrar el tipo y naturaleza de la falla. Las llamadas pruebas preliminares incluyen

- 1) Prueba al aceite del transformado.
- 2) Medición de la resistencia de aislamiento de los devanados
- 3) Medición de la resistencia ohmica de los devanados
- 4) Determinación de las características del aislamiento

Las llamadas pruebas intermedias, como su nombre lo indican, se realizan durante el transcurso de una reparación o bien en las etapas intermedias de la fabricación, cuando el transformador esta en proceso de armado o bien desarmado (según sea el caso) y el tipo de pruebas depende del propósito de la reparación o la etapa de fabricación, por lo general se hacen cuando las bobinas no han sido montadas o desmontadas (según sea el caso) y son principalmente las siguientes

- 1 Medición de la resistencia de aislamiento de tornillos y herrajes contra el núcleo.
- 2 Prueba de la resistencia de aislamiento de tornillos y herrajes por voltaje aplicado
- 3 Prueba de las boquillas por medio de voltaje aplicado

Cuando se han desmontado las bobinas durante un trabajo de reparación, entonces las pruebas se incrementan,

Las pruebas finales se hacen sobre transformadores terminados de fabricación o armados totalmente después de una reparación e incluyen las siguientes:

- 1 Prueba al aceite del transformador.

Esta prueba se hace en un probador especial denominado "probador de rigidez dielectrica del aceite" En este caso, la muestra de aceite también se toma de la parte inferior del transformador, por medio de la llamada valvula de drenaje y se vacía en un recipiente denominado "copa estándar" que puede ser de porcelana o de vidrio y que tiene una capacidad del orden de 1/2 litro El aceite se toma en un recipiente de vidrio o de plastico y después se vacía a la copa estándar que tiene dos electrodos que pueden ser planos o esféricos y cuyo diámetro y separación está normalizado de acuerdo al tipo de prueba, el voltaje aplicado entre electrodos se hace por medio de un transformador regulador integrado al propio aparato probador después de llenada la copa estandar se debe esperar al rededor de 20 minutos para permitir que se eliminen las burbujas de aire del aceite antes de aplicar el voltaje, el voltaje se aplica energizando el aparato por medio de un switch que previamente se ha conectado a un contacto o fuente de alimentación común y corriente el voltaje se eleva gradualmente por medio de la perilla o manija del regulador de voltaje, la tension o voltaje de ruptura se mide por medio de un voltmetro graduado en kilovolts

Existen de acuerdo a distintos criterios de prueba, pero en general se puede afirmar que se pueden aplicar seis rupturas dieléctricas con intervalos de 10 minutos la primero no se toma en cuenta, y el promedio de las otras cinco se toma como la tension de ruptura o rigidez dielectrica normalmente la rigidez dieléctrica en los aceites aislantes se debe comportar en la forma siguiente

Aceites degradados y contaminados	de 10 a 28 kV
Aceites carbonizados no degradados	de 28 a 33 kV
Aceite nuevo sin desgasificar	de 33 a 40 kV
Aceite nuevo desgasificado	de 40 a 50 kV
Aceite regenerado	de 50 a 60 kV

Los valores anteriores se refieren a normas de pruebas de acuerdo a los electrodos si se usan electrodos de 25 4mm de diámetro con una separación de 2.54 mm la tensión de ruptura debe ser cuando menos 25 kV en aceites usados y 35 kV en aceites nuevos

Cuando se usan electrodos de discos semiesféricos con separación de 1 016 mm la tensión de ruptura mínima en aceites usados es de 20 kV y de 30 kV mínimo en aceites nuevos

2 2 PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA DEL ACEITE

Esta prueba permite obtener información relacionada con la contaminación o deterioro del aceite El concepto de factor de potencia es el mismo empleado para los circuitos eléctricos en general, es decir es el coseno del ángulo formado entre la potencia aparente expresada en kVA y la potencia real expresada en kW esto da la medición de la corriente de fuga a través del aceite, la cual a su vez se interpreta como una medición de contaminación o deterioro del aceite.

Cuando las características del aceite no cumplan con las especificaciones de normas, entonces es necesario que se sometan a procesos de rehabilitación, para tratar de obtener las características deseadas

2 4 1 LIMPIEZA DE MEZCLA E IMPUREZAS MECÁNICAS EN LOS ACEITES

Separación por centrifugado

Existen básicamente dos métodos para remover mezclas e impurezas en los aceites de transformadores, estos métodos son: separación por centrifugado y por filtrado

Por el método de centrifugado se limpia el aceite de agua e impurezas, agitándolo a alta velocidad en un aparato denominado centrifugadora de aceite o purificador. Este aparato consiste principalmente de un tambor purificador o separador (1) que en su interior tiene un cierto número de placas en forma de conos con perforaciones, las placas se colocan en forma de paquetes, una junto a otra en paralelo sobre un eje común (la separación es del orden de milímetros o fracciones de milímetros). El propósito de las placas es separar el aceite de manera que se intensifique la purificación.

El aceite entra al separador a través de un ingreso central. El aceite a ser purificado se bombea al interior del separador y se extrae por medio de dos bombas (2). Las impurezas se remueven del aceite en forma intensiva a una temperatura de 50°C a 55°C, el separador de aceite está equipado con un calentador eléctrico (4). Se tiene un filtro metálico de malla muy fina (5) que está conectado en la tubería de entrada del aceite y sirve para capturar partículas y prevenir su entrada al aparato. El tambor separador está accionado por un motor eléctrico (3) por medio de bandas o engranes, por ejemplo, si el tambor se acciona a 6800 r.p.m., se entregará del orden de 1500 litros por hora.

Si el aceite contiene demasiadas impurezas el purificador del aceite se reajusta para separar el agua en forma preliminar, se hace esto regulando las placas del tambor separador. Si el contenido de impurezas no es muy alto, el aparato se debe ajustar normalmente, es decir, para separar simultáneamente el agua y las partículas en suspensión.

Filtro

Por medio de este método, el aceite se limpia forzándolo a circular a través de un medio poroso con un elevado número de pequeñas perforaciones en las cuales se atrapan el agua en suspensión y las impurezas, tal medio puede ser cartón prensado o tela.

El aparato para filtrar el aceite se le conoce como "filtro-prensa" y consiste de un conjunto de marcos metálicos y placas con papel filtro colocado entre ellos, los marcos y placas se colocan en forma alternada, al grupo total de placas y marcos se le sujeta por medio de dos placas y un tornillo sinfín de ajuste.

Los marcos, placas y filtros de papel tienen cada uno dos agujeros en las esquinas inferiores, uno sirve para el ingreso del aceite que va a ser limpiado y el otro para la salida del

aceite limpio El aceite a limpiar se bombea al "filtro prensa a una presión de 4 a 6 x 10⁵ PA y un incremento en la presión durante el proceso de filtrado, indica que los filtros (papel filtro) deben ser reemplazados

3 PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

La prueba de resistencia de aislamiento en transformadores sirve no solo para verificar la calidad del aislamiento en transformadores, también permite verificar el grado de humedad y en ocasiones defectos severos en el aislamiento

La resistencia de aislamiento se mide por medio de un aparato conocido como "Megger" El Megger consiste de una fuente de alimentación en corriente directa y un sistema de medición La fuente es un pequeño generador que se puede accionar en forma manual o eléctricamente El voltaje en terminales de un Megger varía de acuerdo al fabricante y a sí se trata de accionamiento manual o eléctrico, pero en general se pueden encontrar en forma comercial Megger de 250 volts, 1000 volts y 2500 volts, la escala del instrumento está graduada para leer resistencias de aislamiento en el rango de 0 a 10,000 megohms,

La resistencia de aislamiento de un transformador se mide entre los devanados conectados todos entre sí, contra el tanque conectado a tierra y entre cada devanado y el tanque, con el resto de los devanados conectados a tierra

Para un transformador de dos devanados se deben tomar las siguientes medidas

- 1, - Entre el devanado de alto voltaje y el tanque con el devanado de bajo voltaje conectado a tierra
- 2, - Entre los devanados de alto voltaje y bajo voltaje conectados entre sí, contra el tanque.

Estas mediciones se pueden expresar en forma sintetizada como

- A) Alto voltaje vs tanque + bajo voltaje a tierra
- B) Bajo voltaje vs tanque + alto voltaje a tierra
- C) Alto voltaje + bajo voltaje vs tanque a tierra

Cuando se trata de transformadores con tres devanados las mediciones que se deben efectuar son las siguientes:

Alto voltaje (primario) vs tanque con los devanados de bajo voltaje (secundario) y medio voltaje (terciario) a tierra

Medio voltaje (terciario) vs tanque con los devanados de alto voltaje y bajo voltaje a tierra

Bajo voltaje (secundario) vs tanque, con los devanados de alto voltaje y medio voltaje a tierra

Alto voltaje y medio voltaje juntos vs, tanque, con el devanado de bajo voltaje a tierra

Para simplificar la conexión de los transformadores trifásicos, la terminal H_1 se lleva fuera o al exterior del lado derecho viendo al lado de alto voltaje del transformador. La terminal X_1 se coloca hacia el lado izquierdo viendo el lado de bajo voltaje del transformador, el resto de terminales H y X se numeran de acuerdo a lo indicado en la tabla 1

6 PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO DE FASE

Como se ha mencionado antes, para los transformadores trifásicos, es necesario conocer la polaridad de cada grupo de devanados de fase así como el desplazamiento angular que puede existir entre los correspondientes devanados secundarios antes de que las unidades se conecten en paralelo o formando bancos

Un transformador trifásico típico, tiene una placa de datos o características que incluye un diagrama llamado diagrama de vector de voltajes, que muestra las relaciones entre los voltajes de las tres fases de acuerdo a lo mostrado en la tabla 1 el desplazamiento angular entre los devanados de alto voltaje y bajo voltaje, es el ángulo entre las líneas que pasan del punto neutro del diagrama de vector de voltajes, a través de H_1 y X_1 , respectivamente

Para verificar el desplazamiento de fases una de las terminales h se conecta a una de las terminales x como se muestra en la tabla 1 el primario del transformador se conecta a una fuente de voltaje trifásica a bajo voltaje (preferentemente mucho más baja que el voltaje nominal del secundario del transformador, como medida de seguridad precautoria) y el voltaje se mide entre terminales como se muestra en la figura. Las relaciones de voltaje deben estar de acuerdo con las comparaciones indicadas

7 PRUEBA DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

La relación de transformación de un transformador es la relación de voltajes del devanado de alto voltaje al devanado de bajo voltaje para transformadores de dos devanados

Cuando hay más de dos devanados, existen varias relaciones de transformación, todas medidas con respecto al devanado de alto voltaje, los distintos voltajes que tiene un transformador se indican normalmente en la placa de características del transformador

Se pueden emplear en general dos métodos para determinar la relación de transformación en transformadores usando voltímetros conectados a los devanados de alto voltaje y bajo voltaje cuando es necesario se conectan a través de transformadores de potencial, por este procedimiento se fija un valor de voltaje en el devanado de alto voltaje del transformador, tomando la lectura correspondiente a este voltaje en el devanado secundario. Para compensar errores es conveniente intercambiar los procedimientos y se repite para varios valores de voltaje para transformadores trifásicos se usa una fuente de alimentación trifásica y se admite una tolerancia de $\pm 1\%$

El otro método de medición de la relación de transformación es por medio de un aparato denominado TTR (Transformer Test-Turn Ratio) y que consiste de una serie de ajustes para dar suficiente precisión a la lectura, que se toma conectando cables a cada uno de los devanados del transformador (por parejas) El aparato es en realidad una fuente de voltaje regulada.

El voltaje de prueba puede llegar a ser hasta el 130% del voltaje nominal del devanado alimentado

8.3 PRUEBA DE IMPULSO

Esta prueba se hace para el aislamiento del transformador es capaz de soportar las ondas de voltaje debidas a impulsos por rayo (descargas atmosfericas) Esta prueba incluye la verificación del aislamiento a tierra, el aislamiento entre espiras y entre devanados, así como el flameo en las boquillas asociadas a cada devanado. Se aplica una forma de onda de impulso estándar o normalizada que se aproxima a una onda de rayo se aplica al transformador bajo prueba. El elemento que produce las ondas de prueba normalizadas, se conoce como "el generador de impulsos" y consiste por lo general de un cierto numero de condensadores conectados de tal forma que se cargan en paralelo de una fuente de voltaje relativamente bajo, y se descargan en serie para dar el voltaje de prueba con la forma de onda normalizada,

La onda normalizada de prueba alcanza su valor de cresta en 1.2 microsegundos y se reduce al 50% de su valor en 50 microsegundos, el voltaje aplicado en cada caso se obtiene de normas, pero en general, varia de 5 a 30 veces el valor del voltaje nominal del aislamiento

Niveles básicos de aislamiento al impulso para transformadores de distribución

9 PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA A LAS BOQUILLAS DEL

TRANSFORMADOR

Además de las pruebas de resistencia de aislamiento y de alto voltaje (voltaje aplicado, Voltaje inducido y de impulso), la prueba de factor de potencia en las boquillas se usa para determinar la condicion de los materiales aislantes en las mismas. Las boquillas se pueden o no remover del transformador, pero para la prueba se deben desconectar de otros aparatos y de la barra a la cual se conecta el transformador cuando esta en operación

El factor de potencia se obtiene leyendo volts, amperes y watts del circuito de prueba, el equipo de prueba frecuentemente se encuentra integrado en forma de paquete y solo tiene un indicador de factor de potencia y un dispositivo de control de voltaje en el exterior estos equipos se conocen como "probadores de factor de potencia". Los valores de factor de potencia se encuentran en el rango del 5 al 10%. Una lectura no es suficiente para determinar la condición del aislamiento de la boquilla, a medida que este se deteriora las mediciones del factor de potencia aumentan. Pudiendo llegar a ser del 100%

10 MEDICION DE LAS PERDIDAS EN VACIO Y LAS CARACTERISTICAS DE

CORTO CIRCUITO

Para propósitos prácticos, las principales pérdidas en los transformadores son las pérdidas en el núcleo y las pérdidas en los devanados, que se pueden determinar por las llamadas pruebas de vacío y de corto circuito del transformador respectivamente.

$$Z_{EP} = V_{cc} / I_{cc}$$

Donde Z_{EP} = Impedancia equivalente referida al primario expresada en OHMS

V_{cc} = En volts y la corriente I_{cc} en amperes

$$R_{EP} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}}$$

DONDE

R_{EP} = Resistencia equivalente referida al primario, expresada en ohms

La reactancia equivalente referida al primario y expresada en ohms, se calcula como

$$X_{EP} = \sqrt{Z_{EP}^2 - R_{EP}^2}$$

11 TRABAJOS DE MANTENIMIENTO EN LOS TRANSFORMADORES

El transformador, por ser una maquina sin partes en movimiento (estática), requiere de poco mantenimiento, sin embargo se deben realizar cierto tipo de trabajos de mantenimiento en su instalación o lugar de operacion y que se conocen como mantenimiento de campo, ya sea de tipo predictivo preventivo o correctivo en forma general los trabajos que se realizan son los siguientes

- 1) Maniobras de desconexión y conexión libranzas
- 2) Preparación de equipos de pruebas
- 3) Desconexión y limpieza
- 4) Pruebas de factor de potencia a devanados
- 5) Pruebas de resistencia de aislamiento (Megger)
- 6) Pruebas de corrientes de excitación
- 7) Prueba de factor de potencia a boquillas
- 8) Pruebas de relación de transformación (TTR)
- 9) Pruebas de medición o determinación de impedancia
- 10) Pruebas al aceite en su caso
- 11) Revisión y limpieza del gabinete de control en su caso

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y DE POTENCIAL

DEFINICIONES : Los transformaciones de corriente y de potencial, también son denominados, transformadores de medida o de medición y están destinados a alimentar aparatos de medición, relevadores o aparatos análogos.

Tienen como función principal reducir a valores normales y no peligrosos, las características de tensión (voltaje) y de corriente en un sistema eléctrico, con el fin de permitir el empleo de aparatos de medición normalizados, por consiguiente más económicos y que pueden manejarse sin peligro. Se distinguen dos clases de transformadores para medición.

A) TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

El transformador de corriente es un aparato en donde la corriente eléctrica secundaria es, dentro de las condiciones normales de operación, prácticamente proporcional a la corriente eléctrica primaria, para un sentido apropiado de conexiones.

El lado primario de este transformador está conectado en serie con el circuito que se desea controlar, en tanto que el secundario está conectado a los circuitos de corriente de uno o varios aparatos de medición, relevadores o aparatos análogos, todos ellos conectados en serie.

Un transformador de corriente puede tener uno o varios devanados secundarios bobinado sobre uno o varios circuitos magnéticos separados. Su representación básica en un diagrama eléctrico es:



B) TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Un transformador de potencial es un transformador para medición, donde la tensión (voltaje) secundaria es, dentro de las condiciones normales de operación, prácticamente proporcional al voltaje primario, para un sentido apropiado de conexiones.



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISION DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS INSTITUCIONALES

SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Del 03 al 26 de Octubre de 2006

APUNTES GENERALES ***—INTERRUPTORES—***

CI - 215

Instructor: Ing. Alfredo Nava Rodríguez
Instituto de Educación Media Superior

Octubre de 2006

INTERRUPTORES

Un interruptor es un dispositivo cuya función es interrumpir y restablecer la continuidad en un circuito eléctrico. Si la interrupción o restablecimiento solo pueden efectuarse sin carga (corriente), el interruptor recibe el nombre de desconectador o cuchilla desconectadora. En cambio si la operación es posible efectuarla con carga (corriente nominal) o con corriente de corto circuito (en caso de alguna perturbación) el interruptor recibe el nombre de " Interruptor de Potencia " .

INTERRUPTORES DE POTENCIA.

1 - CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS - Las principales características que deben tomarse en cuenta durante el proceso de cierre/apertura de un interruptor de potencia, son las siguientes:

- 1 - Voltaje Nominal
- 2 - Corriente inicial de CC
- 3 - Corriente de ruptura
- 4 - Capacidad interruptiva
- 5 - Voltaje de restablecimiento

- 1 - Voltaje Nominal. Es el voltaje normal de operación del interruptor.
- 2.- Corriente inicial de CC - Es el valor instantáneo de la corriente de falla.
- 3 -Corriente de ruptura - Es el valor permanente de la corriente de CC.
- 4 -Capacidad interruptiva - Es la potencia de interrupción a una corriente de ruptura.

La energía absorbida por la vaporización y descomposición del aceite, es utilizada para enfriar energicamente la columna del arco y los propios contactos

1.1.1 INTERRUPTORES EN GRAN VOLUMEN DE ACEITE CON CAMARA DE EXTINCION - Los interruptores de grandes capacidades con gran volumen de aceite originan fuertes presiones internas que en algunas ocasiones pueden dar lugar a explosiones. Para disminuir estos riesgos se idearon dispositivos donde se forman las burbujas de gas, reduciendo las presiones a un volumen menor. Estos dispositivos reciben el nombre de cámaras de extinción y su procedimiento de operación es el siguiente.

1.- Al ocurrir una fallase separan los contactos que se encuentran dentro de la cámara de extinción

2 - Los gases que se producen tienden a escapar, pero como se hallan dentro de la cámara que contiene aceite, origina una violenta circulación de aceite que extingue el arco

3 - Cuando el contacto móvil sale de la camara, el arco residual se acaba de extinguir, entrando nuevamente aceite frío en la cámara.

4.- Cuando los arcos se han extinguido se cierran los elementos de admisión de la cámara.

En la fig. 1.3 se ilustra el diagrama de un interruptor de gran volumen de aceite con "cámara de extinción" y en la fig. 1.4 se muestran los elementos principales de la propia cámara

El elemento de desconexión en los interruptores de gran volumen de aceite lo constituyen los contactos móviles. Estos contactos se pueden accionar en general de tres maneras distintas

1 - Mecánicamente por medio de sistemas volante - vieas o engranes - vieas.

2. - Magnéticamente, por medio de un electroimán conocido como bobina de disparo que acciona el trinquete de retención de los contactos móviles al ser energizados: se puede energizar manualmente o automáticamente (relevadores). La acción de conexión o

1 - Al ser accionada la válvula principal (2), esta se abre, permitiendo el acceso de aire a los aisladores huecos (1)

2 -El aire a presión que entra a los aisladores huecos presiona por medio de un émbolo a los contactos (5)

3 - Los contactos (5) accionan a los contactos (6) que operan simultáneamente abriendo el circuito

4.- Como los aisladores huecos (1) se encuentran conectados directamente a las cámaras de extinción (3), al bajar los contactos (5) para accionar a los contactos (6), el aire a presión que se encuentra en los aisladores (1) entra violentamente a la cámara de extinción (3), extinguiéndose el arco se puede ver, el aire comprimido se emplea no solamente para el mando sino también para la extinción del arco

Se tienen una serie de ventajas del interruptor neumático sobre los de aceite ,

Por ejemplo

1 - Disminuye las dimensiones del equipo

2 - Ofrece mejores condiciones de seguridad> ya que evita explosiones e incendios.

3 - Disminuye la posibilidad de reincidencias de arco

4 -Es más económico.

Como inconveniencias de este tipo de interruptor se puede decir lo siguiente:

1 -Se tiene la necesidad de una instalación de un equipo de aire comprimido, con los correspondientes compresores, depósitos, tuberías , controles, etc.

2 - La necesidad de un mantenimiento más complejo.

1.4 INTERRUPTORES EN SF₆ - En vista del aumento constante de la potencia de las Centrales Eléctricas , los constructores de equipo de interrupción, se han visto obligados a mejorar las características de ruptura de sus disyuntores a fin de protegerlos de las elevadas potencias de corto circuito a las que están expuestos . Para adaptarse a las cada día más estrictas normas, el disyuntor de gran volumen de aceite ha sido desplazado por los tipos de pequeño volumen de aceite y de aire comprimido. Todos estos

- 3 - Instructivo de montaje, operación y mantenimiento
- 4 - Diagrama eléctrico de control y protección
- 5 - Protocolo de pruebas
- 6 - Herramientas y refacciones

II MONTAJE

2.1 PLANOS DE BASE DE MONTAJE - Ingeniería Civil realiza el proyecto de la base de montaje por indicaciones de Ingeniería Eléctrica, pero este proyecto pudiera no corresponder con los ejes reales de montaje del interruptor, por lo cual se hace necesario conciliar esta información con la enviada por el propio fabricante. Es importante contar con esta información para verificar medidas en el momento que el Ingeniero residente civil inicia su trabajo.

2.2 ESTADO DE PARTES - Cada equipo cuando es empaquetado en la fábrica consta del interruptor propiamente dicho y de todos los accesorios que habrán de conformarlo durante su instalación. Cualquier faltante o daño irreparable, traerá consigo una serie de problemas que si no son detectados a su debido tiempo pueden ocasionar atrasos en su montaje y aun en su puesta en servicio. Por lo tanto, se debe realizar un recuento minucioso de todas las partes y accesorios de acuerdo al listado de partes que el fabricante anexa al equipo.

Si el montaje no se ha de efectuar inmediatamente, se colocan los bultos sobre vigas para protegerlos de la humedad y se tapan con lonas. En caso de periodos de almacenamiento que se prolonguen por más de tres meses, se debe conectar la calefacción contra condensación de agua por medio de un cable de alimentación auxiliar.

Las partes que vengan protegidas con bolsas de plástico se deberán revisar que no se expongan a la intemperie, si es así, habrá que almacenarlos en lugares secos y cerrados.

3 1 1 Se verifica la altura a lo que habrán de quedar los conectores de alta tensión (parte viva) para que en el caso en que no se tenga la distancia mínima se instalen aumentos en la estructura soporte del propio interruptor.

3 1 2 Se coloca el interruptor en su base, procediendo a nivelar y plomear antes de fijar el equipo. El interruptor se debe cargar apoyándose únicamente en los puntos que marque el fabricante

3 1 3 Se realizan las pruebas eléctricas mínimas de recepción que son

Collar caliente y Megger a las boquillas

Relación Megger y polaridad a los transformadores de corriente

Rigidez dieléctrica al aceite

Se debe tener cuidado de que jamás se opere el interruptor sin aceite

3 1 4 Se bajan los tanques de las cámaras contenedoras del equipo de interrupción y se realizan las siguientes revisiones

- Limpieza
- Centrado de cámaras
- Centrado de contactos
 - Estado del bastón de mando
 - Estado de los topes de cierre y/o apertura
 - Estado de los contactos
 - Fijación de transformadores de corriente

Nota. - Siempre que se haga cualquier revisión interna, se deberá tener desconectada la línea de alimentación eléctrica para la operación del interruptor.

3 1 5 --En los tanques se deben revisar todas las soldaduras, así como la correcta operación de las válvulas de llenado y los indicadores de nivel de aceite.

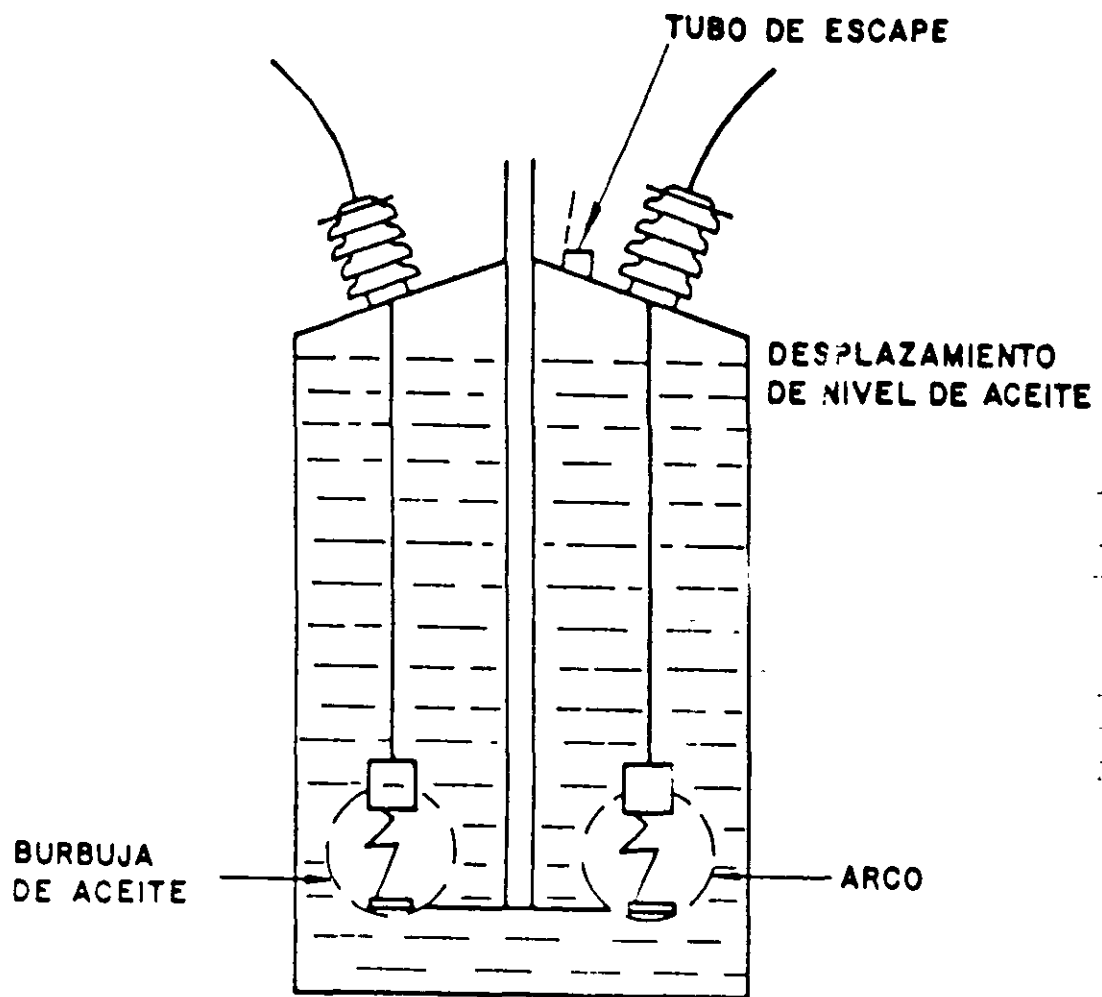


FIG. 1.2

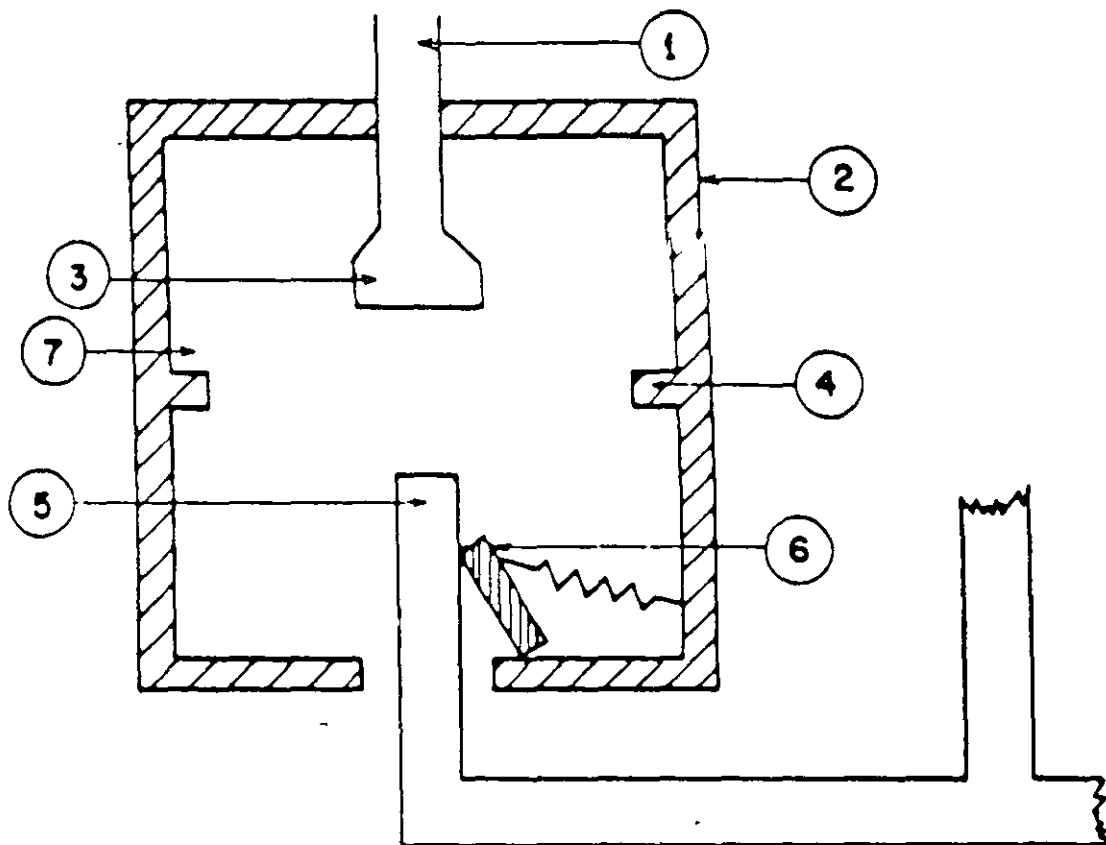


FIG. 1.4

- 1.- PARTE INTERNA DE LA BOQUILLA QUE SOPORTA LA CAMARA
- 2.- CUERPO DE LA CAMARA.
- 3.- CONTACTO FIJO DENTRO DE LA CAMARA.
- 4.- COSTILLAS DE REFUERZO DE LA CAMARA.
- 5.- CONTACTO MOVIL.
- 6.- ELEMENTO DE CIERRE DE LA CAMARA.
- 7. ACEITE EN EL INTERIOR DE LA CAMARA.

