Proyecto Hidroeléctrico para la parroquia Lloa

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN LA ESPECIALIZACION DE ELECTROTECNIA DE LA ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.

BOLIVAR R. LARREA A.

Quito, Julio de 1960

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Quito, Julio de 1960

INDICE DE MATERIAS (continuación)

	Página
Esfuerzos de los postes	50
Selección de postes	51
TRANSFORMADOR DE BAJADA	
Utilidad	55
Funcionamiento en vacío	55
La corriente de vacío y la corriente de magnetización	56
Funcionamiento a plena carga con carga resistiva pura, Diagrama de Kapp	58
Rendimiento	59
Funcionamiento del transformador cargado, cuyo ángulo sea diferente de cero. Diagrama de Kapp	59
El transformador considerando la dispersión. Diagrama de Kapp	61
Tensión y corriente de cortocircuito	64
TRANSFORMADOR ESPECIFICO PARA EL PRESENTE CASO	
Cálculo del número de espiras del primario y del secundario	66
Dimensionamiento del núcleo de hierro	67
La sección transversal de los conductores	67
Sección transversal del núcleo de hierro	66
Rendimiento	69
Refrigeración	69

INDICE DE PLANOS

Plano No.	Página
1	13
2	13
3	13
4	13
5	13
6	32
7	32
8	32
9	32
10	32
11	32
12	32
13	32
14	38
15	38
16	55
17	55
18	55
19	55
20	71
21	71
22	71
23	71
24	71
25	71

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

Los pobladores de Lloa desean electrificar su parroquia, a base del salto que produce el canal denominado "Línea Oriental", de propiedad de la Empresa de Agua Potable de Quito.

La Línea Oriental, como los demás canales abiertos y cerrados del "Sistema Lloa", se ha construído con la finalidad de suministrar agua a "El Placer". Esta Línea Oriental tiene su bocatoma en el río Cinto, y luego de un recorrido de 3750 metros aproximadamente, se encuentra el indicado salto, cuyas cotas son:

3152 metros en la finalización del canal, y

3055,90 metros en la salida del tanque recolector (ver plano No. 6).

A este tanque recolector llegan todas las aguas que corren por los canales del "Sistema Lloa", al cual se debe llevar el agua de la línea oriental, despues de aprovechar el salto.

En la actualidad, el agua corre por el salto a través de una tubería de hierro, de 12 pulgadas de diámetro y de unos 220 metros de longitud. En esta tubería se elimina la energía potencial mediante DOS TANQUES ROMPEPRESION:

el primero, situado en la cota 3088,oo metros, y

el segundo, es el mismo tanque recolector.

Inmediatamente a este tanque recolector y rompepresión, está la boca del túnel Ungüí, por el cual realizan su recorrido todas las aguas recogidas en la zona, directamente a "El Placer" (en Quito).

Como se desprende de las cotas primeramente citadas, el salto bruto del que se dispone, es pues de 96,10 metros.

Según la Empresa de Agua Potable de Quito, el caudal mínimo disponible es de 86 litros por segundo, y, el caudal máximo obtenido, es de 120 litros por segundo. Son datos de aforos realizados durante el estiaje y crecida más notables, respectivamente, aparecidos en el lugar.

EL TANQUE DE PRESION: (Plano No. 1)

Su volúmen:

Se ha pensado en que el volúmen del tanque de presión, sea igual a aquel que resulte de acumular el caudal mínimo disponible, durante un minuto. Como se indicó, la Empresa de Agua Potable de Quito anota como mínimo caudal, 86 litros por segundo. Con lo cual, el volúmen será de:

$$86\ dm^3/seg \times 60\ seg = 5{,}16\ m^3$$

Admitiendo una altura mínima de 1,20 metros, pues, a fin de que el agua acumulada en el tanque de presión, adquiera suficiente velocidad inicial, debe existir, por lo menos, un metro, que se cuenta desde el centro del orificio de entrada a la tubería de presión, hasta el nivel libre del agua (en el tanque). Según ésto, las dimensiones del tanque de presión serán:

$$1{,}2 \cdot 2{,}07 \cdot 2{,}07 = 5{,}16\ m^3$$

Pero en la práctica, no se hace exactamente de estas dimensiones. Por esta razón, las dimensiones que tendrá nuestro tanque de presión son:

$$1{,}2\ m \cdot 2{,}1\ m \cdot 2{,}1\ m = 5{,}292\ m^3$$

Este volúmen de 5,292 m^3 se acumula en 61,53 segundos, que desde luego, es suficiente para que el maquinista de la planta reacciones y opere debidamente en caso de que falte agua en el tanque de presión.

El Orificio de Excesos:

Se ha decidido que, para evacuar los excesos, sea un orificio circular, unido directamente, con un tubo de cemento, al pozo de revisión, en donde inicia la tubería que existe en la actualidad, a lo largo del salto (12 pulgadas de diámetro y 220 metros de longitud. Ver Plano No. 2). En esta forma se evitarán pérdidas de agua, que es la primera condición de la Empresa de Agua Potable de Quito para colaborar con su canal, su caudal y su salto.

El trecho de tubo de cemento mencionado permitirá que la velocidad del agua de excesos sea de un valor igual a aquella que tiene el agua en la

parte final del canal de aducción (1,20 metros por segundo). Velocidad, dato de la Empresa de Agua Potable de Quito.

Cálculo del diámetro mínimo del orificio y del tubo de cemento por el cual circulará el agua de excesos:

$$Q = v \cdot s$$

Q, es el caudal de excesos (120 - 86 = 34 lit/seg),
v, es la velocidad del agua de excesos (1,2 m/seg), y
s, es la sección transversal libre del orificio de excesos.

$$s = (34\ dm^3/seg)/12\ dm/seg = 2,85\ dm^2$$
$$s = 2,85\ dm^2 = \pi \cdot D^2/4$$

D, es el diámetro del orificio. Despejándolo y extrayendo la raíz cuadrada resulta:

$$D = 19,1\ cm$$

Por seguridad, se puede poner, el mencionado trecho, con tubo de cemento de 25 cm de diámetro (diámetro comercial apropiado, ya que el de 20 cm no ofrece mayor seguridad).

Cálculo de los muros laterales (componentes del tanque de presión):

Se calcularán para que funcionen como diques de gravedad. Y, para tener una idea acerca del espesor que debe tener la base. El procedimiento siguiente, explicado por Gómez Navarro y Aracil Segura, en su obra titulada "Saltos de Agua y Presas de Embalse", Tomo I, página 397, dá un resultado satisfactorio:

En el plano No. 3a: P, el peso del dique,
E, el empuje ejercido por el agua, y
W_s, la subpresión.

Se toman momentos de las fuerzas actuantes en el dique, y, se supone el caso límite: "que la resultante actúe en el extremo, aguas abajo, del tercio central de la base, en cuyo punto (centro de momentos), el momento de la resultante será c e r o (el brazo vale cero), por consiguiente, será tambien cero la suma de los momentos", así:

(1) $P \cdot b/3 - E \cdot h/3 - W_s \cdot b/6 = 0$ Además:

(2) $P = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h \cdot \gamma$;

(3) $E = h^2/2$; y

(4) $W_s = b \cdot h$ entonces:

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot h \cdot \gamma \cdot b/3 - h^2/2 \cdot h/3 - b \cdot h \cdot b/6 = 0$$

dividiendo todo por h/6, queda:

$b^2(\gamma - 1) = h^2$, de donde

(5) $$b = \frac{h}{\sqrt{\gamma - 1}}$$

Se usará mampostería de piedra para la construcción de los muros, por cuanto a pocos metros del lugar, se moldean molonas.

h, es la altura de agua, ya se indicó que vale 1,20 metros, y

γ , es el peso específico del material (2,2 toneladas por metro cúbico)

Reemplazando valores en la fórmula (5), se obtiene que

b = 1,10 metros.

Se adoptará el valor de 1,10 metros como espesor de la base, y, para el cálculo se tomará un metro de longitud de muro (dique).

Determinación de las fuerzas actuantes en el muro:

$E = h^2/2 = 1,2^2/2 = 0,72$ toneladas

$P = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h' \cdot \gamma = \frac{1}{2} \cdot 1,10 \cdot 1,50 \cdot 2,2 = 1,815$ toneladas

h', vale 1,50 porque es la suma de altura de agua (1,2 m) con la altura del franco, que para el presente caso, será suficiente de 0,30 m, pues, el orificio de excesos, que tiene 0,25 m de diámetro, debe colocarse sobre el nivel libre. Por ésto $h' = 1,20 + 0,30 = 1,50$ m.

Con estos datos, se determina la distancia del punto de aplicación de la resultante, a partir del punto B;

Por la semejanza entre los triángulos: CDF y aquel que forman las fuerzas P, E y la resultante R, se tiene (Plano No. 3b)

$$(P/E) = (h/3)/x$$

Despejando x y reemplazando los otros valores (conocidos), resulta

x = 0,16 metros. Y, la distancia desde el punto B hasta el punto de aplicación de la resultante vale: $b/3 + x$; o sea:

$$1,10/3 + 0,16 = 0,53 \text{ metros.}$$

Lo cual significa que la resultante actúa cerca del centro del tercio central de la base. A simple vista, se vé claro que el muro está perfectamente asegurado. Sinembargo, se calculan los coeficientes de seguridad:

1.- Contra deslizamiento, a :

$$(6) \qquad a = (P \cdot \mu)/E$$

μ, es el coeficiente de fricción entre el dique y el suelo, para mampostería, según el Ingeniero Jaime Bustamante, en su tratado de Hidráulica, editado en la Escuela de Ingenieros Militares, página 19, Quito, 1955, se usa el valor de 0,6. Las fórmulas (6) y (7), corresponden al mismo Autor.

P, es el peso de la mampostería, y

E, es el empuje del agua.

Con ésto:

$$a = 1,815 \cdot 0,6/0,72 = 1,66$$

Se debe tomar en cuenta, además, que la sección transversal del dique, no va a ser el simple triángulo (Planos 3a y 3b), sino aquella de un trapecio, tal que en su coronamiento, tenga 0,30 metros (cortes indicados en el Plano No. 1).

2.- Contra volcamiento, b ; (se supone, para el cálculo, que el punto de vuelco es O, Plano No. 3b)

$$(7) \qquad b = \frac{P \cdot (b - 0,53)}{E \cdot h/3}$$

$$b = (1,815 \cdot 0,57)/0,72 \cdot 0,4 = 3,5$$

b, es pues, más que suficiente.

La presión que resistirá el suelo, será la fuerza P, correspondiente al peso de la mampostería, dividida en la superficie S, sobre la cual se asienta, así :

$$p = P/S = 1,815 \text{ ton.}/1,10 \text{ m}^2 = 0,165 \text{ kg/cm}^2$$

Valor inferior al cual resiste el suelo estudiado.
Por ser que la altura de 1,5 m, es relativamente pequeña, no se comprueba para que los muros que formarán el tanque de presión, trabajen tambien como "muros de sostenimiento" (caso del tanque de presión vacío).

Entrada a la tubería de presión (Plano No. 4):

En su iniciación, en el tanque de presión, debe tener una forma de embudo, aumentando así la sección, en su orígen, a fin de elevar el coeficiente de contracción, por ejemplo, a 0,97; valor recomendado por Gómez Navarro y Aracil Segura, en su obra "Saltos de Agua y Presas de Embalse", editado en "Tipografía Artística", Madrid, 1958, tomo I, página 401.
Con el coeficiente de contracción, 0,97, la sección de entrada S, es

$$S = Q/(0{,}97 \cdot V_{entrada})$$

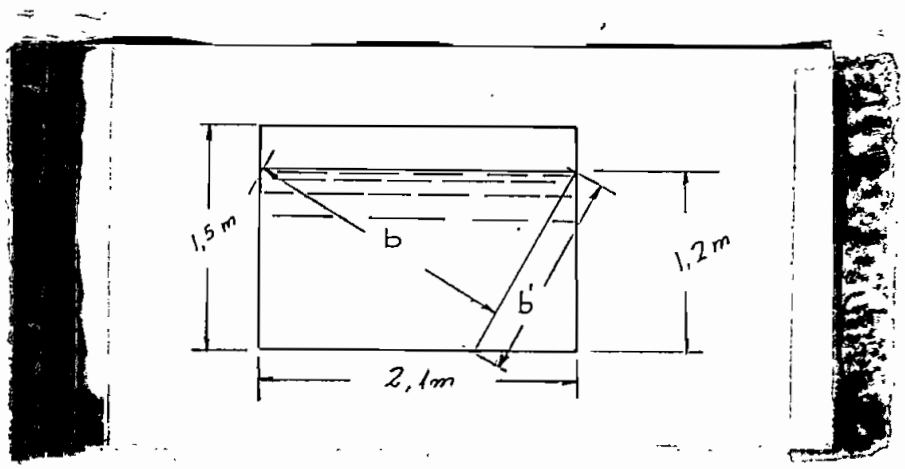
La boca del embudo, debe situarse, en el tanque de presión, lo más baja posible, con el fin de evitar la producción de remolinos, y así mismo, evitar mayor altura de los muros que forman el tanque de presión, ya que la mínima altura necesaria para dar suficiente velocidad inicial al agua, es precisamente la adoptada para nuestro caso.
Al hacer la iniciación de la tubería de presión en forma de embudo, éste debe ser tal que su sección transversal, sea mayor, por lo menos, en un 20 % que la sección de la tubería misma; y, en general, el origen de la sección transversal del embudo, ha de permitir que la velocidad de entrada no sea superior a 1,5 m/seg (se verá que, en nuestro caso, la velocidad es de un valor muy inferior a este límite).
Despues de determinar el diámetro de la tubería de presión, se determinará la sección inicial del embudo (que será de aristas redondeadas).
El embudo será de un metro de longitud, cuyo diámetro menor será igual a aquel de la tubería de presión.

La rejilla:

La rejilla tiene la finalidad de evitar que a la tubería entren cuerpos suficientemente grandes, que puedan dañar a la turbina. Para el caso presente se ha pensado en que ésta sea formada por barras de sección cuadra

da y de 0,5 cm por lado, dejándo, ... 1,5 cm entre dos barras consecutivas. Además, la rejilla debe ser inclina 60 grados con respecto a la solera, y finalizar en el nivel libre, pues así se facilita limpiarla a mano.

Se prueba, a continuación, que las barras de 0,5 cm por 0,5 cm, son sufi-



cientes para el presente caso:

b, es la mayor altura de agua que acciona sobre la barra, se ejerce perpendicularmente. Midiéndola a escala, resulta que $\underline{b} = 1{,}8$ m lo cual equivale a $0{,}18$ kg/cm^2

La longitud de la rejilla es $b' = 1{,}2/\text{sen } 60^\circ = 1{,}4$ m

Se supone, a cada barra, resistiendo como viga simplemente apoyada. Si cada apoyo es de 5 cm, la nueva longitud es b''

$b'' = 1{,}4 + 2 \cdot 0{,}5 = 1{,}5$ m $= b'$ + apoyos

Por seguridad se va a suponer que la máxima presión ($0{,}18$ kg/cm^2), se aplique uniformemente en todo lo largo de la barra, y, luego se la tradu ce a una carga concentrada equivalente y aplicada en la mitad de la luz de cálculo, así :

$0{,}18$ kg/cm^2 . 150 cm . $0{,}5$ cm $= 12{,}5$ kg

El momento máximo, para carga concentrada vale, según Apuntes de Estática de 4o. año (1957-1958):

$$12{,}5 \text{ kg} \cdot 1{,}5 \text{ m} \cdot \tfrac{1}{4} = 4{,}71 \text{ mkg}$$

En cambio, el momento resistente vale:

$$\frac{I}{a} = \frac{M}{\sigma} = W = (b'' \cdot h^2)/6$$

I, es el momento de inercia de la sección;

c, es la distancia a la fibra neutra;

M, es el momento resistente; y

σ, es la resistencia admisible para acero, trabajando a flexión,

(σ = 1200 kg/cm^2)

W, es el módulo de resistencia,

b", es la longitud total de cada barra (b' + apoyos = 1,5 m);

h, es la altura de la barra (0,5 cm):

Finalmente: $W = 150 \cdot 0{,}5^2/6 = 6{,}25$ cm^3

$M = W \cdot \sigma = 6{,}25 \cdot 1200 = 7500$ cmkg = 75 mkg.

Como se vé, el momento resistente, es pues, unas 16,1 veces mayor que el momento actuante y la sección transversal de la barra (0,5 cm . 0,5) es suficiente.

El canal tiene su desarenador junto a la bocatoma. Funciona perfectamente, pues permite que el agua llegue constantemente limpia al tanque recolector, además, en algunos trechos, está constituído por tubería de cemento.

Mientras se lava el desarenador, el agua circula por un trecho de canal al rededor del desarenador, con la finalidad de no interrumpir la circulación del agua. Empieza inmediatamente antes y termina inmediatamente despues del desarenador.

En esta forma, el agua llegará a nuestro tanque de presión suficientemente limpia, y será necesario lavarlo cada mes o talvez a períodos más largos de tiempo.

Cuando se lo lave, el agua debe ir a una zanja, existente en el lugar, para lo cual, el tanque de presión debe contar con una compuerta de fondo. La zanja aparece en el plano No. 2.

El fondo del tanque de presión debe ser inclinado (plano No. 1), coincidiendo la arista más profunda con aquella de la cual forma parte la base del orificio (de la compuerta). Conservando los 1,2 m de altura de agua en la arista más alta (iniciación de la tubería de presión, embudo).

El orificio será rectangular y situado en la esquina, diagonalmente opuesta a la esquina en la cual inicia la tubería de presión, ésto se muestra en el Plano No. 1.

La sección transversal del orificio será de 0,2 m^2, o sea, de 0,4 por 0,5. Situándose verticalmente la dimensión mayor.

La compuerta será tipo h a r d e s t y (de este tipo son todas las compuertas instaladas en el "Sistema Lloa"), y, un poquito mayor que el orificio correspondiente, ésto con el fin de evitar fugas considerables de agua. Será pues, de 0,5 metros por 0,6 metros.

La compuerta será de madera de eucalipto y el espesor indispensable, D se calcula con la siguiente fórmula, tomada de los Apuntes de Proyectos Hidroeléctricos, 4o. año (1957-1958)

(8) $$D = 35 \cdot B \cdot \sqrt{H}$$

$$D = 35 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{1,3} = 19,25 \text{ mm}$$

o sea $D = 20 \text{ mm} = 2 \text{ cm}$

D, es el espesor de la compuerta, se expresa en mm;

B, es el ancho de la compuerta, se expresa en m;

H, es la altura de agua, se expresa en m.

Según los mismos apuntes de Proyectos Hidroeléctricos se calcula la fuerza necesaria para alzar la compuerta estando el tanque de presión lleno:

(9) $$F = (b.h.D.\gamma + P_n) + (b.h.D.h'.1000) + (b.H^2/2 \cdot 1000 \cdot \mu)$$

F, es la fuerza necesaria para alzar la compuerta, en kg

γ, es el peso específico del eucalipto mojado, en kg/m^3 (1000)

P_n, es el peso de las pletinas de hierro (esquinas de la compuerta), en kg

b, es el ancho de la compuerta, en metros

h, es la altura de la compuerta, en metros

D, es el espesor de la compuerta, en metros (fórmula 8)

h', es la altura del agua, a partir del filo superior de la compuerta, hasta el nivel libre, en metros

H, es la altura del agua, en metros

μ, es la fricción entre el hierro y la madera, según Apuntes de Proy. Hidroeléctricos de 4o Año, vale 0,4

$$F = (0,5 \cdot 0,6 \cdot 0.02 \cdot 1000 + 4) + (0,5 \cdot 0,7 \cdot 0,02 \cdot 1000 \cdot 0,6) + + (0,5 \cdot 1,3^2/2 \cdot 0,4 \cdot 1000)$$

$F = 10 + 3,6 + 144 = 157,6$. Se puede decir $F = 160$ kg

Los mecanismos de accionamiento de la compuerta (Plano No. 5):

Para levantar la compuerta se usarán:
Un tornillo solidario a la compuerta; y
Una tuerca solidaria, en cambio, a un volante que será manejado directamente por un hombre.
Para abrir la compuerta, los mecanismos deberán funcionar tal como para apretar un tornillo común. Al hacer girar el volante, en el mismo plano, a determinado lado, gira la tuerca solidaria a éste, mientras tanto, el tornillo asciende junto con la compuerta, y, el orificio se abre.
Al ascender el tornillo, despues de pasar por la tuerca, entra en el tubo que solidariza a la tuerca con el volante.
Cuando se desee bajar la compuerta (tapar el orificio), se procederá de modo contrario, tal como para aflojar un tornillo común.

Cálculo del tornillo y su respectiva tuerca:

Según el Manual del Constructor de Máquinas por H. Dubbel, Editorial Labor, Barcelona, 1955 Tomo I, página 673:

> Si el atornillado debe efectuarse bajo la acción de la carga (tracción en este caso), se debe adoptar una carga de trabajo igual a los 3/4 de la carga admisible ($\sigma_z = 3/4\,\sigma_a$).

El mismo Manual indica que para casos como éste y material de acero, la máxima carga admisible debe ser de 600 kg/cm^2.
Para calcular el diámetro característico o diámetro del núcleo d_1, aconseja utilizar la siguiente fórmula aproximada:

(10) $$F = 3/4 \cdot \sigma_a \cdot d_1^2 \cdot \pi/4$$

F, es la fuerza que se ha de vencer para levantar la compuerta ya calculada. ($F = 160$ kg)

Despejando d_1 y extrayendo la raíz cuadrada, resulta que d_1 = 6,75 milímetros.

Una rosca trapecial se adapta mejor a nuestro caso, pues ofrece mayor resistencia que una rosca plana, sin que tenga un rozamiento esencialmente mayor. Según DIN 103, esta rosca está normalizada hasta un diámetro de rosca d = 300 mm.

De la tabla indicada en la página 672 del mismo manual de H. Dubbel, se tiene:

Dimensiones del tornillo: (Plano No. 5)

El diámetro d_1, inmediato superior al calculado (6,75 mm), indicado en la mencionada tabla, es de d_1 = 8,5 mm, para el cual, las demás dimensiones resultan así:

d_1 = 8,5 mm, es el diámetro del núcleo

d = 12,0 mm, es el diámetro de la rosca

s = 0,57 cm^2, es la sección transversal del núcleo

t_1 = 1,75 mm, es la profundidad de la rosca

Dimensiones de la tuerca (de la Tabla indicada)

D = 12,5 mm, es el diámetro de la rosca

D_1 = 9,5 mm, es el diámetro del agujero

T = 1,5 mm, es la profundidad de la rosca

La circunferencia base de la tuerca debe tener un diámetro D' tal que

$$D' = 1{,}4 \cdot D + 0{,}4 \text{ (cm)} = 1{,}4 \cdot 12{,}5 + 4 = 21{,}4 \text{ mm} = 2{,}14 \text{ cm}$$

La tuerca será exagonal, cuya circunferencia circunscrita debe tener un diámetro e = 24 mm

El espesor m de la tuerca debe tener un valor término medio de:

$$m = 1{,}3 \cdot D = 1{,}3 \cdot 12{,}5 = 16{,}25 \text{ mm} = 1{,}625 \text{ cm}$$

Otras dimensiones:

d_2 = 10,5 mm, es el diámetro de los flancos

t_2 = 1,25 mm, es la profundidad del apoyo

h = 3 mm, es el paso

b = 0,5 mm, es el espacio libre entre el flanco de la tuerca y el

fondo del tornillo

a = 0,25 mm, es el espacio libre entre el flanco del tornillo y el fondo de la tuerca

t = 1,866 . h = 5,6 mm,

Tiempo de apertura de la compuerta:

El hombre es capaz de levantar, en nuestro caso, unos 10 mm en cada segundo de tiempo (1 cm/seg), pues puede hacer girar el volante 3,3 vueltas por segundo, aproximadamente. Como el orificio tiene una altura de 50 cm, lo puede destapar, a ésta velocidad, en unos 50 segundos.

