

# **“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS ELECTRODINÁMICOS Y TÉRMICOS BAJO CONDICIONES DE CORTOCIRCUITO EN UNA SUBESTACIÓN CONVENCIONAL APLICADO A LA SUBESTACIÓN CEIBOS DE 69/13.8 KV”**

Pedro Hidalgo Avilés <sup>1</sup>, Eduardo Izurieta Ponce <sup>2</sup>, Juan Gallo Galarza <sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Ingeniero Eléctrico en Potencia 2003.

<sup>2</sup> Ingeniero Eléctrico en Potencia 2003.

<sup>3</sup> Director de Tesis, Ingeniero Eléctrico en Potencia, Escuela Superior Politécnica del Litoral 1981, profesor de la ESPOL desde 1985.

## **RESUMEN**

Las redes eléctricas generan campos magnéticos que son producto de las corrientes que circulan por ellas y ante esto entre los conductores se presenta fuerzas de atracción o de repulsión. Al ocurrir un cortocircuito se tiene un valor alto de corriente que produce esfuerzos de gran valor denominados esfuerzos electrodinámicos así como esfuerzos térmicos que puede producir daños graves en la red.

El presente trabajo propone una metodología para el dimensionamiento adecuado de una subestación a partir de los esfuerzos electrodinámicos y térmicos máximos que se puedan presentar. Utilizando esto para el dimensionamiento de barras, selección adecuada del interruptor y para calibrar las protecciones; por lo que para la subestación seleccionada se realiza los cálculos de esfuerzos electrodinámicos y térmicos en las barras, cálculo de esfuerzos electrodinámicos en los contactos del interruptor SF6 de 69KV y los metalclad de 13.8KV y cálculos de esfuerzos electrodinámicos y térmicos en el transformador de potencia.

## **1. INTRODUCCIÓN**

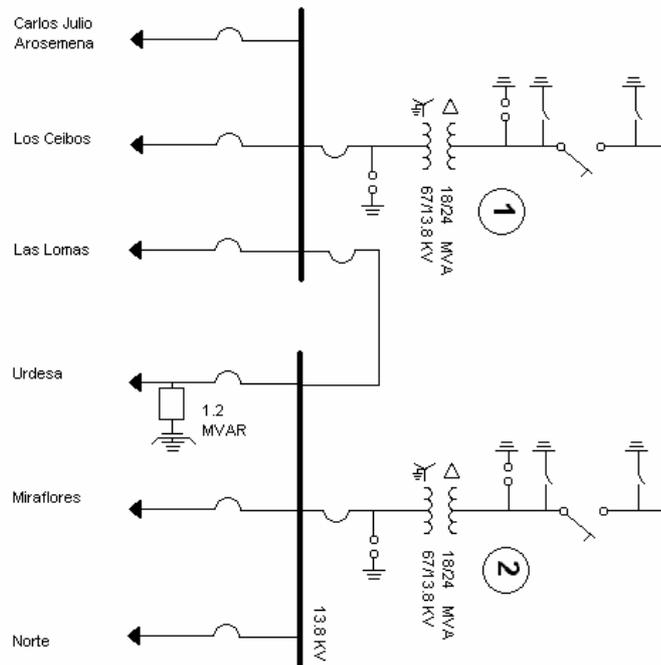
Los elevados valores que pueden alcanzar las corrientes de cortocircuitos generan esfuerzos electrodinámicos y térmicos de considerable magnitud en las barras, aisladores, interruptores y demás elementos de los circuitos recorridos por estas corrientes.

Los calentamientos producidos por las corrientes de cortocircuitos pueden conducir a la destrucción, provocando la fusión o debilitando la resistencia mecánica a alta temperatura, justamente cuando aparecen los mayores esfuerzos electrodinámicos. Por ello uno de los objetivos de este trabajo es calcular estos esfuerzos.

Cuando se presentan fuertes corrientes, los esfuerzos electrodinámicos desencadenados adquieren verdadera importancia, y si la construcción no es muy robusta, son capaces de superar la resistencia mecánica de los materiales, provocando la ruptura de barras, aisladores o el colapso del transformador. Para esto determinamos el tipo de falla que produce los más altos esfuerzos, y en base a estos calcular las fuerzas que soportaran los equipos para así poderlos dimensionar correctamente. La subestación seleccionada para llevar a cabo el estudio es la Subestación Ceibos, y comenzamos por realizar el estudio de cortocircuito para determinar la falla que nos da la peor corriente por fase.

## **2. ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO DE LA SUBESTACIÓN CEIBOS**

La subestación es de reducción de 69/13.8KV, esta subestación en realidad son dos subestaciones Ceibos 1 y Ceibos 2, en la figura 1 se aprecia el diagrama unifilar de la subestación.



**Figura 1.-** Diagrama unifilar de la subestación.

Se realiza el estudio de cortocircuito con el fin de calcular la peor falla que se pueda presentar. Para ello solicitamos a EMELEC (propietaria de la subestación) la potencia de cortocircuito la cuál es de 1172 MVA y con los datos del transformador de potencia impedancia (8%) y relación de transformación (67000/13800)

Con lo cuál se determinaron los siguientes valores de corrientes de cortocircuito, presentándose los resultados en la tabla 1:

**Tabla I.- Corrientes de cortocircuito para distintos tipos de fallas en la subestación Ceibos**

| Tipo de falla             | Ceibos 1     | Ceibos 2     |
|---------------------------|--------------|--------------|
| Trifásica - 69 Kv.        | 9806.38 (A). | 9806.38 (A). |
| Fase a tierra - 69 Kv.    | 5706.45 (A). | 5706.45 (A). |
| Fase a Fase - 69 Kv.      | 8469.74 (A). | 8469.74 (A). |
| 2 Fases a tierra - 69 Kv. | 9779.86 (A). | 9779.86 (A). |
| Trifásica -13.8Kv.        | 7476.90 (A). | 7515.29 (A). |
| Fase a tierra -13.8Kv.    | 7312.38 (A). | 7349.13 (A). |
| Fase a Fase -13.8Kv.      | 6474.38 (A). | 6508.76 (A). |
| 2 Fases a tierra -13.8Kv. | 7705.79 (A). | 7746.74 (A). |

En base a esto podemos calcular los esfuerzos electrodinámicos y térmicos máximos que se puedan presentar en los elementos de la subestación por los que circule el máximo valor de corriente determinado. En el siguiente punto tratamos el dimensionamiento de barras de la subestación de 69KV y de 13.8KV.