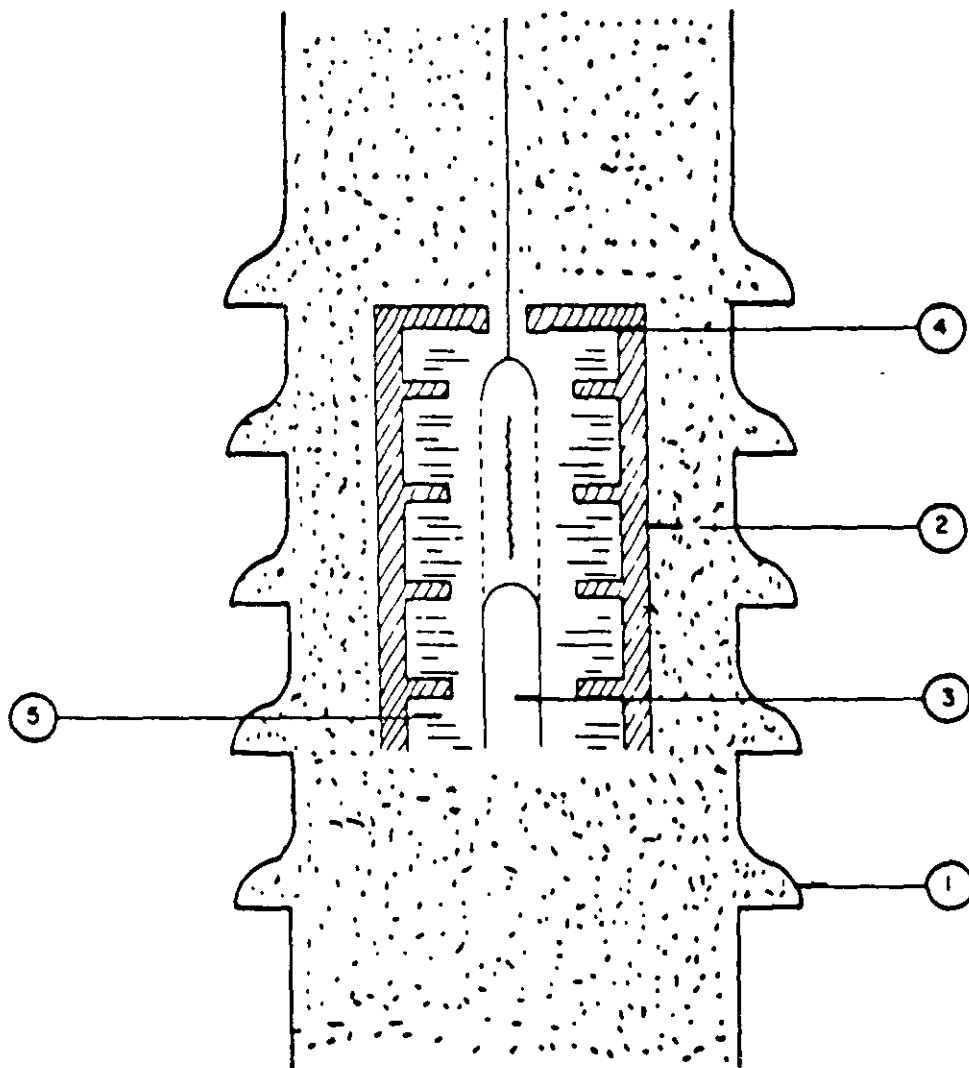


FIG. I.6.

- 1.- PARTE EXTERNA
- 2.- CUERPO DE LA CAMARA
- 3.- CONTACTO MOVIL
- 4.- CONTACTO FIJO
- 5.- ARCO ELECTRICO
- 6.- ACEITE



FACULTAD DE INGENIERIA UNAM
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

CURSOS INSTITUCIONALES

SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Del 03 al 26 de Octubre de 2006

APUNTES GENERALES
—CABLES DE CONTROL—

CI - 215

Instructor: Ing. Alfredo Nava Rodríguez
Instituto de Educación Media Superior
Octubre de 2006

CABLES DE CONTROL

Aunque los cables de control y protección representan un pequeño porcentaje del costo una subestación, es de extrema importancia su selección y su instalación, desde los puntos de vista de simplicidad para facilitar la construcción y el mantenimiento, y de confiabilidad en la operación de la subestación. Por lo tanto, una buena instalación de cable de control deberá ser motivo de una buena planeación y construcción.

Para instalar los cables de control se han venido utilizando diferentes tipos de rutas, mismas que tienen sus ventajas y sus desventajas. Las rutas indicadas son básicamente de cuatro tipos diferentes.

A) - Rutas con tubería conduit En las cuales hay que hacer cajas de registro a distancia razonables para limitar los jalones a los cables a valores permisibles. Cada cable va en su tubo correspondiente y se dejan un número de terminado de tubos extra para ampliaciones futuras.

En este caso se obtiene buena protección mecánica, pero un costo relativamente alto.

B) - Rutas con cables directamente enterrados en el suelo Este sistema es el más barato, pero tiene mala protección mecánica.

C) - Rutas en trincheras Este sistema permite ir instalándolos cables conforme se vaya requiriendo, ya sea directamente en el fondo de la trinchera o apoyando los cables en soportes anclados en las paredes de la misma.

Para llegar al equipo individual se utilizan tubos conduit.

La trinchera debe ser cubierta con algún tipo de tapa que deberá ir de acuerdo con las necesidades de tránsito de la zona.

El costo de este sistema es menor que el del inciso (a) y la protección mecánica está en un nivel intermedio entre las indicadas en los incisos a y b; se debe evitar instalar trincheras en áreas de maniobras de equipo pesado.

En la actualidad hay una gran tendencia a utilizar trincheras sobre todo en S.E.. arriba de 220 Kv y/o que tengan grandes posibilidades futuras de crecimiento.

D) - Rutas en charolas - Este sistema necesita estructuras para soportar las charolas. Produce una instalación simple con buena protección mecánica. La desventaja es la limitación el movimiento de equipo.

Desde el punto de vista de los cables, el material usado es cobre, debido a su mejor conductividad y flexibilidad. El conductor deberá forrarse de polietileno o PVC y si se usa cable de varios conductores, aquél deberá forrarse con una chaqueta de PVC o neopreno.

En el caso (a) se producen oscilaciones amortiguadas, en donde la frecuencia y el amortiguamiento están determinados por la capacitancia de los bancos de capacitores y por la inductancia y resistencia del bus. Las frecuencias andan por el orden de KHz.

En el caso (b) las oscilaciones son producidas por la propagación de la onda de impulso producida al abrirse un interruptor y correr por las barras correspondientes hasta chocar y reflejarse en las terminaciones de las mismas. Las frecuencias son del orden de 3 MHz. Debido a las frecuencias muy altas esta componente resulta fuertemente acoplada a los circuitos de control y protección, habiendo inclusive transferencia por radiación.

Para eliminar las altas frecuencias transmitidas por radiación se debe instalar en la terminal de los cables de control, del lado que remata en el edificio de tableros, un capacitor de 0.1 MF por cable, que se conecta a tierra para descargar estas señales.

Los transitorios generados en esta gama de frecuencias se reducen a medida que se incrementan el número de salidas de líneas de las barras principales.

En general, se ha observado que los transitorios en los cables de control y protección aparecen tanto al abrir un interruptor de alta tensión, como al abrir interruptores de baja tensión, de motores de control y aún al abrir los contactos de los mismos relevadores de protección. En estos últimos casos, los transitorios producidos serán menos severos, pero debido a que los conductores que intervienen en el acoplamiento electromagnético corren en un mismo haz de cables, los disturbios se producen en cantidad comparable a la del primer caso.

De todo lo anterior se han hecho pruebas en los cables de los circuitos secundarios de T.C.'s y T.P.'s en circuitos de fuerza y control de corriente directa y corriente alterna, tanto en subestaciones de 230 KV como de 500 KV. De todas estas experiencias se han obtenido diversas observaciones entre las cuales destacan las siguientes:

- 1 -En los circuitos secundarios de los transformadores de potencial se han medido tensiones hasta de 8 KV.
- 2 -En los circuitos de fuerza de baja tensión de corrientes directa y alterna se han detectado tensiones hasta de 3 KV.
- 3 -En los circuitos secundarios de los transformadores de corriente se han obtenido valores hasta de 2 KV.
- 4 -Por apertura de interruptores de baja tensión se han llegado a tener amplitudes hasta de 3 KV.
- 5 -La naturaleza oscilatoria de los transitorios es debida a las múltiples reflexiones de la onda al producirse el pulso. Los valores observados de las frecuencias que se producen al operar diferentes interruptores son como sigue:

Interruptores de líneas de 50 a 300 KHz.

Interruptores entre barras (buses) de 300 a 600 KHz.

- c) Instalando en cada una de las paredes de las trincheras un cable de cobre desnudo de 4/0 q se conectará a la red de tierras cada 20 m.
- d) Para los casos de radiofrecuencias se conecta un capacitor de 0.1 microfarad en cada cable de control, en sus terminales del edificio de tableros, conectando a tierra el otro extremo del capacitor.

8 -En el caso de subestaciones con bancos de capacitores de alta energía, los transitorios deben tratar de suprimirse en la fuente (interruptor) utilizando unas resistencias de 160 ohms que ya deben traer los interruptores correspondientes y además puenteando a tierra lo más cerca posible del edificio de tableros, a través de capacitores

9 -En los pozos los cables de control y protección deberán entrar en ángulo recto con los cables de fuerza de baja tensión

10 -Los cables que se instalan en las trincheras tienen mayor protección contra los transitorios a medida que se instalan más próximos de la red de tierras.

11 -Para casos extremos se ha visto que si a un cable blindado con sus dos extremos de blindaje conectados a tierra, se tiende paralelo a él un cable de cobre desnudo con sus extremos, a su vez, conectados a tierra se han medido tensiones inducidas dentro de los conductores de 5 volts entre líneas y de 100 V de línea a tierra, aun habiendo dejado los conductores tirados sobre la superficie del terreno

CONCLUSIONES Para subestaciones de EHV se ha visto que lo mejor es usar cable blindado, tener una buena red de tierras y tener especial cuidado en el trazo de las trincheras de cable de control

Señalización lámparas	#10
-----------------------	-----

Alimentadores 20 KV.

Control interruptor 20 KV	#12
---------------------------	-----

T C (bushing)	#10
---------------	-----

Condensadores 20 KV.

Control interruptor	#12
---------------------	-----

T C (bushing) sobrecorriente	#10
------------------------------	-----

T C diferencial	#10
-----------------	-----

NOTA

Estos calibres son aplicables para distancias no mayores de 100 metros. Para casos de mayor longitud deberá calcularse la caída de voltaje resultante y seleccionar con este data calibre adecuado

En cambio, en zonas rurales o sea en zonas despejadas de estructuras se debe utilizar bronce de baja resistencia eléctrica para el armado de los cables, lo cual reduce los efectos destructivos del calentamiento brusco de los cables y por lo tanto, reduce también las perforaciones del aislamiento, por sobre voltajes entre el conductor y el blindaje

El grueso experimentado que protege mejor al cable de los roedores es a partir de 0.005

Aunque los cables armados, todos tienen cierto grado de protección, se ha visto otro problema una vez que el roedor perforado la chaqueta del cable (PVC), se comienza a producir corrosión en la armadura que a su vez facilita la acción de los roedores por lo que hay que tomarla en cuenta de acuerdo con la tabla adjunta y con la vida que se considera que va a tener el cable

M E T A L	Velocidad promedio de Corrosión pg / año
Aluminio	0.0002
Bronce	0.003 a 0.004
Cobre	0.002
Bronce perforado	0.002
Acero Inoxidable	0.0004 a 0.001
Acero	0.005

En general se puede decir que cualquier protección contra roedores nunca se puede considerar 100% segura

Protección Química

El objetivo es recubrir el forro del cable, de una sustancia que sea repelente a los roedores y que además sea efectiva por años, soportando diferentes temperaturas y tipos de atmósferas

Para lo anterior se han hecho diferentes pruebas, usando diferentes tipos de repelentes haciendo las pruebas en rentes regiones de Estados Unidos, incluyendo Panamá y se ha llegado a obtener una duración de la efectividad de la protección química en cables expuestos a la intemperie, de por menos un año



FAVLEAD DE INGENIERIA UNAM
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

CURSOS INSTITUCIONALES

SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Del 03 al 26 de Octubre de 2006

APUNTES GENERALES

-CALCULO DE POTENCIALES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO-

CI - 215

Instructor: Ing. Alfredo Nava Rodríguez
Instituto de Educación Media Superior
Octubre de 2006

CALCULO DE POTENCIALES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO.

Rango de corriente tolerable.

Los efectos que produce una corriente eléctrica al circular a través de partes vitales del cuerpo humano, dependen de la duración, magnitud y frecuencia de esta corriente. La consecuencia más peligrosa por estar expuesto al paso de la corriente eléctrica es la fibrilación ventricular, una condición de acción no coordinada de los ventrículos del corazón que da como resultado el paro inmediato de la circulación de la sangre

Efecto de la frecuencia

El cuerpo humano es muy vulnerable a los efectos de la corriente eléctrica a 60 Hz. En esta frecuencia una corriente con una magnitud de 100 mA puede resultar letal

De estudios realizados, se ha observado que el cuerpo humano puede tolerar mayores corrientes a frecuencias de 25 Hz o a la corriente directa o a las frecuencias en el rango de 3000-10000 Hz

Efectos de la magnitud y duración.

Los efectos fisiológicos más comunes que se presentan al ir incrementando la corriente eléctrica que circula por el cuerpo son.

Percepción
Contracción muscular
Pérdida del conocimiento
Fibrilación ventricular
Paro respiratorio
Quemaduras

La corriente de 1 mA está reconocida generalmente como el umbral de la percepción, esto es, la magnitud de la corriente a la cual una persona es capaz de detectar una ligera sensación de picazón en las manos o en la punta de los dedos, por el paso de la corriente.

Las corrientes de 1 a 6 mA, a menudo denominada "corriente de soltar", aunque desagradable mantener, generalmente no daña la habilidad de la persona sujeta al objeto energizado, de controlar su edad de la persona sujeta al objeto energizado, de controlar sus músculos y soltarse

En el rango de 9 a 25 mA, las corrientes pueden ser dolorosas y hacer imposible ó difícil soltar el objeto energizado. Para corrientes más altas, las contracciones musculares pueden dificultar la respiración. Estos efectos no son permanentes y desaparecen cuando la corriente se interrumpe; a menos que la contracción sea muy severa y la respiración se detenga, no por

$$I_B = 0.116 / \sqrt{t_s} \quad (A)$$

Nótese en esta ecuación que los resultados para 1 seg. son 116 mA y para 0.1 seg. 376 mA.

Para las personas con peso aproximado de 70 Kg (155 lb) se ha determinado un valor de $S_B = 0.0246$ y $K_{70} = 0.157$ entonces la fórmula queda.

$$I_B = 0.157 / \sqrt{t_s} \quad (B)$$

Este valor puede considerarse típico para los cálculos, ya que la mayoría de la población tiene un peso alrededor de los 70 Kg.

Resistencia del cuerpo humano.

Para la corriente directa y para la corriente alterna a frecuencia nominal, el cuerpo humano puede representarse por una resistencia. Esta resistencia está medida entre extremidades, esto es, entre una mano y ambos pies ó entre un pie y otro. En cualquiera de los dos casos el valor de esta resistencia es difícil de establecer. Un valor de resistencia para el cuerpo humano es aproximadamente de 300 Ohms, aunque se ha determinado por estudios un rango entre 500 y 300 Ohms.

Para altos voltajes y corrientes (arriba de 1 KV y 5 A), la resistencia disminuye por daño o perforación de la piel en el punto de contacto.

Para fines de cálculo se han hecho las siguientes consideraciones:

- a) La resistencia de contacto para las manos y los zapatos es igual a cero.
- b) Se ha seleccionado el valor de 1000 Ohms para representar el valor de resistencia del cuerpo humano, de una mano a ambos pies, entre mano y mano ó entre un pie y el otro:

$$R_B = 1000 \Omega$$

Circuitos equivalentes accidentales.

Usando el valor de la corriente tolerable por el cuerpo establecida anteriormente y las constantes apropiadas del circuito, es posible determinar el voltaje tolerable entre dos puntos críticos de contacto.

$$R_{2F3} = (R_{foot} - R_{Mfoot})$$

$$R_{2Fp} = 1 / 2 (R_{foot} + R_{Mfoot})$$

Donde

R_{2F8} = Resistencia de los dos pies en serie

R_{2Fp} = Resistencia de los dos pies en paralelo

La figura 1 define el circuito equivalente de un contacto pie a pie. El potencial U es la diferencia de potencial máxima entre dos puntos sobre la superficie del terreno, separados por la distancia de un paso

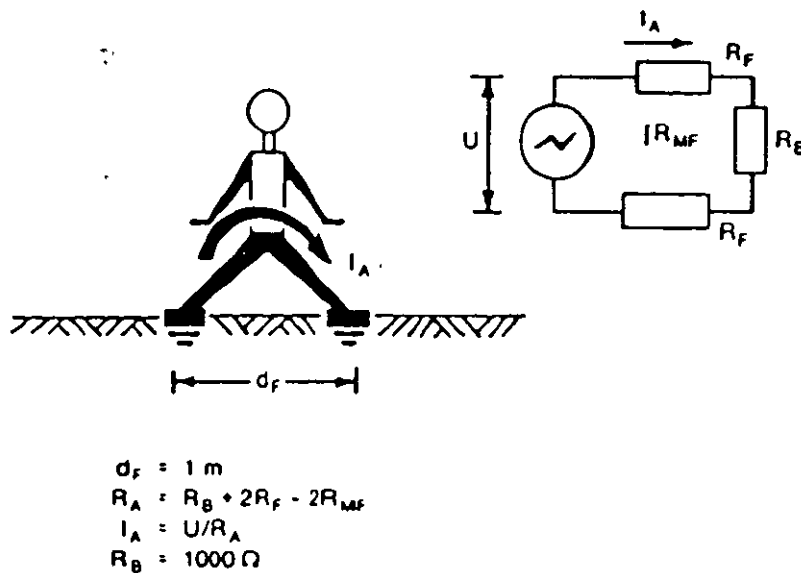


Figura 1

La resistencia equivalente para el circuito del potencial de paso es:

$$R_A = R_B + 2 (R_{foot} - R_{Mfoot})$$

El circuito equivalente para el contacto entre una mano y los dos pies se muestra en la figura 2

Si el terreno tiene una resistividad menor que la de la roca triturada, solamente alguna corriente de la malla irá hacia la capa superior de la roca triturada y el voltaje superficial será el mismo que si no existiera la capa

La corriente a través del cuerpo será considerablemente más baja con la adición de la capa de roca en la superficie, por la gran resistencia de contacto entre el terreno y los pies

Sin embargo, esta resistencia puede ser considerablemente menor que aquella que presenta una capa de roca triturada con un gran espesor (esto es, de un espesor suficiente para suponer resistividad uniforme en todas las direcciones)

Las siguientes ecuaciones para R_{foot} y R_{Mfoot} serán ahora

$$R_{foot} = \frac{\rho_1}{4b} F(X_1) \quad (5)$$

$$R_{Mfoot} = \frac{\rho_1}{2nd_{foot}} F(X_2) \quad (6)$$

Donde

b y d_{foot} se definieron anteriormente y $F(x)$ es una función basada en el espaciamiento entre los pies y los valores relativos de las resistividades del terreno y de la roca triturada en la superficie.

$$F(X) = 1 + 2 \sum Q$$

$$Q = \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2nX)^2}}$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

Donde.

ρ_s = Resistividad de la roca triturada en Ohms-metro

ρ = Resistividad del terreno en Ohms-metro

$$X = X_1 = h_s / b \text{ para } R_{\text{foot}}$$

$$X = X_2 = h_s / d_{\text{foot}} \text{ para } R_{\text{Mfoot}}$$

h_s = Espesor de la capa de roca triturada, en metros

Como la cantidad $F(X)$ es difícil de evaluar si no se cuenta con una computadora, estos valores han sido precalculados y gráficos para un amplio rango de valores x y del factor K como se muestra en la figura 3

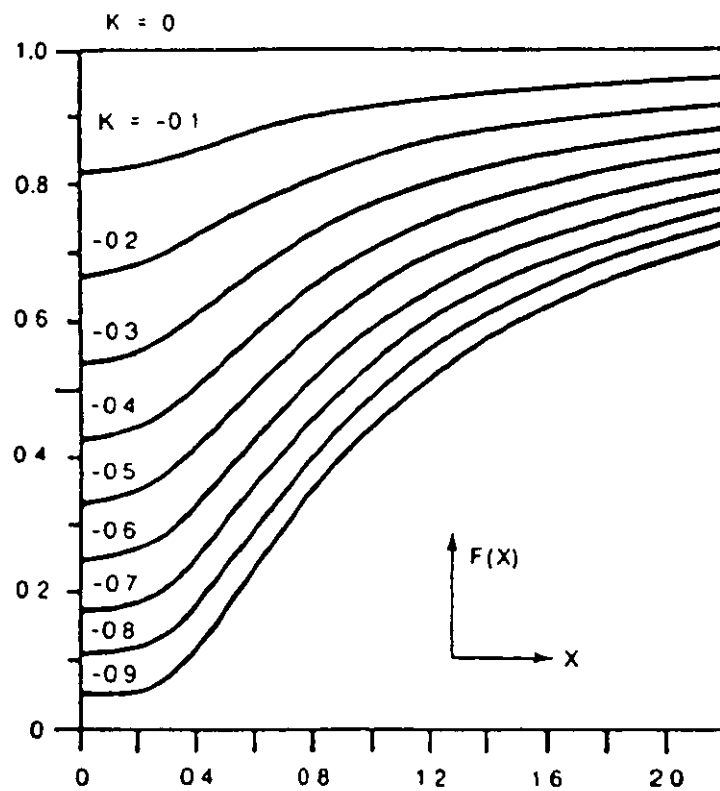


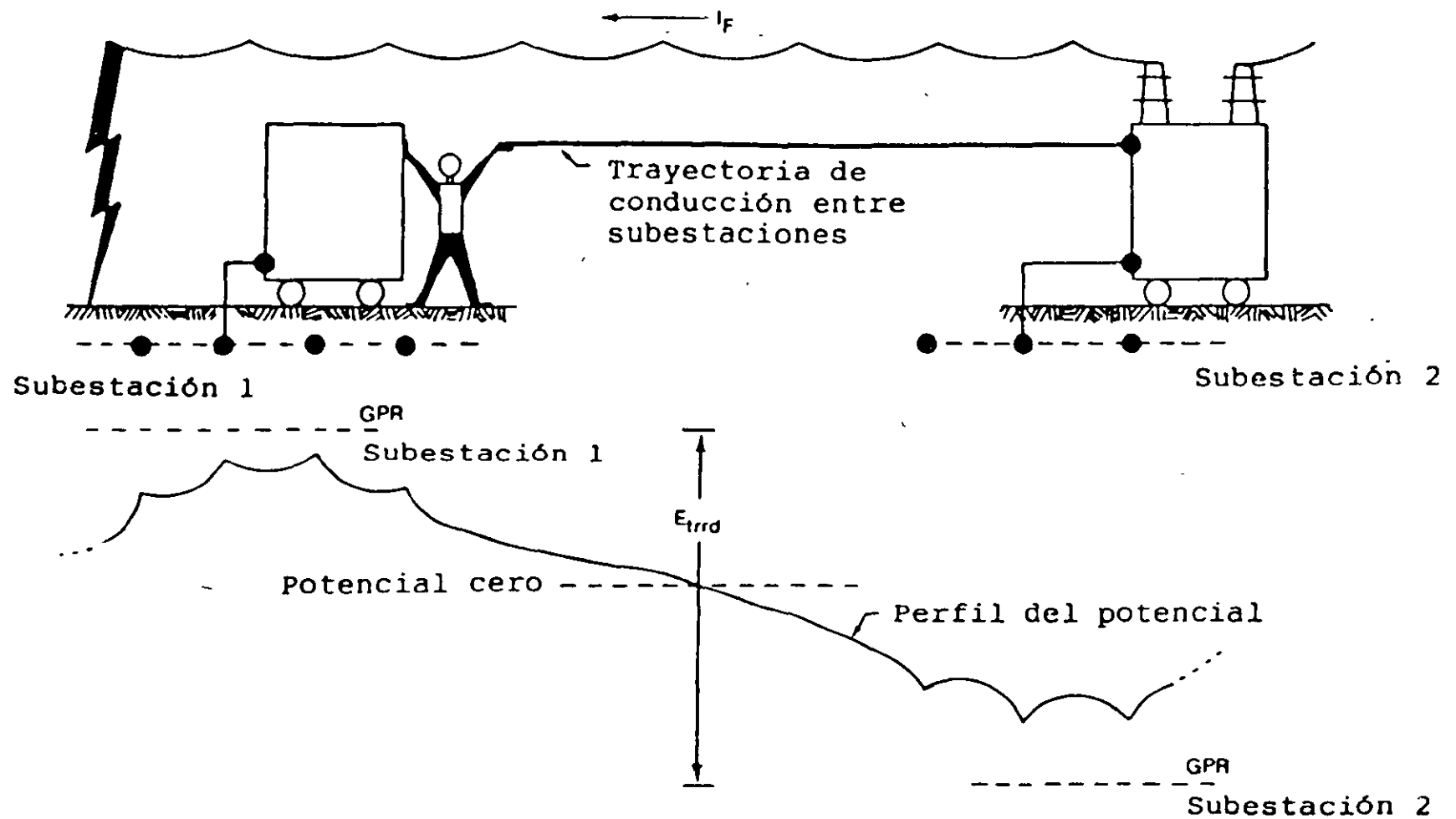
Figura 3

Ejemplo

Resistividad típica de materiales empleados como material de superficie en Subestaciones

<u>No.</u>	<u>Description of Surface Material</u>	<u>Resistivity of Sample (ohm-meters)</u>	
		<u>Dry</u>	<u>Wet</u>
1	Crusher Run Granite with Fines	140×10^6	1,300
2	#57 Washed Granite Similar to 3/4 in. Gravel	190×10^6	8,000
3	Clean Limestone Slightly Coarser than Number 2	7×10^6	2,000 3,000
4	Washed Granite Similar to 3/4 in. Gravel	2×10^6	10,000
5	Washed Granite Similar to Pea Gravel	40×10^3	5,000
6	Crushed Aggregate Base Granite (with fines)	--	500-1,000
7	Concrete	2,000 - 10,000	50-100
8	Concrete	1,200 - 280,000	21-63
9	Asphalt	--	10,000
10	Asphalt	2×10^6 30×10^6	10,000 to 6×10^6

Referencia: Practical Applications of ANSI/IEEE Std. 80-1986
Guide for Safety
Tutorial Course 86 EH0253-5-PWR



Situación típica de potencial transferido

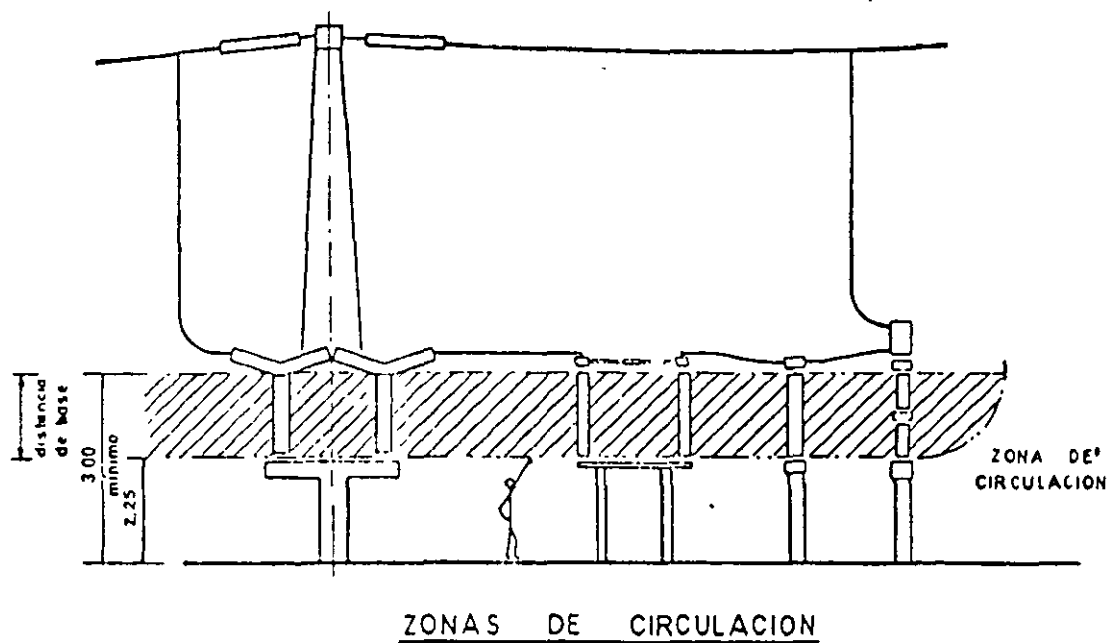


FIG. 2

ALTURA MINIMA = VALOR BASICO + 2.25 m.
 DIST. HORIZONTAL MINIMA = VALOR BASICO + 0.90 m

VALOR BASICO
 ZONA DE SEGURIDAD
 ACOT. EN M.

