

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MUFLA PARA ESTUDIO DE ENVEJECIMIENTO EN
MATERIALES AISLANTES"

HECTOR HORACIO FIALLO SANDOVAL

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO
DE INGENIERO ELECTRICO

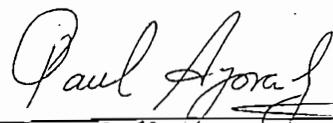
AGOSTO - - 1987

A MIS PADRES Y HERMANOS

AGRADECIMIENTO

Mi profundo agradecimiento para el señor Inge
niero Paúl Ayora González, por los conocimien
tos impartidos, por sus valiosos consejos y
por todo el apoyo brindado; al señor Raúl Va
ca por su invalorable colaboración y a todas
las personas que prestaron su concurso para
que este trabajo llegue a su culminación.

Certifico que el presente trabajo ha sido realizado en su totalidad por el señor Héctor Horacio Fiallo Sandoval bajo mi dirección.


Ing. Paúl Ayora G.

Director

INDICE

SUMARIO	Pág.
Capítulo I : INTRODUCCION	
1.1. Importancia de tener una mufla especial para el estudio de envejecimiento de materiales aislantes --	1
1.2. Estudios realizados sobre el tema -----	2
1.3. Alcance del estudio a realizarse -----	3
Capítulo II : ESTUDIO Y MODELO TERMICO DE LA MUFLA	
2.1. Transferencia de calor -----	6
2.1.1. Transferencia del calor por conducción -----	6
2.1.2. Transferencia del calor por convección -----	10
2.1.2.1. Cálculo de los coeficientes de transferencia del calor por convección -----	11
2.1.3. Transmisión del calor por radiación -----	13
2.1.3.1. Cálculo del factor de forma -----	13
2.1.4. Acceso visual al interior -----	21
2.1.5. Comportamiento térmico de la ventana -----	21
2.2. Fuente de energía calórica -----	24
2.2.1. Flujo térmico conseguido en una resistencia eléctrica -----	25
2.3. Aislamiento térmico -----	27
2.4. Energía almacenada y pérdidas térmicas -----	30
2.4.1. Consideraciones -----	30

	Pág.
2.4.2. Energía térmica almacenada -----	32
2.4.3. Pérdidas desde la cámara de la mufla al medio ambiente -----	34
2.4.3.1. Formulación de q_1, R_1 -----	37
2.4.3.2. Formulación de q_2, R_2 -----	38
2.4.3.3. Formulación de q_3, R_3 y q_4, R_4 -----	39
2.4.3.4. Formulación de q_5, R_5 -----	40
2.4.3.5. Formulación de q_6, R_6 -----	41
2.4.3.6. Formulación de q_7, R_7 -----	42
2.4.3.7. Formulación de q_8, R_8 -----	42
2.4.3.8. Formulación de q_9, R_9 -----	43
2.4.3.9. Formulación del flujo de energía total perdido y la resistencia térmica total equivalente -----	44
2.5. Ecuación diferencial del comportamiento térmico de la mufla -----	46
2.6. Control de temperatura mediante control de potencia -----	48
2.6.1. Control de fase -----	51
2.6.2. Control por ciclo integral -----	53
2.7. Sensores y sistema de medición de la temperatura -	54
2.7.1. Sensores de temperatura -----	54
2.7.2. Sistema sensor -----	57

Capítulo III: AISLAMIENTO ELECTRICO

3.1. Efecto de la temperatura en la capacidad dieléctri	
---	--

	Pag.
ca del aire -----	60
3.2. Efecto de la configuración geométrica de la mufla en el aislamiento -----	62
3.2.a. Modelación Digital -----	63
3.2.b. Modelo Analógico -----	65
3.2.c. Bushing de la mufla -----	69
3.2.d. Distancia de aislamiento y voltaje de operación --	73
3.3. Diseño del aislamiento para operar con hasta 30 kV	74

Capítulo IV : DISEÑOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

4.1. Diseño térmico -----	78
4.1.1. Constante térmica y pérdidas -----	78
4.1.2. Potencia de la fuente -----	81
4.1.3. Disposición de los calefactores -----	82
4.2. Diseño eléctrico -----	84
4.2.1. Resistencia de las niquelinas -----	84
4.2.2. Evaluación de potencia en las niquelinas -----	87
4.2.3. Conductores eléctricos -----	88
4.2.4. Protecciones -----	90
4.3. Diseño del control de Temperatura -----	91
4.3.1. Transductor -----	92
4.3.2. Amplificador -----	93
4.3.3. Comparador -----	93
4.3.4. Controlador -----	102

	Pág.
4.3.5. Control de potencia -----	105
4.3.6. Salida a displays -----	106
4.3.7. Reloj de tiempo real -----	107
4.4. Detalles constructivos y pruebas -----	108
4.4.1. Detalles constructivos -----	108
4.4.2. Pruebas de funcionamiento -----	119
4.4.2.1. Pruebas de calentamiento -----	119
4.4.2.1.a. Pruebas en alto voltaje -----	120
4.4.2.1.b. Pruebas en bajo voltaje -----	125
4.4.2.2. Pruebas eléctricas -----	125
4.4.2.3. Pruebas del control de temperatura -----	131
 Capítulo V : PRUEBAS DE APLICACION EN EL ENVEJECIMIENTO	
5.1. Modelos simples de envejecimiento -----	135
5.1.1. Modelo de envejecimiento térmico -----	135
5.1.2. Modelo de envejecimiento eléctrico -----	137
5.2. Modelo de envejecimiento combinado -----	139
5.3. Pruebas en materiales de tipo polimérico -----	143
5.3.1. Pruebas de envejecimiento térmico -----	143
5.3.2. Prueba de envejecimiento combinado -----	161
 Capítulo VI : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
	165

APENDICE A: Resultados obtenidos en el computador.

APENDICE B: Planos de la mufla.

APENDICE C: Pruebas para determinar los coeficientes de variación de la resistencia con la temperatura.

APENDICE D: Manual de operación.

APENDICE E: Evaluación de costos.

APENDICE F: Resultados de las pruebas de funcionamiento.

APENDICE G: Resultados de las pruebas de envejecimiento.

BIBLIOGRAFIA.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1. IMPORTANCIA DE TENER UNA MUFLA ESPECIAL PARA EL ESTUDIO DE ENVEJECIMIENTO DE MATERIALES AISLANTES

Al ser una de las tareas fundamentales de la Universidad la investigación y el desarrollo de tecnologías que permitan al país reducir la dependencia del extranjero, en la Escuela Politécnica Nacional y más específicamente en la Facultad de Ingeniería Eléctrica, se ha venido desarrollando investigaciones tendientes a satisfacer las necesidades tecnológicas y científicas de esta área.

En el área de Transmisión y Distribución de la mencionada Facultad se ha venido realizando continuas investigaciones en los campos del diseño, construcción y obtención de equipos y materiales.

Dentro de las investigaciones de materiales se ha desarrollado en forma conjunta con la Facultad de Ingeniería Química materiales con base polimérica, materiales con base de cemento, etc. con miras a utilizarlos luego en la fabricación de aisladores eléctricos.

A los materiales obtenidos se los ha sometido a un conjunto de pruebas de corto tiempo, para establecer sus características tanto físicas como químicas. Siendo algunas de estas: Permitividad, Resistencia mecánica, Resistencia al fuego, voltaje de perforación, "tracking" o erosión, etc. Pero como es conocido el aislamiento debe

ser hecho con un material que debe tener la capacidad de mantener sus características por un largo período de tiempo (10 - 15 años), lo cual es imposible probar sin tener un equipo de envejecimiento.

De aquí nace la necesidad de diseñar y construir una mufla especial para el estudio de envejecimiento de dieléctricos. El calificativo especial se la da debido a que no será una mufla común, esto es un horno de temperatura controlada muy precisamente, sino que adicionalmente permitirá el ingreso a su interior de un electrodo de alta tensión, consiguiéndose con esto aplicar a los materiales esfuerzos debidos a temperatura, voltaje o ambos y así determinar su comportamiento a través del tiempo.

Lo indicado claramente explica la importancia de tener una mufla especial para el estudio de envejecimiento, ya que sin la presencia de este equipo no se pueden continuar las investigaciones que se han realizado hasta ahora y que han dado muy buenos resultados.

1.2. ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE EL TEMA

Dentro de la Politécnica Nacional se han realizado algunas investigaciones en el campo de la transferencia de calor y la construcción de equipos para utilizar esta forma de energía.

Así en la Facultad de Ingeniería Mecánica se han desarrollado algunos proyectos de investigación dentro de este campo, los mismos que han sido culminados exitosamente y como resultado de aquello se tienen equipos como: Horno de fundición por arco, Tesis E.P.N., 1986.

Horno solar para cocción de alimentos, Tesis E.P.N. 1985, etc. Pero como estos equipos son diseñados con una finalidad diferente a la que nos ocupa y al no ser de temperatura controlada en forma muy exacta, no se pueden llamar muflas.

En la Facultad de Ingeniería Química existe el antecedente en la re construcción de una mufla para secado, la misma que tiene un rango de operación de 300°C con un sistema de calefacción por convección forzada, este trabajo se realizó en 1983, en esta Facultad se tienen y operan muflas en el estudio e investigaciones propias de la especialización.

En la Facultad de Ingeniería Eléctrica se han venido realizando investigaciones en el desarrollo de sistemas de conversión de energía calórica y sobre los efectos de la energía calórica en el comportamiento de algunos materiales (ESTUDIO TEORICO EXPERIMENTAL SOBRE DIELECTRICOS, TESIS EPN, 1968), dentro de los mecanismos de conversión de energía se están investigando las del tipo no convencional, por ejemplo el de inducción.

1.3. ALCANCE DEL ESTUDIO A REALIZARSE

El estudio propuesto tiene el objetivo de construir una mufla especial para el estudio del envejecimiento de materiales aislantes.

Para alcanzar este propósito se realizará el análisis de los diferentes fenómenos que se verán involucrados en un equipo de este tipo.

La mufla que interesa construir deberá tener un sistema de conver-

sión de energía eléctrica en energía calórica, un sistema que permita el ingreso al interior de la mufla con alto voltaje y un sistema de control de la temperatura muy preciso.

En la concepción de la mufla por tanto se hará el análisis de fenómenos involucrados con la transferencia de calor, tales como: conducción, convección y radiación, debiendo por tanto en este campo plantear las ecuaciones que servirán para obtener un modelo matemático del comportamiento de la mufla y en base a éste realizar el diseño del sistema térmico.

En la búsqueda de un mecanismo de conversión de energía eléctrica en energía calórica se escogerá el que presente las mejores condiciones referentes a costo, eficiencia y durabilidad, haciendo luego el diseño de la disposición de los elementos caloríficos en el interior de la mufla.

En lo que al ingreso del alto voltaje se refiere, se ha creído conveniente hacer el estudio de los fenómenos de campo eléctrico que permitan llegar al interior de la cámara con hasta 30 kV y que adicionalmente se tenga un diseño tal que permita trabajar en pruebas con materiales aislantes sin la presencia de microdescargas con un voltaje que se definirá en pruebas de este tipo dentro de este estudio.

Para poder realizar envejecimiento, a más del alto voltaje, es necesario afectar a las muestras en estudio con temperatura, para lo cual se ha previsto diseñar la mufla de tal forma que se pueda alcanzar una temperatura máxima de 300°C con un error de $\pm 2^\circ\text{C}$. Esto hace que

para controlar la temperatura, se tenga que analizar algunas formas de detección y control que permita finalmente satisfacer estas condiciones.

Con los diseños concluidos se procederá a la construcción del equipo el mismo que deberá ser sometido a pruebas prototipo.

Pues bien, como toda actividad humana es llevada en la búsqueda de alcanzar un objetivo y el objetivo de este trabajo es el de tener el equipo para estudiar el envejecimiento de materiales, se probará su bondad realizando el envejecimiento de un material polimérico. Tentativamente se planteará algún modelo del envejecimiento logrado. Adicionalmente se dejará planteado algunos criterios que permitan evaluar mediante el análisis de la variación de alguna característica - cuantificable del material el grado de envejecimiento de dicho material.

CAPITULO II

ESTUDIO Y MODELO TERMICO DE LA MUFLA

2.1. TRANSFERENCIA DE CALOR

Generalidades.-

En todo sistema térmico se dan tres procesos de transferencia de calor: CONDUCCION, CONVECCION y RADIACION.

Debido a la precisión que se desea alcanzar con la mufla, no se puede despreciar ninguno de estos procesos por pequeña que sea su participación en el comportamiento de la mufla.

2.1.1. Transferencia del calor por conducción

La transferencia del calor por conducción, es aplicable para cuerpos sólidos, aunque también se la puede analizar en medios gaseosos, con la restricción que el fluido esté en completo reposo. Para desarrollar las ecuaciones que rigen la conducción del calor se parte de la primera ley de Fick, la misma que surge de la difusión de partículas entre dos medios. (1)

Por tanto tendremos:

$$q_c = - k A \left(- \frac{dT}{dx} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

q_c = flujo de calor por conducción | W |

k = conductividad térmica del medio | W/m °C |

A = área perpendicular al flujo de calor | m² |

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura | °C/m |

En la mufla el fenómeno de conducción será importante para evaluar las pérdidas de calor, las mismas que se dan a través de las paredes, los bordes y las esquinas.

Bajo estas consideraciones y sabiendo que las paredes deberán estar aisladas térmicamente, se puede hacer suposiciones que simplifiquen el análisis y al mismo tiempo no introduzcan errores de consideración.

Estas suposiciones son:

- a) Las paredes estarán constituidas de material homogéneo e isotrópico.
- b) Las paredes son superficies isotérmicas, permitiendo así un flujo perpendicular a cada una de ellas.

Por tanto el sistema en cada pared es el que se indica en la figura 2.1.

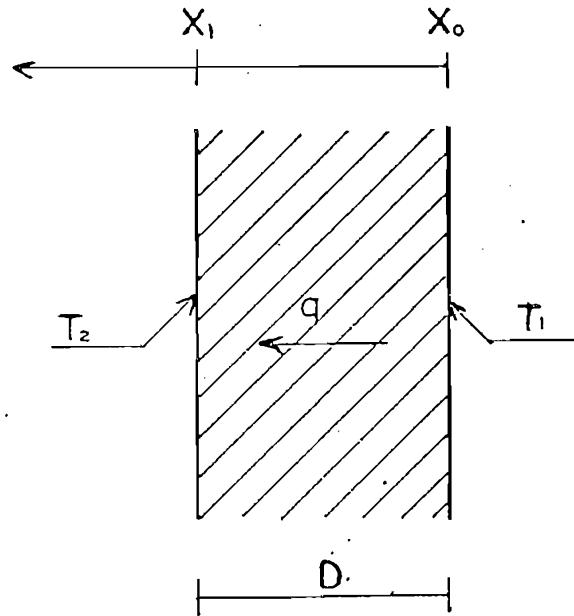


Fig. 2.1. Flujo térmico entre dos superficies a diferente temperatura separadas por un material de espesor D .

D = espesor de la pared | m |

q_c = flujo calórico | W |

T_1 = temperatura interior | °C |

T_2 = temperatura exterior | °C |

Cuando se alcanza la condición de equilibrio térmico, aplicando 2.1.

$$\int_{x_2}^{x_1} q_c dx = -k A \int_{T_1}^{T_2} dT$$

Si $q_c = \text{cte}^*$ $q_c (x_1 - x_0) = -k A (T_2 - T_1)$

Pero $x_1 - x_2 = D$

$$\therefore q_c = K A \frac{(T_1 - T_2)}{D} \quad (2.2)$$

En realidad la transferencia de calor por conducción no es unidireccional sino que es un fenómeno tridimensional, pero debido a la dificultad de obtener por métodos sencillos una expresión general, se introduce un factor de forma por conducción S que se lo expresa como:⁽⁴⁾

$$S = S_p + S_v + S_e \quad (2.3)$$

que permite reemplazar A/D con expresiones fáciles de calcular.

Si la mufla tiene dimensiones que sean superiores en 5 veces al espesor de las paredes, los factores de forma vienen dados por:

$$S_p = A/L \quad (2.4)$$

$$S_v = 0.54 L \quad (2.5)$$

$$S_e = 0.15 D \quad (2.6)$$

donde:

S_v = factor de forma para los extremos.

S_e = factor de forma para las esquinas.

S_p = factor de forma para las paredes.

L = longitud del extremo (m).

D = espesor de la pared (m).

Considerando la distribución volumétrica de la conducción, el flujo de calor por conducción dado por la ecuación 2.3. sería:

$$q_c = K \left(\frac{A}{L} + 0.54 L + 0.15 D \right) \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.7)$$

2.1.2. Transferencia del calor por convección

El fenómeno de convección está relacionado con la dinámica de los fluídos, ya que la transferencia del calor por conducción en un medio gaseoso solo alcanza las capas de fluido muy cercanas a los radiadores de calor, teniéndose luego una transferencia de energía de estas moléculas a las moléculas de las capas más alejadas.

El fenómeno de convección puede darse en forma libre o forzada. La convección se denomina libre, si el movimiento del fluido se produce debido a la diferencia energética alcanzada por las diferentes capas. Será forzada si el fluido es movido mediante medios externos (por ejemplo bombas).

En el caso de la mufla debido a su tamaño reducido, interesa solamente la convección libre. La misma que se presentará entre:

- a) La superficie exterior de la mufla y el medio ambiente;
- b) Las superficies radiadoras y el aire interior;

- c) El aire interior y el objeto de prueba;
- d) El aire interior y las superficies no radiadoras.

Para convección libre se establece de manera general que el flujo de calor viene dada por⁽²⁾:

$$q_{cc} = hc A (T_s - T_{\infty}) \quad (2.8)$$

donde:

q_{cc} = flujo de calor por convección libre (w).

hc = coeficiente de transferencia por convección ($w/m^2 \text{ } ^\circ C$).

T_s = temperatura de la superficie.

T_{∞} = temperatura del fluido en las zonas donde la velocidad de convección es relativamente nula.

El factor importante para determinar el flujo de calor por convección es calcular el coeficiente de transferencia hc , el mismo que depende de las disposiciones geométricas de las superficies. Por tanto es de interés para el calculo posterior dejar planteadas las expresiones de hc para algunas configuraciones.

2.1.2.1. Calculo de los coeficientes de transferencia por convección

a) hc PARA PLACAS PARALELAS Y HORIZONTALES

- El coeficiente de transferencia de calor por convección libre en

placas verticales isotérmicas se determina por: (4)

$$hc = 0.29 \left| \frac{T_1 - T_2}{L} \right|^{1/4} \quad (2.9)$$

donde:

T_1 = temperatura de la superficie ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 = temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

L = dimensión vertical de la superficie (m)

- El coeficiente para placas horizontales se lo determina por: (4)

$$hc = 0.27 \left| \frac{T_1 - T_2}{L} \right|^{1/4} \quad (2.10)$$

donde:

L = media de las dimensiones de la placa horizontal | m |

b) hc ENTRE PLACAS PARALELAS DE DIFERENTE AREA

Para determinar la transferencia de calor entre las placas de la mufla y entre placas y objeto de prueba es necesario calcular el coefi. ciente convectivo, el mismo que se lo determina por⁽⁴⁾:

$$hc = k \cdot 0.195 Gr^{1/4} \quad \text{para} \quad 10^4 < Gr < 4 \times 10^5 \quad (2.11)$$

$$hc = k \cdot 0.068 Gr^{1/3} \quad \text{para} \quad 4 \times 10^5 > Gr \quad (2.12)$$

Donde:

k = conductividad térmica del aire (w/M.°c).

Gr = número adimensional de Grashof que se lo determina por:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_1 - T_2) \cdot D_c^3}{\gamma^2} \quad (2.13)$$

Donde:

g = aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)

β = coeficiente de expansión volumétrica del aire (°C⁻¹)

D_c = separación entre placas (m)

γ = viscosidad cinemática del aire (m²/s).

2.1.3. Transmisión del calor por radiación

Este mecanismo de transmisión del calor es importante, ya que toda fuente de energía transfiere la misma por medio de la radiación de ondas electromagnéticas.

Este mecanismo de transmisión de la energía, a diferencia de los anteriores, no necesita de un medio especial para su ocurrencia, pudiéndose inclusive tener transferencia del calor por radiación en el vacío.

Para que un cuerpo sólido emita energía radiante es necesario que sus átomos sufran perturbación en los niveles energéticos de sus electrones, es decir que éstos pasen de un nivel energético a otro, existiendo emisión si un electrón salta de una órbita de mayor a me

nor energía. Pero la emisión de energía radiante también puede darse a nivel atómico y molecular, ya que si estas partículas en forma aislada vibran a frecuencias diferentes tendremos un movimiento armónico simple creado por las partículas que han ganado energía comportándose así como osciladores lineales. (2)

Esto indica que una forma de evaluar la energía emitida o recibida por radiación en un cuerpo es conocer su espectro de emisión electromagnética.

La frecuencia de una onda oscilatoria permite conocer la longitud de onda de las mismas. Por tanto, para tener transmisión del calor por radiación es necesario que esta energía sea transportada por ondas cuyas longitudes de onda esten comprendidas entre 0.75 - 400 μm que corresponden en el espectro al infrarrojo.

Dentro de este contexto, cada material tendrá su espectro de emisión característico en función de la temperatura que alcance. Para que un cuerpo sólido emita su máxima cantidad de energía en el infrarrojo se necesita que alcance temperaturas entre 300 - 800 $^{\circ}\text{K}$. (5)

En la mufla se presentará transmisión del calor por radiación en los siguientes casos:

- a) Entre los radiadores y las paredes.
- b) Entre las paredes y el medio ambiente.
- c) Entre la superficie radiante y el objeto de prueba.

Por tanto interesa evaluar las expresiones para el cálculo del flujo de calor por radiación entre:

- a) Dos superficies.
- b) En un recinto cerrado.
- c) Entre un cuerpo y el recinto que lo encierra.

a) ENTRE DOS SUPERFICIES

El flujo de energía radiante entre dos superficies se evalúa mediante la expresión⁽²⁾:

$$q_r = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{(1 - e_1)/e_1 A_1 + 1/A_1 F_{1-2} + (1 - e_2)/e_2 A_2} \quad (2,14)$$

donde:

q_r = flujo del calor por radiación | W |

F_{1-2} = factor de forma geométrica.

A_1 = área de la superficie 1 | m² |

A_2 = área de la superficie 2 | m² |

e_1 = emisividad de la superficie 1

e_2 = emisividad de la superficie 2

σ = constante de Stefan - Boltzman (5.67x10⁻⁸ W/m² °K⁴)

T_1 = temperatura de la superficie 1 (°K)

T_2 = temperatura de la superficie 2 (°K)

b) EN UN RECINTO CERRADO

La ecuación que permite calcular el flujo de calor radiante en un recinto cerrado, donde se tengan N superficies, está dada por: (4)

$$q_i = A_i (e_i / (1 - e_i)) \times (T_i - B_i) \quad (2.15)$$

Donde:

q_i = flujo de calor radiante en la superficie i .

A_i = área de la superficie i .

e_i = emisividad de la superficie i .

B_i = radiosidad de la superficie i , que se determina por:

$$B_i = \sum_{j=1}^N m_{ij} \sigma T_j^4 \quad 1 \leq j \leq N \quad (2.16)$$

A continuación se presenta la forma de calcular las radiosidades.

b.1. Cálculo de las radiosidades

Si reordenamos la ecuación 2.16. tendremos:

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} \cdot B_j = \sigma T_i^4 \quad (2.17)$$

Donde los términos X_{ij} están dados por: (4)

$$X_{ij} = \frac{D_{ij} - (1 - e_i) F_{i-j}}{e_i} \quad (2.18)$$

Donde:

e_j = emisividad de la superficie i .

$D_{ij} = 1$ para $i=j$.

$D_{ij} = 0$ para $i \neq j$.

F_{i-j} = factor de forma entre la superficie $i-j$.

Luego para cada par de superficies tendremos un X_{ij} lo cual nos da una matriz X , cuya inversa:

$$X^{-1} = M \quad (2.19)$$

será la matriz de los elementos $|m_{ij}|$, retornando a evaluar los B_j (radiosidades) como en la ecuación 2.16.

Como se puede ver esta expresión resulta ser no lineal y por tanto existirá una solución para cada temperatura de las superficies del recinto y para el número de superficies del mismo, por tanto, para realizar estos cálculos se deben utilizar técnicas de evaluación e inversión de matrices.

c) INTERCAMBIO ENTRE UN RECINTO CERRADO Y UN CUERPO EN SU INTERIOR

Este tipo de transferencia aparecerá entre las superficies de la mufla y el objeto de prueba, así como con el aislador de alta tensión (que permite el ingreso del potencial eléctrico a la mufla).