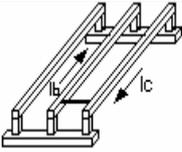
### 3. DIMENSIONAMIENTO DE BARRAS Y AISLADORES SOPORTES DE LA SUBESTACIÓN CEIBOS

Llevamos a cabo un análisis general para las distintas configuraciones y distintos tipos de barras que pueden estar presentes en una subestación y las ecuaciones que resultan del análisis nos permitirán calcular los esfuerzos para la subestación en estudio. Ahora

presentamos para el caso de conductores paralelos y en los otros ítems se indica las otras configuraciones a tratar:

### 3.1.-Fuerzas presentes cuando se tienen tres conductores paralelos en un sistema trifásico en condiciones de cortocircuito.

En esta sección se obtuvo que el caso más grave se presenta en un cortocircuito entre fases (figura 2). La distribución de fuerzas cuando los conductores son muy largos con respecto a su separación es igual a:

|  |   |
|--|---|
|  <p><b>Figura 2.-</b> Cortocircuito entre fases en barras paralelas</p> | $\frac{dF}{dl} = 6.61 \frac{I_{cc}^2}{d} \left[ \frac{L-1}{\sqrt{(L-1)^2 + a^2}} + \frac{1}{\sqrt{1^2 + d^2}} \right] * 10^{-8} \text{ [Kg/cm]}$ <p style="text-align: center;"><b>ecuación 1</b></p> |
|--|---|

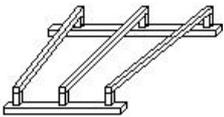
Integrando esta expresión obtenemos la fuerza total y es:

$$F_{\text{máx}} = 13.22 \frac{I_{cc}^2 \left[ \sqrt{L^2 + d^2} - d \right]}{d} * 10^{-8}; \text{ Kg. ecuación 2}$$

En donde  $I_{cc}$  es la corriente de cortocircuito simétrica;  $L$  es la longitud de las barras y  $d$  es la separación entre barras.

### 3.2.-Fuerzas presentes cuando se tienen tres conductores no paralelos en un sistema trifásico en condiciones de falla.

Una disposición común de los conductores que existe en la subestación en estudio se muestra en la figura 3.

|  |   |
|--|---|
|  <p><b>Figura 3.-</b> Disposición no paralela entre barras.</p> | <p>Y la distribución de fuerzas aplicando los mismos criterios es:</p> $\frac{dF}{dy} = \frac{6.61 I_{cc}^2}{\cos(\beta)(a + \tan(\beta)y)} \left\{ \frac{\cos(\beta)}{2\sqrt{(c-y)^2 + b^2}} \left[ (c-y) \left( 1 + \frac{1}{\cos^2 \beta} \right) + \tan \beta [b + a + \tan \beta y] \right] - \frac{b-a}{d} \frac{a}{\sqrt{a^2 + y^2}} - \frac{c}{d} \frac{y}{\sqrt{a^2 + y^2}} \right\} \text{ [Kg/cm]}$ <p style="text-align: center;"><b>ecuación 3</b></p> |
|--|---|

En donde  $a$  es la menor distancia entre barras;  $b$  es la mayor distancia;  $c$  es la longitud de la menor barra y  $d$  la longitud de la mayor;  $\beta$  es el ángulo de inclinación de la barra.

Pero aquí no hemos tomado en cuenta el tipo de barra en el siguiente punto presentamos un análisis y resultados de los esfuerzos para los tipos de barra presente en la subestación.

### 3.3.-Tensión y distancia máxima entre apoyos de las barras considerando la fuerza máxima debida a cortocircuitos.

Se presentan tablas que indican la tensión máxima y la longitud máxima que pueden tener las barras tubulares, y cilíndricas, en función del tipo de carga que soportan.

**Tabla II: Tensión máxima y longitud máxima de barras cilíndricas cuando la sujeción en ambos extremos es tipo poste**

| Tipo de Carga       | Tensión Máxima (Kg.)  | Longitud Máx. (m)   |
|---------------------|---|---|
| Carga Uniforme      | $\frac{8qL^2}{3\pi D^3}$  | $\sqrt{\frac{3\pi D^3 \sigma_{\text{máx}}}{8q}}$            |
| Barras paralelas    | $\frac{L^2}{3\pi D^3} [8q_1 + 5q_2]$  | $\sqrt{\frac{3\pi D^3 \sigma_{\text{máx}}}{[8q_1 + 5q_2]}}$ |
| Barras NO paralelas | $\frac{1}{\pi D^3} \left[ \left( \frac{8}{3}q_1 + \frac{8}{5}q_2 \right) L_1^2 + \left( \frac{56}{5}q_2 + 16q_1 \right) L_1 L_2 + \left( 16q_3 + \frac{32}{3}q_4 \right) L_2^2 \right]$ | -   |

**Tabla III: Tensión máxima y longitud máxima de barras tubulares:**

| Tipo de Carga       | Tensión Máxima (Kg.)   | Longitud Máx. (m)   |
|---------------------|--|---|
| Carga uniforme      | $\frac{qRL^2}{3\pi(R^4 - r^4)}$  | $\sqrt{\frac{3\pi(R^4 - r^4)\sigma_{\text{máx}}}{Rq}}$              |
| Barras paralelas    | $\frac{[8q_1 + 5q_2]RL^2}{24\pi(R^4 - r^4)}$   | $\sqrt{\frac{24\pi\sigma_{\text{máx}}(R^4 - r^4)}{[8q_1 + 5q_2]R}}$ |
| Barras NO paralelas | $\frac{R}{\pi(R^4 - r^4)} \left[ \left( \frac{1}{3}q_1 + \frac{1}{5}q_2 \right) L_1^2 + \left( \frac{7}{5}q_2 + 2q_1 \right) L_1 L_2 + \left( 2q_3 + \frac{4}{3}q_4 \right) L_2^2 \right]$ | -   |

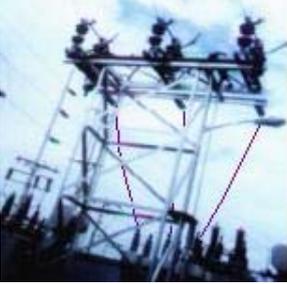
**Tabla IV.-Esfuerzos que soportan los aisladores debido a las fuerzas electrodinámicas.**

| Tipo de Carga       | Reacciones  | Momento Máximo           |
|---------------------|---|--------------------------|
| Carga Uniforme      | $R_1 = R_2 = \frac{qL}{2}$  | $M_{\text{máx}} = R * Y$ |
| Barras paralelas    | $R_1 = R_2 = 6.61 \frac{I_{cc}^2 \left[ \sqrt{L^2 + d^2} - d \right]}{d} * 10^{-8} \text{ Kg.}$                               | $M_{\text{máx}} = R * Y$ |
| Barras NO paralelas | $R_A = \frac{1}{2}q_4L_2 + q_3L_2 + \frac{7}{20}q_2L_1 + \frac{1}{2}q_1L_1$<br>$R_B = \frac{3}{20}q_2L_1 + \frac{1}{2}q_1L_1$ | $M_{\text{máx}} = R * Y$ |

Con los resultados obtenidos de este análisis procedemos a aplicarlo a la subestación.