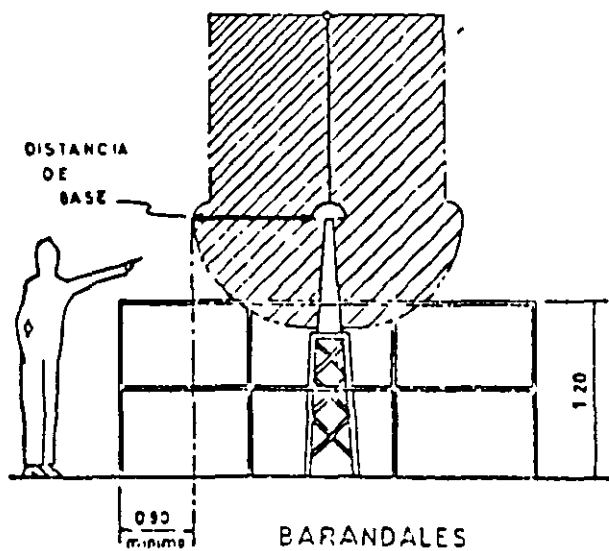


FIG. 3

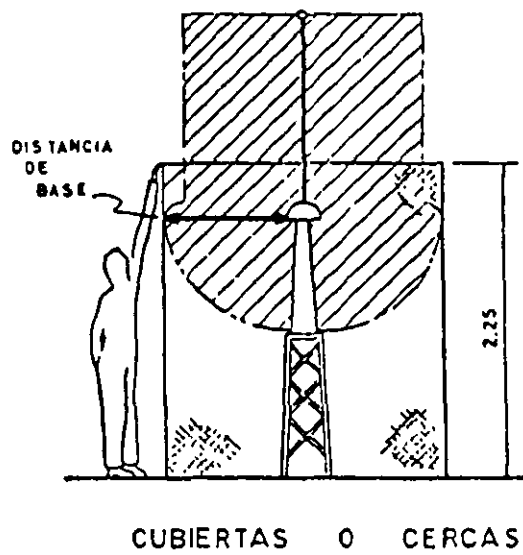
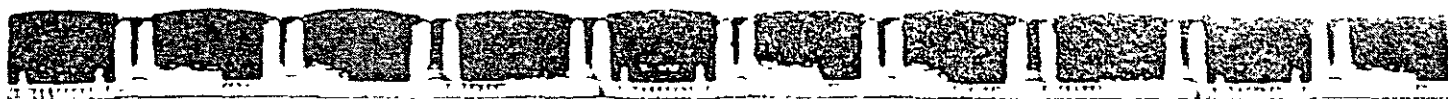


FIG. 4



FACULTAD DE INGENIERIA UNAM
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

CURSOS INSTITUCIONALES

SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Del 03 al 26 de Octubre de 2006

APUNTES GENERALES
—COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE TIERRA—

CI - 215

Instructor: Ing. Alfredo Nava Rodríguez
Instituto de Educación Media Superior
Octubre de 2006

1.- COMPONENTES BASICOS DE UN SISTEMA DE TIERRA.

El sistema de tierra de una subestación se integra con los siguientes elementos

- A) Conductores
- B) Varillas o electrodos de tierra
- C) Conectores o juntas

Conductores.

Sirven para formar el sistema de tierra y para la conexión a tierra de los equipos.

Los conductores empleados en los sistemas de tierra son generalmente cables concéntricos formados por varios hilos y los materiales empleados en su fabricación son el cobre, cobre estañado, copperweld (acero recubierto con cobre), acero, acero inoxidable, acero galvanizado o aluminio

El factor principal en la selección del material es la característica de corrosión que presenta al estar enterrado

El cobre es la selección más común para los conductores, ya que es económico y tiene buena conductividad, además de ser resistente a la corrosión y a la fusión.

El calibre de los conductores, como se verá más adelante, se determinará por requerimientos de conducción de corriente

Varillas o electrodos de tierra.

Estos elementos se clavan en el terreno y sirven para encontrar zonas más húmedas y por lo tanto con menor resistividad eléctrica en el subsuelo.

Los materiales empleados en la fabricación de varillas o electrodos de tierra son generalmente el acero, acero galvanizado, acero inoxidable y copperweld.

Como en los conductores, la selección de material dependerá de las características de corrosión que presenten al estar enterrados. El copperweld es el material más empleado en las varillas de tierra ya que combina las ventajas del cobre con la alta resistencia mecánica del acero, tiene buena conductividad, resistencia a la corrosión y buena resistencia mecánica para ser clavada en el terreno

El diámetro y longitud de las varillas o electrodos, se determinará por resistencia mecánica y por las características de resistencia eléctrica que presenten al estar enterrados.

B) Conductividad eléctrica De tal manera que no contribuya sustancialmente con diferencias de potencial en el sistema de tierra

C) Capacidad de conducción de corriente Suficiente para soportar los esfuerzos térmicos durante las condiciones más adversas impuestas por la magnitud y duracion de las corrientes de falla

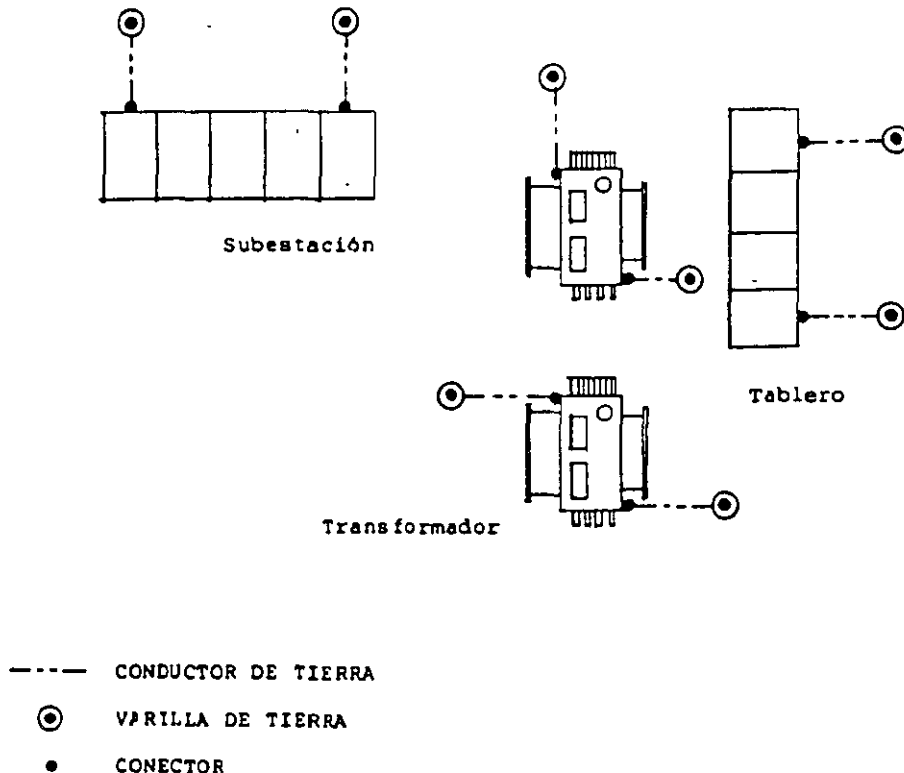
D) Resistencia mecanica De tal manera que soporte esfuerzos electromecánicos y daño físico.

3.- DISPOSICIONES BASICAS DE LAS REDES DE TIERRA

Se han considerado basicamente 3 sistemas:

A) Sistema radial

Este sistema consiste en uno o varios electrodos de tierra a los cuales se conecta la derivación de cada uno de los equipos El sistema radial es el menos seguro, ya que al producir se una falla en el equipo, se producen elevados gradientes de potencial

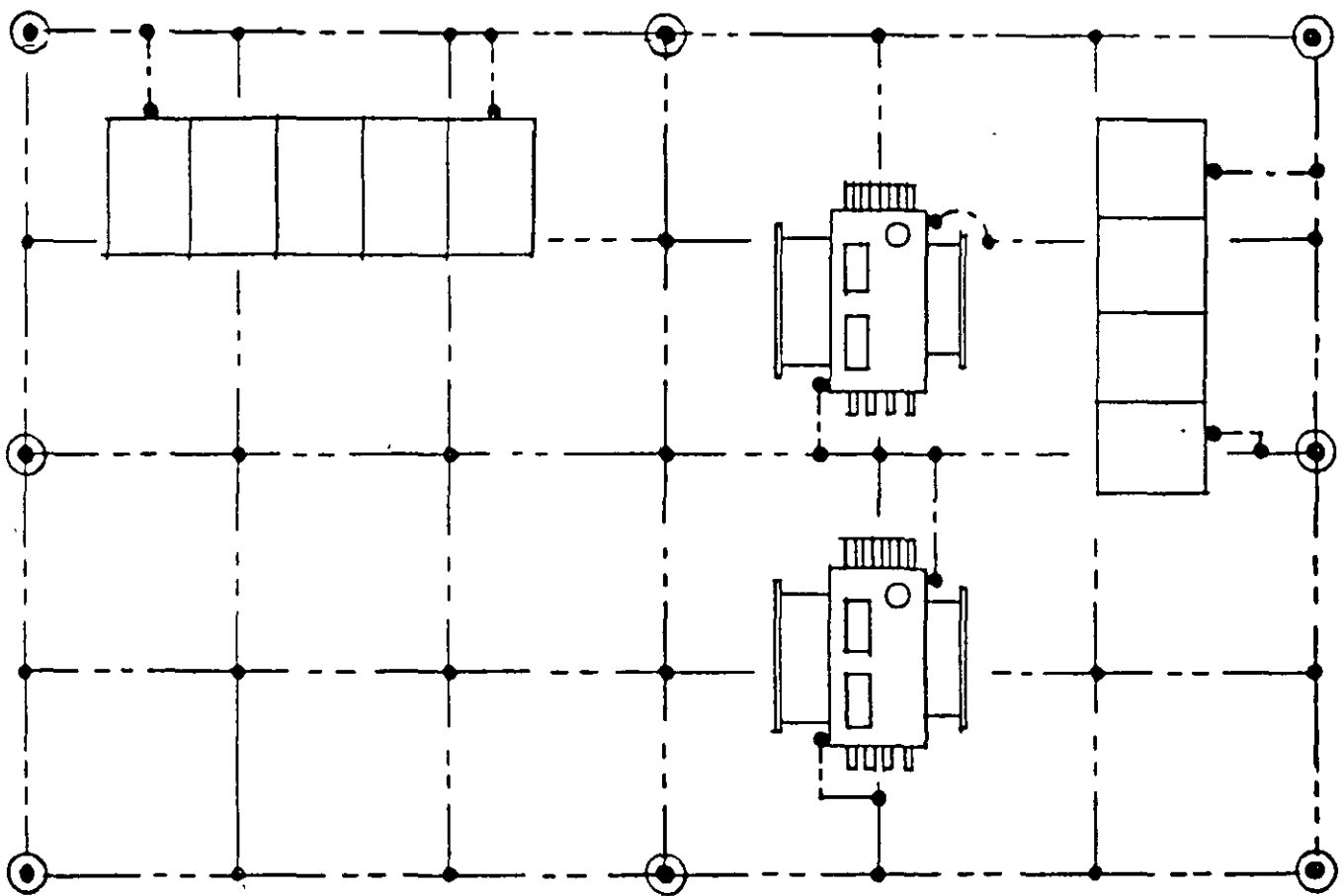


SISTEMA RADIAL

C) Sistema de malla.

El sistema de malla es el más usado actualmente en las subestaciones eléctricas.

Consiste, como su nombre lo indica, en un arreglo de conductores perpendiculares formando una malla o retícula a la cual se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos. En el perímetro de la malla generalmente se colocan varillas o electrodos de tierra. Este sistema es el más eficiente ya que se limitan los potenciales originados por la circulación de la corriente de falla



----- CONDUCTOR DE TIERRA

⊙ VARILLA DE TIERRA

• CONECTOR

SISTEMA DE MALLA

Despejando a ρ

$$\rho = R \times A / L = \text{Ohms} \times \text{long}$$

En el sistema métrico.

ρ = Resistividad del terreno en Ohms-metro

R = Resistencia en Ohms

A = Area de la sección transversal en m

L = Longitud en m

La resistividad del terreno para el diseño de una red de tierras, generalmente se determina por una interpretación apropiada de los datos de campo. Debido a que la resistividad del terreno varía tanto horizontal como verticalmente, los datos se conocen como "perfil de resistividad aparente del suelo", los cuales se obtienen por pruebas en varios lugares de la subestación y hasta en una cierta profundidad en el terreno.

Un modelo de suelo, con sus parámetros a usarse en el diseño, puede determinarse por simples técnicas o por los métodos más sofisticados de computadora.

Características del suelo

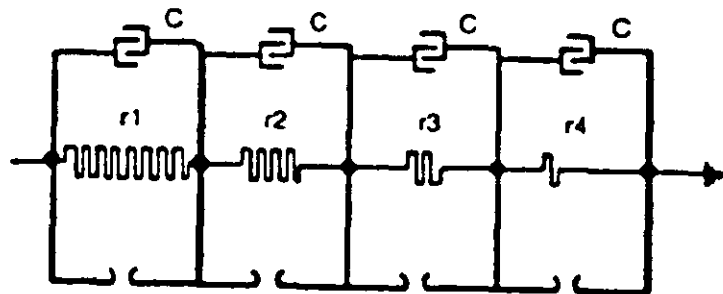


Figura 2

Como se puede observar, la mayoría de los suelos se comportan como un conductor de resistencia r y como un dieléctrico excepto para ondas de alta frecuencia y frente con mucha pendiente penetrando un suelo de material muy resistivo, la corriente de carga es despreciable en comparación con la corriente de fuga y la tierra puede representarse por una resistencia pura.

efecto típico de la sal común (Cloruro de Sodio), sobre la resistividad del suelo al contener 30% de humedad por peso

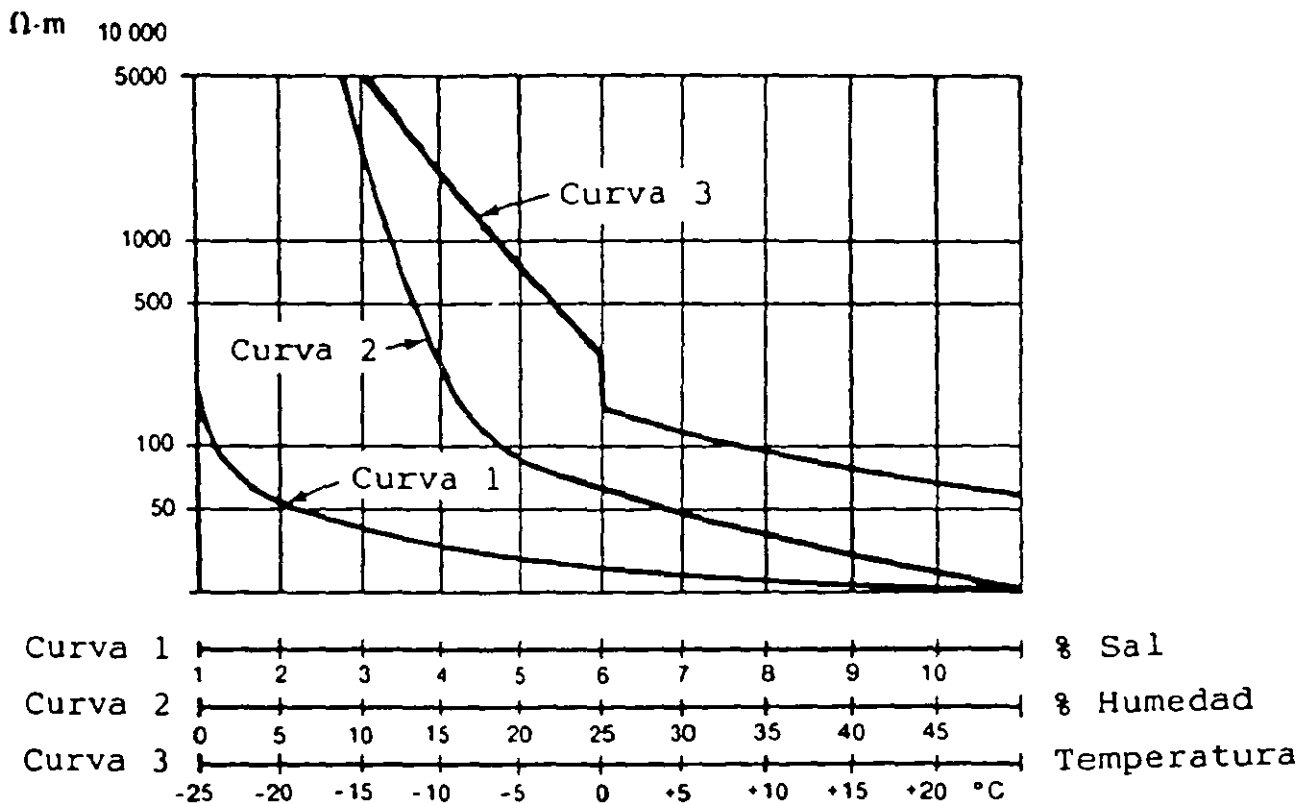


Figura 3

Técnicas de medición de la resistividad

La investigación en campo del lugar en que se va a ubicar una subestación, es esencial para determinar la composición general del suelo y obtener algunas ideas básicas acerca de su homogeneidad. Las muestras de campo para los estudios de Mecánica de Suelos son muy útiles, ya que proporcionan información sobre las diferentes capas del subsuelo y los materiales que las componen, dándonos una idea del rango de su resistividad.

El valor de la resistividad del suelo que se usará en el diseño de la red de tierras, generalmente se determina con pruebas de campo en el lugar donde se ubicará la subestación.

Debido a que existen variaciones en el sentido horizontal y vertical en la composición del suelo, es conveniente realizar las pruebas de campo en varios lugares del terreno. La mayor cantidad de datos obtenidos en las pruebas, nos permitirá seleccionar con más precisión el modelo de suelo a usar en el diseño de nuestra red.

Existen 2 métodos para la medición de la resistividad en el terreno:

- Método de 4 puntos o Método de Wenner

Si "A" y "B" se miden en cm. o en m y la resistencia R en Ohms, la resistividad estará dada en ohms.cm o en Ohms m respectivamente. Si la longitud "B" es mucho menor que la longitud "A", puede suponerse $B=0$ y la fórmula se reduce a

$$\rho = 2 \pi A R$$

Con estas formulas se obtiene la resistividad promedio del terreno, también considerada como resistividad aparente

Las lecturas obtenidas en campo pueden graficarse en función de su espaciamento, indicándonos en donde existen capas de diferente tipo de suelo con sus resistividades y profundidades respectivas

Electrodos no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger-Palmer

Una desventaja del método de Wenner es el decremento rápido en la magnitud de la tensión entre los 2 electrodos interiores cuando su espaciamento se incremento a valores muy grandes. Para medir la resistividad con espaciamentos muy grandes entre los electrodos de corriente, puede usarse el arreglo mostrado en la Figura No 4b

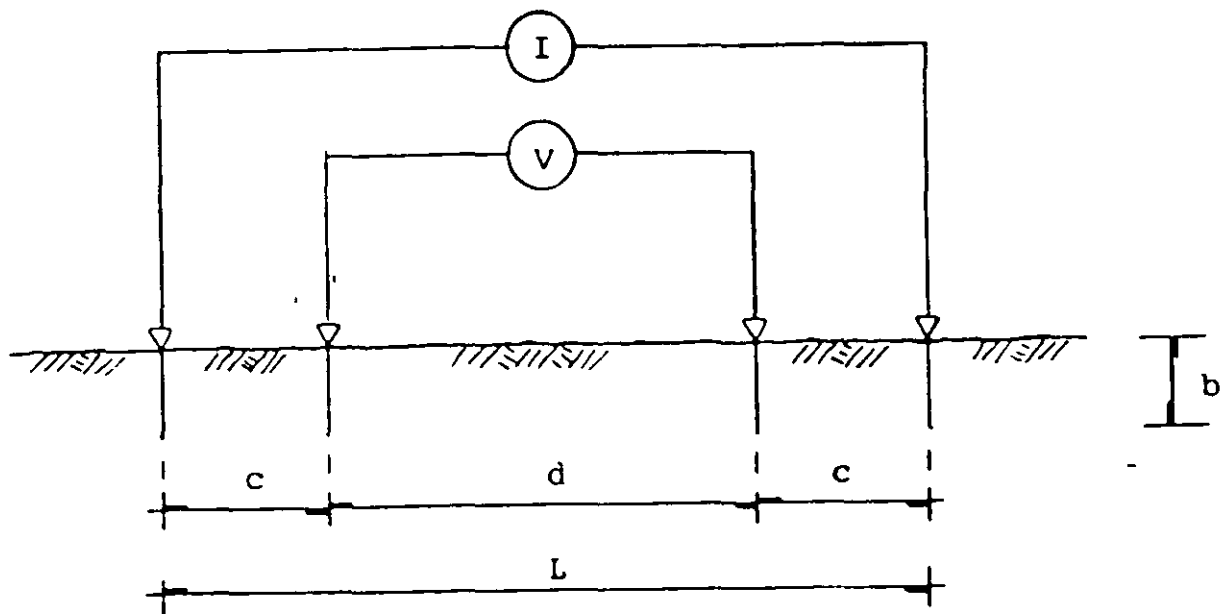


Figura 4 b

Los electrodos de potencial se localizan lo más cerca de los correspondientes electrodos de corriente, esto incrementa el potencial medido

La fórmula empleada en este caso se puede determinar fácilmente. Si la profundidad de los electrodos es pequeña comparada con la separación "d" y "c", entonces la resistividad aparente puede calcularse como

Para cada longitud L de la varilla, la resistencia R medida, determina el valor de resistividad aparente. Cuando este valor se grafica contra L , se observan las variaciones de la resistividad del terreno con la profundidad.

SINTOMA	CAUSA PROBABLE	REMEDIO
	Si las celdas se embarcaron con electrolito, no se ha aplicado carga de refresco por lo menos cada 3 meses a celdas con rejilla plomo-antimonio y cada seis meses a celdas con rejilla plomo-calcio lo que ha provocado sulfatación de las placas (conversión del sulfato de plomo suave en cristales duros, muy difíciles de reconvertir en peróxido de plomo, placa +, y plomo, placa -), durante su almacenamiento	de carga aumenta, por lo que se deben hacer correcciones para mantener la carga a régimen bajo. Si la temperatura alcanza los 43°C, detenga la carga hasta que las celdas se enfríen y luego continúe.
9 Pérdida de capacidad	Las celdas cargadas y secas se pueden almacenar durante varios años en un local seco, fresco y con baja humedad Algunas veces se puede detectar la sulfatación en los bordes de las placas. Para esto es necesario dirigir una fuente de luz a través de la celda hacia las placas, la luz que incide en los cristales duros de sulfato de plomo, se reflejará indicando la sulfatación	Mantenga la carga a régimen bajo mientras la g e aumente. Si la g e llega a 1 300, reemplace el líquido con a d y empiece de nuevo. Una vez que la g e deje de aumentar reemplace el líquido con electrolito nuevo, probablemente se tengan que hacer un par de ciclos de carga y descarga verificando la g e, si aumenta arriba del valor normal reemplace alguna parte del electrolito con a d y si cae demasiado (cuando este completamente cargada) agregue ácido suficiente, con densidad no mayor a 1 400, para llevar la g e al valor nominal Mantenga siempre la batería a plena carga para evitar la sulfatación.
10 Pérdida de capacidad	Mantenimiento inadecuado. Las baterías estacionarias se fabrican en varios tamaños, con diferentes mezclas, tipos de placa y gravidades específicas del electrolito, por lo que el mantenimiento recomendado para un tipo de batería no es el mismo para otro	Proporcionar mantenimiento requerido.
11. Pérdida de capacidad.	Las celdas se han llevado a la descarga profunda, dejando que el voltaje disminuya más allá del valor límite de 1 75 V. Esta clase de descarga es destructiva para las celdas	Este daño puede ser permanente
12 Pérdida de capacidad.	Crecimiento de la placa positiva con lo que se ha perdido el contacto íntimo entre la rejilla y la pasta (ver síntoma 60)	Reemplazar las celdas dañadas.
13 Pérdida de capacidad acompañada de sedimentos	Se ha dejado parte de las placas descubiertas al aire por lo que la pasta ha sufrido una sulfatación anormal con desmoronamiento Se pierde capacidad en forma proporcional a la cantidad de placa dañada.	Agregue agua para detener la destrucción y quede útil el resto de la placa, o bien, reemplazar las celdas dañadas, si la capacidad de estas celdas ya es insuficiente.

SINTOMA	CAUSA PROBABLE	REMEDIO
22 Las celdas no retienen carga y las placas presentan un color blanquecino	En la elaboración del electrolito, no se usaron ácido sulfúrico y agua con la calidad mencionada en las normas NOM K-2 y NOM-J-181 respectivamente, o bien, el agua empleada para reposición no es desmineralizada y contiene cloruros, principalmente de calcio, el cual al reaccionar con el ácido sulfúrico originó sulfato de calcio (de color blanquecino)	Reemplazar celdas dañadas
4. CONEXIONES FLOJAS		
23 Las conexiones de las celdas terminales o sus postes están flojas	Los conductores que conectan la batería al cargador o a la carga son rígidos, por lo que pueden estar ejerciendo esfuerzo o tensión, o bien, transmitir vibraciones a los postes de las celdas	Usar cables flexibles y que estén soportados, para conectar las celdas terminales De la misma manera, las conexiones eléctricas entre celdas, instaladas en diferentes niveles o estantes, deben hacerse con cables flexibles, de tal manera que se reduzcan los esfuerzos mecánicos en los postes de las mismas.
5. CONEXIONES, INCREMENTO EN LA RESISTENCIA DE		
24 Incremento en la resistencia de las conexiones o terminales muy calientes	Puede deberse a corrosión, suciedad o alojamiento de las conexiones Una resistencia alta en las conexiones, si no es detectada a tiempo, puede causar daño severo a las celdas cuando sea necesario descargar la batería con altas corrientes, asimismo, el comportamiento de la batería puede verse seriamente afectado si los postes terminales presentan fuerte corrosión. Valores en la resistencia de las conexiones que excedan en 20% al que tenía en su instalación, acortan la vida útil de la batería	Limpiar y apretar conexiones a los valores recomendados por el fabricante La resistencia de las conexiones es una de las verificaciones más importantes, pero a menudo es descuidada. Puede llevarse a cabo con la batería en servicio, empleando equipo normalmente usado para medir la resistencia de contacto de los interruptores. Esta medición se debe repetir periódicamente, de preferencia cada año y comparar los resultados con las mediciones anteriores.
6. DEGRADACION.		
25 Degradación	La degradación (La capacidad de la batería ha descendido más del 10% de la capacidad nominal promedio obtenida en pruebas de comportamiento previas, o bien, es inferior al 90% de la capacidad nominal de fábrica), puede deberse a envejecimiento, serios problemas internos o sulfatación (ver síntoma 9)	A la batería o celdas con signos de degradación, efectuarles cada año prueba de comportamiento. Cuando los resultados de las pruebas no sean satisfactorios, aún después de haber aplicado acciones correctivas, reemplazar las celdas dañadas.

SINTOMA	CAUSA PROBABLE	REMEDIO
		La rapidez con que se desarrolla el hidrógeno debe ser inferior a 0.028 m ³ /minuto por ampere de carga a 25°C y una atmósfera.
10. GASIFICACION.		
33 Las celdas gasifican cuando están en circuito abierto o en estado de flotación	Esto puede ser indicativo de fuertes acciones locales o voltaje de flotación insuficiente En estos casos la gasificación se originará en las placas negativas y la producirá el material activo o pasta, por el sulfato de plomo formado a medida que la celda se descarga.	Verificar que la grav. esp. del electrolito no esté alta, ya que las acciones locales se incrementan con la grav. esp., o bien, elevar la tarifa de flotación a los valores recomendados por el fabricante.
34 Las celdas gasifican excesivamente durante la carga de igualación	Aunque la gasificación en la carga es normal, una gasificación excesiva puede indicar sobrecarga. Las celdas comienzan a gasificar cuando el voltaje de las celdas está entre los 2.20 y 2.30 V, es moderada a los 2.40 V muy pesada a los 2.50 V	Cargar la batería a los valores recomendados por el fabricante.
35 Las celdas no gasifican durante la carga.	Si las celdas no gasifican durante la carga puede ser que la carga sea insuficiente	Cargar la batería a los valores recomendados por el fabricante
36 Las celdas no gasifican durante la carga.	Si las celdas no gasifican aun cuando se apliquen los valores de carga recomendados por el fabricante, puede haber cortos circuitos en las celdas o impurezas en el electrolito	Si existen cortos circuitos, reemplazar las celdas. Si el problema está en el electrolito, cambiarlo
11. GRAVEDAD ESPECIFICA		
37 La gravedad específica es incorrecta después de haber hecho correcciones por temperatura y nivel	Las lecturas de la grav. espec. son erróneas si se toman cuando la batería se está cargando, durante un período relativamente corto después de una carga de igualación, después de una descarga, o después de agregar agua.	Todas las inspecciones se deben hacer durante condiciones normales de flotación. Es decir, que la batería haya estado, cuando menos, 72 horas en voltaje de flotación luego de aplicar carga igualadora o de refresco
38 La gravedad específica es incorrecta.	Al tomar la lectura, el hidrómetro no se mantiene en posición vertical	Tomar la lectura con el hidrómetro en posición vertical, permitiendo que flote libremente y sin tocar ninguna parte.
39. La gravedad específica del electrolito es baja después de haber aplicado carga de igualación y hacer correcciones por temperatura.	Si las celdas perdieron electrolito por alguna razón, es posible que no se haya reemplazado esa cantidad perdida con electrolito, sino con agua.	Reemplace parte del electrolito con ácido sulfúrico que tenga una gravedad específica no mayor de 1.400. Aplique carga de igualación tomando las últimas lecturas sin cambio cada 15 min.