La expresión que permite evaluar el flujo radiante se la puede deter-

minar por una analogía con el diagrama de celocía para ondas viajeras en líneas de transmisión llegando a establecerse que⁽¹⁾:

$$q_r = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{1/e_1 + A_1/A_2(1/e_2 - 1)} \quad (2.20)$$

Donde:

A_1 = área del objeto o cuerpo (m^2)

A_2 = área de la cámara del horno (m^2)

T_1 = temperatura del cuerpo en ($^{\circ}K$)

T_2 = temperatura de los radiadores en ($^{\circ}K$)

q_r = flujo de calor radiante (W)

2.1.3.1. Calculo del factor de forma.

En las expresiones para el calculo del flujo de calor por radiación - se señala un factor de forma geométrica, el mismo que tiene relación con el área efectiva de transferencia de calor entre dos cuerpos, y se lo evalúa dependiendo de la configuración, así:

a) ENTRE DOS SUPERFICIES PARALELAS

El factor de forma entre dos superficies paralelas esta dado por⁽⁴⁾:

$$F_{1-2} \left(\frac{\pi XY}{2} \right) = \ln \left| \frac{(1+x)^2 (1+y)^2}{1+x^2+y^2} \right| + y \sqrt{1+x^2} \tan^{-1} \left(\frac{y}{\sqrt{1+x^2}} \right) + X \sqrt{1+y^2} \tan^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{1+y^2}} \right) - Y \tan^{-1} (y) - X \tan^{-1} (x) \quad (2.21)$$

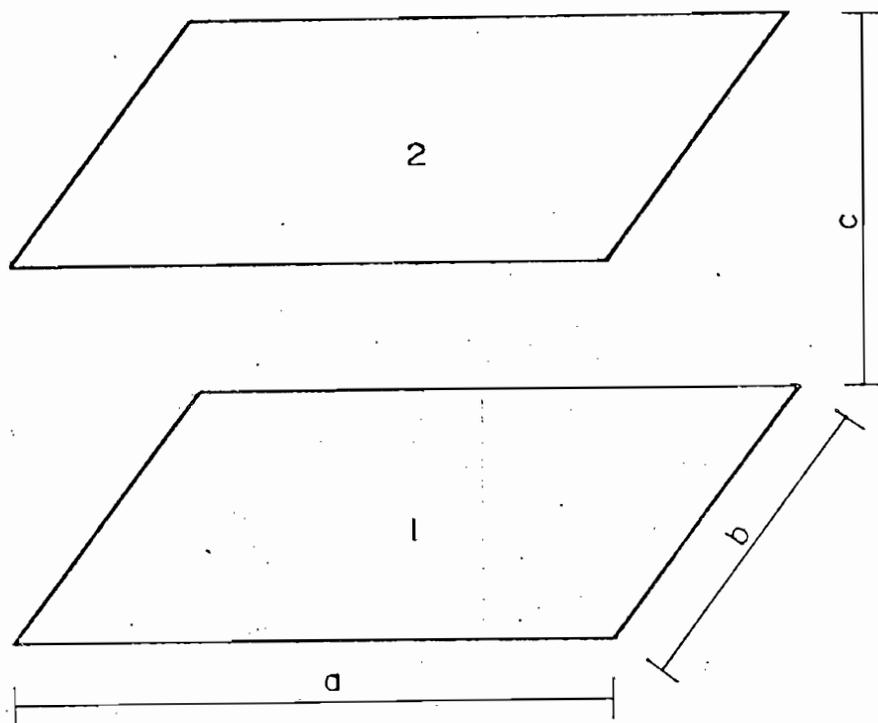


Fig. 2.2. Determinación del factor de forma entre dos superficies paralelas.

Donde:

$$X = a/c$$

$$Y = b/c$$

Se puede demostrar que si el área $A_1 = A_2$ y $c \ll a \wedge b$ entonces $F_{1-2} \approx 1$.

b) FACTOR DE FORMA ENTRE DOS SUPERFICIES PERPENDICULARES

Este factor de forma está dado por la expresión⁽⁴⁾:

$$\begin{aligned}
 F_{1-2}(\pi Y) = & \frac{1}{4} \left\{ \text{Ln} \left| \frac{(1+x^2)(1+y^2)}{1+z} \right| + y^2 \text{Ln} \left| \frac{y^2(1+z)}{(1+y^2)z} \right| + \right. \\
 & + x^2 \text{Ln} \left| \frac{x^2(1+z)}{z(1+x^2)} \right| \left. \right\} + Y \tan^{-1} \left(\frac{1}{y} \right) + X \tan^{-1} \left(\frac{1}{x} \right) + \\
 & - \sqrt{Z} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{Z}} \right) \quad (2.22)
 \end{aligned}$$

Donde la definición de cada variable es:

$$X = a/b$$

$$Y = c/b$$

$$Z = x^2 + y^2$$

Las dimensiones a, b, c están indicadas en la figura 2.3.

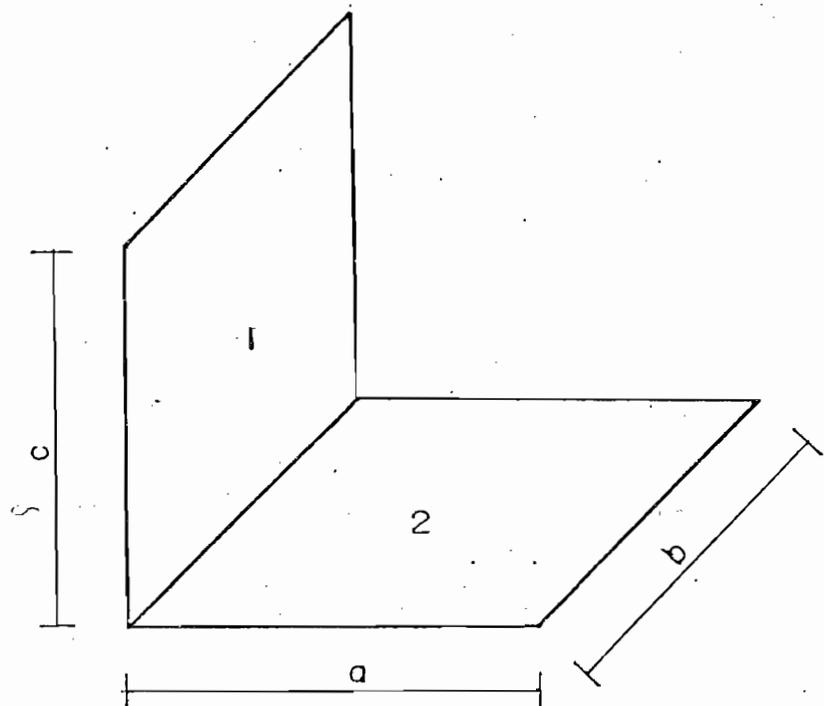


Fig. 2.3. Determinación del factor de forma entre dos superficies perpendiculares.

2.1.4. Acceso visual al interior

Como es conocido, el mejor sensor para tener una idea del comportamiento de un fenómeno es alguno de los sentidos del hombre, por tanto se ha creído conveniente preveer un acceso visual al interior de la mufla.

La ubicación que permitirá la mayor percepción será en la pared lateral del horno. Para lo cual y deseando tener una buena resolución, se ha previsto la utilización de una puerta de vidrio y un sistema de iluminación interno.

2.1.5. Comportamiento térmico de la ventana.

La función que debe cumplir esta ventana es la de permitir ver hacia el interior y además evitar la transmisión del calor. Se ha encontrado que el vidrio con un contenido de 0.1% de Fe_2O_3 , tiene una alta reflectancia para ondas cuya longitud de onda sea mayor que 3 μm , es decir el infrarrojo. (4)

La transmisión de la radiación a través de un material transparente depende de: la longitud de onda, el ángulo de incidencia, índice de refracción y el coeficiente de extinción. (4)

Es conocido que la energía radiante puede involucrarse en tres fenómenos: reflexión, transmisión y absorción, por tanto existirán los coeficientes respectivos para cada material, los mismos que satisfacen la expresión:

$$\tau + \rho = 1$$

El coeficiente de transmisión (τ) y el de reflexión (ρ) para dos superficies paralelas están dados por⁽⁴⁾:

$$\tau = \frac{1}{2} \left| \left(\frac{\tau_{\perp}}{1 - \rho_{\perp}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel}}{1 - \rho_{\parallel}} \right)^2 \right| \quad (2.23)$$

$$\rho = \frac{1}{2} \left| \left(\rho_{\perp} + \frac{\rho_{\perp} \tau_{\perp}^2}{1 - \rho_{\perp}^2} \right) + \left(\rho_{\parallel} + \frac{\rho_{\parallel} \tau_{\parallel}^2}{1 - \rho_{\parallel}^2} \right) \right| \quad (2.24)$$

Donde:

$\rho_{\perp}, \rho_{\parallel}$ = componentes perpendicular y paralela de la reflexión e valuadas por

$$\rho_{\perp} = \frac{\text{Sen}^2 (\theta_i - \theta_r)}{\text{Sen}^2 (\theta_i + \theta_r)} \quad (2.25)$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{\tan^2 (\theta_i - \theta_r)}{\tan^2 (\theta_i + \theta_r)} \quad (2.26)$$

$\tau_{\perp}, \tau_{\parallel}$ = componentes perpendicular y paralela de la transmisión evaluadas por

$$\tau_{\perp} = \tau_{\alpha} \left| \left(\frac{1 - \rho_{\perp}}{1 + \rho_{\perp}} \right) \left(\frac{1 - \rho_{\perp}^2}{1 - (\rho_{\perp} \tau_{\alpha})^2} \right) \right| \quad (2.27)$$

$$\tau_{\parallel} = \tau_{\alpha} \left| \left(\frac{1 - \rho_{\parallel}}{1 + \rho_{\parallel}} \right) \left(\frac{1 - \rho_{\parallel}^2}{1 - (\rho_{\parallel} \tau_{\alpha})^2} \right) \right| \quad (2.28)$$

Siendo τ_{α} = absorción de la radiación por el medio transparente evaluado por:

$$\tau_{\alpha} = e^{-kxL/\cos \theta_r} \quad (2.29)$$

Donde:

L = espesor de la cubierta transparente.

θ_r = ángulo de refracción, medido entre la prolongación de la normal a la superficie y el rayo refractado:

θ_i = ángulo de incidencia medido entre la normal y la superficie y el rayo refractado.

k = coeficiente de extinción de la cubierta (para vidrio al 0.01% Fe_2O_3 $k = 4$) (4)

Para poder trabajar con estas expresiones, se debe recordar que todo fenómeno que involucra reflexión y transmisión de ondas electromagnéticas debe satisfacer la ley de Snell.

$$\frac{\text{Sen}(\theta_i)}{\text{Sen}(\theta_r)} = \frac{n_r}{n_i} \quad (2.30)$$

Donde:

n_r, n_i = índice de refracción de las sustancias que forman la interface.

Para aire y vidrio de (0.01% Fe_2O_3) se tienen los siguientes índices de refracción:

$$\begin{aligned} n_{\text{aire}} &= 1.00 \\ n_{\text{vidrio}} &= 1.50 \end{aligned} \quad (4)$$

De lo expuesto se desprende que para evaluar el flujo de calor por radiación mediante la expresión 2.15. hay que considerar todas las superficies que se involucran en este fenómeno y que tengan diferente ϵ_j .

a) Las superficies radiantes.

b) La superficie interior de la ventana.

2.2. FUENTE DE ENERGIA CALORICA

La fuente de energía calórica a utilizarse debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Transformar la energía disponible en el laboratorio (Eléctrica).
- Dar facilidades en el control.
- Ser de fácil obtención, montaje y mantenimiento.
- Tener un adecuado rendimiento calórico.
- No presentar peligro de deterioro para las muestras.

Desde estos puntos de vista se encuentra que el sistema de calefactores que mejor se ajustan son los construidos utilizando resistencias del tipo hierro, níquel, cromo (níquelinas).

Por tanto es necesario hacer un análisis del comportamiento de estos dispositivos, al transformar la energía.

2.2.1. Flujo térmico conseguido en una resistencia metálica

Previamente se estableció que los cuerpos sólidos incandescentes emiten radiaciones que se las puede aprovechar como fuentes de calor cuando estas están en el infrarrojo. Se conoce que, en una resistencia al circular una corriente eléctrica I .(A), por efecto Joule, I^2R , se produce calor, aún más, cuando la temperatura a la que llega el material alcanza valores tales como $300 - 800^\circ\text{K}$ se tiene flujo de calor radiante, predominantemente.

La radiación de los sólidos incandescentes ha sido estudiada desde hace mucho tiempo y para tener un patrón referencial de radiación se ha supuesto un cuerpo negro, el mismo que se caracteriza por una absorptividad (a) igual a 1 y una reflexividad igual a cero. (5)

El cuerpo negro ideal tiene una longitud de onda de máxima energía - que será menor cuanto mayor sea la temperatura que alcance como se indica en la figura 2.4. (5)

Para la radiación de cuerpos negros Stefan dedujo que la energía radiada por unidad de tiempo de área por un cuerpo diferente al cuerpo negro está dada por

$$E = a \sigma T^4 \quad (2.31)$$

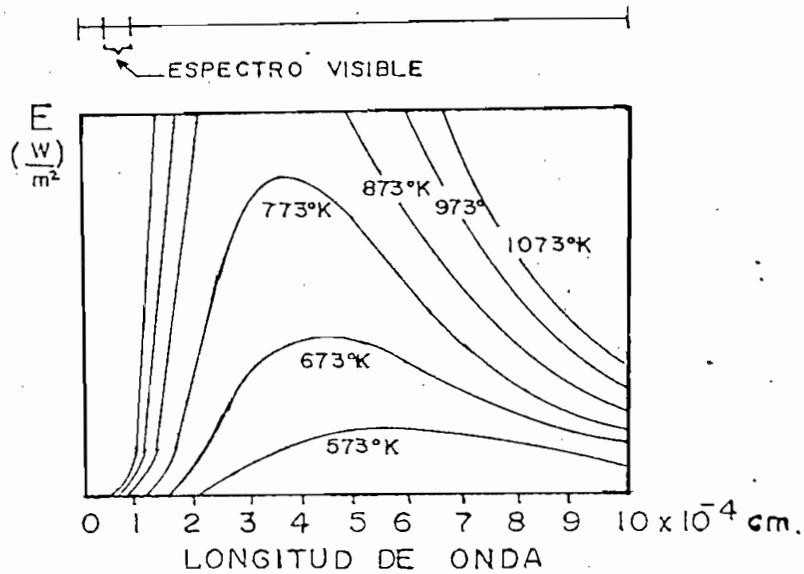


Fig. 2.4. Radiación del cuerpo negro a diferentes temperaturas (5).

Donde:

a = coeficiente de emisividad (0 - 1 dependiendo del material)

$$\sigma = 5.6699 \times 10^{-8} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \right)$$

T = temperatura del cuerpo en $^{\circ}\text{K}$

Por tanto la cantidad del flujo de calor obtenida del sistema será:

$$q_r = a \alpha (T_1^4 - T_2^4) \cdot A_1 \quad (2.32)$$

donde:

q_r = flujo de calor producido | W |

T_2 = temperatura del medio al cual se entrega la energía ($^{\circ}\text{K}$)

A_1 = área del cuerpo radiante $|\text{m}^2|$

Pero el sistema generador de calor no sólo entregará calor por radiación sino también por convección y conducción, teniéndose así un equilibrio de potencia en el sistema.

$$I^2R = q_r + q_c + q_k \quad (2.33)$$

Adicionalmente se debe recordar que la resistencia del material metálico tiene un comportamiento no lineal con la temperatura, siendo el comportamiento (3)

$$R = R_0(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T^2 + \dots) \quad (2.34)$$

Donde:

R = resistencia a la temperatura final $|\Omega|$

R_0 = resistencia a la temperatura inicial $|\Omega|$

$\alpha_{1,2}$ = coeficientes de variación de la resistencia con la temperatura. $|\frac{1}{^{\circ}\text{C}}|$

ΔT = diferencia de temperatura $|\text{^{\circ}\text{C}}|$

2.3. AISLAMIENTO TERMICO

En todo sistema donde se quiere tener un alto rendimiento se debe minimizar las pérdidas. Para conseguir este objetivo se debe proveer a la mufla de un aislamiento térmico que minimice la transferencia -

de calor al medio ambiente.

Este objetivo se lo consigue poniendo una capa de lana mineral entre las superficies interiores y las exteriores de la mufla.

Pero para minimizar la transferencia de calor existe un radio crítico de aislamiento luego del cual de ser mayor a este se produce una mayor transferencia al medio (en formas cilíndricas).

Se sabe que la forma del flujo de calor por conducción entre dos superficies cilíndricas a diferente temperatura esta dado por (1):

$$q = \frac{2 \pi R_b}{\ln r/r_{in}} (T - T_{\infty}) \quad (2.35)$$

Donde:

R_b = conductividad térmica aislante ($\frac{W}{m \text{ } ^\circ C}$)

r = radio exterior (m)

r_{in} = radio interior (m) (Figura 2.5.)

Luego la resistencia térmica será (1):

$$R_c = \frac{1}{2 \pi R_b} \ln \frac{r}{r_{in}} \quad (2.36)$$

La resistencia térmica de convección entre la pared externa y el aire será (1):

$$R_a = \frac{1}{h_a 2 \pi r} \quad (2.37)$$

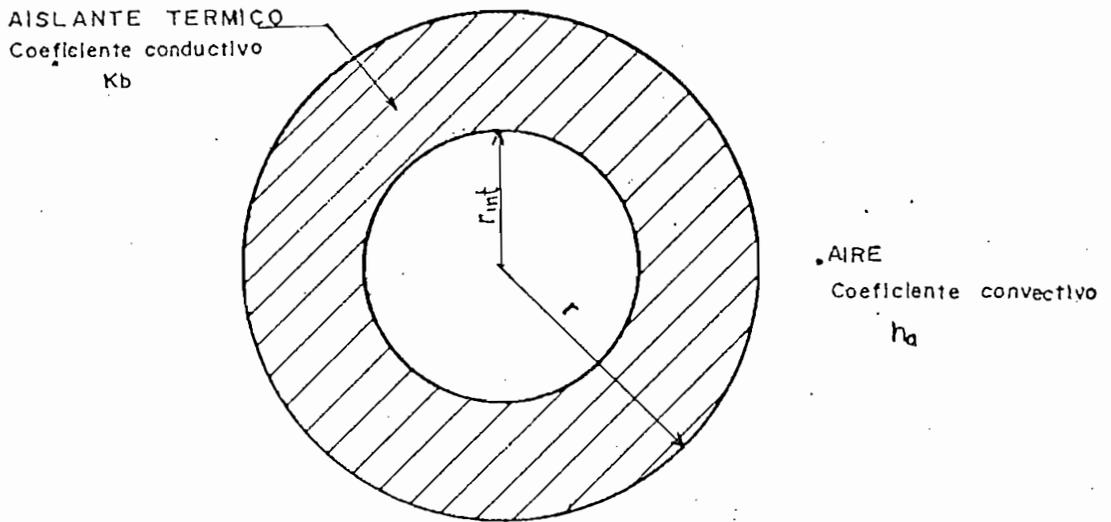


Fig. 2.5. Representación gráfica de un cilindro aislado, para determinar el radio crítico de aislamiento.

Donde:

h_a = factor de transferencia del calor por convección en aire.

Para encontrar un mínimo de la transferencia de calor, debemos encontrar el máximo de la resistencia térmica equivalente que sea la suma de las dos resistencias térmicas ya anotadas.

$$\frac{\partial R}{\partial r} = 0 = \frac{1}{2 \pi k_b r_c} - \frac{1}{h_a 2 \pi r_c^2} \quad (2.38)$$

por tanto el radio crítico de máxima transferencia de calor estará dado por:

$$r_c = \frac{k_b}{h_a} \quad (2.39)$$

Esto implica que para reducir las pérdidas de calor por las paredes, el material escogido debe ser tal que el radio exterior resultante satisfaga la condición que el radio exterior sea menor que el radio crítico.

Entonces:

$$r_c > r_{ext}$$

Lo cual se consigue poniendo materiales cuyo coeficiente de conductividad sea tal que satisfaga esta condición. Existen algunos materiales aislantes térmicos así: lana mineral, asbestos, arcillas refractarias, arena, etc.

La utilización de alguno de ellos estará determinada por los requerimientos de diseño, dando un radio exterior a la mufla que satisfaga la condición del radio crítico y adicionalmente permita mantener la temperatura exterior de la mufla en valores bajos por ejemplo 30°C, para así conseguir una reducida potencia de pérdidas.

2.4. ENERGIA ALMACENADA Y PERDIDAS TERMICAS

2.4.1. Consideraciones

Para facilitar el planteamiento del modelo matemático se hacen algunas asunciones que no introducen error.

Las asumpciones son:

- a) Para tener una adecuada distribución de las superficies equitérmi-
cas el sistema deberá tener la misma forma que los objetos de prue-
ba, por tanto deberá ser cilíndrico.
- b) Las superficies radiadoras, así como las absorvedoras y el aire ex-
terior se encuentran a una misma temperatura, por tanto sólo se a-
nalizará en el estado estable.
- c) Las pérdidas de energía por las caras del horno serán referidas a
la temperatura ambiente.
- d) Las placas cobertoras se considerarán superficies equitérmi-
cas.
- e) Las superficies radiadoras así como el aire exterior de la mufla
se considerarán como un sólo sistema de capacidad térmica.

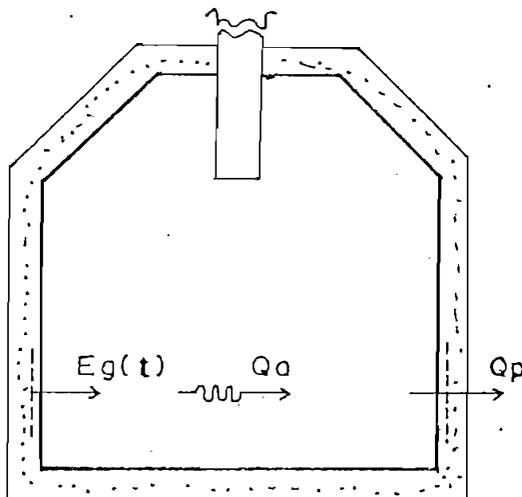


Fig. 2.6. Esquema que muestra el flujo de energía en la mufla:

$E_g(t)$ = energía entregada.
 Q_a = energía almacenada.
 Q_p = energía de pérdidas.

Con las asunciones anotadas y para el sistema mostrado en la figura 2.6., se establece que el balance de energía se ajusta a la siguiente expresión:

$$E_g(t) = Q_a + Q_p \quad (2.40)$$

Donde:

$E_g(t)$ = energía entregada al sistema.

Q_a = energía almacenada por el sistema.

Q_p = pérdidas de calor desde el sistema al ambiente.

2.4.2. Energía térmica almacenada en la mufla.

La cámara de la mufla conforma un sistema de capacidad térmica que da lugar a un almacenamiento de energía que se lo evalúa por (2):

$$Q_a = M \cdot C \cdot \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad (2.41)$$

Donde:

$\frac{dT}{dt}$ = variación de la temperatura en la cámara respecto al tiempo.

MC = capacitancia térmica equivalente que se evalúa por: (4)

$$MC = \rho_p \cdot V_p \cdot C_p + \rho_a \cdot V_a \cdot C_a + \rho_i \cdot V_i \cdot C_i \quad (2.42)$$

ρ_p , ρ_a , ρ_i = densidad de los absorbedores, aire y aislador, respec-

tivamente.

V_p , V_a , V_i = volumen de los absorbedores, aire y aislador, respectivamente.

C_p , C_a , C_i = calor específico de los absorbedores, aire y aislador, respectivamente.

Los volúmenes se evaluarán como:

$$V_p = A_p \cdot e_p \quad (2.43)$$

Donde:

V_p = volumen de las placas absorbedoras (m³)

e_p = espesor de las placas absorbedoras (m)

A_p = área de las placas absorbedoras (m²)

$$V_a = \pi r_1^2 \cdot L_1 + \pi \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right)^2 \cdot L_2 \quad (m^3) \quad (2.44)$$

En donde los valores corresponden a las dimensiones indicadas en la figura 2.7.

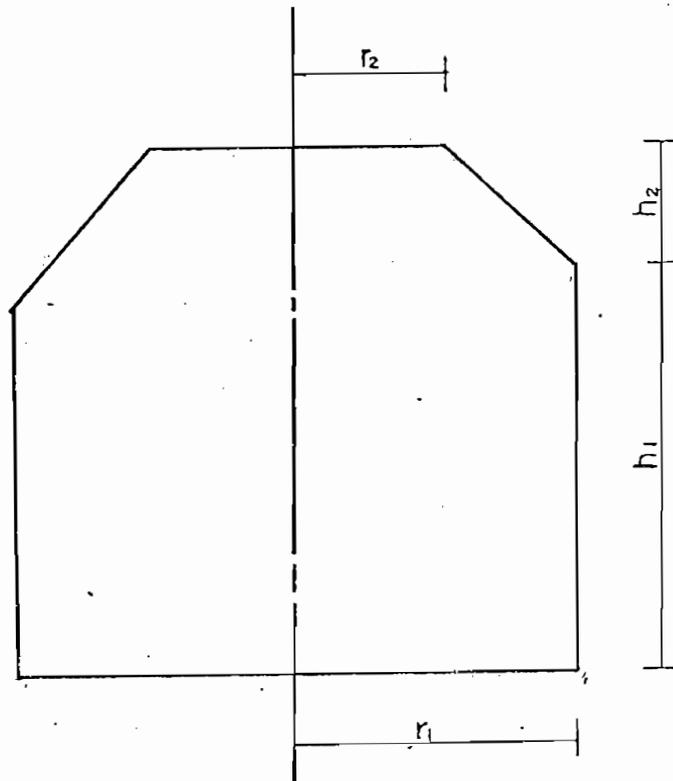


Fig. 2.7. Dimensiones de la cámara de la mufla.

2.4.3. Pérdidas desde la cámara de la mufla al medio ambiente

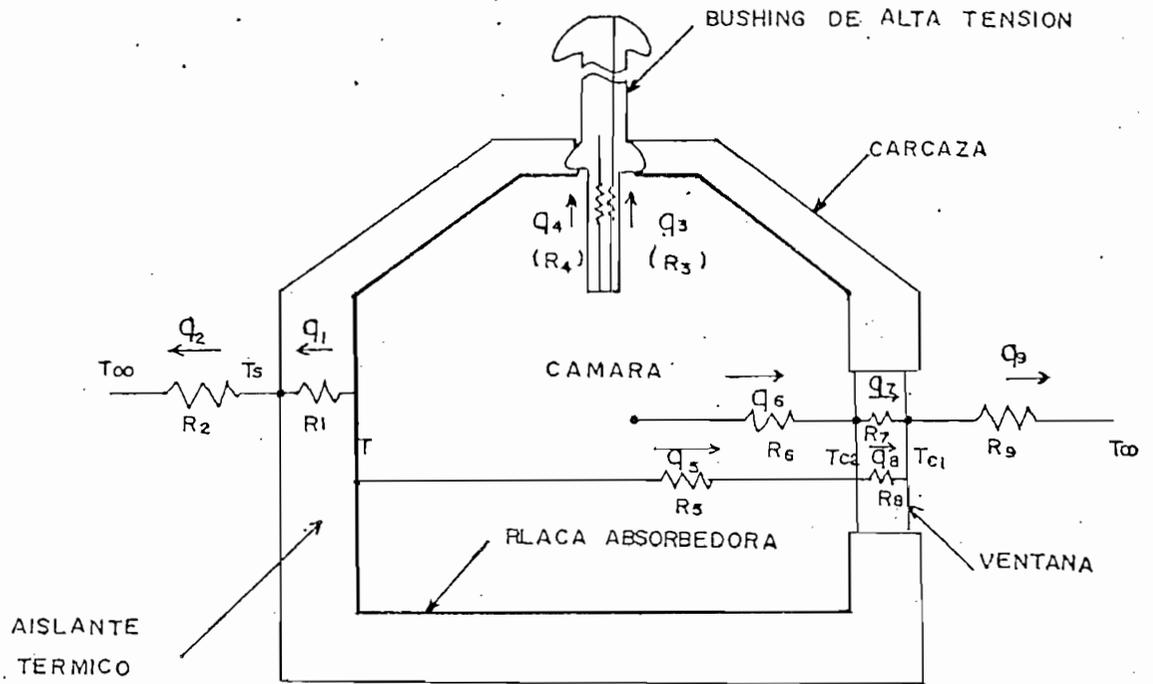
En la mufla existirán pérdidas por convección, conducción y radiación desde la placa absorbidora y el aire interior, hasta el exterior a través de las paredes de la cámara.