### 3.4.-Aplicación del estudio de los esfuerzos electrodinámicos a las barras y aisladores de la subestación Ceibos.

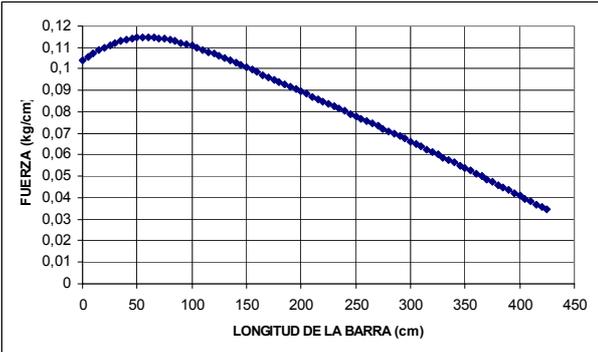
#### 3.4.1- Cálculo de la distribución de fuerzas, de la fuerza total y verificación de la longitud máxima de las barras que van del seccionador de 69 KV. al interruptor SF<sub>6</sub>.

|   |                                   |   |
|---|-----------------------------------|---|
|  <p><b>Figura 4:</b> Barras que van del seccionador de 69 KV. Al interruptor SF<sub>6</sub>.</p> | Tipo de barra: Cable (cilíndrica) | Menor dist. entre barras: 80 cm.                  |
|   | Material de la barra: Cobre.      | Tensión resistente máx.: 3860Kg/cm <sup>2</sup> . |
|   | Longitud: 470 cm.                 | I <sub>cc</sub> de fase a fase: 8469.74(A)        |
|   | Mayor dist. entre barras: 213 cm. | Diám. de la barra: 1.168 cm.                      |
| Tipo de sujeción: Aislad. Tipo Poste  |                                   |   |

La distribución de fuerzas de acuerdo a la ecuación 3 es:

$$\frac{dF}{dy} = \frac{4.967}{80 + 0.314y} \left[ \frac{939 - 1.91y}{\sqrt{(425 - y)^2 + 45540}} - \frac{23.9 - 0.954y}{\sqrt{y^2 + 6400}} \right] \text{ (Kg/cm)}$$

Obteniéndose a partir de la ecuación el siguiente gráfico de distribución de fuerza:



**Figura 5.-** Curva de la distribución de fuerzas de barras que van del seccionador de 69Kv al interruptor SF<sub>6</sub>

La fuerza total la es:  $F_{\text{total}} = 35.36 \text{ (Kg.)}$

La tensión máxima que va a soportar la barra es:  $\sigma_{\text{máx.}} = 13482 \text{ Kg/cm}^2$

#### 3.4.2.- Cálculo de la distribución de fuerzas, de la fuerza total y verificación de la longitud máxima de las barras que van del interruptor SF<sub>6</sub> a los pararrayos del lado de 69 Kv del transformador.

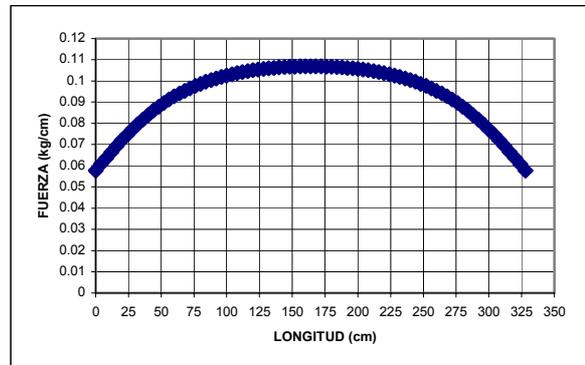
|   |   |   |
|---|---|---|
|  <p><b>Figura 6:</b> Barras que van del interruptor SF<sub>6</sub>. al pararrayos del lado de 69 Kv del trafo.</p> | Tipo de barra: Cable (cilíndrica)         | I <sub>cc</sub> de fase a fase: 8469.74(A)      |
|   | Material de la barra: Cobre.              | Diámetro de la barra: 1.168 cm.                 |
|   | <b>a</b> = Longitud de la barra : 328 cm  | Tensión resistente máx.: 3860Kg/cm <sup>2</sup> |
|   | <b>b</b> = Distancia entre barras: 80 cm. | Tipo de sujeción: Aislad. Tipo Poste            |

La distribución de fuerzas se la obtiene a partir de la ec.1:

$$\frac{dF}{dl} = 0.0595 \left[ \frac{328-l}{\sqrt{(328-l)^2 + 6400}} + \frac{l}{\sqrt{l^2 + 6400}} \right]$$

[Kg/cm]

Obteniéndose a partir de la ecuación el siguiente grafico de distribución de fuerza:

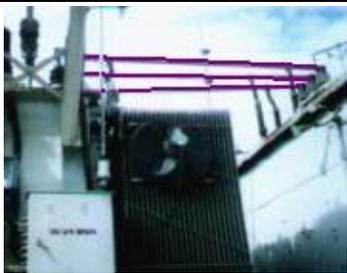


**Figura 7.-** Curva de la distribución de fuerzas de barras que van del interruptor SF<sub>6</sub>. al pararrayos del lado de 69 Kv del trafo.

La fuerza total es: F<sub>total</sub> = 30.54 Kg.