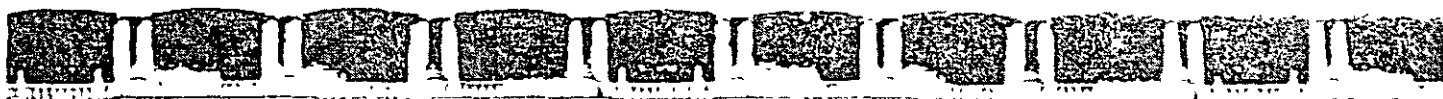
SINTOMA		CAUSA PROBABLE	REMEDIO
46	La gravedad específica es baja	Las celdas con grav esp baja usualmente se encuentran en la sección más caliente de la batería.	Hacer correcciones por temperatura y eliminar las fuentes de calor (ver síntoma 44)
47	La gravedad específica es baja.	Todas las baterías pierden un poco de carga durante su transportación y almacenamiento	Aplicar carga de refresco. Si después de la carga de refresco y de 72 horas en flotación, alguna celda exhibe una gravedad específica, corregida por temperatura y por nivel, inferior a 1.200 o superior a 1.220, se debe ejercer una acción correctiva de acuerdo con las instrucciones del fabricante
48	La gravedad específica es alta.	La gravedad específica aumentó por la pérdida de agua, debido a evaporación o electrólisis (provocada por la corriente de carga) La grav esp aumentara aproximadamente 15 puntos (0.015) cuando el nivel del electrolito haya descendido .13 mm	Cuando se tomen las lecturas de la grav esp, los niveles del electrolito también deben medirse y registrarse para hacer las correcciones por nivel
49	La gravedad específica es alta después de hacer correcciones por temperatura y por nivel	Se agregó electrolito en vez de agua para reponer el agua perdida por evaporación y electrólisis	Retirar parte del electrolito con una jeringa y remplazarlo con agua desmineralizada. Después aplique carga de igualación para que la gasificación mezcle el electrolito
50	La gravedad específica es alta.	La carga de igualación produce gasificación, lo que ocasiona cambios en la grav esp del electrolito	Tomar la lectura después que la batería haya estado un mínimo de 72 horas en flotación
12. HIDRATACION.			
51	Hidratación. Se ha formado un anillo blanquecino alrededor de la celda aproximadamente a la mitad de la altura de las placas	La causa es una descarga fuerte o profunda de la batería sin haberla recargado inmediatamente. Ocurre cuando el plomo y sus compuestos en la celda se disuelven en el agua, creada durante la descarga, para formar plomo hidratado. Este se deposita en los separadores y cuando la batería se recarga, origina miles de cortocircuitos entre las placas positivas y negativas. La hidratación también puede ocurrir si las celdas cargadas y envidas secas, accidentalmente se llenan con agua en lugar de electrolito	Una vez que la hidratación se presenta el daño es irreversible, por lo que se deben reemplazar las celdas dañadas

15. PLACAS		
SINTOMA	CAUSA PROBABLE	REMEDIO
57 La placa positiva se ha oscurecido	En buenas condiciones la placa positiva debe tener un color que varíe del café oscuro al chocolate Entre más oscuro sea el color de la placa positiva, es más probable que la batería ha sido sobrecargada.	Cargar la batería siguiendo las recomendaciones del fabricante
58 La placa negativa se ha oscurecido	En buenas condiciones la placa negativa debe ser de color gris Con el envejecimiento la placa negativa tiende a oscurecerse	Efectuar prueba de capacidad a la celda. Si la capacidad no es la adecuada, reemplazar las celdas dañadas
59 Placas desprendidas	Si las placas se han desprendido de los puentes que las conectan, se debe a vibraciones, ya sean por actividad sísmica o de otra índole	Reemplazar celdas dañadas y evitar que las vibraciones lleguen a las celdas. Para minimizar el efecto de los sismos y vibraciones, las baterías deben instalarse a la menor altura práctica posible El anclaje de los estantes, a ambos piso y muros, debe evitarse; con el fin de prevenir esfuerzos originados por modos de vibración antagónicos o encontrados.
60 Las placas positivas han aumentado de tamaño	La causa no se conoce todavía y el crecimiento puede ser peculiar Este crecimiento se debe más a la rejilla que a la pasta o material activo.	Reemplazar las celdas dañadas, ya que una consecuencia de este crecimiento es que se rompa el contacto íntimo entre rejilla y pasta, ocasionando mayor resistencia eléctrica y pérdida de capacidad.
61 Las placas negativas han reducido su tamaño	Reinstalación del plomo suave en cristales de plomo duro más pequeños	Reemplar las celdas dañadas.
62 Deformación o pandeo de las placas	Crecimiento de la pasta o material activo, debido a una descarga profunda (más allá de los límites permitidos) o a una sulfatación severa Cuando una batería sufre una descarga profunda, se forma una cantidad masiva de sulfato de plomo. Puesto que el sulfato ocupa más espacio que el peróxido de plomo que reemplaza, los cristales de sulfato crecen en los poros Cuando los poros se tapan, se crean fuerzas que deforman las placas de una u otra manera	Evitar que la batería se descargue más allá de los límites recomendados.
63 Placas cortocircuitadas en la parte superior	La gasificación durante la carga ha agitado los sedimentos, depositándolos en la parte superior de las placas y separadores (ver síntoma 52) La reducción electrolítica puede reducir estos sedimentos, a cristales duros, en forma de árboles o musgo, que pueden cortocircuitar las placas	No se permita llegar a la gasificación excesiva durante la carga.

SINTOMA		CAUSA PROBABLE	REMEDIO
72.	Sedimentos de color marrón o café oscuro	Se ha permitido que las celdas alcancen temperaturas elevadas	Evite que las celdas rebasen los 38°C
73.	Sedimentos	Otra causa de sedimentos excesivos (en la ausencia de sobrecarga o baja carga) es la vibración No se debe ignorar esto ya que puede reducir la vida de servicio de la batería.	Evitar que las vibraciones lleguen a la batería (ver síntoma 59)
18. TEMPERATURA			
74	Las celdas se calientan mucho al cargarlas	La gasificación está originando excesivo calor, particularmente en la placa negativa El ácido se vuelve excesivamente fuerte, por lo que la difusión no se puede realizar con la debida rigidez más allá de las placas. El exceso de ácido en la superficie de la placa reduce la rapidez de conversión del sulfato, haciendo a las celdas más difíciles de cargar La gasificación es un proceso autodestructivo	Evitar que las celdas rebasen los 38°C durante la carga. Si alguna celda rebasa los 38°C, parar la carga y permitir que las celdas se enfrien antes de continuar
75	Las celdas se calientan mucho, particularmente las terminales	Conectores intercelda flojos, atacados por la corrosión o sucios	Limpia y apretar los conectores intercelda.
76	Celdas con alta temperatura.	Usualmente son causadas por cortos circuitos internos, lo cual también es evidente por el bajo voltaje de la celda	Reemplazo de las celdas dañadas.
77.	Celdas con alta temperatura.	Condiciones exteriores que son parte de la instalación La operación a temperaturas altas, aunque no disminuye la capacidad de la batería, si acorta su vida.	Evitar fuentes de calor tales como, rayos solares, radiadores, tuberías calientes, calentadores, motores, etc.
78	Las celdas se calientan mucho al cargarlas	El electrolito contiene ácido sulfúrico en exceso.	Reemplazar parte del electrolito por agua desmineralizada.
79.	Celdas con alta temperatura	La temperatura ambiente en el cuarto de baterías es elevada lo cual ocasiona una reducción en la vida esperada de la batería.	Si las temperaturas en el cuarto de baterías tienen un promedio ambiente de 32°C por más de 30 días en el año, se recomienda bajar la densidad a plena carga, de 1.210 a 1.170, y el voltaje de flotación a 2.12 V/celda, con el fin de conservar la vida esperada de la batería (consultar fabricante). La temperatura óptima del electrolito es de 25°C. Esta temperatura es la base para la capacidad nominal y si es mantenida se contribuirá para que la batería alcance su vida óptima, mejor comportamiento y menor costo de operación.

SINTOMA		CAUSA PROBABLE	REMEDIO
			cuyo caso, esta prueba se debe efectuar anualmente La prueba de servicio, cuando se requiera satisfacer una aplicación específica de la instalación, o cuando se quiera verificar la capacidad de la batería para satisfacer las condiciones de diseño del sistema de corriente directa.
88	La vida de la batería se ha reducido	La temperatura del electrolito afecta la vida de la batería Una regla de dedo indica que la vida de la batería se reducirá a la mitad por cada 8.3°C (15°F) que trabaje, arriba de los 25°C (77°F)	Bajar la temperatura de operación de la batería
89	Reducción en la vida de la batería.	Se está empleando un voltaje de carga o de flotación elevado, lo que está ocasionando una sobrecarga y disminución en la vida esperada de la batería	Ajustar el voltaje de carga o de flotación, a los niveles recomendados por el fabricante. El mantenimiento adecuado prolonga la vida útil de la batería.
90	Reducción en la vida de la batería.	La operación prolongada de la batería, con un voltaje inferior a 2.13 V/celda, puede reducir la vida esperada de la batería. Aparentemente existe una zona muerta, de 2.05 a 2.15 V, en donde la celda se carga muy poco o se descarga. Cuando el circuito exterior o carga conectado a la batería disminuye el voltaje abajo de los 2.05 V/celda, la batería entrega potencia y cuando se vuelven a poner las celdas arriba de los 2.15 V, la batería se recarga.	Aplicar carga de igualación y ajustar el voltaje de flotación a los niveles recomendados por el fabricante
91	Reducción en la vida de la batería.	Se ha operado la batería durante un período de tiempo largo, con el nivel del electrolito en la línea de nivel bajo	Agregar agua desmineralizada.
92	Reducción en la vida de la batería.	Se ha permitido operar la batería durante un período largo con un valor en la resistencia de los conectores inter-celda o de las conexiones terminales, que excede en un 20% al que tenía en su instalación Este incremento en la resistencia puede deberse a corrosión, suciedad o aflojamiento de las conexiones.	Limpiar y apretar conexiones a los valores recomendados por el fabricante. La resistencia de las conexiones es una de las verificaciones más importantes, pero a menudo es olvidada. Puede llevarse a cabo con la batería en servicio, empleando instrumentos normalmente usados para medir la resistencia de contacto de los interruptores. Esta prueba o verificación se debe repetir periódicamente, de preferencia cada año.
93	Reducción en la vida de la batería.	La batería ha operado durante un período largo, con una diferencia de temperatura entre celdas mayor a los 2.8°C (5°F)	Eliminar la causa de la diferencia de temperatura entre celdas.

SINTOMA	CAUSA PROBABLE	REMEDIO
99. En algunas celdas el voltaje es inferior a 0.05 volts del promedio de la batería, estando en flotación.	Puede deberse a temperatura elevada del electrolito (ver síntoma 98).	Proporcionar carga igualadora y eliminar la causa.
100. Al iniciar la descarga, las celdas tienen un voltaje inferior a 2.0 V durante unos minutos y después se recuperan.	Este suceso no es indicativo de falla, es el comportamiento normal de las baterías plomo-ácido.	
101. Aproximación a la inversión de polaridad.	Si durante las pruebas de aceptación o comportamiento, alguna celda se aproxima a la inversión de polaridad ($+1.0$ V ó menos), posiblemente la celda esté dañada.	Investigar la causa y si efectivamente está dañada la celda, reemplazarla.
102. Celdas con alto voltaje en estado de flotación.	Esta condición puede existir, cuando se han reemplazado algunas celdas por nuevas, en una batería usada.	No hay perjuicio asociado con el hecho de que alguna celda tenga un voltaje de flotación superior al del promedio de las otras celdas en la batería, excepto cuando el voltaje de la celda iguala ó excede el voltaje de gasificación. Aplicar carga de igualación a la batería.



FACULTAD DE INGENIERIA UNAM
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

CURSOS INSTITUCIONALES

SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Del 03 al 26 de Octubre de 2006

APUNTES GENERALES
-MOTORES-

CI - 215

Instructor: Ing. Alfredo Nava Rodríguez
Instituto de Educación Media Superior
Octubre de 2006

CAPÍTULO VI

MOTORES

1.—GENERALIDADES

Los motores eléctricos transforman energía eléctrica en energía mecánica y por lo tanto su aplicación está definida por las características que imponen los requerimientos de la carga mecánica. Por esto el problema de aplicación de motores se basa principalmente en cálculos mecánicos que utilizan las leyes fundamentales de esta ciencia. En los ejemplos que se desarrollan en este Capítulo, se ilustra esta técnica, cuyos fundamentos podemos resumir en las siguientes fórmulas básicas de mecánica:

1.—Energía Cinética

$$\begin{aligned}\text{Rotación} &= \frac{1}{2} I \omega^2 \\ \text{Translación} &= \frac{1}{2} M v^2\end{aligned}$$

2.—Trabajo:

$$\begin{aligned}\text{Rotación} &= T O \\ \text{Translación} &= F d\end{aligned}$$

3.—Potencia:

$$\begin{aligned}\text{Rotación} &= T \omega \\ \text{Translación} &= F v\end{aligned}$$

4.—Par y Fuerza:

$$\begin{aligned}T &= I \alpha \\ F &= M a\end{aligned}$$

5.—Tiempo de Aceleración:

$$t = \frac{WK^2 (N_1 \cdot N_2)}{308T} \text{ seg.}$$

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

I.—Momento de Inercia.

ω .—Velocidad Angular.

M.—Masa.

T.—Par.

F.—Fuerza.

α .—Aceleración Angular

v .—Velocidad.

a .—Aceleración.

N.—Velocidad de Rotación en rpm.

t .—Tiempo en segundos.

2.—MOTORES DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA

La Asociación de Manufactureros Eléctricos "NEMA" clasifica los motores de inducción jaula de ardilla como sigue:

Clase	Par de arranque	Cte. en el arranque	Deslizamiento a plena carga	Notas	Aplicación
A	Normal	Normal	Bajo < 5 %	Pueden requerir arrancadores a voltaje reducido	Máquinas herramientas, ventiladores, bombas, compresores y transportadores arrancados sin carga.
B	Normal	Baja	Bajo < 5 %	Motores para arranque directo sobre la línea.	Igual que la Clase A con menor corriente de arranque
C	Alto 200 % de p.c.	Baja	Bajo < 5 %	Motores para arranque directo sobre la línea.	Bombas de émbolo, transportadores arrancados con carga
D	Alto 275 % de p.c.	Baja	Alto 5-8 8-13 %	Rotores de alta resistencia	Elevadores, prensas.
F	Bajo	Muy Baja	Bajo < 5 %		Motores de alta velocidad para ventiladores.

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

Pérdidas en el arranque.

La mitad de la energía suministrada al rotor durante el arranque se disipa como pérdidas. La otra mitad constituye la energía cinética almacenada en las partes giratorias.

Las pérdidas durante el período en que un motor para e invierte su velocidad son cuatro veces las del período de arranque.

La expresión de la energía disipada por el rotor en el arranque es:

$$W = 0.000231 WR^2 (S_1^2 - S_2^2) \text{ (rpm sincr.) watt-seg.}$$

Donde S_1 es el deslizamiento inicial y S_2 el final. Esta fórmula muestra como la energía perdida en el arranque normal se triplica al detener el motor invirtiéndolo y se cuadruplica al acelerarlo en sentido contrario. Una consecuencia de esta fórmula, es la recomendación de los motores de alto deslizamiento para servicio que requieren frecuentes arranques y posibles inversiones.

Pérdidas normales.

Las pérdidas en el rotor son el producto del deslizamiento por la potencia suministrada al rotor

Características generales.

Las características de los motores varían con el voltaje y la frecuencia de la línea que los alimenta. La tabla siguiente contiene las variaciones aproximadas producidas por cambios en el voltaje y frecuencia de alimentación.

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

Los valores dados son promedios y pueden variar ligeramente en casos concretos. Las variaciones están expresadas en por ciento de los valores normales. Esta tabla puede guiar en la localización de defectos que deban achacarse a los circuitos de alimentación.

Las cualidades de los tres tipos de motor y su habilidad para satisfacer las aplicaciones que les son peculiares se deben al diseño de cada uno de ellos. El motor clase II emplea un rotor doble con una jaula exterior de alta resistencia y una interior normal que en el arranque es de alta reactancia y rechaza la corriente hacia el devanado exterior, obteniéndose así el alto par de arranque. Este motor está diseñado fundamentalmente para los casos en que se desea una reducida corriente de arranque y el conseguirla con voltaje bajo disminuye el par al grado de no poder mover la carga.

El motor de alto deslizamiento emplea un rotor con aleaciones tipo bronce o latón de alta resistencia. Debido a esto tiene un alto par de arranque que lo hace adaptable a las cargas cíclicas que requieren aceleraciones frecuentes e inversiones, ya que arranca rápido y reduce las pérdidas considerablemente, evitando calentamiento. En cambio, el alto deslizamiento significa baja eficiencia por lo que no es recomendable para operación a plena carga continua.

3—CONTROL DE MOTORES EN JAULA DE ARDILLA

Arranque Directo

El control más económico y más empleado para los motores de inducción jaula de ardilla es el arranque directo sobre la línea. Este tipo de control tiene como inconveniente la aplicación súbita de un par mayor que el de plena carga que puede dañar la flecha y la variación de voltaje en la línea, del motor debida a la caída producida por la alta corriente de arranque del mismo. Estas depresiones ocasionan parpadeo de las lámparas y pueden hacer que otros motores se paren. Por estas razones las Cías. de Luz objetan el uso de arrancadores de línea con motores de tamaños medianos, mientras que en las fábricas que poseen sus propias plantas o subestaciones es el método comúnmente empleado.

El dispositivo para arrancar sobre la línea consiste en un juego de contactos de material resistente al arqueo los cuales se conservan cerrados por la fuerza producida por una bobina de cierre, mientras está energizada. La apertura automática de estos contactos por sobrecarga se efectúa mediante unos relevadores que son de tipo térmico en los tamaños chicos y medianos y magnético en los grandes (tamaños 4 y mayores). Estos relevadores interrumpen la alimentación de la bobina de cierre, con lo cual los contactos caen. Los de tipo térmico tienen una característica tiempo corriente paralela a la del motor de tal manera que permiten utilizar la capacidad

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

El arrancador seleccionado deberá satisfacer las condiciones siguientes:

- 1.—Producir mínima perturbación en el sistema.
- 2.—Proporcionar el par de arranque necesario.
- 3.—Ajustar automáticamente corriente y voltaje con la velocidad del motor.
- 4.—Tener bajo costo.
- 5.—Permitir selección del par de arranque.
- 6.—Consumir poca energía.
- 7.—Requerir poco mantenimiento.

A continuación tabulamos los 4 métodos y las 7 condiciones, marcando con una x las que cumple cada uno:

Método	<u>Condición</u>						
	1	2	3	4	5	6	7
Resistencia	x	x	x	—	x	—	—
Reactancia	x	x	x	—	x	x	x
Autotransformador	x	x	—	x	x	x	—
Estrella-Delta	x	—	—	—	—	x	—

El cuadro anterior muestra por qué el método de autotransformador es el normalmente usado. El método de resistencia requiere una grande capaz de disipar las pérdidas. El reactor suele ser voluminoso y debe ser adecuado a cada clase de motor. Suele emplearse en los motores de más de 200 HP.

El autoarrancador tamaño 2 y mayor tiene derivaciones de 50, 65 y 80% del voltaje total y permite 6 conexiones que proporcionan desde 25 a 75% del par de arranque a pleno voltaje. Se dispone en forma de dos devanados en delta abierta con los cuales pueden hacerse las siguientes combinaciones de derivaciones en cada pierna:

50 — 50
 50 — 65
 65 — 65
 65 — 80
 80 — 80
 80 — 100

Esta diversidad de conexiones permite la selección de un par de arranque que se adapte a la carga. Al decidir la conexión más adecuada debe tenerse en cuenta la proposición que produzca la perturbación mínima en la línea, considerando no sólo el arranque sino también la transferencia. Para ilustrar esto, va el siguiente caso:

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

Dibujando las gráficas par-velocidad y corriente-velocidad del motor a 100, 80, 65 y 50% voltaje y la par-velocidad de la bomba, podemos determinar las corrientes en el instante de la transferencia. De la gráfica tenemos:

	Derivación	Cte. arranque %	Cte. transfe- rencia %	Perturbación Val. Máx. %
	80	384	110	384
100 % carga	65	252	250	252
	50	150	430	430
	80	384	60	384
50 % carga	65	252	75	252
	50	150	170	170

Estos valores muestran que para arranque normal, la derivación que da la perturbación mínima es la de 65% y que para arranque con válvula de descarga cerrada, la de 50%.

Los arrancadores de autotransformador tienen su capacidad basada en los siguientes ciclos:

200 HP o menos: un arranque de 15 seg. cada 4 minutos durante 1 hora con una carga inductiva (F. P. 50%) de 3 veces la corriente normal del motor conectado a la derivación de 65%, con un total de 4 ciclos.

Mayor de 200 a 2000 HP: 3 periodos de 30 segundos separados por intervalos de 30 segundos y seguidos de un descanso de 60 minutos, seguidos de otro ciclo de 3×30 segundos con intervalos de 30 segundos.

En aplicaciones especiales puede ser necesario verificar el tiempo de arranque, a fin de determinar si se sobrecarga el arrancador. El caso siguiente ilustra cómo hacer esto:

PROBLEMA. Una prensa tiene un volante de fierro fundido de 48" de diámetro con una llanta de 6" $\times$ 8" y gira a 720 rpm sin carga con una relación de 2.5 a 1 entre motor y volante. La prensa está acoplada por banda a un motor de inducción jaula de ardilla de 15 HP, 1650 rpm tipo prensa cuyo WR^2 es 2.30. El par de arranque del motor es 170 pies-libras y el máximo de 145 pies-libras a 55% de la velocidad y sin carga de fricción en la máquina. Determinar el tiempo para acelerar el motor y volante hasta la velocidad síncrona.

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

Desventajas

1. Costo inicial más alto que el jaula de ardilla aunque el control es más barato que un autotransformador para éste.
2. Necesidad de control en el rotor.
3. Ocupa más espacio.
4. Construcción más complicada del rotor, reparación más cara.
5. Produce chispas en los colectores del rotor que pueden producir incendios.

Cuando el arranque es con cargas bajas e infrecuente, y la carga opera a velocidad constante y no hay restricciones acerca de perturbaciones en la línea, el motor de inducción jaula de ardilla es el indicado. Cuando hay que arrancar cargas pesadas o demasiado frecuentes y las líneas de alimentación son afectadas por los disturbios, el motor de rotor devanado es preferible.

Más específicamente, las aplicaciones donde el rotor devanado es más adecuado son:

- 1.—Arranque con perturbación mínima.
- 2.—Operación que requiere cambio de velocidad.
- 3.—Operación con alto par de arranque (transportadores, trituradores).
- 4.—Cargas pulsantes con volante (compresores de aire).
- 5.—Donde se puede necesitar frenado regenerativo (elevadores, grúas).
- 6.—Para cargas cíclicas, reemplaza con ventaja al motor de jaula de ardilla de alto deslizamiento.

El motor de rotor devanado es *no* satisfactorio:

- 1.—Donde un motor jaula de ardilla sea adecuado. Este por su simplicidad y bajo costo es el más popular de todos los motores.
- 2.—Donde se necesite una gran diversidad de velocidades, debido a su mala regulación a velocidades bajas. En estos casos el motor de corriente directa es el indicado.
- 3.—En baja velocidad, la eficiencia y regulación son muy bajas. Debe evitarse por lo tanto esta situación.

Una lista de aplicaciones del motor de inducción de rotor devanado es la siguiente:

Velocidad constante

Compresores.

Molinos de harina.

Transportadores de banda.

Propulsión de navíos.

Locomotoras

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

La operación de corte de la prensa reduce la velocidad de 1800 a 1600. El volante cede una energía de

$$\frac{860.3 \times 1800 \text{ rpm} \times (1800 - 1600)}{32.2 \times 550} = 174 \text{ HP segundos}$$

Si la operación dura un segundo, el par medio desarrollado por el motor es

$$\frac{860.3}{308} \times \frac{(1800 - 1600)}{1} = 560 \text{ p.l.}$$

y el desarrollado por el volante es

$$\frac{174 \times 5250}{\text{velocidad media}} = \frac{174 \times 5250}{1700} = 539 \text{ p.l.}$$

Si se usara un autotransformador para el arranque en la derivación de 80%, el tiempo necesario para la aceleración sería

$$\frac{46.6}{0.64} = 73 \text{ seg.}$$

y no sería satisfactorio usar un arrancador normal que puede efectuar 15 arranques de 15 segundos con espacios de 3 minutos 45 segundos en una hora.

PROBLEMA. Un motor de elevador normalmente requiere 2 minutos para acelerar a plena velocidad y 2 minutos para parar, vaciar y recoger. Suponiendo la fricción muy pequeña, con una reducción de 10% en el voltaje de la línea, ¿cuántas cargas por hora se obtendrán y qué porcentaje de la producción se obtendrá?

$$\text{A pleno voltaje se obtienen } \frac{60}{4} = 15 \text{ ciclos por hora.}$$

El par medio es 81% del anterior con 10% de reducción de voltaje en la línea. El motor tomará $\frac{1}{.81}$ tiempo extra para acelerarse o sea 25% más tiempo o sea .5 min.

La producción ahora es a $\frac{60}{4.5} = 13.3$ ciclos por minuto o sea un $\frac{13.3}{15} = 89\%$ de lo normal.

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

Trituradoras de piedra.

Maquinaria para papel, calendereadores.

Rodillos principales en laminadoras.

Velocidad variable

Grúas.

Elevadores.

Motores-generadores con volante.

Descargadores de carbón y mineral.

Palas eléctricas.

Y en general todas las que requieran pares de arranque altos con corrientes de arranque pequeñas. El motor de rotor devanado tiene la eficiencia de par más alto de los de inducción (el mayor par de arranque por unidad de corriente de arranque), pudiéndose obtener el par de plena carga en el arranque con la corriente normal como corriente de arranque. Esto representa una eficiencia de 100% mientras que el motor jaula de ardilla clase B tiene una eficiencia de 25%.

Los siguientes ejemplos ilustran algunos puntos de interés en conexión con la aplicación de los motores de inducción de rotor devanado.

Ejemplo No 1.

Un motor de rotor devanado de 50 HP, 1750 rpm tiene las siguientes características:

Carga	¼	½	¾	Plena carga
Factor de Potencia %	70	81	89	90
Eficiencia %	78	86	88	88

Si este motor se usa para mover una carga con par constante y su control permite incluir suficiente resistencia en el rotor para reducir la velocidad hasta ½ de la de plena carga, las pérdidas en kilowatts en la resistencia externa y la eficiencia del conjunto para 50% de carga son:

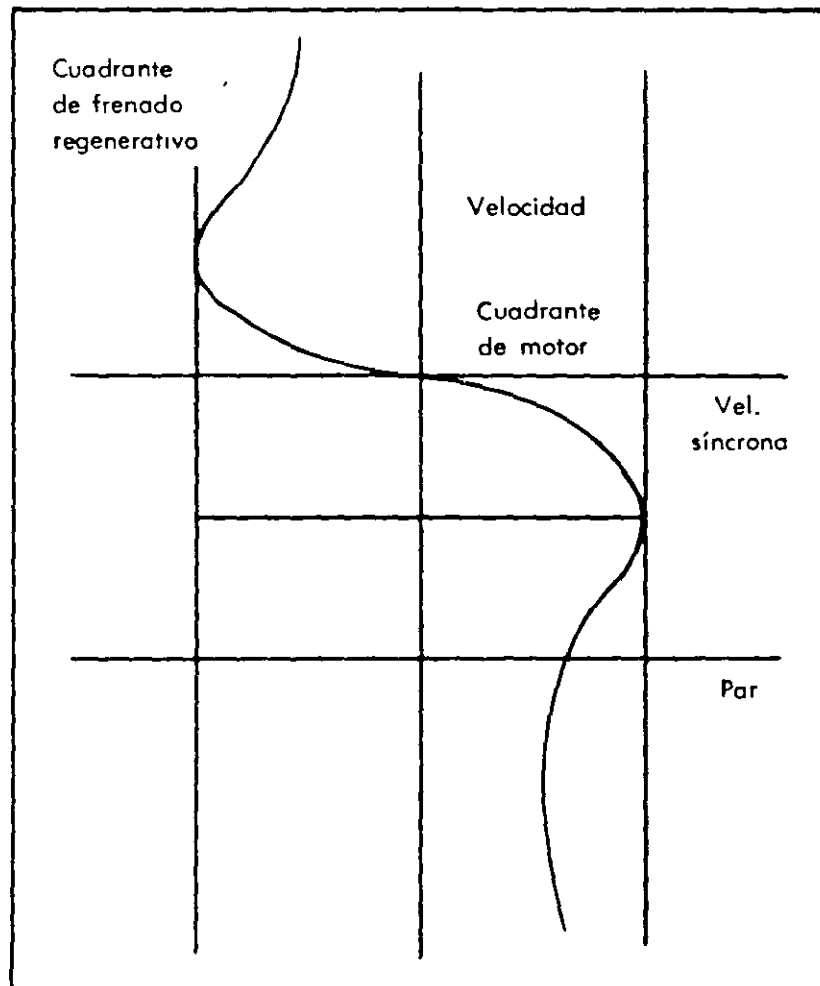
$$\text{Energía recibida por el rotor} = T \times W_s$$

$$\begin{aligned} \text{Energía recibida por el rotor} &= T \times W \\ &= \text{Par del rotor} \times \text{Velocidad síncrona.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energía cedida por el rotor} &= T \times W \\ &= \text{Par del rotor} \times \text{Velocidad actual.} \end{aligned}$$

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

Este frenado opera como sigue: está basado, en el hecho que a velocidades superiores a la síncrona el motor se comporta como generador devolviendo energía a la línea, según se ve en la curva siguiente, en la cual se ve que el par cambia de signo con respecto a la velocidad arriba de la velocidad de sincronismo.