En la figura 2.8. se muestra un esquema de las pérdidas en la mufla.

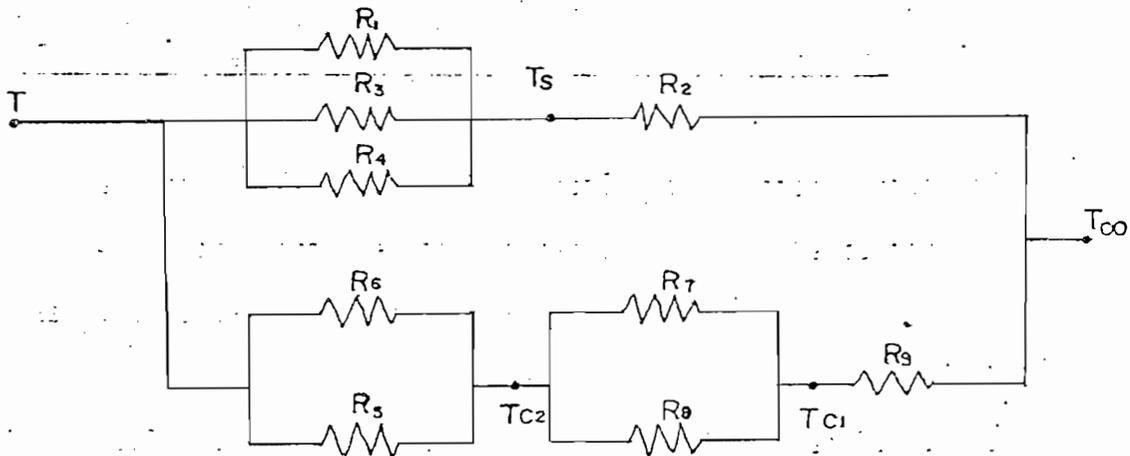
Donde:

E_g = energía ganada por las superficies absorbedoras.

q_1, R_1 = pérdidas de calor por conducción y su resistencia térmica respectiva.



(a)



(b)

Fig. 2.8. (a) Representación de los flujos de pérdidas en la mufla con su resistencia térmica respectiva.
 (b) Circuito equivalente del flujo de pérdidas mostrado - en (a).

q_2, R_2 = pérdidas de calor por convección y su resistencia térmica respectiva.

q_3, R_3 = pérdidas de calor por conducción en el aislador y su resistencia térmica respectiva.

q_4, R_4 = pérdidas de calor por conducción en el relleno del "bushing" y su resistencia térmica respectiva.

q_5, R_5 = pérdidas de calor por radiación desde las superficies absorvedoras hacia la segunda cubierta de vidrio y su resistencia térmica total respectivamente.

q_6, R_6 = pérdidas de calor por convección desde el aire interior de la cámara del horno hacia la segunda cubierta de vidrio y su resistencia térmica respectivamente.

q_7, R_7 = pérdidas de calor por radiación entre las dos cubiertas de vidrio y su resistencia térmica respectivamente.

q_8, R_8 = pérdidas de calor por convección desde la segunda hacia la primera cubierta de vidrio y su respectiva resistencia térmica.

q_9, R_9 = pérdidas de calor por convección desde la primera cubierta de vidrio hacia el ambiente exterior y su respectiva resistencia térmica.

T = temperatura de las placas absorvedoras |°C |

T_s = temperatura de la superficie exterior |°C |

T_∞ = temperatura del ambiente externo |°C |

T_{c1} = temperatura de la primera cubierta de vidrio |°C |

T_{c2} = temperatura de la segunda cubierta de vidrio |°C |

2.4.3.1. Formulación de q_1 , R_1

Las pérdidas de calor por conducción entre las placas absorbedoras y la superficie exterior están dadas por:

$$q_1 = k \cdot S \cdot (T - T_s) \quad (2.45)$$

Donde:

k = conductividad del aislante térmico.

S = factor de forma por extremos y aristas definido en las expresiones: 2.4; 2.5; 2.6.

Para el caso de la mufla definida como en la figura 2.7. se obtienen las siguientes expresiones:

$$S_p = \frac{2\pi r_1 h_1}{2\pi r_1} + \frac{2\pi \left(\frac{r_1 + r_2}{2}\right) h_2}{2\pi r_1 + 2\pi r_2} + \frac{\pi r_1^2}{2\pi r_1} + \frac{\pi r_2^2}{2\pi r_1}$$

$$S_v = 0.54 (2\pi r_1 + 4\pi r_2)$$

$$S_e = 0.15 D \times 4$$

Donde:

h_1, h_2 = alturas de la cámara | m |

r_1, r_2 = radios de la cámara | m |

D = $r_{ext} - r_{int}$

Operando:

$$S = h_1 + \frac{h_2}{2} + \frac{r_1}{2} + \frac{r_2}{2} + 3.39(r_1 + 2 r_2) + 0.6 D \quad (2.46)$$

Otra forma de evaluar el flujo térmico es (2):

$$q = \frac{T - T_s}{R} \quad (2.46.a)$$

De donde se obtiene:

$$R = \frac{T - T_s}{q} \quad (2.46.b)$$

Donde R = resistencia térmica | °C/W |

Reemplazando las ecuaciones 2.45 y 2.46 en 2.46.b. se obtiene la expresión que permitirá evaluar R_1 :

$$R_1 = \frac{1}{k \left| h_1 + \frac{h_2}{2} + \frac{r_1}{2} + \frac{r_2}{2} + 3.39(r_1 + 2 r_2) + 0.6 D \right|} \quad (2.47)$$

2.4.3.2. Formulación de q_2 , R_2

Las pérdidas por convección en la superficie de la mufla se las evalúa por: (4)

$$q_2 = h_2(A_b + A_s) (T_s - T_\infty) \quad (2.48)$$

Donde:

A_b = área exterior de las bases | m^2 |

A_s = área exterior lateral | m^2 |

h_2 = coeficiente convectivo de transferencia de calor se lo de termina por (2)

$$h_2 = 5.7 + 3.8 v \quad (2.49)$$

Donde:

v = velocidad media del viento | m/s |

Por tanto R_2 se evalua como:

$$R_2 = \frac{1}{(A_b + A_c)(5.7 + 3.8 v)} \quad (2.50)$$

2.4.3.3. Formulación de q_3 , R_3 , q_4 , R_4

Las pérdidas de calor por conducción a través del bushing y su relleno se las evalua por: (1)

$$q_i = K_i \frac{A_i}{L_i} (T - T_\infty) \quad \text{Si } i = 3,4 \quad (2.51)$$

Donde:

K_i = conductividad térmica del material.

A_i = área del material expuesto a la cámara.

L_i = longitud del material hasta estar a T_∞ .

Por tanto R_i se evalúa como:

$$R_i = \frac{L_i}{K_j A_j} \quad i = 3, 4 \quad (2.52)$$

2.4.3.4. Formulación de q_5 , R_5

Las pérdidas de calor por radiación desde la placa absorbadora a la segunda cubierta de vidrio se determina aplicando el método de transferencia de calor desde un recinto cerrado dado por 2.15.

$$q_5 = \frac{A_c e_c}{1 - e_c} (\sigma T_{c_2}^4 - B_c) \quad (2.53)$$

Donde:

q_6 = flujo de calor por radiación entre la placa absorbadora y la segunda cubierta.

A_c = área de la cubierta de vidrio.

e_c = emisividad de la placa absorbadora.

T_{c_2} = temperatura de la segunda cubierta.

B_c = radiosidad de la cubierta, se calcula por la ec. (2.16)

La resistencia térmica se puede obtener con la expresión:

$$R_5 = \frac{T - T_{c_2}}{q_5} \quad (2.54)$$

2.4.3.5 Formulación de q_6 , R_6

El flujo de energía por convección desde el aire interior de la cámara de la mufla a la segunda cubierta de vidrio se evalúa por

$$q_6 = h_6 \cdot A_c (T - T_{c2}) \quad (2.55)$$

donde:

A_c = área de la cubierta de vidrio.

h_6 = coeficiente de convección de transferencia de calor, el mismo que está dado por:

$$h_6 = (0.29 + 0.27) | (T - T_{c2}) |^{1/4} \left(\frac{1}{l} + \frac{2}{l+p} \right)^{1/4} \quad (2.56)$$

Dada por la suma de las ecuaciones 2.9; 2.10.

donde:

l = longitud vertical de la ventana.

p = ancho de la ventana.

Con lo cual la resistencia térmica R_6 se define:

$$R_6 = \frac{1}{0.56 (lp) | (T - T_{c2}) \left(\frac{1}{l} + \frac{2}{l+p} \right) |^{1/4}} \quad (2.57)$$

2.4.3.6 Formulación de q_7 , R_7

El flujo de calor por radiación entre las placas cobertoras se puede analizar como un intercambio radiante entre superficies paralelas in finitas dado que las dimensiones de los vidrios son mayores que las distancias que los separa, por tanto la ecuación será para el flujo de calor:

$$q_7 = \frac{Ac \cdot \sigma \epsilon_1 (Tc_2^4 - Tc_1^4)}{2/(1 - \epsilon_1)} \quad (2.58)$$

Donde:

Ac = área de la cubierta (m²)

Tc_2 = temperatura de la segunda cubierta (°C)

Tc_1 = temperatura de la primera cubierta (°C)

ϵ_1 = emisividad de la cubierta.

Por lo tanto la resistencia térmica será:

$$R_7 = \frac{2/(1 - \epsilon_1)}{\epsilon_1 Ac \sigma (Tc_2 + Tc_1)(Tc_2^2 + Tc_1^2)} \quad (2.59)$$

2.4.3.7. Formulación de q_8 , R_8

El flujo de calor por convección entre placas de vidrio se puede calcular con la expresión:

$$q_8 = h_8 Ac (Tc_2 - Tc_1) \quad (2.60)$$

Donde:

A_c = área del vidrio (m^2)

T_{c_1} = temperatura de la primera cubierta ($^{\circ}K$)

T_{c_2} = temperatura de la segunda cubierta ($^{\circ}K$)

h_8 = coeficiente convectivo de transferencia de calor entre las placas de vidrio.

De las expresiones expuestas en el estudio inicial (Ecs. 2.11 y 2.12)

$$h_8 = k \cdot 0.195 Gr^{1/4} \quad (2.61)$$

Donde:

k = conductividad térmica del aire.

Gr = número de Grashof.

Luego, la resistencia térmica estará dada por:

$$R_8 = \frac{1}{A_c k 0.195 Gr^{1/4}} \quad (2.62)$$

2.4.3.8. Formulación de q_9 , R_9

El flujo de calor por convección entre la primera tapa de vidrio y el medio ambiente se evalúa por:

$$q_9 = A_c \cdot h_9 \cdot (T_{c_1} - T_{\infty}) \quad (2.63)$$

Donde:

A_c = área de la placa de vidrio o segunda placa.

h_g = coeficiente convectivo de transferencia del calor, se evalúa mediante:

$$h_g = 5.7 + 3.8 \times V$$

Donde:

V = velocidad del viento.

Por tanto la resistencia térmica estará dada por:

$$R_g = \frac{1}{A_c(5.7 + 3.8 V)} \quad (2.64)$$

2.4.3.9. Formulación del flujo de energía total perdido y la resistencia térmica total equivalente

El flujo total de pérdidas, del interior al exterior de la cámara, depende de la temperatura que vaya adquiriendo la cámara, por tanto la pérdida de energía variable en el tiempo se la evalúa como: (2)

$$Q_p = (T - T_{\infty})/RT \quad (2.65)$$

Donde:

Q_p = pérdida total de energía térmica variable con el tiempo.

T = temperatura interior de la cámara.

T_{∞} = temperatura del medio ambiente exterior.

R_T = resistencia térmica total equivalente.

Para determinar la resistencia térmica equivalente se parte de la analogía entre un circuito eléctrico y el sistema térmico. Así tendremos analogía entre:

TABLA DE ANALOGIAS

MAGNITUD CALORICA

MAGNITUD ELECTRICA

q (W)

i (A)

R ($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$)

R (Ω)

T ($^{\circ}\text{C}$)

V (V)

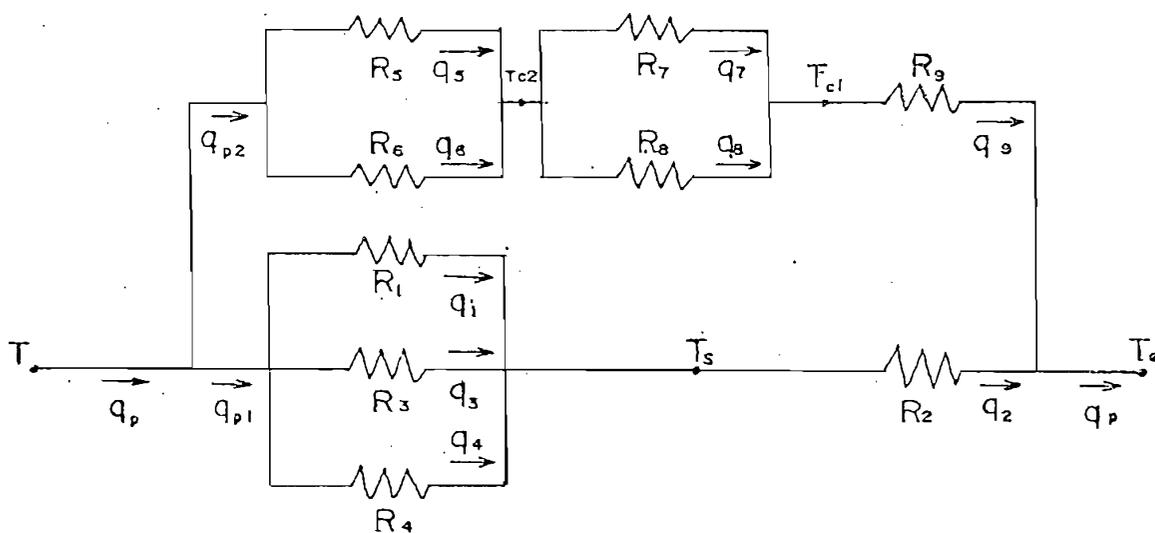


Fig. 2.9. Circuito equivalente de pérdidas térmicas desde el interior de la mufla hacia el exterior (igual a 2.8.b).

De donde:

$$R_{T_1} = R_1 \parallel R_3 \parallel R_4 + R_2 \quad (2.66.a)$$

$$R_{T_2} = R_5 \parallel R_6 + R_7 \parallel R_8 + R_9 \quad (2.66.b)$$

$$R_T = R_{T_1} \parallel R_{T_2} \quad (2.67)$$

2.5. ECUACION DIFERENCIAL DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE LA MUFLA

Partiendo del balance energético expuesto anteriormente y reemplazando las expresiones obtenidas, la ecuación diferencial que describe el comportamiento térmico de la mufla es:

$$Eg(T) = MC \frac{dT}{dt} + \frac{T - T_{\infty}}{R_T} \quad (2.68)$$

Donde:

Eg = energía entregada por la fuente | W-min |

Que se la evalua como:

$$Eg(T) = I^2 R(T) \cdot t \quad (2.69)$$

siendo:

I = corriente eléctrica eficaz (A)

t = tiempo transcurrido (min)

$R(T)$ = resistencia de las niquelinas variable con la temperatura (Ω)

Que se la evalúa como:

$$R(T) = R_{\infty} (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2 + \dots) \quad (2.70)$$

donde ΔT se evalúa como

$$\Delta T = T - T_{\infty} \quad (2.71)$$

siendo:

T_{∞} = temperatura a la cual se tiene R_{∞} [$^{\circ}\text{C}$]

Como en un circuito eléctrico la corriente se calcula:

$$I = \frac{V}{R(T)} \quad (2.72)$$

donde:

V = voltaje aplicado eficaz (Voltios)

Se obtiene que en la expresión 2.69, reemplazando las ecs. 2.70. y 2.72. la energía esta dada por:

$$E_g(T) = \frac{V^2}{R_{\infty} (1 + \alpha_1 (T - T_{\infty}) + \alpha_2 (T - T_{\infty})^2)} \cdot t \quad (2.73)$$

Luego la energía por unidad de tiempo será:

$$E_g = \frac{V^2}{R_{\infty} (1 + \alpha_1(T-T_{\infty}) + \alpha_2(T-T_{\infty})^2)} \quad (2.74)$$

Reemplazando (2.74) en (2.68) tenemos

$$MC \frac{dT}{dt} = \frac{V}{R_{\infty}(1 + \alpha_1(T-T_{\infty}) + \alpha_2(T-T_{\infty})^2)} - \frac{T - T_{\infty}}{R_T} \quad (2.75)$$

Cuya solución se la obtiene con métodos numéricos por ser una ecuación diferencial no lineal.

Para resolver esta ecuación se escogerá la temperatura más alta de operación y se fijará un valor de $R(T)$ para este punto, debiendo luego evaluar el comportamiento de $R(T)$ con la temperatura.

Se aplica la ley de Ohm en la evaluación de la energía entregada por las resistencias ya que la tensión eficaz se puede mantener constante para un determinado valor de temperatura que se desee alcanzar.

Cabe resaltar el hecho de que un sistema eléctrico es más fácil controlar el valor eficaz de voltaje y mantenerlo constante que mantener constante la corriente. Esto se lo consigue con circuitos electrónicos de potencia realizando el control del V_{ef} por métodos tales como: control de fase, ciclo integral, etc. (5)

2.6. CONTROL DE TEMPERATURA MEDIANTE CONTROL DE POTENCIA

La expresión 2.75. sugiere el que la temperatura de la mufla se pueda

controlar mediante el control de voltaje.

Si se recuerda que la potencia instantánea viene dada por:

$$p = v \cdot i \quad (2.76)$$

y que la potencia media, que es la energía consumida o transmitida en la unidad de tiempo está dada por

$$P = \frac{1}{\hat{T}} \int_0^{\hat{T}} p \, dt \quad (2.77)$$

donde:

\hat{T} = período (seg)

dt = diferencial de tiempo.

Para una carga resistiva:

$$i = \frac{v}{R} \quad (2.78)$$

Si se reemplaza 2.76 y 2.78 en 2.77 se tiene:

$$P = \frac{1}{\hat{T}} \int_0^{\hat{T}} \frac{v^2}{R} \, dt \quad (2.79)$$

Si para una temperatura determinada la resistencia varia hasta $R(T)$ ($T =$ temperatura), de la expresión 2.79. se puede llegar a:

$$P = \frac{1}{R(T)} \frac{1}{\hat{T}} \int_0^{\hat{T}} v(t)^2 dt \quad (2.80)$$

Donde:

\hat{T} = período de la señal $| S |$.

$V(t)$ = señal sinusoidal de voltaje $| V |$

$R(T)$ = resistencia que será constante para una temperatura T constante $| \Omega |$

Por tanto de 2.80. se llega a:

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R(T)} \quad (2.81)$$

Como se conoce la potencia media es la que se transforma en otro tipo de energía en un sistema conversor, en este caso en energía calórica, de ahí que para controlar la cantidad de calor y por ende la temperatura de la mufla se tenga que controlar la potencia entregada a través del control del voltaje eficaz.

Existen varias formas de controlar el voltaje eficaz en un sistema, pudiendo hacerlo mediante sistemas electromecánicos o con sistemas de estado sólido.

En nuestro medio aún se encuentran controles de potencia para sistemas térmicos del tipo electromecánico, pero se tiene la desventaja - que son lentos y por tanto acarrearán una banda de error en el control muy grande.

Dentro de los sistemas de control de potencia de estado sólido existen varios tipos de ellos así: control de fase, control de fase inverso, control por ciclo integral, etc.

De estos controles se analizarán las características de algunos de ellos para justificar su utilización.

2.6.1. Control de fase

Este tipo de control se lo hace utilizando los elementos electrónicos denominados tiristores, los cuales son dispositivos que permiten la conexión de la carga a la red solo cuando han recibido una señal de encendido.

Como se analizó antes la potencia entregada a la carga depende del voltaje eficaz y el voltaje eficaz depende del período con que se aplique la señal por tanto al controlar el período de la señal se controlarían el valor del voltaje eficaz y por ende la potencia.

En forma sencilla una señal controlada por fase será del tipo mostrada en la figura 2.10., para la cual el voltaje eficaz está dado por la ecuación 2.82:

$$V_{\text{rms}} = V_{\text{max}} \sqrt{\frac{(\pi - \alpha) + \frac{\text{Sen } 2\alpha}{2}}{2\pi}} \quad ; \quad 0 \leq \alpha \leq \pi \quad (2.82)$$

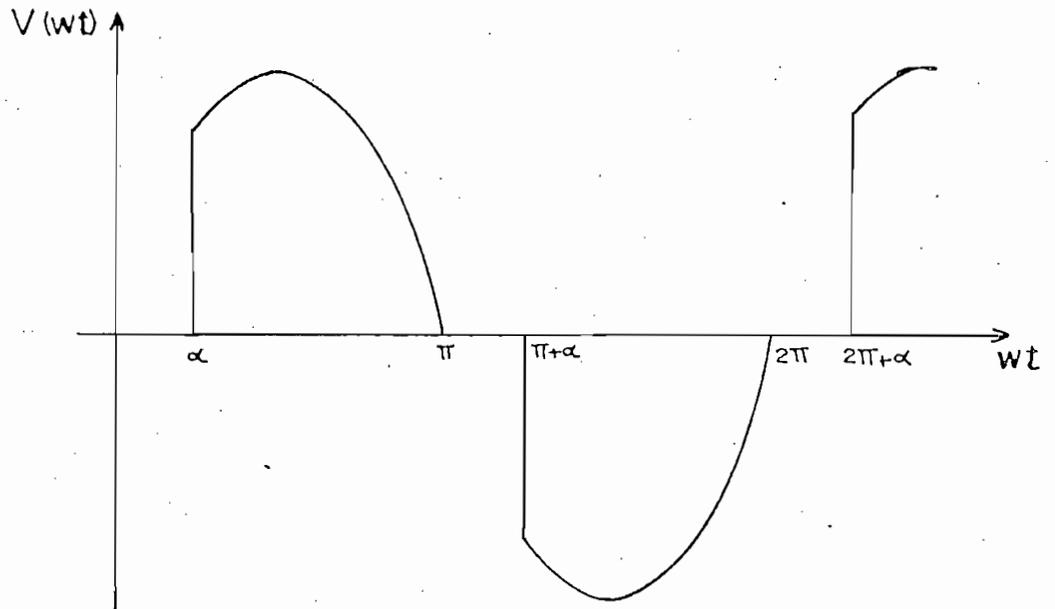


Fig. 2.10. Variación del valor eficaz de una señal por control de fase.

Esta forma de control tiene el inconveniente de producir una transición abrupta en la conexión, lo cual provoca ruido de radio frecuencia.

Dentro de este tipo de control de fase existen las modalidades inversa y diferencial que son realizadas cuando se requiere reducir el paso abrupto de conexión a desconexión.

Este tipo de control se justifica sólo cuando la potencia a controlar se es baja respecto de la potencia del transformador que alimenta el sistema.

2.6.2. Control por ciclo integral

Este control consiste en entregar a la carga ciclos enteros de señal así como lo muestra la figura 2.11. para la cual el voltaje eficaz esta dado por la ecuación 2.83.

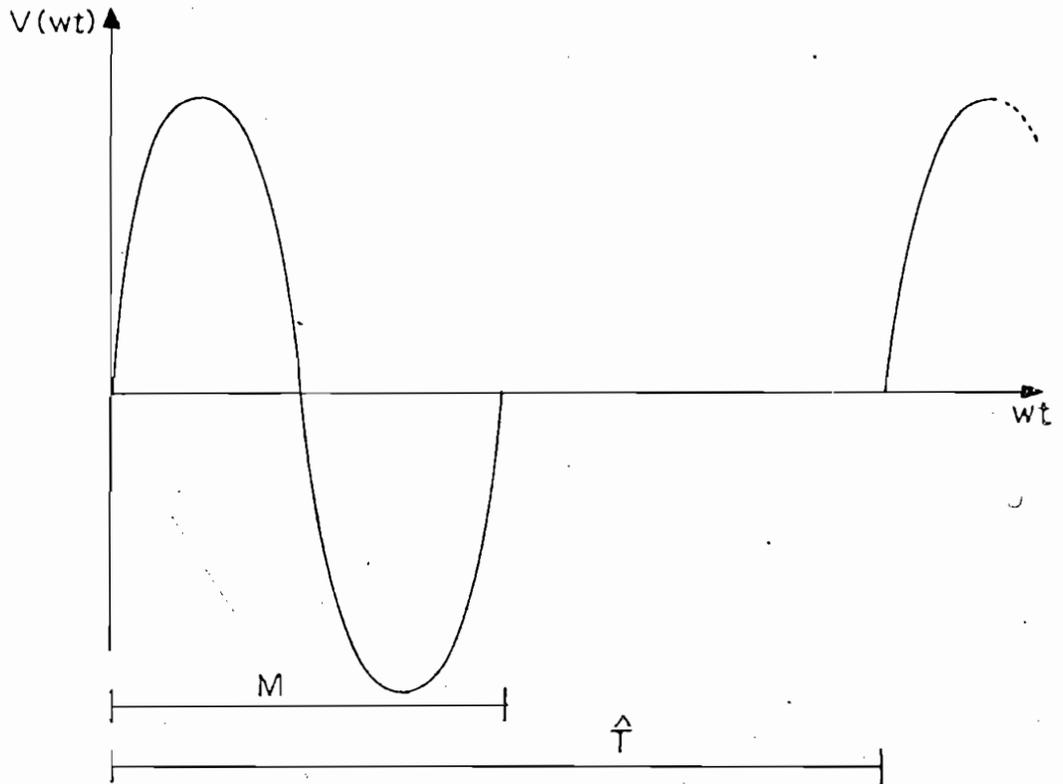


Fig. 2.11. Variación del valor eficaz de una señal controlada por ciclo integral.

$$V_{rms} = V_{max} \frac{M}{T} \quad (2.83)$$

Como se observa este tipo de control sólo aplica ciclos completos, lo cual permite tener características mejores que las conseguidas con el sistema anterior así:

- Ausencia o reducción al mínimo del ruido de radio frecuencia.
- Los tiristores y/o triacs no precisan rendir grandes prestaciones - relativas a la derivada de la corriente respecto al tiempo que es nociva al ser muy elevada.
- La potencia suministrada esta formada por unidades elementales de un ciclo mínimo sin límite con respecto al máximo.

