

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**“LAS PÉRDIDAS TRANSVERSALES EN LÍNEAS DE  
TRANSMISIÓN TÍPICAS EN EL PERÚ”**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:  
JUAN CARLOS, NÚÑEZ ONOFRE**

**PROMOCIÓN  
84 – II**

**LIMA-PERÚ  
UNI - 2002**

**Dedicatoria**

En Memoria a mi Madre.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi Padre, Esposa y mis Profesores de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UNI, a quienes debo sus gratos consejos y mi título profesional de Ingeniero.

**LAS PÉRDIDAS TRANSVERSALES EN LÍNEAS  
DE TRANSMISIÓN TÍPICAS EN EL PERÚ**

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
1.1 El problema de las pérdidas transversales en Líneas de de Transmisión.....	3
1.2 Pérdidas en la superficies de los aisladores.....	6
1.3 Pérdidas por efecto corona.....	8
1.4 Gradiente de potencial en líneas con conductores en disposición asimétrica.....	16
1.4.1. Determinación del gradiente de potencial en las líneas de transmisión con disposición asimétrica de conductores y teniendo en cuenta el efecto de tierra.....	21
1.4.2. Gradientes críticos .....	24
1.4.3. Radio equivalente de un conductor múltiple.....	31
<b>CAPITULO II</b>	
<b>SOLUCIÓN DEL PROBLEMA PLANTEADO.....</b>	<b>34</b>
2.1. Caso: línea trifásica con conductores horizontales y sus pérdidas.....	34
Caso : línea trifásica con conductores en triángulo asimétrico.....	47

**CAPITULO III****PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR EFECTO CORONA:**

<b>3.1. MÉTODO DE PETERSON.....</b>	<b>53</b>
<b>RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>57</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>59</b>
<b>PLANOS DE ESTRUCTURAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DEL PERÚ ANALIZADAS.....</b>	<b>59</b>
Línea de Transmisión en 66 kV Corongo – Pallasca y Subestaciones.....	60
Línea de Transmisión en 138 kV Tingo María – Aucayacu.....	61

## INTRODUCCIÓN

Aplicando el concepto del cálculo de los gradientes de potencial en la superficie de los conductores, es posible predecir el nivel de pérdidas, si existen, por efecto corona, Las mismas que serán evaluadas en dos líneas típicas del Perú, así como a casos particulares, para luego comparar con los obtenidos en experiencias internacionales.

Por otra parte, el fenómeno de la influencia de las perturbaciones eléctricas de alta frecuencia y la correspondiente elección del diámetro del conductor, no se ha tomado en cuenta en el presente trabajo.

## **CAPITULO I**

### **PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA**

#### **1.1 El problema de las pérdidas transversales en Líneas de Transmisión.**

Como consecuencia de las descargas en los conductores se presentan pérdidas de transmisión adicionales llamadas pérdidas por efecto corona. La magnitud de las pérdidas depende del gradiente de campo máximo sobre el conductor, siendo fuertemente influenciado por las condiciones meteorológicas.

TABLA N° 1.1

COMPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA CON LAS PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE

CONDUCTOR	Pérdidas Joule (I <sup>2</sup> R) con P <sub>nat</sub> kW km trifásica	Gradiente Máximo admisible kV/cm	Pérdidas por Efecto Corona					
			Tiempo Seco		Con Lluvia		Tiempo Normal	
			kWkm	% de las Pérdidas Joule	kWkm	% de las Pérdidas Joule	kWkm	% de las Pérdidas Joule
4x21,0/400 ACSR Simple Tema	70	13,20	0,40	0,57	2,30	3,29	0,70	1,00
4x21,0/400 ACSR Doble Tema	88	14,80	0,60	0,68	7,00	7,95	1,50	1,70
4x21,7/400 ACSR Simple Tema	79	14,50	0,50	0,63	7,00	8,86	1,70	2,15
2x32,0/400 ACSR Simple Tema	64	16,20	0,60	0,94	11,60	18,13	2,30	3,59
42 mm, ø Cobre Simple Tema	49	17,60	0,60	1,22	18,80	38,37	3,30	6,73
42 mm, ø ACSR Doble Tema	31	17,10	0,60	1,94	23,20	74,84	4,50	14,52
2x26,6/400 ACSR doble Tema	59	18,10	0,50	0,85	34,80	58,98	5,90	10,00

La tabla adjunta fue elaborada y presentada en el Informe N° 22 Aspectos Técnico Económicos a tomar en consideración en el Dimensionamiento de Sistemas de Transmisión, KONSORTIUM LAHMEYER SALZGITTER, Ministerio de Energía y Minas y Dirección General de Electricidad PERU. Febrero 1973 teniendo en cuenta las pérdidas anuales medias durante un año normal en Alemania con un 2 % de tiempo seco, 5 % de neblina y 13 % de lluvia.

Tal como se deduce de la misma, las pérdidas dependen en alto grado de las condiciones meteorológicas. Para tiempo seco, estas son sumamente bajas y prácticamente sin importancia. En caso de lluvia fuerte, si pueden llegar a valores considerables, elevándose más o menos a las pérdidas por el efecto Joule en líneas funcionando con capacidad natural, dicha tabla compara para diferentes disposiciones de conductores las pérdidas por efecto Corona con las respectivas pérdidas por efecto Joule al trabajar las líneas con Potencia Natural. También en este caso se hace figurar las pérdidas anuales medias para el año normal alemán y para la zona costera del Perú.

Al comparar las pérdidas por efecto corona con las pérdidas por el efecto Joule con la potencia natural de la línea, debe tenerse en cuenta que los cambios en la carga y en la tensión de la línea pueden dar como resultado variaciones en las partes proporcionales ya que las pérdidas por efecto corona dependen de la tensión y las pérdidas por el efecto Joule dependen de la carga.

Los valores indicados para las pérdidas por efecto corona tienen validez al nivel del mar. Para líneas en mayores alturas sobre el nivel del mar deben aumentarse los diámetros de los conductores correspondientemente, a fin de mantener iguales pérdidas por efecto corona. El cálculo del diámetro necesario se lleva a cabo teniendo en cuenta la densidad atmosférica relativa  $\delta$  Y con  $\delta^{2/3}$ , tal como se señala en el apartado sobre el nivel de perturbaciones eléctricas de alta frecuencia.

A base de las mediciones alemanas de las pérdidas por efecto corona realizadas paralelamente con mediciones del nivel de perturbaciones eléctricas, se llegó a la conclusión que las pérdidas por efecto corona no son decisivas para el dimensionamiento de los conductores. Un conductor dimensionado de acuerdo a los criterios vigentes para evitar interferencias de radio y transmisiones de frecuencia portadoras demuestra pérdidas por efecto corona prácticamente de poca importancia en comparación con las pérdidas por el calor de la corriente.

## 1.2 Pérdidas en la superficies de los aisladores.

Fundamentalmente, consideramos que las pérdidas transversales en Líneas de transmisión tiene dos componentes:

1. Las pérdidas por fugas de pequeñas corrientes en los aisladores y
2. Las pérdidas por efecto corona.

Ambas pérdidas conforman las denominadas pérdidas por dispersión.

Por definición la perditancia es entonces:

$$g = \frac{\Delta p}{U_N^2} \times 10^{-3} \quad (1.1)$$

$g =$  Siemens/km

En donde  $U_N$  es la Tensión Nominal (kV) y  $\Delta p$  son las pérdidas por dispersión (transversales) en kW/km.

Las pérdidas en los aisladores dependen de:

- La calidad del material de los aisladores.
- Geometría del aislador.
- Frecuencia de la Tensión aplicada.
- Potencial a que son sometidos los aisladores.
- Condiciones meteorológicas en el lugar de instalación.

Experiencias en Inglaterra con una Línea experimental en 275 kV demuestran que las pérdidas son variables:

- Con tiempo bueno: 0,25 a 1,5 Watts/aislador
- Con lluvias suaves: 2,5 watts/aislador
- Con lluvias fuertes: 25 Watts/aislador

Se han efectuado mediciones en EHV (Extra Alta Tensión ) y se han obtenido:

- Con tiempo bueno: < 1 Watt/aislador
- Con lluvia: alrededor de 2 Watts/aislador.

En conclusión, no es simple la determinación o predicción de estas fugas sobre las cadenas de aisladores, durante el proceso de diseño; sin embargo parecen ser lo suficientemente pequeñas para ser despreciadas

En 1995 durante el proceso de Instalación de la Línea de Transmisión en 66 kV Paramonga Huarney, al Norte de Lima (Perú), a una de sus cadenas limpias se le hizo la medición de su aislamiento dando el valor de:

$$R = 50 \text{ M}\Omega \rightarrow i_{\text{fuga}} = \frac{66 / \sqrt{3} \text{ kV}}{50 \times 10^3 \text{ k}\Omega} = 0,000762 \text{ Amperes / cadena}$$

Podemos entonces estimar las pérdidas en la forma: Total de cadenas:

$$87 \frac{\text{km}}{\text{línea}} \times 3 \frac{\text{Estruct}}{\text{km}} \times 1 \frac{\text{Cadena}}{\text{Estruc}} = 261 \text{ Cadenas}$$

Estas 261 cadenas están en paralelo y conectadas a una de las fases de la línea, por lo que la resistencia equivalente al total de las cadenas es:

$$R_{eq} = \frac{50 M\Omega}{261} = 0,1916 \text{ } M\Omega \rightarrow I_{total} = \frac{66 / \sqrt{3} \text{ } kV}{0,1916 \times 10^3 \text{ } k\Omega} = 0,19888 \text{ } Amp$$

En consecuencia se puede estimar pérdidas de:

$$p = (0,19888)^2 \times (0,1916 \times 10^6) = 7578,3 \text{ } Watts / fase$$

$$p = \frac{7578,3 \times 10^{-3} \text{ } kW}{87 \text{ } km} \times 3 \text{ } Fases$$

Es decir:  $p = 0.2613 \text{ } kW / km \text{ } de \text{ } Linea$

### 1.3 Pérdidas por efecto corona.

Estas dependen principalmente de la diferencia de potencial entre los conductores y tierra, mas exactamente del gradiente de potencial en la superficie de los conductores y de las condiciones climáticas a lo largo de la línea.

Las pérdidas pueden ser nulas con tiempo bueno y alcanzar valores elevados con lluvias intensas, es evidente que una buena evaluación de estas pérdidas requiere conocimiento de las condiciones meteorológicas de las regiones que la línea atraviesa, registros climáticos de muchos años, de los cuales con procedimientos estadísticos se extrae el número de horas de lluvia que finalmente permite efectuar la evaluación de las pérdidas anuales.

En fase de proyecto preliminar es común usar procedimientos simplificados como el siguiente:

Se adopta un diámetro de conductor normalizado fijando pérdidas nulas para buen tiempo. Para líneas con distinto número de conductores puede adoptarse para este un diámetro que sea por lo menos igual al indicado en la tabla siguiente:

**TABLA N° 1.2**

Formación del haz	145 kV	245 kV	362 kV	550 Kv
Conductor simple	14.5	24.5	36.2	55.0
Conductor doble	11.0	18.6	27.5	41.8
Haz triple	7.3	12.3	18.1	27.5
Haz cuádruple	6.1	10.3	15.2	23.1

**Un:** es la tensión máxima de operación (tensión entre fases)

En cálculos económicos estos diámetros fijan los mínimos no debiendo usarse valores inferiores.