Nota: Todas las dimensiones de los mecanismos de accionamiento están representadas en el plano No. 5

001489

LA TUBERIA DE PRESION:

Cálculo del diámetro económico:

Se calcula el diámetro más económico con la fórmula simplificada y suficientemente aproximada de Félix Bundschu (indica "Gómez Navarro y Aracil Segura en su obra Saltos de Agua y Presas de Embalse", editada en Tipografía Artísitca, Madrid, 1958, Tomo I página 778)

$$(1) \qquad d = \sqrt[7]{(5{,}2 \cdot Q^3)/H}$$

d, es el diámetro, en metros;

Q, es el caudal disponible, en metros cúbicos por segundo (0,086)

H, es la presión estática, más la presión dinámica, en metros de altura de agua, vale: $H = H_1 + 0{,}3 \cdot H_1 = 1{,}3 \cdot H_1 = 124$ metros

H_1, es la presión estática (salto bruto, 96,1 metros)

$0{,}3 \cdot H_1$, es la presión dinámica o sobrepresión, se presenta en turbina pelton cuando no hay desviador de chorro.

Reemplazando los valores representados en la fórmula (1), se tiene que

$d = 22{,}22$ centímetros

pero el diámetro estandarizado, inmediato superior, es de 25 cm, el cual se lo usará para nuestra tubería de presión.

Cálculo de las pérdidas de carga, por fricción y menores:

1.- Por fricción:

El Ingeniero Jaime Bustamante, en su tratado de Hidráulica editado en la Escuela de Ingenieros Militares, Quito, 1955, página 51 indica la fórmula de DARCY-WEISBACK, que es la siguiente:

$$(2) \qquad h_f = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{d \cdot 2g}$$

h_f, es la pérdida de carga por fricción, en metros de altura de agua;

f, es el coeficiente de fricción (0,023 según el mismo Ingeniero J. Bustamante)

L, es la longitud total de la tubería, en metros;

v, es la velocidad del agua dentro de la tubería, en metros por segundo

$v = Q/S$

Q, es el caudal que fluya por la tubería de presión, en m^3/seg (0,086);

S, es la sección libre de la tubería, en m^2 ($S = \pi \cdot d^2 \cdot \frac{1}{4}$)

d, es el diámetro interior de la tubería, en metros (pág. anterior, 0,25 m)

g, es la aceleración de la gravedad, 9,8 m/seg^2

Se determinan los valores desconocidos (L, v)

$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$ (ver Plano No. 6)

$L = h_1/Sen \alpha_1 + h_2/Sen \alpha_2 + h_3/Sen \alpha_3 + h_4/Sen \alpha_4$

$L = 12/0,515 + 39/0,438 + 21/0,3973 + 24,1/0,473$

$L = 23 + 89 + 54 + 51 = 217$ metros

(las alturas h_1 .... h_4 se expresan en metros)

Se calcula ahora la velocidad:

$v = (0,086\ m^3/seg)/0,0492\ m^2 = 1,75$ m/seg (aceptable)

$h_f = (0,023 \cdot 217 \cdot 1,75^2)/(0,25 \cdot 2 \cdot 9,80) = 3,12$ m = 3,25 %

3,25 % para las pérdidas por fricción, es también un valor aceptable

2.- Pérdidas en la válvula de compuerta que irá inmediatamente antes del Tanque de Presión, se calcula con la fórmula siguiente:

(3) $$h_v = k_v \cdot v_1^2/2g$$

cuando la válvula está totalmente abierta, k_v vale 0,10

v_1, es la velocidad del agua en el canal, 1,2 m/seg

h_v, es la pérdida de carga que ocasiona la válvula

Los otros valores, ya se indicarón. Reemplazándolos en la fórmula (3) se tiene $h_v = 0,0074$ metros = 0,74 cm

3.- Pérdidas en la rejilla:

(4) $$h_r = (v_r^2 - v_o^2)/2g$$

La fórmula (4) se ha tomado de los apuntes de Proyectos Hidroeléctricos de 4o. Año (1957-1958).

v_r, es la velocidad del agua al atravesar la rejilla, vale Q/S_{libre}.

Q, es el caudal, 0,086 m^3/seg

S_{libre}, es la sección libre de la rejilla. Se la determina de la siguiente manera: se explicó que cada dos cm. de rejilla dejan libres los 3/4, pues, el otro $\frac{1}{4}$ es ocupado por la barra de hierro. Además, se supone ahora que la rejilla se tape con suciedades arrastradas por el agua en una cuarta parte más (de la sección original libre). Vale decir que el agua tendrá libre acceso, solamente en la mitad de la sección original libre y

$$S_{lib} = \frac{1}{2} \cdot b' \cdot a$$

b', es la longitud de la rejilla (se calculó, 1,4 m)

a, es el ancho de la rejilla, es suficiente 0,7 m

$S_{lib} = \frac{1}{2} \cdot 1,4 \cdot 0,7 = 0,49$ metros cuadrados

Ahora, la velocidad del agua en la rejilla, vale $v_r = 0,086/0,49$

$= 0,175$ m/seg

En la fpórmula (4)

v_o, es la velocidad del agua en el tanque de presión, inmediatamente antes de entrar a la rejilla, es de un valor despreciable

g, es la aceleración de la gravedad (9,8 m/seg^2)

Reemplazando estos valores en la fórmula (4), resulta que

$$h_r = (0.175^2 - 0)/19,6 = 0,00156 \text{ metros}$$

4.- Pérdidas de entrada a la tubería de presión:

(5) $$h_e = k_e \cdot v^2/2g$$

k_e, coeficiente de pérdidas, 0,04

v, es la velocidad del agua al entrar al embudo. Si el diámetro del origen del embudo es de 0,35 m, su sección es, vale 0,0985 m^2; y

$v = 0,086/0,0985 = 0,875$ m/seg; $v^2 = 0,755$ m^2/seg^2

$h_e = 0,04 \cdot 0,755/19,6 = 0,0016$ m $= 0,16$ cm

v = 0,875 m/seg, es pues, un valor muy inferior al límite anotado antes, de 1,5 m/seg.

5.- Pérdidas por codos:

(6) $$h_c = k_c \cdot v^2/2g$$

k_c, es el coeficiente de pérdidas por codo; 0,14

v, es la velocidad del agua en la tubería de presión, 1,75 m/seg

$$h_c = 0,14 \cdot 1,75^2/19,6 = 0,022 \text{ m} = 2,2 \text{ cm}$$

Por cuánto los codos no tienen ángulos muy diferentes, se puede tomar la pérdida de 2,2 cm por cada uno de los 4 codos, o sea 8,8 cm

6.- Pérdidas a la salida de la tubería de presión (boquete), son despreciables, por cuánto la reducción del diámetro es gradual y no violenta.

Finalmente, las pérdidas totales de carga son:

312 + 0,74 + 0,156 + 0,16 + 8,8 = 321,856 cm = 3,22 m

Se debe indicar que: las fórmulas (3), (5) y (6), juntamente con sus coeficientes k_v, k_e, k_c, usados para calcular las respectivas pérdidas de carga, los indica el Ing. Jaime Bustamante en su obra "Hidráulica" editada en la Escuela de Ingenieros Militares, Quito, 1955 página 60, 61 y 62.

Cálculo de la sobrepresión y subpresión producidas al abrir y cerrar los órganos de entrada de agua a la turbina:

El caso de sobrepresión (golpe de Ariete), es un fenómeno que se produce al cerrar violentamente los órganos de la entrada del agua a la turbina. Se produce subpresión, al abrir violentamente los mismos, por efecto del vacío que se produce en la tubería de presión.

Despues de calcular los valores, tanto de sobrepresión, como de subpresión, se dibuja y comprueba que la tubería de presión (su perfil), permanezca suficientemente alejada de la línea de energía existente en el momento en el cual se produce subpresión (apertura violenta de los organos de entrada del agua). Ver Plano No. 7. Pues, si coinciden en algún punto, se ocasionan suspensiones o interrupciones de la circulación del agua en la tubería de presión, porque allí se van acumulando los gases que casi siempre lleva el agua. Estos se constituyen en una fuerza que se opone a la circulación normal del agua.

Como ya se indicó, la turbina será pelton, más adelante, cuando se determine la velocidad específica, se probará esta aseveración. Nuestra

turbina tendrá desviador de chorro o deflector.

Por seguridad se calcula la presión dinámica para el caso de que no tenga deflector, con lo cual se adquiere:

para la sobrepresión, un valor de 0,3 . h; y

para la subpresión, un valor de 0,25 . h

h, es la caída bruta (96,1 m)

Numéricamente: sobrppresión vale 28,9 m y

subpresión vale 24,025 m

Se han tomado estos valores extremos, por seguridad, pues los valores que dá el cálculo, son mucho menores, se probará ésto, cuando se diseñe el volante.

Nuestro caso está suficientemente asegurado porque, al dibujar el valor de la subpresión, se vé claramente que la línea representativa del perfil de la tubería de presión y aquella que representa la subpresión, se alejan progresivamente, conforme se vá descendiendo (desde el tanque de presión hacia la casa de máquinas, extremo inferior de la tubería). Se puede ver ésto en el Plano No. 7

Cálculo de los espesores de la tubería de presión, la cual será de chapa de acero:

Se calcula con la siguiente fórmula tomada de los apuntes de Proyectos Hidroeléctricos (4o. Año):

(7) $$e = (1{,}3 \cdot P_e \cdot d)/(2 \cdot f \cdot \sigma)$$

e, es el espesor de la tubería, en cm.

1,3 ; factor que incluye la sobrepresión por golpe de Ariete;

P_e, es la presión estática, en kg/cm^2 (9,61)

d, es el diámetro libre de la tubería, en cm (25)

½, factor que indica que la presión se ejerce en los extremos del diámetro en cualquier sección transversal del tubo

f, factor que toma en cuenta el debilitamiento por soldaduras y uniones, vale 0,9 (chapa soldada)

σ, corresponde a la deformación plástica del acero, corregida con un

factor de seguridad de 2,5 (2000/2,5 = 800 kg/cm^2)

$$e = \frac{1,3 \cdot 9,61 \cdot 25 \ (kg/cm^2 \cdot cm)}{2 \cdot 809 \cdot 0,9 \cdot (kg/cm^2)}$$

$$e = 2,16 \text{ mm}$$

Conviene preveer una seguridad para la oxidación, se usará entonces un espesor e de 3 mm, el cual será constante a lo largo de toda la tubería porque para la mayor altura de caída, se requieren apenas, 2,16 milímetros de espesor . Para las menores alturas de caída, los espesores indispensables tambien serán menores, no obstante, por razones prácticas se aconseja que no se usen tuberías con espesores inferiores a 3 mil-ímetros, pues, aquellas están sujetas a golpes (al transportarlas) choques entre si, agentes exteriores, etc

El peso de la tubería es:

$$P = d_m \cdot e \cdot L \cdot \pi \cdot \gamma$$

$$P = 0,253 \cdot 0,003 \cdot 217 \cdot 3,14 \cdot 7,5 = 3,9 \text{ toneladas}$$

Se debe agregar un 15 % correspondiente al peso de las bridas y otros accesorios. El peso final será pues de

$$P' = 3,9 \cdot 1,15 = 4,5 \text{ toneladas}$$

Cálculo de los bloques de anclaje:

Para este objeto se utilizan como libros de consulta los siguientes:
Gómez Navarro y Aracil Segura tomo I, pág. 795 (libro ya citado)
Otto Streck en su obra Problemas de Hidráulica Aplicada, Editorial Labor S. A., Barcelona, 1948, pág 172 y siguientes; y
Apuntes de Proyectos Hidroeléctricos de 4o. Año (1957-1958)
Primeramente se deban conocer los esfuerzos que los bloques han de soportar.
Bundschu, basándose en una conferencia dictada por el Dr. Arthur Hruschke, anota que el número de éstos asciende a 32, siendo 5 de consideración para el presente caso:

1.- P_1, representa la presión del agua. Para calcularlo se toma en cuenta la presión estática, sumada con la presión dinámica;

2.- P_2, es la presión sobre el anille de la prensa estopa. Para determinarlo se toma en cuenta la presión estática y la dinámica, sumadas.

3.- P_3, es el esfuerzo correspondiente a la fricción de la prensa estopa. Para su cálculo se toma en cuenta solamente la presión estática. Y no la presión dinámica porque ésta actúa instantáneamente.

4.- P_4, representa el esfuerzo producido por el peso de la tubería. Es función del seno del ángulo que hacen el eje de la tubería y la horizontal, en el tramo considerado; y,

5.- P_5, es el esfuerzo producido por fricción de la tubería sobre sus apoyos. Se toma en cuenta el peso de tubo LLENO DE AGUA. Es función del coseno del ángulo indicado en 4.-

Se debe indicar además, que se producen esfuerzos positivos y negativos según se considere la parte de tubería situada encima o debajo del bloque de anclaje, respectivamente. A los negativos se los llama P'_1 , P'_2 , P'_3 y se los define del mismo modo que a los positivos, con los numerales 1.-; 2.- y 3.- respectivamente

Se calcula la longitud de la junta de dilatación:

(8) $\quad l = \alpha \cdot \Delta t \cdot L_i$

l, es la longitud de la junta de dilatación

α, es el coeficiente de dilatación del acero, vale 0,000012

Δt, es el incremento de temperatura (40° C)

L_i, es la longitud del tramo más largo de la tubería (89 m)

Reemplazando los valores en (8), se tiene:

$$l = 0{,}000012 \cdot 40 \cdot 8900 = 4{,}3 \text{ cm}$$

Esto dice que, con suficiente seguridad, se puede usar juntas de dilatación de 10 cm de largo.

Se ha tomado un incremento de temperatura, con una seguridad adicional pues, el peor de los casos que se ha observado es una variación de temperatura entre 0° C y 25° C.

Se ha calculado la longitud de la junta de dilatación necesaria para el tramo más largo (89)

Una junta de dilatación estará localizada en la primera unión de tubos adyacentes e irá inmediatamente despues de cada bloque de anclaje. La primera estará situada a 6 metros a partir del tanque de presión (unión de los dos primeros tubos adyacentes).

Los datos indispensables para el cáelculo de los anclajes y que conviene tenerlos reunidos, son:

$\text{Sen}\,\alpha_1 = 0{,}515$; $\text{Sen}\,\alpha_2 = 0{,}459$; $\text{Sen}\,\alpha_3 = 0{,}3973$; $\text{Sen}\,\alpha_4 = 0{,}473$

$\text{Cos}\,\alpha_1 = 0{,}86$; $\text{Cos}\,\alpha_2 = 0{,}8985$; $\text{Cos}\,\alpha_3 = 0{,}923$; $\text{Cos}\,\alpha_4 = 0{,}88$

Las diferentes alturas son:

$h' = 6 \cdot 0{,}515 = 3{,}09$ m, es la altura hasta la la. junta de dilatac.

$h_1 = 12$ metros, altura hasta el primer bloque de anclaje;

$h_1' = 12 + 6 \cdot 0{,}439 = 14{,}3$ m, alt. hasta 2a. junta de dilatación;

$h_2 = 51$ m, altura hasta el 2o. bloque de anclaje;

$h_2' = 51 + 6 \cdot 0{,}3973 = 53{,}34$ m, alt. hasta 3a. junta de dilatación

$h_3 = 72$ m, altura hata el 3er. bloque de anclaje

$h_3' = 72 + 6 \cdot 0{,}475 = 74{,}84$ m, alt. hasta 4a. junta de dilatación

$h_4 = 96{,}1$ m, altura hasta el 4o. bloque de anclaje.

Todas las alturas se expresarán en presiones (ton/m^2)

Las diferentes longitudes de tramos de tubería son:

$L_1 = 23{,}0$ metros; $L_2 = 89$ m; $L_3 = 54{,}0$ m; $L_4 = 51{,}0$ m

Por ser pequeña la diferencia entre el diámetro interior, diámetro medio y diámetro exterior (de la tubería de presión); y, para tener una seguridad adicional, para todos los cálculos se usará el valor del diámetro exterior, D (0,256 m).

Las dimensiones de superficies, siempre se usarán en metros cuadrados.

Los pesos se expresarán en toneladas.

Las longitudes se expresarán en metros.

A N C L A J E No. 1 (Plano No. 9)

A) Esfuerzos positivos:

$P_1 = (h_1 + 0{,}3 \cdot h_1) \cdot S_t$

h_1, es la presión estática;

$0,3 \cdot h_1$, es la presión dinámica;

S_t, es la sección transversal libre de la tubería de presión.

$P_1 = (12,0 + 3,6) \cdot 0,0492 = 0,77$ toneladas

$P_2 = (h' + 0,3 \cdot h') \cdot D \cdot \pi \cdot e$

$P_2 = 4,05 \cdot 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,003 = 0,0097$ toneladas

$P_3 = D \cdot \pi \cdot 1 \cdot \mu_1 \cdot h'$ μ_1 = fricción entre cáñamo y acero (0,3)

$P_3 = 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,10 \cdot 0,3 \cdot 3,09 = 0,075$ toneladas

$P_4 = P_T \cdot \operatorname{Sen} \alpha_1$ (P_T, es el peso del primer tramo de la tubería, sin agua)

$P_T = D \cdot \pi \cdot e \cdot \gamma \cdot (L_1 - 6)$

$L_1 - 6$; es el valor de la longitud del primer tramo de la tubería de presión. En la fórmula, se puede poner L_1 simplemente, porque la longitud de la tubería, hasta la primera junta de dilatación (que se resta), es prácticamente igual a la longitud de la tubería, desde el primer bloque de anclaje hasta la segunda junta de dilatación (que se suma). Esto se hace por cuánto los valores de los ángulos, son parecidos. Entonces:

— $P_T = 0,256 \cdot 3,14 \cdot 7,5 \cdot 0,003 \cdot 23,0 = 0,354$ toneladas

$P_4 = 0,354 \cdot 0,515 = 0,18$ toneladas

$P_5 = (P_T + P_A) \operatorname{Cos} \alpha_1 \cdot \mu_2$

$(P_T + P_A)$, es el peso del tramo de tubería llena de agua

μ_2, es el coeficiente de rozamiento entre el tubo y los apoyos, vale 0,5

$(P_T + P_A) = (0,354 + 0,0492 \cdot 23,0 \cdot 1) = 1,484$ toneladas

$P_5 = 1,484 \cdot 0,86 \cdot 0,5 = 0,64$ toneladas

B) Esfuerzos Negativos:

$P'_1 = P_1 = 0,77$ ton. (son iguales porque la presión se reparte en todas las direcciones)

$P'_2 = D \cdot \pi \cdot e \cdot (h'_1 + 0,3 \cdot h'_1)$

$P'_2 = 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,003 \cdot (14,3 + 0,3 \cdot 14,3) = 0,046$ ton.

$P'_3 = D \cdot \pi \cdot 1 \cdot \mu_1 \cdot h'_1$

$P'_3 = 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,10 \cdot 0,3 \cdot 14,3 = 0,35$ ton.

μ_1, es el coeficiente de fricción entre cáñamo y acero, vale 0,3

s u m a n d o:

A) Esfuerzos Positivos : $P_+ = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$

$P_+ = 0,0097 + 0,77 + 0,075 + 0,18 + 0,64$

$P_+ = 1,68$ toneladas

B) Esfuerzos Negativos : $P_- = P'_1 + P'_2 + P'_3$

$P_- = 0,77 + 0,046 + 0,35 = 1,17$ ton.

Si se descomponen las fuerzas P_+ y P_- en sus componentes horizontales y verticales, sumándolas respectivamente, se obtiene una sóla horizontal y una sóla vertical, de las cuales la primera trabaja en contra del bloque de anclaje, tendiendo a deslizarlo, mientras que la vertical actúa en la misma línea de acción (en favor) de aquella del peso del bloque, las componentes son:

$V_+ = P_+ \cdot \text{Sen } \alpha_1 = 0,87$ ton.

$H_+ = P_+ \cdot \text{Cos } \alpha_1 = 1,45$ ton

$V_- = P_- \cdot \text{Sen } \alpha_2 = 0,52$ ton

$H_- = P_- \cdot \text{Cos } \alpha_2 = 1,05$ ton

Sumándolas aritméticamente se obtiene una vertical y una horizontal finales que son:

$H = H_+ - H_- = 0,40$ ton

$V = V_+ - V_- = 0,35$ ton

El peso que requiere el bloque de anclaje viene a ser de $H/\mu_3 = 0,9$ μ_3, es el coeficiente de fricción, para acilla vale 0,45. Además, se usa un coeficiente de seguridad de 2. Así el valor del peso crece a 1,8 toneladas. Se debe también agregar a este valor aquel correspondiente a V , y, definitivamente, el valor del peso de bloque es:

$$Q = 1,8 + 0,35 = 2,15 \text{ ton}$$

El bloque será de mampostería de piedra, cuyo peso específico es 2,2 (ton/m^3). Esto dice que el volúmen será de un metro cúbico aprox.
La forma de su sección transversal, paralela a los ejes de la tubería, puede ser cualquiera, con la única condición de que su resultante "no se salga del tercio central de la base". Se debe descontar el volúmen de tubo que está dentro del anclaje y que vale 0,08 m^3 aprox. O sea que nuestro anclaje debe ser de por lo menos 1,08 m^3
La resultante que no debe salirse del tercio central de la base, se obtiene de componer:

la fuerza correspondiente al peso del bloque con la resultante de componer P_+ con P_-

Se comprueba graficamente.
Para llenar el volúmen indispensable, se asigna las dimensiones de 1,3 m por 0,8 m y por 1,2 m de altura, con las cuales el volúmen viene a ser de 1,25 m^3. Al usar este volúmen hay un error por exceso que no es de consideración. Así, el peso del bloque vale 2,75 toneladas.
Si su sección transversal (paralela al eje de la tubería), indica que se disminuye una esquina, por la cual entra la tubería al bloque de anclaje, el peso que se debe restar por este concepto es de

$$\frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 0,25 \cdot 0,8 \cdot 2,2 = 0,11 \text{ ton.}$$

Queda el peso final del bloque de anclaje $Q_o = 2,64$ ton.
Además, el punto de corte de los ejes de los tramos contíguos de tubería (1o. y 2o. en este caso), debe coincidir con el centro de gravedad del bloque, esto con el fin de facilitar la comprobación gráfica.

Determinación del Centro de Gravedad:
Según la física general de F. W. Sears y M. W. Zemansky, Madrid, 1958, página 45, impreso en España por Grafiplas.