Por lo expuesto este tipo de control es el que menos problemas presenta inclusive para los dispositivos electrónicos de control. Lo cual hace muy recomendable su utilización en circuitos de control térmicos.

De las formas de control mencionadas la más utilizada en la actualidad es la del control de potencia por ciclo integral y será por tanto el control que se implementará para controlar la potencia en el sistema.

2.7. SENSORES Y SISTEMA DE MEDICION DE LA TEMPERATURA

2.7.1. Sensores de temperatura

Los sensores o transductores son dispositivos que permiten cambiar una variable de un tipo de energía a otro así por ejemplo: temperatura a voltaje.

Para sensar la temperatura y utilizar esta señal en circuitos electrónicos existen varios tipos de dispositivos tales como: Sondas de pla

tino, termocuplas, termistores, etc.

Todos estos dispositivos basan su funcionamiento en el comportamiento de los materiales conductores o semiconductores frente a las variaciones de la temperatura.

Así las sondas de platino son dispositivos provistos de una resistencia construida de un hilo de platino donde se aprovecha la variación de la resistencia con la temperatura dada por: (6)

$$R(T) = R_0(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T^2 + \dots) \quad (2.84)$$

donde:

$R(T)$ = resistencia a T |°C |

$R(0)$ = resistencia a 0 |°C |

ΔT = variación de temperatura.

α_1 = coeficiente lineal de variación de la resistencia con la temperatura.

α_2 = coeficiente cuadrático de variación de la resistencia con la temperatura.

Las termocuplas o termopares son dispositivos contruidos pensando en la utilización de la termo electricidad, la cual se basa en que al someter a una unión de dos materiales de diferente tipo (por ejemplo - iron - constantan) en los extremos opuestos de la unión aparecerá una diferencia de potencial del orden de los mV, que se deberá básicamente a la diferencia energética alcanzada por los electrones de cada ma

terial, respecto de la temperatura a la que se encuentra el lado o puesto.

Se las encuentra de varios tipos así: J, K, T, E, etc. cuya diferencia radica en los materiales utilizados para formar el termo par y por tanto varia también el rango de temperatura en el cual pueden ser utilizadas, así como la variación del voltaje con la temperatura conocido como coeficiente de Seebeck. (7)

Los termistores, son dispositivos contruidos de óxidos metálicos a glutinados con polímeros y se los encuentra de dos tipos los PTC (Positive Temperature Characterístic) y NTC (Negative Temperature Characteristic).

Los PTC se caracterizan por aumentar su resistencia al aumentar la temperatura y los NTC por disminuir su resistencia al aumentar la temperatura. (3)

Por estar constituidos con materiales poliméricos el rango de temperatura en el que pueden trabajar es bajo, teniendo además el inconveniente de presentar un comportamiento no lineal, lo cual hace que para utilizarlos haya que linealizar su característica.

Debido a que se va a trabajar hasta 300°C se utilizará una termocupla del tipo T (copper - Constatan, que se la puede conseguir en el mercado y su costo respecto a la sonda de platino es mas bajo).

Adicionalmente este tipo de termocupla presenta un error de ± 1 °C

en el rango de operación de 0 a 390 °C. (7)

2.7.2. Sistema sensor

Como se señaló el sensor escogido es la termocupla, dispositivo que se caracteriza por transducir la temperatura en señal de voltaje, el mismo que para el termopar tipo T oscila entre 0 mV para 0 °C y 14.864 mV para 300°C, teniendo un coeficiente Seebeck o coeficiente de variación del voltaje con la temperatura de 42.7 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. (7)

El voltaje que aparecerá entre los terminales abiertos de la termocupla estará dado por:

$$v = v_{\text{TIN}} - V_{\text{tamb}}$$

v = voltaje en los terminales abiertos | mV |

v_{TIN} = voltaje en los terminales abiertos si la temperatura ambiente fuese 0 °C | mV |

V_{Tamb} = voltaje que aparece debido a que la temperatura de referencia es la ambiental. | mV |

Para poder utilizar esta señal en el circuito de control, se deben hacer algunas consideraciones que hagan válida su utilización.

1. Como la señal es del orden de los mV, hay que llevar esta señal a un sistema con alta impedancia de entrada, que permita captar la señal en su totalidad.

2. Hay que proteger el sistema contra rotura de termopar.
3. La temperatura de referencia será la temperatura ambiente, por tanto cualquier variación deberá ser compensada con un sistema auxiliar. Simulando con el los 0°C como temperatura de referencia. (8)
4. Las señales se deben amplificar hasta un valor tal que permita manejarlas con mayor seguridad y facilidad, debiendo por tanto en las etapas aplicadoras eliminar los efectos de offset, derivas, retornos por tierra, variación de resistencias del sistema eléctrico.
5. Introducir esta señal a un sistema digital donde se codifiquen los pulsos que permitan presentar la temperatura en displays.

Para conseguir estos objetivos se diseñará un circuito electrónico que cumpla todos estos requerimientos, en el cual como detalle importante se debe destacar la utilización de resistencias de precisión que son las que se mantienen más tiempo inalteradas por las condiciones ambientales estando además su valor declarado con un error menor al $\pm 1\%$

Dado que la utilización de este equipo será en el estudio de envejecimiento de materiales aislantes, los requerimientos en lo que ha medición y control de temperatura se refieren deben enmarcarse dentro de las normas para que los resultados obtenidos tengan validéz.

La norma IEC - 212, 1971 (STANDARD CONDITIONS FOR USE PRIOR TO AND DURING THE TESTING OF SOLID ELECTRICAL INSULATION MATERIALS) estable-

ce que para que los resultados obtenidos sean válidos al trabajar con rasgos de temperatura de hasta 400°C se puede tener un error de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ y sólo en casos especiales el error puede ser de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Siendo además condición necesaria que la medición se realice lo más cerca posible a la muestra bajo estudio.

Para conseguir estos objetivos el diseño considera todos los factores de error ya mencionados y se construirá un orificio en el pedestal porta electrodos por lo que se introducirá la termocupla, teniendo así la medición a nivel de electrodos y sin distorsionar el campo eléctrico en la cámara de la mufla. La termocupla será colocada como muestra la figura 2.12.

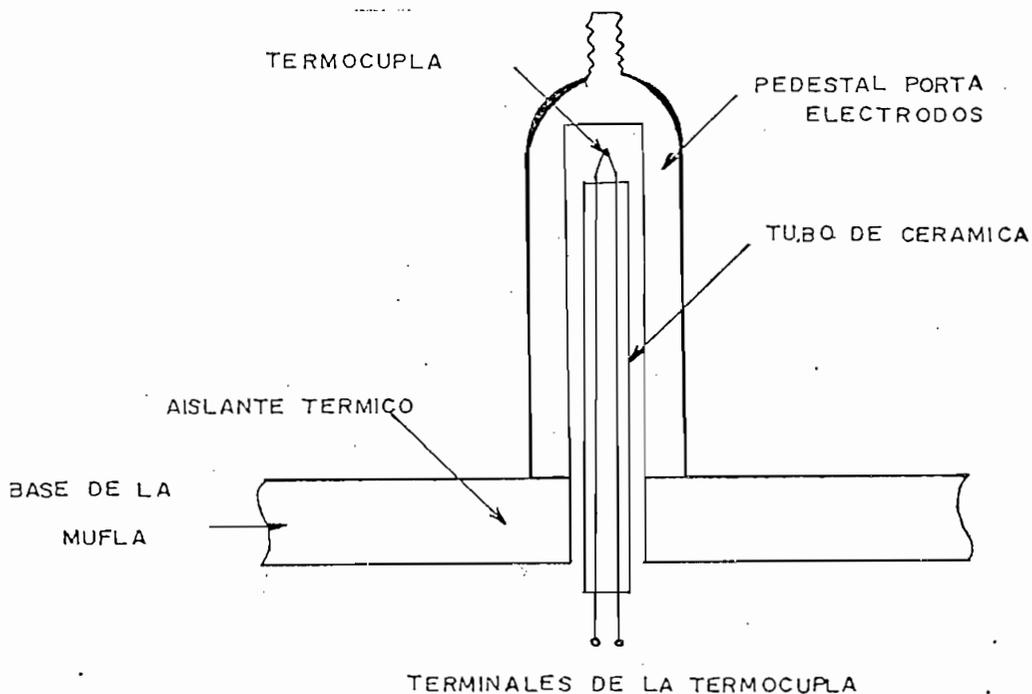


Fig. 2.12. Colocación de la termocupla en el interior de la cámara para sensor la temperatura lo más cerca de la muestra.

CAPITULO III

AISLAMIENTO ELECTRICO

Para poder realizar el estudio de envejecimiento de materiales se ha señalado que a las muestras se las va a someter a esfuerzos debidos a temperatura o voltaje (campo eléctrico) o ambos.

El voltaje con el cual se operará en la cámara será de hasta 30 Kv, valor, este que se lo justificará más adelante dentro de este capítulo.

Por tanto será conveniente analizar el comportamiento del medio aislante y la configuración geométrica desde el punto de vista del aislamiento.

3.1. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA CAPACIDAD DIELECTRICA DEL AIRE

El comportamiento dieléctrico del aire esta regido por la ley de Paschen, la misma que establece una relación entre el producto densidad por distancia y el voltaje de disrupción.

Pero al no trabajar a condiciones normalizadas de presión, temperatura y humedad (según BS. 20°C, 1 at, 11 gr/cm³) el voltaje de disrupción estará dado por: (9)

$$V_s = 24.4 (pd) + 6.53 \sqrt{pd} \quad (3.1)$$

Donde:

V_s = voltaje de disrupción del aire (KV).

d = separación entre electrodos menor o igual a 20 cm.

p = densidad del aire, dada por:

$$p = \frac{P}{760 \text{ mmHg}} \cdot \frac{293}{t + 273} \text{ a } 11 \text{ gr/m}^3 \text{ de humedad} \quad (3.2)$$

Donde:

P = presión atmosférica (mmHg)

t = temperatura del gas ($^{\circ}\text{C}$).

El considerar la variación de la humedad en el aire introduciría un factor de corrección de la densidad dado por:

$$H = \frac{h}{11 \text{ gr/m}^3} \quad (3.3)$$

donde:

H = factor de corrección por humedad.

h = humedad del medio. (gr/m^3)

Siendo por tanto:

$$p = \frac{P}{760} \cdot \frac{293}{t + 273} \cdot H \quad (3.4)$$

Estas expresiones no señalan el rango de temperatura para el cual se cumple la ley de Pashen, por tanto se realizaron pruebas de desrupción a diferentes longitudes y temperaturas que indicaron que el comportamiento dieléctrico del aire con una temperatura de hasta 200°C

se comportaba según la ley de Pashen, es decir sólo se afecta la densidad.

Pruebas realizadas con aire caliente entre temperaturas de 20 - 1100 °C por Powell y Ryan⁽⁹⁾ en 1969, demostraron que el voltaje de "disrupción del aire se altera respecto del obtenido de la curva de Pashen a partir de los 860°C, concluyéndose que el voltaje de ruptura del aire hasta esta temperatura solamente se afecta por la variación de la densidad."

Sobre esta temperatura se produce variaciones debido a la emisión de cátodo que puede aparecer dependiendo del material del mismo, ya que dicha emisión dependerá de la función de trabajo del material.

Si la mufla va a trabajar hasta 300°C, será suficiente considerar en el diseño, la variación del voltaje de disrupción debida a la variación de la densidad.

3.2. EFECTO DE LA CONFIGURACION GEOMETRICA DE LA MUFLA EN EL AISLAMIENTO

Adicionalmente al comportamiento del aire como dieléctrico, en el aislamiento se debe considerar la influencia de la configuración geométrica dada por las paredes de la mufla y los electrodos, debido a que la configuración del campo eléctrico que se obtenga dentro de la mufla influirá en los resultados al realizar el estudio de envejecimiento.

Si existen zonas con gradientes de potencial muy fuertes, se puede producir corona y dado que una de las formas de evaluar el envejecimiento es mediante la medición de microdescargas en el material, es ta corona puede invalidar la observación o análisis o los resultados que se obtengan.

Adicionalmente la separación entre las partes no aisladas del sistema debe ser tal que el campo eléctrico no se distorciona de la forma que tendría si los electrodos estuviesen en un sistema ordinario de prueba esto es sin placas aterrizadas en su entorno⁽⁹⁾.

Para evaluar este comportamiento se recurrió a dos procedimientos:

a) Modelación digital.

b) Modelación analógica.

3.2.a. Modelación digital

La modelación digital se la realizó utilizando el programa digital implementado por Correa René, "DISEÑO DE AISLADORES", Tesis de Grado, E.P.N., Quito, 1982.

Si bien es cierto esta tesis tiene algunas limitaciones respecto de la forma y tamaño del material aislante, en cambio permitió introducir un modelo aproximado de la configuración de interés así:

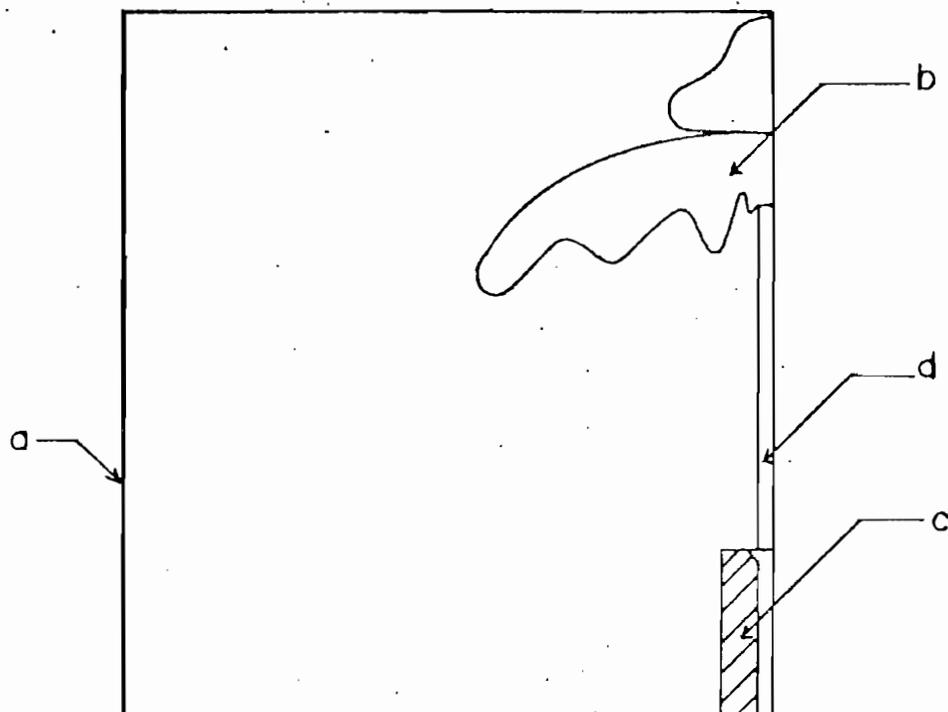


Fig. 3.1. Modelo introducido al computador.

Donde: a = paredes de la mufla.

b = aislador 52-4 bajo prueba.

c = bushing cerámico de ingreso de alta tensión a la mufla.

d = conductor.

Los datos utilizados, así como las dimensiones de los espacios de la matriz y los resultados detallados se presentan en el Apéndice A (RESULTADOS OBTENIDOS EN EL COMPUTADOR).

De los resultados obtenidos se encontró que con una distancia de aislamiento de 30 cm entre conductor y paredes de la mufla (que están al potencial de referencia), el campo eléctrico presentaba gradientes su

periores a los 10 KV/cm únicamente en la zona considerada crítica donde se une el bushing con la pared de la mufla, como se indica en los resultados del programa digital. La falta de resolución por la limitación del programa digital, que no fue hecho con esta perspectiva, determinó la modelación analógica, previendo que para mejorar esta concentración de campo detectada había que introducir en la configuración un anillo de tierra, que ayude a ecualizar y eliminar las gradientes peligrosas del orden de 16 KV/cm que se presentaban en esta zona. Este es un requerimiento importantísimo ya que se busca gradientes de potencial menores a 10 KV/cm para evitar la aparición de corona.

3.2.b. Modelo analógico

Para observar en mejor forma la configuración del campo eléctrico al variar el perfil de tierra junto al bushing, se recurrió a modelar este sector en forma analógica, utilizando el equipo de medición de equipotenciales MESSWANDLER, disponible en el laboratorio de Alto Voltaje, cuyo principio de operación se basa en la analogía existente entre densidad de corriente y densidad de flujo eléctrico:

$$J = \sigma E \quad (3.5)$$

$$D = \xi E \quad (3.6)$$

Esto permitió hacer modelos a escala de la zona de interés y encontrar la configuración de las curvas de potencial, permitiendo así ajustar el modelo y la forma del anillo de tierra para conseguir una menor con

centración de campo en este sector, que podría originar corona.

Para mantener una distribución más homogénea del campo eléctrico se simuló una primera vez en la forma como se indica en la Figura 3.2. Con estos resultados se estableció la superficie equipotencial hasta la cual existían fuertes gradientes de potencial, correspondiendo esta a la curva del 20%.

Teniendo como base esta curva, se modeló un perfil siguiendo la misma forma, que permita mantener el campo eléctrico en su entorno más homogéneo y que corresponde a un perfil Rogowsky.

En la modelación, el perfil obtenido se lo acercó al bushing hasta que tenga un contacto que permita sujetar al mismo.

Para evitar que el campo eléctrico se deforme por esto, se pone el tope del perfil en forma perpendicular a la cerámica en la parte baja de la saliente, haciendo que las líneas equipotenciales no cambien de dirección al cambiar de medio, (ver Figura 3.3).

Esto se justifica con la expresión válida para campos eléctricos que establece: (10)

$$\frac{\operatorname{tg} \gamma_1}{\operatorname{tg} \gamma_2} = \frac{\xi_2}{\xi_1} \quad (3.7)$$

Donde:

tg = tangente

γ_1 = ángulo con que incide la superficie equipotencial respecto

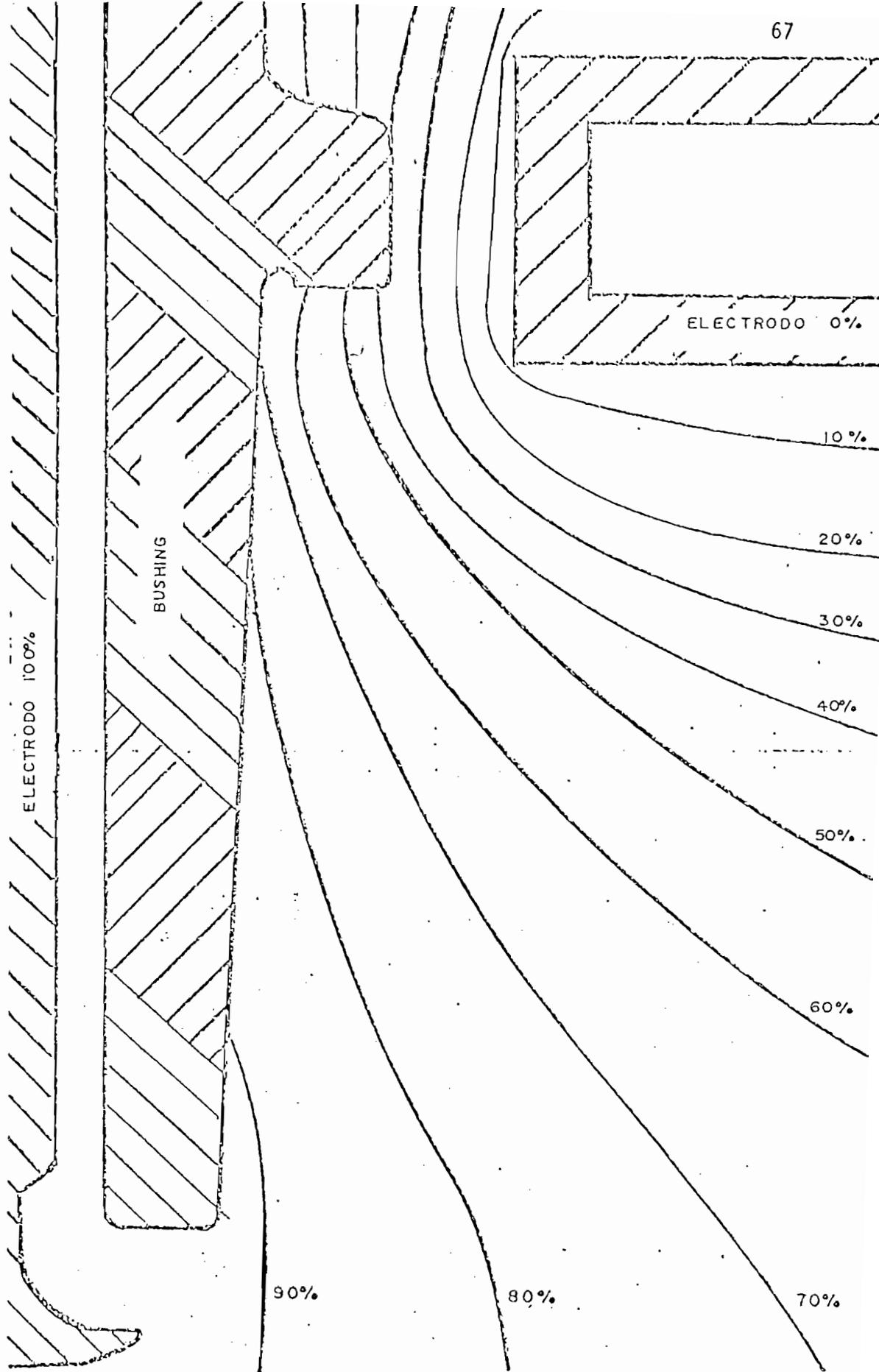


Fig. 3.2. Modelo analógico inicial para encontrar la distribución de superficies equipotenciales.

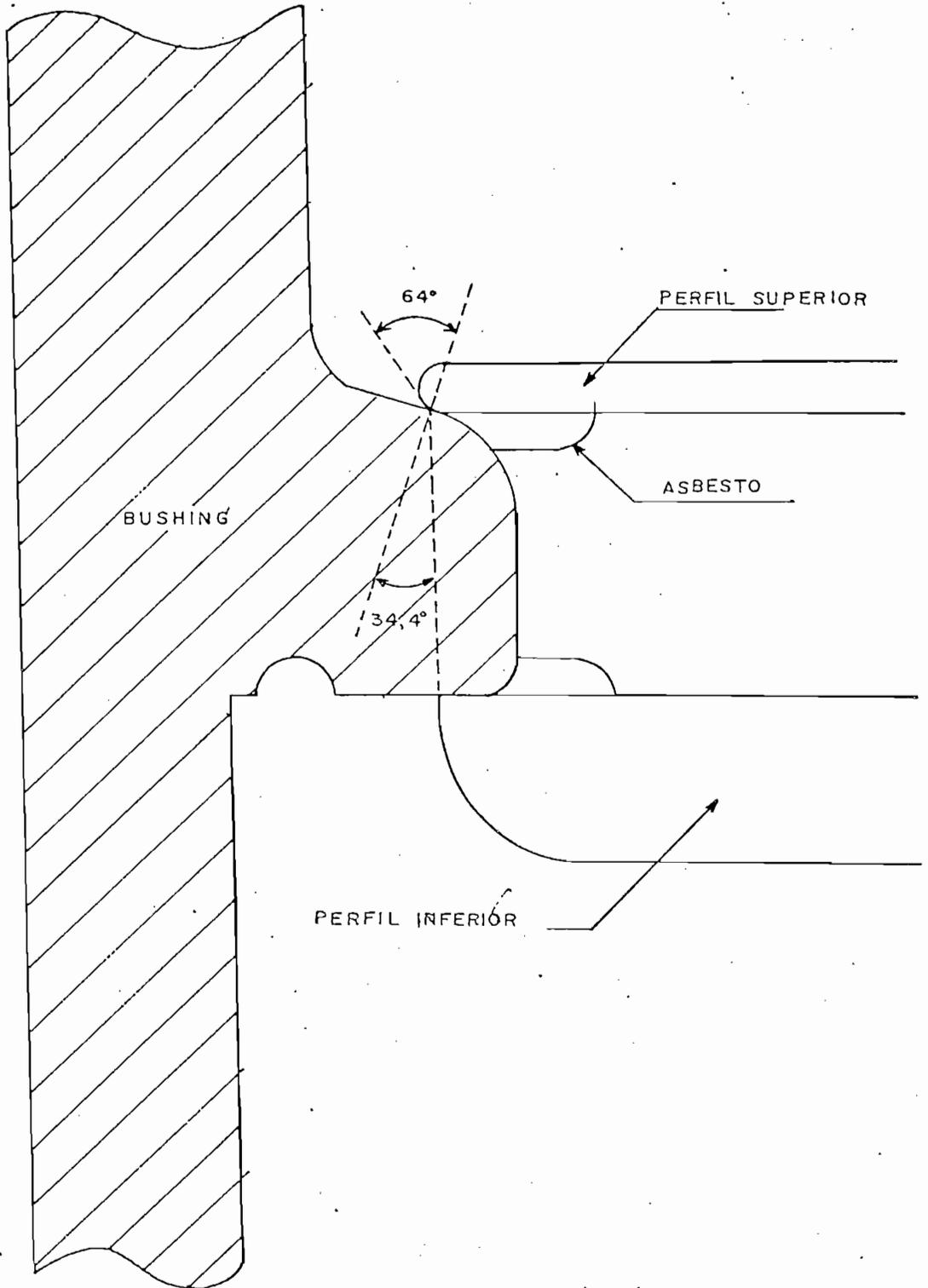


Fig. 3.3. Comportamiento de las superficies equipotenciales en el borde de aire - cerámica.

dé la normal al borde.

γ_2 = ángulo con que ingresa la superficie equipotencial en el medio 2.

ξ_1 , ξ_2 = permitividad relativa de los medios.

Por esta misma razón en la parte superior de la tapa se da una curvatura tal que las superficies equipotenciales mantengan la dirección requerida en la parte baja.