La longitud máxima que puede tener la barra es:  $L_{m\acute{a}x.} = 286 \text{ cm.}$

**3.5.- Cálculo de la distribución de fuerzas, de la fuerza total y verificación de la longitud máxima de las barras que van de los pasatapas del lado de 13.8 Kv. del transformador a los aisladores tipo poste ubicados sobre la Metalclad.**

|   |                                      |  |
|---|--------------------------------------|--|
|  <p><b>Figura 8:</b> Barras que van de los pasatapas del lado de 13.8Kv. del trafo a los aisladores ubicados sobre la Metalclad.</p> | Tipo de barra: Tubular               | Menor dist. entre barras: 30 cm.                             |
|   | Material de la barra: Cobre.         | Tensión resistente máx.: 3860Kg/cm <sup>2</sup> .            |
|   | Longitud: 400 cm.                    | I <sub>cc</sub> de fase a fase: 6474(A)                      |
|   | Mayor dist. entre barras: 50 cm.     | Diámetro exterior: 4.826 cm.<br>Diámetro interior: 4.064 cm. |
|   | Tipo de sujeción: Aislad. Tipo Poste |  |

La distribución de fuerza es:

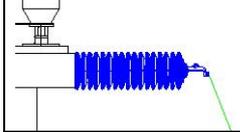
$$\frac{dF}{dy} = \frac{2.78}{30 + 0.0816y} \left[ \frac{495 - 1.98y}{\sqrt{(245 - y)^2 + 2500}} - \frac{2.44 - 0.997y}{\sqrt{y^2 + 900}} \right] \text{ (Kg./cm.)}$$

La fuerza total es: F<sub>total</sub> = 44.92 (Kg.).

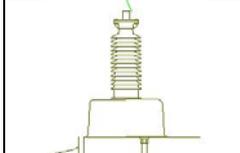
La tensión máxima que va a soportar la barra es:  $\sigma_{m\acute{a}x.} = 274.59 \text{ (Kg./cm}^2\text{.)}$

### 3.6.-Aplicación del estudio de los esfuerzos electrodinámicos a los aisladores de la subestación.

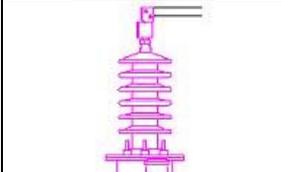
#### 3.6.1.- Esfuerzos que soporta el aislador ubicado en la torre donde se encuentra el seccionador de 69 Kv.

|   |                 |                |
|---|-----------------|----------------|
|  | Reacción:       | 10.68 Kg.      |
|   | Momento Máximo: | 875.3 (Kg.cm.) |

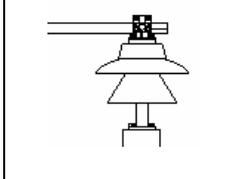
#### 3.6.2.- Esfuerzos que soporta el aislador ubicado sobre la entrada de alimentación del interruptor SF<sub>6</sub>

|   |                 |                 |
|---|-----------------|-----------------|
|  | Reacción:       | 23.097 Kg.      |
|   | Momento Máximo: | 1455.1 (Kg.cm.) |

#### 3.6.3.-Esfuerzos que soporta el pasatapas de 13.8Kv. del transformador.

|   |                 |                |
|---|-----------------|----------------|
|  | Reacción:       | 11.58 Kg.      |
|   | Momento Máximo: | 845.2 (Kg.cm.) |

#### 3.6.4.- Esfuerzos que soporta el aislador ubicado sobre la entrada de alimentación del interruptor SF<sub>6</sub>

|   |                 |               |
|---|-----------------|---------------|
|  | Reacción:       | 26.62 Kg.     |
|   | Momento Máximo: | 1091 (Kg.cm.) |

De los resultados obtenidos podemos concluir que:

- La barra de cobre que va del seccionador al interruptor SF<sub>6</sub> de 69 kv, soportara una tensión de **13482 (kg/cm<sup>2</sup>)** con las dimensiones y separación actuales, como la tensión de ruptura del cobre es de 3860 (kg/cm<sup>2</sup>) concluimos que **no soportara dicha tensión**. por lo tanto hay que tomar medidas correctivas. La solución más conveniente es aumentar la sección de la barra. ya que es económica y fácil de aplicar. El área mínima que debe tener el conductor para que no sobrepase la tensión máxima resistente del cobre manteniendo constante la longitud y la corriente de cortocircuito es:

$$d = 1.772 \text{ cm} \Rightarrow \text{area} = 246.6 \text{ mm}^2 = 500 \text{ mcm}$$

- En la barra que va del interruptor SF<sub>6</sub> al pararrayos ubicado sobre el lado de 69 kv. del transformador que se analizo en la sección 3.5.2 sucede lo mismo por lo tanto, el área mínima que debe tener es:

$$d = 1.28 \text{ cm} \Rightarrow \text{area} = 128.7 \text{ mm}^2 = 250 \text{ mcm}$$

#### 4. ESTUDIO DE LOS EFECTOS TÉRMICOS DEBIDO A CORTOCIRCUITOS EN LAS BARRAS DE LA SUBESTACIÓN CEIBOS: OBTENCIÓN DE LAS CURVAS TEMPERATURA VS. TIEMPO.

A partir de los fenómenos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) se determina una ecuación de transferencia de energía por unidad de tiempo.

**4.1.- Ecuación para el equilibrio térmico en una barra por la cual circula corriente.-** Tomando en cuenta que hay variables que cambian con la temperatura, la ecuación que gobierna la transferencia de energía es:

$$I^2 R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]L - hA_{\text{sup}}(T - T_{\text{air}}) - \varepsilon\sigma A_{\text{sup}}(T^4 - T_{\text{air}}^4) = \rho cV \frac{dT}{dt} \text{ ecuación. 4.}$$

En donde:

|   |   |
|---|---|
| $R_0$ ( $\Omega$ ) es la resistencia de los conductores a la temperatura $T_1$ .      | $h$ ( $W/m^2 \text{ } ^\circ K$ ): Coef. de transferencia de calor por convección . |
| $\alpha$ ( $1/^\circ C$ ) es el coef. de variación de resistencia con la temperatura. | $A_{\text{sup}}$ ( $m^2$ ): Es el área superficial de la barra.                     |
| $T$ ( $^\circ C$ ) es la sobre-temperatura a la que se encuentra el conductor.        | $T$ ( $^\circ K$ ): Es la temperatura final que alcanzara el conductor.             |
| $T_0$ ( $^\circ C$ ) es la temperatura de referencia del conductor.                   | $T_{\text{air}}$ ( $^\circ K$ ): Es la temperatura del ambiente.                    |
| $(kg/m^3)$ : Densidad del material de la barra.                                       | $V$ ( $m^3$ ): Volumen de la barra.   |
|   | $C$ ( $J/Kg.K$ ): Calor específico.   |

Determinada la ecuación procedemos aplicarla.

#### 4.2.- Obtención de las curvas que rigen la variación de la temperatura en función del tiempo de cortocircuito en las barras de la subestación.