Tomando coordenadas cartesianas (Plano No. 8) y haciendo que las ordenadas sigan la vertical y las abcisas, la horizontal, se calculan las coordenadas del centro de gravedad del anclaje ($\overline{x}$ e $\overline{y}$)

$$x = \frac{\sum P \cdot x}{\sum P} \qquad y = \frac{\sum P \cdot y}{\sum P}$$

x e y, en cambio, son las coordenadas del centro de gravedad de cada sección elemental (en que se ha divido al bloque)

P, es el peso de cada volúmen elemental componente del bloque

Tomando en cuenta que el peso específico del material del bloque es de 2,2 ton/m^3 y el espesor de 0,8 m, ambos, quedan constantes para todos los elementos del bloque, se puede calcular $\overline{x}$ e $\overline{y}$ reemplazando P por S. Siendo S un elemento de la sección transversal del bloque de anclaje.

$$S_1 = \tfrac{1}{2} \cdot (1,3 + 1,05) \cdot 0,5 = 0,57 \text{ m}^2$$

$$S_2 = 1,3 \cdot 0,7 = 0,91 \text{ m}^2$$

x_1 , x_2 , y_1 e y_2 se miden a escala. En este caso, se tienen:

$x_1 = 0,75$ m $\qquad y_1 = 0,58$ m

$x_2 = 0,65$ m $\qquad y_2 = 0,00$ m

Reemplazando valores se obtiene que:

$$\overline{x} = (0,57 \cdot 0,75 + 0,91 \cdot 0,65)/(0,57 + 0,91) = 0,68 \text{ m}$$

$$\overline{y} = (0,57 \cdot 0,58)/(0,57 + 0,91) = 0,224 \text{ m}$$

Conocidas las coordenadas del centro de gravedad, se lo sitúa. Representando, a su vez, el punto de corto de los ejes de los dos tramos contíguos de la tubería.

La presión que soportará el suelo es de:

$$(2640 \text{ kg})/(10400 \text{ cm}^2) = 0,24 \text{ kg/cm}^2$$

El plano No. 9 muestra que el bloque está seguro, porque la resultante final cae dentro del tercio central de la base.

Se puede mejorar aún la seguridad del bloque de anclaje, so se lo hace de tal manera que la base esté formada por dientes que se incrusten en el suelo en forma segura.

A N C L A J E No. 2 (Plano No. 10)

A) Esfuerzos Positivos:

Se utilizan las mismas fórmulas que para el anclaje No. 1;

$P_1 = (51 + 15,6) \cdot 0,0492 = 3,34$ toneladas;

$P_2 = (14,5 + 4,29) \cdot 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,003 = 0,04$ toneladas

$P_3 = 14,5 \cdot 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,10 \cdot 0,3 = 0,346$ toneladas

$P_4 = 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,003 \cdot 7,5 \cdot 89,0 \cdot 0,439 = 0,7$ toneladas

$P_5 = (1,6 + 0,0492 \cdot 89,0) \cdot 0,5 \cdot 0,8983 = 2,70$ toneladas

B) Esfuerzos Negativos:

$P'_1 = P_1 = 3,34$ toneladas

$P'_2 = 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,003 \cdot (53,34 + 16,002) = 0,142$ toneladas

$P'_3 = 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,10 \cdot 0,3 \cdot 53,34 = 1,28$ toneladas

s u m a n d o :

A) $P_+ = 3,34 + 0,04 + 0,346 + 0,7 + 2,7 = 7,144$ toneladas

B) $P_- = 3,34 + 0,142 + 1,28 = 4,78$ toneladas

Las componentes verticales y horizontales son:

$V_+ = 7,144 \cdot 0,439 = 3,13$ toneladas

$H_+ = 7,144 \cdot 0,8983 = 6,42$ toneladas

$V_- = 4,78 \cdot 0,3973 = 1,91$ toneladas

$H_- = 4,78 \cdot 0,923 = 4,44$ toneladas

Los esfuerzos horizontales y verticales finales son:

$H = H_+ - H_- = 6,42 - 4,44 = 1,98$ toneladas

$V = V_+ - V_- = 3,13 - 1,91 = 1,22$ toneladas

El peso del anclaje debe ser: $Q = 2 \cdot (1,98/0,45) + 1,22 = 10,02$ ton.

El volumen del anclaje es: $10,02/2,2 = 4,6\ m.^3$

Estos $4,6\ m.^3$ se pueden conseguir con un bloque de las siguientes dimensiones:

$3,0 \cdot 1,2 \cdot 1,4$ de altura $= 5,05\ m.^3$

La sección transversal, vale, en cambio : $3,0 \cdot 1,40 = 4,20\ m.^2$. A ésta hay que descontar el triángulo de la esquina por la cual entra la tubería al bloque y que vale :

$$\tfrac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 0,35 = 0,1o.$$

O sea que la sección transversal final del bloque queda de $4,10\ m.^2$

Como en el caso anterior, se divide la sección transversal del bloque en : una trapezoidal y otra rectangular (S_1 y S_2)

$$S_1 = (3,0 \cdot 0,7 + 2,7 \cdot 0,7) \cdot \tfrac{1}{2} = 2,0\ m.^2$$

$$S_2 = 3,0 \cdot 0,7 = 2,10\ m.^2$$

Las coordenadas del centro de gravedad se calculan del mismo modo que en el bloque No. 1 y se tiene:

$\bar{x} = 1,51$ metros

$\bar{y} = 0,318$ metros

Se dibuja y se comprueba que la resultante final no se sale del tercio central de la base (plano No. 10). Así sucede, y el bloque está seguro.

La presión que soportará el suelo es de

$$\frac{10.020\ Kg.}{36.000\ cm^2} = 0,28\ Kg/cm.^2$$

A N C L A J E No. 3 (Plano No. 11)

A) Esfuerzos Positivos:

$P_1 = (72,0 + 21,6) \cdot 0,0492 = 4,6$ toneladas

$P_2 = (53,34 + 16,002) \cdot 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,003 = 0,142$ toneladas

$P_3 = 53,34 \cdot 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,10 \cdot 0,3 = 1,28$ toneladas

P_4 = 0,256 . 3,14 . 0,003 . 7,5 . 54,0 . 0,3973 = 0,388 toneladas

P_5 = (0,97 + 54,0 . 0,0492) . 0,5 . 0,932 = 1,68 toneladas

B) Esfuerzos Negativos:

P'_1 = P_1 = 4,6 toneladas

P'_2 = 0,256 . 3,14 . 0,003 . (74,84 + 22,452) = 0,233 toneladas

P'_3 = 0,256 . 3,14 . 0,10 . 0,3 . 74,84 = 1,78 toneladas

s u m a n d o :

A) P_+ = 4,6 + 0,142 + 1,28 + 0,388 + 1,68 = 8,09 toneladas

B) P_- = 4,6 + 0,233 + 1,78 = 6,613 toneladas

Las componentes verticales y horizontales son:

V_+ = 8,09 . 0,3973 = 3,22 toneladas

H_+ = 8,09 . 0,923 = 7,45 toneladas

V_- = 6,613 . 0,473 = 3,13 toneladas

H_- = 6,613 . 0,88 = 5,85 toneladas

Los Esfuerzos horizontales y verticales finales son:

$H = H_+ - H_-$ = 1,60 toneladas

$V = V_+ - V_-$ = 0,09 toneladas

El peso del anclaje debe ser: Q = 2 . (1,60/0,45) + 0,09 toneladas

= 7,24 toneladas

El volumen del anclaje: 7,24/2,2 = 3,3 m^3

Si las dimensiones son: 2,0 m . 1,20 m . 1,50 m de altura, se tiene 3,6 metros cúbicos.

La sección transversal, como para los anclajes No. 1 y No. 2, también se componen de un trapecio y de un rectángulo (S_1 y S_2 respectiv.)

$S_1 = 1,85 \cdot 0,75 = 1,39 \text{ m}^2$

$S_2 = 2,0 \cdot 0,75 = 1,50 \text{ m}^2$

Superficie total = $2,89 \text{ m}^2$

El peso definitivo será : $2,89 \cdot 1,2 \cdot 2,2 = 7,6$ toneladas

Las coordenadas del centro de gravedad son:

$\bar{x} = 1,04$ m

$\bar{y} = 0,365$ m.

Se prueba gráficamente que la resultante final no se sale del tercio central de la base, así sucede (plano No. 11), y el bloque está seguro.

La presión que soportará el suelo:

$7600 \text{ kg} / 24000 \text{ cm}^2 = 0,318 \text{ kg/cm}^2$

A N C L A J E No. 4 (Plano No. 12)

A) Esfuerzos Positivos:

$P_1 = (96,1 + 28,9) \cdot 0,0492 = 6,2$ toneladas

$P_2 = (74,84 + 22,452) \cdot 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,003 = 0,233$ toneladas

Aunque a este esfuerzo no se lo debería tomar en cuenta, por ser que el último tramo irá soterrado, sin embargo, se lo toma en cuenta solamente por una seguridad adicional.

$P_3 = 74,84 \cdot 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,10 \cdot 0,3 = 1,82$ toneladas

$P_4 = 0,256 \cdot 3,14 \cdot 0,003 \cdot 7,5 \cdot 51,0 \cdot 0,473 = 0,434$ toneladas

$P_5 = (0,92 + 51,0 \cdot 0,0492) \cdot 0,5 \cdot 0,88 = 1,5$ toneladas

B) Esfuerzos Negativos:

$P'_1 = P_1 = 6,2$ toneladas

$P'_2 = 0,00$ (por no existir junta de dilatación después de este anclaje)

$P'_3 = 0,00$ (por la misma razón que el anterior)

Después del anclaje No. 4 no existirá junta de dilatación porque a 6 metros estará la turbina.

s u m a n d o :

$P_+ = 6,2 + 0,233 + 1,82 + 0,434 + 1,5 = 10,187$ toneladas

$P_- = 6,2$ toneladas

Las componentes verticales y horizontales son:

$V_+ = 10,187 \cdot 0,473 = 4,85$ toneladas

$H_+ = 10,187 \cdot 0,923 = 0,45$ toneladas

$V_- = 6,2 \cdot 0,00 = 0,00$

$H_- = 6,2 \cdot 1,00 = 6,2$ toneladas

Los esfuerzos verticales y horizontales finales son:

$V = 4,85 - 0,00 = 4,85$ toneladas

$H = 9,45 - 6,2 = 3,25$ toneladas

El peso del anclaje : $2.(3,25/0,45) + 4,85 = 19,35$ toneladas

El volumen del anclaje: $19,35/2,2 = 8,8\ m^3$

Si el bloque es de 3,0 m . 1,2 m . 2,7 m de altura, se tienen $9,7\ m^3$

El trapecio, $S_1 = 2,65 \cdot 1,35 = 3,58\ m^2$

El rectángulo $S_2 = 3,0 \cdot 1,35 = 4,05\ m^2$

El peso definitivo: $7,63 \cdot 1,2 \cdot 2,2 = 20,3$ toneladas

Las coordenadas del centro de gravedad son:

$\overline{x} = 1,55$ m

$\overline{y} = 0,62$ m

Se comprueba gráficamente en el plano No. 12 y se ve que la resultante final no se sale del tercio central de la base. El bloque está seguro.

La presión que soportará el suelo: $20300kg/36000\ cm^2 = 0,573\ kg/cm^2$

Muros de Apoyo (Plano No. 13):

Trabajarán como apoyos simples, sosteniendo trechos de tubo lleno, considerando a cada uno de éstos como una viga simplemente apoyada. Se calcula uno sólo, pues todos serán de las mismas dimensiones:

0,5 m . 0,5 m . 0,8 m; (0,8 m de altura)

Se fabricarán con hormigón ciclópeo, cuyo peso será de:

$0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 2,4 \ (m^3 \cdot ton/m^3) = 0,48$ ton.

El trecho de tubo es de 6 metros de longitud:

Los apoyos se localizarán cada 6 m de distancia, a lo largo de todos los tramos de la tubería de presión.

Para facilidad de montaje, cada apoyo irá a un metros de la unión (brida) entre dos trechos contíguos de tubo (de 6 m cada uno). Los apoyos deben adecuarse para que la tubería se deslice fácilmente sobre ellos, por efecto de las variaciones de temperatura.

Comprobación de un apoyo:

Trecho , 6 metros;

tubo: 0,25 metros de diámetro;

espesor del tubo: 0,003 metros;

coeficiente de rozamiento: 0,2

peso del tubo de 6 metros lleno de agua: 0,406 ton.

La fuerza horizontal, H vale: $H = 0,2 \cdot 0,406 = 0,0812$ ton.

La fuerza vertical, V vale: V = 0,406 ton. (peso del trecho de tubo lleno de agua)

Sumando geométricamente: V con el peso propio del apoyo resulta:

$0,406 + 0,48 = 0,886$ ton.

Coeficientes de seguridad:

a) Contra el deslizamiento: $a = (0,886/0,0812) \cdot 0,45 = 4,92$

0,45 es el coeficiente de fricción utilizado para arcilla (pág 23)

El valor mínimo de a debe ser: 1,5

b) Contra el volcamiento: b

Haciendo la composición de fuerzas en la cara superior (asiento de la tubería), se obtiene que la línea de acción de la resultante, a partir del punto A (plano No. 13) esta a la distancia de(0,5/2)+x

x, se calcula mediante la proporción de triángulos semejantes, usando los siguientes valores: (V/H) = (0,8/x);

de donde x = (0,0812 . 0,8)/0,886 = 0,073 metros

Esto dice que: desde el punto A, la línea de acción de la resultante cruza la base a la distancia de 0,25 + 0,073 = 0,323 m. Lo cual prueba que la resultante no se sale del tercio central de la base (plano No. 13) El muro de apoyo está seguro.

Tomando momentos, con respecto a O (centro de volcamiento), resulta:

V . (0,5 - 0,323) = H . 0,8 . b

de donde:

b = (0,886 . 0,177)/(0,0812 . 0,8) = 2,43 (aceptable)

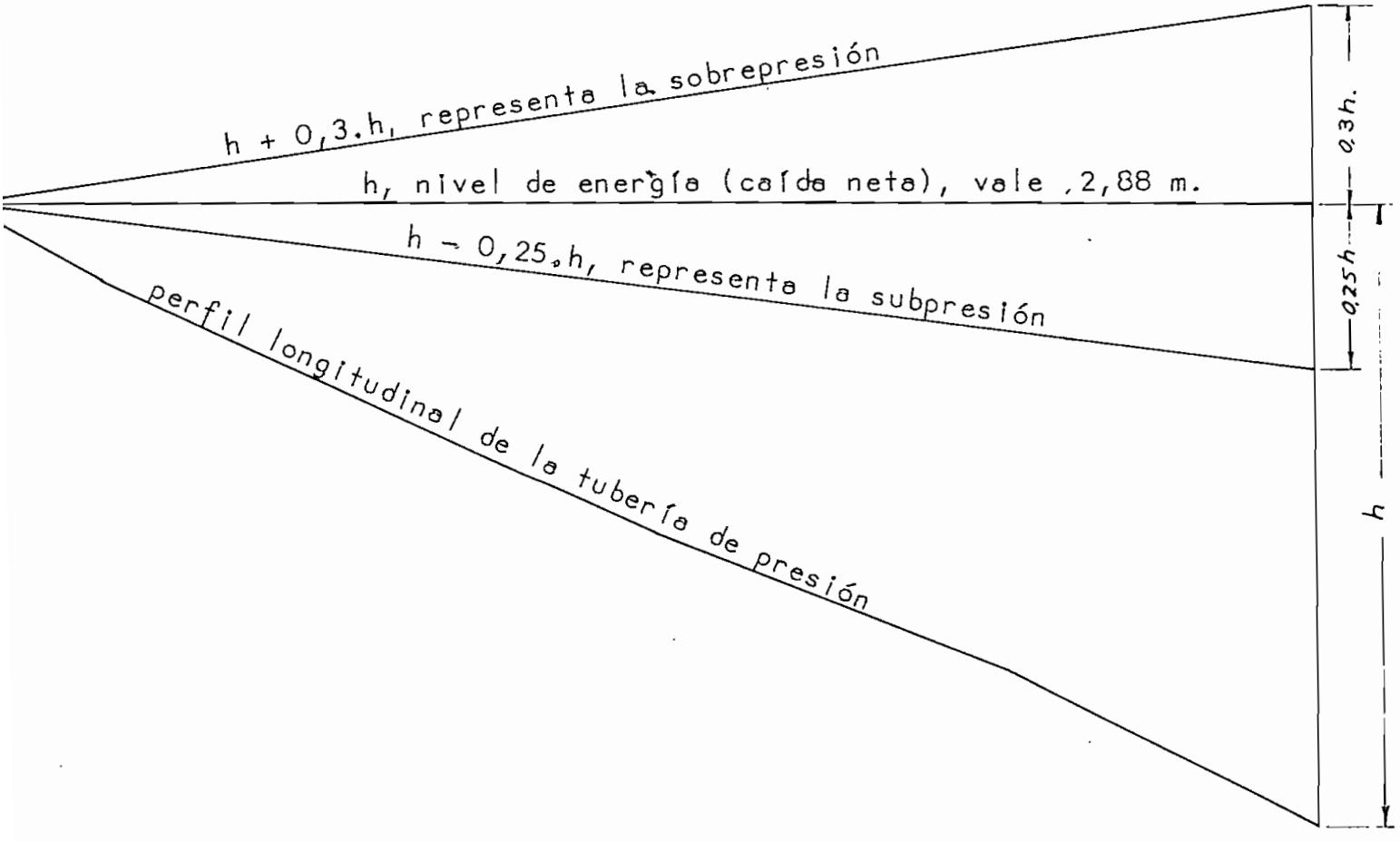
Los coeficientes a y b se han calculado con las mismas fórmulas que se utilizaron para determinar los coeficientes de seguridad de los muros componentes del tanque de presión.

H debía situarse segun el ángulo menor del perfil (plano 13)
H está horizontal, así se consigue el mayor valor de x.

PLANO No. 7

Indica que el perfil de la tubería de presión:

conforme avanza, se separa más de la línea que representa a la subpresión

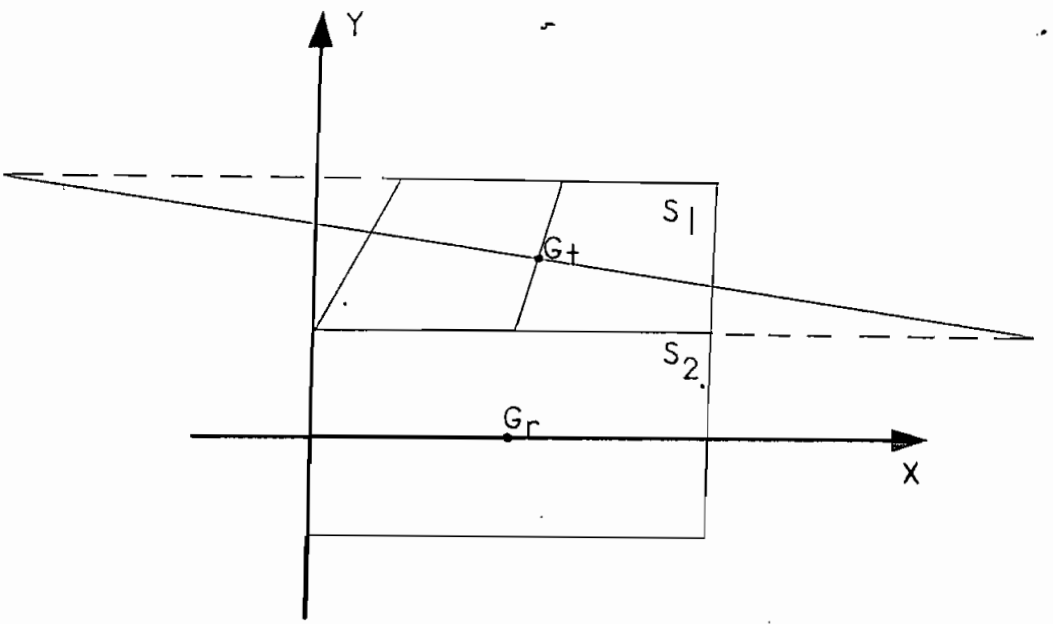


PLANO No. 8

Sección del bloque de anclaje No. 1 (en sentido de la tubería de presión)

La figura que representa este plano se usa para calcular el centro de gravedad de cada bloque de anclaje

Escala 1:25

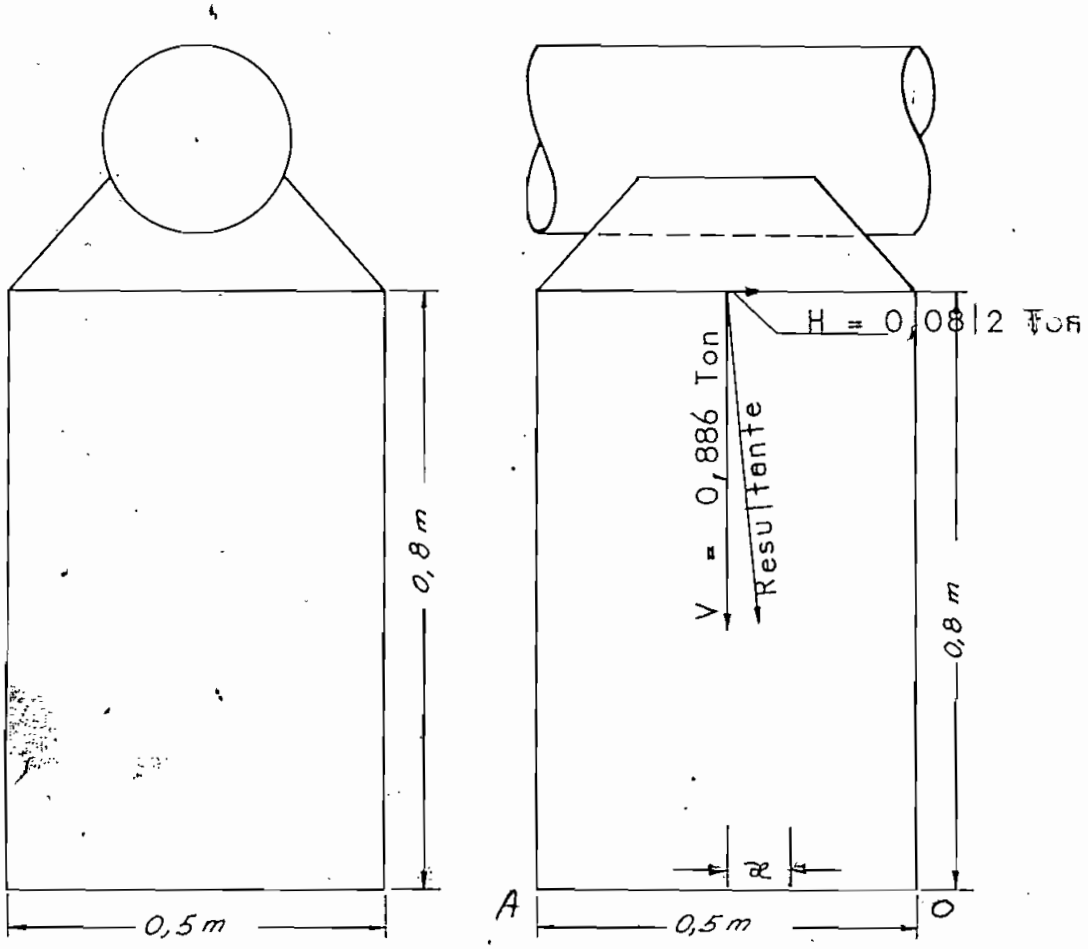


PLANO No. 13

Apoyos de la tubería de presión

Escalas: dibujo 1:10

fuerzas 1 cm = 200 kg



Según tablas de la Westinghouse, el rendimiento η para nuestra turbina disminuye a 0,81. En resúmen, económicamente, conviene usar aquella ouya velocidad específica es 27,9 r.p.m.