Por tanto si $\xi_1 = 3$, $\xi_2 = 1$ y $\gamma_1 = 34.44^\circ$, como se indica en la Figura 3.3, el ángulo para el perfil superior debe valer, utilizando la expresión 3.7.

$$\gamma_2 = 64^\circ \text{ (respecto de la normal)}$$

Angulo con el cual se parte para redondear el perfil.

Realizada la modelación bajo estas condiciones, se obtiene una distribución de equipotenciales como la mostrada en la figura 3.4., donde se puede observar que en la zona de interés el campo se ha hecho más homogéneo, encontrándose gradientes de 9 KV/cm, en la zona donde están más unidas las superficies equipotenciales.

3.2.c. Bushing de la Mufla

Para poder atravesar las paredes metálicas de la mufla, se necesita un bushing, de un material tal que mantenga sus características dieléctricas sin envejecer al someterse a temperaturas de hasta 300 °C.

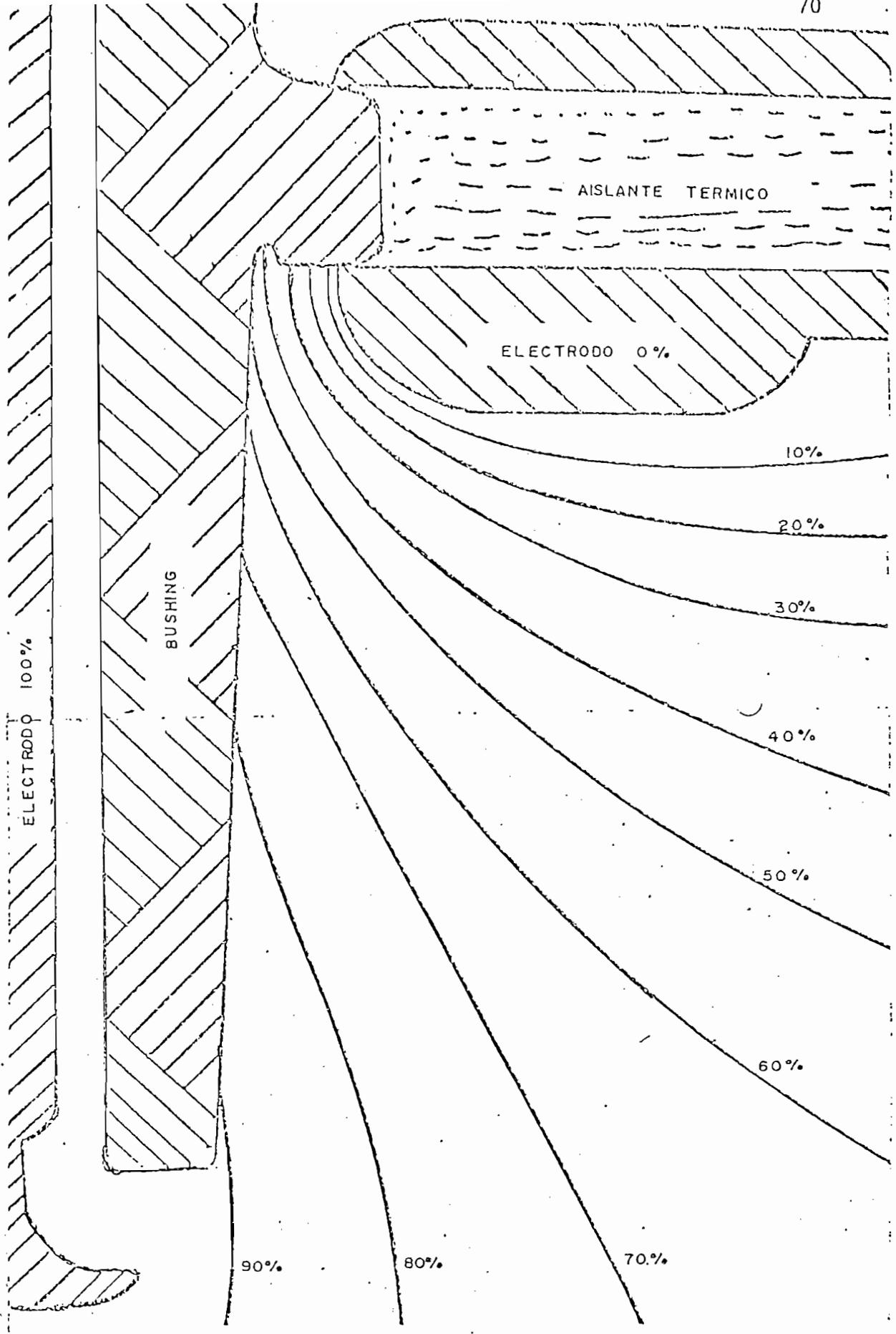


Fig. 3.4. Resolución final de la zona peligrosa, perfil de tierra y su superficies equipotenciales.

Los bushings hechos de cerámica se ajustan bien a estos requerimientos, ya que la capacidad dieléctrica de los mismos se altera cuando la cerámica ha alcanzado temperaturas superiores a los 700 °C. (10)

Para conseguir un menor costo en la fabricación de la mufla se decidió utilizar los materiales y partes que se las encuentre en el laboratorio, una de estas partes fue el bushing, del mismo que no se sabía el voltaje que soportaría sin producir una falla de aislamiento, por esta razón se realizaron pruebas para establecer el voltaje de operación.

Para realizar estas pruebas se montó una lámina metálica para soportar al bushing, de tal forma simular las condiciones de funcionamiento y medir el voltaje de contorno a frecuencia industrial, obteniéndose los valores mostrados en la Tabla 3.1., se realizaron cinco medidas para tomar en cuenta el factor probabilístico que siempre se da en este tipo de pruebas.

TABLA 3.1.

No. PRUEBA	VOLTAJE CONTORNEO (KV)eficaz
1	45
2	46
3	43
4	42
5	43

Por tanto el valor esperado del voltaje de contorno será:

$$V_{cont} = 43.8 \text{ KV a. } 547 \text{ mmHg y } 17^{\circ}\text{C}$$

Para poder correlacionar con las distancias de aislamiento dadas en las normas se debe calcular el voltaje de contorno en condiciones standar de presión y temperatura (10) (STP 760 mmHg, 20°C).

$$V_{STP} = 60.51 \text{ KV}$$

Al aumentar la temperatura en un sistema no hermético (Presión constante) y partiendo de ecuación 3.4., la densidad del aire disminuye, por tanto el voltaje de contorno disminuye, lo cual hace que el voltaje máximo con que se puede operar sea el encontrado para la temperatura más baja (20°C), ya que se estará simulando una variación en la densidad del aire.

Como se anotó antes el voltaje de contorno del bushing en condiciones normales (STP) es de:

$$V_{STP} = 60.51 \text{ KV}$$

Por tanto para poder determinar el voltaje máximo de operación del equipo se ha recurrido a la utilización de la norma IEC 71 (INSULATION COORDINATION, 1967, TABLA I, LISTA 1, pág. 21) en la cual se dan los voltajes para equipos que operarán en sitios cubiertos de la intemperie.

Al interpolar en esta tabla el valor de sobrevoltaje de frecuencia industrial medido se encuentra el voltaje máximo de valor:

$$V_{\max} = 30.25 \text{ KV a condiciones STP}$$

3.2.d. Distancia de aislamiento y voltaje de operación

En base al voltaje máximo de operación obtenido se recurre a la norma VDE159 - BUSBARS, 1969, en la tabla correspondiente a "DISTANCIAS EN INSTALACIONES INTERIORES ABIERTAS O CERRADAS AISLADAS EN AIRE PARA BARRAS Y CONEXIONES" en un sistema efectivamente aterrizado se encuentra interpolando que para el voltaje especificado de 30 KV la distancia de aislamiento es de:

$$D_{fT} = 200.03 \text{ mm}$$

Esta distancia será la que se utilizará en el dimensionamiento de la cámara siendo por tanto el límite inferior de las dimensiones.

Cabe resaltar que tanto el voltaje de operación como la distancia de aislamiento, mencionados, se han determinado para operar al nivel del mar, por tanto para que esta distancia de aislamiento garantice el funcionamiento del equipo en una altura diferente sobre el nivel del mar (por ejemplo Quito 2840 m s.n.m), el voltaje de operación debe ser escogido por el factor correspondiente a la variación de la densidad del aire, expresado en la ecuación 3.2.

Para Quito este factor calculado con valores de $P = 540 \text{ mmHg}$ y

$T_a = 18^\circ\text{C}$, es de:

$$p = 0.71$$

Con el cual el voltaje de operación en Quito será

$$V_{Q_{\max}} = 21.5 \text{ KV} \quad (3.8)$$

3.3. DISEÑO DEL AISLAMIENTO PARA OPERAR CON HASTA 30 KV

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, se encontró que el máximo voltaje con el que se podrá operar en la mufla es de 30 KV, por tanto este valor será el que determine la distancia fase - tierra de aislamiento. Esta distancia ya se estableció y es de 200.03 mm.

La distancia de aislamiento se debe guardar entre todos los puntos energizados (100% Pot.) y todos los puntos aterrizados (0% pot).

Por tanto en las dimensiones de la mufla se considera esta distancia de aislamiento, como "PRIORITARIA" lo cual hace que se determine la distancia entre la punta del bushing y la lámina metálica del cono de techo tal que se mantenga 200.03 mm dando así las dimensiones de este sector, las mismas que se presentan en los planos de la mufla.

Adicionalmente hay que considerar que para evitar la deformación del campo eléctrico debido a la presencia de las paredes de la mufla, que no están aisladas, se debe dejar una separación entre el electrodo aterrizado y el plano de tierra al menos igual al diámetro del elec-

trodo mayor que se utilice (14 cm) por tanto el pedestal tendrá una altura de 15 cm y un diámetro menor a 1/5 del diámetro de los electrodos (2 cm), ver figura 3.5. (11)

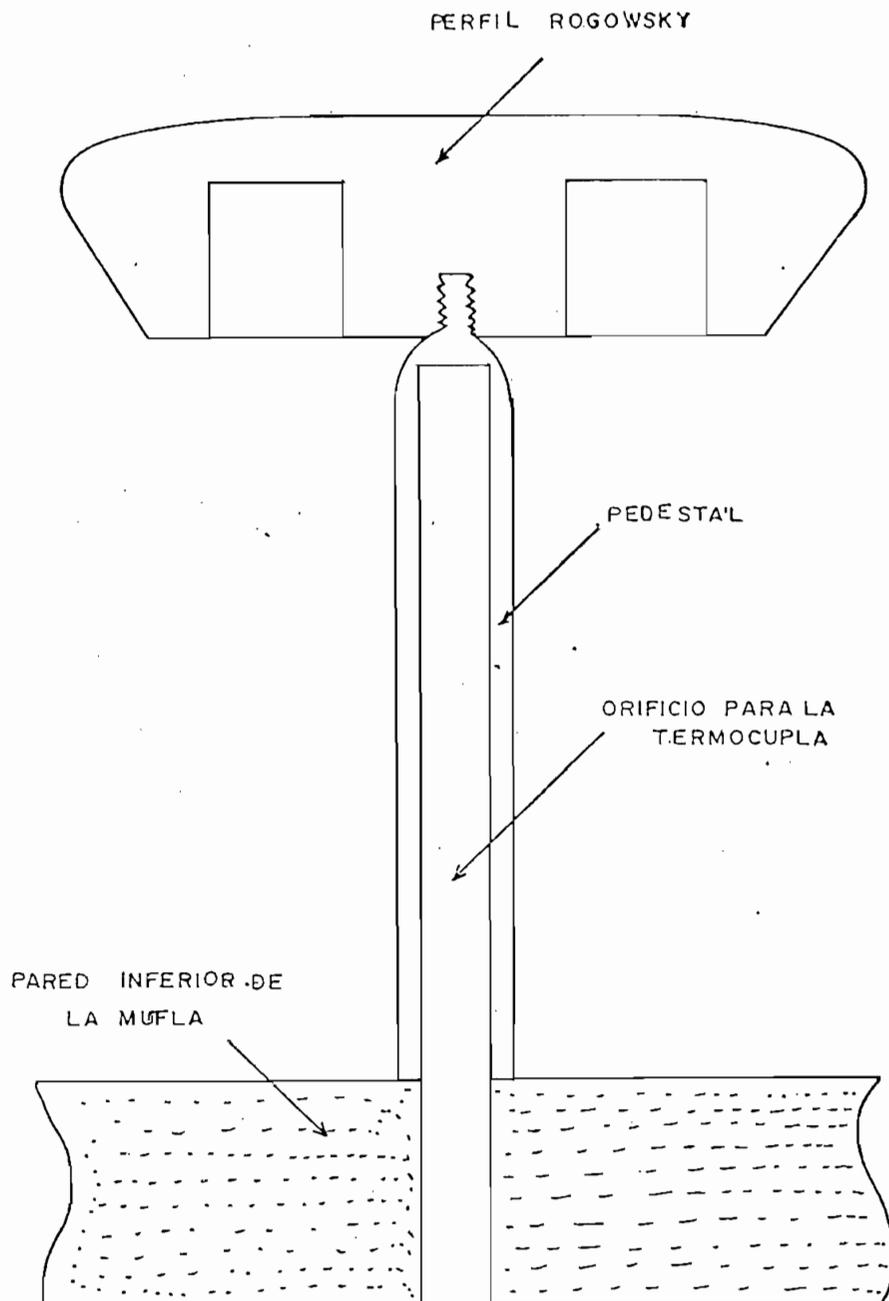
El introducir todos estos criterios y el considerar el mayor tamaño de los electrodos que se podrán introducir en la mufla (Pérfiles Rogowsky de acero 14 cm), lleva a establecer que las dimensiones de la mufla en su cámara sean:

<u>DETALLE</u>	<u>ANCHO (m)</u>	<u>ALTURA (m)</u>
CAMARA CILINDRICA	$r = 0.31$	$h_1 = 0.40$
CIELO CAMARA* (CONICO)	$r_1 = 0.31$ $r_2 = 0.156$	$h_2 = 0.13$

*Se considera la longitud del bushing que estará en el interior y se encuentra la distancia de aislamiento.

Cabe destacar que el radio de la cámara cilíndrica es mayor que el encontrado por el modelo digital (0.3 m) a partir del cual se tiene un campo eléctrico con buenas características para permitir la utilización del equipo.

Adicionalmente dentro del aislamiento se debe considerar, el tamaño del objeto de prueba y su forma, ya que al colocar un dieléctrico entre dos electrodos, el voltaje de descarga se reduce debido a que la superficie del material coincide con las líneas de campo eléctrico, este descenso en el voltaje de disrupción (respecto al aire) se debe



→ Fig. 3.5. Configuración del electrodo de tierra para no deformar el campo eléctrico.

a las imperfecciones en la superficie del material, cuando la muestra tiene dimensiones que son inferiores a las de los electrodos.

Para eliminar estos efectos en investigaciones realizadas por Masayuki Ieda, (IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-15 No. 3 Junio 1980), se recomienda utilizar perfiles Rogoswky para los electrodos, muestras con un buen acabado superficial que tengan dimensiones tal que su lado sea mayor al diámetro de los electrodos y de un espesor menor o igual a 2 mm.

Esto hace que al poner muestras de estas dimensiones se pueda en nuestro caso utilizar el puente de Schering para medir la tangente de pérdidas dieléctricas, como una forma de evaluar el envejecimiento de los materiales aislantes poliméricos, ya que se tendría una capacitancia mayor a 1.2 pf que es el valor mínimo que se puede conectar al puente.

CAPITULO IV

DISEÑOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

4.1. DISEÑO TERMICO

Una vez determinadas las dimensiones de la cámara para satisfacer los requerimientos del aislamiento eléctrico, corresponde realizar los cálculos de diseño térmico, que permitan alcanzar los requerimientos del equipo.

El hacer la cámara en forma circular permite que la distribución de las superficies equitéticas sea uniforme en el interior de la cámara.

4.1.1. Constante térmica y pérdidas

La constante térmica se determina conociendo las características de los materiales y las dimensiones de la mufla (ver Apéndice B, PLANOS) las mismas que se deben introducir en las ec. 2.42., para lo cual se han utilizado los valores de las constantes detallados en la Tabla 4.1.

TABLA 4.1.

MATERIAL	C_p^* J/Kg°C	ρ^* Kg/m ³	V m ³
Hierro (4.8 mm)	418.759	7288	0.003325
Aire (interior)	1017.585	28.9	0.1429
Cerámica (Bushing)	1138.80	441.57	4.41×10^{-5}

* Manual del Ingeniero Químico, Prentice Hall 1979.

de donde la constante térmica es:

$$mC_T = 14373.1025 \quad | \text{ J/}^\circ\text{C} |$$

Las pérdidas térmicas se evalúan utilizando las expresiones 2.46 - 51 - 55 - 58 - 60 - 63 - 66, obteniéndose las siguientes resistencias de pérdidas Tabla 4.2.

TABLA 4.2.

RESISTENCIA	VALOR $^\circ\text{C/w}$
R_1	3.9552
R_2	0.1586
R_3	6103.760
R_4	230294.600
R_5	41.455
R_6	9.29
R_7	42.41
R_8	9.653848
R_9	3.68568

Con estos valores se calcula la resistencia de pérdidas térmicas y las pérdidas térmicas, así como las temperaturas esperadas en cada punto para la máxima temperatura interior (300°C) y a 20°C de temperatura ambiente para lo cual se utiliza al modelo de pérdidas de la figura 2.9. (Ver figura 4.1).

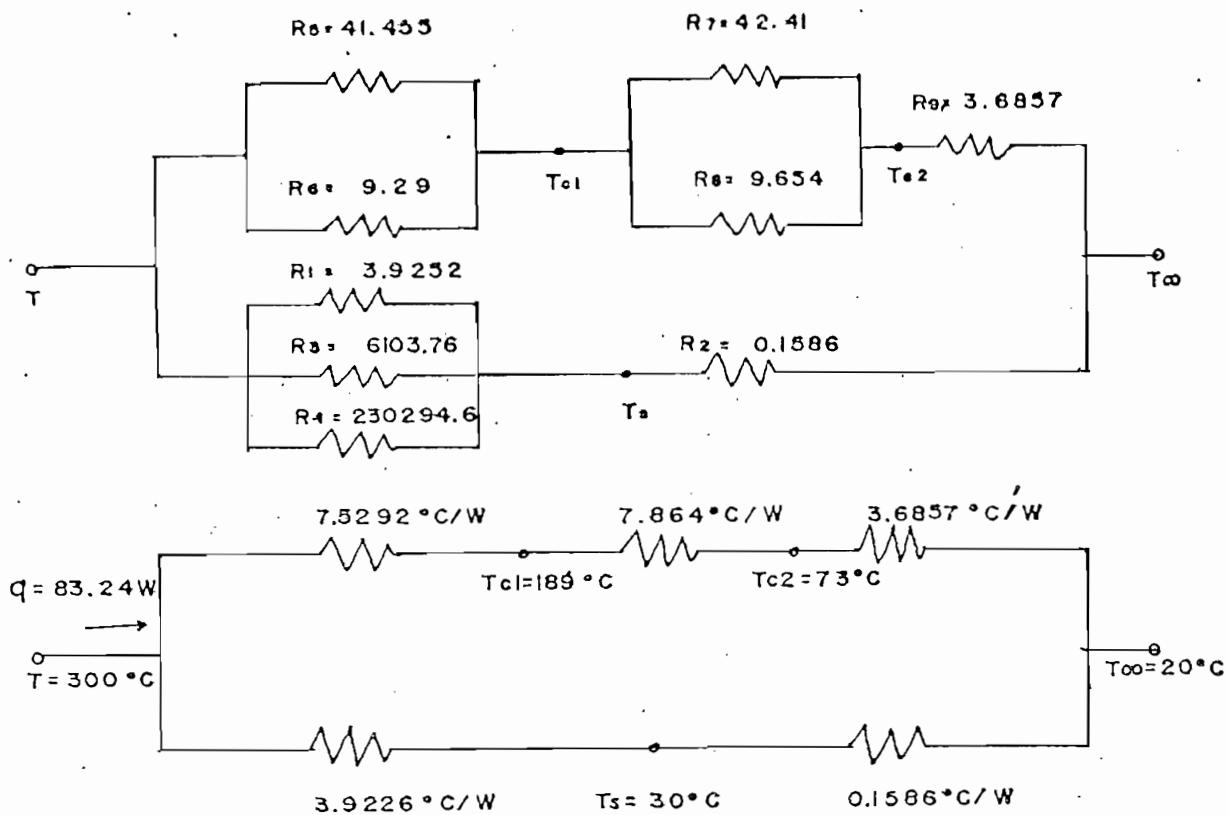


Fig. 4.1. Circuito térmico equivalente y temperaturas límite.

La resistencia de pérdidas es:

$$R_T = 3.364 \text{ | } ^\circ\text{C/W} \text{ |}$$

Por tanto la constante de inercia térmica es:

$$\text{MCR}_T = 48351.12 \text{ | } \text{S} \text{ |}$$

Para conseguir estos objetivos de diseño se requieren las siguientes condiciones:

a) Se debe aislar la cámara del medio externo con una capa de 5 cm.

de lana mineral, espesor calculado en base a las condiciones de aislamiento y pérdidas deseadas.

- b) La puerta deberá ser fabricada con vidrio comercial poniéndose dos tapas con una separación de 0.5 cm., entre capas.

Cabe resaltar que el diseño considera una potencia de pérdidas de 83.24 w, con una temperatura de la carcasa de 30°C cuando el sistema opere a 300°C (Tmax).

4.1.2. Potencia de la fuente

Para encontrar la potencia máxima necesaria se debe resolver la ecuación del comportamiento térmico para la temperatura máxima.

La ecuación diferencial está dada en la expresión (2.75) y se puede linealizarla para esta condición, así:

$$a \quad 300^{\circ}\text{C} \quad R_{\infty}(1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2) = R(T) = kte.$$

$$\text{Por tanto} \quad \frac{V^2}{R(T)} = E_g = kte. \quad a \quad 300^{\circ}\text{C} \quad (4.1)$$

Esto hace la ecuación diferencial lineal cuya solución es:

$$T(t) = T_{\infty} + (1 - e^{-\frac{t}{mc R_T}}) E_g R_T \quad (4.2)$$

donde:

$$t = \text{tiempo} \quad | \text{ S } |$$

Para realizar pruebas en materiales aislantes no se requiere una alta velocidad del sistema por tanto se diseña con un tiempo de equilibrio $t = 3600$ seg. Con estas condiciones se encuentra que la potencia necesaria es de:

$$E_g = 2261.42 \quad | \text{ W } |$$

Por tanto el sistema diseñado tendrá un porcentaje de pérdidas

$$\eta_p = 3.68 \% \quad \text{a} \quad 300^\circ\text{C}$$

Este disminuirá al reducirse la temperatura de operación, ya que las resistencias térmicas son dependientes del material con que se relacionan, cuyas constantes térmicas son prácticamente invariables en este rango de temperaturas, cambiando el flujo térmico.

4.1.3. Disposición de los calefactores

Para satisfacer la condición de que la superficie radiadora de calor, sea isotérmica es necesario distribuir los calefactores en forma simétrica a lo largo de la pared de la cámara. Para establecer la disposición de los calefactores se necesita tomar en cuenta las siguientes condiciones:

- a) Los calefactores deben llevar a la placa absorbadora a la condición de isoterminia.
- b) Los calefactores deben estar dispuestos de tal forma que el flujo actúe sobre la muestra, aprovechando de la mejor forma los flujos

componentes; esto es: radiación, convección y conducción.

- c) Mantener la forma de la placa absorbadora de calor para así conseguir un campo térmico homogéneo.

Para satisfacer estos requerimientos se hace el diseño en la forma siguiente:

- a. Dado que la muestra estará a una altura del fondo de la cámara de 15 cm (distancia definida en el capítulo III), los calefactores deben estar distribuidos alrededor de esta altura, para concentrar el flujo térmico sobre la muestra.
- b. Si se parte la cámara a la mitad y se superponen las partes, se encuentra que, a partir de la altura base, la forma más fácil de conseguir una distribución igual en la placa es la mostrada en la figura 4.2.

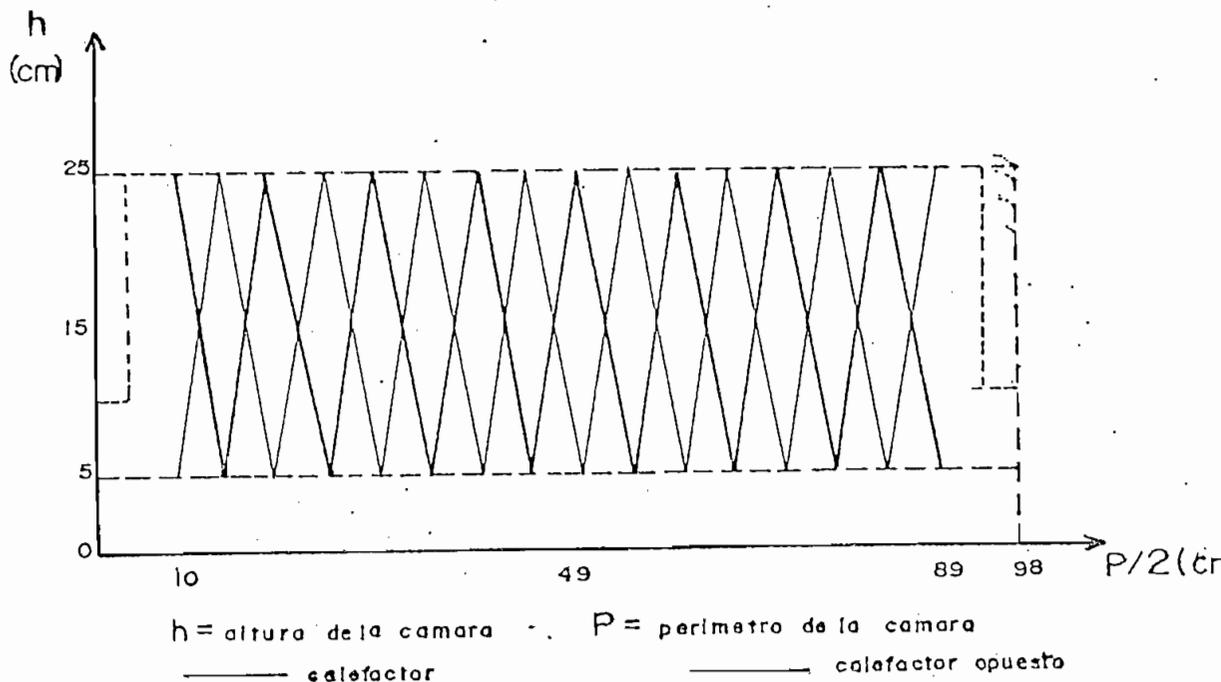


Fig. 4.2. Disposición de los calefactores.