Insertando resistencia se acelera la bajada de la carga, o sea que se obtiene el efecto contrario de la operación como motor. El control de tambor permite seleccionar la velocidad de bajada disminuyendo la resistencia para decelerar. Es aconsejable no exceder 150% de la velocidad de sincronismo en el frenado regenerativo.

Aplicaciones especiales.

Además del uso normal como motor, los motores de rotor devanado pueden ser usados como cambiadores de frecuencia. Si se alimenta el estator a voltaje y frecuencia normales y se hace girar el rotor desde el exterior, se tiene en los anillos colectores una frecuencia y voltaje que dependen de la velocidad y sentido de rotación. Operando en estas condiciones se tiene lo que se llama un cambiador de frecuencia, el cual tiene bastante aplicación en la industria de trabajos en metal o madera y en general en donde se requieren generadores que no excedan 100 Kw.

5.—MOTORES SÍNCRONOS

Los motores síncronos se usan para mover cargas a velocidad constante debido a las siguientes ventajas:

- Corrección de factor de potencia. Los Kva reactivos de un motor síncrono son menos costosos que los capacitores.
- Alta eficiencia. La eficiencia del motor síncrono es de 1 a 3% mayor que la del motor de inducción debido a la ausencia de deslizamiento y corriente de excitación. Las pérdidas de C. D. son de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{3}$ de las del rotor del motor de inducción.
- Bajo costo. Las mayores tolerancias de entrehierro hace más económica su construcción. El entrehierro de un motor síncrono es dos a tres veces el de un motor de inducción.
- Posibilidad de frenado dinámico. Este consiste en mantener el campo alimentado con el estator abierto, de tal manera que la reacción de las corrientes parásitas frena el rotor.
- Las características especiales de arranque no perjudican la eficiencia a carga normal como en el motor de inducción de alto deslizamiento.

En la especificación de motores síncronos, intervienen las características siguientes:

1. *Par a rotor bloqueado*. Este es el par mínimo que desarrolla estando parado, en todas las posiciones del rotor, cuando el estator está alimentado a frecuencia y voltaje normales.

2. *Par de sincronismo*. Este es el máximo par bajo el cual el motor puede llevar su carga a la velocidad de sincronismo, cuando con voltaje y frecuencia normales se le aplica excitación en el campo. El valor nominal de este par es el que desarrolla como motor de inducción a 95% de la velocidad de sincronismo, a frecuencia y voltaje normales. Esta cantidad es útil para propósitos de comparación cuando no se conoce la inercia de la carga.

3. *Par de salida*. Este par es el máximo que el motor puede sostener durante 1 minuto a velocidad síncrona, con voltaje, frecuencia y excitación normales.

Características de motores síncronos. (En % de los valores de plena carga).

Motor	No. de Polos	Par de Arranque	Par de Sincr.	Par de Salida	Corriente de Arranque
De aplicación general					
FP = 1.0	4	110	110	150	550-750
	6 — 14	110	110	175	550-750

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

f = frecuencia del sistema (ciclos/seg.).

WR^2 de las partes rotatorias.

Aplicación a compresores.

Los motores síncronos suelen mover compresores de amoníaco, aire y anhídrido carbónico.

El factor "C" del compresor permite seleccionar el motor adecuado para él. Este factor se determina de las características físicas del compresor tales como número de cilindros, peso de las partes reciprocantes, etc., y viene dado por el manufacturero. En función de las características del motor.

$$C = \frac{0.746 \times WR^2 \times (RPM)^4}{P \times f \times 10^8}$$

donde P y f son los mismos empleados en el cálculo de la frecuencia natural F.

Clasificación de cargas según su efecto en el arranque de motores síncronos.

Tipo	WR^2	Par		Ejemplos
		Estático	Marcha a p. carga	
1	alto	bajo	bajo	Sierras de banda, cortadores de madera.
2	alto	bajo	alto	Cargas centrífugas, Ventiladores grandes (de minas, por ejemplo).
3	alto	bajo	alto	Molinos de harina Molinos de papel.
4	bajo	alto	alto	Molinos de hule Batidores de papel Molinos de tubo o bolas para cemento.
5	bajo	bajo	bajo	Máquinas arrancadas sin carga como compresores de aire o Jordans en fábricas de papel.
6	bajo	bajo	alto	Bombas centrífugas o ventiladores de velocidad alta o mediana.

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

Es posible adicionar una carga en kilowatts sin aumentar la capacidad en KVA si esta carga es de un factor adelantado?

Llamando X a la adición en Kilowatts desconocida a 80% F.P. adelantado, tenemos:

$$\sqrt{(1400 + X)^2 + (1420 - .75 X)^2} = 2000$$

De donde:

$$X = \frac{-670 \pm \sqrt{670^2 + 2 \times .44 \times 40000}}{2 \times .44}$$

$$X = \frac{29}{.88} = 33 \text{ Kw.}$$

Es casi nula la posibilidad de añadir un motor síncrono que permita aumentar la carga en Kw. sin sobrecargar el banco.

6.—SISTEMAS DE VELOCIDAD VARIABLE CON C.D.

El control de velocidad de los motores de corriente directa mediante el voltaje aplicado conocido por "Sistema Ward Leonard" sirve aquellas aplicaciones que requieren velocidades que varíen en proporciones desde 10:1 hasta 40:1. El campo más común para este control es la Industria Papelera. El número de aplicaciones de estos sistemas tiende a aumentar debido a la precisión de control que permiten.

Este método emplea, en su forma más simple:

Un Generador de corriente directa movido a velocidad constante (generalmente una unidad motor-generador).

Uno o más motores de corriente directa cuyas armaduras son alimentadas por dicho generador.

Una fuente de corriente directa para la excitación de los campos del generador y motores (generalmente un excitador directamente conectado).

Equipo de control para arrancar, parar y modificar la velocidad de los motores, así como protección de sobrecarga y bajo voltaje.

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

$$\text{a 200 rpm } E = \frac{200}{1200} 218.5 = 36.4 \text{ volts.}$$

$$V = 36.4 + 11.5 = 47.9 \text{ volts.}$$

Por consiguiente, es necesario reducir el voltaje aplicado al motor a 47.9 volts para obtener la velocidad de 200 rpm

Ejemplo 2. Un sistema consiste de 3 motores shunt de C. D. operados por el mismo generador de voltaje variable y cada uno con carga a par constante. Uno de los motores es el del ejemplo anterior y los otros dos uno de 20 HP y otro de 5 HP con la misma velocidad y eficiencia y con resistencias serie totales de .15 y .80 ohms respectivamente.

Con los campos de los motores ajustados para dar la misma velocidad a 230 volts y carga normal, ¿qué velocidad tendrán los motores chicos cuando el mayor gira a 200 rpm?

Motor de 20 HP.

$$I = \frac{20 \times 746}{230 \times 0.85} = 76 \text{ amps.}$$

$$\text{Caída} = 76 \times 0.15 + 2 = 11.4 + 2 = 13.4 \text{ volts.}$$

$$\text{Fuerza contra Electro Motriz} = 230 - 13.4 = 216.6 \text{ volts.}$$

$$\text{Velocidad} = \frac{47.9 - 13.4}{216.6} \times 1200 = 190 \text{ rpm.}$$

$$\text{Motor de 5 HP } I = 19 \text{ amps.}$$

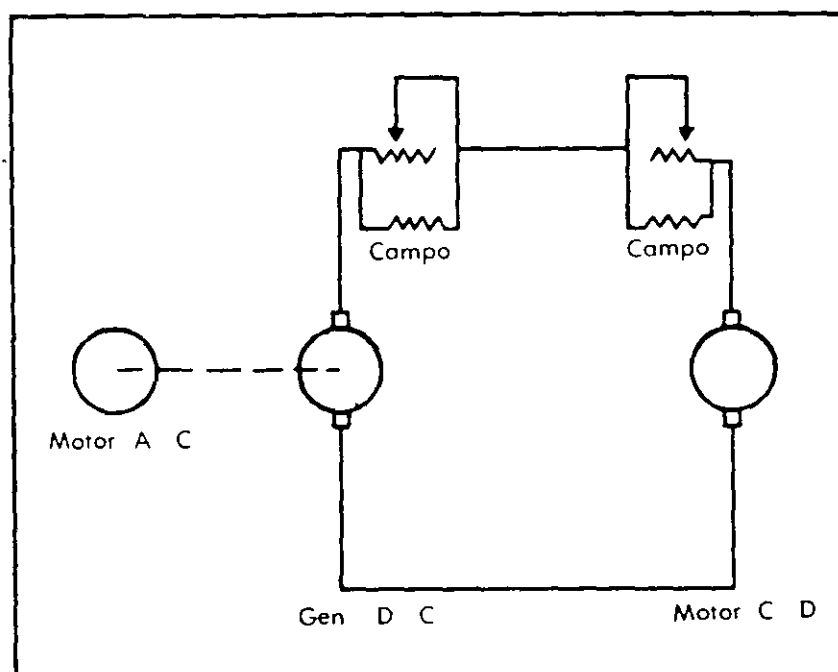
$$\text{Caída} = 19 \times 0.8 + 2 = 15.2 + 2 = 17.2 \text{ volts.}$$

$$\text{Fuerza contra Electro Motriz} = 230 - 17.2 = 212.8 \text{ volts.}$$

$$\text{Velocidad} = \frac{47.9 - 17.2}{212.8} \times 1200 = 182 \text{ rpm.}$$

APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

entonces la fuente separada de C. D. para la excitación. El diagrama simplificado es el siguiente:



Esta conexión posee el alto par de arranque del motor serie de C. D. Con el reóstato ajustado para $\frac{1}{10}$ de la velocidad máxima el par de arranque puede ser

5 ó 6 veces el de plena carga. El tamaño del reóstato es el factor que limita el tamaño en que el sistema serie pueda construirse económicamente (hasta 15 HP aprox.). El sistema serie se aplica a cargas que requieran alto par de arranque como transportadores y alimentación a máquinas herramientas. El sistema convencional (motor y generador shunt. excitación separada) se puede obtener en todos los tamaños y puede permitir una variación total de velocidad de 40 a 1, debido a que variando el voltaje se obtiene 10:1, y con el ajuste del campo 4:1. El sistema serie sólo permite variación total de 10:1, aunque en operaciones de pequeña duración puede alcanzarse una relación de 20:1.

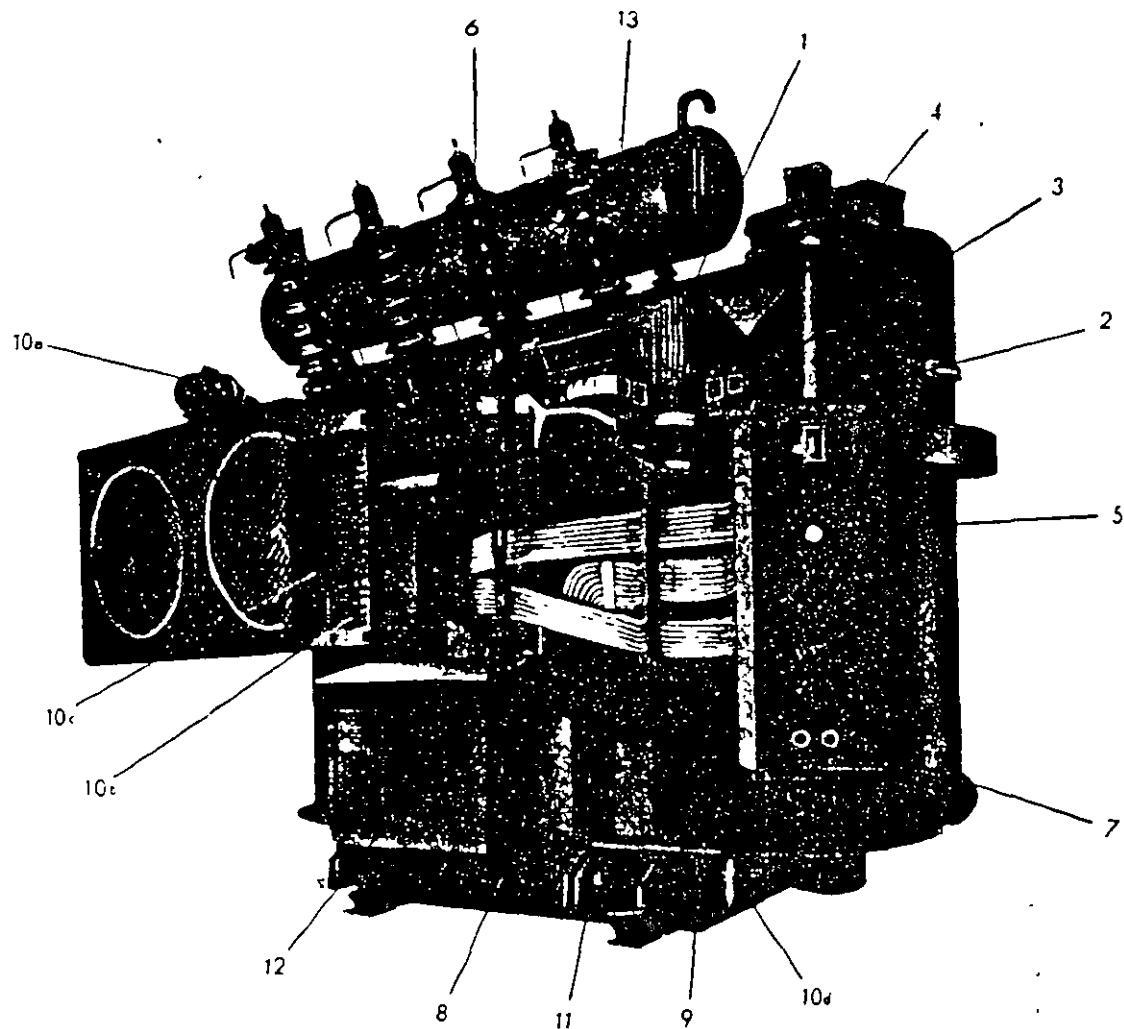
Aplicación a la fabricación de papel.

En las fábricas de papel se emplean varias unidades que hacen funciones distintas actuando sobre el mismo proceso continuo, lo cual exige coordinación. Una masa de fibra de celulosa obtenida de pulpa de madera, papel viejo o tejido de algodón de desecho y conteniendo una gran cantidad de agua (en la proporción de 99 partes de agua por 1 de celulosa) es alimentada a un tanque al principio de la máquina de papel. El producto fluye a través de una ranura y pasa a una malla fina en movimiento a través de la cual se pierde gran parte de la humedad.

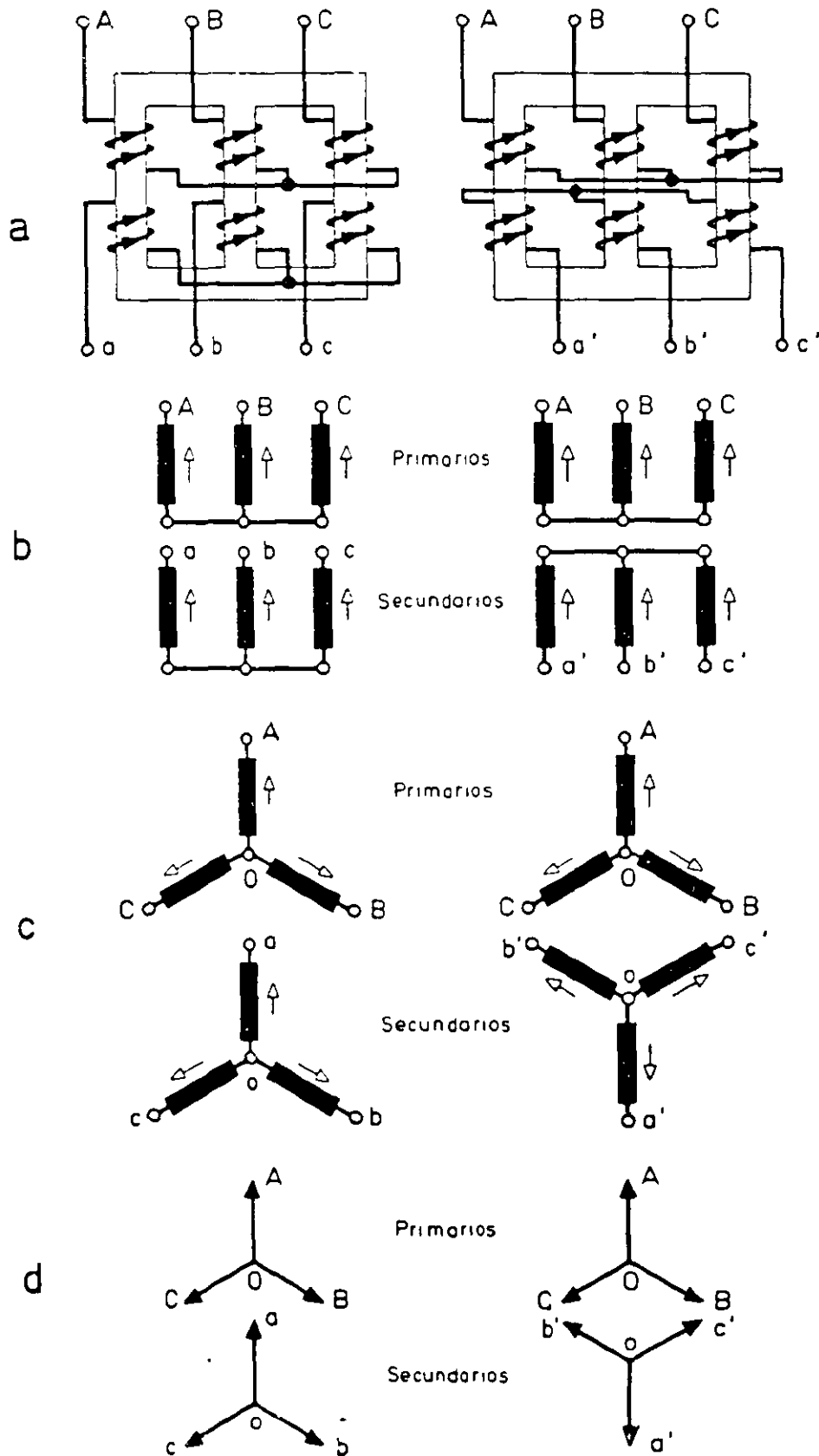
APLICACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO

El motor de 1150 rpm desarrolla 150 HP a 1150 rpm y es un motor de par constante.

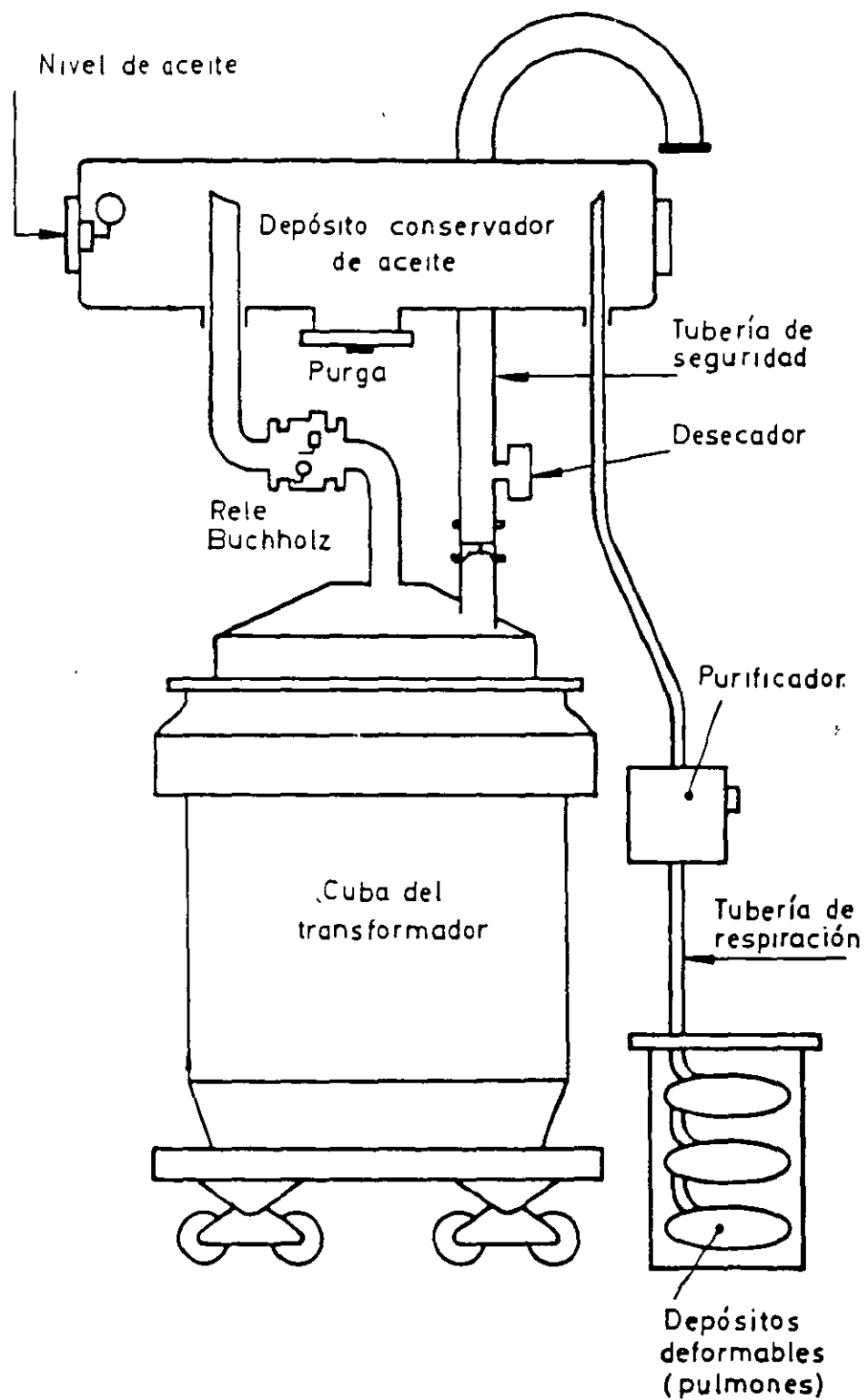
Por consiguiente, el motor de 690 rpm es mayor y tiene capacidad extra a 690 rpm, igual a $460 \text{ rpm} \times$ el par constante. Este exceso de capacidad no se usa en todo el rango de operación y hace este motor ineconómico. Su regulación de velocidad es peor en las velocidades máximas debido al incremento en la corriente de armadura que produce caídas mayores. Otra razón para su gran tamaño es la mayor capacidad del campo requerido abajo de 690 rpm. Su única ventaja es el menor calentamiento a bajas velocidades.



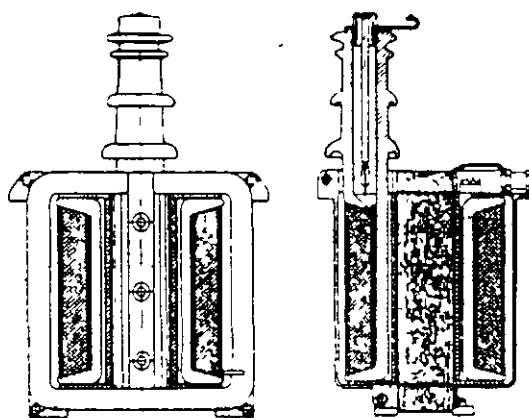
1. Circuito magnético
2. Arrollamiento sin soldadura (discos continuos) con circulación forzada y guiada de aceite
3. Anillos de acero para apriete de los arrollamientos
4. Regulador de tensión en carga, tipo Jansen
5. Armario de mando del regulador de tensión en carga
6. Pasatapas de alta tensión, tipo condensador
7. Cuba de chapa plegada
8. Recipiente de aceite
9. Junta soldada
10. Aerorrefrigerante
 - 10 a. bomba de aspiración del aceite caliente
 - 10 b. haz tubular para circulación forzada de aceite
 - 10 c. ventiladores para soplado
 - 10 d. tubería de retorno del aceite frío
11. Dispositivos para montaje y manuntención (placa de apoyo para gatos, salientes para levantamiento del transformador, etc.)
12. Armario para los dispositivos auxiliares del transformador, del equipo refrigerador y del regulador de tensión bajo carga
13. Depósito de reserva y conservación del aceite



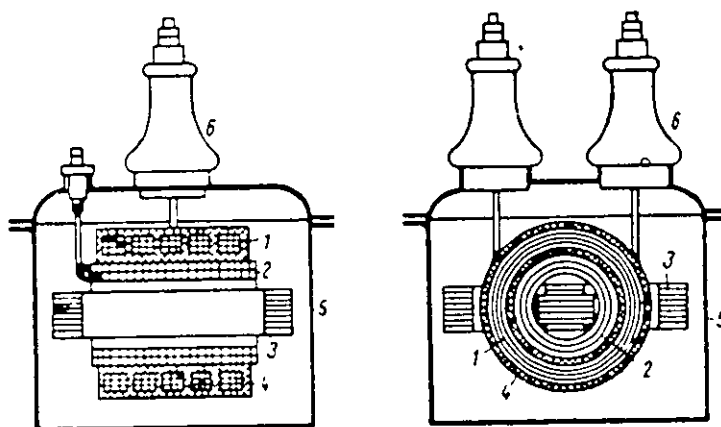
Influencia de las conexiones interiores sobre las polaridades de los arrollamientos de un transformador trifásico en conexión estrella-estrella: a—dibujos esquemáticos. b y c—esquemas d—diagramas vectoriales.



Sistema Josse para evitar la oxidación del aceite del transformador

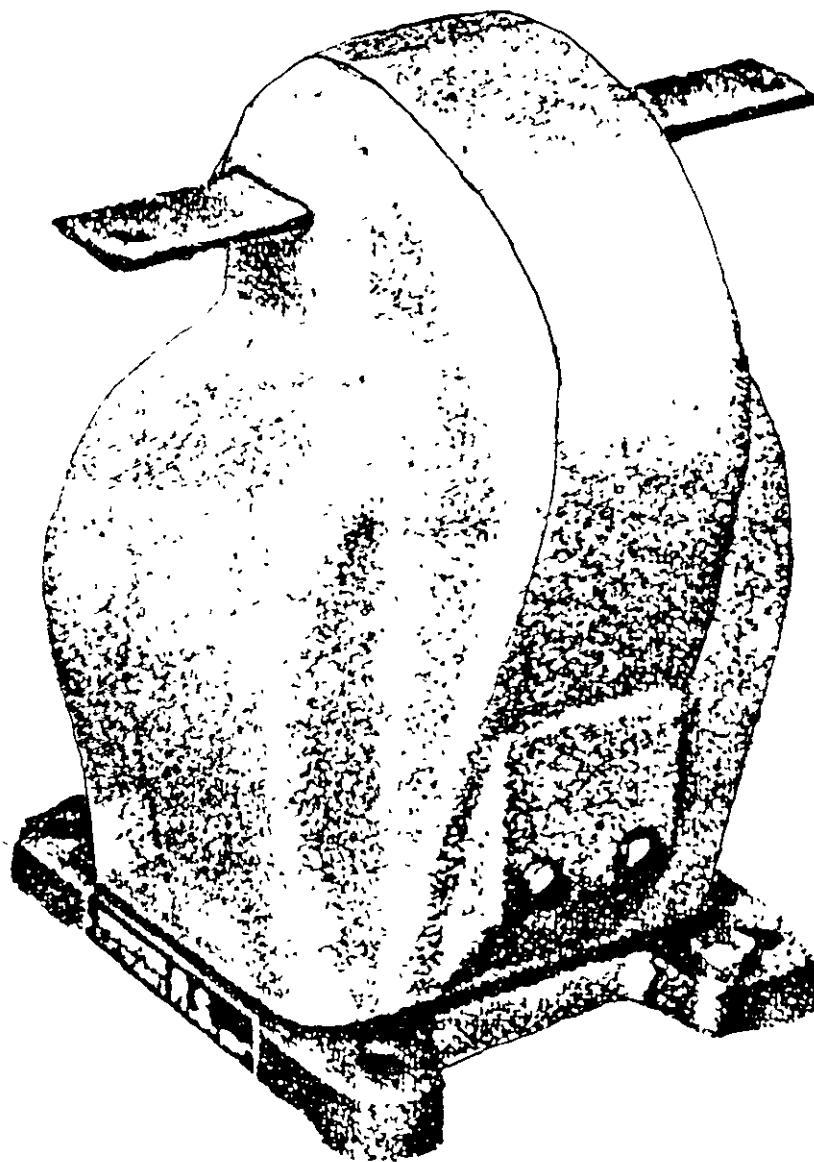


Transformador de tensión



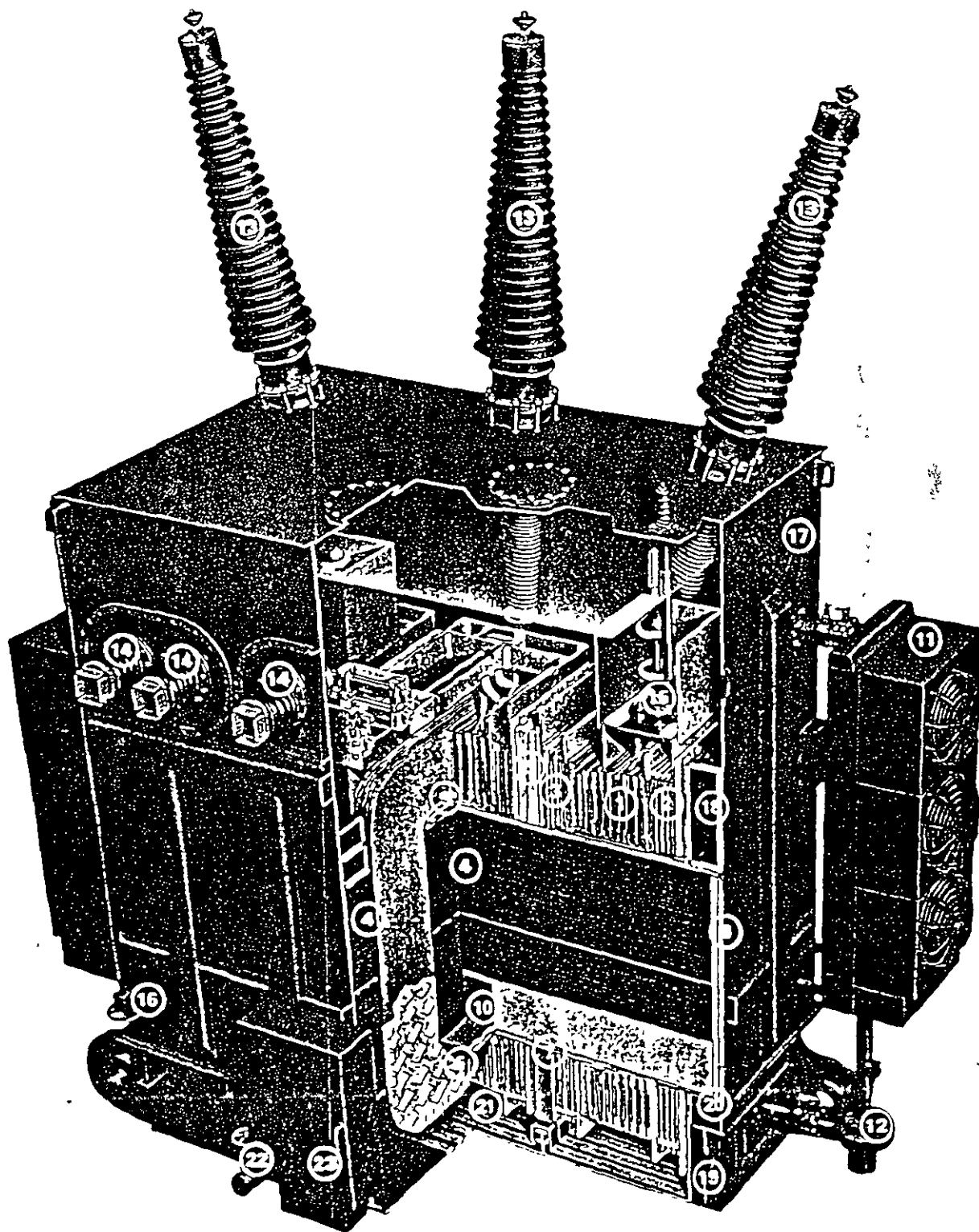
Transformador de tensión aislado en aceite: 1—Arrollamiento primario 2—Arrollamiento secundario 3—Núcleo 4—Material aislante. 5—Recipiente para el aceite. 6—Aisladores de porcelana.