Puede adoptarse un valor medio de pérdidas corona en líneas de una misma clase que atraviesan regiones con condiciones

meteorológicas similares, cuando no se cuenta con datos se pueden adoptar los valores de líneas que en el mundo son buen ejemplo y que están comprendidos entre 2 y 8 kW/km al variar la tensión entre 220, 230 kV y 500, 550 kV.

Estos datos tienen razonable precisión en cálculos económicos preliminares, siendo usados frecuentemente.

Un buen indicador del límite de pérdidas es el gradiente superficial que debe limitarse a 17 kV/cm no siendo conveniente superarlo.

Estudios realizados por Peterson han fijado una metodología de cálculo del efecto corona que se considera válida, más recientemente se han propuesto otros métodos que se encuentran dispersos en la bibliografía.

Por otra parte, en las líneas de transmisión, la distancia entre conductores es mayor que su radio, al existir una diferencia de potencial entre conductores se tiene una intensidad de campo eléctrico  $E$ .

Cuando la intensidad del campo eléctrico excede la rigidez dieléctrica del aire, en la superficie de los conductores aparece el efecto corona. Este efecto depende de varios factores, entre los más importantes se pueden considerar el tipo de tensión, temperatura, densidad relativa del aire, presencia de vapor de agua, etc.

El efecto corona tiene las siguientes consecuencias en una Línea de transmisión:

- Pérdidas que se manifiestan en forma de calor.
- Oscilaciones electromagnéticas de alta frecuencia que se transmiten en toda la línea y provocan perturbaciones de radio y televisión en sus inmediaciones (radio interferencia).

Este fenómeno se puede explicar en forma semejante o a la descarga en gases, ya que debido a la incidencia de radiaciones y otras causas, existen moléculas ionizadas en el aire, estas moléculas han perdido uno o más de los electrones que les corresponden y por tanto tienen cargas eléctricas positivas . Debido a la diferencia de potencial entre las líneas el campo electrostático acelera la partícula aumentando su energía cinética, provocando choques con otras partículas (ionización por impacto).

La velocidad de estas partículas en promedio, depende de su carga eléctrica ( $e$ ) de su masa ( $M_e$ ). La intensidad del campo electrostático ( $E$ ) y del camino libre entre impactos.

El camino libre entre impactos depende de la presión atmosférica y de la temperatura absoluta.

En la aparición del efecto corona en una línea se pueden diferenciar varios tipos de descargas.

- Descarga trichel de poca importancia práctica.

- Descarga de puntas, aparece el aumentar el gradiente superficial; se puede medir una pequeña pérdida de energía.
- Descarga o corona de transición aparece una luminosidad tenue en las partes rugosas del conductor, además un ruido siseante.
- Corona luminiscente, aparece un halo luminoso alrededor de todo el conductor y se percibe el olor característico de ozono.

En la determinación de las Pérdidas por efecto corona se pueden emplear en general dos métodos: El método experimental y el método empírico.

En el método empírico se han desarrollado fórmulas para el cálculo de las Pérdidas, como la de F.W. Peek y la de Prinz. La más empleada para la determinación de las Pérdidas por corona en las Líneas de C.A. (Corriente Alterna) es la fórmula de Peek, que obtiene las Pérdidas como:

$$P = \frac{242}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} (V - V_0)^2 \times 10^{-5} \quad \text{kw / km} \quad (1.2)$$

$\delta_r$  = Densidad relativa del aire.

f = Frecuencia en ciclos/seg.

r = Radio del conductor en cm.

D = Separación entre centros de conductores en cm.

$V_0$  = Tensión crítica disruptiva (de corona).

$V$  = Tensión de fase a neutro de la línea en KV.

La densidad relativa del aire  $\delta$  se obtiene de la expresión:

$$\delta = \frac{3,926 H}{273 + \theta} \quad (1.3)$$

$H$  = presión barométrica en cmHg

$\theta$  = Temperatura en °C,

$$\text{Si } H = 76 \text{ cmHg} \quad \wedge \quad \theta = 25^\circ \text{C} \quad \rightarrow \quad \delta = 1,0 \quad (1.4)$$

La tensión crítica de corona  $V_0$  se puede expresar en función del gradiente de potencial.

Para dos conductores de radio  $r$  y separados una distancia  $D$  el gradiente de potencial máximo es:

$$E_{\max} = \frac{V}{r \ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (1.5)$$

$$V = r E_{\max} \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad (1.6)$$

El gradiente de potencial máximo (valor crítico) para el aire corresponde a un valor de 30 KV/cm a 76 cmHg y 25 °C, para la

corriente alterna senoidal este valor máximo es: 21.2 kV/cm por lo que la última ecuación se transforma en:

$$V_0 = \frac{30}{\sqrt{2}} r \ln\left(\frac{D}{r}\right) = 21,2r \ln\left(\frac{D}{r}\right) = 21,2r \left[ 2,303 \log\left(\frac{D}{r}\right) \right] = 48,5r \log\left(\frac{D}{r}\right) \quad (1.7)$$

Esta ecuación no toma en consideración la densidad del aire, y supone un conductor cilíndrico pulido sin rugosidades o irregularidades, como en realidad los conductores son rugosos y además están atacados por agentes atmosféricos es necesario corregir la expresión para esto se multiplica por  $\delta$  para tomar en consideración la densidad del aire, y por un factor  $m_c$  conocido como factor de estado superficial del conductor y que tiene los valores mostrados en la tabla adjunta.

**TABLA N° 1.3**

<i>FACTOR DE ESTADO SUPERFICIAL DEL CONDUCTOR</i>	
<i>mc</i>	<i>Alambre pulidos</i>
1	Alambre pulidos.
0,93 - 0,98	Alambres rugosos o atacados por agentes atmosféricos
0,83 - 0,87	Para cables de 7 hilos
0,80 - 0,85	Para cables de 19, 31 o 61 hilos

Por tanto la ecuación última corregida queda:

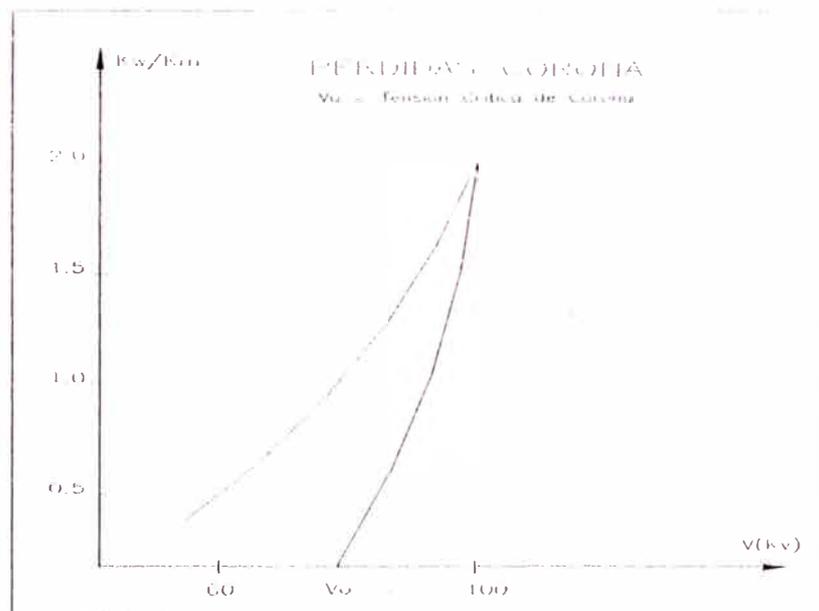
$$V_0 = 48,5r\delta m_c \log\left(\frac{D}{r}\right) \quad (1.8)$$

La curva de Peek se puede determinar experimentalmente, aplicando tensión y tomando lecturas de pérdidas para cada tensión.

La tensión se aplica lentamente hasta llegar a un determinado valor de pérdidas.

Después se reduce la Tensión lentamente, y se observa que no se regresa por el mismo camino, el punto donde la curva corta al eje de tensiones determina el valor de la tensión crítica de corona.

**GRAFICO N° 1.1**



#### 1.4 Gradiente de potencial en líneas con conductores en disposición asimétrica.

En caso que los conductores no se encuentran dispuestos en forma simétrica, las pérdidas por efecto corona son diferentes en cada conductor, aún cuando las tensiones entre fases estén balanceadas, en razón que estas pérdidas por corona dependen del gradiente de potencial en la superficie de cada conductor.

El gradiente de potencial para la línea es:

$$E = \frac{V}{r \ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (1.9)$$

$$V = rE \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad (1.10)$$

El gradiente de potencial máximo (rigidez dieléctrica del aire) en forma análoga.

$$E_{\max} = \frac{V_0}{r \ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (1.11)$$

$$V_0 = rE_{\max} \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad (1.12)$$

Ambas ecuaciones sustituimos en la ecuación de pérdidas corona:

$$p = \frac{242}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} (V - V_0)^2 \times 10^{-5} \quad (1.13)$$

$$p = \frac{242}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} \left( E r \ln\left(\frac{D}{r}\right) - E_{\max} r \ln\left(\frac{D}{r}\right) \right)^2 \times 10^{-5} \quad (1.14)$$

$$p = \frac{242}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} r^2 \left( \log\left(\frac{D}{r}\right) \right)^2 2,303^2 (E - E_{\max})^2 \times 10^{-5} \quad (1.15)$$

$$p = \frac{1285}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} r^2 \left( \log\left(\frac{D}{r}\right) \right)^2 (E - E_{\max})^2 \times 10^{-5} \quad (1.16)$$

Los valores de los gradientes de potencial (E) se pueden obtener para un sistema trifásico balanceado en la forma siguiente:

Sean  $E_a$ ,  $E_b$ ,  $E_c$  (kV/cm) los gradientes de potencial para cada fase, por otra parte, sabemos que la intensidad de campo eléctrico para un conductor de longitud infinita es:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon L} \rightarrow \text{para } L=1 \rightarrow E = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \quad (1.17)$$

Para una línea trifásica balanceada con disposición asimétrica y transposiciones a la tercera y dos terceras partes de la línea se conoce que:

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_a \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) + q_b \ln\left(\frac{r}{D_{eq}}\right) \right] \quad (1.18)$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_a \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) + q_c \ln\left(\frac{r}{D_{eq}}\right) \right] \quad (1.19)$$

en donde:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}} \quad (1.20)$$

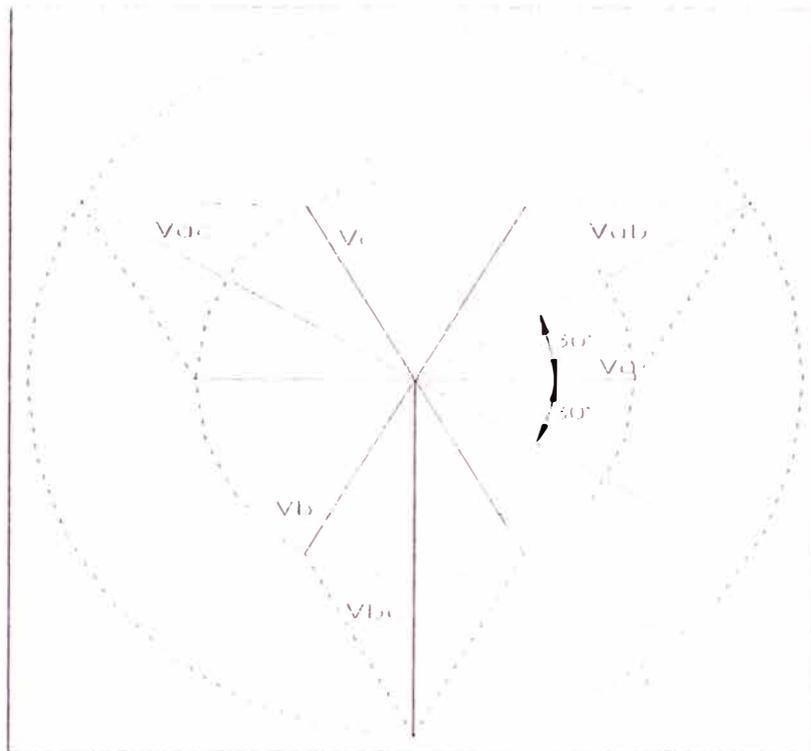
Además que:

$$q_a + q_b + q_c = 0 \quad (1.21)$$

En consecuencia, de las tres últimas ecuaciones podemos plantear la ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) & \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{r}{D_{eq}}\right) & 0 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) & 0 & \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{r}{D_{eq}}\right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{ac} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