Para la obtención de las curvas utilizamos la ec. 4 y con las siguientes condiciones:

**Tabla 4.3: Condiciones ambientales**

|  |   |
|--|---|
| Densidad del aire a 311K ( $\rho_{\text{aire}}$ ): 1.1351( $Kg./m^3$ ) | Velocidad del viento: 1m/seg.           |
| Viscosidad del aire 311K ( $\mu_f$ ): 1.98E-5 ( $Kg./m*s$ )            | Temperatura del ambiente: 38 $^\circ C$ |
| Numero de Prandtl del aire 311K ( $Pr_f$ ): 0.708                      | Presión atmosférica: 1 atm.             |

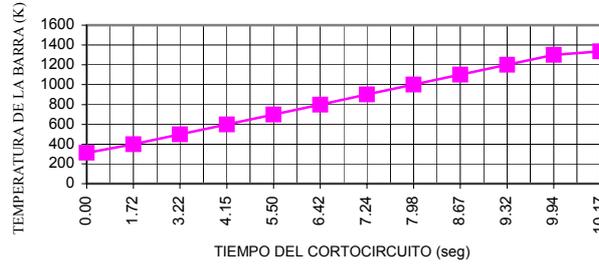
#### 4.2.1.-Obtención de la curva de Temperatura vs. Tiempo para la barra cilíndrica del lado de 69KV de la subestación.

Los datos que utilizaremos son los siguientes:

**Tabla 4.4: Datos de la barra cilíndrica**

|  |   |
|--|---|
| Material de la barra: Cobre                                  | Densidad de la barra ( $\rho$ ): 8933 ( $Kg./m^3$ )             |
| Diám. de la barra: 0.0117 (m).                               | Calor específico de la barra: 385 ( $J/Kg*K$ )                  |
| Emisividad de la barra ( $\varepsilon$ ): 0.8                | Resist. barra a 50 $^\circ C$ ( $R_0$ ): 2.37E-4 ( $\Omega/m$ ) |
| Conduct. Térm. barra a 311K: 0.0262 ( $W/m*K$ )              | Corriente de cortocircuito 7705.786 (A).                        |
| Coef. de var. de resist. con Temp. de la barra: 0.00339(1/K) |   |

La curva obtenida es la siguiente:



**Figura 9:** TEMPERATURA DE LA BARRA DE 69KV EN FUNCION DE LA DURACIÓN DEL CORTOCIRCUITO

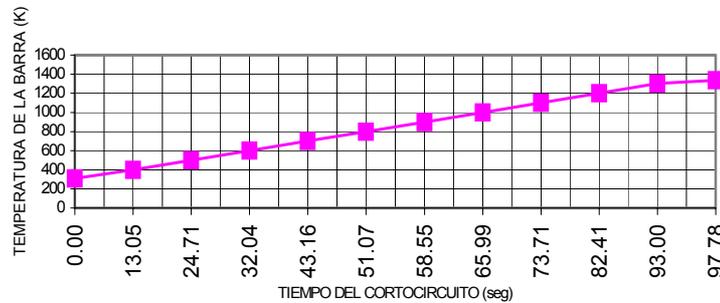
**4.2.2.-Obtención de la curva de Temperatura vs. Tiempo para la barra tubular del lado de 13.8 KV de la subestación.**

Los datos que utilizaremos son los siguientes:

**Tabla 4.5**

|   |   |
|---|---|
| Material de la barra: Cobre                                 | Densidad de la barra ( $\rho$ ): 8933 (Kg./m <sup>3</sup> )     |
| Diám. exterior de la barra: 0.040 (m).                      | Calor específico de la barra: 385 (J/Kg*K)                      |
| Diám. interior de la barra: 0.036 (m).                      | Resist. barra a 50 <sup>0</sup> C (Ro): 1.087E-4 ( $\Omega$ /m) |
| Coef. de var. de resist. con Temp. de la barra: 0.0039(1/K) | Emisividad de la barra ( $\epsilon$ ): 0.8                      |
| Conduct. Térm. barra a 311K: 0.0262 (W/m*K)                 | Corriente de cortocircuito 7705.786 (A).                        |

La curva obtenida es la siguiente:



**Figura 10:** TEMPERATURA DE LA BARRA TUBULAR DE 13.8KV EN FUNCION DE LA DURACIÓN DEL CORTOCIRCUITO

De los resultados obtenidos podemos concluir que:

- En caso de que se presentase la condición más crítica de cortocircuito en una fase del sistema de barras del lado de 69 KV, en tan solo 10.17 seg. se alcanzaría el punto de fusión del cobre que es de 1336K., esto se daría en caso de que el corto-circuito no pueda ser despejado por las protecciones. Sabiendo que no es recomendable que una barra pase de los 573K ya que a partir de esta temperatura pierde sus propiedades térmicas, eléctricas y mecánicas, la falla debe ser despejada antes de 4.15 seg. para que la barra no alcance esta temperatura.
- En el lado de 13.8 KV, en caso de que se presentase la condición más crítica de cortocircuito en una fase del sistema de barras de dicho lado en 97.78 seg. se alcanzaría el punto de fusión del cobre, esto se daría en caso de que el corto-circuito no pueda ser despejado por las protecciones.

## 5. ESTUDIO DE LOS ESFUERZOS ELECTRODINÁMICOS EN LOS INTERRUPTORES DE LA SUBESTACIÓN CEIBOS

En los interruptores se presenta fuerza de separación en los contactos y vamos a determinar dicho valor y como evitarlo.

### 5.1.-Esfuerzos electrodinámicos en los contactos de los interruptores.

Puesto que el flujo de corriente a través de los contactos converge a un punto o a pocos, fuerzas se oponen al cierre de los contacto, la fuerza de separación es:

$$F = 0.70i^2 \ln\left(\frac{60}{d}\right)10^{-8} \text{ Kg.} \quad \text{ecuación . 5.}$$

En donde  $i$  es la corriente en amperios y  $d$  es el diámetro de los puntos de contacto en milímetros. Estas fuerzas deben ser compensadas por el uso de resortes lo bastantes fuertes, o bien compensando los esfuerzos mediante fuerzas electrodinámicas contrarias. Una solución es el uso de *dedos adinámicos* .Una expresión para la fuerza que soporta cada dedo es la siguiente:

$$F = \frac{\mu I^2}{2\pi n^2} \left[ 2 \sum_{m=1}^{(n-2)/2} \left[ \frac{\sqrt{L^2 + \left(2R \cos\left(\frac{180}{n}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{180m}{n}\right)\right)^2}}{2R \cos\left(\frac{180}{n}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{180m}{n}\right)} - 1 \right] + \frac{\sqrt{L^2 + \left(2R \cos\left(\frac{180}{n}\right)\right)^2}}{2R \cos\left(\frac{180}{n}\right)} - 1 \right] \quad \text{ec. 6}$$

En donde  $L$  es la longitud del conductor en este caso del dedo,  $a$  es la separación entre dedos;  $R$  es el radio del anillo formado por los dedos,  $n$  es el numero de dedos y  $m = 1, 2, \dots, (n-2)/2$ .