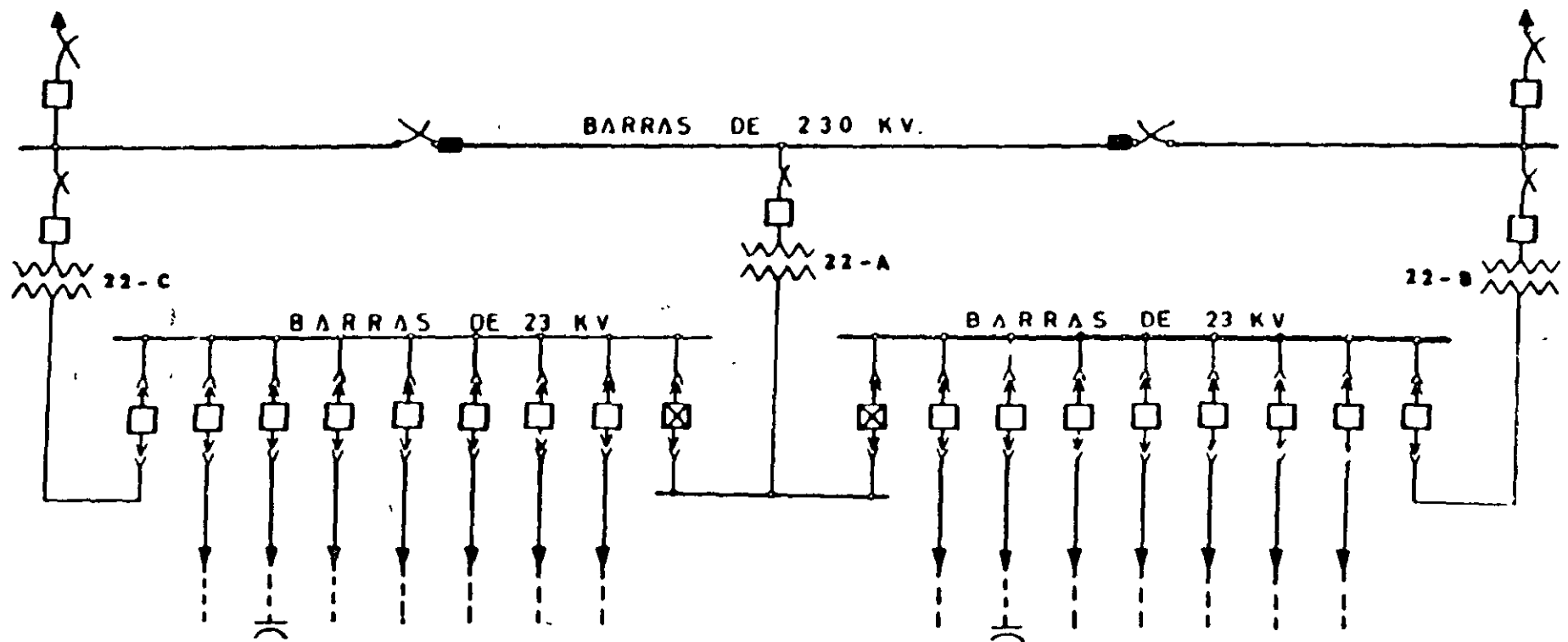
- a) *transformadores secos*, en los que el aislante es el aire, materiales fibrosos empapados en laca, productos sintéticos o aglomerados, normalmente montados al aire o encerrados en una caja protectora. Estos materiales no requieren ninguna vigilancia y son prácticamente insensibles a las sobrecargas.
- b) *transformadores de masa sólida*, que están sumergidos en un recipiente relleno de masa aislante resinosa fluida, que se endurece al enfriarse. En frío, la resistencia de aislamiento es superior a la del aceite, pero ya a 100° C baja a una cuarta parte de su valor. Estos transformadores son prácticamente insensibles a la acción de la humedad.
- c) *transformadores de resina endurecida*, parecidos a los anteriores, pero que no necesitan recipiente, debido a que la resina forma una masa sólida y compacta. Tienen muy



Transformador de intensidad de resina endurecida

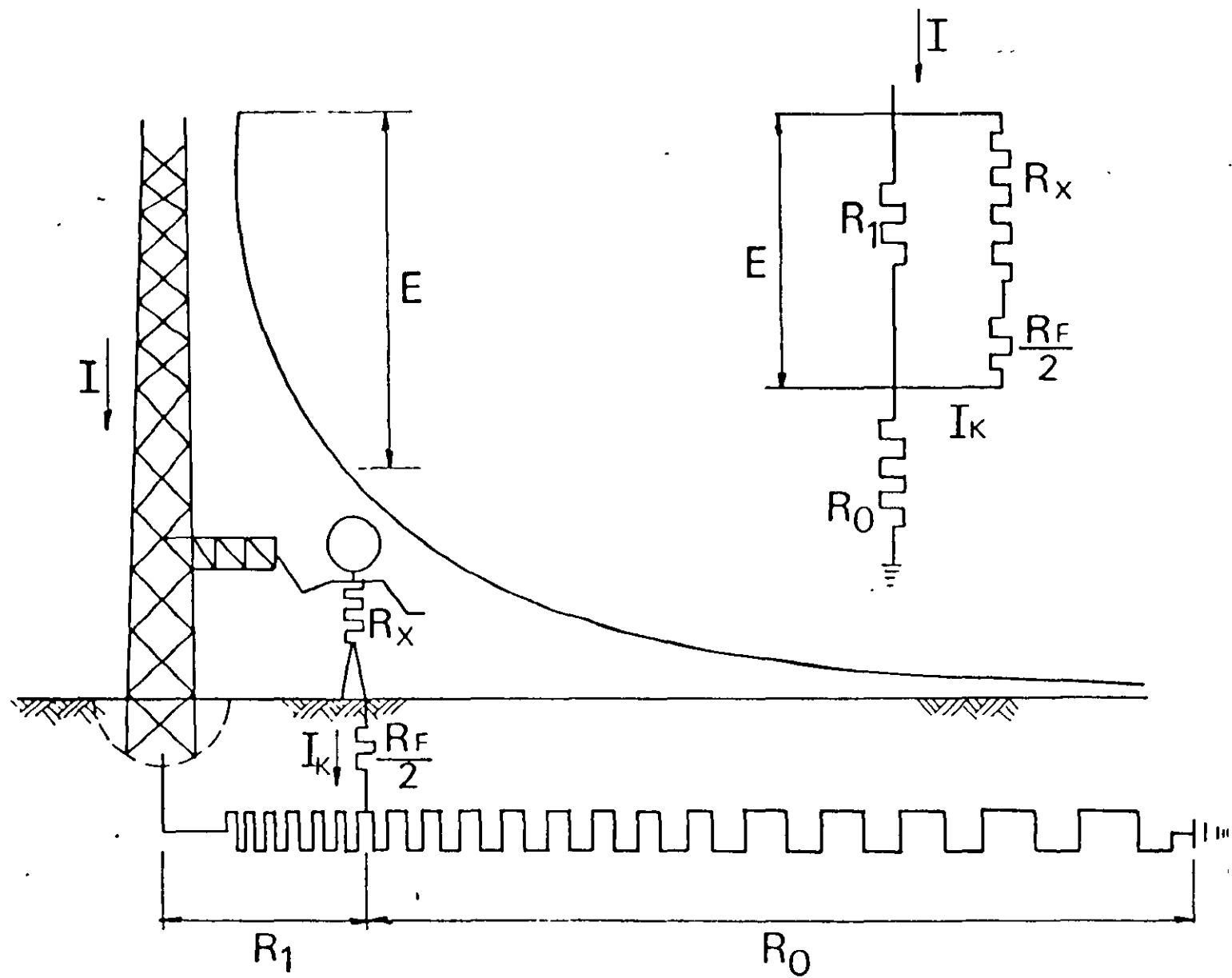
Large Power Transformers





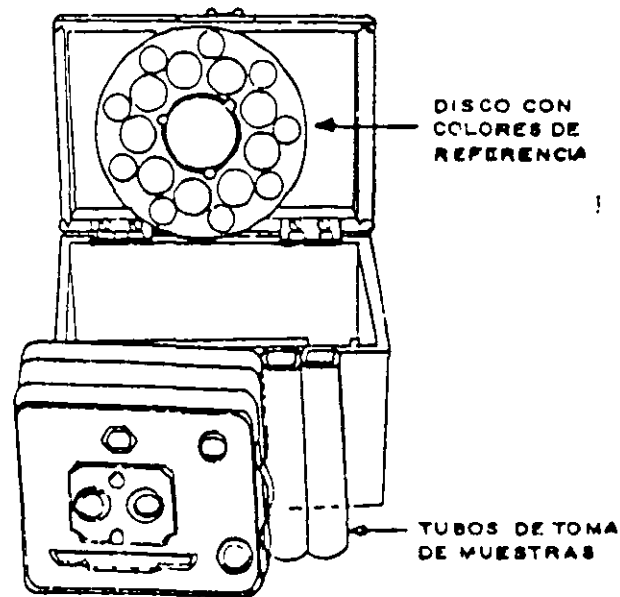
- ☐ INTERRUPTOR NORMALMENTE ABIERTO
☒ INTERRUPTOR NORMALMENTE CERRADO

BUS SENCILLO EN 230 KV. Y EN 23 KV. (Variante Δ)
 (S.E. PENSADOR MEXICANO)

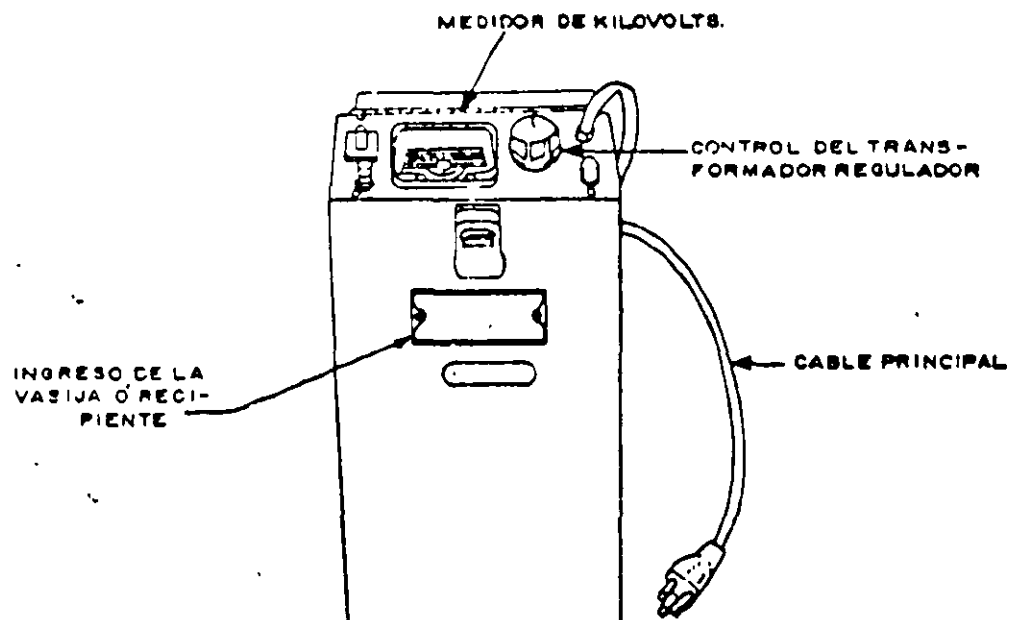


TENSIONES DE CONTACTO

EN EL RANGO DE COLOR
AMARILLO, NARANJA Y
ROJO INDICA QUE EL
TRANSFORMADOR PUEDE
TENER DAÑOS SEVEROS



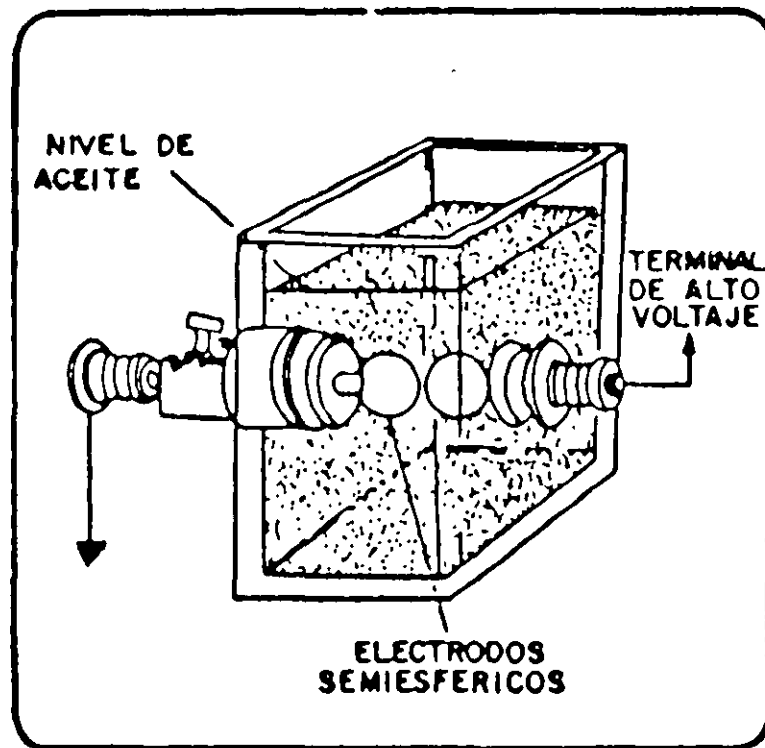
PROBADOR DE COLOR DEL ACEITE



VISTA DE UN PROBADOR DE
DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL

VALORES MINIMOS

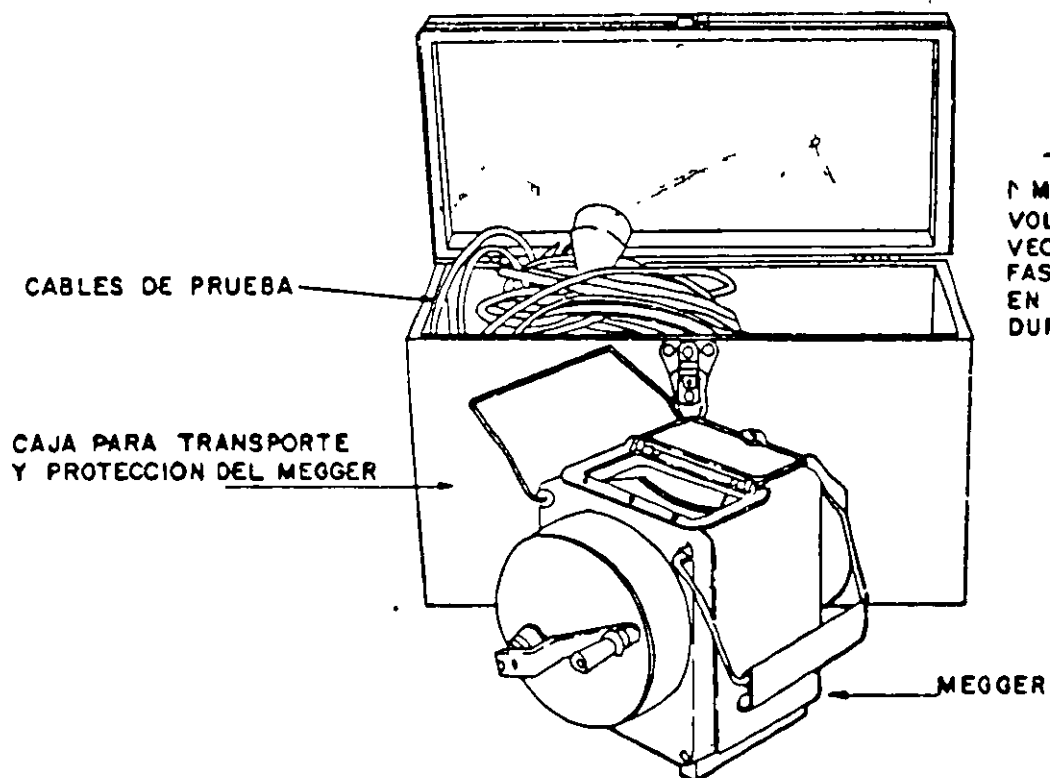
CON ELECTRODOS SEMI -
ESFERICOS Y SEPARACION
DE 1.016 mm
20KV. PARA ACEITES USADOS
30KV. PARA ACEITES NUEVOS



VALORES MINIMOS
DE RIGIDEZ DIELECTRICA

25 KV. PARA ACEITES USADOS
35 KV. PARA ACEITES NUEVOS
CON ELECTRODOS DE 25.4 mm
DE DIAMETRO
Y 2.54 DE SEPARACION

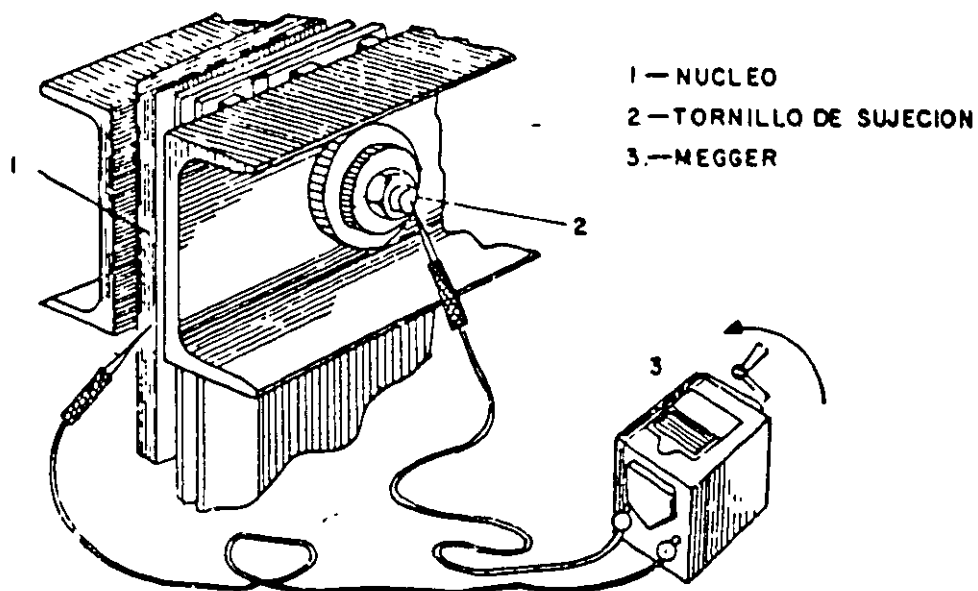
COPA ESTANDAR PARA PRUEBA DE
RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE



LECTURA MINIMA:

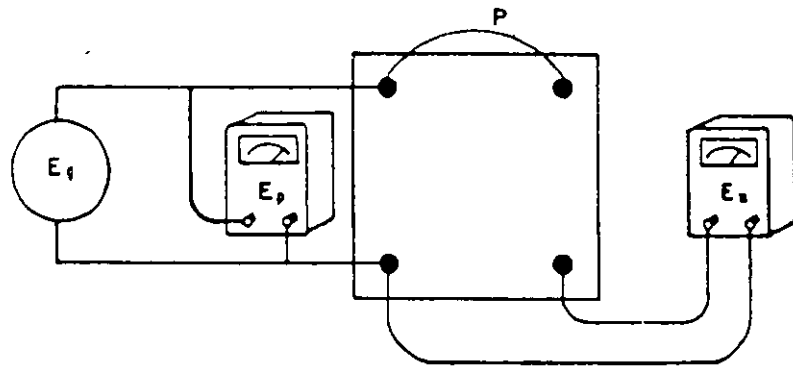
1 MEGOHM POR CADA 100 VOLTS DE PRUEBA O 25 VECES EL VOLTAJE DE FASE A FASE EXPRESADO EN KV. APLICADOS DURANTE 1 MINUTO

VISTA DE UN MEGGER CON ACCIONAMIENTO MANUAL PARA PROBAR RESISTENCIA DE AISLAMIENTO



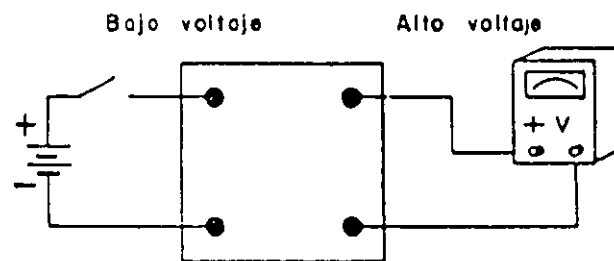
MEDICION DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO ENTRE HERRAJE Y NUCLEO DE UN TRANSFORMADOR

Si E_x es mayor que E_p la polaridad es aditiva



Si E_x es menor que E_p la polaridad es sustractiva

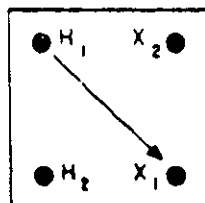
Determinación de la polaridad de un transformador usando una fuente de C A



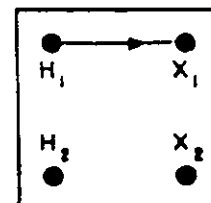
Si la aguja del voltmetro deflexiona hacia la escala al cerrar el switch, las marcas de polaridad de los devanados coinciden

Determinación de la polaridad de un transformador monofasico usando una fuente de Corriente Continua

Polaridad aditiva



Polaridad sustractiva



Indicación de las marcas de polaridad en un transformador monofasico

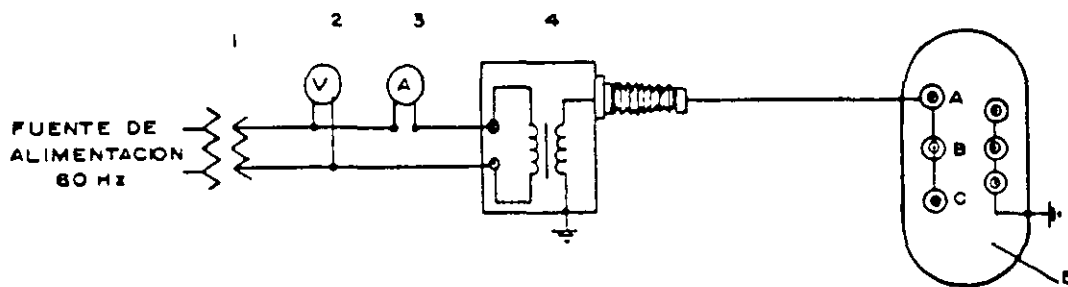
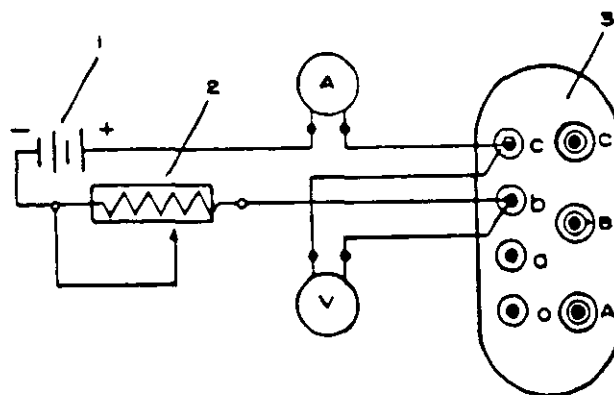


DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO AL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE

- 1 - TRANSFORMADOR REGULADOR
- 2 - VOLTMETRO
- 3 - AMPERMETRO
- 4 - TRANSFORMADOR PARA PRUEBA (CASCADA)
- 5 - TRANSFORMADOR BAJO PRUEBA

EL VOLTAJE SE APLICA EN FORMA CONTINUA DESDE CERO HASTA EL VALOR DE PRUEBA POR MEDIO DEL TRANSFORMADOR REGULADOR.

LA PRUEBA SE APLICA 1 MINUTO Y SI EL AMPERMETRO (3) NO MUESTRA INCREMENTO EN LA CORRIENTE Y EL VOLTMETRO (2) NO INDICA BAJA DE VOLTAJE EN EL VOLTAJE DE ALIMENTACION Y NO SE ESCUCHAN DESCARGAS EN EL INTERIOR, LA PRUEBA PASA, LOS OTROS DEVANADOS SE PRUEBAN IGUAL.

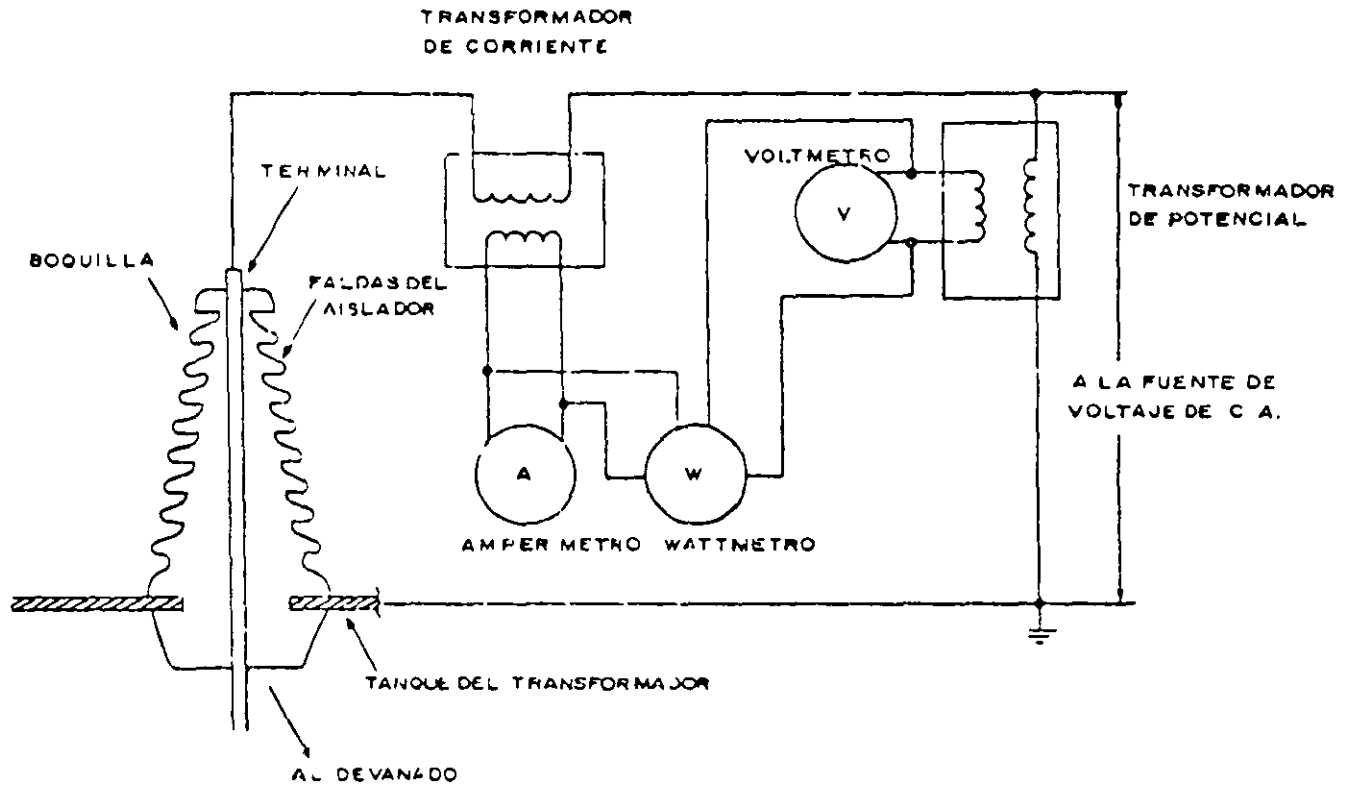


- 1 - BATERIA DE 4 A 6 VOLTS.
- 2 - REOSTATO PARA EL CONTROL DE CORRIENTE
- 3 - TRANSFORMADOR EN PRUEBA

DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA MEDICION DE LA RESISTENCIA EN LOS DEVANADOS POR EL METODO DE LA CAIDA DE VOLTAJE

LA RESISTENCIA DE CADA DEVANADO SE CALCULA POR LA LEY DE OHM COMO: $R = \frac{V}{I}$ SE DEBEN CORREGIR POR TEMPERATURA Y EL VALOR DE RESISTENCIA ENTRE FASES NO DEBE DIFERIR EN MAS DEL 2 %.