GRAFICA N° 1.2



Del diagrama fasorial se deduce:

$$V_{ab} = \sqrt{3}V_a \angle 30^\circ = \frac{3}{2}V_a + j\frac{\sqrt{3}}{2}V_a \quad (1.23)$$

$$V_{ac} = \sqrt{3}V_a \angle -30^\circ = \frac{3}{2}V_a - j\frac{\sqrt{3}}{2}V_a \quad (1.24)$$

$$V_{ab} + V_{ac} = 3V_a \quad (1.25)$$

Teniendo en cuenta estas tres últimas expresiones y resolviendo la ecuación matricial, tenemos que las cargas y los respectivos gradientes de potencial son:

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) & \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{r}{D_{eq}}\right) & 0 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) & 0 & \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{r}{D_{eq}}\right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{ac} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\pi\epsilon V_a / 0^\circ}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \\ \frac{2\pi\epsilon V_a / 240^\circ}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \\ \frac{2\pi\epsilon V_a / 120^\circ}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi r \epsilon} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_a / 0^\circ}{r \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \\ \frac{V_a / 240^\circ}{r \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \\ \frac{V_a / 120^\circ}{r \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

### 1.4.1 Determinación del gradiente de potencial en las líneas de transmisión con disposición asimétrica de conductores y teniendo en cuenta el efecto de tierra.

Supongamos que  $q_a$   $q_b$   $q_c$  representan las cargas de los conductores de cada una de las fases.

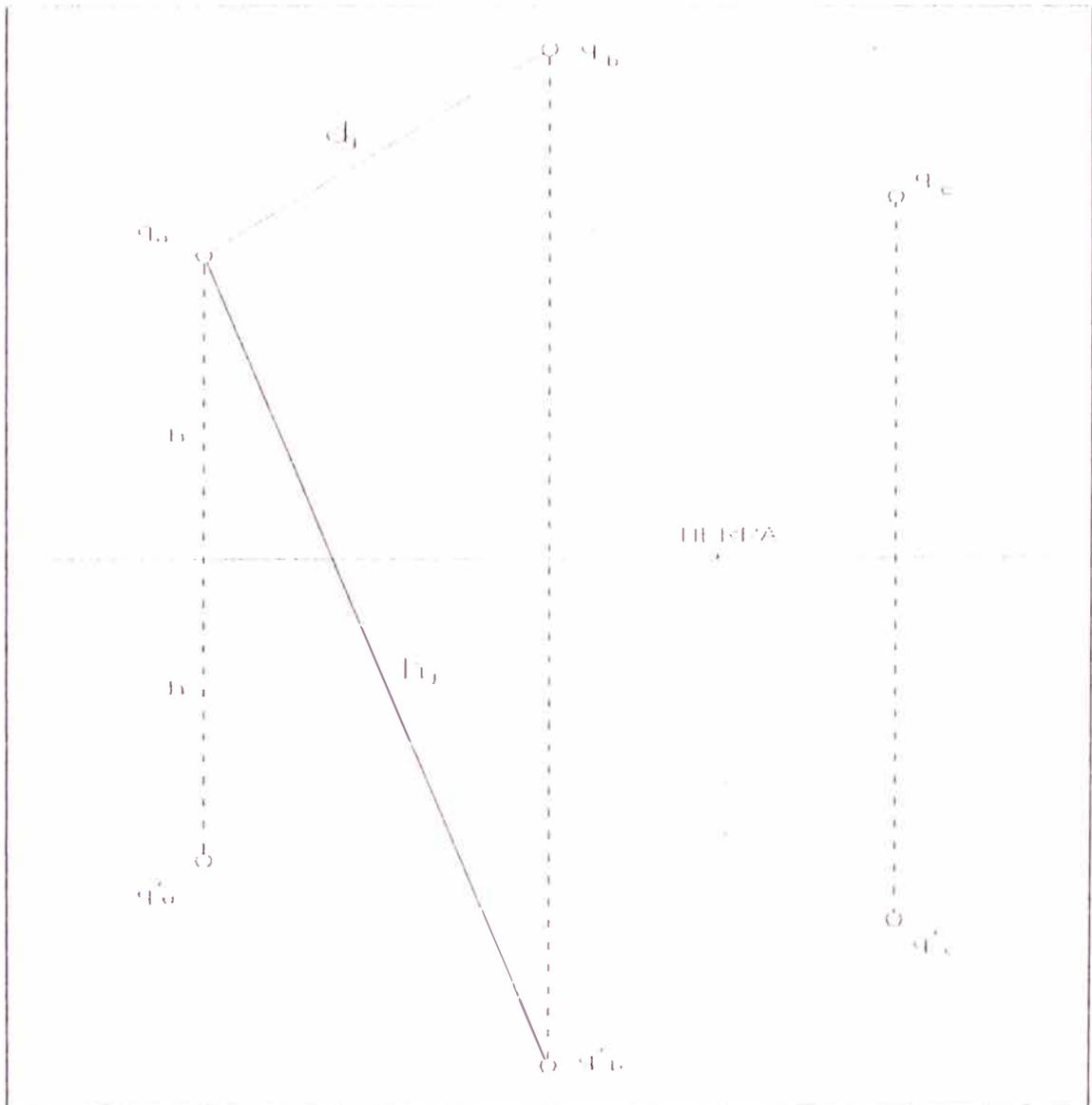
Sean también  $q'_a$   $q'_b$   $q'_c$  sus respectivas cargas imagen

$V_a$   $V_b$   $V_c$  son las tensiones al neutro de cada una de las fases.

Estas tensiones en forma matricial están dadas por:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ \vdots \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \dots & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & \dots & P_{2n} \\ \vdots & & & & & \\ \vdots & & & & & \\ \vdots & & & & & \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

GRAFICA N° 1.3



Particularmente, para el caso de tres conductores a, b, c podemos escribir la misma ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Es decir:  $[q] = [P]^{-1}[V]$  (1.31)

La Matriz de coeficientes se denomina MATRIZ DE COEFICIENTES DE MAXWELL en m/farad.

Dichos coeficientes tienen la forma:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad (1.32)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{h_{ij}}{d_{ij}}\right) \quad (1.33)$$

$h$  = Altura del conductor o altura media para disposición no horizontal sobre el terreno.

$r$  = Radio del Conductor.

$h_{ij}$  = distancia entre el conductor  $i$  y la imagen del conductor  $j$

$d_{ij}$  = distancia directa entre los conductores  $i$  y  $j$

$$\epsilon = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \quad \text{farad / m} \quad \text{Constante dieléctrica del aire.}$$

Teniendo en cuenta el valor de  $\epsilon$  los Coeficientes de Maxwell son:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}} \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad (1.34)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}} \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad (1.35)$$

$$E_{ii} = 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{2h}{r} \right) \quad (1.36)$$

$$E_{ij} = 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (1.37)$$

### 1.4.2 Gradientes críticos

Como Sabemos las pérdidas por Corona aparecen cuando el gradiente de potencial en la superficie del conductor excede el gradiente crítico disruptivo del aire.

La Tensión Crítica está controlada por:

- La presión del aire.
- La presión de Vapor de agua.
- Tipo de tensión aplicada.
- Fotoionización incidente.

En la actualidad, los conservadores del MEDIO AMBIENTE, están considerando a las líneas de Transmisión como POLUCION VISUAL., así como también a la Radio interferencia (RI) y al ruido acústico originado (RA).

Las descargas individuales de Corona provocan pulsos de Tensión y corriente de corta duración que se propagan a lo largo de la línea, resultando campos electromagnéticos en su inmediaciones.

El dimensionamiento económico de Líneas en Extra Alta Tensión (EHV) y en Ultra Alta Tensión (UHV), está relacionado directamente con la selección del gradiente de potencial máximo admisible en la superficie de los conductores.

En la actualidad se está investigando colocar los conductores en polígono irregular de tal manera que el gradiente de potencial en la superficie de cada sub conductor sea mínimo, pero en contrapartida tenemos que resolver el problema de la inestabilidad mecánica ocasionada por esta propuesta.

F.W. PEEK fue quien ha dado mayor contribución a la Ingeniería Eléctrica, en el campo del efecto Corona en Líneas de Transmisión. Trabajó en sus laboratorios entre 1910 y 1939 y con pocos recursos de la época consiguió establecer las bases para un correcto dimensionamiento de los conductores: Los resultados de sus trabajos y conclusiones continúan válidos.

El gradiente crítico disruptivo del aire atmosférico es 30,5 kV/cm; en condiciones normales ( 20°C; 760 mmHg).

Para la Corriente Alterna (AC), el valor eficaz de este gradiente es de:

$$\frac{30,5}{\sqrt{2}} \text{ kV/cm} = 21,6 \text{ kV/cm} \quad (1.38)$$

Peek verificó experimentalmente que el fenómeno de descargas de Corona solamente se inicia con valores de gradientes mas elevados en la superficies de los conductores, cuando también se inician las manifestaciones luminosas (GRADIENTE CRITICO VISUAL).

De acuerdo con las investigaciones de Peek:

$$E_{\text{CKVmax}} = 305 \left( 1 + \frac{0.301}{\sqrt{r}} \right) \text{ kV/cm} \quad (1.39)$$

En valor eficaz →

$$E_{\text{CKV}} = \frac{305}{\sqrt{2}} \left( 1 + \frac{0.301}{\sqrt{r}} \right) \text{ kV/cm} \quad (1.40)$$

En sus investigaciones Peek trabajó con conductores de diámetro pequeños y lisos.

Otros investigadores como W.O. Schumann (1923) y C.J. Miller Jr.(1956) Ampliaron el campo de observación, verificando que  $E_{\text{CRV}}$  depende mucho de las dimensiones del conductor.

TABLA N° 1.4

$E_{CRV}$ (KV/PULG)	DIÁMETRO CONDUCTOR (PULG)	AUTOR
$48,48 \left( 1 + \frac{0,467}{\sqrt{r}} \right)$	3,98 a 11,8	Schumann
$49,65 \left( 1 + \frac{0,406}{\sqrt{r}} \right)$	0,788 a 3,93	"
$52,95 \left( 1 + \frac{0,324}{\sqrt{d}} \right)$	0,236 a 6,788	"
$56,30 \left( 1 + \frac{0,276}{\sqrt{d}} \right)$	0,0788 a 0,236	"
$46,0 \left( 1 + \frac{0,48}{\sqrt{d}} \right)$	0,25 a 1,24	Miller Jr.
$35,0 \left( 1 + \frac{0,97}{\sqrt{d}} \right)$	1,48 a 2,23	Miller Jr.