#### 5.1.1.- Esfuerzos Electrodinámicos En Los Contactos Del Interruptor Tipo DHP-VR Vacío A 13.8 Kv.

Los contactos principales constan de 14 dedos. A partir de la ecuación 6 tenemos que la fuerza de atracción que soporta cada dedo es:

$$F_{\text{atracc.}} = 0.64814 \text{ Kg.}$$

La fuerza de separación que reciben cada contacto la encontramos aplicando la ecuación 5. El diámetro es 0.5 mm. y la corriente que circula por cada contacto es 1401.12 A.

$$F_{\text{sep}} = 0.066 \text{ Kg.}$$

#### 5.1.2.- Esfuerzos electrodinámicos en los contactos del interruptor en gas SF<sub>6</sub> tipo 72PM40-12.

Los contactos principales constan de 18 grupos de tres dedos formando un anillo. la fuerza de separación que soporta cada placa del dedo es:

$$F_{\text{sep}} = 0.00716 \text{ Kg.}$$

### 5.2.- Esfuerzos térmicos en los contactos de los interruptores.

El aumento de la temperatura en los puntos de contacto, con corrientes de corta duración, viene dado por:

$$t_f = \frac{i^2 \rho_{20} (1 - 20\alpha) + 8k\pi^2 a^2 10^4 t_o}{8k\pi^2 a^2 10^4 - i^2 \rho_{20} \alpha} \quad ^\circ\text{C} \quad \text{ec. 5.6}$$

Siendo  $\rho$  la resistividad del material;  $k$  la conductividad térmica del conductor en vatios / centímetro por grado centígrado,  $i$ , la amplitud de la corriente en amperios, y  $a$ , el radio del punto de contacto en centímetros.

### 5.2.1.-Esfuerzos térmicos en los contactos del interruptor Tipo DHP-VR VACIO a 13.8Kv.

En base a los siguientes datos:

|                        |                               |                                    |
|------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Temp. Inicial : 35°C   | Resistividad:0,162W.cm        | Coef. De Temp. 0,0041 (1/°C)       |
| Icc en el dedo: 1401 A | Conduct. Térm.: 4.19 (w/cm°C) | Material: Cobre blindado en plata. |

Y de acuerdo a la ecuación 5 se tiene la siguiente curva:

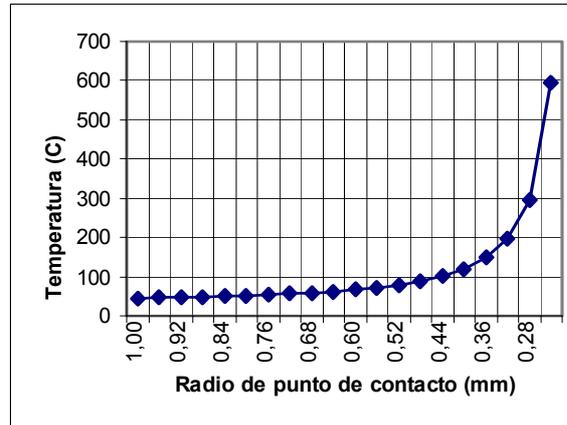


Figura 11: Curva temperatura - radio del punto de contacto para el interruptor a 13.8 KV.

### 5.2.2.-Esfuerzos térmicos en los contactos del interruptor en gas SF6 TIPO 72PM40-12.

En base a los siguientes datos:

|                          |                               |                                    |
|--------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Temp. Inicial : 35°C     | Resistividad:0,162W.cm        | Coef. De Temp. 0,0041 (1/°C)       |
| Icc en el dedo: 462.28 A | Conduct. Térm.: 4.19 (w/cm°C) | Material: Cobre blindado en plata. |

Y de acuerdo a la ecuación 5 se tiene la siguiente curva:

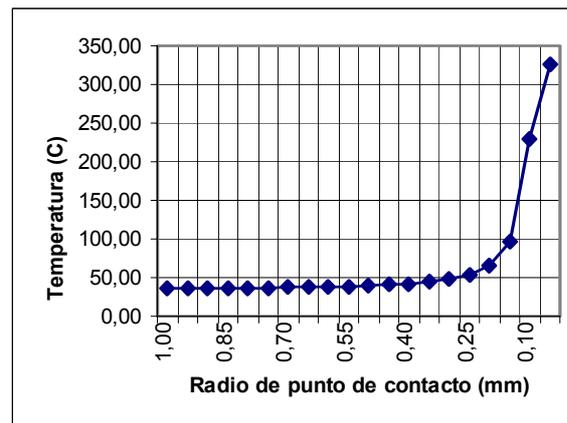


Figura 12: Curva temperatura - radio del punto de contacto para el interruptor SF<sub>6</sub> a 69 KV.

Para compensar la fuerza de separación entre contactos se proponen dos métodos:

- El primero utiliza contactos a base de dedos. Si observamos la ec. 6: vemos que si aumentamos el número de dedos y el radio de los contactos la fuerza se reducirá considerablemente.
- El otro método es el uso de resortes como en el caso del interruptor SF<sub>6</sub>.

Las temperaturas que pueden alcanzar los contactos en caso de presentarse un cortocircuito dependen de la intensidad de presión de los contactos, de la dureza del material y del valor de intensidad de corriente; por ello es recomendable el uso de los contactos con dedos ya que incrementan la presión de contacto en el momento del cortocircuito.

## 6. ESTUDIO DE LOS ESFUERZOS TÉRMICOS Y ELECTRODINÁMICOS EN LOS TRANSFORMADORES DE LA SUBESTACIÓN CEIBOS

Los cálculos de esfuerzos electrodinámicos y térmicos son de suma importancia para los diseñadores de transformadores, ya que estos esfuerzos afectan de manera significativa la vida útil del transformador.