Según precios del comercio local:

La velocidad específica de 27,9 r.p.m., es más económica para nuestro caso, pues, el costo de la maquinaria rotativa, disminuye un 10 % aproximadamente, con respecto al costo correspondiente de la maquinaria, ouya velocidad rotativa sea de 720 r.p.m., oaso en el oual, se gana, en rendimiento, un 2 % aprox.

(2), se obtiene:

$$U_1 = \frac{H * g * \eta}{g * \sqrt{2gH}} = 2{,}28 \cdot \eta \cdot \sqrt{H} = (D \cdot n \cdot \pi)/60$$

De donde:

$$D = (60 \cdot 2{,}28 \cdot \eta \cdot \sqrt{H})/(n \cdot \pi) = (43{,}5 \cdot \eta)/n_1$$

$$= 0{,}375 \text{ metros} \quad (= 375 \text{ milímetros})$$

El valor numérico de la velocidad propia, como se vió, vale:

$$U_1 = 2{,}28 \cdot \eta \cdot \sqrt{H} = 18{,}6 \text{ m/seg.}$$

Esta velocidad indica que el rodete se construirá de hierro fundido. Este material soporta hasta 30 m/seg.

Se calcula ahora el valor del diámetro del chorro, d_o :

$$d_o = \sqrt{(4 \cdot Q)/(C_1 \cdot \pi)} = \sqrt{(4 \cdot Q)/(\pi \cdot \varphi \cdot \sqrt{2gH})} = 0{,}55 \cdot \sqrt{Q_1}$$

$= 0{,}0165$ m $= 16{,}5$ milímetros (ahora Q_1 debe expresarse en m^3/seg.)

El diámetro de la boquilla del inyector d_1 :

Las fábricas lo dimensionan de tal manera que $d_1 = 1{,}1 \cdot d_o = 18{,}2$ mm.

El diámetro exterior del rodete, D_e, según L. Quantz, pág. 73 :

$$D_e = D + 2 \cdot (3 \cdot h/5) = 375 + 70 = 445 \text{ milímetros}$$

h, es la altura de la cazoleta, como a continuación se indica, vale 58 milímetros (se mide radialmente).

Si la separación entre dos cucharas contíguas es, aproximadamente igual a h, se determina el número de éstas, Z:

$$Z = (D_e \cdot \pi)/h = (445 \cdot 3{,}14)/58 = 24{,}2 = 25 \text{ cucharas}$$

Las detenidas experiencias de R E I C H E L y de W A G E N B A C H han demostrado que no es recomendable disponer cucharas demasiado pequeñas, y, que los valores más favorables que se pueden considerar en la actualidad, son en función del diámetro del chorro d_o :

ancho de la cazoleta (espesor del rodete), $b = 3{,}75 \cdot d_o = 62$ mm.

altura de la cazoleta (se mide radialmente), $h = 3{,}5 \cdot d_o = 58$ mm.

profundidad de la cazoleta, $t = 1{,}5 \cdot d_o = 25$ mm.

Cálculo del volante: (plano No. 15)

Se empieza por determinar el valor del tiempo de cierre t_o,

(3) $$t_o = (2 \cdot L \cdot v)/(g \cdot h_d)$$

(3) indica la obra "Tuberías de Presión" por Félix Bundschu, traducida al Castellano por Ernesto Contag, propiedad de la Empresa Eléctrica Quito S. A.

2 . L: porque la presión dinámica se hace notar en una ida y un regreso;

v, es la velocidad del agua dentro de la tubería de presión;

h_d, es la presión dinámica, como se indicó: 28,83 metros de altura de agua con ésto: $t_o = (2.217 \cdot 1{,}75)/(9{,}8 \cdot 28{,}83) = 2{,}7$ segundos

El tiempo de curso $t = (2 \cdot L)/a$

a, es la velocidad de propagación de la onda de presión, según Bundschu, para nuestro caso vale 1300 m/seg

Conociendo a, se calcula el tiempo de curso t:

$$t = 2 \cdot 217{,}0/1300 = 0{,}335 \text{ segundos}$$

t, es menor que t_o

cuando ésto sucede, se corrige el valor de t_o, pero antes es necesario

L A T U R B I N A (con REGULADOR AUTOMATICO DE VELOCIDAD)

Velocidad Específica:

Es el número de revoluciones por minuto que daría una turbina semajante a la que se busca, y, que desarrolle una potencia de un caballo de vapor, contando con un salto de un metro. Sin tomar en cuenta el rendimiento, se calcula la velocidad específica n_s con la siguiente fórmula, tomada de: Motores Hidráulicos por L. Quantz, Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona, 1.953, pág. 72.

(1) $$n_s = n_1 \cdot \sqrt{Q_1/100}$$

n_1, es la velocidad en revoluciones por minuto, referida a la altura, vale $(n/\sqrt{H})$

n, es el número de revoluciones por minuto, nominales de la turbina que se busca. Para el caso presente, 900 r.p.m.

H, es el valor del salto neto, en metros.

Q_1, es el caudal disponible mínimo, en litros por segundo, referido a la altura H, vale: $Q_1 = Q/\sqrt{H}$

Q, es el caudal mínimo disponible (86 litros por segudno)

Con estos datos:

$$n_s = 93{,}0 \cdot \sqrt{9/100} = 27{,}9 \text{ r.p.m.}$$

Este valor de n_s dice que la turbina debe ser p e l t o n porque nuestra velocidad específica está dentro de los límites para este tipo de turbinas. Por otro lado, la turbina cuya velocidad específica es de 27,9 r.p.m., puede fabricarse de hierro fundido, porque, como se verá luego, la velocidad propia resulta inferior a 30 m/seg., lo cual significa menor costo inicial. Una turbina pelton tiene su mejor rendimiento cuando su velocidad específica tiene un valor de 20 r.p.m. En nuestro caso, puede conseguírsela disminuyendo la velocidad a 720 r.p.m., o bien, instalando dos boquetes. No se tratará de ir a las 20 r.p.m.. Nos quedaremos con la tubina de 27,9 r.p.m., aunque disminuya el rendimiento, el cual no tiene mayor importancia económicos porque la potencia es relativamente pequeña, como se indica inmediatamente:

Según tablas de la Westinghouse, el rendimiento η para nuestra turbina disminuye a 0,81. En resúmen, económicamente, conviene usar aquella cuya velocidad específica es 27,9 r.p.m.

Según precios del comercio local:

La velocidad especifica de 27,9 r.p.m., es más económica para nuestro caso, pues, el costo de la maquinaria rotativa, disminuye un 10 % aproximadamente, con respecto al costo correspondiente de la maquinaria, cuya velocidad rotativa sea de 720 r.p.m., caso en el cual, se gana, en rendimiento, un 2 % aprox.

(2), se obtiene:

$$U_1 = \frac{H \cdot g \cdot \eta}{g \cdot \sqrt{2gH}} = 2{,}28 \cdot \eta \cdot \sqrt{H} = (D \cdot n \cdot \pi)/60$$

De donde:

$$D = (60 \cdot 2{,}28 \cdot \eta \cdot \sqrt{H})/(n \cdot \pi) = (43{,}5 \cdot \eta)/n_1$$

$$= 0{,}375 \text{ metros} \quad (= 375 \text{ milímetros})$$

El valor numérico de la velocidad propia, como se vió, vale:

$$U_1 = 2{,}28 \cdot \eta \cdot \sqrt{H} = 18{,}6 \text{ m/seg.}$$

Esta velocidad indica que el rodete se construirá de hierro fundido. Este material soporta hasta 30 m/seg.

Se calcula ahora el valor del diámetro del chorro, d_o :

$$d_o = \sqrt{(4 \cdot Q)/(U_1 \cdot \pi)} = \sqrt{(4 \cdot Q)/(\pi \cdot \varphi \cdot \sqrt{2gH})} = 0{,}55 \cdot \sqrt{Q_1}$$

$= 0{,}0165$ m $= 16{,}5$ milímetros (ahora Q_1 debe expresarse en m^3/seg.)

El diámetro de la boquilla del inyector d_1 :

Las fábricas lo dimensionan de tal manera que $d_1 = 1{,}1 \cdot d_o = 18{,}2$ mm.

El diámetro exterior del rodete, D_e, según L. Quantz, pág. 73 :

$$D_e = D + 2 \cdot (3 \cdot h/5) = 375 + 70 = 445 \text{ milímetros}$$

h, es la altura de la cazoleta, como a continuación se indica, vale 58 milímetros (se mide radialmente).

Si la separación entre dos cucharas contíguas es, aproximadamente igual a h, se determina el número de éstas, Z:

$$Z = (D_e \cdot \pi)/h = (445 \cdot 3{,}14)/58 = 24{,}2 = 25 \text{ cucharas}$$

Las detenidas experiencias de R E I C H E L y de W A G E N B A C H han demostrado que no es recomendable disponer cucharas demasiado pequeñas, y, que los valores más favorables que se pueden considerar en la actualidad, son en función del diámetro del chorro d_o :

ancho de la cazoleta (espesor del rodete), $b = 3{,}75 \cdot d_o = 62$ mm.

altura de la cazoleta (se mide radialmente), $h = 3{,}5 \cdot d_o = 58$ mm.

profundidad de la cazoleta, $t = 1{,}5 \cdot d_o = 25$ mm.

Cálculo del volante: (plano No. 15)

Se empieza por determinar el valor del tiempo de cierre t_o,

(3) $$t_o = (2 \cdot L \cdot v)/(g \cdot h_d)$$

(3) indica la obra "Tuberías de Presión" por Félix Bundschu, traducida al Castellano por Ernesto Contag, propiedad de la Empresa Eléctrica Quito S. A.

2 . L: porque la presión dinámica se hace notar en una ida y un regreso; v, es la velocidad del agua dentro de la tubería de presión;

h_d, es la presión dinámica, como se indicó: 28,83 metros de altura de agua

con ésto: $t_o = (2.217 \cdot 1,75)/(9,8 \cdot 28,83) = 2,7$ segundos

El tiempo de curso $t = (2 \cdot L)/a$

a, es la velocidad de propagación de la onda de presión, según Bundschu, para nuestro caso vale 1300 m/seg

Conociendo a, se calcula el tiempo de curso t:

$t = 2 \cdot 217,0/1300 = 0,335$ segundos

t, es menor que t_o

cuando ésto sucede, se corrige el valor de t_o, pero antes es necesario corregir el valor de h_d, con la fórmula siguiente:

(4) $$h'_d = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot t_o \cdot (1 + \frac{a \cdot v}{2gH})(1 - \frac{2 \cdot L}{a \cdot t_o})}$$

reemplazando valores en la fórmula (4), se obtiene que: $h'_d = 17,45$ m

usando h'_d en vez de h_d para el cálculo del tiempo de cierre t_o,

en la fórmula (3) $t_o = 4,45$ segundos.

El valor exacto de la sobrepresión es de 17,45 metros de altura de agua.

Nuestra turbina tendrá deflector de chorro, como se indicóanteriormente.

Por seguridad se mantendrá el valor adoptado de 28,83 metros representando a la sobrepresión. No se recalcula para el nuevo valor de 17,45 m.

Aúnque el tiempo de apertura, generalmente es menor que el tiempo de cierre, se adopta el mismo valor de 4,45 segundos.

Con éstos datos se pasa a calcular el volante propiamente dicho:

Tiene la finalidad de demorar los cambios bruscos de velocidad, los cuales se presentan al variar violentamente la carga. Esta demora debe ser un período de tiempo tal que puedan accionar debidamente los instrumentos de regulación automática de la velocidad.

En la práctica, la variación de la carga, se limita. Es máxima cuando se produce una descarga brusca y total.

Una buena regulación de estas alteraciones, se consigue con el concurso de masas volantes, de suficiente momento de inercia, cuya velocidad no pueda ser alterada violentamente (instantáneamente).

Las masas volantes son: aquella del rotor y, aquella del volante propia-

mente dicho.

El valor del momento total de inercia de las masas volantes se calcula con la fórmula indicada en el libro V de la Escuela del Téronico Mecánico, Editorial Labor S. A. Buenos Aires, 1951, pág. 318:

$$(5) \qquad \Sigma G \cdot D^2 = 1'500.000 \frac{N \cdot t_o \cdot (1 + 2 \cdot a)^2}{z \cdot n^2 \cdot (1+a)}$$

N, es la potencia expresada en caballos de vapor

t_o, es el tiempo de cierre en segundo

a, es el aumento relativo de presión (0,3) $a = \frac{\text{presión dinámica}}{\text{presión estática}}$

z, es el incremento de velocidad, con descarga del 25 %, se expresa en porcentajes, vale 6 %

$\Sigma G \cdot D^2$, es el momento total de inercia

$$\Sigma G \cdot D^2 = 1'500.000 \frac{86 \cdot 4,45 \cdot (1 + 2 \cdot 0,3)}{6 \cdot 900^2 \cdot (1 + 0,3)}$$

$$\Sigma G \cdot D^2 = 233 \text{ m}^2\text{kg.}$$

233 m^2kg., es el momento total de inercia, de éste se debe restar el valor correspondiente al momento de inercia de las masas del rotor.

El rotor de un alternador de características parecidas tiene un momento de inercia de 134 m^2kg., se puede pues, adoptar, para el nuestro el valor de 133 m^2kg. Por consiguiente el volante que se debe dimensionar, debe tener un momento de inercia de 100 m^2kg.

Como se indicó anteriormente, la turbina va a ser de hierro fundido. El volante debe ser del mismo material, por lo cual, su velocidad periférica debe ser inferior a 30 m/seg

Prefijando que el diámetro sea de 60 cm., se tiene:

$$v = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot n)/60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,30 \cdot 900/60 = 28,26 \text{ m/seg.}$$

r, es el radio del volante (0,3 m)

Las dimensiones del volante:

Será constituído por dos anillos unidos mediante brazos radiales. Si se supone que el anillo de menor diámetro (central), y, los brazos que unen los dos anillos mencionados, representan el 10 % del momento de inercia del volante. Además, el espesor radial del anillo exterior, es pequeño en relación al diámetro del volante, se pusde calcular el valor del peso G

del anillo , con la siguiente fórmula aproximada:

del libro V de la Escuela del Técnico Mecánico, pág. 318:

(6) $G = 0{,}9 \cdot \frac{(GD^2)_{volante}}{D^2_{volante}} = 250$ kg.

$G = (100\ m^2kg/0{,}36\ m^2) \cdot 0{,}9 = b \cdot h \cdot \gamma \cdot D_{vol} \cdot \pi$

Asumiendo que b = 20 cm, resulta

$h = 250/(\pi \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}2 \cdot 7500) = 0{,}09$ m = 9 cm

El anillo de mayor diámetro, tiene pues, las siguientes dimensiones:

b = 200 mm h = 90 mm D = 600 mm (r = 300 mm)

El anillo de menor diámetro tendrá:

b' = 250 mm h' = 30 mm (son dimensiones que ofrecen una buena sustentaoión para el volante íntegro)

El diámetro del eje se calcula según H. Dubbel, en su Obra "Manual del Constructor de Máquinas", capítulo Arboles y Ejes, del cual se toma la fórmula del diámetro, espresada en cm/ :

$d = 14{,}4 \cdot \sqrt{N_{cv}/n_{rpm}}$ (siendo el material, acero dulce)

reemplazando valores:

$d = 14{,}4 \cdot \sqrt{(86/900)} = 66$ mm (6,6 cm), se puede adoptar, 70 mm

Los brazos radiales que unen los dos anillos, serán de 40 mm de diámetro (serán circulares).

El peso definitivo del volante, según las dimensiones indicadas (plano No. 15) será de: peso de la corona, 250 kg aprox.

peso del anillo central, 40 kg apeox.

peso de los 6 brazos radiales, 10 kg aprox.

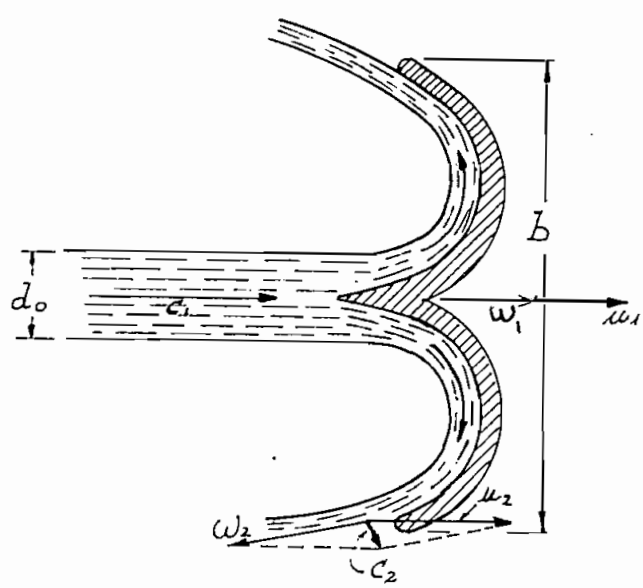
PESO TOTAL DEL VOLANTE, 300 kg aprox.

GD^2 del volante íntegro, se mantiene en un valor cercano a 100 m^2kg. El momento de inercia de los brazos radiales y del anillo central es despreciable. Por ésto no se recalculan las dimensiones del anillo exterior (de mayor diámetro).

PLANO No. 14

Trayectoria del agua en la cuchara

Escala 1:10

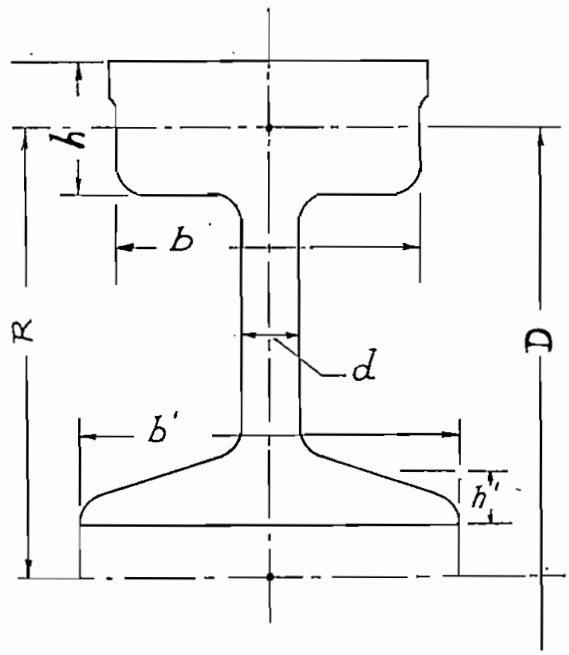


Las dimensiones de la cuchara se indican en la página 34

PLANO No. 15

Corte axial del volante

Escala 1:5



Las dimensiones se indican en la página 37

E L A L T E R N A D O R :

Principio de funcionamiento:

El alternador trabaja de tal manera que se produce una velocidad relativa entre el campo magnético y los conductores, en los cuales se engendra la fuerza electromotríz. El campo magnético es tal que los polos norte alternan con los polos sur, de lo que se sigue que la fuerza electromotríz engendrada en el conductor, cambia su sentido cada vez que el conductor cambia su posición de un polo a otro.

Este cambio engendra una fuerza electromotríz alterna, cuya frecuencia es función del número de polos y del número de revoluciones por minuto, así:

$$f = p \cdot n/60$$

f, es la frecuencia, en períodos por segundo;

n/60 , es el número de revoluciones por segundo (r.p.s.);

p, es el número de pares de polos.

De ésto se desprende que la fuerza electromotríz cambia su sentido 120 veces por segundo (un período vá de más a menos, y nuevamente a más)

El alternador tiene la finalidad de convertir la energía mecánica en eléctrica alterna.

Nuestro alternador tendrá su inductor giratorio (con polos salientes), y su estator, fijo, será el inducido.

Esta disposición permite obtener alta tensión en el inducido. Más adelante se indicará que la tensión de bornes de nuestro alternador debe ser 2300 voltios (pág. 40).

Según la tabla que trae el tratado de electricidad, en la parte de corriente alterna, por Chester L. Dawes (pág. 243);

Para 70 KVA; cos θ = 0,8; tensión, hasta 2400 voltios, tiene un rendimiento de 0,896 (sin tomar en cuenta la altura sobre el nivel del mar).

Finalmente, la tabla indica que la corriente de excitación debe ser de 16 amperios y la tensión de excitación, de 125 voltios (2 kw de potencia).

Siendo posible todavía, que nuestro alternador sea autoexcitado solamente, pues la potencia es relativamente pequeña.

El alternador debe montarse en el mismo eje que la turbina (acoplamiento directo).

Cálculo de la potencia, en kw.:

$$N = (0{,}736 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_1 \cdot \eta_2)/75$$
$$= (0{,}736 \cdot 86{,}0 \cdot 92{,}00 \cdot 0{,}81 \cdot 0{,}896)/75 = 56 \text{ kw}$$

0,736; permite que los caballos de vapor se conviertan en kw.

η_1 y η_2 son los rendimientos de la turbina y generador, respectivamente.

El número de pares de polos es:

$$p = (60 \cdot f)/n = 60 \cdot 60/900 = 4$$

Las especificaciones para el alternador son:

Impulsado por turbina pelton (acoplamiento directo);

tendrá acoplado un volante cuyas dimensiones indicadas anteriormente.

Se admite una irregularidad del 6 % (Apuntes de proyectos Hidroeléctricos de 4o. Año 1957-1958);

La tensión de bornes será de 2300 voltios (pág. siguiente);

La potencia, 70 KVA; EFECTIVOS A 3050 m. SOBRE EL MAR

El factor de potencia 0,8;

La frecuencia será de 60 períodos por segundo;

la velocidad, 900 r.p.m.;

la excitación:

corriente de excitación, 16 amperios;

tensión de excitación, 125 voltios.

L A L I N E A D E T R A N S M I S I O N: (Plano No. 16)

Perfil Longitudinal:

Se ha procurado que sea lo más corto posible. Se ha logrado unir los puntos terminales, con dos rectas solamente, ésto es, con un sólo ángulo de deflección (21° 50').

En su mayor parte se han seguido las cercas divisorias, a fin de conseguir con facilidad el correspondiente permiso, tanto para el montaje como para el mantenimiento de la línea.

En total, el perfil tiene 762,5 metros de longitud, y, los puntos para los postes, en su mayoría, se hna localizado cada 80 metros, con excepción de aquellos que cruzan al río Cinto, a la carretera de la Central Hidroeléctrica de Carrión y hacienda del mismo nombre, y, a la carretera para ir a la estación de bombeo (Cotocyacu) y a la hacienda Monjas.

No se han levantado perfiles transversales por ser que la zona, es practicamente plana.

El fin de la línea de transmisión está situado en el punto en el cual comienza la red de distribución de Lloa, que, en la actualidad le sirve la Central Hidroeléctrica de Carrión, diariamente, desde las 5 de la tarde hasta las 10 de la noche.

Selección del voltaje:

La selección del voltaje es función de la potencia a transmitirse y de la longitud de la línea.

En el presente caso se escogerá una tensión de transmisión de 2300 voltios, a esta tensión se genera la energía en la Central H. de Carrión, para luego transmitirsela a los mismos 2300 voltios. En la actualidad, se transmite la energía a la Estación de Bombeo y a las horas de servir a Lloa se hace desde la misma E. de bombeo.