Schumann publicó sus trabajos en 1923 y Miller en 1956 por lo que se supone que las expresiones de Miller sean más reales, por cuanto contó con recursos tecnológicos mas avanzados. La expresión de Peek aún es utilizado.

Los diámetros de conductores normalmente empleados en Líneas de Transmisión caen dentro de la primera expresión de Miller, que en sistema métrico es:

$$E_{CRV} = 18.11 \left( 1 + \frac{0.54187}{\sqrt{r}} \right) \quad (1.41)$$

kV/cm (Miller Jr.)

Miller demostró que esta expresión es válida también para conductores múltiples efectuando una corrección.

Esta corrección consiste en determinar el diámetro de un conductor cilíndrico que colocado en la posición del eje del conductor múltiple, posea en su superficie el mismo gradiente de potencial que los subconductores, por lo que podemos generalizar:

$$E_{CRV} = 18.11 \left( 1 + \frac{0.54187}{\sqrt{r_{eq}}} \right) \quad (1.42)$$

kV/cm  $r_{eq}$  en cm

Peek verificó, como lo demostraron las investigaciones posteriores, que  $E_{CRV}$  debe ser corregida por el factor de densidad del aire:

$$E_{CRV} = 18,11\delta \left( 1 + \frac{0,54187}{\sqrt{r_{eq}\delta}} \right) \text{ kV / cm} \quad (1.43)$$

siendo:

$$\delta = \frac{0,386b}{273 + \theta} \quad \wedge \quad b = 760 - 0,086x(\text{msnm}) = 0.91$$

$\theta = \text{Temp } ^\circ\text{C}$  media anual

$b = \text{mmHg}$

Estas expresiones se aplican en conductores de superficies pulidas y secas, por lo que es necesario incluir el factor de superficie ( $m_C$ )

$$E_{\text{CRV}} = 18.11 m_C \delta \left( 1 + \frac{0.54187}{\sqrt{r_{\text{eq}} \delta}} \right) \quad (1.44)$$

Peek y Miller determinaron los factores:

TABLA N° 1.5

	$m_c$
Conductores Cilíndricos, pulidos y secos	1,0
Cables nuevos, secos, limpios.	0,92
Cobre, en atmósfera limpia	0,82
Aluminio, nuevos y secos	0,53 a 0,73
Cables mojados nuevos o usados	0,16 a 0,25

Para que la Línea presente un desempeño satisfactorio es necesario que:  $E_{CRV} > E$ , es decir que el gradiente crítico visual sea mayor que el gradiente en la superficie de los subconductores.

En observaciones realizadas en líneas en operación del BRASIL mostraron que se pueden esperar un desempeño razonable con valores de gradientes del orden de 15 kV/cm.

Publicaciones recientes indican que el desempeño satisfactorio (por pérdidas o por radiointerferencias) es cuando:

$$E < 17 \text{ kV/cm} \quad (1.45)$$

Que es empleado en el dimensionamiento preliminar del conductor desde el punto de vista Técnico – Económico.

### 1.4.3 Radio equivalente de un conductor múltiple.

Es el radio de un conductor cilíndrico ficticio que es colocado en el eje del conductor múltiple, presentando el mismo gradiente medio que el conductor múltiple.

Sea  $Q$  la carga total por km de un conductor múltiple (Coulomb/km), entonces:

$$\text{Carga Media de cada Subconductor} = \frac{Q}{n} \text{ (Coulomb / km)}$$

Por tanto el gradiente medio en cada Subconductor es:

$$E = \frac{Q/n}{2\pi\epsilon r} \text{ (kV/cm)} \quad (1.46)$$

$$E = \frac{Q/n}{2\pi\epsilon r_{eq}} \quad (1.47)$$

donde  $r$  es el radio de un subconductor y  $r_{eq}$  es el radio del conductor cilíndrico de carga  $Q$  (Coulomb/km), entonces:

$$E = \frac{Q/n}{2\pi\epsilon r_{eq}} \quad (1.48)$$

Por otra parte

$$Q = CU \quad \text{Siendo: } C = \frac{2\pi\epsilon}{\text{Ln}\left(\frac{DMG}{RMG_C}\right)} \quad (1.49)$$

C = para Líneas Trifásicas transpuestas.

RMG<sub>C</sub> = Radio Medio Geométrico Capacitivo.

Por tanto en el subconductor:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon nr} = \frac{\left[ \frac{2\pi\epsilon}{\text{Ln}\left(\frac{DMG}{RMG_C}\right)} U \right]}{2\pi\epsilon nr} = \frac{U}{nr \text{Ln}\left(\frac{DMG}{RMG_C}\right)} \quad (1.50)$$

En el conductor ficticio:

$$E = \frac{U}{r_{eq} \text{Ln}\left(\frac{DMG}{r_{eq}}\right)} \rightarrow \frac{U}{nr \text{Ln}\left(\frac{DMG}{RMG_C}\right)} = \frac{U}{r_{eq} \text{Ln}\left(\frac{DMG}{r_{eq}}\right)}$$

$$\frac{1}{nr \text{Ln}\left(\frac{DMG}{RMG_C}\right)} = \frac{1}{r_{eq} \text{Ln}\left(\frac{DMG}{r_{eq}}\right)} \quad (1.51)$$

Se igualan los campos en razón que el conductor ficticio “reemplaza” al conductor múltiple, por lo que en consecuencia:

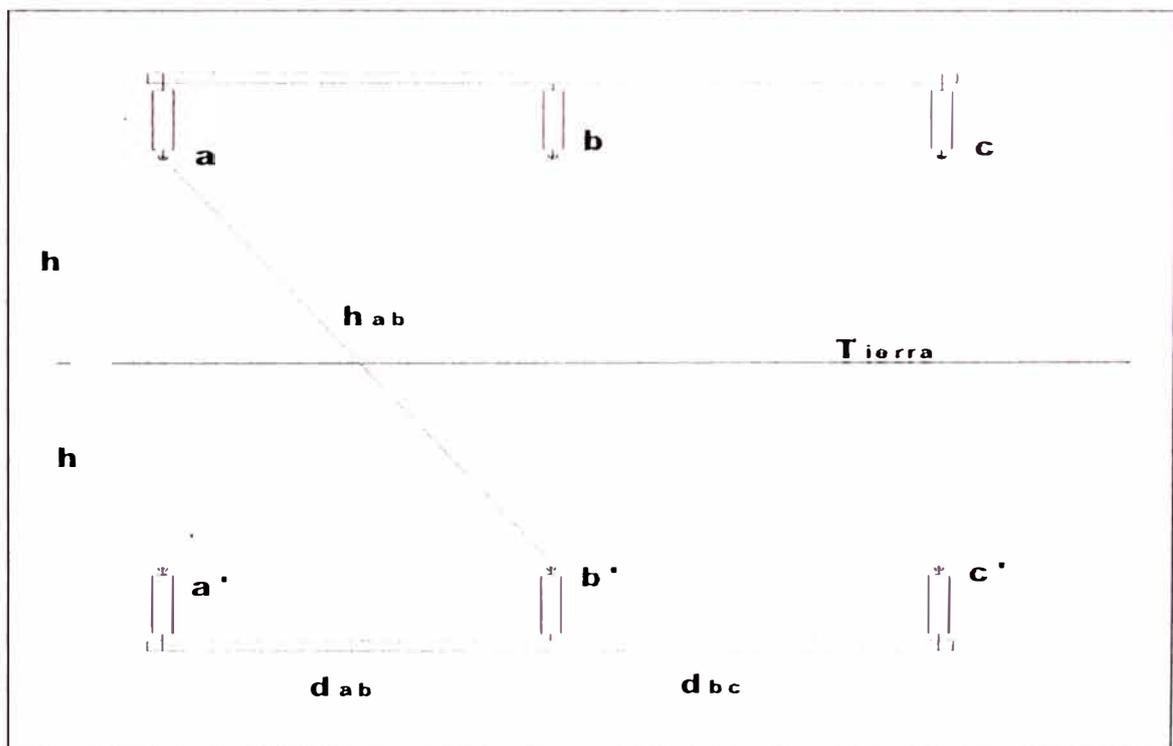
$$\frac{DMG}{r_{eq}} = \left( \frac{DMG}{RMG_c} \right)^{nr} \quad (1.52)$$

## CAPITULO II

### SOLUCIÓN DEL PROBLEMA PLANTEADO

#### 2.1. Caso: línea trifásica con conductores horizontales y sus pérdidas.

GRAFICO N° 2.1



$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{h_{ab}}{d_{ab}}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{h_{ac}}{d_{ac}}\right) \\ 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{h_{ab}}{d_{ab}}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{h_{bc}}{d_{bc}}\right) \\ 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{h_{ac}}{d_{ac}}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{h_{bc}}{d_{bc}}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_a / 0^\circ \\ V_b / -120^\circ \\ V_c / +120^\circ \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

En razón de la simetría física de la disposición de conductores, la Matriz de Coeficientes de Maxwell es Simétrica.

$$\text{Por otra parte:} \quad V_a = V_b = V_c = |V_a| \quad (2.3)$$

Así mismo;

$$d_{ab} = d_{bc} = d \quad \wedge \quad d_{ac} = 2d \quad (2.4)$$

$$h_{ab} = h_{bc} = \sqrt{(2h)^2 + d_{ab}^2} = \sqrt{4h^2 + d^2} \quad (2.5)$$

$$h_{ac} = \sqrt{(d_{ab} + d_{bc})^2 + (2h)^2} = \sqrt{(2d)^2 + (2h)^2} \quad (2.6)$$

$$h_{ac} = 2\sqrt{h^2 + d^2} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{2\sqrt{h^2 + d^2}}{2d}\right) \\ 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d}\right) \\ 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{2\sqrt{h^2 + d^2}}{2d}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d}\right) & 18 \times 10^9 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_a / 0^\circ \\ V_b / -120^\circ \\ V_c / +120^\circ \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Ejemplo:

Calculemos los gradientes de Potencial para una línea de Transmisión con conductores en disposición FLAT (un conductor/fase) y cuya estructura típica se muestra en la figura N° 5 , con los datos siguientes:

Altura promedio sobre el terreno	$h = 10.0 \text{ m}$
Distancia entre fases :	$d = 3.20 \text{ m}$
Radio del conductor:	$r = 0.7385 \text{ cm}$
Tensión Nominal:	$U_N = 66 \text{ KV}$

Solución:

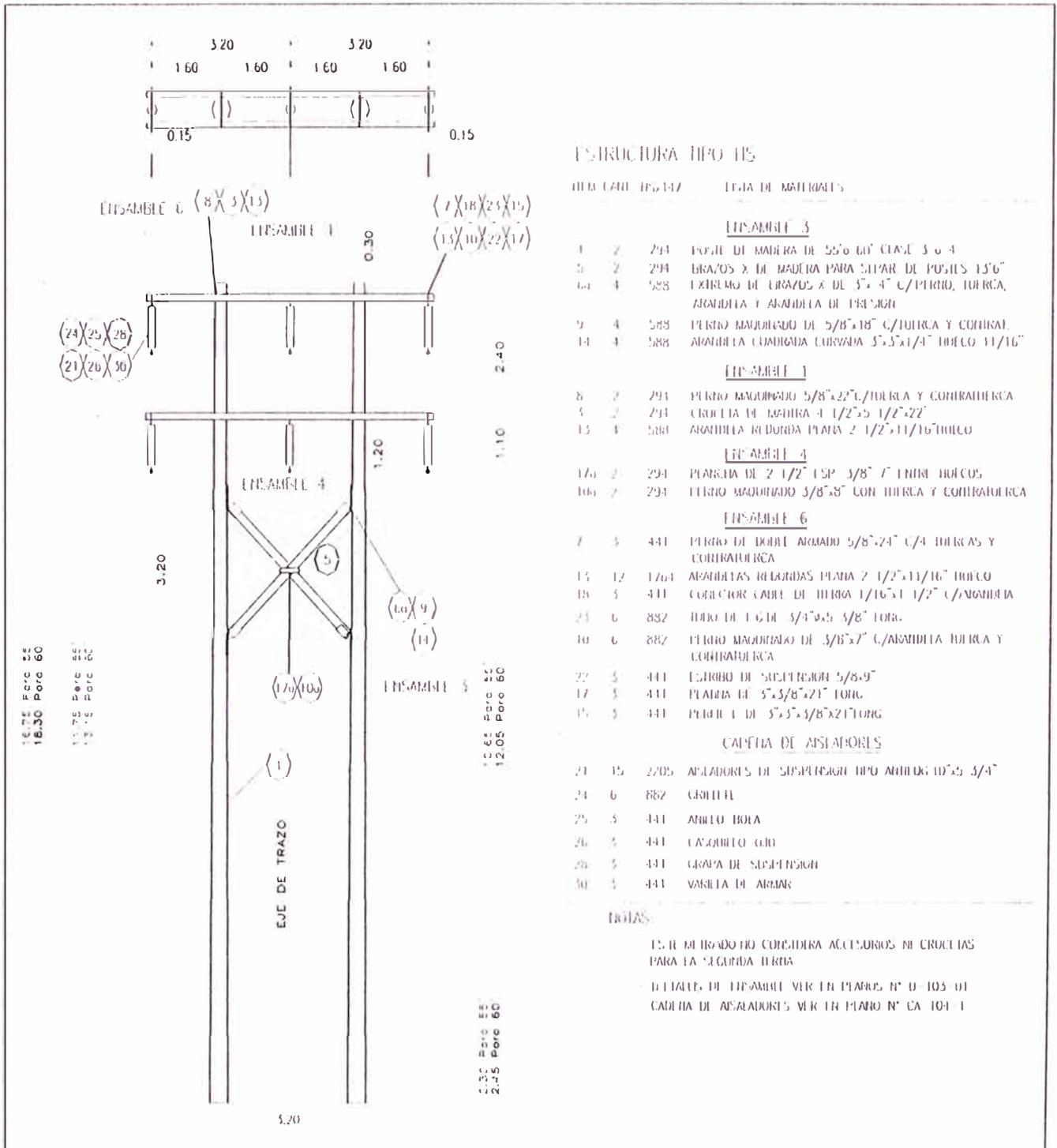
En este caso:  $h = 10 \quad \wedge \quad d = 3.20$

TABLA N° 2.1

<i>MATRIZ DE COEFICIENTES DE MAXWELL [P]</i>		
1.42518E+11	18968511768	21387223689
18968511768	1.42518E+11	33213966612
21387223689	33213966612	1.42518E+11

LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORONGO PALLASCA Y SUBESTACIONES:

GRAFICA N° 2.2



La Matriz Inversa  $[P]^{-1}$  será:

TABLA N° 2.2

<b>MATRIZ INVERSA DE <math>[P]</math></b>		
7.25386E-12	-7.52644E-13	-9.13159E-13
-7.52644E-13	7.49773E-12	-1.63441E-12
-9.13159E-13	-1.63441E-12	7.53459E-12

En consecuencia, La matriz de cargas  $q$  en los conductores será:

$$[q] = [P]^{-1}[V] \quad (2.9)$$

TABLA N° 2.3

<b>Matriz de cargas <math>[q]</math></b>
2.12934E-10
1.94743E-10
1.90031E-10

Donde la matriz de (Módulos) Tensiones es:

$$[V] = \begin{bmatrix} U_n \\ \sqrt{3} \\ U_n \\ \sqrt{3} \\ U_n \\ \sqrt{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 66 \\ \sqrt{3} \\ 66 \\ \sqrt{3} \\ 66 \\ \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

TABLA N° 2.4

<i>Matriz de Tensiones al neutro</i> [V]
38.11
38.11
38.11

Por tanto los gradientes de potencial serán:

$$[E] = \frac{1}{2\pi r\epsilon} [q] \text{ kV/cm} \quad (2.11)$$

TABLA N° 2.5

<b>Gradientes [E] en las Fases a, b, c (kV/cm)</b>
5.26
4.81
4.70

Evaluemos el Gradiente Crítico Visual, a partir del cual se manifiestan las pérdidas por efecto corona:

TABLA N° 2.6

CALCULO DEL GRADIENTE CRITICO VISUAL			
$rmsnm =$	2600	Coef de superficie $m c =$	0.825
Temp Media ( $^{\circ}C$ ) $\theta =$	15	Frecuencia (HZ) $f =$	60
Densidad Relativa $\delta =$	0.75	Presión Atmosférica (cmHg) $H =$	54.83
$DMG$ (cm) =	523.37	Radio equivalente (cm) $req =$	518.56
$RMG$ Capacitivo (cm) =	0.73	GRADIENTE CRITICO VISUAL $E_{CRV}$	11.47
		(kV/cm) =	

Para múltiples conductores por fase (Conductores fasciculados) se deberá tomar en cuenta el emplear el concepto de Radio Medio Geométrico:

GRAFICO N° 2.3



$$RMG = \sqrt[n]{nrR^{n-1}} \quad (2.12)$$

Donde  $R$  es el Radio de la circunferencia que inscribe los conductores de fase.

Para circuito dúplex (dos conductores por fase):  $R = \frac{\Delta}{2}$

Para circuito tríplex (tres conductores por fase):  $R = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$

Para circuito cuádruplex (cuatro conductores por fase):  $R = \frac{\Delta}{\sqrt{2}}$

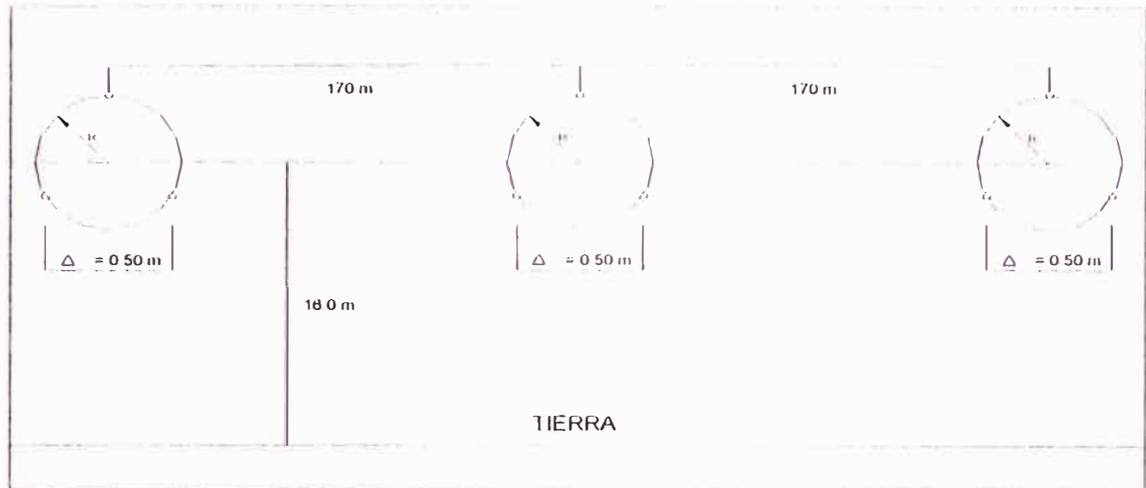
Siendo  $\Delta$  la separación física entre sub conductores, que es el dato más común y su valor oscila entre 0.35 y 0.50 m normalmente.

Por ejemplo, determinemos las pérdidas por efecto Corona para una Línea de Transmisión de las características siguientes:

Tensión de Operación: 400 kV, conductores Tríplex (radio de cada sub conductor = 1,09 cm), Fases en FLAT, con 17 m de separación, con altura media de fases de 16 m sobre el suelo.

Solución:

GRAFICO N° 2.4



Para este caso,

$$R = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{50}{\sqrt{3}} = 28.8 \text{ cm} \quad (2.13)$$

$$\text{RMG} = \sqrt[n]{nrR^{n-1}} = \sqrt[3]{3 \times 1.09 \times 28.8^{3-1}} = 14.4 \text{ cm} \quad (2.14)$$

$$d_{ab} = d_{bc} = d = 17 \quad \wedge \quad d_{ac} = 2d = 34 \quad (2.15)$$

$$h_{ab} = h_{bc} = \sqrt{4h^2 + d^2} = \sqrt{4 \times 16^2 + 17^2} = 36 \text{ m} \quad (2.16)$$

$$h_{ac} = 2\sqrt{h^2 + d^2} = 2\sqrt{16^2 + 17^2} = 46,6 \text{ m}$$

Por tanto la matriz de coeficientes de Maxwell será:

TABLA N° 2.7

<i>MATRIZ DE COEFICIENTES DE MAXWELL [P]</i>		
97814967303	27505050935	5709231959
27505050935	97814967303	13622788676
5709231959	13622788676	97814967303

Cuya inversa es:

TABLA N° 2.8

<i>MATRIZ INVERSA DE [P]</i>		
1.11057E-11	-3.09257E-12	-2.17508E-13
-3.09257E-12	1.12868E-11	-1.39142E-12
-2.17508E-13	-1.39142E-12	1.04299E-11

En consecuencia, La matriz de cargas  $q$  en los conductores será:

$$[q] = [P]^{-1}[V] \quad (2.17)$$

Donde la matriz de (Módulos) Tensiones es:

$$[V] = \begin{bmatrix} 400 \\ \sqrt{3} \\ 400 \\ \sqrt{3} \\ 400 \\ \sqrt{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 230,94 \\ 230,94 \\ 230,94 \end{bmatrix} \quad U_N = 400 \text{ kV} \quad (2.18)$$

Por tanto las matrices de cargas y de gradientes de potencial serán:

**TABLA N° 2.9**

<b>Matriz de cargas [ q ]</b>
1.80032E-09
1.57104E-09
2.03711E-09

Siendo:  $2\pi r n \epsilon = 2\pi r (n \epsilon) = 1.817 \times 10^{-10}$

**TABLA N 2.10**

<b>Gradientes [ E ] en las Fases a, b, c (kV/cm)</b>
9.91
8.65
11.21

$$[E] = \frac{1}{2\pi r n \epsilon} [q] \text{ kV/cm} \quad (2.19)$$

El Gradiente que se toma es el de mayor valor.