### 6.1.-Esfuerzos térmicos en los devanados de un transformador.

La temperatura final  $T_F$  que puede alcanzar un devanado del transformador viene dado por:

$$T_F = T_o + \frac{2(T_o + 235)}{\frac{\rho^2 * T_{cc}}{101000} - 1} \quad [^\circ C] \quad \text{para el cobre} \quad \text{ecuación 7}$$

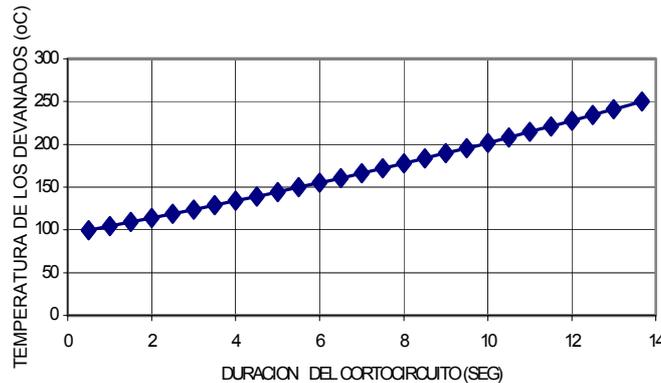
Donde:

|                                      |   |  |
|--------------------------------------|---|--|
| $T_o$ : Temp. inicial del conductor. | $\rho$ : Densidad de corriente en A/mm <sup>2</sup> . | $T_{cc}$ : Duración del cortocircuito. |
|--------------------------------------|---|--|

Con la ecuación 7 y de acuerdo con los datos siguientes:

|   |  |
|---|--|
| Icc trifásica: 7476.904 A.                              | Área del cond. del devanado de AT: 40.14 mm <sup>2</sup> . |
| Área del cond. del devanado BT: 194.9 mm <sup>2</sup> . | Material de los devanados: Cobre.                          |
| Máxima temperatura ambiente: 40°C.                      | Máx. elevación de Temp. devanados: 55°C.                   |

Tenemos la siguiente curva:



**Figura 13:** Curva Temperatura-Tiempo de los devanados del Transf. Ceibos 1 para falla de fase a tierra.

### 6.2.-Esfuerzos electrodinámicos en transformadores:

La fuerza media que se puede presentar es:

$$F_{media} = 2 * 10^{-7} \frac{2\pi R n^2 i^2}{kl} \quad [N] \quad \text{ecuación 8.}$$

Donde  $n$  es número de espiras en la bobina exterior e  $i$  es el valor instantáneo de la corriente,  $kl$  en metros, es la longitud media del camino del flujo de dispersión, siendo  $k$  un factor (aproximadamente 1.8). Cuando existe desplazamiento axial entre las bobinas la componente radial será  $F_{med} \cos \alpha$  y la componente axial  $F_{med} \sin \alpha$ .

**6.2.1.- Cargas sobre arrollamiento externo.-**Cada conductor del arrollamiento externo esta sometido a cargas específicas radiales  $p$  y axiales  $q$ , la carga radial provoca una sollicitación de tracción, siendo la tensión correspondiente igual a:

$$\sigma_r = \frac{p \times r}{S_c} \text{ ecuación 9}$$

siendo  $S_c$  la sección del anillo conductor. La carga específica radial resulta:

$$p = 1.28 \times 10^{-7} * \frac{NI}{H} * I_c \text{ (Kg/mm}^2\text{)} \text{ ec. 10}$$

Siendo NI la fuerza magnetomotriz, H la altura del devanado y  $I_c$  la corriente en el conductor. La tensión máxima es:

$$\sigma_a = \frac{q}{2b} \left[ \frac{l}{h} \right]^2 \text{ ecuación 11}$$

**6.2.2.- Cargas del arrollamiento interno.-** La diferencia con el arrollamiento externo es que las fuerzas radiales actuantes tienen dirección opuesta. Para un anillo con apoyos las sollicitaciones en una sección cualquiera del (anillo) las tensiones normales máximas, es:

$$\sigma = \sigma_A + \sigma_R = \frac{q}{2b} \left[ \frac{l}{h} \right]^2 + \xi \frac{p \times R}{S_c}$$

El factor  $\xi$  es función del número de distanciadores y de  $\beta$  que es la relación entre el espesor del conductor y el radio medio del anillo.

En el transformador 18/24 MVA de la subestación Ceibos se determinan los esfuerzos que se producirán entre los devanados de baja y alta tensión en caso de presentarse una falla de dos fases a tierra que es la que produce una mayor corriente de cortocircuito. Los datos del transformador son los siguientes (ciertos datos son aproximados):

|  |   |
|--|---|
| Capacidad, OA/FA                                 | 18000/24000 KVA                           |
| Tensión Nominal primaria                         | 67000 V.                                  |
| Tensión Nominal secundaria                       | 13800 V.                                  |
| Corriente de Cortocircuito                       | 1735.07 A.                                |
| Material de los devanados                        | Cobre                                     |
| Tipo de núcleo                                   | Columna                                   |
| Diámetro del núcleo                              | 50 cm                                     |
| <b>Datos Del Devanado De Alta Tensión</b>        |   |
| Número de espiras por fase                       | 915                                       |
| Altura del devanado                              | 150 cm                                    |
| Características del devanado                     | 2 espiras por capa con 8 capas por disco. |
| Dimensiones del Cond. desnudo                    | 4.621*9.266 mm                            |
| Dimensiones del Cond. aislado                    | 5.230*9.80 mm                             |
| Área del conductor                               | 41.65 mm <sup>2</sup>                     |
| Espesor del devanado                             | 45.34 mm                                  |
| <b>Datos Del Devanado De Baja Tensión</b>        |   |
| Número de espiras por fase                       | 109                                       |
| Altura del devanado                              | 175 cm                                    |
| Características del devanado                     | 5 conductores en paralelo.                |
| Dimensiones del Cond. desnudo                    | 4.51*9.3 mm                               |
| Dimensiones del Cond. aislado                    | 5.22*9.83 mm                              |
| Área del conductor                               | 5*41.6 = 208 mm <sup>2</sup>              |
| Espesor del devanado                             | 45.34 mm                                  |
| Espesor del devanado                             | 26.1 mm                                   |
| Espesor total de los devanados y distanciadores. | 14.5 cm.                                  |

La fuerza media que se producirá se la obtiene aplicando la ec. 7:

$$F_{\text{media}} = 227167.78 \text{ Kg.}$$

Asumiendo que los puntos centrales de los devanados están mutuamente desplazados un ángulo de desplazamiento de  $25^\circ$  en sentido axial las componentes de la fuerza media son:

$$F_{\text{radial}} = 205883.93 \text{ Kg.} \quad F_{\text{axial}} = 96005.25 \text{ Kg.}$$