La casa de máquinas de Carrión está a unos 200 metros del lugar en donde se construirá la casa de máquinas para la central, objeto de este trabajo. Existe pues la posibilidad de que alguna vez se interconecten las líneas respectivas. Esta es la razón fundamental por la cual se ha escogido la tensión tanto de generación como de transmisión de 2300 voltios.

Se-lección de los conductores:

El escogimiento de la sección de los conductores está supeditado a la caída de tensión y pérdidas de potencia, es pues, un aspecto económico el que prima. Las pérdidas, en ningún caso, conviene que sean mayores al 6 %. Admitiéndo que la pérdida de potencia sea del 5 %, se calcula la sección transversal s de uno de los conductores, en milímetros cuadrados, con la siguiente fórmula tomada de los Apuntes de Proy. Hidroel. 4o. Año 1957-1958;

(1) $$s = \frac{100 \cdot L \cdot W}{p \cdot E^2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \rho}$$

100, es el factor que convierte los cm^2 en mm^2;

L, es la longitud de la línea, en metros;

W, es la potencia total a transmitirse, en vatios;

p, es el porcentaje de pérdidas de potencia, en tantos por ciento;

E, es la tensión de transmisión, en voltios;

Cos θ , es el factor de potencia;

ρ , es el coeficiente de conductibilidad del material.

$$s = \frac{100 \cdot 762{,}5 \cdot 56000}{5 \cdot 2300^2 \cdot 0{,}8^2 \cdot 57} = 4{,}41 \text{ mm}^2$$

Si el conductor es de material de cobre, la conductibilidad es de 57, y, la sección transversal es de 4,41 mm^2. Pero, nunca se ponen secciones inferiores a 10 mm^2. Por esta razón se usará conductor de cobre No. 6 AWG (13,3 mm^2). Con esta nueva sección, la pérdida de potencia baja, del 5 % al 1,655 %

Distancia entre Conductores:

Es importante tener una distancia suficiente entre los conductores, especialmente, en el centro del vano (lugar de la flecha máxima), tal que evite un acercamiento peligroso de los conductores. La distancia mínima equivalente se calcula con la siguiente fórmula, cuyo resultado es en pulgadas. Tomada de Apuntes de Electroteonia de 4o. Año (1957-1958)

(2) $$d = 6 + 1{,}25 \cdot kv = 6 + 1{,}25 \cdot 2{,}3 = 9'' = 22{,}86 \text{ cm.}$$

Esta es la distancia equivalente indispensable, pero, para el presente caso conviene utilizar una distancia mucho mayor. Adoptaremos 70 cm, pues se debe asegurar para que el arco no salte en el centro del vano (punto más peligroso), al acercarse los conductores entre si por efecto de vientos.

Los conductores formarán un triángulo equilátero con la finalidad de dismi-

nuír la reactancia. Cada lado de este triángulo será de 70 cm. Se formará éste con la ayuda de una cruceta adecuadamente situada en el poste.

Regulación de la línea:

Para conocer la regulación, se requiere, previamente, conocer la caída de tensión.

Por ser que nuestra línea pertenece al tipo de líneas cortas (762,5 m), el efecto capacitivo es insignificante y no se lo toma en cuenta.

La caída de tensión: $e = E_s - E_r$

E_s = la tensión de salida entre fase y neutro

E_r = la tensión de recepción " " " "

(3) $E_s = \sqrt{(E_r \cdot \text{Cos}\,\theta + IR)^2 + (E_r \cdot \text{Sen}\,\theta + IX)^2}$

Cos θ, es el factor de potencia

I, es la corriente de línea

R, es la resistencia óhmica de la línea

X, es la reactancia de la línea

Sen θ, es el factor de potencia reactiva

$I = 70/(2,3 \cdot 1,732) = 17,6$ amperios

$R = 762,5/(57 \cdot 13,3) = 1$ Ohmio

$X = X_a + X_b$

X_a, es la reactancia inductiva interior (hasta un pie de radio)

X_b, es la reactancia inductiva exterior (desde un pie de radio, hasta un radio igual a la distancia entre conductores, 70 cm.)

X_a y X_b, se han tomado de "Electrical Transmission and Distribution, Reference Book, Copyright, 1950 by Westinghouse Electric Corporation páginas 49 y 54

$X_a = 0,628$ ohm/cond/milla $\cdot \left(\frac{762,5 \text{ m}}{1609 \text{ m/milla}}\right) = 0,3$ Ohmios/conductor

$X_b = 0,1028$ ohmios/conductor

$X = 0,3 + 0,1028 = 0,4028$ ohmios/conductor

$E_s = \sqrt{((2300/1,732).0,8 + 17,6.1,0)^2 + ((2300/1,732).0,6 + 17,6.0,4028)^2}$

$= 1355$ voltios; $E_r = 2300/1,732 = 1330$ voltios

Caída de tensión $e = 1355 - 1330 = 25$ voltios

Regulación en % = $\frac{100 \cdot 25}{1330}$ = 1,88 %

Aislamiento y Protecciones:

Para ésto se ha consultado el catálogo de LINE MATERIAL Company Division MILWAUKEE 1, WISCONSIN, Noviembre de 1956 Insulators y Lighning Arresters El aislamiento de la Línea debe ser a base de aisladores de soporte o rígidos, tales que, la longitud de la línea de fugas, en la porcelana, sea aproximadamente, el doble de la menor distancia de los puntos con tensión en el aire.

Especificaciones:

1.- Debe ser una camapana de vidrio o porcelana con cemento portland puro, con el fin de que la rotura de una pieza no se transmita a la otra, gracias al cemento intermedio.

2.- La tensión nominal de servicio, 2300 voltios. La tensión característica del aislador debe ser: en seco 29 000 voltios,
bajo lluvia 17 000 voltios; y, la tensión de perforación 43 500 voltios.

O sea que los coeficientes de seguridad son de 9,7; 5,7 y 14,5 respect. Así mismo, los coeficientes de seguridad, eléctrico y mecánico son de 2 y 2,5 respectivamente. Se trata de aisladores para corriente alterna con una frecuencia de 60 ciclos.

3.- La cota más alta de la línea es 3055 metros sobre el nivel del mar.

4.- La resistencia a la tracción estará comprendida entre los 490 y los 630 kg/cm^2

La resistencia a la compresión: entre 2800 y 4200 kg/cm^2

Rigidez dieléctrica: entre 60 y 100 kv/cm (deben ser de superficie lisa).

En los extremos y en el ángulo irán aisladores de cadena, siendo necesario un disco solamente.

Características de los aparatos de protección:

El objeto de los aparatos de protección es el de limitar los sobrevoltajes que pueden aplicarse sobre los aparatos que ellos protegen, y, desviarlos a tierra. Los aparatos de protección deben soportar contínuamente el vol

taje nominal del sistema para el cual están diseñados. La relación del sobrevoltaje máximo que el pararrayos es capaz de soportar, al voltaje de cresta del sistema, despues de la descarga, es lo que se llama la relación de protecciónу, es por lo tanto, una medida de la capacidad de protección del aparato.

Otra cualidad de gran importancia y que define la bondad del aparato de protección es la "magnitud y la duración de las corrientes que puede descargar, debidas al sobrevoltaje, sin sufrir deterioro".

Hay tres tipos generales de aparatos de protección contra rayos, cada cual tiene su campo de aplicación. Los tres tipos son: varillas estalladoras, tubos protectores y los pararrayos convencionales tipo válvula.

Aúnque las varillas estalladoras tienen la ventaja de ser extremadamente simples, tienen dos desventajas importantes desde el punto de vista de la protección:

En primer lugar, no llenan plenamente uno de los requerimientos de un verdadero aparato protector, es que no hace el papel de válvula para la corriente del sistema despues de haber desviado el sobrevoltaje exterior. En otras palabras, tiene que desconectarse el sistema cada vez que se ha producido un arco de descarga en el espacio de las varillas estalladoras.

En segundo lugar, su voltaje de descarga se eleva, con un tiempo de retraso, a valores mayores que el de la mayor parte de los aisladores que está protegiendo, ésto, tambien significa que se requiere, relativamente, menores distancias para proteger el aislamientos contra sobrevoltajes que tienen una onda de frente sumamente empinado. Se llegaría, por lo tanto, a un bajo voltaje de descarga con un lapso de tiempo de retraso. Ello traería consigo nuevas descargas, con las consiguientes interrupciones del servicio, aún en el caso de sobrevoltajes menores o sobretensiónes debidas a operación de suiches.

Las varillas estalladoras se usan solamente como última protección, en caso de falla de los otros sistemas, o en donde se pueda poner una pequeña distancia, lo que trae consigo suspensiones que pueden tolerarse, y, con ayuda de interruptores automáticos del tipo reconectador rápido.

A veces se han usado algunas modificaciones de las varillas estalladoras.

Las principales modificaciones consisten en varillas estalladoras con fusibles. Los estalladores, sea como varilla o en cualquier otra forma, pueden ponerse en serie con un fusible, de manera que la corriente del sistema, que fluya despues de la descarga de la sobretensión, funda al fusible, con lo que se interrumpe el paso de dicha corriente. Su desventaja está en que tiene que cuidarse y reemplazarse los fusibles. Por otro lado es difícil conseguir una buena coordinación para que los fusibles se quemen antes de que operen los interruptores automáticos.

Un tubo protector del tipo que se usa en transmisión, tiene una característica de voltaje tiempo, algo mejor que las varillas estalladoras, y, además, tiene la gran ventaja de poder interrumpir el flujo de corriente que sigue a la descarga de una sobre-tensión. Por esta razón se usa ampliamente para evitar las descargas de contorneo sobre los aisladores de la línea de transmisión, los aisladores de los suiches y los aisladores de las barras colectoras.

Tambien se usan extensamente, montados en las últimas torres adyacentes a las subestaciones, a fin de disminuír la magnitud de las sobretensiones que llegan a la subestación, desde la línea.

En la actualidad no se considera que los tubos protectores provean de una buena protección para los aisladores de los transformadores, por esta razón se usan solamente para proteger los transformadores de distribución para voltajes de hasta 13800 voltios.

Los pararrayos para corriente alterna se especifican de acuerdo con el máximo voltaje de fase a tierra que se quiere que soporten. Entre los pararrayos tipo válvula, se distinguen en los EE. UU. tres tipos:

Parrarrayos tipo estación, con voltajes nominales desde 3 hasta 242 kv.
" " " línea para 20 hasta 73 kv.
" " " de distribución, de 3 a 15 kv.

Los pararrayos tipo estación son los más pesados y caros de todos los tipos, son así mismo los que proveen el mayor grado de protección y los que tienen la mayor capacidad de descarga de corriente más alta. Estos pararrayos se usan para la protección de los equipos costosos de los dos lados de la línea de transmisión y, en especial, de los transformadores.

Los pararrayos tipo. línea se usan para la protección de los transformadores pequeños de fuerza o de subestaciones muy pequeñas.
Los pararrayos de distribución se construyen para montarse en los postes, junto con los transformadores de distribución, a los cuales tienen que dar protección. Estos pararrayos baratos no se construyen sino para voltajes de hasta 13800 voltios.
Estos pararrayos tipo de distribución, siendo los más baratos, son unas 4 veces más caros que los tubos protectores.
Se debe tener en cuenta, además, que la Central Hidroeléctrica de Carrión viene trabajando 4 años, durante este tiempo, no se ha observado la caída de UN RAYO, y, según informaciones de los vecinos del lugar, se concluye en que las descargas atmosféricas son r e m o t a s.
Por todas estas razones y por ser que nuestros equipos serán, relativamente, de pequeño valor, se utilizará, como protección contra las descargas atmosféricas, simplemente tubos protectores, los cuales se situarán en los extremos de la línea.

Esfuerzos de los conductores:

Los esfuerzos que deben desarrollar los conductores, nunca deben llegar al valor de la carga de la deformación plástica, siempre deben tener un coeficiente de seguridad, entre 2 y 3.
Los conductores están sujetos, especialmente a vientos fuertes, al peso propio, a las cargas adicionales provenientes de hielo o de nieve, y, a las variaciones notables de la temperatura. Estos factores se toman muy en cuenta al calcular las flechas.
Así, al medio día, en Lloa, la temperatura ambiente sube hasta 25° C, en ciertas ocasiones, en cambio, hay madrugadas en las que caen las llamadas heladas y aquella baja hasta(cero) 0° C.
Al aumentar la temperatura, aumentan, tanto la longitud del conductor como la flecha.
Las cargas adicionales que se tomarán en cuenta, son las que provienen por efecto de vientos. Estan influyen notablemente aumentando la flecha.
Las cargas adicionales aumentan la fuerza de tracción, la cual, en ocasio-

nes, se hace múltiplo de aquella correspondiente al peso propio del conductor. Por lo expuesto, y según aconseja el Ing. Alfonso Mendizabal en su obra "Electrotecnia", editada en la Escuela de Ingenieros Militares, Quito, 1955, pág. 27. Al calcular las flechas para el cambio de condiciones, se debe tomar en cuenta todos los efectos producidos pro los esfuerzos anotados anteriormente.

En nuestro caso, por seguridad, se tomará como mínima temperatura a la que puede llegar en el lugar (Lloa), aquella de - 5° C; y, como cargas adicionales se tomarán el valor de 100 . $\sqrt{d}$ gr/metro de longitud de conductor, siendo d el diámetro expresado en milímetros.

La temperatura mínimaobservada es de 0° C. Por cargas adicionales, se entienden los esfuerzos producidos por vientos fuertes.

Las temperaturas extremas, para el cálculo de las flechas, se usarán los valores de - 5° C y de + 50° C.

Las flechas máximas se obtienen a la temperatura de 50° C sin actuar la carga adicional; y, aquella que resulta a la temperatura de - 5° C actuando la carga adicional. De estas dos se escogerá la de mayor valor que servirá de base para determinar la altura de los postes.

Se debe anotar que a 25 kg/mm^2, el cobre está sujeto a deformación plástica, por ésta razón, nuestros conductores trabajarán solamente a 10 kg/mm^2. O sea que se usará un coeficiente de seguridad de 2,5. En ningún caso la fuerza de tracción sobrepasará los 10 kg/mm^2.

La altura mínima del conductor más bajo al suelo será, por lo menos de 6 metros en el centro del vano.

El mismo Ing. Alfonso Mendizabal, en su obra "Electrotecnia", aconseja, en la pág. 17, utilizar la ecuación general para los materiales utilizados en transmisión de energía eléctrica, por hoy llamaremos fórmula (4). Esta ecuación supone el caso aproximado de que el conductor forma una parábola y no una curva catenaria.

$$(4) \qquad t = \frac{s^2 \cdot \delta}{24 \cdot p^2 \cdot \beta} - \frac{p \cdot \alpha}{\beta} - \frac{s^2 \cdot \delta_o}{24 \cdot p_o^2 \cdot \beta} + \frac{p_o \cdot \alpha}{\beta} + t_o$$

t, es la temperatura buscada

t_o, es la temperatura mínima considerada

δ, es el peso propio del material, sin la carga adicional, en kg/cm^3

δ_o, es el peso propbo del material, con la " " " " " "

p, es la tensión mecánica de tracción, a la temperatura t, en kg/mm^2

p_o, " " " " " " " " " " " " t_o, " " "

S, es el vano, en metros

α, es el coeficiente de alargamiento mecánico, en cm^2/kg

β, " " " " " dilatación térmica

Convirtiéndo a la fórmula (4) en ecuación particular para el cobre resulta:

$$t = 0{,}194 \cdot (S^2/p^2) - 0{,}0452 \cdot p - 2415 \cdot (S/p_o)^2 \cdot \delta_o + 0{,}0452 \cdot p_o + t_o$$

Las dimensiones que se deben usar en la mencionada ecuación del cobre son:

S, vano, en centímetros (8000)

p, en kg/cm^2 (1000)

$$\delta_o = 0{,}0089 + (100 \cdot \sqrt{4{,}12})/(13{,}3 \cdot 1000) = 0{,}024 \text{ kg/cm}^3$$

reemplazando valores resulta que:

$$t = 12{,}4(10^6/p^2) + 0{,}0452 \cdot p - 49{,}0$$

Dando valores a p, se van calculando las respectivas temperaturas t. Con un número suficiente de estos valores (de t y de p), se dibuja una curva que representa a p. Así se facilita la lectura de cualquier tensión de tracción, a determinada temperatura, dentro de los límites considerados (- 5° C y + 50° C):

Si	p =	330 kg/cm^2	t =	50° C
"	p =	360 " "	t =	45° C
"	p =	400 " "	t =	10,5° C
"	p =	430 " "	t =	-1° C
"	p =	450 " "	t =	-7,8° C

A continuación, se calculan las flechas:

La flecha máxima para -5° C se calcula con la fórmula siguiente, que considera a la carga adicional:

(5) $$f = (S^2 \cdot \delta_o)/(8 \cdot p_o) =$$

$$= (8000^2 \cdot 0{,}024)/(8 \cdot 1000) = 194 \text{ cm.}$$

La flecha para +50° C, sin considerar a la carga adicional se calcula con la siguiente fórmula de "Electrotecnia del Ing. Alfonso Mendizabal, pág. 18

$$f = 11{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot (S^2/p)$$

δ_o, S_s p y p_o son las mismas indicadas anteriormente

Si t = 50° C f = 215,0 cm.

" t = 45° C f = 197,0 "

" t = 10,5° C f = 177,0 "

" t = - 1° C f = 164,0 "

" t = - 7,8° C f = 158,0 "

Las flechas características son:

para - 5° C ; f = 194,0 cm.

+50° C ; f = 215,0 cm.

Nuestra flechas máxima definitiva es pues: 215,0 centímetros.

Se dibuja el plano No. 17 en el cual aparecen dos curvas:

La primera corresponde a las flechas: en ordenadas, las flechas, y en abcisas, las temperaturas

La segunda corresponde a las tensiones: en ordenadas, las tensiones, y en abcisas, las temperaturas

Esfuerzos de los postes:

Los postes han de soportar consuficiente seguridad, ciertos esfuerzos mecánicos que los ataquen. Son provenientes de varias causas. El cálculo se basará en la suma de todos aquellos que actúan simultáneamente. Eston son:

1.- Peso propio del poste, aisladores, conductores con su carga adicional;

2.- Esfuerzos causados por efecto del viento, actuando perpendicularmente sobre todas las partes mencionadas en 1.-

3.- Carga de tracción, máxima, que ocurre en los conductores, en el lugar en el cual se los sujetan, vale, el producto de la tracción máxima admisible, por la sección transversal del conductor. Este esfuerzo se presenta en los sitios de fijación de los conductores.

Se los puede clasificar tambien, de la manera siguiente:

a) Esfuerzos que provocan compresión vertical sobre el poste;

b) Esfuerzos que provocan un momento de flexión en el poste (rotura de todos los conductores del mismo lado);

c) Esfuerzos que provocan un momento de torsión, se presenta cuando se rompen parte de los conductores del mismo lado.

Selección de los postes:

Los postes sirven para la suspensión de los conductores, para separar éstos del suelo.

Para que la línea sea estable, una parte de los postes debe ser más fuerte, así se conseguirá mantener en orden la línea, aún en caso de falla (rotura), en otras palabras, los postes más fuertes deben soportar esfuerzos tales que los postes comunes no están garantizados a soportar. Por esta razón, se clasifican para el presente caso, en dos tipos:

Tipo A (Plano No. 18 b):

Comprenderá a los postes terminales y a aquel del ángulo;

Tipo B (Plano No. 18 a):

Trata de los postes de suspensión o de alineación.

Los del tipo A, tendrán que soportar, simultáneamente, los esfuerzos indicados en 1, 2 y 3. Además, se debe tener en cuenta que éstos atacan por distintas direcciones. Al calcularlos se analizarán debidamente a todos los esfuerzos.

Los postes de suspensión o de alineación, en cambio, no soportarán la carga de tracción, indicada en 3.- porque en el poste se anulan las cargas de los dos lados contíguos, pues son de igual magnitud y de sentido opuesto. Esto sucede porque los postes de suspensión se colocan solamente en sentido rectilíneo (alineación).

Para el cáloulo de los postes de suspensión, se admite que el esfuerzo m´ máximo ocurre cuando el viento actúa en direcoión perpendicular a la línea, atacando: sobre los conductores (un vano), sobre el poste (mitad de la superficie lateral), y, sobre los aisladores. Por eso los postes de suspensión deben poseer mayor resistencia mecánica en sentido perpendicular al rumbo de la línea.

Se calculan los esfuerzos mencionados y se prueba con postes de madera:

Su longitud debe ser de por lo menos la suma de:

1) La altura que se empotra en el suelo (fluotúa entre 1/8 y 1/6 de la longitud total del poste, ésto indica el libro X de la Escuela del Técnico Electricista, Editorial Labor S. A. Barcelona, 1954). Para

el tipo B se usará 1/8 de la longitud total, y para el tipo A, se usará 1/6 de la longitud total del poste, t

2) La altura mínima al suelo, desde el conductor más bajo, se indicó que será de 6 metros en el centro del vano, h

3) El valor de la flecha máxima, 215,0 cm, $f_{máx.}$; y

4) El lado del triángulo equilátero multiplicado con el Sen 60° (cada conductor será un vértice del triángulo), d = 60 cm = 70 . 0,866

Si el poste tipo B (de suspensión), es de 10 metros de longitud, L :

t = 10/8 = 1,25 m

h = 6,0 metros

$f_{máx}$ = 2,15 metros

d = 0,60 metros

Si el poste tipo A (terminal), es de 10,5 metros de longitud, L' : solamente varía el valor de t, con respecto al tipo B, pues para éste,

t = 1,75 metros = 10,5/6

Se determina el valor numérico de todos y cada uno de los esfuerzos que soportará el poste tipo A (plano Nº 19.b)

1.- a) Peso propio del poste, 800 kg aprox.

b) Peso de los tres aisladores, 12 kg aprox.

c) Peso propio de los conductores, más la carga adicional, vale: 0,024 . 13,3 $(kg/cm^3).(cm^3)/m$ de longitud . longitud del vano. Se multiplica por la longitud del vano porque el poste carga la mitad de cada uno de sus dos vanos contíguos. Además, la longitud verdadera del vano es: 80 m . 1,008 = 80,64 m . Numéricamente: 0,024 . 13,3 . 80,64 = 26 kg/conductor

(a) + (b) + (c) = 800 + 12 + 78 = 890 kg

2.- Los esfuerzos por el viento son:

a) Sobre el poste se ejerce, a la mitad de la altura libre, y sobre la mitad de la superficie lateral.

Si el poste tiene sus diámetros de 45 cm en la base mayor y de 20 cm en la base menor; 41 cm en la sección más peligrosa; y, 33 cm será el diámetro medio. S[u] valor es de:

$\frac{1}{4}$. 3,14 . 0,33 . $8,75^2$. 65 $(m . m^2 . kg/m^2)$ = 1270 mkg

$\frac{1}{4}$, comprende a la mitad de la superficie lateral y al viento actuando

en la mitad de la altura libre del poste (8,75 m)

65 kg/m^2 es la presión que ejerce el viento

b) Sobre los conductores se usa el mismo valor que se obtuvo para la carga adicional (26,0 kg/conductor), actuando a la altura respectiva de cada uno de los conductores. Su valor es:

26,0 . (2 . 8,15 + 8,75) kg/cond. . (cond. . m) = 652 mkg

3.- a) Se considera actuando solamente, los tres conductores del mismo lado:

(10 kg/mm^2) . 13,3 mm^2 = 133 kg el momento vale:

133 kg . (2 . 8,15 m + 8,75 m) = 3340 mkg

b) En el poste de ángulo, hay una resultante horizontal, cuando todos los conductores tensan normalmente por los dos lados:

vale $2 \cdot 3 \cdot 133 \cdot \text{Cos } \frac{1}{2}(180-21^\circ\ 50')$ = 155 kg

A este poste de ángulo se lo considera como terminal, con lo cual resulta estar mucho más asegurado.