Al observar este gráfico se desprenden las siguientes conclusiones:

1. Cada semiplaca se calienta en forma homogénea en el sector donde se encuentra inmerso el objeto de prueba.
2. El flujo por radiación de una semiplaca sobre la opuesta ayuda a aumentar la distancia entre calefactores permitiendo así cubrir un mayor perímetro.
3. Al ser los calefactores expuestos (sin ningún cobertor) la placa absorbe más rápido el calor.
4. No se distribuyen calefactores en el sector donde irá la ventana de acceso ni en su lado opuesto para evitar un flujo radiante directo sobre la misma.

Con estas premisas el diseño de la disposición de los calefactores es como el mostrado en el Apéndice B (planos).

4.2. DISEÑO ELECTRICICO

4.2.1. Resistencia de las niquelinas

Teniendo la potencia necesaria para alcanzar la temperatura, resta calcular el valor de la resistencia total de las niquelinas.

Si:

$$\frac{V}{R(T)} = E_g$$

Para máxima temperatura se operará el equipo con 120 V hasta alcan-

zar el punto de equilibrio.

Por tanto:

$$R(T) = 6.37 \ \Omega \quad \text{a} \quad 300^{\circ}\text{C}$$

Como se anotó anteriormente, la resistencia eléctrica varía con la temperatura. La variación de la misma se puede representar ya sea como una recta: o por un polinomio así:

$$R(T) = R_{T_0} (1 + \alpha_1 \Delta T) \quad (4.3)$$

$$R(T) = R_{T_0} (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2 + \dots) \quad (4.3.1)$$

Donde:

R_{T_0} = resistencia eléctrica a temperatura T_0 | Ω |

α_1, α_2 = coeficientes de variación de la resistencia con la temperatura | $1/^{\circ}\text{C}$; $1/^{\circ}\text{C}^2$ |

Cuando se requiere un control muy fino de la temperatura es necesario utilizar la forma polinómica de variación de la resistencia, en este diseño se utilizará un polinomio de segundo grado.

Para hacer menos costoso el equipo y de fácil reparación, se utilizarán resistencias del tipo "Niquelinas" (Fe, Cr, Ni) que se encuentran fácilmente en el mercado.

Las características comerciales de las mismas son:

$$P = 600 \text{ w}$$

$$V = 120 \text{ V}$$

Pero estos datos son insuficientes para el diseño y por tanto mediante pruebas de laboratorio y cálculos por recurrencia que se indican en el Apéndice C, se determinó que estas niquelinas presentan las siguientes características:

$$R(18^\circ\text{C}) = 19.1 \text{ } \Omega$$

$$\alpha_1 = 0.00031751 \text{ } |^\circ\text{C}^{-1}|$$

$$\alpha_2 = - 2.23264 \times 10^{-7} \text{ } |^\circ\text{C}^{-2}|$$

Luego la resistencia necesaria para calentar el equipo hasta 300°C , que se mida a 18°C será despejando de la ec. 4.3.

$$R(18^\circ\text{C}) = \frac{R(300^\circ\text{C})}{|1 + \alpha_1(282) + \alpha_2(282)^2|}$$

$$R(18^\circ\text{C}) = 5.94 \text{ } \Omega$$

Para prolongar la vida de las niquelinas es necesario que estas no trabajen a potencia máxima nunca, por tanto para satisfacer la resistencia necesaria a 18°C se busca un arreglo resistivo con el mayor número de resistencias en paralelo.

Esto hace que si cada niquelina tiene $19.1 \text{ } \Omega$ a 18°C se necesita conectar: 5 resistencias de $29.70 \text{ } \Omega$ en paralelo para alcanzar la resis

tencia deseada, lo cual implica que cada resistencia estará compuesta de 1.55 niquelinas.

Al ser las resistencias los calefactores, su disposición en la cámara deberá ajustarse a los requerimientos del diseño térmico, lo cual requiere que las cinco resistencias se dividan en segmentos de la longitud exigida por el diseño. Para esto se dividirá cada niquelina en 6 segmentos.

Al tener que conectar cada resistencia en 6 segmentos iguales se debe unirlos de tal forma que el flujo magnético que aparezca en cada segmento sea opuesto al siguiente para que así se anulen y tener un factor de potencia unitario.

4.2.2. Evaluación de potencia en las niquelinas

Al eliminar el efecto inductivo de las niquelinas, mediante el control de la instalación de los segmentos de las mismas, por diseño de bemos tener un factor de potencia unitario, lo cual hace que la evaluación de la potencia disipada en las niquelinas sea muy simple.

Si tenemos 5 niquelinas de 29.7 en paralelo, la potencia total a 120 V entre terminales será:

$$P_{DT} = 2424.24 \text{ | w | a } 18^{\circ}\text{C}$$

Potencia que satisface los requerimientos térmicos, siendo a 18°C mayor que la requerida a 300 °C, por existir una variación de la resistencia eléctrica con la temperatura y siendo la fuente una barra in

finita.:

Cada resistencia en paralelo entregará:

$$P_{C/R} = 484.85 \text{ w}$$

lo que implica una disipación por niquelina de 312.8 w , que representa el 52.13% de la capacidad de las mismas, lo cual prolongaría su vida útil.

4.2.3. Conductores eléctricos

Como se ha señalado se dispondrán las resistencias en 5 ramas paralelas, se desprende que la corriente que circulará por cada rama será:

$$I_r = 4.04 \text{ a } 18^\circ\text{C}$$

Por lo tanto la corriente que circulará por los conductores principales será de:

$$I_t = 20.20 \text{ A a } 18^\circ\text{C}$$

Pero por la disposición de las niquelinas hay que construir dos alimentadores, uno por cada lado, por tanto la corriente de cada alimentador será

$$I_a = 10.10 \text{ A a } 18^\circ\text{C}$$

Con estos valores de corriente se deben escoger los calibres de con

ductor necesarios para transportarla.

a. Conductor en las ramas

Estos conductores serán los que enlacen los segmentos de niquelina en cada rama. Por lo mismo serán conductores que podrán trabajar hasta 300°C, lo cual hace prever que no podrán tener ningún tipo de aislamiento termoplástico y se los deberá aislar de las partes metálicas con materiales resistentes a esta temperatura. Se encontró factible aislarlos con aisladores de cerámica del mismo tipo que los que se utilizarán en el montaje de las niquelinas, dejando los segmentos li bres de conductor envueltos en lana mineral.

Por lo expuesto se debe colocar conductores del siguiente calibre; en cuyo calculo se hace un ajuste por el cambio en las condiciones de o peración. (14)

$$I_{20^{\circ}\text{C}} = I_{300^{\circ}\text{C}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{máx}} - T_{\text{npvc}}}{T_{\text{n pvc}}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{Lm}}}{k_{\text{p.v.c}}}} \quad (4.4)$$

$$I_{20^{\circ}\text{C}} = 4.04 \sqrt{\frac{220^{\circ}\text{C}}{80^{\circ}\text{C}}} \sqrt{\frac{0.0744 \text{ w/m}^{\circ}\text{C}}{0.1029 \text{ w/m}^{\circ}\text{C}}}$$

$$I_{20^{\circ}\text{C}} = 6 \text{ A}$$

Para trabajar en estas condiciones se requiere hacer las conexiones - con conductor de cobre No. 18 AWG desnudo. (Tablas Técnicas Squard-D)

b. Conductores principales

Los conductores que llevarán la energía a cada arreglo resistivo en cada lado de la cámara se encontrarán de igual manera a 300°C, por tanto el cálculo del conductor requerido se realiza de forma idéntica al procedimiento anterior.

$$I_{300^{\circ}\text{C}} = 13.12 \text{ A}$$

Para esta corriente el conductor requerido en este sector será No. 14 AWG.

c. Conductores que van al control

Los conductores que van al control de temperatura serán conductores que puedan servir una carga de 20.20 A, por tanto se requieren conductores No. 12 AWG, siendo estos aislados con PVC ya que estarán en el aire y sólo soportarán el calentamiento que se transmita de los conductores principales.

4.2.4. Protecciones

- a. Para proteger el sistema contra un cortocircuito se instalará un interruptor termo magnético de 30 A/120 V a la entrada de todo el sistema.
- b. Existe la posibilidad de tener potenciales transferidos desde la cámara a través del sistema calefactor, por tanto se instalará -

un descargador del tipo de válvula de 140 V máximo entre polos.

4.3. DISEÑO DEL CONTROL DE TEMPERATURA

Como se señaló en el capítulo dos el control de temperatura se lo hace mediante el control de potencia por ciclo integral.

Los requerimientos de este control son: Permitir controlar la temperatura hasta 300°C con un error inferior al $\pm 2^\circ\text{C}$, permitiendo además tener la lectura de la temperatura.

El sistema de control que permitirá alcanzar estos objetivos se lo representa en diagrama de bloques como sigue: figura 4.3.

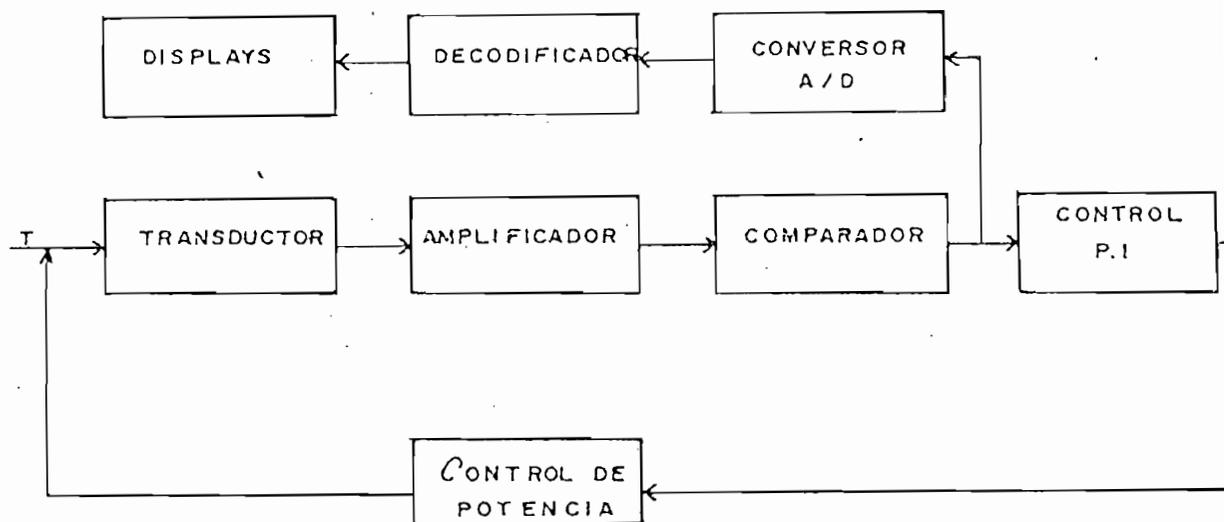


Fig. 4.3. Diagrama de bloques del control

La descripción de cada una de estas etapas así como la configuración

de las mismas se lo hace a continuación.

4.3.1. Transductor

Como se señaló antes, el transductor será una termocupla tipo T (cobre - Constantan), cuya característica temperatura - voltaje se presenta a continuación. (Omega Engineering Inc. Stamford).

THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLI VOLTS												
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
-270	-0.258											-270
-260	-0.252	-0.254	-0.256	-0.257	-0.258	-0.259	-0.260	-0.261	-0.262	-0.263	-0.264	-260
-250	-0.247	-0.248	-0.249	-0.250	-0.251	-0.252	-0.253	-0.254	-0.255	-0.256	-0.257	-250
-240	-0.241	-0.242	-0.243	-0.244	-0.245	-0.246	-0.247	-0.248	-0.249	-0.250	-0.251	-240
-230	-0.235	-0.236	-0.237	-0.238	-0.239	-0.240	-0.241	-0.242	-0.243	-0.244	-0.245	-230
-220	-0.229	-0.230	-0.231	-0.232	-0.233	-0.234	-0.235	-0.236	-0.237	-0.238	-0.239	-220
-210	-0.223	-0.224	-0.225	-0.226	-0.227	-0.228	-0.229	-0.230	-0.231	-0.232	-0.233	-210
-200	-0.217	-0.218	-0.219	-0.220	-0.221	-0.222	-0.223	-0.224	-0.225	-0.226	-0.227	-200
-190	-0.211	-0.212	-0.213	-0.214	-0.215	-0.216	-0.217	-0.218	-0.219	-0.220	-0.221	-190
-180	-0.205	-0.206	-0.207	-0.208	-0.209	-0.210	-0.211	-0.212	-0.213	-0.214	-0.215	-180
-170	-0.199	-0.200	-0.201	-0.202	-0.203	-0.204	-0.205	-0.206	-0.207	-0.208	-0.209	-170
-160	-0.193	-0.194	-0.195	-0.196	-0.197	-0.198	-0.199	-0.200	-0.201	-0.202	-0.203	-160
-150	-0.187	-0.188	-0.189	-0.190	-0.191	-0.192	-0.193	-0.194	-0.195	-0.196	-0.197	-150
-140	-0.181	-0.182	-0.183	-0.184	-0.185	-0.186	-0.187	-0.188	-0.189	-0.190	-0.191	-140
-130	-0.175	-0.176	-0.177	-0.178	-0.179	-0.180	-0.181	-0.182	-0.183	-0.184	-0.185	-130
-120	-0.169	-0.170	-0.171	-0.172	-0.173	-0.174	-0.175	-0.176	-0.177	-0.178	-0.179	-120
-110	-0.163	-0.164	-0.165	-0.166	-0.167	-0.168	-0.169	-0.170	-0.171	-0.172	-0.173	-110
-100	-0.157	-0.158	-0.159	-0.160	-0.161	-0.162	-0.163	-0.164	-0.165	-0.166	-0.167	-100
-90	-0.151	-0.152	-0.153	-0.154	-0.155	-0.156	-0.157	-0.158	-0.159	-0.160	-0.161	-90
-80	-0.145	-0.146	-0.147	-0.148	-0.149	-0.150	-0.151	-0.152	-0.153	-0.154	-0.155	-80
-70	-0.139	-0.140	-0.141	-0.142	-0.143	-0.144	-0.145	-0.146	-0.147	-0.148	-0.149	-70
-60	-0.133	-0.134	-0.135	-0.136	-0.137	-0.138	-0.139	-0.140	-0.141	-0.142	-0.143	-60
-50	-0.127	-0.128	-0.129	-0.130	-0.131	-0.132	-0.133	-0.134	-0.135	-0.136	-0.137	-50
-40	-0.121	-0.122	-0.123	-0.124	-0.125	-0.126	-0.127	-0.128	-0.129	-0.130	-0.131	-40
-30	-0.115	-0.116	-0.117	-0.118	-0.119	-0.120	-0.121	-0.122	-0.123	-0.124	-0.125	-30
-20	-0.109	-0.110	-0.111	-0.112	-0.113	-0.114	-0.115	-0.116	-0.117	-0.118	-0.119	-20
-10	-0.103	-0.104	-0.105	-0.106	-0.107	-0.108	-0.109	-0.110	-0.111	-0.112	-0.113	-10
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
10	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	10
20	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	20
30	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	30
40	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	40
50	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014	50
60	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	60
70	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	70
80	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	80
90	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	90
100	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	100
110	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	110
120	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	120
130	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	130
140	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	140
150	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	150
160	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	160
170	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	170
180	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	180
190	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	190
200	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	200
210	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	210
220	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	220
230	0.022	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	230
240	0.023	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	240
250	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	250
260	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	260
270	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	270
280	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	280
290	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	290
300	0.029	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	300
310	0.030	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	310
320	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	320
330	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	330
340	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	340
350	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	350
360	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	360
370	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	370
380	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	380
390	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	390
400	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	400
410	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	410
420	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	420
430	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	430
440	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	440
450	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	0.054	450
460	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	0.054	0.055	460
470	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	0.054	0.055	0.056	470
480	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	0.054	0.055	0.056	0.057	480
490	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	0.054	0.055	0.056	0.057	0.058	490
500	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	0.054	0.055	0.056	0.057	0.058	0.059	500

Debido al costo de la termocupla su longitud debe ser lo más corta posible, utilizándose únicamente hasta llegar al cable de extensión, que se caracteriza por no formar un nuevo termopar en la unión termocupla - cable de extensión. Esquemáticamente se representa el conjunto en la figura 4.4.

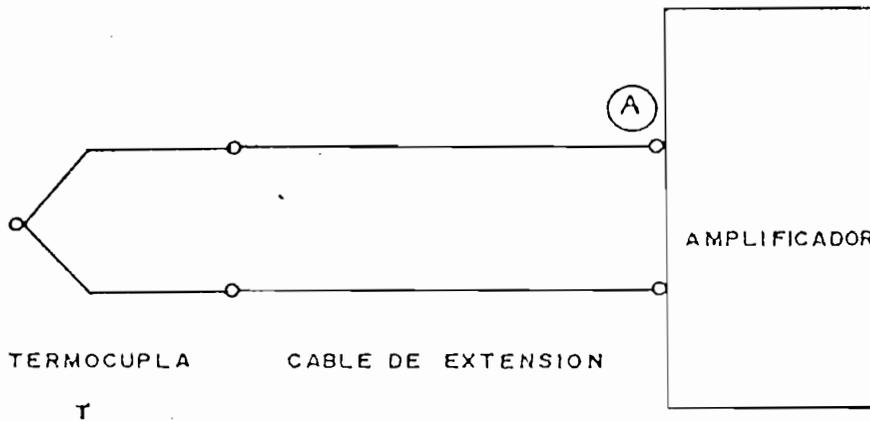


Fig. 4.4. Conexión del transductor

4.3.2. Amplificador

Esta etapa es la que permitirá tener la señal del transductor en valores más manejables, ya que la señal del transductor es de unos pocos mili voltios (14.864 mV a 300°C), en esta etapa se encuentran los siguientes circuitos.

a. Captación de la señal

Esto se consigue conectando la señal a un amplificador operacional

de alta impedancia de entrada conectada en la forma conocida como seguidor de voltaje. Figura 4.5. (7)

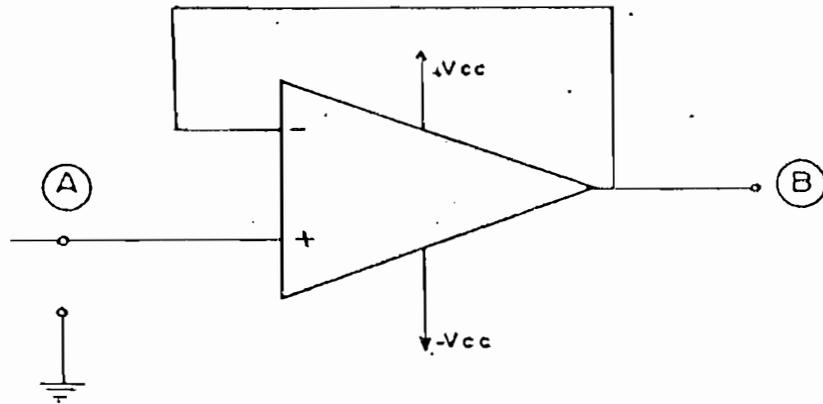


Fig. 4.5. Seguidor de voltaje para captar la señal de la termocupla

b. Protección contra rotura de termopar

El poner esta protección es de gran importancia, ya que si el termopar se rompe el sistema podría dispararse y alcanzar temperaturas muy elevadas que pueden poner en peligro la integridad del equipo⁽³⁾.

Para evitar este peligro se diseña un sistema por el cual, al romperse el termopar la señal que llega al control sea la máxima que se tendría del termopar en condición de funcionamiento esto es 14.864 mV.

En la figura 4.6. se muestra la protección y su cálculo se lo hace utilizando la siguiente expresión:

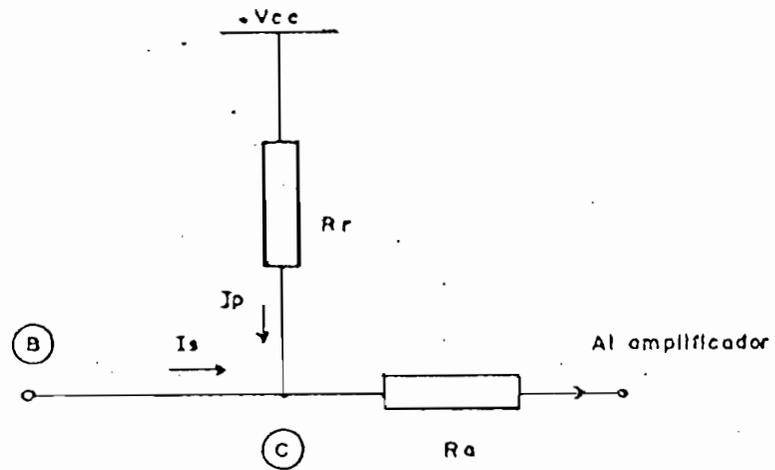


Fig. 4.6. Protección contra rotura de termopar

$$V_{in(r)} = V(300^{\circ}\text{C})$$

$$V_{in(r)} = \frac{V_{CC} R_a}{R_r + R_a} \quad (4.5)$$

Donde:

$V_{in(r)}$ = voltaje de entrada si se rompe el termopar (mV).

R_a = resistencia de entrada al amplificador.

R_r = resistencia de protección a la rotura.

Para garantizar el buen funcionamiento en condiciones normales de operación R_r debe ser lo suficientemente grande de tal forma que $I_S \gg I_P$ (6).

c) Escalamiento de la señal

Para operar con mayor facilidad con el circuito electrónico es necesario que la señal se escale o amplifique a valores de voltaje mucho más manejables, por esta razón se introduce dos etapas de amplificación, una primera por 10 y la otra por 50, con lo cual la señal se amplifica en definitiva por 500, dando un rango de variación a la salida de los mismos de 0 - 7.5 voltios.

La etapa de escalamiento es como muestra la figura 4.7.

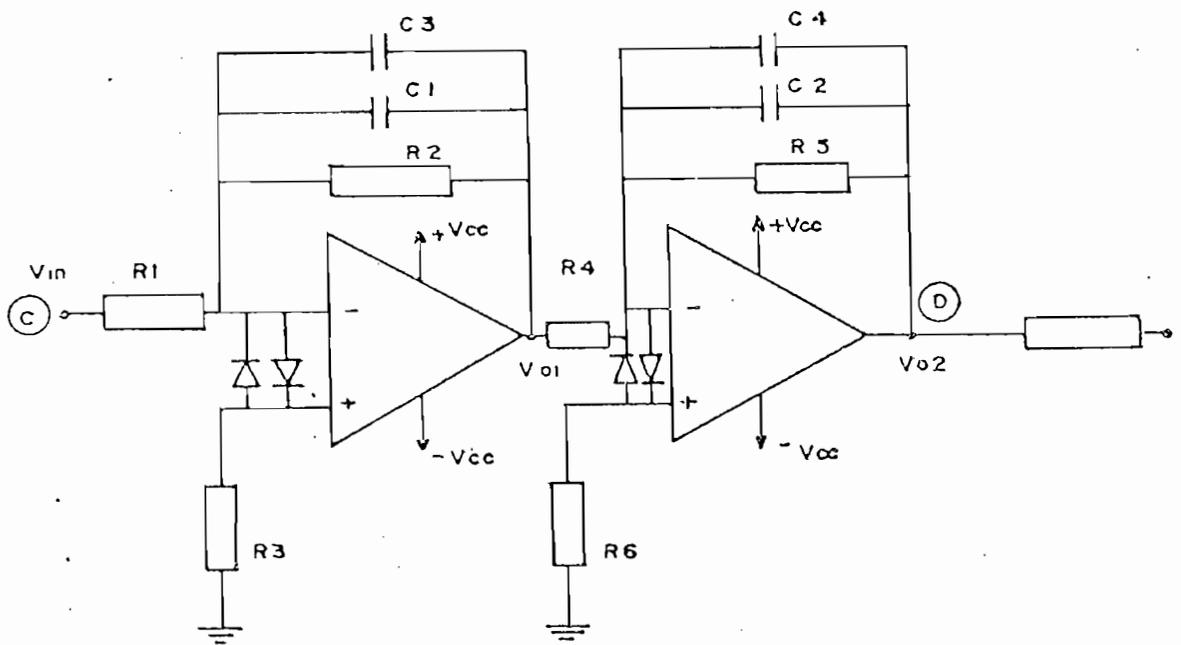


Fig. 4.7. Etapa de escalamiento o amplificación de la señal de la termocupla.

Para calcular la ganancia de cada amplificador se utiliza la conocida expresión:

$$V_o = V_{in} \left(- \frac{R_{LP}}{R_{IN}} \right) \quad (4.6)$$

Donde:

V_o = voltaje de salida | V |

V_{IN} = voltaje de entrada | V |

R_{LP} = resistencia del lazo | Ω |

R_{IN} = resistencia de entrada | Ω |

Por lo tanto los voltajes marcados en la figura 4.7. son:

$$V_{o1} = V_{in} \left(- \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (4.7)$$

Donde:

$$\frac{R_2}{R_1} = 10 \text{ para amplificar por } 10$$

$$V_{o2} = V_{o1} \left(- \frac{R_5}{R_4} \right) \quad (4.8)$$

Donde:

$$\frac{R_5}{R_4} = 50 \text{ para amplificar por } 50.$$

En esta etapa adicionalmente se ponen filtros pasa bajos, con el objeto de permitir el ingreso de señales de muy baja frecuencia, (en el orden de 0.1 Hz) ya que el sistema es de respuesta lenta y las señales de alta frecuencia son ruido que sería tremendamente nocivo en la operación.

Las frecuencias de corte para estos filtros se evalúan con las expresiones (6) :

$$f_{1_{10}} = \frac{1}{2 R_2 C_1} \quad (4.9)$$

$$f_{2_{10}} = \frac{1}{2 R_1 C_1} \quad (4.10)$$

$$f_{1_{s0}} = \frac{1}{7.82 R_3 C_2} \quad (4.11)$$

$$f_{2_{s0}} = \frac{1}{7.82 R_4 C_2} \quad (4.12)$$

Donde:

f_{n_m} = frecuencia de corte en Hertz.

n = denominación de la respuesta: 1 para ganancia nominal; 2 para ganancia cero.

m = etapa de amplificación.