Los valores obtenidos pueden ser comparados con los obtenidos para otras líneas:

TABLA N° 2.11

**VALORES TIPICOS DE GRADIENTE DE POTENCIAL. Conductores en FLAT**

Conductores/ Fase	345 kV		500 kV		735 kV	
	Conductores Externos	Conductor Central	Conductores Externos	Conductores Externos	Conductores Externos	Conductor Central
1	20,577	21,811	21,397	22,37		
2	18,738	20,179	19,976	21,105		
3			20,538	21,822	19,099	20,176
4			21,417	22,876	19,286	20,455

En general, publicaciones recientes consideran que la línea de transmisión tiene desempeño satisfactorio tanto por pérdidas como por radio interferencia si el gradiente E es:

$$E < 17 \text{ kV/cm} \quad (2.20)$$

TABLA N° 2.12

**CALCULO DEL GRADIENTE CRITICO VISUAL**

$m_{snm} =$	2000	Coef de superficie $m_c =$	0.825
Temp Media ( $^{\circ}\text{C}$ ) $\theta =$	15	Frecuencia (Hz) $f =$	60
Densidad Relativa $\delta =$	0.81	Presión Atmosférica (cmHg) $H =$	59.12
$DMG$ (cm) =	1593.46	Radio equivalente (cm) $req =$	1577.90
$RMG$ Capacitivo (cm) =	13.97	<b>GRADIENTE CRITICO VISUAL <math>ECRV</math></b> (kV/cm) =	<b>12.22</b>

Tales que:

$$x = \sqrt{d_{ac}^2 - (h_c - h_a)^2} \quad (2.21)$$

$$y = h_c - h_a$$

$$z = h_b - h_c$$

$$w = \sqrt{d_{bc}^2 - (h_b - h_c)^2} \quad (2.22)$$

En consecuencia, de la geometría de la estructura se deduce:

$$h_{ab} = \sqrt{(h_a + h_b)^2 + \left( \sqrt{d_{ac}^2 - (h_c - h_a)^2} - \sqrt{d_{bc}^2 - (h_b - h_c)^2} \right)^2} \quad (2.23)$$

$$h_{ac} = \sqrt{(h_a + h_c)^2 + \left( \sqrt{d_{ac}^2 - (h_c - h_a)^2} \right)^2} = \sqrt{4h_a h_c + d_{ac}^2} \quad (2.24)$$

$$h_{bc} = \sqrt{(h_b + h_c)^2 + \left( \sqrt{d_{bc}^2 - (h_b - h_c)^2} \right)^2} = \sqrt{d_{bc}^2 + 4h_b h_c} \quad (2.25)$$

La matriz de coeficientes de Maxwell tiene los elementos siguientes:

$$P_{ii} = 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{2h_i}{RMG} \right) \quad (2.26)$$

$$P_{ij} = 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (2.27)$$

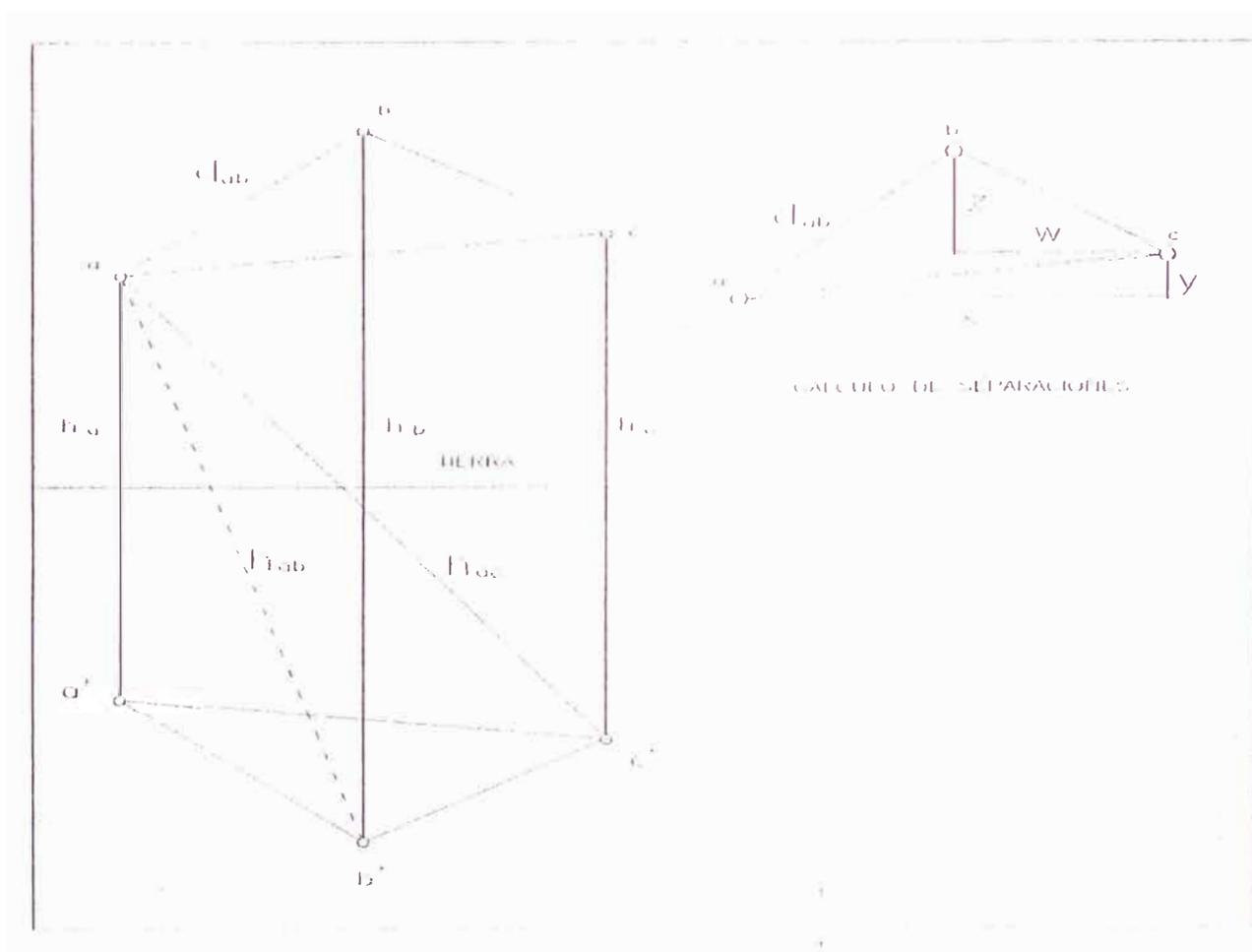
$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{2h_a}{RMG} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{ab}}{d_{ab}} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{ac}}{d_{ac}} \right) \\ 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{ba}}{d_{ba}} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{2h_b}{RMG} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{bc}}{d_{bc}} \right) \\ 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{ca}}{d_{ca}} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{cb}}{d_{cb}} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{2h_c}{RMG} \right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_a \angle 0^\circ \\ V_b \angle -120^\circ \\ V_c \angle +120^\circ \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

En consecuencia, se observa que el gradiente crítico visual es mayor que los gradientes en la superficie de los conductores, por lo que se deduce que no tendremos problemas con el efecto corona, es decir no existirán pérdidas.

**Caso: línea trifásica con conductores en triángulo asimétrico.**

Tomaremos como base la disposición de conductores de la figura:

GRAFICA N° 2.5

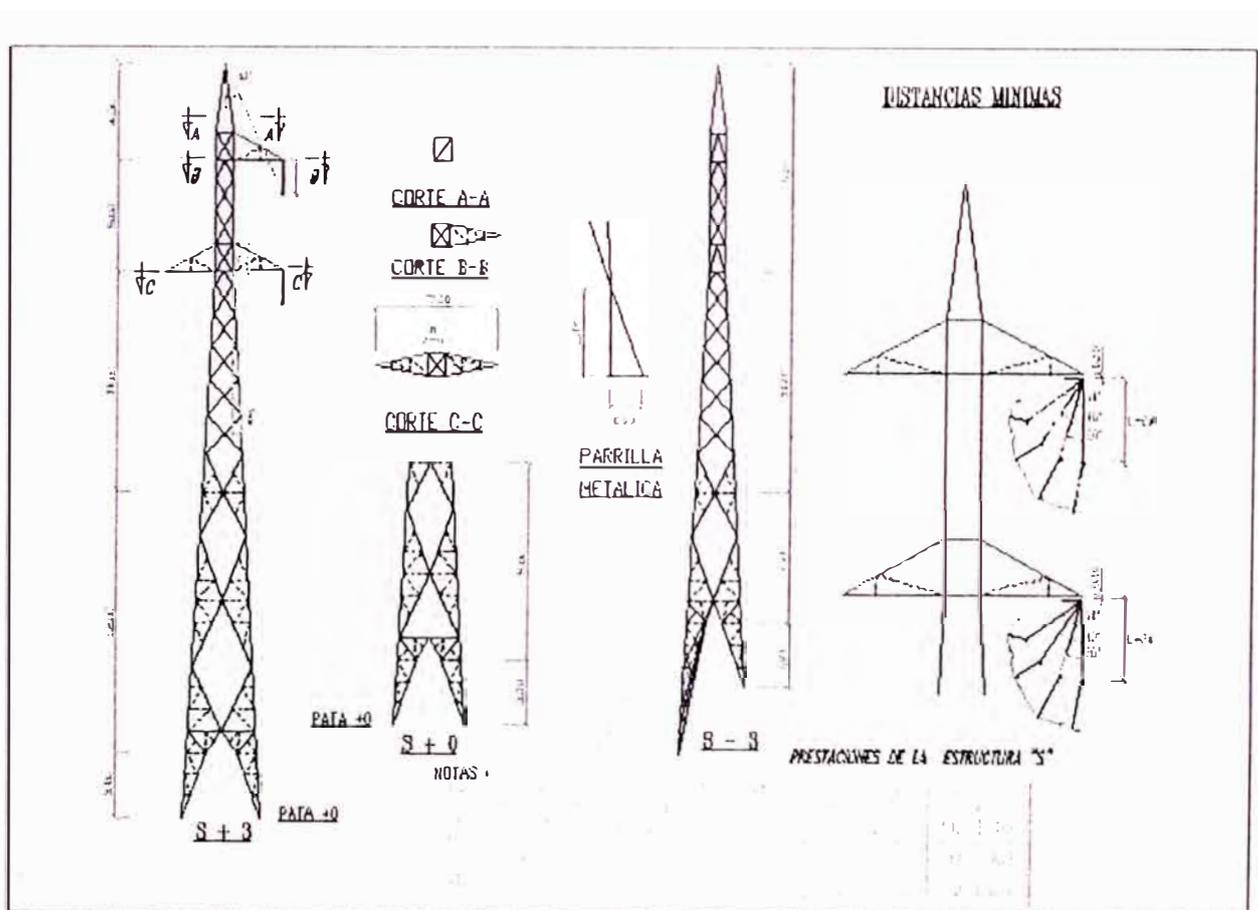


La matriz de coeficientes es simétrica y los elementos de la diagonal principal son diferentes, en razón que las fases tienen diferentes alturas ( $h$ ) respecto al terreno.