Sedetermina el valor numérico de todos y cada uno de los esfuerzos que soportará el poste tipo B (plano Nº 19 Q)

1.- a); b) y c) dan valores iguales a aquellos del poste tipo A

(a) + (b) + (c) = 890 kg

2.- a) Solamente varía el valor del diámetro medio porque el diámetro de la base mayor es ahora 40 cm, por consiguiente vale:

1270 mkg . (0,3/0,33) = 1178 mkg

b) Tiene exactamente el mismo valor de 652 mkg

3.- a) y b) valen cero

En el caso presente, dan valores suficientemente pequeños, como para no tomarlos en cuenta a los esfuerzos que harán trabajar al poste:

bajo compresión, y

bajo momento de torsión

Solamente se toma en cuenta aquellos esfuerzos que harán trabajar al poste bajo flexión, actuando simultáneamente, caso más desfavorable. Estos esfuerzos son: Para el poste tipo A: a) de 2.- y

a) de 3.-

Para el poste tipo B: a) de 2.- y

b) de 2.-

Los momentos resistentes de los dos tipos de postes:

$M_{resistente} = W \cdot \sigma = d^3 \cdot (3,14/32) \cdot 85$

W, es el módulo de resistencia, vale: $d^3 \cdot 3,14/32$

σ, es la tensión máxima admisible, para madera, vale: 85 kg/cm^2

d, es el diámetro de la sección más peligrosa (flor de tierra):

para el tipo B (poste de suspensión), resulta de 0,38 metros

" " " A (poste terminal), resulta de 0,41 metros

Tipo A:

$M_{resistente} = (0,41\ m)^3 \cdot (3,14/32) \cdot (850000\ kg/m^2) = 5350$ mkg

$M_{actuante}$ = (a) de 2.- y (a) de 3.- = 1270 + 3340 = 4610 mkg

factor de seguridad: 5350/4610 = 1,32 (32 %)

Tipo B:

$M_{resistente} = (0,38\ m)^3 \cdot 850000\ kg/m^2 \cdot 3,14/32 = 4580$ mkg

$M_{actuante}$ = (a) de 2.- y (b) de 2.- = 1178 + 652 = 1830 mkg

factor de seguridad: 4580/1830 = 2,5

Se debe mencionar que el poste terminal puede ser reemplazado por poste de suspensión asegurado con un tensor apropiado.

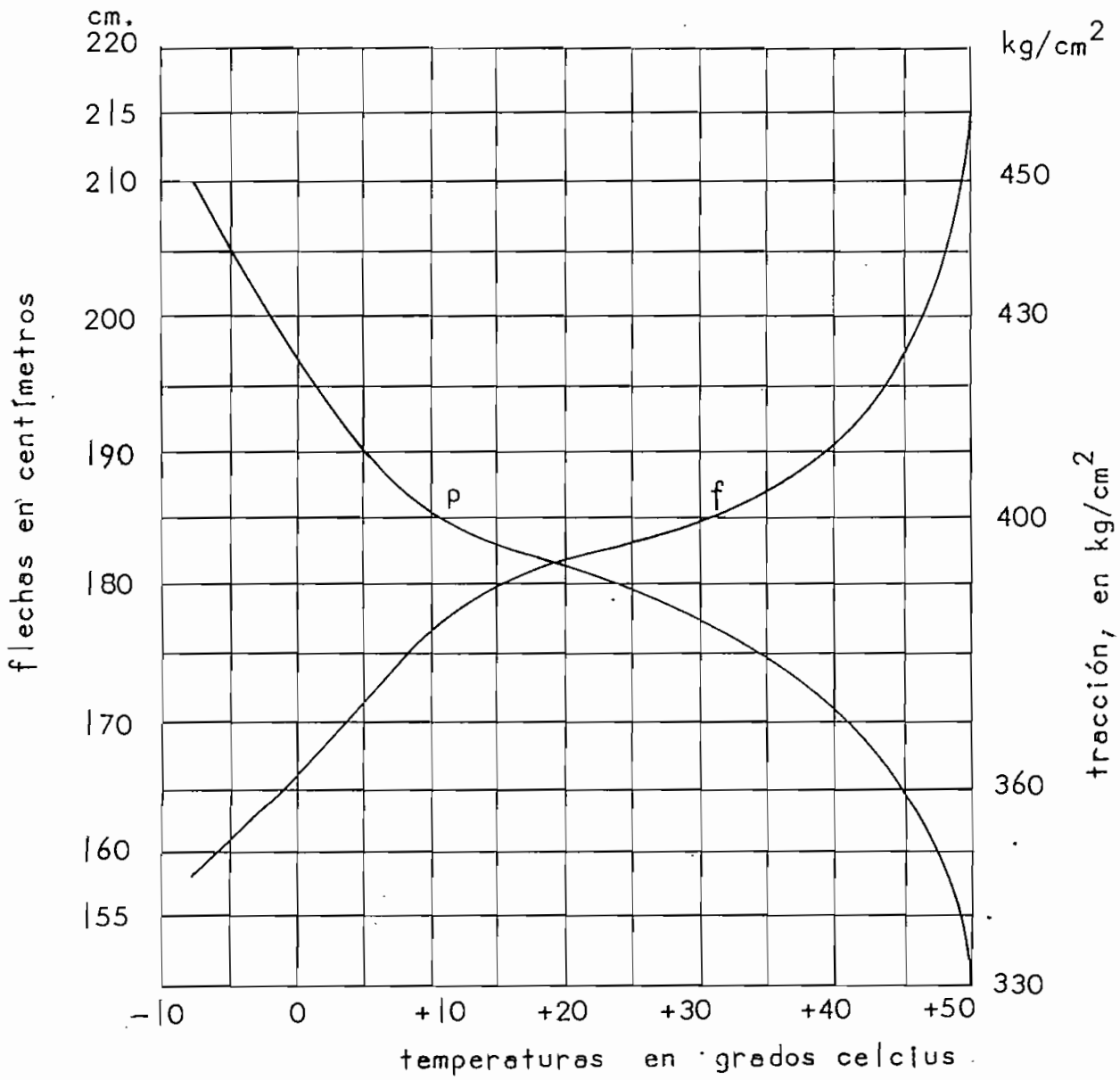
PLANO No. 17

Flechas y tensiones de tracción de los conductores para el "cambio de condiciones"

Escalas: Tracción 1 cm = 10 kg/cm^2 (ordenadas en la derecha)

Flechas 1 cm = 5 cm (ordenadas en la izquierda)

Temperaturas 1 cm = 1° C (abcisas)



f, es la curva de flechas

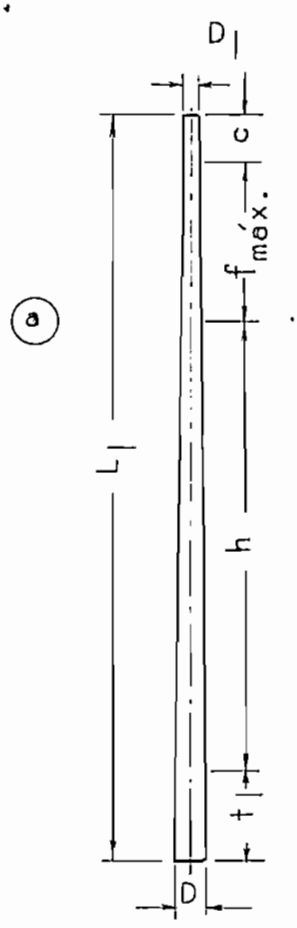
p, es la curva de tracciones

PLANO No. 18

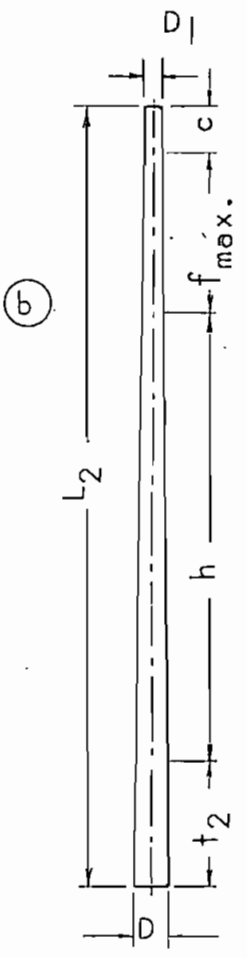
Tipos de postes: A y B

Escala 1:100

Tipo B



Tipo A

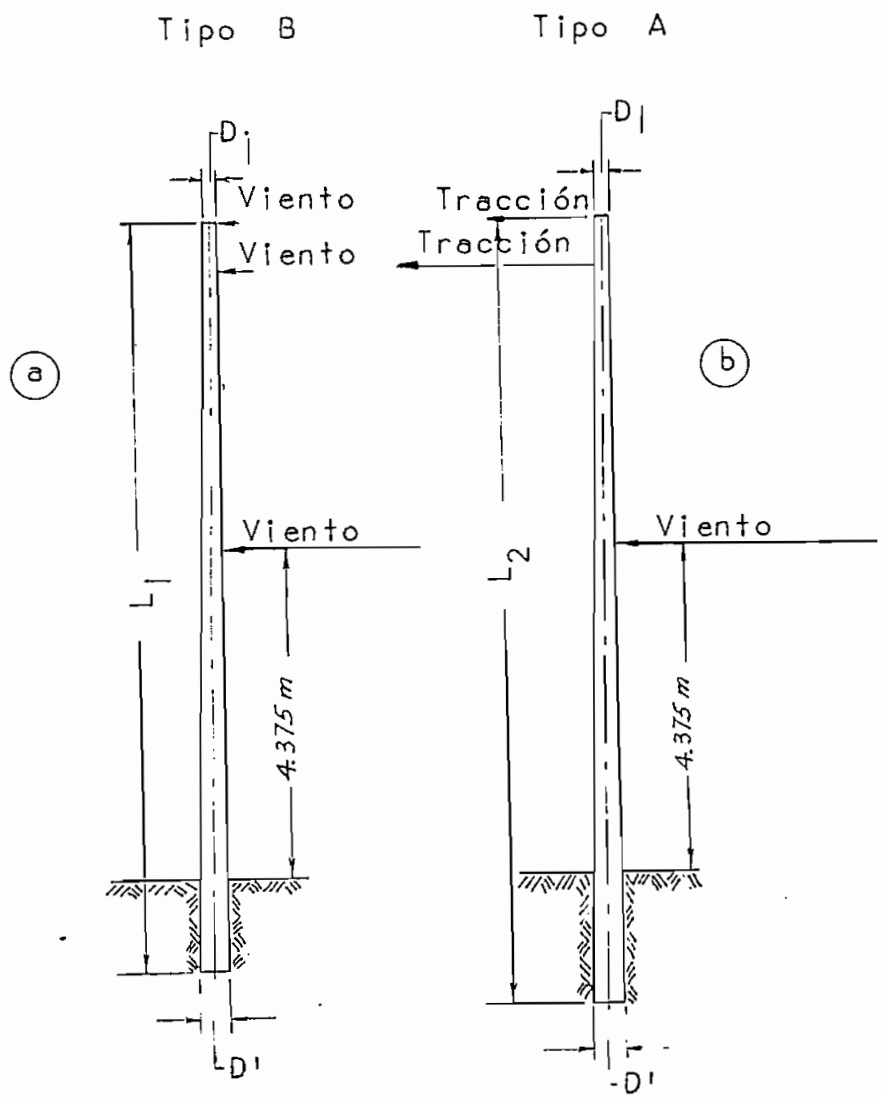


PLANO No. 19

Los postes y los esfuerzos que soportarán

Escalas: dibujo 1:100

fuerzas 1cm = 100 kg



E L T R A N S F O R M A D O R D E B A J A D A :

Utilidad:

A los transformadores se debe la extensa difusión que ha alcanzado la corriente alterna.

El transformador es un aparato destinado a transferir la energía eléctrica, de un circuito de corriente alterna a otro, sin variar la frecuencia. Esta transferencia, en el presente caso, va acompañada de una variación de la tensión, pues, recibirá 2200 voltios y devolverá 220 voltios, por ésto se lo llama "transformador reductor".

Funcionamiento en vacío:

Fuerzas electromotrices en el transformador:

Se designan por E_1 a la fuerza electromotríz del primario, y, por E_2, la del secundario, en cambio, V es la tensión de bornes, con la cual se alimenta a la bobina primaria que tiene Z_1 espiras, mientras que la bobina secundaria tiene Z_2 espiras.

El momento que se alimenta al transformador con la tensión V (primario), se induce en el primario una fuerza contraelectromotríz $-E_1$. El origen de ésta, es el flujo magnético producido por la corriente de magnetizaoión I_m. A fin de que esta I_m pueda circular en la bobina , es necesario que la fuerza contraelectromotríz y la tensión de bornes tengan valores algo diferentes, diferencia que debe ser igual a la caída de tensión en el primario.

Se admite que la corriente de magnetización y el flujo coincidan con la vertical, en cambio, la fuerza electromotríz sigue la horizontal, retrasada 90^o de la corriente de magnetización (y del flujo). Flujo = ϕ

El valor de la fuerza contraelectromotríz se lo determina de la siguiente manera:

El momento que se aplica la tensión V en bornes, circula la corriente de magnetización, produciendo un flujo magnético ϕ, el cual abraza al núcleo que encadena las dos bobinas (primaria y secundaria).

Se admite que el flujo varía según una función sinusoidal del tiempo, así:

$$\phi = \phi_{máx.} \cdot \text{Sen } wt$$

$w = 2 \cdot \pi \cdot f$ (f es la frecuencia)

t, es el tiempo

Con ésto, el voltaje inducido en la bobina primaria, que tiene Z_1 espiras es $-E_1$. La cual se debe al flujo variable, y, en cualquier instante, en valor absoluto vale:

$$E_1 = Z_1 \cdot (d\phi/dt) \cdot 10^{-8} \quad \text{(voltios)}$$

reemplazando el valor de ϕ, y, diferenciando, se tiene:

$$E_1 = Z_1 \cdot w \cdot \phi_{máx} \cdot (\text{Cos } wt) \cdot 10^{-8}$$

$\text{Cos } wt = \text{Cos } (2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$

El valor eficaz del voltaje inducido en el primario, en valor absoluto es:

(1) $E_1/\sqrt{2} = (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \phi_{máx} \cdot Z_1 \cdot 10^{-8})/\sqrt{2} = 4{,}44 \cdot f \cdot Z_1 \cdot \phi_{máx} \cdot 10^{-8}$ vol.

De igual manera, el valor eficaz del voltaje inducido en la bobina secundaria, está dado por:

(2) $$E_2 = 4{,}44 \cdot f \cdot Z_2 \cdot \phi máx \cdot 10^{-8} \quad \text{(voltios)}$$

Como el flujo se admitió sinusoidal, tambien las tensiones deben ser sinusoidales, sólo que retrasadas 90° eléctricos con respecto al flujo. Con lo cual, las tensiones vienen a ser cosenoidales.

Si se divide miembro a miembro las ecuaciones (1) y (2), se tiene:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Esta proporción demuestra que, para el transformador en carga a vacío, las fuerzas electromotrices son directamente proporcionales a los números de espiras de los respectivos devanados.

La corriente de magnetización y la corriente de vacío (Plano No. 20 b):

Para un transformador, la corriente de vacío (I_o), no coincide con la horizontal y no es igual a la corriente de magnetización I_m, ésto se debe a las pérdidas por "histéresis y de Foucault".

La pérdida por histéresis está representada por la corriente necesaria para magnetizar al núcleo de hierro.

La pérdida de Foucault es aquella producida por las corrientes que circulan por el hierro mismo. Tambien se las llama corrientes parásitas.

Como ya se mencionó, el flujo no es exactamente una sinusoide, no obstante, se lo admite como tal a fin de representarlo por un vector. Se lo dibuja

en sentido vertical (Plano No. 20 b), y, a base de éste se dibuja el vector I_o (corriente de vacío o de excitación), en su valor eficaz, el cual resulta adelantado con respecto al flujo ϕ

La corriente de magnetización está en fase con el flujo ϕ, mientras que las corriente correspondientes a las pérdidas, tanto por histéresis, como de Foucault, (I_h e I_F respectivamente), están en fase con $-E_1$. La componente total de las pérdidas vale:

$$\dot{I}_f = \dot{I}_h + \dot{I}_F$$

Así mismo, la corriente de vacío vale:

$$\dot{I}_o = \dot{I}_m + \dot{I}_f$$

Las pérdidas en el hierro son: $V_1 \cdot I_f = V_1 \cdot I_o \cdot \text{Cos}$

En el plano 20 b, la parte correspondiente a la suma vectorial de las corrientes I_m e I_f, se la puede hacer, midiendo con amperímetro, voltímetro y watímetro. La energía que entra (que consume) en el transformador, en marcha a vacío, se mide manteniendo los bornes secundarios abiertos. Además, se debe tomar en cuenta que el watímetro mide simultáneamente, tambien las pérdidas Joule de la bobina primaria. Pero, en vista de que la corriente de vacío es una fracción muy pequeña de la corriente nominal, en la práctica, a las pérdidas Joule en marcha a vacío, se las desprecia.

Las pérdidas Joule se calculan multiplicando "la resistencia óhmica pura con el cuadrado de la corriente", así:

Pérdidas Joule en la bobina primaria, valen: $I_1^2 \cdot R_1$

" " " " " secundaria " $I_2^2 \cdot R_2$

" " " " " primaria, con corriente de vacío: $I_o^2 \cdot R_1$

Se debe indicar que la componente I_m (corriente de magnetización), que resulta de la medida con los instrumentos, es siempre un poco mayor que el valor obtenido por el cálculo. Esta diferencia existe porque la mayoría de los transformadores tienen núcleos formados por algunas partes. En las uniones de éstas, no se pueden eliminar por completo los pequeños espacios de aire, los cuales ofrecen mayor reluctancia (que las otras partes del núcleo compuestas por hierro homogéneo).

Funcionamiento a plena carga, cuyo factor de potencia vale la unidad:
Sin tomar en cuanta la dispersión.
Cuando el transformador se carga, conforme aumenta la carga en los bornes del secundario, el primario, toma de la red, el correspondiente aumento de corriente.
Para calcular un transformador, es importante previamente, conocer todas las magnitudes del transformador cargado, y, de manera absolutamente exacta. Esto proporciona, en mejor forma, el diagrama de vectores, inventado por el sabio inglés Guisbert Kapp, que lleva su nombre. Se ha consultado en el "Tratado de transformadores" por el Ing. Max Forter, editado en la Escuela Politécnica Nacional, 1936.
El Plano No. 20 a, muestra que el flujo máximo $I_o \cdot Z_1$ puede descomponerse en los flujos componentes $I_1 \cdot Z_1$ e $I_2 \cdot Z_2$.
Si se divide los tres vectores por Z_1, queda un nuevo diagrama que lo representa el plano No. 20 b.
La corriente de vacío que se mide en el amperímetro I_o, con los bornes secundarios abiertos, es la resultante geométrica de restar:

la corriente que circula por la bobina secundaria, multiplicada por la relación Z_2/Z_1 de la

corriente que circula por la bobina primaria.

En el Plano No. 20 b, constan las fuerzas electromotrices con sus retrasos respecto del flujo. V_1, es la suma vectorial de $-E_1$ con la caída de tensión en la bobina primaria

φ , es el ángulo de desfasamiento entre la tensión de bornes V_1 y la corriente de la bobina primaria I_1;

$E_1 = E_2 \cdot (Z_1/Z_2)$, es la fuerza electromotríz del primario

La potencia entrante es: $W_e = V \cdot I \cdot \cos \varphi = E_2 \cdot I_2 + I_1^2 \cdot R_1 + E_2 \cdot I_f$

En la igualdad, $E_2 \cdot I_2$ contiene:

La potencia utilizable que se obtiene de los bornes secundarios, y
Las pérdidas Joule, en el secundario $(Z_1/Z_2) \cdot I_2 \cdot R_2$

En cambio, la potencia entrante, cubre:

Las pérdidas Joule en el Primario y en el Secundario;

Las pérdidas en el hierro; y

La potencia utilizable.

Además: $E_2 \cdot (Z_1/Z_2) = I_2 \cdot R_2 \cdot (Z_1/Z_2) + V_2 \cdot (Z_1/Z_2)$

Esta, es realmente una suma geométrica, pero el plano No. 20 b, muestra como una suma algébrica solamente, pues se ha dicho que el coseno del ángulo de carga es igual a la unidad (carga resistiva pura).

Finalmente, la tensión de bornes secundarios vale:

$V_2 \cdot (Z_1/Z_2)$; y la potencia utilizable vale:

$V_2 \cdot (Z_1/Z_2) \cdot I_2 \cdot (Z_2/Z_1) = I_2 \cdot V_2$

El rendimiento η, vale:

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2}{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi}$$

Funcionamiento del transformador con carga, cuyo coseno del ángulo de la carga, sea diferente de cero, diagrama de Kapp:

Sin tomar en cuanta la dispersión.

φ_2, Es el desfasamiento entre la tensión de bornes secundarios V_2 y la corriente secundaria I_2.

El Plano No. 20 b corresponde a un transformador cargado, cuyo factor de potencia (de la carga) es igual a la unidad. El vector I_2 está en fase con la tensión secundaria; y, E_2 representa la suma algébrica de V_2 con $I_2 \cdot R_2$ referidos al primario, o sea multiplicados por la relación Z_1/Z_2.

En cambio, en el plano 21 a, no sólo se considera la caída óhmica en el primario, sino tambien aquella del secundario, cuyo valor es $I_2 \cdot R_2$, que referido al primario vale: $I_2 \cdot R_2 \cdot (Z1/Z2)$, se representa por OL, en fase con I_2

I_2, es la corriente del secundario, y

R_2, es la resistencia óhmica del mismo arrollamiento secundario.

El plano No. 21 a, no cambia, en cuanto a la parte derecha (primario) del plano No. 20 b. Pero, en el secundario, parte izquierda, aparecen los nuevos valores : OL, LE, LM, EM, los cuales representan:

$OL = I_2 \cdot R_2 \cdot (Z_1/Z_2)$ = la caída ómica secundaria;

$LE = V_2 \cdot (Z_1/Z_2)$ = la tensión secundaria de bornes;

$LM = I_2 \cdot R_{ext.} \cdot (Z_1/Z_2)$ = componente óhmica del circuito exterior

$EM = I_2 \cdot w \cdot L_{ext} \cdot (Z_1/Z_2)$ = componente inductiva del circuito exterior

$w = 2 \cdot \pi \cdot f$)

El ángulo de desfasamiento de la carga vale $\vartheta_2 = \text{arc tg} \frac{L_{ext}}{R_{ext}}$

De las corrientes se conocen los siguientes valores vectoriales:

$$OC = I_2 \cdot (Z_2/Z_1)$$

$$OA = I_o = I_1 - I_2$$

$$OD = I_1 = I_o + I_2 \cdot (Z_2/Z_1)$$

En la práctica, I_o es mucho menor que las corrientes primaria y secundaria (individualmente), por lo cual, se desprecia el valor de la corriente de vacío I_o, y, se dibujan I_1 e I_2 en la misma dirección, con sentidos opuestos, así se procede en el plano No. 21 b, el cual muestra unicamente la parte correspondiente al secundario, y, OC del primario. Este es el llamado "diagrama simplificado".