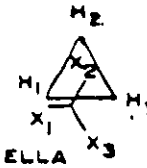
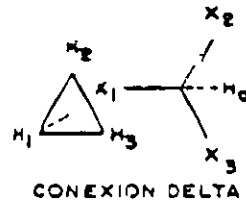
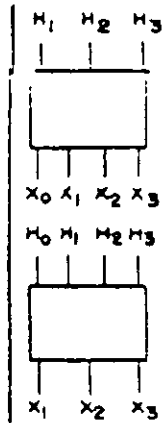
DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA PRUEBA
DE FACTOR DE POTENCIA EN LAS BOQUILLAS DE
UN TRANSFORMADOR.



LOS VALORES DE FACTOR DE POTENCIA DEBEN ESTAR EN EL RANGO
DEL 6 AL 10 % PARA SER ACEPTABLE
TODO EL EQUIPO PUEDE ESTAR INTEGRADO EN UN PAQUETE CONOCIDO
COMO " PROBADOR DEL FACTOR DE POTENCIA "

MARCAS DE POLARIDAD DE TRANSFORMADORES
MOSTRANDO LOS DIAGRAMAS VECTORIALES DE
VOLTAJE

DESPLAZAMIENTO
ANGULAR DE 30
GRADOS

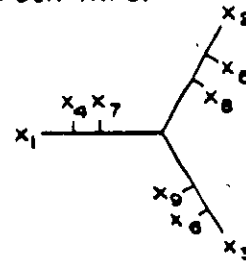
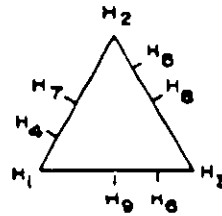
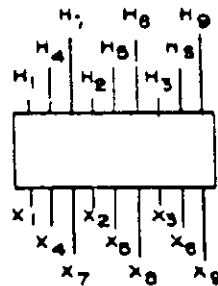


CONECTAR $H_{10} X_1$
MEDIR: $H_2 X_2, H_3 X_3$
 $H_1 H_3, H_2 X_2, H_2 X_3$

RELACIONES DE VOLTAJE

- (1) $H_3 X_2 = H_3 X_3$
- (2) $H_3 X_2 < H_1 H_3$
- (3) $H_2 X_2 < H_2 X_3$
- (4) $H_2 X_2 < H_1 H_3$

EJEMPLO DE TRANSFORMADOR TRIFASICO CON TAPS.



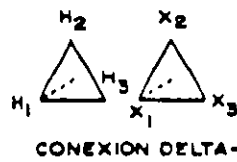
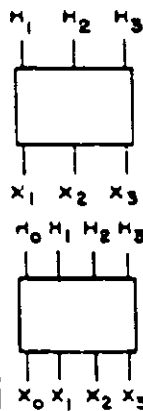
MARCAS DE
POLARIDAD

DESPLAZAMIENTO
ANGULAR

DIAGRAMA
PARA MEDICION

VERIFICAR
MEDICIONES

DESPLAZAMIENTO
ANGULAR DE CERO
GRADOS

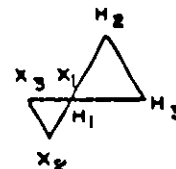
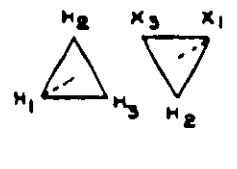


CONECTAR $H_{10} X_1$
MEDIR: $H_2 X_2, H_3 X_3$;
 $H_1 H_2, H_1 H_3$

RELACIONES DE VOLTAJE

- (1) $H_2 X_2 = H_3 X_3$
- (2) $H_2 X_2 < H_1 H_2$
- (3) $H_2 X_2 < H_2 H_3$

DESPLAZAMIENTO
ANGULAR DE 180
GRADOS



CONECTAR $H_{10} X_1$
MEDIR: $H_2 X_2, H_3 H_3$
 $H_1 H_2, H_1 H_3$

RELACIONES DE VOLTAJE

- (1) $H_2 X_2 = H_3 X_3$
- (2) $H_1 H_2 < H_2 X_2$
- (3) $H_1 H_3 < H_3 X_3$



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS INSTITUCIONALES

SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Del 03 al 26 de Octubre de 2006

ANEXOS

CI - 215

Instructor: Ing. Alfredo Nava Rodríguez

Instituto de Educación Media Superior

Octubre de 2006

Bombas

1. Introducción

Siempre que tratemos temas como procesos químicos, y de cualquier circulación de fluidos estamos, de alguna manera entrando en el tema de bombas

El funcionamiento en sí de la bomba será el de un convertidor de energía, o sea, transformará la energía mecánica en energía cinética, generando presión y velocidad en el fluido

Existen muchos tipos de bombas para diferentes aplicaciones

Los factores más importantes que permiten escoger un sistema de bombeo adecuado son presión última, presión de proceso, velocidad de bombeo, tipo de gases a bombear (la eficiencia de cada bomba varía según el tipo de gas)

2. Bombas

Las bombas se clasifican en tres tipos principales

- De émbolo alternativo
- De émbolo rotativo
- Rotodinámicas

Los dos primeros operan sobre el principio de desplazamiento positivo, es decir, que bombean una determinada cantidad de fluido (sin tener en cuenta las fugas independientemente de la altura de bombeo)

El tercer tipo debe su nombre a un elemento rotativo, llamado rodete, que comunica velocidad al líquido y genera presión. La carcasa exterior, el eje y el motor completan la unidad de bombeo

En su forma usual, la bomba de émbolo alternativo consiste en un pistón que tiene un movimiento de vaivén dentro de un cilindro

Un adecuado juego de válvulas permite que el líquido sea aspirado en una embolada y lanzado a la turbina de impulsión en la siguiente

En consecuencia, el caudal será intermitente a menos que se instalen recipientes de aire o un número suficiente de cilindros para uniformar el flujo

Aunque las bombas de émbolo alternativo han sido separadas en la mayoría de los campos de aplicación por las bombas rotodinámicas, mucho más adaptables, todavía se emplean ventajosamente en muchas operaciones industriales especiales

Las bombas de émbolo rotativo generan presión por medio de engranajes o rotores muy ajustados que impulsan periféricamente al líquido dentro de la carcasa cerrada

El caudal es uniforme y no hay válvulas. Este tipo de bombas es eminentemente adecuado para pequeños caudales (menores de 1 pie³/s y el líquido viscoso). Las variables posibles son muy numerosas

La bomba rotodinámica es capaz de satisfacer la mayoría de las necesidades de la ingeniería y su uso está muy extendido.

Su campo de utilización abarca desde abastecimientos públicos de agua, drenajes y regadíos, hasta transporte de hormigón o pulpas.

Los diversos tipos se pueden agrupar en

a Centrifugos

Son el tipo más corriente de bombas rotodinámicas, y se denomina así porque la cota de presión que crean es ampliamente atribuible a la acción centrífuga

Pueden estar proyectadas para impulsar caudales tan pequeños como 1 gal/min o tan grandes como 4 000 000 gal/min, mientras que la cota generada puede variar desde algunos pies hasta 400. El rendimiento de las de mayor tamaño puede llegar al 90%.

El rodete consiste en cierto número de alabes curvados en dirección contraria al movimiento y colocados entre dos discos metálicos.

El agua entra por el centro u ojo del rodete y es arrastrada por los alabes y lanzada en dirección radial. Esta aceleración produce un apreciable aumento de energía de presión y cinética. A la salida, el movimiento del fluido tiene componentes radial y transversal.

Para que no haya una pérdida notable de energía, y por tanto de rendimiento, es esencial transformar en la mayor medida posible la considerable cota cinética a la salida del rodete en la más útil cota de presión.

Normalmente, esto se consigue construyendo la carcasa en forma de espiral, con lo que la sección del flujo en la periferia del rodete va aumentando gradualmente.

Para caudales grandes se usa el rodete de doble aspiración, que es equivalente a dos rodetes de simple aspiración ensamblados dorso con dorso; esta disposición permite doblar la capacidad sin aumentar el diámetro del rodete.

Es más cara de fabricar, pero tiene la ventaja adicional de solucionar el problema del empuje axial.

En ambos casos, las superficies de guía están cuidadosamente pulimentadas para minimizar las pérdidas por rozamiento.

El montaje es generalmente horizontal, ya que así se facilita el acceso para el mantenimiento. Sin embargo, debido a la limitación del espacio, algunas unidades de gran tamaño se montan verticalmente.

Las proporciones de los rodetes varían dentro de un campo muy amplio, lo que permite hacer frente a una dilatada gama de condiciones de funcionamiento.

Por ejemplo, los líquidos con sólidos en suspensión (aguas residuales) pueden ser bombeados siempre que los conductos sean suficientemente amplios.

Inevitablemente habrá alguna disminución de rendimiento.

Para que la bomba centrífuga esté en disposición de funcionar satisfactoriamente, tanto la tubería de aspiración como la bomba misma, han de estar llenas de agua.

Si la bomba se encuentra a un nivel inferior a la del agua del pozo de aspiración, siempre se cumplirá esta condición, pero en los demás casos hay que expulsar el aire de la tubería de aspiración y de la bomba y reemplazarlo por agua, esta operación se denomina cebado.

El mero giro del rodete, aún a alta velocidad, resulta completamente insuficiente para efectuar el cebado y sólo se conseguirá recalentar los cojinetes.

Los dos métodos principales de cebado exigen una válvula de retención en la proximidad de la base del tubo de aspiración, o en las unidades mayores, la ayuda de una bomba de vacío.

En el primer caso, se hace entrar el agua de la tubería de impulsión o de cualquier otra procedencia, en el cuerpo de bomba y el aire es expulsado por una llave de purga.

Fig : Bomba del tipo Centrífuga

Se ha desarrollado una bomba centrífuga, la cual fue concebida, teniendo como objetivos un rendimiento de trabajo que sea óptimo, una gran variedad de aplicaciones y fácil mantenimiento del equipo.

El cuerpo húmedo de esta bomba, está fabricado en un polímero de grandes cualidades mecánicas y de excelente resistencia química.

Estos materiales evitan las incrustaciones de partículas, y además no son afectados por problemas de cavitación.

Las aplicaciones de esta bomba son de óptimo rendimiento en PLANTAS DE ÁCIDO, AGUA DE COLA, AGUAS MARINAS, y en general en lugares con gran concentración de CORROSIVOS.

Ademas tiene una muy buena aplicación en la INDUSTRIA ALIMENTICIA dado que no contamina los productos

Las bombas están disponibles en materiales del acero termoplástico e inoxidable, diseños del mecanismo impulsor para las aplicaciones horizontales y verticales

La construcción rugosa proporciona una resistencia excelente al producto químico y a la corrosión

Las aplicaciones típicas son proceso químico, laminado de metal, piezas que lavan sistemas, fabricación de la tarjeta de circuito impresa, foto que procesa, productos farmacéuticos, semiconductores, etc

a Múltiples

Para alturas superiores a 200 pies se emplean normalmente bombas múltiples o bombas de turbina

Este tipo de bomba se rige exactamente por el mismo principio de la centrifuga y las proporciones del rodete son muy semejantes

Consta de un cierto número de rodetes montados en serie, de modo que el agua entra paralelamente al eje y sale en dirección radial

La elevada energía cinética del agua a la salida del rodete se convierte en energía de presión por medio de una corona difusora formada por alabes directores divergentes. Un conducto en forma de S conduce el agua en sentido centrípeto hacia el ojo del rodete siguiente

El proceso se repite en cada escalonamiento hasta llegar a la salida. Si se aplica un número suficiente de escalonamientos, puede llegarse a obtener una cota de 4.000 pies. De hecho, la cota máxima vendrá probablemente dictada por el costo de reforzamiento de la tubería más que por cualquier limitación de la bomba.

A) B)

*Fig.. Bombas de turbina. A) Bomba de Turbina Vertical para Agua Pesada
B) Bomba de Agua con Turbina Vertical*

b De columna

Son del tipo múltiple, con montaje vertical y diseñadas especialmente para la elevación del agua en perforaciones angostas, pozos profundos o pozos de drenaje

Resultan adecuadas para perforaciones de un diámetro tan pequeño como 6 pulg y con mayores diámetros son capaces de elevar cantidades de agua superiores a un millón de galones por hora desde profundidades de hasta 1 000 pies

Normalmente se diseñan los rodetes de forma que lancen el agua en dirección radial-axial, con objeto de reducir a un mínimo el diámetro de perforación necesario para su empleo.

La unidad de bombeo consiste en una tubería de aspiración y una bomba situada bajo el nivel del agua y sostenida por la tubería de impulsión y el árbol motor. Dicho árbol ocupa el centro de la tubería y está conectado en la superficie al equipo motor.

Cuando la cantidad de agua que se ha de elevar es pequeña o moderada, a veces es conveniente y económico colocar la unidad completa de bombeo bajo la superficie del agua

Así se evita la gran longitud del árbol, pero en cambio se tiene la desventaja de la relativa inaccesibilidad del motor a efectos de su entretenimiento

c De flujo axial

Este tipo de bomba es muy adecuado cuando hay que elevar un gran caudal a pequeña altura

Por esto, sus principales campos de empleo son los regadíos, el drenaje de terrenos y la manipulación de aguas residuales

El rendimiento de esta bomba es comparable al de la centrífuga. Por su mayor velocidad relativa permite que la unidad motriz y la de bombeo sean más pequeñas y por tanto más baratas

La altura máxima de funcionamiento oscila entre 30 y 40 pies. Sin embargo, es posible conseguir mayores cotas mediante 2 o 3 escalonamientos, pero este procedimiento raramente resulta económico. Para grandes bombas se adopta generalmente el montaje vertical, pasando el eje por el centro de la tubería de salida

El rodete es de tipo abierto, sin tapas, y su forma es análoga a la de una hélice naval.

El agua entra axialmente y los alabes le imprimen una componente rotacional, con lo que el camino por cada partícula es una hélice circular.

La cota se genera por la acción impulsora o de elevación de los alabes, sin que intervenga el efecto centrífugo

La misión de los alabes fijos divergentes o alabes directores es volver a dirigir el flujo en dirección axial y transformar la cota cinemática en cota de presión

Para evitar la creación de condiciones favorables al destructivo fenómeno de cavitación, la bomba de flujo axial se ha de proyectar para poca altura de aspiración

De hecho, es preferible adoptar en la que el rodete permanezca siempre sumergido, ya que así la bomba estará siempre cebada y lista para comenzar a funcionar

El objeto del sifón es evitar el riesgo de que se averíe la válvula de retención, que de otro modo tendría lugar una inversión del flujo en la tubería, con lo que la bomba funcionaría como una turbina

La acción sifónica se interrumpe mediante una válvula de mariposa

Esta válvula está en ligero equilibrio hacia la posición de abierta y en el instante en que cesa el bombeo, la válvula se abre y entra el aire, con lo que se evita la inversión del flujo

La estación de bombeo puede automatizarse por medio de electrodos inmersos en el pozo de aspiración para controlar el funcionamiento de la bomba.

d De flujo mixto

La bomba de flujo mixto ocupa una posición intermedia entre la centrífuga y la de flujo axial.

El flujo es en parte radial y en parte axial, siendo la forma del rodete acorde con ello

La trayectoria de una partícula de fluido es una hélice cónica. La cota que se consigue puede ser hasta de 80 pies por rodete, teniendo la ventaja sobre la bomba axial de que la potencia que ha de suministrar el motor es casi constante aunque se produzcan variaciones considerables de cota

La recuperación de la cota de presión se consigue mediante un difusor, un caracol o una combinación de ambos

f) de paleta

Existen varios tipos de bombas de paletas, ellas podrán ser.

- 1 - De paletas deslizantes, con un número variante de ellas montadas en un rotor ranurado. Según la forma de la caja se subdividen en bombas de simple, doble o triple cámara, si bien raramente se emplean tales denominaciones. La mayoría de las bombas de paletas deslizantes son de una cámara. Como estas máquinas son de gran velocidad de capacidades pequeñas o moderadas y sirven para fluidos poco viscosos, se justifica el siguiente tipo de clasificación
- 2 - Bomba pesada de paleta deslizante, con una sola paleta que abarca todo el diámetro. Se trata de una bomba esencialmente lenta, para líquidos muy viscosos
- 3 - Bombas de paletas oscilantes, cuyas paletas se articulan en el rotor. Es otro de los tipos pesados de bomba de paleta
- 4 - Bombas de paletas rodantes, también con ranuras en el rotor pero de poca profundidad, para alojar rodillos de elastómero en el lugar de paletas, se trata de un modelo patentado
- 5.- Bomba de leva y paleta, con una sola paleta deslizante en una ranura mecanizada en la caja cilíndrica y que, al mismo tiempo, encaja en otra ranura de un anillo que desliza sobre un rotor accionado y montado excéntricamente. El rotor y los anillos que ejercen el efecto de una leva que inicia el movimiento de la paleta deslizante. Así se elimina el rascado de las superficies. Se trata de una forma patentada que se emplea principalmente como bomba de vacío.
- 6 - Bomba de paleta flexible, que abrazan un rotor de elastómero de forma esencial giratorio dentro de una caja cilíndrica. En dicha caja va un bloque en media luna que procura un paso excéntrico para el barrido de las paletas flexibles de rotor

g) de tornillo

Las bombas de tornillo son un tipo especial de bombas rotatorias de desplazamiento positivo, en el cual el flujo a través de los elementos de bombeo es verdaderamente axial.

El líquido se transporta entre las cuerdas de tornillo de uno o más rotores y se desliza axialmente a medida que giran engranados.

La aplicación de las bombas de tornillo cubren una gama de mercados diferentes, tales como en la armada, en la marina y en el servicio de aceites combustibles, carga marítima, quemadores industriales de aceite, servicio de lubricación de aceite, procesos químicos, industria de petróleo y del aceite crudo, hidráulica de potencia para la armada y las máquinas - herramientas y muchos otros.

La bomba de tornillo puede manejar líquidos en una gama de viscosidad como la melaza hasta la gasolina, así como los líquidos sintéticos en una gama de presiones de 50 a 5.000 lb/pulg² y los flujos hasta de 5.000 gpm.

Debido a la relativamente baja inercia de sus partes en rotación, las bombas de tornillo son capaces de operar a mayores velocidades que otras bombas rotatorias o alternativas de desplazamiento comparable.

Algunas bombas de lubricación de aceite de turbina adjunta operan a 10 000 rpm y aún mayores.

Las bombas de tornillo, como otras bombas rotatorias de desplazamiento positivo son de autocebado y tienen una característica de flujo que es esencialmente independiente de la presión.

La bomba de tornillo simple existe sólo en número limitado de configuraciones. La rosca es excéntrica con respecto al eje de rotación y engrana con las roscas internas del estator (alojamiento del rotor o cuerpo).

Alternativamente el estator está hecho para balancearse a lo largo de la línea de centros de la bomba.

Las bombas de tornillos múltiples se encuentran en una gran variedad de configuraciones y diseños. Todos emplean un rotor conducido engranado con uno o más rotores de sellado. Varios fabricantes cuentan con dos configuraciones básicas disponibles, la construcción de extremo simple o doble, de las cuales la última es la más conocida.

Como cualquier otra bomba, hay ciertas ventajas y desventajas en las características de diseño de tornillo. Estos deben de reconocerse al seleccionar la mejor bomba para una aplicación.

particular

Entre algunas ventajas de este tipo tenemos:

Amplia gama de flujos y presiones

- 1 Amplia gama de líquidos y viscosidad
- 2 Posibilidad de altas velocidades, permitiendo la libertad de seleccionar la unidad motriz
- 3 Bajas velocidades internas
4. Baja vibración mecánica, flujo libre de pulsaciones y operaciones suaves
- 5 Diseño sólido y compacto, fácil de instalar y mantener
- 6 Alta tolerancia a la contaminación en comparación con otras bombas rotatorias

Entre algunas desventajas de este tipo tenemos

- 1 Costo relativamente alto debido a las cerradas tolerancias y claros de operación
- 2 Características de comportamiento sensibles a los cambios de viscosidad
- 3 La capacidad para las altas presiones requiere de una gran longitud de los elementos de bombeo

h) de diafragma

En la bomba de simple diafragma, este es flexible, va sujeto a una cámara poco profunda y se mueve por un mecanismo unido a su centro. Con el mando hidráulico del diafragma, mediante impulsos de presión iniciados en una cámara de fluidos conectada a un lado del diafragma, se consigue el mismo funcionamiento. Por tanto, los tipos principales de bombas de diafragma son

- 1 - De mando mecánico
- 2 - De mando hidráulico

En las últimas, la citada presión pulsatoria deriva normalmente de una bomba de pistón, con lo que se pueden designar como bombas de pistón diafragma

i) de pozo profundo

Cada vez se utilizan más de las bombas para gran profundidad, en lugar de las autocebado, de desplazamiento positivo para vaciado de fondos y aplicaciones análogas, cuando la bomba puede funcionar sumergida o cuando la interrupción de la descarga es temporal y ocurre solamente cuando las perturbaciones del nivel inferior del líquido son de importancia. Las principales ventajas a este tipo de bombas son:

- 1 - Funcionamiento más fácilmente regulable
- 2 - Gran capacidad y rendimiento y además, a grandes velocidades
- 3 - Tolerancia ante los contaminantes en el fluido
- 4 - Sumamente compacta, tanto en servicio vertical como en horizontal
- 5 - Funcionamiento silencioso

6.- Amplio campo de elección de un motor apropiado.

7 - Facilidad de drenaje automático o de desmontar (vertical) para inspección o mantenimiento. La primera de estas ventajas puede ser fundamental cuando el fluido es peligroso.

La instalación de una bomba para gran profundidad no deja de presentar problemas

Notablemente por el hecho de que suele suspenderse de una cubierta superior

A veces requiere una fijación rígida que la abraza e impida la flexión del tramo vertical colgante, bajo sollicitaciones de vaivén.

Fig : Diferentes fotografías de bombas (sumergibles, de vacío, verticales, centrífugas, de hélice

Formulario a considerar
para adquirir una bomba centrífuga

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO / OBSERVACIONES			
Aplicacion			
Altura sobre nivel mar	(m s n m)		
CARACTERISTICAS DEL LIQUIDO / OBSERVACIONES			
Tipo de Líquido			
Agentes Corrosivos			
Concentración			
Viscosidad			
Gravedad específica líquido			
pH del líquido			
Temperatura liquido °C			
¿Hay sólidos presentes?	Si / No	Porcentaje Granulometria	
CARACTERISTICAS DE LA INSTALACION / OBSERVACIONES			
Ø int tubo / modif (si/no)			
Energía eléct Volts / Hz			
Bomba actual / rpm			
Motor actual Hp / rpm			
CARACTERISTICAS DE OPERACION / OBSERVACIONES			
Caudal Q (m ³ /hora)			
1) Volumen (m ³)			
2) Tiempo (minutos)			
3) P descarga (PSI)			
4) L tubería [m] / Ø" int.tub			
5) N° codos / válv descarg			
6) N° codos / válv succión			
EQUIPO SELECCIONADO / OBSERVACIONES			
Bomba			
Ø impulsor [mm]			
rpm bomba			
Eficacia %			
Potencia al eje (KW)			
Material de carcasa			
Material del impulsor			
Material del Eje			
Modelo de Sello / caras			
Presión máx trabajo		[psi]	
Motor requerido [KW]		[KW]	

Una bomba es una turbo máquina generadora para líquidos. La bomba se usa para transformar la energía mecánica en energía hidráulica.

Las bombas se emplean para bombear toda clase de líquidos, (agua, aceites de lubricación, combustibles, ácidos, líquidos alimenticios, cerveza, leche, etc.), este grupo constituye el grupo importante de las bombas sanitarias. También se emplean las bombas para bombear los líquidos espesos con sólidos en suspensión, como pastas de papel, melazas, fangos, desperdicios, etc.

Un sistema de bombeo puede definirse como la adición de energía a un fluido para moverse o trasladarse de un punto a otro.

Una bomba centrífuga es una máquina que consiste en un conjunto de paletas rotatorias encerradas dentro de una caja o carter, o una cubierta o carcasa. Las paletas imparten energía al fluido por la fuerza centrífuga.

Uno de los factores más importantes que contribuyen al creciente uso de bombas centrífugas ha sido el desarrollo universal de la fuerza eléctrica.

Descripción de las Bombas Centrífugas y de Flujo Axial:

El elemento rotativo de una bomba centrífuga se denomina impulsor. La forma del impulsor puede forzar al agua a salir en un plano perpendicular a su eje (flujo radial), puede dar al agua una velocidad con componentes tanto axial como radial (flujo mixto) o puede inducir un flujo en espiral en cilindros coaxiales según la dirección del eje (flujo axial). Normalmente, a las máquinas con flujo radial o mixto se les denomina bombas centrífugas, mientras a las de flujo axial se las llama bombas de flujo axial o bombas de hélice. Los impulsores de las bombas radiales y de las mixtas pueden ser abiertos o cerrados. Los impulsores abiertos consisten en un eje al cual están unidos los alabes, mientras que los impulsores cerrados tienen láminas (o cubiertas) a cada lado de los alabes.

Las bombas de flujo radial tienen una envolvente helicoidal, que se denomina voluta, que guía el flujo desde el impulsor hasta el tubo de descarga. El incremento de la sección transversal a lo largo de la envolvente tiende a mantener constante la velocidad en su interior.

Algunas bombas tienen alabes difusores en la voluta. Estas bombas son conocidas como turbo bombas.

Las bombas pueden ser unicelulares o multicelulares. Una bomba unicelular tiene un único impulsor, mientras que una multicelular tiene dos o más impulsores dispuestos de forma que la salida de uno de ellos va a la entrada siguiente.

Es necesario emplear una disposición apropiada de las tuberías de aspiración y descarga para que una bomba centrífuga funcione con su máximo rendimiento. Por motivos económicos, el diámetro de la cubierta de la bomba en la aspiración y descarga suele ser menor que el del tubo al cual se conecta. Si existe un reductor horizontal entre la aspiración y la bomba, deberá utilizarse un reductor excéntrico para evitar la acumulación de aire. Deberá instalarse una válvula de pie (válvula de registro) en el tubo de aspiración para evitar que el agua abandone la bomba si ésta se detiene. La tubería de descarga suele incorporar una válvula de registro o una válvula de cierre. La válvula de registro evita que se cree un flujo de retorno a través de la bomba en caso de que haya una caída de potencia. Las tuberías de aspiración que toman agua de un depósito deben tener un filtro para prevenir la entrada de partículas que pudieran atascar la bomba.

Las bombas de flujo axial suelen tener solo dos o cuatro palas, por lo que tienen grandes conductos sin obstáculos, que permiten trabajar con agua que contengan elementos sólidos sin que se produzca atascos. Los alabes de algunas bombas axiales grandes son ajustables para permitir fijar la inclinación que dé el mejor rendimiento bajo condiciones reales.

Altura Desarrollada por una Bomba

La h desarrollada por una bomba se determina midiendo la presión en la aspiración y en la salida de la bomba, calculando las velocidades mediante la división del caudal de salida entre las respectivas áreas de las secciones transversales y teniendo en cuenta la diferencia de altura entre la aspiración y la descarga. La altura neta h suministrada por la bomba al fluido es

$$h = H_d - H_{as} = \left(\frac{P_d}{\gamma} + \frac{V_d^2}{2g} + z_d \right) - \left(\frac{P_{as}}{\gamma} + \frac{V_{as}^2}{2g} + z_{as} \right)$$

donde los subíndices d y as se refieren a la descarga y aspiración de la bomba. Si las tuberías de descarga y aspiración son del mismo tamaño, las componentes de la altura correspondiente a la velocidad se cancelan, sin embargo en general la tubería de entrada es mayor que la de salida.

La normativa de ensayo indica que la altura desarrollada por una bomba es la diferencia entre la carga en la entrada y en la salida. Sin embargo, las condiciones del flujo en la brida de salida son normalmente demasiado irregulares para tomar medidas de presión precisas, y es más seguro medir la presión alejándose de la bomba diez o más veces el diámetro del tubo y añadir una estimación de la pérdida por fricción para esa longitud del tubo.

En la entrada algunas veces existe prerrotación en la zona del tubo cercana a la bomba y esto puede hacer que las lecturas de presión obtenidas con un instrumento de medida sean diferentes a la presión media real en dicha sección.

Rendimiento de las Bombas

Cuando un líquido fluye a través de una bomba, sólo parte de la energía comunicada por el eje del impulsor es transferida al fluido. Existe fricción en los cojinetes y juntas, no todo el líquido que atraviesa la bomba recibe de forma efectiva la acción del impulsor, y existe una pérdida de energía importante debido a la fricción del fluido. Esta pérdida tiene varias componentes, incluyendo las pérdidas por choque a la entrada del impulsor, la fricción por el paso del fluido a través del espacio existente entre las palas o alabes y las pérdidas de alturas al salir el fluido del impulsor. El rendimiento de una bomba es bastante sensible a las condiciones bajo las cuales esté operando. El rendimiento η de una bomba viene dado por

$$\eta = \frac{\text{potencia suministrada al fluido}}{\text{potencia en el eje (al freno)}} = \frac{\gamma Q h}{T \omega}$$

donde γ , Q y h se definen de forma habitual, T es el par ejercido por el motor sobre el eje de la bomba y ω el régimen de giro del eje en radianes por segundos.