Por ejemplo para la Línea en 138 kV Tingo María - Aucayacu,  
Radio conductor = 1,03 cm

Así mismo, del gráfico las distancias (en metros) son:

GRAFICA N° 2.6



$$d_{ac} = 7.00 \quad d_{bc} = 5.00 \quad d_{ab} = 8.602$$

$$h_a = h_c = 12.0 \quad h_b = 17.0$$

$$h_{ab} = \sqrt{(h_1 + d_2)^2 + d_1^2} \quad (2.29)$$

$$h_{bc} = h_2 + d_2 \quad (2.30)$$

$$h_{ac} = \sqrt{h_1^2 + d_1^2} \quad (2.31)$$

La matriz de coeficientes de Maxwell tiene los elementos siguientes:

$$P_{ii} = 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{2h_{ii}}{r} \right) \quad (2.32)$$

$$P_{ij} = 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (2.33)$$

Si  $n=1 \rightarrow \text{RMG} = r$

**TABLA N° 2.13**

<b>MATRIZ DE COEFICIENTES DE MAXWELL [P]</b>		
1.39566E+11	25659543039	22913382165
25659543039	1.45835E+11	31641442516
22913382165	31641442516	1.39566E+11

Además la matriz de tensiones es:

**TABLA N° 2.14**

<b>Matriz de Tensiones al neutro [V]</b>
79.67
79.67
79.67

Y la matriz de cargas:

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{2h_a}{RMG} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{ab}}{d_{ab}} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{ac}}{d_{ac}} \right) \\ 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{ba}}{d_{ba}} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{2h_b}{RMG} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{bc}}{d} \right) \\ 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{ca}}{d_{ca}} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{h_{cb}}{d_{cb}} \right) & 18 \times 10^9 \ln \left( \frac{2h_c}{RMG} \right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_a \angle 0^\circ \\ V_a \angle -120^\circ \\ V_a \angle +120^\circ \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

reemplazando las fórmulas de distancias:

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = 18 \times 10^9 \ln \begin{bmatrix} \ln \left( \frac{2h_1}{r} \right) & \ln \left( \frac{\sqrt{(h_1 + d_2)^2 + d_1^2}}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2}} \right) & \ln \left( \frac{\sqrt{h_1^2 + d_1^2}}{d_1} \right) \\ \ln \left( \frac{\sqrt{(h_1 + d_2)^2 + d_1^2}}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2}} \right) & \ln \left( \frac{2h_3}{r} \right) & \ln \left( \frac{h_2 + d_2}{d_2} \right) \\ \ln \left( \frac{\sqrt{h_1^2 + d_1^2}}{d_1} \right) & \ln \left( \frac{h_2 + d_2}{d_2} \right) & \ln \left( \frac{2h_2}{r} \right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_a \angle 0^\circ \\ V_a \angle -120^\circ \\ V_a \angle +120^\circ \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Al reemplazar los datos físicos, obtenemos:

**TABLA N° 2.15**

<b>Matriz de cargas [q]</b>
4.3304E-10
3.80415E-10
4.13532E-10

En consecuencia, el gradiente en la superficie de los conductores son:

**TABLA N° 2.16**

<b>Gradientes [ E ] en las Fases a, b, c (kV/cm)</b>
7.57
6.65
7.23

Al calcular el gradiente crítico visual, se obtiene:

**TABLA N° 2.17**

<b>PERDIDAS CORONA: GRADIENTE CRITICO VISUAL</b>			
<i>msnm</i>	1000	<i>Coef de superficie mc</i>	0.825
<i>Temperatura (°C)</i>	25	<i>Frecuencia (Hz)</i>	60
<i>Densidad Relativa <math>\delta</math></i>	0.883	<i>Presión Atmosférica (cmKg) H=</i>	67.03
<i>DMG (cm) =</i>	625.73	<i>Radio equivalente (cm)</i>	1.03
<i>RMG Capacitivo (cm) =</i>	1.03	<b>GRADIENTE CRITICO VISUAL (kV/cm)</b>	<b>20.69</b>

En caso que la línea anterior, hubiere sido en el nivel de 220kV, los resultados son:

**TABLA N° 2.18**

<b>Gradientes [ E ] en las Fases a, b, c (kV/cm)</b>
12.06
10.60
11.52

El valor del gradiente crítico visual (20.69 kV/cm) tiene el mismo valor en razón que este no depende de la tensión nominal, en consecuencia, para 220 kV tampoco se presentan pérdidas por efecto corona.

Como se observa, a medida que la tensión aumenta, el gradiente de trabajo en la superficie de los conductores aumenta, acercándose probablemente al valor del gradiente crítico visual, que a partir del cual se presentan las pérdidas en estudio.

Por otra parte si hacemos una simulación, para la misma línea pero en zona costera (0.00 msnm a la temperatura promedio de 25° C), los resultados del gradiente crítico visual es 22.9 KV/cm, por lo que su comportamiento bajo corona es mejor.

## CAPITULO III

### PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR EFECTO CORONA

#### 3.1. MÉTODO DE PETERSON

Se conoce que si una línea de transmisión ha sido bien dimensionada, las pérdidas por efecto corona con tiempo bueno son lo suficientemente pequeñas para ser despreciadas con fines de determinación de los parámetros de las líneas.

Peterson en 1933 determinó las pérdidas por Corona, en forma muy aceptable para tiempo bueno y para un conductor o subconductor:

$$p = \frac{0,00002094 f V^2 \phi}{\left[ \log \left( \frac{D_m}{r} \right) \right]^2} \quad kW / km \quad (3.1)$$

En este caso los parámetros son:

f = Frecuencia del sistema (Hz)

$V$  = Tensión eficaz fase a neutro (kV)

$r$  = Radio externo del conductor o subconductor.

$D_m$  = Distancia media geométrica entre subconductores.

$\emptyset$  = factor experimental que depende de la relación:

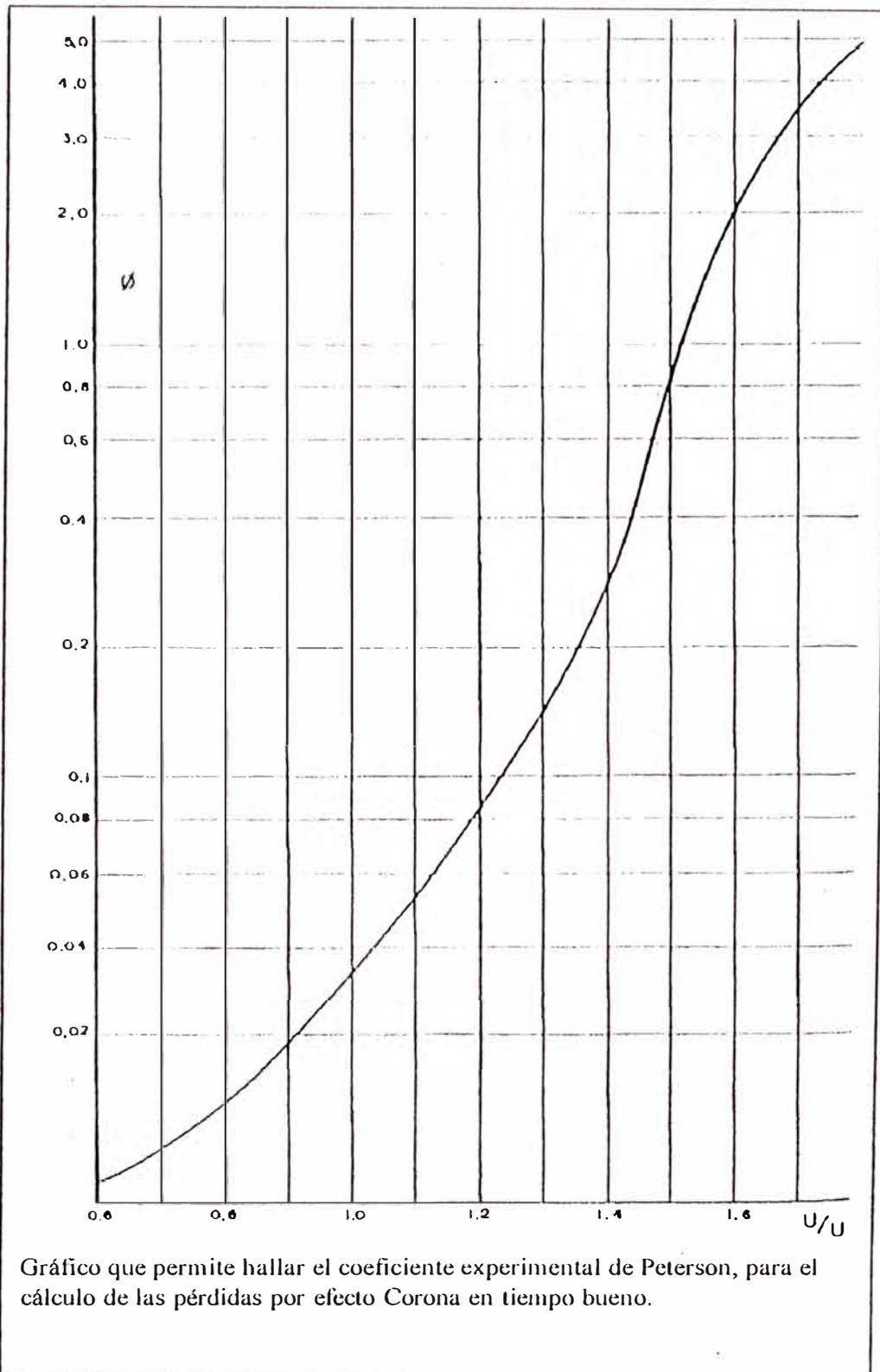
$$\frac{V}{V_0} = \frac{E}{E_{CRV}} \quad (3.2)$$

$E$  = Gradiente de potencial del conductor o subconductor (kV/cm)

$E_{CRV}$  = Gradiente crítico visual del conductor o subconductor.

Para el caso particular de la Línea de Transmisión en 66 kV Corongo - Pallasca, los resultados se muestran en el cuadro siguiente.

GRAFICA N° 3.1



En consecuencia, para tiempo bueno y según la relación de Peterson, las pérdidas por efecto Corona son nulas.

TABLA N° 3.1

<b>CONDUCTOR</b>		
f =	Frecuencia del sistema (Hz)	60
U =	Tensión eficaz NOMINAL (kV)	66
V =	Tensión eficaz fase a neutro (kV)	38.11
r =	Radio externo del conduc o subconductor (cm)	0.7285
Dm =	Distancia media geométrica entre subconductores (cm)	523.37
<b>E</b>	= Gradiente de potencial del conductor o subconductor (kV/cm)	4.70
<b>ECRV</b>	= Gradiente crítico visual del conductor o subconductor (kV/cm)	8.77
<b>E / ECRV</b>		0.5
<b>∅</b>	= factor experimental que depende de la relación: E / ECRV	0.0019
<b>Pérdidas (kW/km)</b>	<b>p =</b>	<b>0.000</b>

## RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

- Para las condiciones climáticas del Perú, se puede afirmar que para líneas de transmisión con niveles de tensión menores de 220 kV, las pérdidas por efecto corona son despreciables.
- El presente trabajo fundamentalmente ha calculado el nivel del gradiente en la superficie de los conductores, comparándolos con el nivel del gradiente crítico visual, deduciendo que en ningún caso este gradiente es superado por el gradiente de trabajo de la línea en estudio, en consecuencia las pérdidas por efecto corona son despreciables.
- No ha sido necesario calcular niveles de pérdidas corona utilizando la fórmula de Petersen para tiempo bueno, por la razón expresada en el párrafo anterior.
- Los cálculos determinan que para niveles de tensión de 220 kV, tampoco se presentarían pérdidas por este efecto.