OG, es la proyección en verdadera magnitud, de $I_1 \cdot R_1$ (E'H) sobre OD

Finalmente, $GL = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 \cdot (Z_1/Z_2)$, pues GL = OG + OL

Sumando geométricamente GL con LE, se obtiene $GE = V_1$ que representa la tensión necesaria en bornes primarios, a fin de tener constante el valor de la tensión en bornes secundarios, LE.

El triángulo GME está formado, a su vez, por el triángulo GLE, que corresponde al circuito interior, y, por el triángulo LME, que corresponde al circuito exterior.

También en lo que sigue, todos los elementos son vectores y las igualdades son geométricas.

En el triángulo GLE:

$$GL = OG + OL = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 \cdot (Z_1/Z_2)$$

pero $I_2 = I_1 \cdot (Z_1/Z_2)$, reemplazando este valor en la ecuación anterior se tiene:

$$GL = I_1 \cdot (R_1 + R_2 \cdot (Z_1/Z_2)^2)$$

La última ecuación demuestra que la resistencia óhmica pura del transformador vale $R_1 + R_2 \cdot (Z_1/Z_2)^2$, la cual, se supone, está recorrida por la corriente primaria I_1

LE = $V_2 \cdot (Z_1/Z_2)$, es el lado común de los dos triángulos mencionados, representa la tensión de bornes secundarios.

GE = V_1 = GL + LE, representa la tensión necesaria de bornes primarios para tener fija la tensión de bornes secundarios.

Considerando ahora el triángulo LME:

LE = LM + ME

LE, es el lado común de los dos triángulos, ya se indicó su valor;

LM = $V_2 \cdot (Z_1/Z_2) \cdot \text{Cos}\,\varphi_2 = I_2 \cdot R_{ext} \cdot (Z_1/Z_2)$

ME = $V_2 \cdot (Z_1/Z_2) \cdot \text{Sen}\,\varphi_2 = I_2 \cdot w \cdot L_{ext} \cdot (Z_1/Z_2)$

El diagrama tiene utilidad para determinar la caída de tensión entre la marcha a vacío y la marcha a plena carga. Caída de tensión, que, juntamente con la tensión de bornes secundarios, determinan el valor de la tensión de bornes primarios (indispensable para tener constante la tensión de bornes secundarios), para la carga y desfasamiento secundarios.

El transformador considerando la dispersión, diagrama de Kapp:

Este fenómeno se debe a que no todas las líneas magnéticas producidas por las espiras siguen su camino a traves del núcleo de hierro. Sino que, algunas de éstas se cierran por el aire. Se denominan "líneas de dispersión" (plano No. 22 a).

ϕ_{d_1} y ϕ_{d_2} son las líneas que abandonan el núcleo de hierro y atraviesan el aire (flujos de dispersión). El número de líneas de dispersión, va en proporción directa con la corriente que circula por las espiras, o bien, están en "razón directa con los amperio-vueltas".

Estos flujos de dispersión, engendran las llamadas "tensiones de dispersión", y, como cada flujo actúa en fase con la corriente que lo produce, las tensiones de dispersión son retrasadas 90° eléctricos, con respecto a las corrientes respectivas.

Se calcula el valor instantáneo de las tensiones de dispersión e_{d_1}, con la siguiente fórmula:

$e_{d_1} = (d\phi_d/dt) \cdot Z \cdot 10^{-8}$ voltios = $L \cdot (di/dt)$. El valor eficaz es:

$E_d = I \cdot w \cdot L$ voltios

L, es el coeficiente de autoinducción del arrollamiento

Con lo anterior se llega a la conclusión de que la tensión de bornes primarios V_1 tiene que vencer: además de la fuerza electromotríz y la caída óhmica, a la tensión de dispersión, o sea:

$$V_1 = E_1 + I_1 \cdot R_1 + E_{d_1}$$

Para construír el plano No. 22 b, se procede de la misma manera que para los anteriores:

a) El flujo $\emptyset$, se dibuja en la vertical (ordenadas)

b) Las corrientes primaria y secundaria, en la misma dirección, pero con sentidos opuestos. Se supone, como ya se mencionó, que I_o es despreciable, y, no consta en este plano.

La dirección de las corrientes viene determinada por la relación entre la inductancia del circuito exterior L_{ext} y la resistencia óhmica del mismo circuito exterior R_{ext}.

a) Las fuerzas electromotrices coinciden con la horizontal. E_{d_2}, que se produce en el arrollamiento secundario, está retrasada 90° respecto a la corriente I_2, y, para que la fuerza electromotríz E_2, pueda vencer a esta tensión E_{d_2}, se necesita que esté adelantada 90° de I_2. O sea q' E_{d_2} debe girarse 180°, lo cual se consigue poniendo su opuesto $(-E_{d_2})$.

En el plano 22 b, se representa por ON y vale:

a) $ON = -E_{d_2} \cdot (Z_1/Z_2) = I_2 \cdot w \cdot L_2 \cdot (Z_1/Z_2)$

$= I_1 \cdot w \cdot L_2 \cdot (Z_1/Z_2)^2$

b) OL, representa la caída óhmica secundaria, está en fase con la corriente secundaria

$OL = I_2 \cdot R_2 \cdot (Z_1/Z_2) = I_1 \cdot R_2 \cdot (Z_1/Z_2)^2$

$ON + OL = OR$

c) $RE = OE - OR$, representa la tensión de bornes secundarios

$RE = V_2 \cdot (Z_1/Z_2)$

$OE = RE + OR$ representa la fuerza electromotríz E_2. Esta debe vencer a la tensión de bornes secundarios y a la caída de tensión OR (suma geométrica de la caída de tensión por dispersión $-E_{d_2}$ con la caída óhmica pura OL).

En cambio, la tensión de bornes primarios V_1, tiene que vencer:

La componente $-E_{d_1}$ (opuesto de la caída de tensión en el primario, por dispersión), representado por el vector OP, adelantado y formando ángulo recto con I_1;

d) $OP = -E_{d_1} = I_1 \cdot w \cdot L_1$

La caída óhmica primaria está en fase con I_1, vale $OG = I_1 \cdot R_1$

La resultante OQ es la suma geométrica de la tensión de dispersión OP con la caída óhmica OG, que debe ser vencida por la tensión de bornes primarios.

Si a partir del punto E', se traza una paralela a OQ, y de igual valor, se obtiene el puntos H.

OH, es la tensión de bornes primarios, valor al que se deseaba llegar.

El plano 22 b puede simplificarse, resultando el plano No. 22 c, del siguiente modo:

Si se prolonga QG, por el lado de G, y si a partir de los puntos R y E se trazan perpendiculares hasta cortar a la línea prolongada, se obtienen los puntos U y S. Queda entonces formado el triángulo QSE, que el llamado "triángulo de las tensiones de un transformador".

El Plano No. 22 c, representa:

$QE = OH = V_1$ (por construcción)

$I_1 \cdot Z_k + V_2 \cdot (Z_1/Z_2) = QR + RE$

$QR = QU + RU$

$QU = E_{d_1} + E_{d_2} \cdot (Z_1/Z_2) = I_1 \cdot w \cdot L_1 + I_2 \cdot w \cdot L_2 \cdot (Z_1/Z_2)$

$= I_1 \cdot w \cdot L_1 + L_2 \cdot w \cdot I_1 \cdot (Z_1/Z_2)^2$

$= w \cdot I_1 \cdot (L_1 + L_2 \cdot (Z_1/Z_2)^2) = w \cdot I_1 \cdot L_k$

QU, es la suma de las tensiones de dispersión;

$RU = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 \cdot (Z_1/Z_2)$

$= I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot R_2 \cdot (Z_1/Z_2)^2$

$= I_1 \cdot (R_1 + R_2 \cdot (Z_1/Z_2)^2) = I_1 \cdot R_k$

= a la suma de las caída óhmicas:

$QR = (QU^2 + RU^2)^{\frac{1}{2}} = (I_1^2 \cdot R_k^2 + I_1^2 \cdot w^2 \cdot L_k^2)^{\frac{1}{2}} = I_1 \cdot (R_k^2 + w^2 \cdot L_k^2)^{\frac{1}{2}}$

QR, es la caída total de la tensión en el transformador;

RE, es la tensión de bornes secundarios, $V_2 \cdot (Z_1/Z_2)$

TE, es la componente óhmica pura del circuito exterior;

TR, es la componente inductiva del mismo circuito exterior
La caída de tensión, expresada en porcentajes, cuando el transformador está cargado vale:

$$I \cdot Z_k = 100 \frac{QE-RE}{QE}$$

Tensión y corriente de cortocircuito:

Al cortocircuitar los bornes secundarios, la tensión secundaria se reduce a cero, cerrados los bornes secundarios, a traves de un amperímetro, se aplica una tensión en bornes primarios, y, se la vá aumentando paulatinamente, hasta que el amperímetro instalados en el circuito primario acuse la corriente nominal I_1. El valor de la tensión aplicada, a la cual, el amperímetro acusa la corriente nominal I_1, es la "tensión de cortocircuito", e_c.
Trasladando ésto al plano No. 22 c, se vé que $RE = V_2 \cdot (Z_1/Z_2) =$ cero
Quedando solamente el triángulo QUR, en el cual $I_1 \cdot Z_k$, es la tensión de cortocircuito.
Así mismo la corriente de cortocircuito I_c, es aquella que circularía por el secundario si al primario se le aplicaría la tensión nominal, manteniendo, eso sí, los bornes secundarios cortocircuitados. Resulta la relación:

$$\frac{V_1}{e_c} = \frac{I_c}{I_1}$$

En esta relación, se vé que la tensión de cortocircuito e_c es inversamente proporcional a la corriente de cortocircuito I_c. Por esta razón, se debe procurar que e_c sea grande, hasta un 12 % , con lo cual, rebaja I_c.
En la última relación: V_1, es la tensión de bornes primarios;
I_1, es la corriente primaria.
La tensión de cortocircuito sirve:

a) para calcular la corriente de cortocircuito;
b) para determinar la caída de tensión sin necesidad de medir el coeficiente de auto-inducción;
c) para poner en paralelo con otros transformadores, pues, si éstos tienen diferente e_c se forman las llamadas corriente circulantes (entre los transformadores en paralelo).

Si e_c se mide mediante un voltímetro y un amperímetro, se puede observar

que el watímetro acusa un número de watios un poco mayor a aquel que se obtiene del cálculo. Esto se debe a las pérdidas suplementarias que se ocasionan: éstas son las de Foucault que se deben a las líneas magnéticas de dispersión de la armadura del núcleo, pernos, tuercas, placas de fijación, etc., y, por efecto Skin, son producto de que la corriente tiende a circular por la parte exterior del conductor (en la parte interior, hay más reactancia).

Por estas razones se acostumbra utilizar el valor acusado por el watímetro, con la finalidad de obtener el valor real de R_k que vale:

$$R_k = R_1 + R_2 \cdot (Z_1/Z_2)^2$$

Cálculo del transformador específico para el presente caso: 70 KVA.

Se utiliza el "Tratado de Transformadores" por Max Forter y el libro VII de la Escuela del Técnico Electricista:

Nuestro transformador va a ser refrigerado en aceite, en cuyo caso, según el diagrama c de la página 212 (de Max Forter): plano Nº 23

en la curva (d) se lee las pérdidas en el hierro 0,6 % hasta para una relación de transformación de 5000/230 voltios;

en la curva (a) se lee las pérdidas en el cobre 2,3 %

Nuestro transformador será de conexión triángulo-estrella. Esta permite un desequilibrio de cargas secundarias, el cual se neutraliza magnéticamente en las tres fases, sin dar lugar a sobrexcitación por corriente no compensada en ninguna de ellas. Esto porque los amperios vueltas de la carga pueden compensarse inmediatamente por medio de los amperios vueltas contrarios del triángulo (primario).

Se deduce pues, que la conexión triángulo-estrella es plenamente capaz de cargarse en el punto neutro. He ahí la ventaja de esta conexión para alimentar redes de distribución con 4 hilos.

Por otro lado, la red secundaria recibe una fácil protección al poner a tierra el centro de la estrella.

La figura del plano No. 25 b, se refiere a la carga entre fase y neutro. Vale para todos los tipos de circuitos magnéticos. Indica numéricamente las intensidades relativas aproximadas, con una relación de transforma-

ción 1:1, de las tensiones compuestas.

La relación de las pérdidas del cobre (P_{CU}), a las pérdidas del hierro (P_{Fe}), se la llama R y vale:

$$R = (2,3 \cdot 70)/(0,6 \cdot 70) = 3,83$$

La densidad de corriente, según el diagrama e (Pano No. 23), página 213 de Max Forter, es de 2,48 Amp/mm^2

Las pérdidas específicas en el cobre y en el hierro, P'_{Cu} y P'_{Fe}, respectivamente, se calculan de la siguiente manera:

$$P'_{Cu} = 2,7 \cdot \sigma^2 = 2,7 \cdot 2,48^2 = 16,5 \text{ watios/kg}_{Cu}$$

Si el núcleo del transformador es de láminas de hierro al silicio, de 0,35 mm de espesor, cuya cifra específica de pérdidas para una densidad de flujo de 10000 gaus (B), es 1,3 watios/kg_{Fe}.

Por concepto de pérdidas suplementarias en la armadura, se añade el 15 %, o sea:

$$P'_{Fe} = 1,3 \cdot 1,15 = 1,5 \text{ watios/kg}_{Fe}$$

La sección activa del nécleo de hierro, S_{Fe}, expresada en cm^2, se calcula con la siguiente fórmula de Max Forter:

$$(1) \qquad S_{Fe} = C \cdot \sqrt{\frac{N_S \cdot (P'_{Cu}/P'_{Fe}) \cdot 10^5}{f \cdot R \cdot B \cdot \sigma}}$$

El factor C para transformador trifásico, vale 40 (pág. 213 de Max Forter)

N_S, es la potencia, en KVA (70)

f, es la frecuencia, en ciclos por segundo (60)

R, es la relación de las pérdidas totales en el cobre, a las del hierro

B, es la densidad de flujo en gaus (10000)

σ, es la densidad de corriente en amperios por milímetro cuadrado (2,48)

Reemplazando estos valores en la fórmula (1) se obtiene que

$$S_{Fe} = 164 \text{ cm}^2$$

Al tomar en cuenta el aislamiento de las láminas, la sección activa S_{Fe} resulta : $164/0,9 = 182 \text{ cm}^2$

De ésto se desprende que el flujo $\phi = 164 \cdot 10000 = 1,64 \cdot 10^6$ maxwel.

La tensión primaria es de 2200 voltios, y la secundaria, de 220 voltios

El número de espiras del primario vale:

$$Z_{1f} = (E_1 \cdot 10^8)/(1,73 \cdot 4,44 \cdot 60 \cdot 1,64 \cdot 10^6)$$

$$= 290 \text{ espiras por fase}$$

Esta fórmula se demostró anteriormente.

Así mismo, el número de espiras del secundario vale Z_2 = 29 espiras por fase.

Las corrientes primaria y secundaria (I_1 e I_2) son:

I_1 = 70000/(1,73 . 2200) = 18,4 amperios

I_2 = 70000/(1,73 . 220) = 184 amperios

Las secciones transversales de los conductores:

$S_{1_{Cu}}$ = 18,4 Amp/(2,48 Amp/mm^2) = 7,4 mm^2

$S_{2_{Cu}}$ = 184 Amp/(2,48 Amp/mm^2) = 74 mm^2

Por cuánto estas secciones no son standard, se utilizan medidas standard inglesas: así,

8,55 mm^2 en vez de 7,4 mm^2; y

2 por 38,48 mm^2 en vez de 74,0 mm^2

que corresponden al No. 10 SWG y a 2 Nos. 2 SWG respectivamente.

Las bobinas de nuestro transformador serán en forma de un cilindro (tubo) Situándose a las de baja tensión junto al núcleo. Las de alta rodearán a las de baja . Las bobinas estarán debidamente aisladas, tanto entre sí como entre bobina y hierro.

Además, las bobinas se dispondrán, en nuestro núcleo de hierro, no acorazado, de tal manera que cada columna del núcleo lleve a las dos columnas de bobinas parciales B_1 y B_2 (Plano No. 25 b)

Estas bobinas parciales serán confeccionadas de modo que consten de las dos ramas: situándo a la rama a en el interior de la bobina y a la b en el exterior de la misma. En la otra columna de bobinas parciales se invertirán (b, en el interior y a, en el exterior de la bobina).

Esta conexión de los dos grupos en paralelo se efectúa con la finalidad de equilibrar las tensiones de dispersión engendradas en las espiras del arrollamiento. De no hacer ésto, las bobinas tendrían distintas caídas de tensión por dispersión por las distintas posiciones que ocuparía con respecto al núcleo de hierro.

Dimensionamiento del núcleo de hierro:

Se usará núcleo no acorazado (de columnas), pues, por la estrecha inter-

conexión magnética que existe entre las fases: el flujo de cada columna, debiendo cerrarse forzosamente por las otras dos, tiende a reestablecer, por vía magnética, los desequilibrios que introducen, a veces, las condiciones eléctricas de las distintas fases.

La ventana:

Sean A los amperios vueltas por centímetro de altura.
Toda la altura H (en centímetros), Plano No. 25 a, está en condiciones de llevar A . H amperios vueltas. Se calcula del siguiente modo:

$$A \cdot H = I_1 \cdot Z_{1f} + I_2 \cdot Z_{2f}$$

Pero como, amperios vueltas primarios = amperios vueltas secundarios, se obtiene:

$$A \cdot H = 2 \cdot I_1 \cdot Z_{1f} \quad y \quad H = 2 \cdot I_1 \cdot Z_{1f}/A$$

El valor de A se obtiene del diagrama g (plano No. 24). Para nuestro caso, resulta $A = 380$

$H = 2 \cdot 18{,}4 \cdot 290/380 = 28{,}2$ cm , se puede decir:

$H = 29$ cm

La otra dimensión de la ventana B_f, según la siguiente fórmula, será:

(2) $$B_f \cdot H \cdot f_k \cdot 100 = (Z_{1f} \cdot S_{1_{Cu}} + Z_{2f} \cdot S_{2_{Cu}}) \cdot 2$$

Se desconoce f_k, que es la relación entre el espacio necesario para los arrollamientos que se encuentran en la ventana y la superficie de la misma. Así por ej., si los arrolamientos llenan toda la ventana, $f_k = 1$
Del diagrama h (plano No. 24) (para 70 KVA y 3000 voltios), se vé que f_k, para nuestro caso vale 28 % = 0,28
Por otra parte $Z_{1f} \cdot S_{1_{Cu}} = Z_{2f} \cdot S_{2_{Cu}}$, resulta:

(2) $$B_f = (4 \cdot Z_{1f} \cdot S_{1_{Cu}})/(H \cdot f_k \cdot 100)$$

reemplazando valores, se obtiene que

$B_f = 10$ centímetros.

El peso del núcleo, con la siguiente fórmula (de Max Forter):

$$G_{Fe} = \gamma_{Fe} \cdot S_{Fe} \cdot (3 \cdot H + 4 \cdot B_f + 6 \cdot b_k) \cdot 10^{-3} \text{ kg.}$$

b_k, es el lado de la sección transversal activa del núcleo. Al procurar que ésta sea lo más cercana a un cuadrado, se puede asumir que

b_k sea 13 centímetros (ancho de una lámina). Por lo tanto, el espesor resulta de $(182\ cm^2)/13\ cm = 14\ cm$.

$$G_{Fe} = 7{,}8 \cdot 182 \cdot (3 \cdot 29 + 4 \cdot 10 + 6 \cdot 13) \cdot 10^{-3}\ kg$$
$$= 304\ kg$$

Para calcular el peso del cobre, previamente se debe conocer la longitud media de una espira, para lo cual se utiliza la siguiente fórmula de Max Forter (4)

(4) $L_{med.\ esp.} = 3{,}14 \cdot (b_k + B_p/2) = 3{,}14 \cdot (10/2 + 13) = 56{,}5\ cm$

(5) $G_{Cu} = 3 \cdot \gamma_{Cu} \cdot 2 \cdot Z_{lf} \cdot S_{l_{Cu}} \cdot L_{med.\ esp.} \cdot 10^{-5}\ kg$

reemplazando valores resulta que

$G_{Cu} = 60\ kg$

γ_{Cu}, es el peso específico del cobre ($8{,}9\ gr/cm^3$)

Comprobación de los valores adoptados según los diagramas, tanto para las pérdidas en el cobre, como para las del hierro:

Según los diagramas: en cobre, $2{,}3 \cdot 70000/100 = 1610$ Volt-amper.
en hierro, $0{,}6 \cdot 70000/100 = 420$ volt-amperios.

Según los pesos: en cobre, $16{,}5 \cdot 60 = 990$ voltio-amperios.
en hierro, $1{,}5\ watt/kg_{Fe} \cdot 304\ kg = 456$ vol-amp.

El rendimiento η, vale:

$$\eta = \frac{70000 - (990 + 456)}{70000} = 0{,}98 = 98\ \%$$

A este rendimiento hay qué descontar tambien la pérdida de potencia que proviene de la altura sobre el nivel del mar. Según la AEG, se pierde el 4 % aproximadamente, por cada 1000 metros de altura sobre el nivel del mar. En nuestro caso (después de los primeros 1000 m.) se perderá, por este concepto, el 8 %. Finalmente, el rendimiento de nuestro transformador a plena carga será del 90 %.

Estudio de la refrigeración:

Tiene por objeto eliminar del transformador la energía calórica, en la cual se transforman las pérdidas de potencia.

Para esta eliminación existen varios métodos. Para nuestro caso, más adecuado es el llamado de autorrefrigeración por termosifón (autorrefrigeración por aceite).

La potencia y tensión de nuestro transformador, no requieren de un sistema de refrigeración más complidado y costoso.

La autorrefrigeración por aceite, consiste: en que tanto el núcleo como los arrollamientos deben estar sumergidos en el aceite, el mismo que, debe tambien, ser aislante. Este, circula por convección natural dentro del tanque, que debe tener paredes corrugadas con tubos que formen parte del propio tanque.

Los tubos permiten reducir la superficie de radiación. De no haber éstos, la superficie de radiación tendría que ser demasiado grande para la potencia de 70 KVA.

Finalmente, nuestro transformador tiene todas las características de uno de distribución, por lo cual se puede catalogarlo como tal.

Sus características son:

Conexión Triángulo-estrella;

frecuencia, 60 ciclos por segundo ;

refrigeración, clase OA;

trabajará a la intemperie (3050 m. sobre el nivel del mar);

Alta tensión, 2200 voltios;

Baja tensión, 220 voltios;

Potencia, 70 KVA.

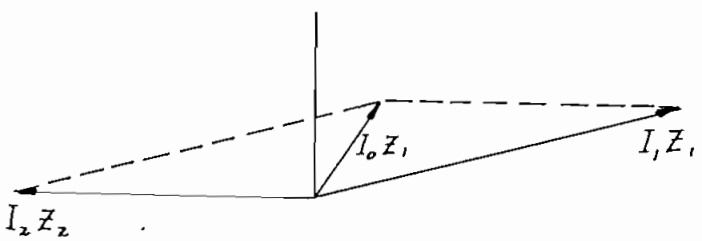
El estudio de la refrigeración se ha hecho a base del manual del Montador Electricista, Editorial Reverté, Barcelona, 1949, página 40, juntamente con los apuntes de Electrotecnia de 4o. Año (1957-1958).