La fuerza específica  $p$  se la encuentra utilizando la ecuación 10 y es:  $p = 1.28 \text{ Kg./mm}$

La tensión que soportara el anillo aplicando la ecuación 9 es:  $\sigma_r = 10.72 \text{ Kg./mm}^2$

La tensión resultante sobre un conductor del devanado externo será:

$$\sigma = \sigma_r + \sigma_a \quad \boxed{\sigma = 14.43 \text{ Kg./mm}^2}$$

La fuerza media que se producirá:

$$F_{\text{media}} = 455933.25 \text{ Kg.}$$

Asumiendo que los puntos centrales de los devanados están mutuamente desplazados un ángulo de desplazamiento de  $25^\circ$  en sentido axial las componentes de la fuerza media son:

$$F_{\text{radial}} = 413215.85 \text{ Kg.} \quad F_{\text{axial}} = 192685.72 \text{ Kg.}$$

De acuerdo a la normas IEC la temperatura a la cuál no se debe llegar ya que se degradarían los aislamientos es  $250^\circ\text{C}$ , esta temperatura el transformador de Ceibos 1 la alcanza en 13.5 seg. si el cortocircuito no fuera despejado, como sabemos la subestación esta calibrada para abrir a los 7 ciclos y no tiene recierre y analizando la figura 6.2 podemos apreciar de que ni siquiera se alcanza los  $100^\circ\text{C}$ . Es decir se constata que los transformadores están diseñados para soportar estos valores de temperatura.

El desarrollo de los cálculos de esfuerzos electrodinámicos nos lleva a ver los valores tan altos que se presenta, si hablamos de la fuerza que se presenta en el devanado exterior tenemos un valor de fuerza radial de 205883.9 Kg. y la fuerza axial de 96005.25 Kg. valores tan altos que si no estuvieran las partes mecánicas bien sujetadas, bien dimensionadas para soportar estos esfuerzos sería inevitable la destrucción del transformador, por esto de que en el aspecto mecánico se lo hace lo más seguro posible y se lo sobredimensiona en lo posible.

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en la sección 3 podemos concluir que:

- La barra de cobre que va del seccionador al interruptor  $\text{SF}_6$  de 69 kv, soportara una tensión de **13482 (kg/cm<sup>2</sup>)** con las dimensiones y separación actuales, como la tensión de ruptura del cobre es de 3860 (kg/cm<sup>2</sup>) concluimos que **no soportara dicha tensión**. por lo tanto hay que tomar medidas correctivas. La solución más conveniente es aumentar la sección de la barra. ya que es económica y fácil de aplicar. El área mínima que debe tener el conductor para que no sobrepase la tensión máxima resistente del cobre manteniendo constante la longitud y la corriente de cortocircuito es:

$$\boxed{d = 1.772 \text{ cm} \Rightarrow \text{area} = 246.6 \text{ mm}^2 = 500 \text{ mcm}}$$

- En la barra que va del interruptor  $\text{SF}_6$  al pararrayos ubicado sobre el lado de 69 kv. del transformador que se analizo en la sección 3.5.2 sucede lo mismo por lo tanto, el área mínima que debe tener es:

$$\boxed{d = 1.28 \text{ cm} \Rightarrow \text{area} = 128.7 \text{ mm}^2 = 250 \text{ mcm}}$$

Y de los resultados obtenidos en la sección 4 podemos concluir que:

- En caso de que se presentase la condición más crítica de cortocircuito en una fase del sistema de barras del lado de 69 KV, en tan solo 10.17 seg. se alcanzaría el punto de fusión del cobre que es de 1336K., esto se daría en caso de que el corto-circuito no pueda ser despejado por las protecciones. Sabiendo que no es recomendable que una barra pase de los 573K ya que a partir de esta temperatura pierde sus propiedades térmicas, eléctricas y mecánicas, la falla debe ser despejada antes de 4.15 seg. para que la barra no alcance esta temperatura.
- En el lado de 13.8 KV, en caso de que se presentase la condición más crítica de cortocircuito en una fase del sistema de barras de dicho lado en 97.78 seg. se alcanzaría el punto de fusión del cobre, esto se daría en caso de que el corto-circuito no pueda ser despejado por las protecciones.

### **RECOMENDACIONES**

Para todo diseño de subestaciones es menester el calculo de estos esfuerzos para que sea dimensionada adecuadamente y se garantice la continuidad del servicio, para la subestación que hemos realizado este estudio se recomienda cambiar la barra de cobre que va del seccionador al interruptor SF<sub>6</sub> de 69 KV, la solución más conveniente es aumentar la sección de la barra ya que es lo más económico y fácil de aplicar. Teniéndose también presente por la sección del interruptor su poder de desconexión ya que si no es el adecuado para soportar estos esfuerzos se arriesga al deterioro del interruptor y de la instalación.

### **BIBLIOGRAFÍA**

1. Ferdinand L. Singer, Resistencia de Materiales (2da. Edición, Madrid, Ediciones del Castillo, 1979), pp.120-285.
2. Ferdinand L. Singer, Estatica (5ta. Edición, México, Harper & Row Latinoamérica, 1998), pp. 45-68.
3. José Raúl Martín, Diseño de Subestaciones Eléctricas (1ra. Edición, México, Mc Graw-Hill, 1987), pp. 50-104.
4. William D. Stevenson, Análisis de Sistemas de Potencia (2da. Edición, México, Mc Graw-Hill, 1992), pp. 242-315.
5. Sir Isaac Pitman&Sons, The Switchgear Handbook, Volume 1 (Londres, C.H.Flurschein, 1970), pp. 7-22.
6. J.P. Holman, Transferencia De Calor (4ta. Reimpresión, México, Compañía Editorial Continental, 1992), pp. 265-295
7. Carlt Johnk , Teoria Electromagnética: Principio Y Aplicaciones (2da. Edición, México, Editorial Limusa, 1993), pp. 17-69.
8. John Kuhlmann, Diseño De Aparatos Eléctricos (1ra. Edición, México, Compañía Editorial Continental, 1965), pp.268-286.
9. ABB, 72 PM Outdoor Circuit Breaker, (Publicación número: 33-200A-6, noviembre 1997)
10. J. N. L. Sacchi - A.Rifaldi , 25/11/2002, [www.ing.unlp.edu.ar/sispot/libros.htm](http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot/libros.htm)