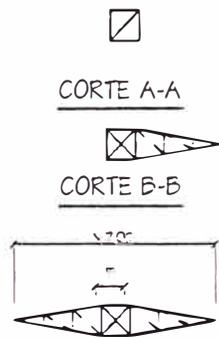
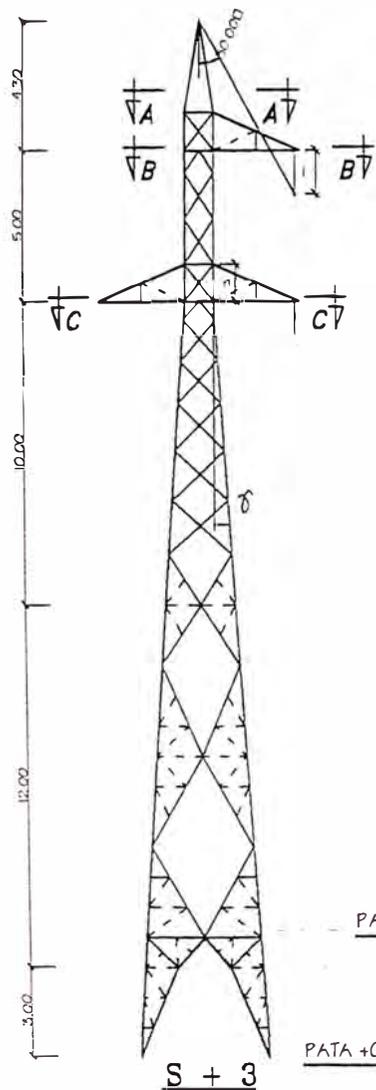
## BIBLIOGRAFÍA

- "Consideraciones teóricas y prácticas sobre el efecto corona y su incidencia en las líneas de alta tensión en el Perú", Corporación de Energía eléctrica del Mantaro. Ministerio de Energía y Minas del Perú. 1965
- Informe N° 22 "Aspectos Técnico Económicos a tomar en consideración en el dimensionamiento de Sistemas de Transmisión". KONSORTIUM LAHMEYER SALZGITTER. Ministerio de Energía y Minas. Dirección General de Electricidad. PERU. Febrero 1973
- "Técnica de las Altas Tensiones", Ing° Gilberto Enríquez Harper, Vol I Editorial Limusa . México 1980. Segunda Pre edición.
- "TRANSMISSAO DE ENERGIA ELECTRICA" Vol 2, de Rubens Darío Fuchs, LIVROS TECNICOS E CIENTIFICOS EDITORA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA 1977 Río de Janeiro. Brasil.

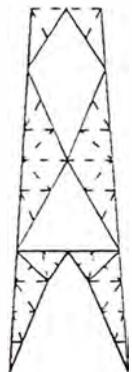
## **ANEXOS**

### **PLANOS DE ESTRUCTURAS TÍPICAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DEL PERÚ ANALIZADAS.**

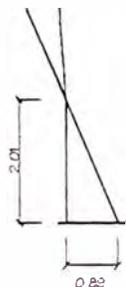
- Línea de Transmisión en 66 kV Corongo - Pallasca y Subestaciones.
- Línea de Transmisión en 138 kV Tingo María – Aucayacu.



CORTE C-C

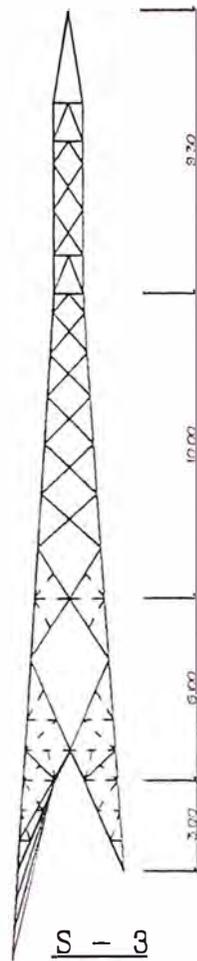


S + 0



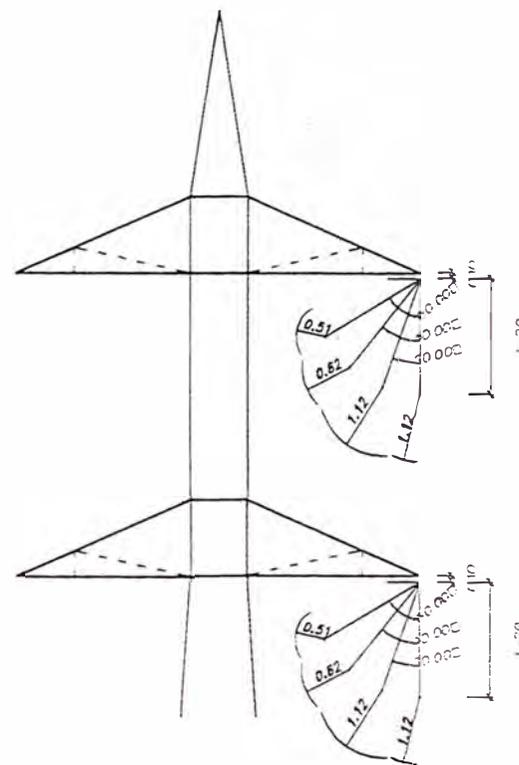
PARRILLA METALICA

- PATA -1
- PATA +0
- PATA +1
- PATA +2
- PATA +3



DISTANCIAS MINIMAS

ESC. 1/100



PRESTACIONES DE LA ESTRUCTURA "S"

Angulo de la Linea	0°	4°
Vano Viento	530	350
Vano Gravante	750	750
Vano Maximo	650	650

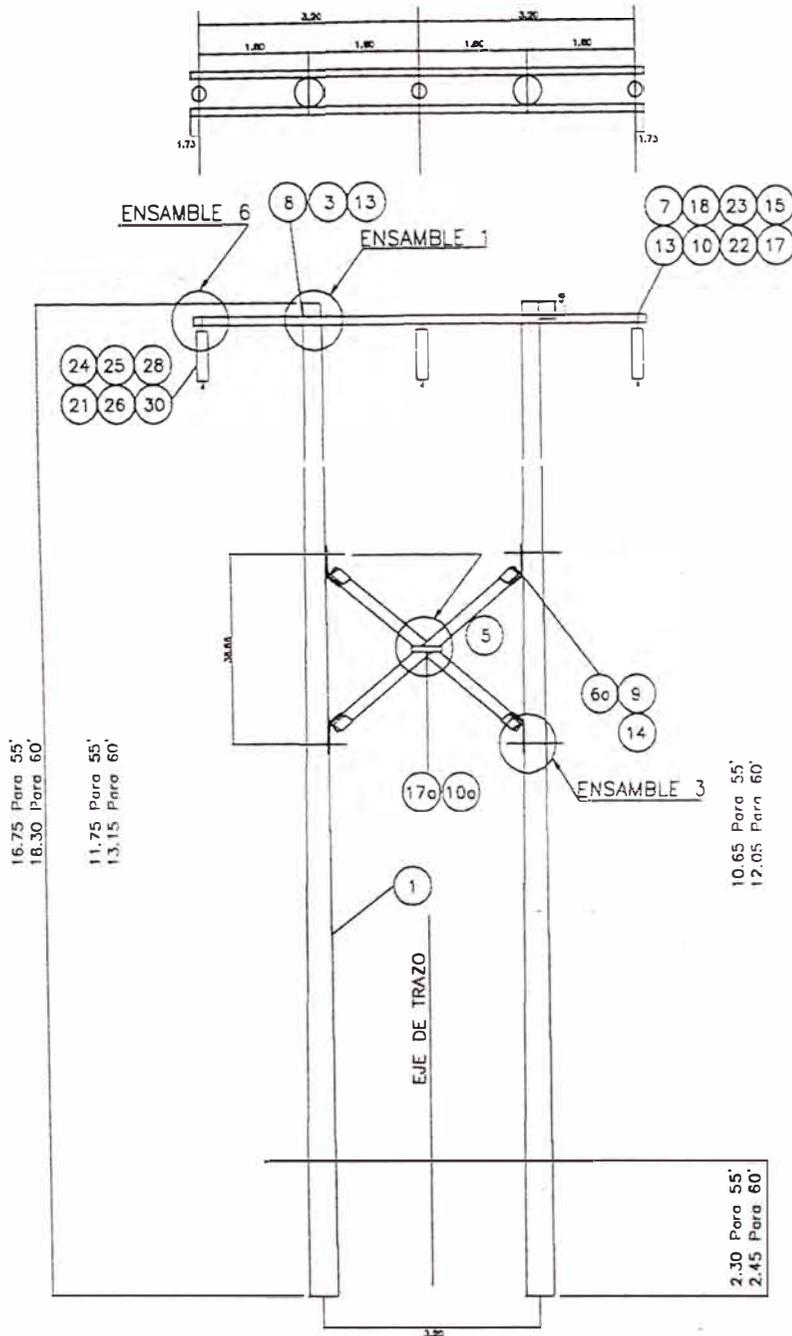
NOTAS :

- Las Dimensiones a, n y el angulo deben ser optimizadas por el Fabricante, a fin de obtener menor peso de Torre. no exedera los 4°
- Referencialmente m = 1.00 m.
- Distancias en metros.

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA	ESCALA: 1:100	FECHA: OCT 2001
	LAS PERDIDAS TRANSVERSALES EN LINEAS DE TRANSMISION TYPICAS EN EL PERU		LAMINA-N NN-01

# ESTRUCTURA TIPO HS

## ITEM CANT. HSx147 LISTA DE MATERIALES



### ENSAMBLE 3

1	2	294	POSTE DE MADERA DE 55' o 60' CLASE 3 o 4
5	2	294	BRAZOS X DE MADERA PARA SEPAR. DE POSTES 13'6"
60	4	588	EXTREMO DE BRAZOS X DE 3"x 4" C./PERNO, TUERCA, ARANDELA Y ARANDELA DE PRESION
9	4	588	PERNO MAQUINADO DE 5/8"x18" C/TUERCA Y CONTRAT.
14	4	588	ARANDELA CUADRADA CURVADA 3"x3"x1/4" HUECC 11/16"

### ENSAMBLE 1

8	2	294	PERNO MAQUINADO 5/8"x22"C/TUERCA Y CONTRATUERCA
3	2	294	CRUCETA DE MADERA 4 1/2"x5 1/2"x22'
13	4	588	ARANDELA REDONDA PLANA 2 1/2"x11/16"HUECO

### ENSAMBLE 6

7	3	441	PERNO DE DOBLE ARMADO 5/8"x24" C/4 TUERCAS Y CONTRATUERCA
13	12	1764	ARANDELAS REDONDAS PLANA 2 1/2"x11/16" HUECO
18	3	441	CONECTOR CABLE DE TIERRA 1/16"x1 1/2" C/ARANDELA
23	6	882	TUBO DE F.G.DE 3/4"Øx5 3/8" LONG.
10	6	882	PERNO MAQUINADO DE 3/8"x7" C/ARANDELA TUERCA Y CONTRATUERCA
22	3	441	ESTRIBO DE SUSPENSION 5/8x9"
17	3	441	PLATINA DE 3"x3/8"x21" LONG.
15	3	441	PERFIL L DE 3"x3"x3/8"x21"LONG.

### CADENA DE AISLADORES

21	15	2205	AISLADORES DE SUSPENSION TIPC ANTIFOG.10"x5 3/4"
24	6	882	GRILLETE
25	3	441	ANILLO-BOLA
26	3	441	CASQUILLO-OJO
28	3	441	GRAPA DE SUSPENSION
30	3	441	VARILLA DE ARMAR



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA  
LAS PERDIDAS TRANSVERSALES EN  
LINEAS DE TRANSMISION TIPCAS  
EN EL PERU

ESCALA: 1:100  
FECHA: OCT 2001

LAMINA-N  
NX-02