PLANO No. 20

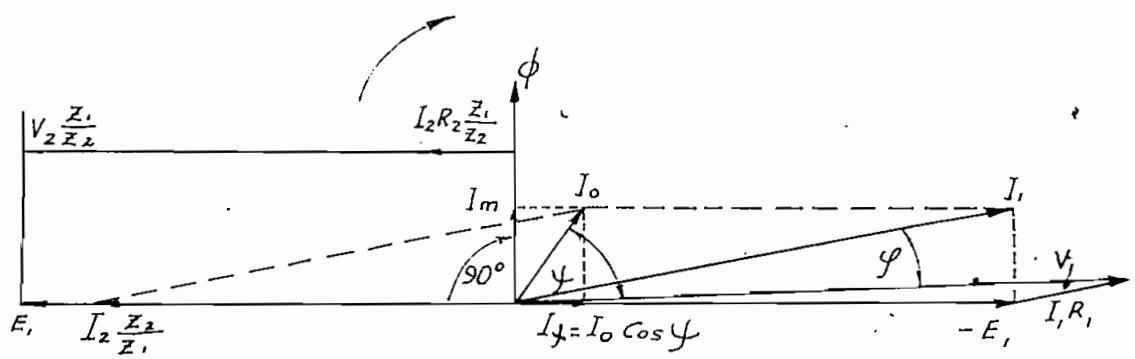
Diagrama del transformador con carga resistiva pura

(a) Muestra el flujo máximo $I_o.Z_1$

(b) Muestra los valores del secundario, referidos a los del primario, suponiendo que la relación de transformación sea la unidad. No se toma en cuenta la dispersión.



(a)



$E_1 = E_2 \frac{Z_1}{Z_2}$

E_1 = vector de referencia

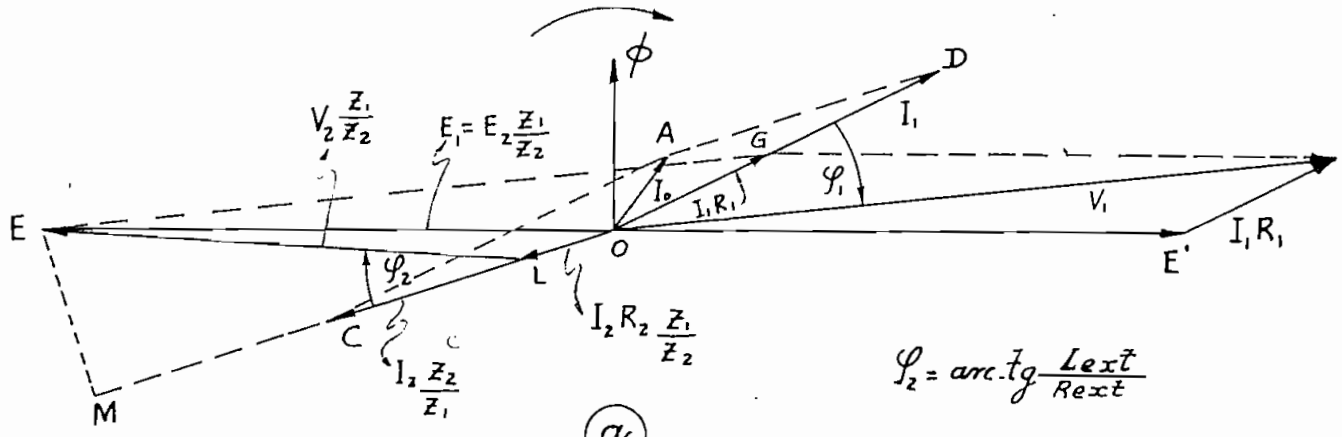
(b)

PLANO No, 21

Diagrama del transformador, con carga resistiva pura, sin tomar en cuenta la dispersión

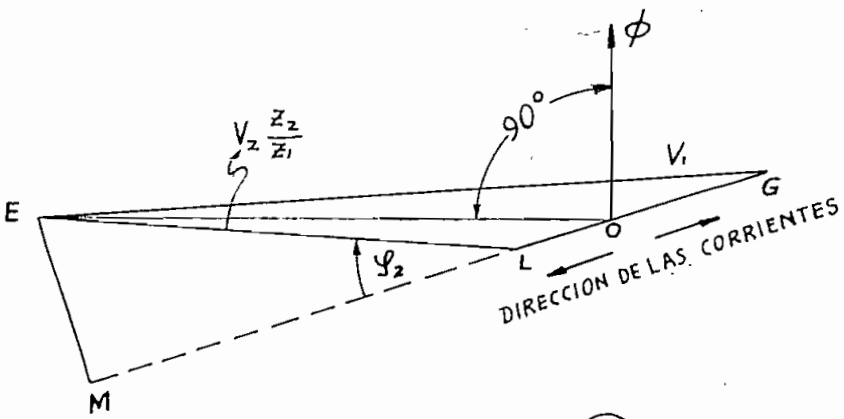
(a) Hace constar la corriente de excitación I_o

(b) No hace constar la corriente de excitación I_o, es el llamado "diagrama simplificado"



(a)

OE = vector de referencia



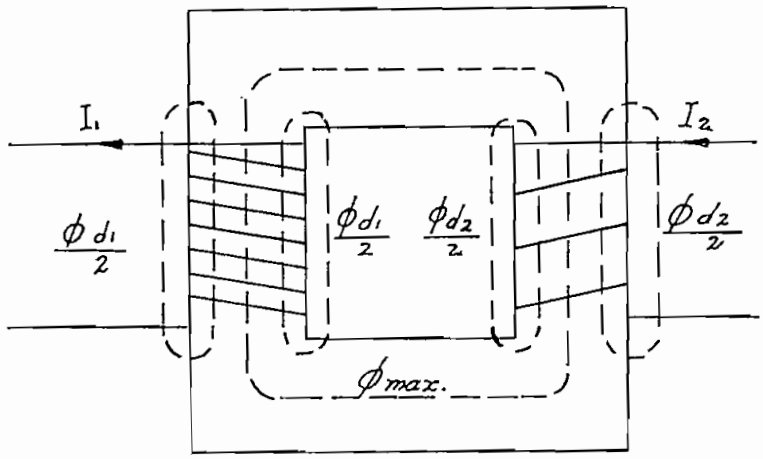
(b)

PLANO No. 22

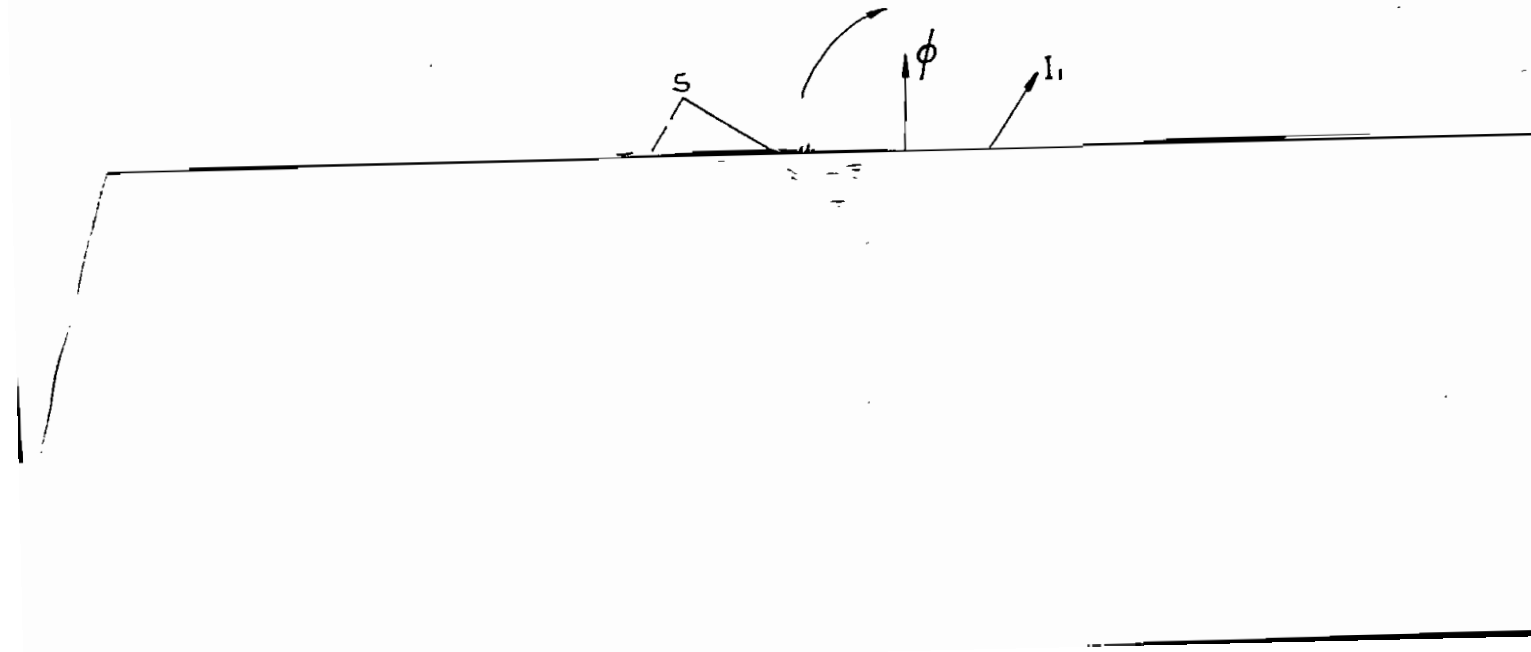
(a) Esquema de los flujos de dispersión

(b) Diagrama del transformador tomando en cuenta las pérdidas por dispersión

(c) Diagrama (b) simplificado, Muestra ampliado el triángulo QSE



(a)



PLANO No. 23

Las curvas del diagrama c representan:

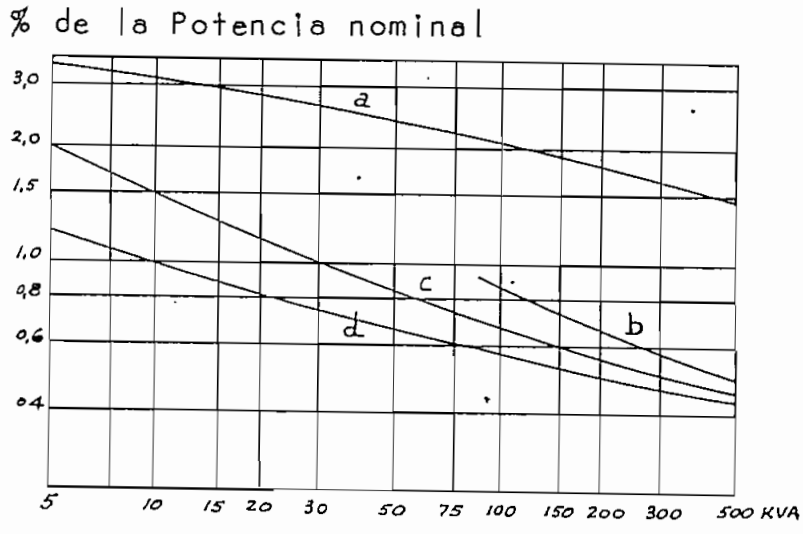
a: Pérdidas en el cobre para Transf. Trifásicos

b: " " " hierro " E_1/E_2 = 22000/3150 V.

c: " " " " " " = 20000/230 V.

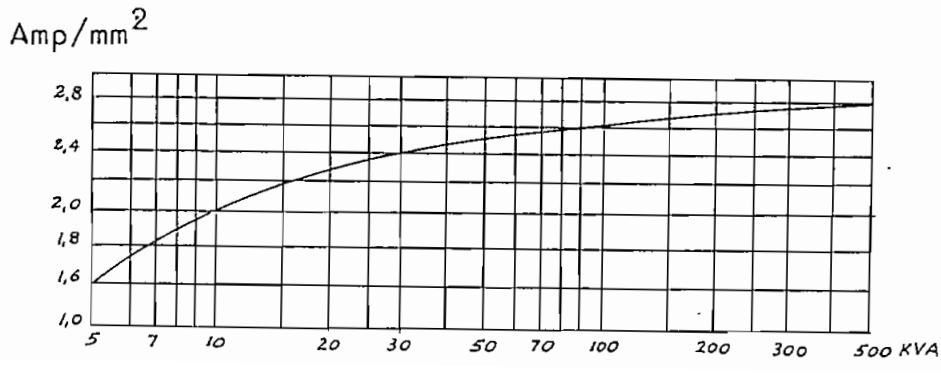
d: " " " " " " = 5000/230 V.

Diagrama c)



La curva del diagrama e sirve para determinar la densidad de corriente, para transformadores trifásicos, en recipientes con aceite autorefrigerados

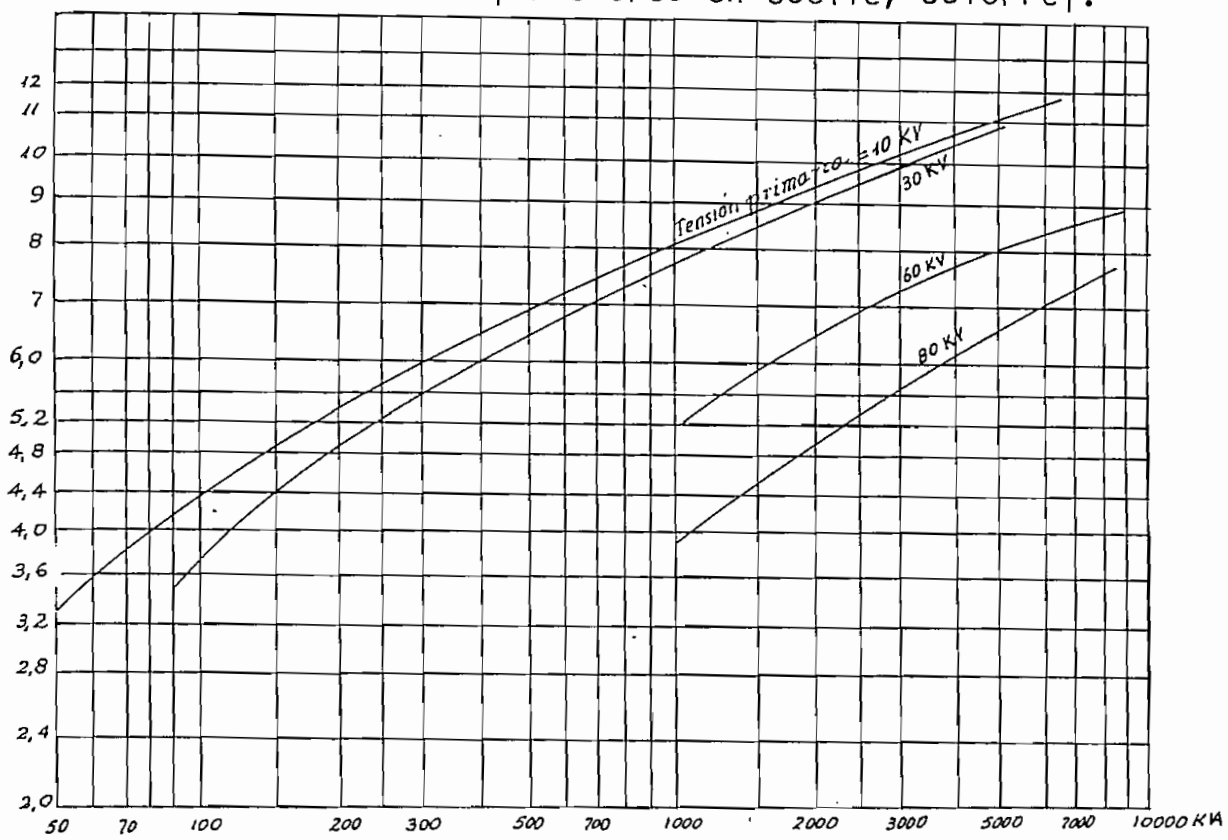
Diagrama e)



PLANO No. 24

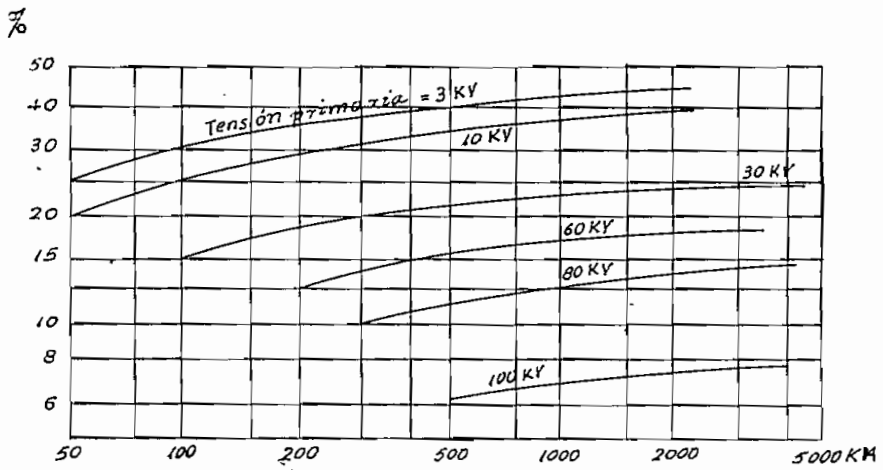
El diagrama g sirve para determinar el número de amperio-vueltas por centímetro de montante, para transformadores en aceite, autorref.

Diag. g



El diagrama h sirve para determinar el factor f_k de la ventana para transformadores en aceite, autorrefrigerados

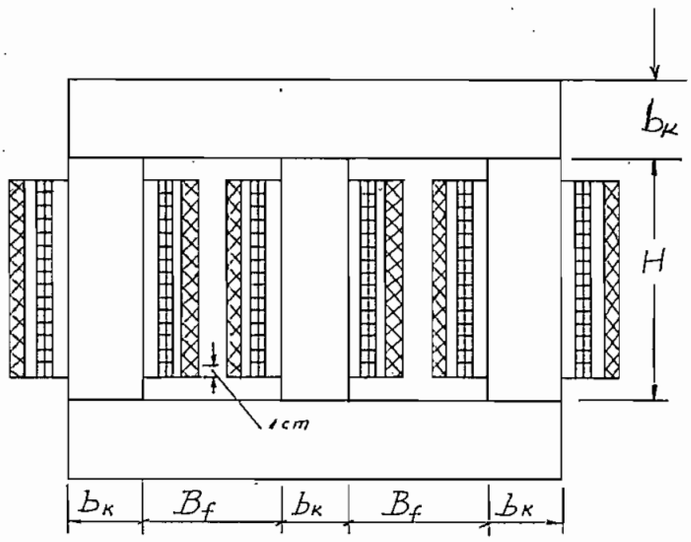
Diagrama h



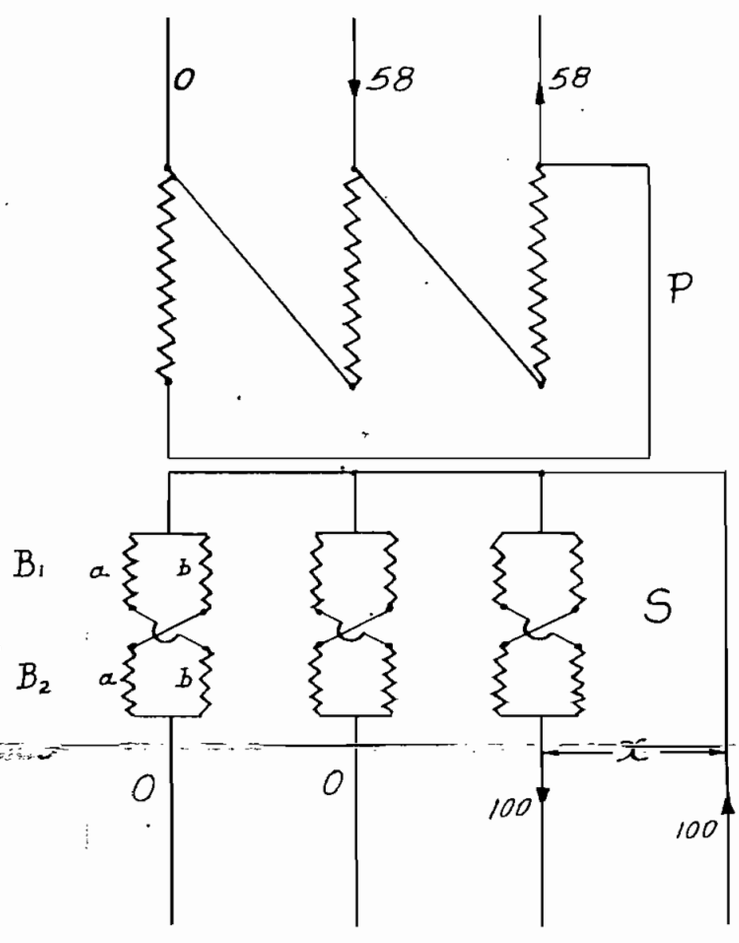
PLANO No. 25

(a) Muestra el núcleo dimensionado y las bobinas primarias y secundarias

(b) Muestra la conexión triángulo-estrella con las bobinas de baja dispuestas en paralelo



(a)



(b)

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

1) Gómez Navarro y Aracil Segura

Saltos de Agua y Presas de Embalse

Tipografía Artística - Madrid - 1958

2) Jaime Bustamante

Hidráulica

Escuela de Ingenieros Militares - Quito - 1955

3) Galo Pazmiño

Apuntes de clase - 1957 - 1958 - 1959

4) Dimitri Kakabadse

Apuntes de clase - 1957 - 1958 - 1959

5) H. Dubbel

Manual del Constructor de Máquinas

Editorial Labor S. A. - Barcelona - 1955

6) Félix Bundschu

Tuberías de Presión

Empresa Eléctrica Quito S. A.

Traducida del Alemán por Ernesto Contag (no publicada)

7) Otto Strck

Problemas de Hidráulica Aplicada

Editorial Labor S. A. - Barcelona - 1948

8) F. W. Sears y M. W. Zemansky

Física General

Impreso en España por Grafiplas - Madrid - 1958

9) L. Quantz

Motores Hidráulicos

Editorial Gustavo Gili S. A. - Barcelona - 1953

10) Escuela del Técnico Mecánico Tomo V

Editorial Labor S. A. Buenos Aires, 1951

11) Chester L. Dawes

Tratado de Electricidad

Editorial Gustavo Gili S. A. - Barcelona - 1957

12) Electrical Transmission and Distribution, Reference Book

Copyright - 1950 by Westinghouse Electric Corporation

13) Catálogo de LINE MATERIAL Co.

Lightning Arresters Insulators

Mc - Graw Electric Company Division

MILWAUKEE 1. WISCONSIN, Noviembre de 1956

14) Alfonso Mendizabal

Electrotecnia

Escuela de Ingenieros Militares, Quito - 1955

15) Vicente Jácome

Apuntes de clase - 1957 - 1958 - 1959

16) Escuela del Técnico Electricista Tomos VII y X

Editorial Labor S. A. - Barcelona - 1954

17) Max Forter

Electrotecnia

Escuela Politécnica Nacional - Quito - 1936

18) Terrell Croft

Manual del Montador Electricista

Editorial Reverté - Barcelona - 1949