Para evitar que alguna señal parásita que se introduzca al sistema - destruya los dispositivos se ponen diodos en inverso paralela, los mismos que impedirán el ingreso de sobrevoltajes en la señal.

Las resistencias R_3 y R_5 se colocan para evitar el desvío de la señal (bias curen) y por lo tanto deben satisfacer la condición que

$$R_3 = R_1 \parallel R_2 \quad \text{y} \quad R_5 = R_4 \parallel R_6 \quad (6)$$

4.3.3. Comparador

4.3.3.a. Compensador de la temperatura ambiente

Como se señaló con anticipación, el voltaje que se obtiene en los terminales fríos de la termocupla está disminuido por el voltaje debido a la temperatura del lado frío, que en este caso es la temperatura ambiente. Esto implica que al necesitar la temperatura neta de la cámara haya que compensar la señal con un sistema que tenga la misma respuesta que la termocupla en el rango correspondiente a la temperatura ambiente, entre 5 a 25°C.

Para alcanzar este objetivo se diseña el sistema mostrado en la figura 4.8., el mismo que utiliza un termistor con características NTC⁽⁸⁾.

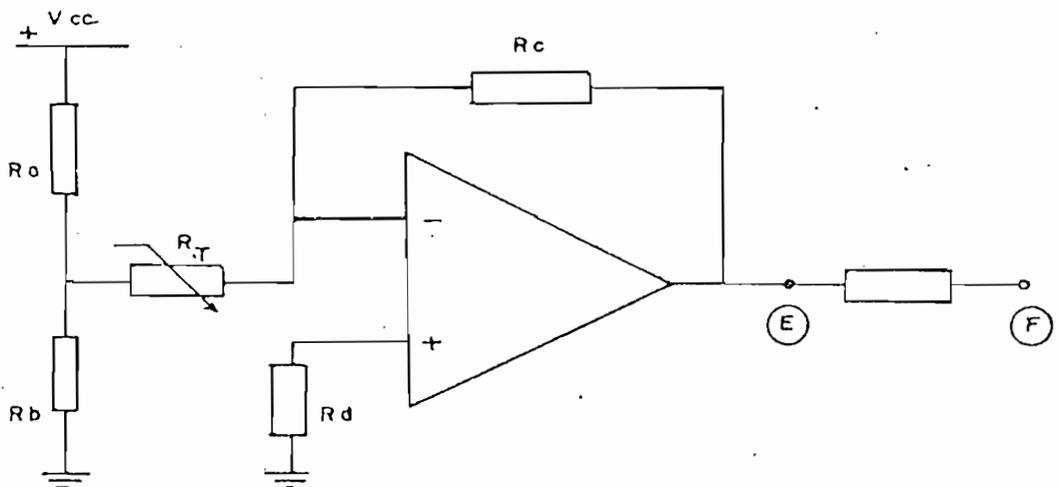


Fig. 4.8. Compensador de la temperatura ambiente.

La señal de salida de este compensador será:

$$V_E = V_m \left(1 + \frac{R_C}{R_T} \right) \quad (4.13)$$

Donde:

V_E = voltaje de salida | V |

V_m = voltaje de entrada constante | V |

el cual está dado por

$$V_m = V_{CC} \frac{R_b}{R_a} \quad (4.14)$$

R_T = resistencia del termistor decreciente con la temperatura

siendo (6):

$$R_T = A e^{B/T} \quad (4.15)$$

B = constante dada por el fabricante | 1/°k |

$$A = R_{25^\circ} e^{-\frac{B}{298^\circ K}} \quad | \Omega | \quad (4.16)$$

R_{25° = resistencia del termistor dada por el fabricante a 25°C.

Expresiones con las cuales se calcula la respuesta del sistema de tal forma que sea del mismo tipo que la termocupla esto es:

$$v = 0.019 \text{ V/}^\circ\text{C} \cdot T \quad 5 \leq T \leq 25 \quad (4.18)$$

4.3.3.b. Selector de temperatura

Si se parte del hecho que la temperatura ambiente podría alcanzar has

ta 25°C, el equipo deberá tener un punto mínimo de selección mayor a la mencionada temperatura. Adicionalmente la mayoría de polímeros utilizados para fabricar aislantes, tienen un comportamiento normal para temperaturas inferiores a 70°C. Por esta razón el equipo se diseña con un selector cuya temperatura mínima a seleccionarse sea de 50°C y tenga 10 pasos de 25°C hasta alcanzar los 300°C, la configuración de este selector será como muestra la figura 4.9.

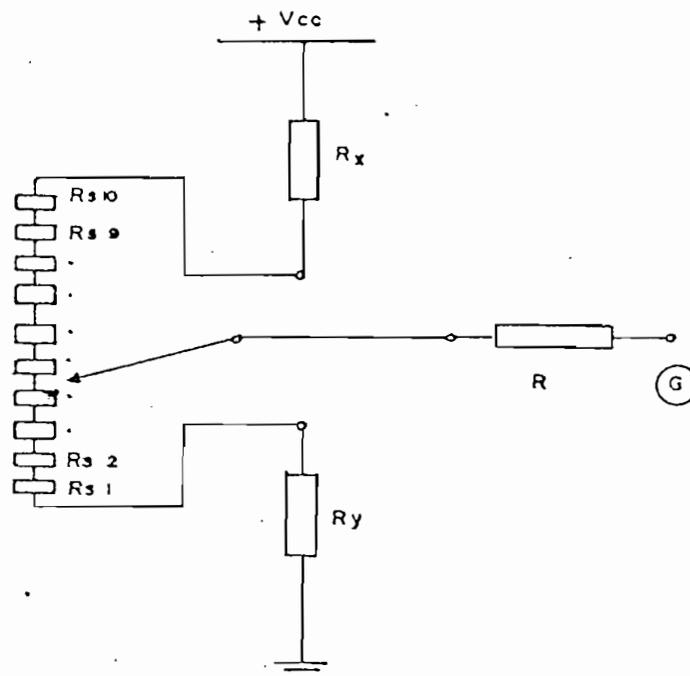


Fig. 4.9. Selector de temperatura desde 50°C a 300°C

En el cual el voltaje en s será de la forma:

$$V_s = +V_{cc} \frac{R_y + n R_{s_i}}{R_x + R_y + 10 R_s} \quad (4.19)$$

Donde:

V_{cc} = voltaje de alimentación (+ 15 V).

- R_y = resistencia que da la tensión equivalente a 50°C. $|\Omega|$
 R_{s_i} = resistencias iguales que dan los pasos de selección $|\Omega|$.
 R_x = resistencia que permite seleccionar la tensión equivalente a 300°C $|\Omega|$
 n = número de pasos $0 \leq n \leq 10$.

4.3.4. Controlador

En esta etapa es donde se ajusta la sensibilidad del equipo y su exactitud. Para realizar un adecuado control de la temperatura se utilizará un control del tipo Proporcional - Integral (PI), el cual se caracteriza porque su salida sigue el error de entrada y además integra la variación, reduciendo así el sobretiro por un cambio de estado en el sistema. (3)

Se mencionó el error en el párrafo anterior; esta señal será la que se obtiene de la salida de un sumador. Para aclarar estos conceptos se presenta la configuración en la figura 4.10. La formulación de esta señal será:

$$V_e = - \frac{R}{R_{Lp}} (V_D + V_E - V_s) \quad (4.20)$$

Donde:

V_e = voltaje de error.

V_D = voltaje que llega de la termocupla.

V_E = voltaje que llega del compensador.

V_s = voltaje que llega del selector.

Al introducir esta señal en la etapa de control la respuesta del mismo será: (3)

$$V_c = k_p V_e + K_I \int V_e dt \quad (4.21)$$

Donde:

k_p = constante de proporcionalidad

K_I = constante integral

V_c = salida del control.

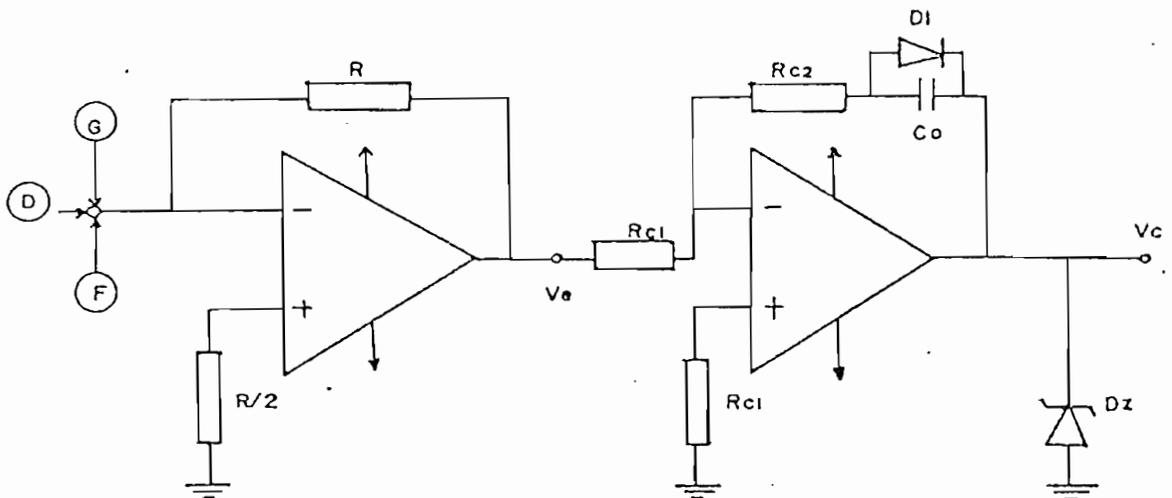


Fig. 4.10. Controlador Proporcional Integral

Para calcular las constantes en la expresión 4.21. se deben fijar los requerimientos del control, los mismos que tienen estrecha relación con los requerimientos del sistema. Así, el error buscado es $\pm 2^\circ\text{C}$, por tanto la banda de acción del control $Bp\%$ (5), deberá ser tal que se vaya controlando la potencia entregada al sistema desde un valor

relativamente bajo de temperatura, BP = 50%, esta banda de operación constante se relaciona con la constante de proporcionalidad así:

Si la entrada V_e oscila entre 0 y $V_{m\acute{a}x}$

$$V_{osc} = \frac{BP\%}{100} V_{max} \quad (4.22)$$

Si se busca que la salida del controlador V_c oscile entre 0 y V_{cmax} entonces (8)

$$K_p = \frac{V_{cmax}}{V_{osc}} \quad (4.23)$$

En este equipo se ha diseñado un V_{cmax} de 5 voltios con una K_p de 3.5.

La constante k_I depende de la velocidad del sistema, que para el sistema térmico es muy baja, por lo que se escoge un valor de k_I igual 5 segundos de tiempo integral.

Ya en el circuito mismo, las constantes se evalúan por (8):

$$k_I = \frac{1}{R_{c2} C_0} = \frac{1}{\text{tiempo integral}} \quad (4.24)$$

$$k_p = \frac{R_{c2}}{R_{c1}} \quad (4.25)$$

El diodo D_1 se pone para evitar oscilaciones porque el condensador se puede quedar cargado. El diodo D_2 y el diodo zéner D_z se ponen para evitar que la salida supere al V_{cmax} o cambia de signo.

4.3.5. Control de potencia

En esta etapa se diseña el circuito que controlará el encendido de un TRIAC para mediante este dispositivo controlar la potencia entregada a la carga, figura 4.11.

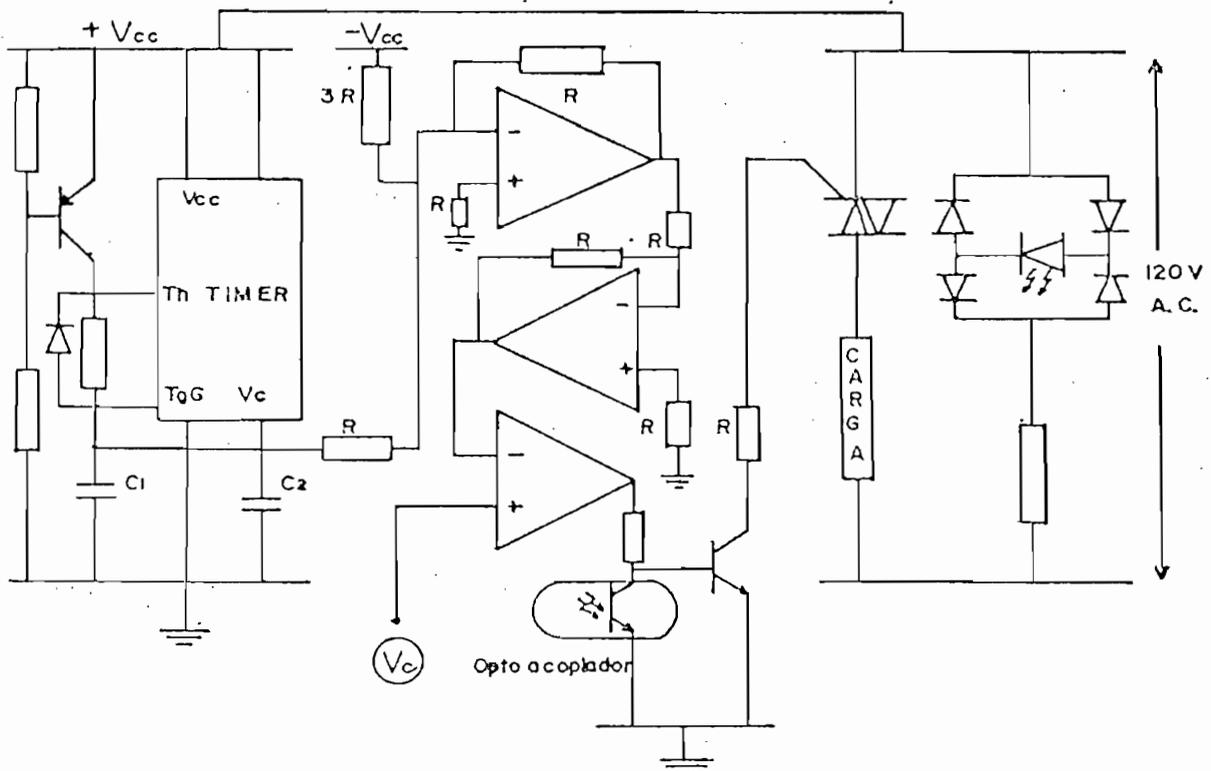


Fig. 4.11. Control de potencia por ciclo integral, sistema de disparo

Su funcionamiento se basa en generar una frecuencia variable con un timer funcionando como aestado y un amplificador en el cual mediante la detección de nivel se genera una señal de salida de periodo constante 166.66 ms (10 ciclos de 60 hertz) con la particularidad de ser una señal variable entre 15 V_{DC} a 0 V_{DC}, siendo el tiempo que permanece en 15 V_{DC} un tiempo proporcional a la salida del controlador, ade

más su duración será menor mientras más cercana esté a cero la señal del control P.I.

Esta señal se sincroniza con la red de 60 Hertz para comandar el disparo del triac en los cruces por cero de la señal de alterna, esto se hace utilizando un opto acoplador y un transistor que está conectado a la compuerta del triac.

4.3.6: Salida a los displays

En las etapas anteriores se diseñó el sistema de control propiamente dicho, pero ante la necesidad de saber la temperatura a la que está trabajando el sistema, se diseña una etapa adicional de tipo digital y que permitirá ver el valor de la temperatura en los displays. Esta etapa se diseñó como muestra la figura 4.12.

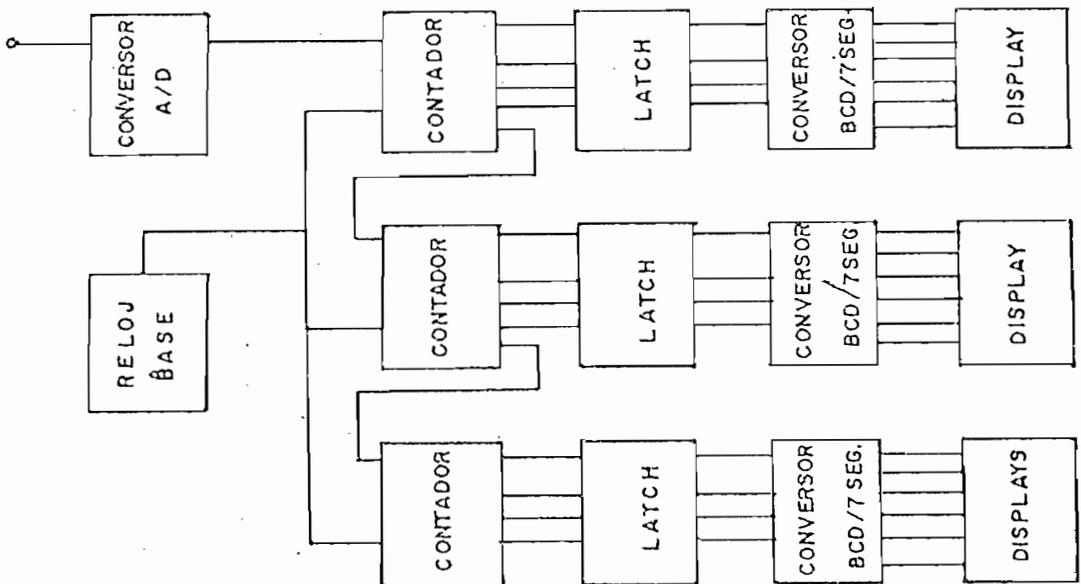


Fig. 4.12. Salida digital para tener la información de temperatura.

La explicación del funcionamiento de cada dispositivo se puede encontrar en un texto de electrónica digital o en las referencias adjuntas. (15) (16) (17) (18) (19).

4.3.7. Reloj de tiempo real

Debido a que las muestras que se someterán a envejecimiento pueden estar bajo prueba muchas horas, es necesario introducir un sistema de medición del tiempo, el mismo que estará instalado de tal forma que permita evaluar el tiempo que ha estado sometida la muestra a determinadas condiciones de envejecimiento.

Para esto se utilizará un reloj del tipo CONTADOR REAL cuya alimentación de 120 V 60 Hz, está conectada a través de un relé, que se deberá instalar en la puesta a tierra del equipo, el mismo que desconectará todo el sistema de la alimentación, permitiendo evaluar así el tiempo que ha soportado la muestras las condiciones impuestas. Esquemáticamente el sistema será como muestra la figura 4.13.

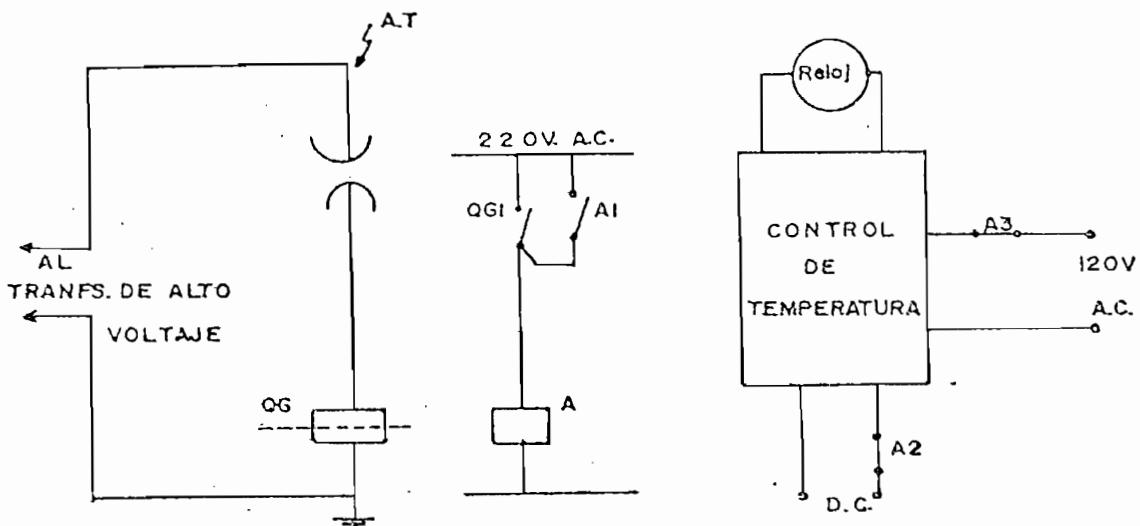


Fig. 4.13. Detección del tiempo de prueba o de falla al hacer envejecimiento.

El circuito general con todas sus etapas, así como los valores y tipos de dispositivos utilizados se presentan en las láminas del apéndice B, correspondiente a planos de diseño.

4.4. DETALLES CONSTRUCTIVOS Y PRUEBAS

4.4.1. Detalles constructivos

Con los diseños térmico y eléctrico se procedió a la materialización del equipo. El primer paso fue la construcción de la cámara en la cual se utilizó una lámina de hierro negro de 4.8 mm de espesor, dándosele la forma requerida por el diseño.

De acuerdo con el diseño, se construyó un cuerpo de forma similar de diámetro mayor y en lámina de hierro de 1.6 mm. FOTO. 1.

El aislamiento térmico se lo dió con una capa de lana mineral de 5cm, cuyas características se presentan en la Tabla 4.1.

TABLA 4.1.

CARACTERISTICAS*	VALOR
- Lana AW aislante térmico.	
- Rango de temperatura de operación.	0 - 538 °C
- Densidad.	17.30 Kg/m
- Conductividad térmica.	0.037 w/m°C
- Constituida de materiales inorgánicos.	
- Constituida de fibras de vidrio resistentes y elásticas aglutinadas con resina de fraguado - termoestable.	

*Catálogo "Fiber Glass Corp.", 1984.

Para alcanzar los requerimientos térmicos de diseño se dispusieron las niquelinas siguiendo una línea quebrada alrededor de una cota de 15 cm de la base de la cámara, con espaciamiento entre puntas de 5 cm. Siendo la disposición de la una cara respecto a su opuesta, invertida.

Cada niquelina de resistencia, medida con el puente de Wheastone , 29.45 Ω , se partió en 6 partes iguales, en cada parte se colocaron terminales soldados a las niquelinas para evitar así su deterioro por mala conexión eléctrica.

Para instalar estos segmentos de niquelina hubo que recurrir a la utilización de aisladores de cerámica diminutos, los que fueron empotrados en la pared de la cámara colocándose tres aisladores por segmento de niquelina, dos en los extremos para conexión y uno al centro para soportar la niquelina y evitar que se produzca un cortocircuito en caso de elongación por calentamiento. FOTO.2.

Los conductores eléctricos se llevaron en forma aérea, suspendidos cada 15 cm en un aislador de los utilizados para sostener las niquelinas, realizando las conexiones a los puntos de interés (cada 6 segmentos) a través de conectores y ajustados con tornillos, los puentes entre segmentos son del mismo tipo: FOTO.3.

Para poder instalar en el interior de la cámara los electrodos, se instaló en el centro de la base un pedestal de 15 cm torneado en bronce, en cuya punta existe un tornillo de 0.6 cm. Adicionalmente este pedestal tiene un hueco interior que llega hasta 1 cm de la punta pasando por la cámara y la cascara exterior con la finali

dad de introducir por ahí la termocupla y sensor la temperatura lo más cerca posible a la muestra sin distorcionar el comportamiento térmico y eléctrico de la cámara. FOTO. 3.

El perfil ecualizador de voltaje se lo construyó en plancha de 13 mm de hierro, torneado en la forma requerida por el diseño, sujetándolo a la cámara con pernos, en hueco ciego y colocando en la parte superior un anillo de asbesto de 5 mm, el cual también es parte del diseño y sirve para evitar el corrimiento del bushing. FOTOS. 4 y 5.

Para llegar con la alta tensión al interior sin permitir el escape de calor por el interior del bushing y evitar la transferencia del mismo por la parte metálica se construyó un electrodo de carbón, de 28 cm de largo, utilizando las barras de carbón que se encuentran en las pilas de teléfono antiguas. FOTO. 6.

Las características eléctricas y térmicas de este material se muestran a continuación en la Tabla 4.2.

En la parte baja del bushing se instaló un electrodo torneado en bronce, como se muestra en la figura 4.14. (más detalles en el apéndice B), el mismo que se ajusta al bushing por la tracción hecha por los demás componentes.

En la parte superior del bushing se construyó un terminal de forma idéntica a los que tienen los equipos del laboratorio de alto voltaje, con la finalidad de colocar sobre este los cabezotes de conexión de alta tensión y evitar así la aparición de corona en este punto.

TABLA 4.2.

CARACTERISTICAS DEL CARBON UTILIZADO PARA EL ELECTRODO
DE ALTA TENSION

ϕ 2.4 cm ; Long. 14 cm.

T_{amb} = 15°C

T_{lado caliente} = 300°C

TIEMPO min.	TEMPERATURA °C
0	15
5	60
10	65
15	67
20	71
25	73
30	75
35	76.5
40	78
45	78.5
50	79
55	79
60	79

Nota: Pruebas realizadas con un quemador de gas, teniendo la muestra sumergida en un recipiente con aceite hasta una altura de 3cm.

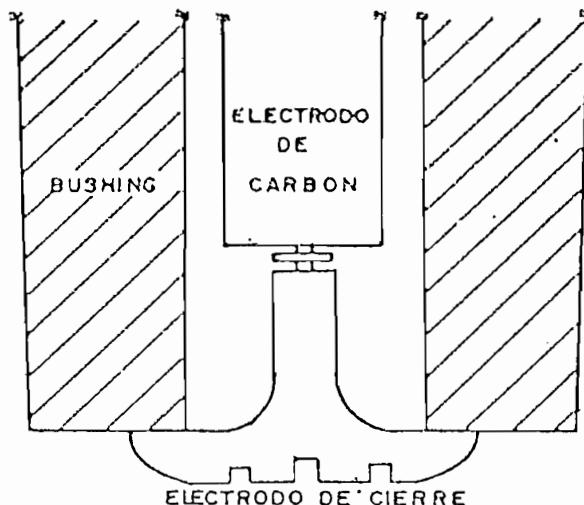


Fig. 4.14. Tapa del tubo interior del bushing.

Pero la parte inferior de estos cabezotes no es redondeada, por lo que se hizo necesario colocar un anillo ecualizador de voltaje en la parte donde asienta el cabezote para evitar la concentración de campo y por ende la corona. (Ver FOTO: 7)

Para conectar el alta tensión con el electrodo que se coloque sobre la muestra, se construyó un resorte em alambre galvanizado, de 20 cm de longitud natural y 2 cm de diámetro, teniendo terminales soldados en ambos extremos para conexión. Se le dió esta forma para impedir la aparición de corona y poder mover el electrodo que se coloque sobre la muestra.