Características del Funcionamiento de las Bombas a Velocidad Constante

El rendimiento de una bomba varía considerablemente dependiendo de las condiciones bajo las cuales esté operando. Por tanto, cuando se selecciona una bomba para una situación dada, es importante que la persona encargada de realizar dicha selección tenga información relativa al funcionamiento de las distintas bombas entre las que vaya a realizarse la elección. El fabricante de bombas suele tener información de este tipo, basada en ensayos de laboratorio, sobre su catálogo de bombas estándar. Sin embargo, algunas veces las bombas de gran capacidad se fabrican a medida. A menudo se fabrica y se ensaya un modelo de tal bomba antes de realizar el diseño final del prototipo de la bomba. Aun cuando algunas bombas centrífugas son accionadas por motores de velocidad variable, la forma más frecuente de operación de las bombas es a velocidad constante.

La forma de los impulsores y de los alabes y su relación con la envolvente de la bomba dan lugar a variaciones en la intensidad de las pérdidas por choque, la fricción del fluido y la turbulencia. Dichos parámetros varían con la altura y el caudal, siendo responsables de las grandes modificaciones en las características de las bombas. La altura en vacío es la que desarrolla la bomba cuando no hay flujo. En el caso de las bombas centrífugas de flujo mixto, la altura en vacío es alrededor de un 10 por 100 mayor que la altura normal, que es la que corresponde al punto de máximo rendimiento, mientras que en el caso de las bombas de flujo axial la altura en vacío puede ser hasta tres veces la altura normal.

La elección de una bomba para condiciones determinadas dependerá de la velocidad de giro del motor que la acciona. Si la curva característica de una bomba para una velocidad de giro dada es conocida, la relación entre la altura y el caudal para velocidades de giro distintas puede deducirse a partir de ecuaciones.

Punto de Funcionamiento de una Bomba:

La manera en la que una bomba trabaja depende no sólo de las características de funcionamiento de la bomba, sino también de las características del sistema en el cual vaya a trabajar. Para el caso de una bomba dada, mostramos las características de funcionamiento de la bomba (h respecto a Q) para una velocidad de operación dada, normalmente cercana a la velocidad que da el rendimiento máximo. También mostramos la curva característica del sistema (es decir, la altura de bombeo requerida respecto a Q). En este caso, la bomba está suministrando líquido a través de un sistema de tuberías con una altura estática Δz . La altura que la bomba debe desarrollar es igual a la elevación estática más la pérdida total de carga en el sistema de tuberías (aproximadamente proporcional a Q^2). La altura de funcionamiento de la bomba real y el caudal son determinados por la intersección de las dos curvas.

Los valores específicos de h y Q determinados por esta intersección pueden ser o no ser los de máximo rendimiento. Si no lo son, significa que la bomba no es exactamente la adecuada para esas condiciones específicas.

El punto de funcionamiento o punto óptimo de una bomba solo dinámica es el de la curva $H - Q$ que corresponde a un rendimiento máximo. Cuanto más empinada sea la curva $H - Q$, más significativo será el efecto de cualquier cambio de altura en el punto de funcionamiento.

Por ejemplo, una bomba con una curva $H - Q$ empinada presentará un pequeño cambio de descarga pero la altura variará mucho si se desplaza el punto de funcionamiento, en cambio una bomba cuya curva $H - Q$ sea plana, mostrará un gran cambio de capacidad pero la altura variará poco al desplazarse el punto de funcionamiento.

Las curvas H – Q para las bombas centrífugas son sustancialmente planas, con tendencia a que el rendimiento máximo se sitúe inmediatamente después de la capacidad media

Las curvas H – Q para una bomba de flujo axial es aún más empinada, con su punto de demanda en la descarga nula y su curva de potencia es decreciente

Cavitación en las Bombas

Un factor importante para el funcionamiento satisfactorio de una bomba es evitar la cavitación, tanto para obtener un buen rendimiento como para evitar daños en el impulsor. Cuando un líquido pasa por el impulsor de una bomba, se produce un cambio de presión. Si la presión absoluta de un líquido cae por debajo de su presión de vapor, se producirá cavitación. Las zonas de vaporización obstruyen el flujo limitando la capacidad de la bomba. Cuando el fluido avanza a una zona de mayor presión, las burbujas colapsan y su implosión puede producir un picado del impulsor. La cavitación suele producirse con más frecuencia cerca de la salida (periferia) de los impulsores de flujo radial y mixto, donde se alcanzan las velocidades mayores. También puede aparecer en la aspiración del impulsor, donde las presiones son menores. En el caso de las bombas de flujo axial, la parte más vulnerable a la cavitación es el extremo de los alabes.

Para las bombas se define el parámetro de cavitación como

$$\sigma = \frac{(P_{as})_{abs} / \gamma + V_{as}^2 / 2g - P_d / \gamma}{h} = \frac{NPSH}{h}$$

para evitar que se produzca cavitación, la bomba debe funcionar de manera que σ sea mayor que σ_c . Esto puede conseguirse seleccionando el tipo, tamaño de bomba y la velocidad de funcionamiento adecuados, y situando la bomba en el punto y a la elevación correcta dentro del sistema.

La expresión para σ indica que σ tenderá a ser pequeño (por lo que existirá la posibilidad de cavitación) en las siguientes situaciones: a) grandes alturas de bombeo, b) presión atmosférica, c) grandes valores de z_e , es decir, cuando la bomba se encuentra a una elevación relativamente grande comparada con la elevación de la superficie del agua del depósito; e) valores grandes de presión de vapor, es decir, altas temperaturas y/o bombeo de líquidos muy volátiles como gasolina.

La cavitación ocurre cuando la presión absoluta dentro de un impulsor cae por debajo de la presión del vapor del líquido y se forman burbujas de vapor. Estas se contraen más adelante en los alabes del impulsor cuando llegan a una región de dispersión más alta. La (MPS)_r mínima para una capacidad y velocidad dadas se define como la diferencia entre la carga absoluta de succión y la presión de vapor del líquido bombeado a la temperatura de bombeo y que es necesario para evitar la cavitación.

La cavitación de la bomba se nota cuando hay uno o más de las siguientes señales: ruido, vibración, caída en la curva de capacidad de carga y eficiencia, con el paso del tiempo, por los daños en el impulsor por picaduras y erosión. Como todas estas señales son inexactas, se hizo necesario aplicar ciertas reglas básicas para establecer cierta uniformidad en la detección de la cavitación.

Efecto de la Viscosidad

Las bombas centrífugas también se utilizan para bombear líquidos con viscosidades diferentes a las del agua. Al aumentar la viscosidad, la curva altura caudal se hace más vertical y que la potencia requerida aumenta. La línea discontinua indica los puntos de máximo rendimiento para cada curva. Se observa que tanto la altura como el caudal disminuyen en el punto de máximo rendimiento.

Dos de las principales pérdidas en una bomba centrífuga son por fricción con el fluido y fricción con el disco. Estas pérdidas varían con la viscosidad del líquido de manera que la carga – capacidad de salida, así como de la toma mecánica difiere de los valores que se obtienen cuando se maneja agua.

Es necesario, sin embargo, conocer las tres unidades diferentes que pueden encontrarse para describir la viscosidad de un líquido en especial:

- 1 Segundos Saybolt Universal, o SSU
- 2 Centistokes – que define la viscosidad cinemática.
- 3 Centipoises – que definen la viscosidad absoluta

Se han hecho muchas pruebas experimentales para determinar el efecto de la viscosidad del líquido en el funcionamiento de diversas bombas centrífugas. Aun con datos muy extensos sobre el efecto de la viscosidad:

Es difícil predecir con precisión el funcionamiento de una bomba cuando maneje un fluido viscoso de su comportamiento cuando emplea agua fría.

Cuando se aplican bombas ordinarias de agua fría para usarse en el bombeo de líquidos viscosos, se debe tener cuidado para asegurarse de que el diseño de la flecha es lo bastante fuerte para la potencia necesaria, que puede ser un considerable esfuerzo en los caballos de fuerza al freno para agua fría, aunque pueda ser el peso específico del líquido menor que el del agua.

Selección de Bombas:

Al seleccionar bombas para una aplicación dada, tenemos varias bombas entre las que elegir. Haremos lo posible para seleccionar una bomba que opere con un rendimiento relativamente alto para las condiciones de funcionamiento dadas.

Los parámetros que se deben investigar incluyen la velocidad específica N_s , el tamaño D del impulsor y la velocidad de operación n . Otras posibilidades son el uso de bombas multietapa, bombas en serie, bombas en paralelo, etc. Incluso, bajo ciertas condiciones, limitar el flujo en el sistema puede producir ahorros de energía.

El objetivo es seleccionar una bomba y su velocidad de modo que las características de funcionamiento de la bomba en relación al sistema en el cual opera sean tales que el punto de funcionamiento esté cerca del PMR (punto de máximo de rendimiento). Esto tiende a optimizar el rendimiento de la bomba, minimizando el consumo de energía.

El punto de operación puede desplazarse cambiando la curva característica de la bomba, cambiando la curva característica del sistema o cambiando ambas curvas. La curva de la bomba

puede modificarse cambiando la velocidad de funcionamiento de una bomba dada o seleccionando una bomba distinta con características de funcionamiento diferentes. En algunos casos puede ser una ayuda ajustar el impulsor, es decir, reducir algo su diámetro, alrededor de un 5 por 100, mediante rectificado. Este impulsor más reducido se instala en la cubierta original. La curva característica del sistema puede cambiarse modificando el tamaño de la tubería o estrangulando el flujo.

Una complicación que se presenta a menudo es que los niveles de ambos extremos del sistema no se mantienen constantes, como ocurre si los niveles de los depósitos fluctúan. En tal caso es difícil alcanzar un rendimiento alto para todos los modos de funcionamiento. En casos extremos a veces se utiliza un motor con velocidad variable.

El procedimiento de selección de una bomba que permita una recirculación segura es

- 1 seleccione una bomba que produzca el flujo de descarga Q_a deseado. La curva E es la característica de carga y capacidad de la bomba y la curva a es la de carga del sistema para la descarga hacia el tanque A. La bomba funciona con una carga de Hop.
- 2 para incluir recirculación continua en el sistema de bombeo, hay que aumentar el caudal de la bomba con la carga Hop de funcionamiento para mantener una descarga de Q_a hacia el tanque A y, al mismo tiempo, una recirculación Q_b de retorno al tanque B. Para lograrlo, se selecciona el tamaño inmediato mayor de impulsor con la curva de rendimiento F.
- 3 si se conoce el flujo Q_b con la curva Hop de funcionamiento para orificio y tubo de recirculación, el flujo de recirculación Q_s , en el punto de corte de la bomba se puede determinar con:

$$Q_s = Q_b \sqrt{\frac{H_s}{H_{op}}}$$

en donde H, es la carga de corte de la bomba con la curva de rendimiento F.

- 4 Calcúlese el flujo mínimo seguro, Q_{min} , para la bomba con curva de rendimiento F y la ecuación (2) y conviértase W_{min} a Q_{min} .
- 5 Compárese la recirculación, Q_s , en el punto de corte de la bomba contra el flujo seguro mínimo, Q_{min} . Si Q_s es mayor que o igual a Q_{min} , esto concluye el proceso de selección.

Si Q_s es menor que Q_{min} , selecciónese el tamaño inmediato mayor de impulsor y repítase los pasos 3, 4 y 5 hasta

Determinar el tamaño de impulsor que produzca la recirculación mínima segura.

Instalación de Bombas en la Industria de Alimentos

Los productos que manipulan las bombas en la industria de la alimentación pueden ser desde soluciones acuosas y aceites vegetales ligeros a jarabes y melazas e gran viscosidad, desde líquidos puros a los que tienen gran proporción de sólidos. Dada la extensa variedad de características de estos medios. La industria emplea casi todos los tipos de bombas, con ciertas preferencias en aplicaciones concretas, como en el caso de las máquinas específicamente proyectadas como bombas para producto alimenticio con particular atención con los detalles a estudiar.

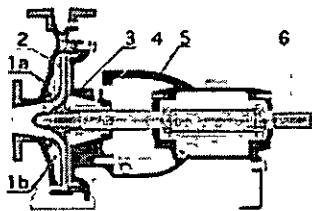
La condición principal que deben cumplir estas bombas es que no contaminen el producto en modo alguno. Básicamente esto significa que la bomba no debe ser sensible al ataque corrosivo o abrasivo por parte del producto que se manipula y que no le teñirá en absoluto. Al final de un periodo de utilización, la bomba puede verse obligada a cierto tiempo de inactividad, o incluso pasar a manipular un producto diferente. La facilidad de limpieza y la eliminación eficaz de cualquier residuo de producto son, pues, esenciales y ello debe conseguirse mediante una simple purga, cuando se trata de una bomba de diafragma, el material elegido para este será, normalmente el caucho blanco suave, o bien, si la resistencia al ataque químico ha de ser más elevada, el "hipalón". Igualmente puede ser necesario que la cabeza de válvula, estas y las conexiones de aspiración y de descarga sean de vidrio o de material estéril en lugar de metal.

Basadas en la experiencia se han establecido ciertas condiciones para los materiales. Así, en las bombas centrífugas utilizadas en la manipulación de zumos de melocotones o peras, la caja suele ser de fundición y los rodetes de bronce excepto de cinc, pero esta combinación no conviene para las cerezas aunque su valor de pH sea parecido. En este caso se recurre a la construcción totalmente de bronce. Por otra parte los tomates y las leches sugieren virtualmente el uso de bombas de acero inoxidable.

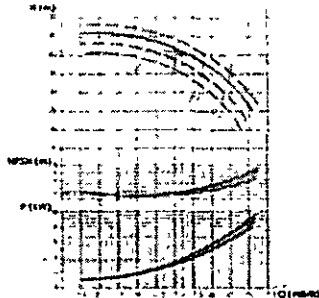
Si algún material existe con la máxima posibilidad de aplicación en bombas para productos alimenticios es el acero inoxidable, a pesar de que no deja de tener sus limitaciones sobre todo si el líquido manipulado es electrolito activo, como la salmuera.

Es importante que la bomba se proyecte y se construya de forma que el desmontaje y la limpieza sean operaciones fáciles, dado que quizás deban realizarse a diario o a intervalos regulares (según el proceso) aparte de la facilidad de repararlas y montarlas de nuevo, las superficies internas deben ser lisas y exentas de grietas y puntos de acumulación de suciedad. Esto se tendrá en cuenta al proyectar una bomba para procesos de la industria alimenticia.

Bomba centrífuga



Corte esquemático de una bomba centrífuga.



Nomograma característico de una bomba centrífuga

Una **bomba centrífuga** es un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en energía cinética y potencial requeridas. Aunque la fuerza centrífuga producida depende tanto de la velocidad en la periferia del impulsor como de la densidad del líquido, la energía que se aplica por unidad de masa del líquido es independiente de la densidad del líquido. Por tanto, en una bomba dada que funcione a cierta velocidad y que maneje un volumen definido de líquido, la energía que se aplica y transfiere al líquido, (en pie-lb/lb de líquido) es la misma para cualquier líquido sin que importe su densidad. Por tanto, la carga o energía de la bomba en pie-lb/lb se debe expresar en pies.

Las bombas centrífugas tienen un uso muy extenso en la industria ya que son adecuadas casi para cualquier servicio. Son comunes las que tienen capacidades entre 5000 y 6000 galones por minuto. Las cargas pueden ser hasta de 500 a 600 pies con motores eléctricos de velocidad estándar. Estas bombas se suelen montar horizontales, pero también pueden estar verticales.

Constituyen no menos del 80 % de la producción mundial de bombas, porque es la más adecuada para manejar más cantidad de líquido que la bomba de desplazamiento positivo.

No hay válvulas en las bombas de tipo centrífugo, el flujo es uniforme y libre de pulsaciones de baja frecuencia.

Los impulsores convencionales de bombas centrífugas se limitan a velocidades en el orden de 60 m/s (200 pie/s).

Cebado de bombas

Algunos tipos de bombas para su correcto funcionamiento necesitan estar llenas de fluido, en caso que estén llenas de aire no funcionarían correctamente, es lo que se conoce como cebado de la bomba. Este fenómeno se produce en concreto en las bombas centrífugas, estas son máquinas sin capacidad autocebante, al contrario que las bombas de desplazamiento positivo que en general son todas autocebantes, es decir aun llenas de aire son capaces de llenar de fluido el circuito de aspiración.

En un circuito como el mostrado en el esquema adjunto sin ningún dispositivo adicional al parar la bomba centrífuga el fluido del circuito de aspiración cae hacia el depósito vaciándose la bomba.

Esquema de una bomba instalada sobre el nivel de agua

La altura de elevación H que proporciona la bomba es siempre la misma y responde a la siguiente fórmula

$$H = \frac{P_I - P_A}{\rho g}$$

donde P_I es la presión de impulsión, P_A es la presión de aspiración, ρ es la densidad del fluido y g la aceleración de la gravedad.

Despejando la diferencia de presiones se tiene que

$$(P_I - P_A) = \rho g H$$

De esta fórmula se puede observar que la diferencia de presiones que consigue la bomba entre la impulsión y la aspiración es mayor cuanto mayor sea la densidad del fluido a mover. De tal forma que para el caso concreto del agua se tiene

$$(P_I - P_A)_{aire} = \rho_{aire} g H = 1,29 \cdot 9,81 \cdot H$$

$$(P_I - P_A)_{agua} = \rho_{agua} g H = 1000 \cdot 9,81 \cdot H$$

Con lo cual

$$\frac{(P_I - P_A)_{aire}}{(P_I - P_A)_{agua}} = \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} = \frac{1,29}{1000} = 0,00129$$

Es decir, si la bomba está llena de aire la presión de aspiración es 0,00129 veces la que conseguiría dicha bomba si estuviese llena de agua, es decir, si estuviese cebada. Por lo que si la bomba está vacía la altura que se eleva el agua en el circuito de aspiración sobre el nivel del agua en el depósito es mínima y totalmente insuficiente para que el agua llegue a la bomba.

Por otra parte el funcionamiento de una bomba centrífuga en vacío puede estropear el sellado de la bomba debido a una deficiente refrigeración dado que no circula fluido por su interior que ayuda a mejorar la disipación del calor producido por la bomba.

Por lo tanto en instalaciones de bombeo cuyo esquema coincide con el indicado en el esquema adjunto es necesario un sistema adicional para evitar que la bomba se descebe. Algunos de estos sistemas se enumeran a continuación:

- Se puede construir un orificio en la parte superior de la carcasa de la bomba y arrojar agua sobre el mismo para que la bomba al encenderse esté llena de agua y pueda bombear correctamente. No se trata de un sistema muy eficiente.
- Se puede usar una válvula de pie. Permite el paso del líquido hacia la bomba pero impiden su regreso al depósito una vez se ha apagado la bomba con lo que impide el descebe de la tubería de impulsión. Puede presentar problemas cuando el fluido tiene suciedad que se deposita en el asiento de la bomba disminuyendo su estanqueidad, por otra parte supone una pérdida de carga más o menos importante en la tubería de impulsión por lo que aumenta el riesgo de que se produzca cavitación en la bomba.
- Uso de una bomba de vacío. La bomba de vacío es una bomba de desplazamiento positivo que extrae el aire de la tubería de impulsión y hace que el fluido llegue a la bomba centrífuga y de este modo quede cebada.
- Por último otra posibilidad consiste en instalar la bomba bajo carga, es decir por debajo del nivel del líquido, aunque esta disposición no siempre es posible, a no ser que se instale sumergida, con lo cual la bomba tiene que ser especial.

Golpe de ariete

Junto a la cavitación, el **golpe de ariete** o *pulso de Joukowski*, llamado así por el ingeniero ruso Nikolay Egorovich Zhukovskiy (Жуковский, Николай Егорович en ruso), es el principal causante de averías en tuberías e instalaciones hidráulicas

El golpe de ariete se origina debido a que el agua es ligeramente elástica (aunque en diversas situaciones se puede considerar como un fluido no compresible). En consecuencia, cuando se cierra bruscamente una válvula o un grifo instalado en el extremo de una tubería de cierta longitud, las partículas de agua que se han detenido son empujadas por las que vienen inmediatamente detrás y que siguen aún en movimiento. Esto origina una sobre presión que se desplaza por la tubería a una velocidad algo menor que la del sonido en el agua. Esta sobre presión tiene dos efectos: primero comprime ligeramente el agua, reduciendo su volumen, y segundo dilata ligeramente la tubería. Cuando todo el agua que circulaba en la tubería se ha detenido, cesa el impulso que la comprimía y, por tanto, ésta tiende a expandirse. Por otro lado, la tubería que se había ensanchado ligeramente tiende a retomar su dimensión normal. Conjuntamente, estos efectos provocan otra onda de presión en el sentido contrario. El agua se desplaza en dirección contraria pero, al estar la válvula cerrada, se produce una depresión con respecto a la presión normal de la tubería. Al reducirse la presión, el agua puede pasar a estado gaseoso formando una burbuja mientras que la tubería se contrae. Al alcanzar el otro extremo de la tubería, si la onda no se ve disipada por ejemplo, en un depósito a presión atmosférica, se reflejará siendo mitigada progresivamente por la propia resistencia a la compresión del agua y a la dilatación de la tubería.

El problema del golpe de ariete es uno de los problemas más complejos de la hidráulica, y es resuelto generalmente mediante modelos matemáticos, que permiten simular el comportamiento del sistema.

Consecuencias

Este fenómeno es muy peligroso, ya que la sobre presión generada puede llegar a entre 60 y 100 veces la presión normal de la tubería, ocasionando roturas en los accesorios instalados en los extremos (grifos, válvulas, etc.)

La fuerza del golpe de ariete es directamente proporcional a la longitud del conducto, ya que las ondas de sobre presión se cargarán de más energía, e inversamente proporcional al tiempo durante el cual se cierra la llave: cuanto menos dura el cierre, más fuerte será el golpe.

El golpe de ariete estropea el sistema de abastecimiento de agua, a veces hace reventar tuberías de hierro colado, ensancha las de plomo, arranca codos instalados, etc.

Dispositivos para controlar el golpe de ariete

Para evitar este efecto, existen diversos sistemas:

- Para evitar los golpes de ariete causados por el cierre de válvulas, hay que estrangular gradualmente la corriente de agua, es decir, cortándola con lentitud utilizando para ello, por ejemplo, válvulas de rosca. Cuanto más larga es la tubería, tanto más deberá durar el cierre.
- Sin embargo, cuando la interrupción del flujo se debe a causas incontrolables como por ejemplo, la parada brusca de una bomba eléctrica se utilizan tanques

neumáticos con cámara de aire comprimido, torres piezométricas, o válvulas que puedan absorber la onda de presión.

- Otro caso común de variación brusca de la velocidad del flujo en la tubería se da en las centrales hidroeléctricas, cuando se produce una caída parcial o total de la demanda. En estos casos tratándose de volúmenes importantes de agua que deben ser absorbidos, se utilizan en la mayoría de los casos torres piezométricas que se conectan con la presión atmosférica, o válvulas de seguridad.

Cavitación

La **cavitación** o aspiración en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido. Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas o, más correctamente, *cavidades*. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implotan (el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, «aplastándose» bruscamente las burbujas) produciendo una estela de gas y un rápido desgaste de la superficie que origina este fenómeno.

La implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido. Estas pueden disiparse en la corriente del líquido o pueden chocar con una superficie. Si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse metalúrgicamente y se inicia una erosión que, además de dañar la superficie, provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando implosionan, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida.

El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones, dando la impresión de que se tratara de grava que golpea en las diferentes partes de la máquina.

Se puede presentar también cavitación en otros procesos como, por ejemplo, en hélices de barcos y aviones, bombas y tejidos vascularizados de algunas plantas.

Introducción

El proceso físico de la cavitación es casi exactamente igual que el que ocurre durante la ebullición. La mayor diferencia entre ambos consiste en cómo se efectúa el cambio de fase. La ebullición eleva la presión de vapor del líquido por encima de la presión ambiente local para producir el cambio a fase gaseosa, mientras que la cavitación es causada por una caída de la presión local por debajo de la presión de vapor.

Para que la cavitación se produzca, las "burbujas" necesitan una superficie donde nuclearse. Esta superficie puede ser la pared de un contenedor o depósito, impurezas del líquido o cualquier otra irregularidad.

El factor más determinante en cómo se produce la cavitación es la temperatura del líquido. Al variar la temperatura del líquido varía también la presión de vapor de forma importante, haciendo más fácil o difícil que para una presión local ambiente dada la presión de vapor caiga a un valor que provoque cavitación.

Problemas

La cavitación es, en la mayoría de los casos, un suceso indeseable. En dispositivos como hélices y bombas, la cavitación puede causar mucho ruido, daño en los componentes y una pérdida de rendimiento.

Este fenómeno es muy estudiado en ingeniería naval durante el diseño de todo tipo de barcos debido a que acorta la vida útil de algunas partes tales como las hélices y los timones.

En el caso de los submarinos este efecto es todavía más estudiado, evitado e indeseado, puesto que imposibilita a estos navíos de guerra mantener sus características operativas de silencio e indetectabilidad por las vibraciones y ruidos que la cavitación provoca en el casco y las hélices.

El colapso de las cavidades supone la presencia de gran cantidad de energía que puede causar enorme daño. La cavitación puede dañar casi cualquier material. Las picaduras causadas por el colapso de las cavidades producen un enorme desgaste en los diferentes componentes y pueden acortar enormemente la vida de la bomba o hélice.

Además de todo lo anterior, la creación y posterior colapso de las burbujas crea fricción y turbulencias en el líquido. Esto contribuye a una pérdida adicional de rendimiento en los dispositivos sometidos a cavitación.

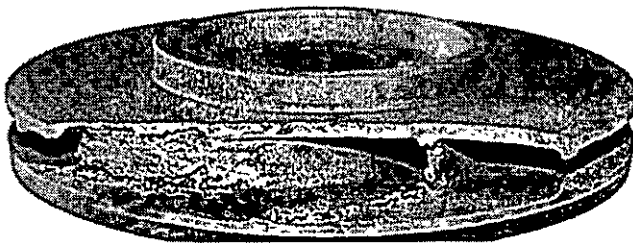
La cavitación se presenta también en el fondo de los ríos donde se genera a partir de irregularidades del lecho disociando el agua y el aire. Ambos son sometidos a presiones, dando lugar, este último, a burbujas que, con la fuerza del agua, se descomponen en tamaños microscópicos, saliendo disparadas a gran velocidad. Esto provoca un fuerte impacto en el lecho que puede ser de hasta 60 t/m^2 . Su importancia radica en la constancia y repetición del fenómeno, lo que favorece su actuación. La cavitación es un proceso erosivo frecuente en los pilares de los puentes.

Aunque la cavitación es un fenómeno indeseable en la mayoría de las circunstancias, esto no siempre es así. Por ejemplo, la supercavitación tiene aplicaciones militares como por ejemplo en los torpedos de supercavitación en los cuales una burbuja rodea al torpedo eliminando de esta manera toda fricción con el agua. Estos torpedos se pueden desplazar a altas velocidades bajo el agua, incluso hasta a velocidades supersónicas. La cavitación puede ser también un fenómeno positivo en los dispositivos de limpieza ultrasónica. Estos dispositivos hacen uso de ondas sonoras ultrasónicas y se aprovechan del colapso de las burbujas durante la cavitación para la limpieza de las superficies.

Bombas y hélices



Desgaste producido por la cavitación en un rodete de una bomba centrífuga



Otro ejemplo de desgaste producido por la cavitación en un rodete de una bomba centrífuga.

Los alabes de un rodete de una bomba o de la hélice de un barco se mueven dentro de un fluido, las áreas de bajas presiones se forman cuando el fluido se acelera a través de los alabes. Cuanto más rápido se mueven los alabes menor es la presión alrededor de los mismos. Cuando se alcanza la presión de vapor, el fluido se vaporiza y forma pequeñas burbujas de vapor que al colapsarse causan ondas de presión audibles y desgaste en los alabes.

La cavitación en bombas puede producirse de dos formas diferentes

Cavitación de succión

La cavitación de succión ocurre cuando la succión de la bomba se encuentra en unas condiciones de baja presión/alto vacío que hace que el líquido se transforme en vapor a la entrada del rodete. Este vapor es transportado hasta la zona de descarga de la bomba donde el vacío desaparece y el vapor del líquido es de nuevo comprimido debido a la presión de descarga. Se produce en ese momento una violenta implosión sobre la superficie del rodete. Un rodete que ha trabajado bajo condiciones de cavitación de succión

presenta grandes cavidades producidas por los trozos de material arrancados por el fenómeno, esto origina el fallo prematuro de la bomba

Cavitación de descarga

La cavitación de descarga sucede cuando la descarga de la bomba está muy alta. Esto ocurre normalmente en una bomba que está funcionando a menos del 10% de su punto de eficiencia óptima. La elevada presión de descarga provoca que la mayor parte del fluido circule por dentro de la bomba en vez de salir por la zona de descarga, a este fenómeno se le conoce como "slippage". A medida que el líquido fluye alrededor del rodete debe de pasar a una velocidad muy elevada a través de una pequeña apertura entre el rodete y el tajamar de la bomba. Esta velocidad provoca el vacío en el tajamar (fenómeno similar al que ocurre en un venturi) lo que provoca que el líquido se transforme en vapor. Una bomba funcionando bajo estas condiciones muestra un desgaste prematuro del rodete, tajamar y álabes. Además y debido a la alta presión de funcionamiento es de esperar un fallo prematuro de las juntas de estanqueidad y rodamientos de la bomba. Bajo condiciones extremas puede llegar a romperse el eje del rodete.