En la puertade acceso se utilizaron 2 vidrios de 4 mm del tipo comer

cial, suspendidos entre láminas de asbesto y separados entre sí 5 mm.
FOTO. 1.

El equipo tiene su propio sistema de transporte y adicionalmente se instaló un brazo externo para montar el control de temperatura. FOTO. 8.

El control de temperatura está instalado en 6 impresos que se colocan en una caja metálica, en cada uno de los cuales se colocan ciertas etapas del circuito así:

IMPRESO 1 Escalamiento y compensación.

IMPRESO 2 Selector, controlador.

IMPRESO 3 Conversor análogo digital.

IMPRESO 4 Circuito de disparo.

IMPRESO 5 Circuito digital.

IMPRESO 6 Displays.

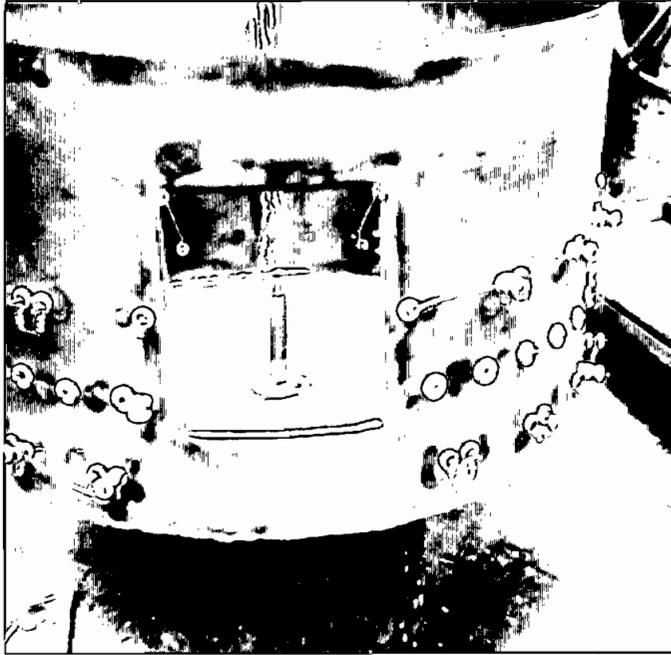
La forma de cada uno de estos, así como su disposición en la caja, se muestra en las FOTOS: 8 y 9.



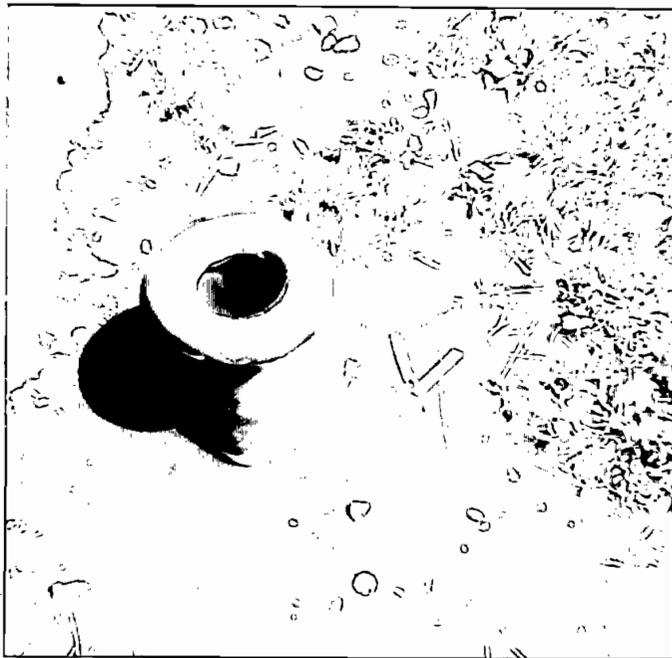
Fotografía 1. Cámara y carcasa de la mufla.



Fotografía 2. Montaje de las niquelinas.

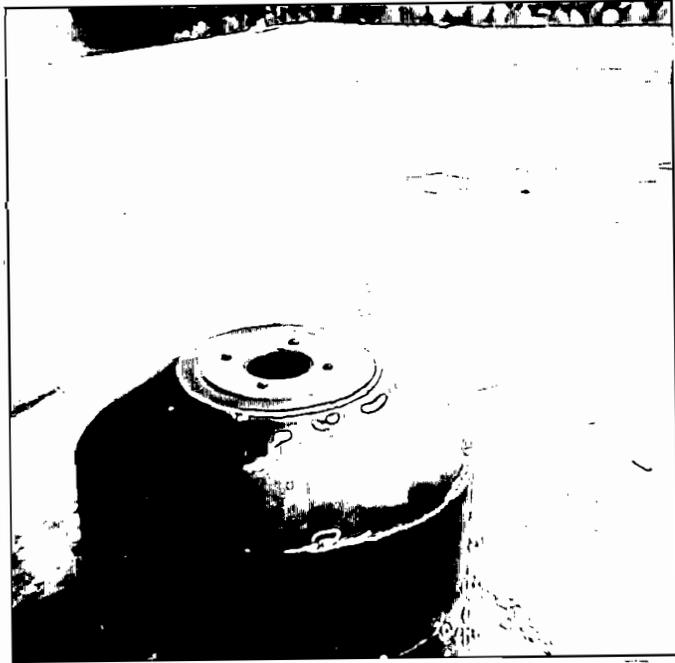


Fotografía 3. Disposición de los conductores y el pedestal porta electrodos.

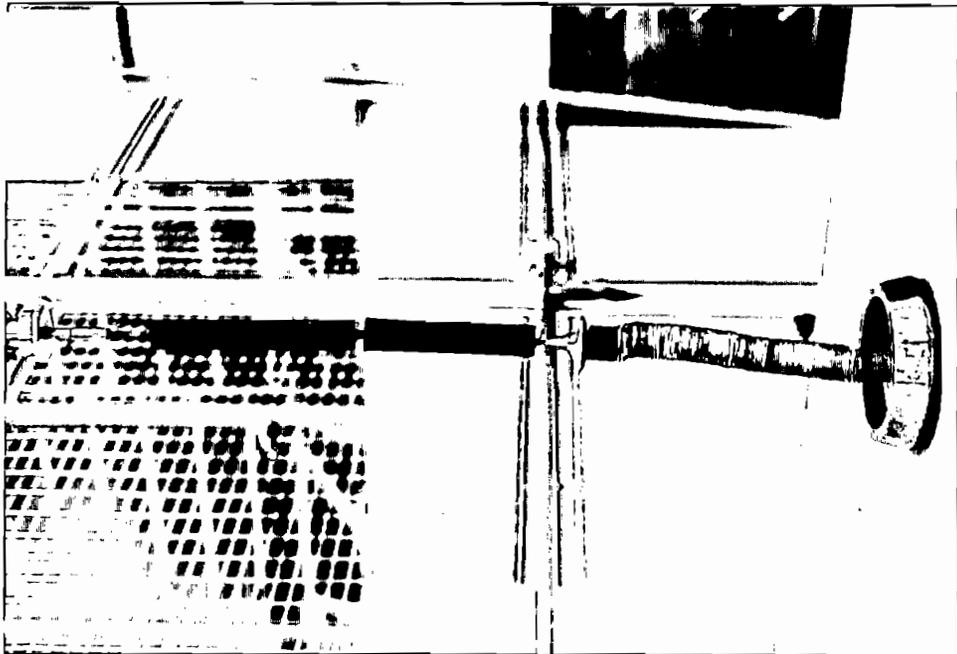


Fotografía 4. Anillo equalizador de tierra.

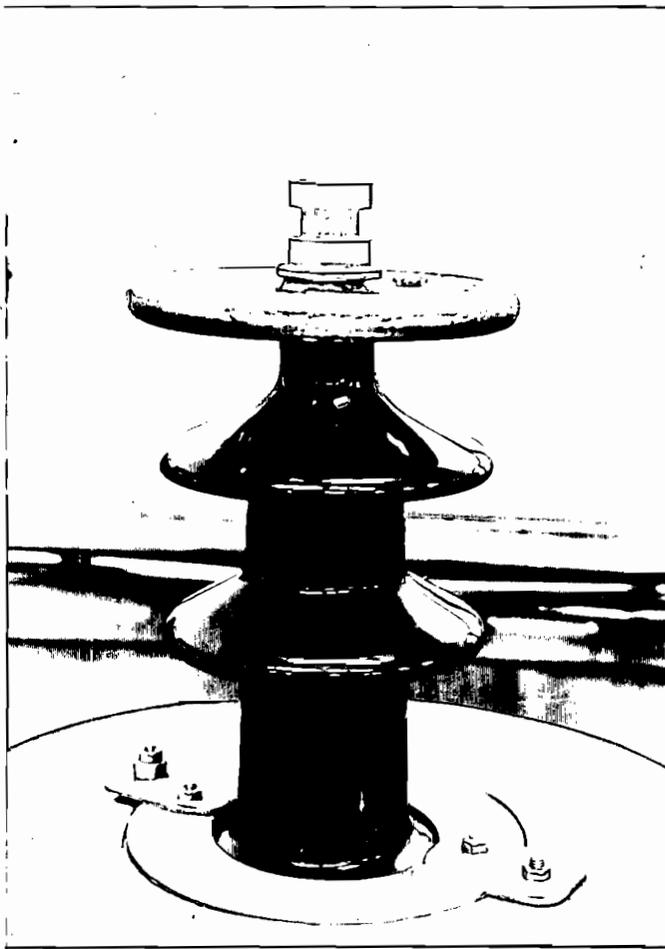




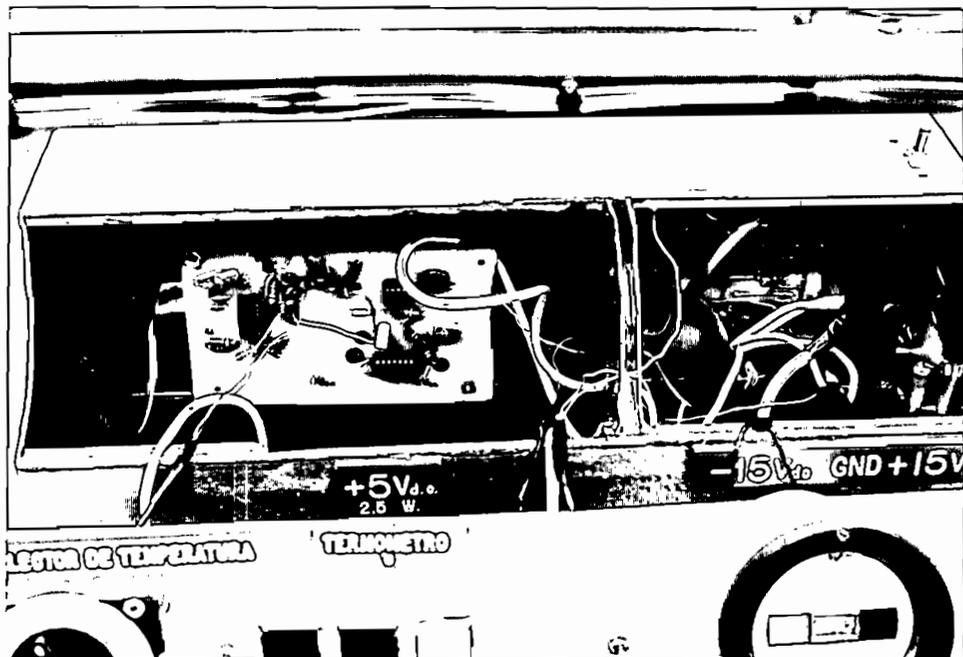
Fotografía 5. Montaje del anillo equalizador de tierra.



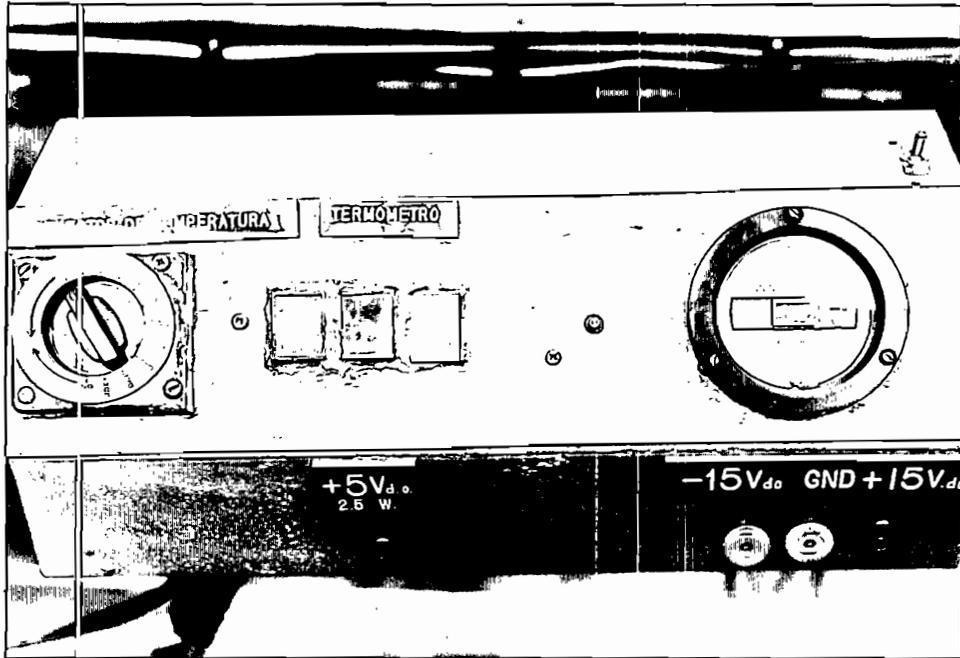
Fotografía 6. Configuración del electrodo de alta tensión.



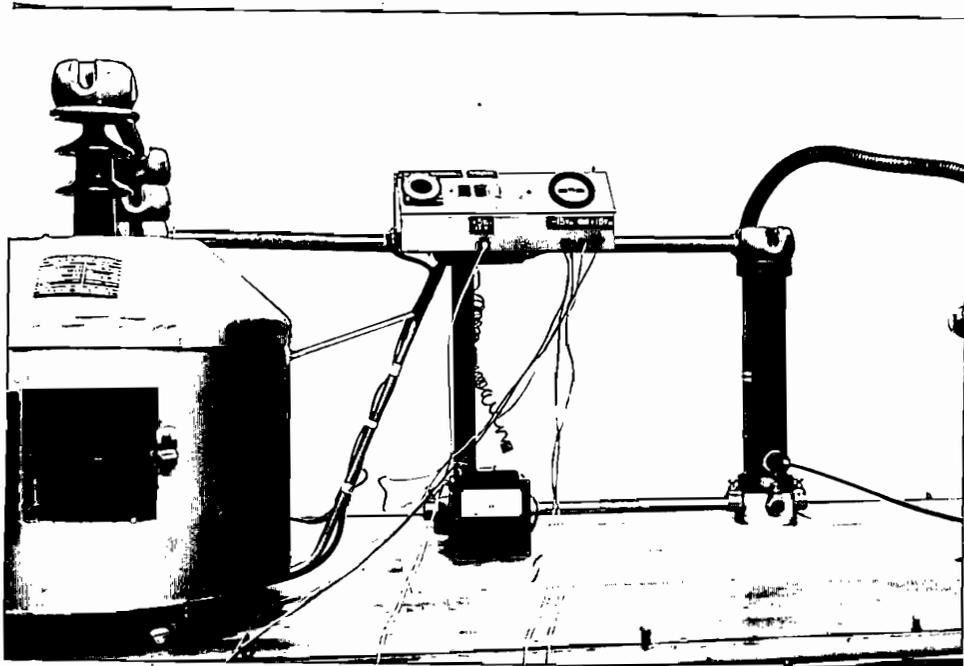
Fotografía 7. Anillo ecualizador en la parte superior del bushing.



Fotografía 8. El interior del control de temperatura.



Fotografía 9. El control de temperatura.



Fotografía 10. El equipo utilizado en pruebas de envejecimiento.

4.4.2. Pruebas de funcionamiento

El objeto de estas pruebas prototipo es el obtener la respuesta del equipo en condiciones de trabajo, para con estos resultados establecer si se satisfacen las condiciones de diseño.

Por lo tanto las pruebas que se realizarán deberán estar orientadas a obtener valores que permitan evaluar los diseños térmico, eléctrico y del control de temperatura.

A continuación se presenta la descripción del conjunto de pruebas realizadas.

4.4.2.1. Pruebas de calentamiento

El realizar este tipo de pruebas permite obtener la respuesta térmica del equipo en vacío, esto implica obtener la respuesta: Temperatura vs tiempo, para la condición de máxima temperatura (300°C). Adicionalmente, este tipo de pruebas permiten evaluar el comportamiento del aislante térmico, así como el de la ventana de acceso a la cámara.

Por otro lado, es importante establecer el comportamiento de estos parámetros cuando el sistema funciona con carga, debiendo entenderse por carga cualquier objeto en el interior de la mufla que no sea parte integrante de esta.

Realizadas las pruebas antes mencionadas los resultados se presentan

en el Apéndice F, tablas F-1 y F-2, y como gráficos racionalizados ($\%T = f(t)$), se indican en las figuras 4.15., 4.16., 4.17., 4.18.

Al analizar estas curvas de respuesta se desprenden las siguientes conclusiones:

- a) En el gráfico de la figura 4.15. se observa que el sistema presenta inicialmente un crecimiento lineal, el mismo que se mantiene hasta alcanzar el 50% (150°C) de la temperatura seleccionada, luego de este punto el sistema empieza a responder a la acción del sistema de control, el mismo que empieza a controlar la potencia entregada para así garantizar que el sistema vaya a la temperatura seleccionada (300°C) sin existir un sobretiro debido a un exceso de energía almacenada en el sistema. Por lo tanto se puede concluir diciendo que el sistema térmico y el control están actuando de acuerdo a lo previsto.

La figura 4.16. muestra la respuesta de temperatura en la carcaza y en la ventana de vidrio de la mufla, se observa que no existen discontinuidades ni saltos bruscos de temperatura, lo cual indica la ausencia de esfuerzos térmicos en el aislamiento, siendo este un síntoma de su adecuado funcionamiento. Observación que se corrobora con la comparación de los valores de diseño que para la temperatura de la ventana en su cubierta exterior (T_{c1}) y la de carcaza (T_s) para máxima temperatura son: $T_{c1} = 75$ y $T_s = 30$ respectivamente, frente a los resultados de las pruebas que indican $T_{c1} = 73.8$ y $T_s = 32$ °C.

Fig.4.15 % $T_{int} = f(t)$, en vacío

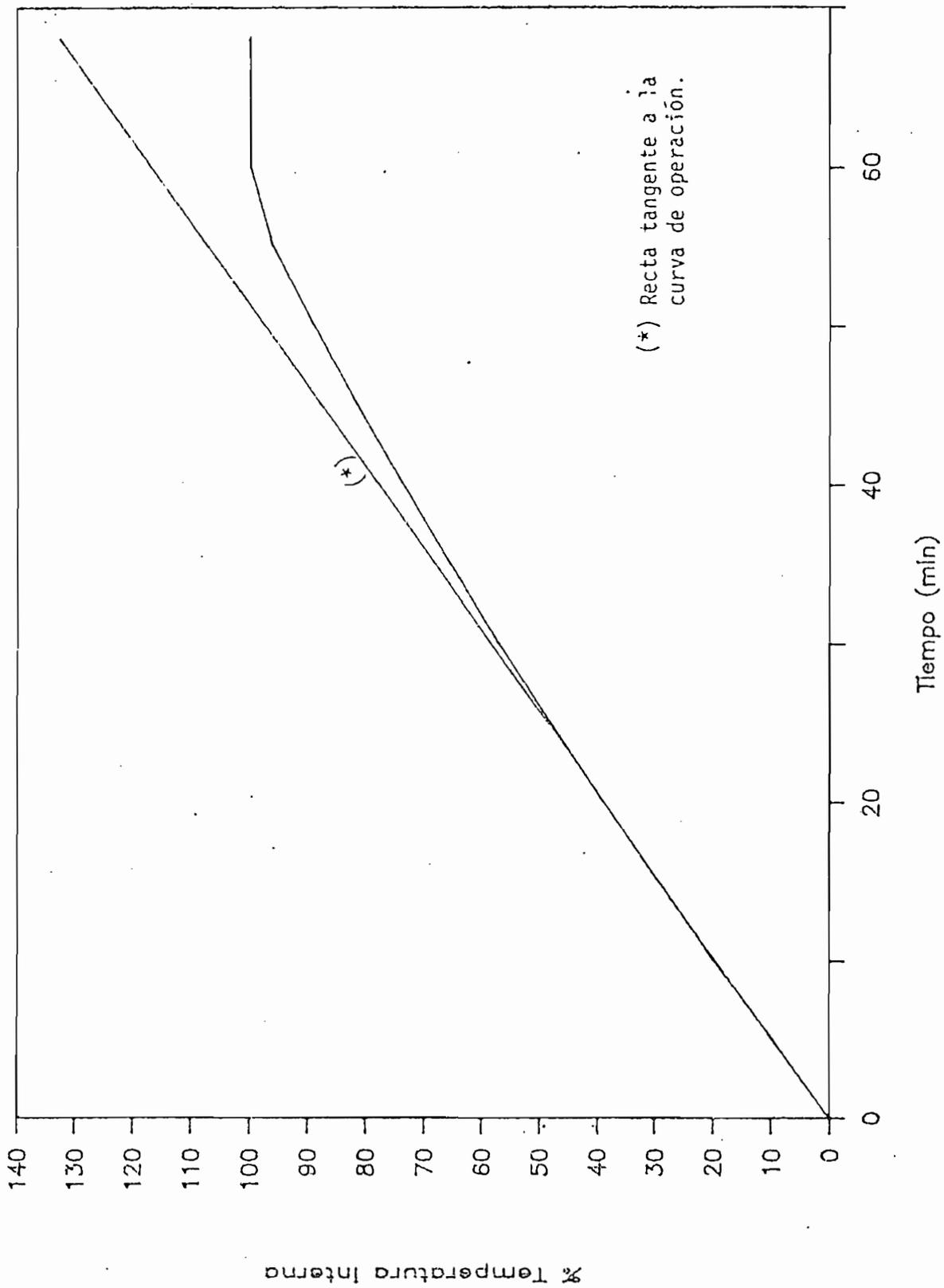


Fig. 4.16 (1) % T vidrio = f(t), va

(2) % T carcaza = f(t)

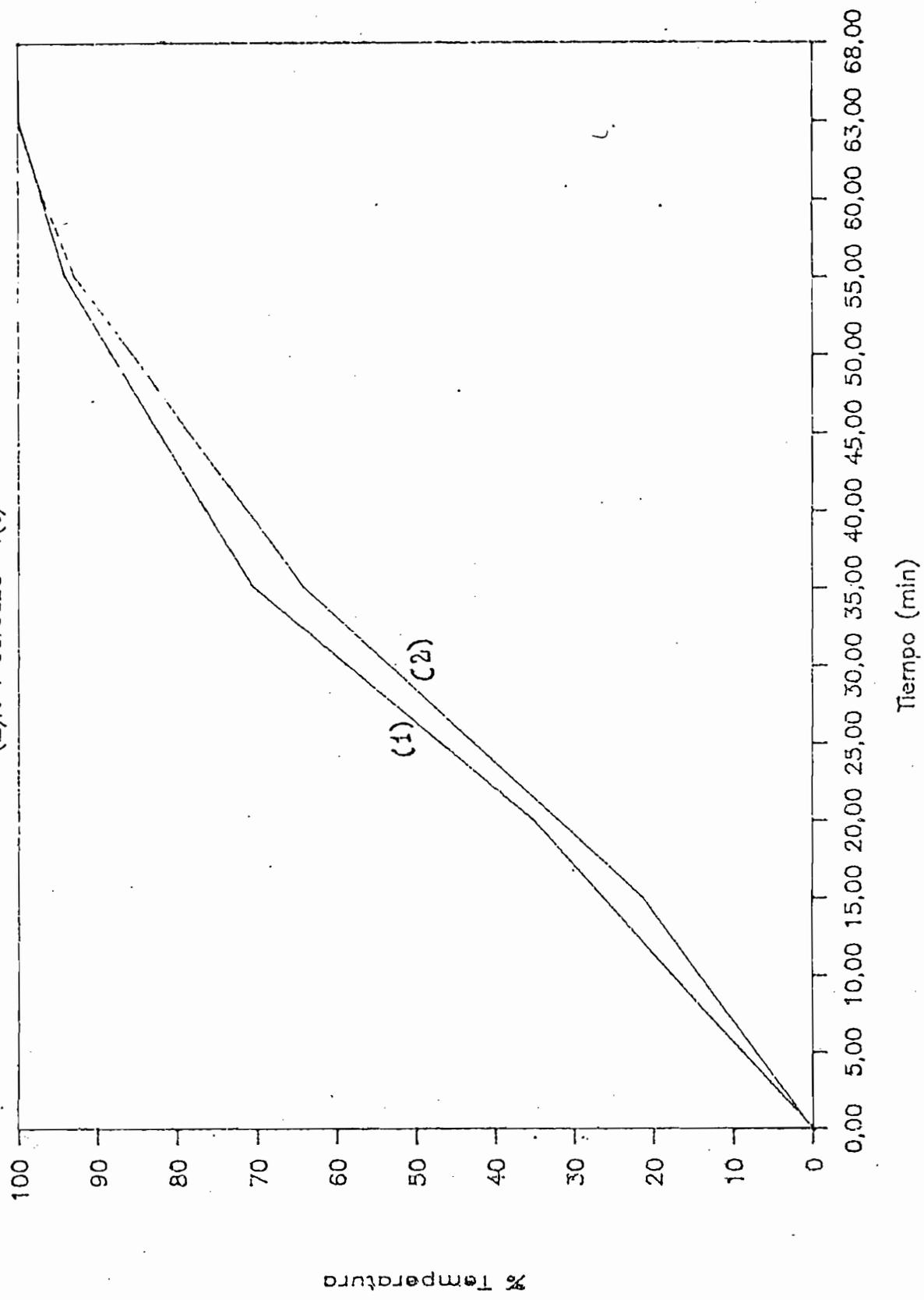


Fig. 4.17 % $T_{int.} = f(t)$. con carga

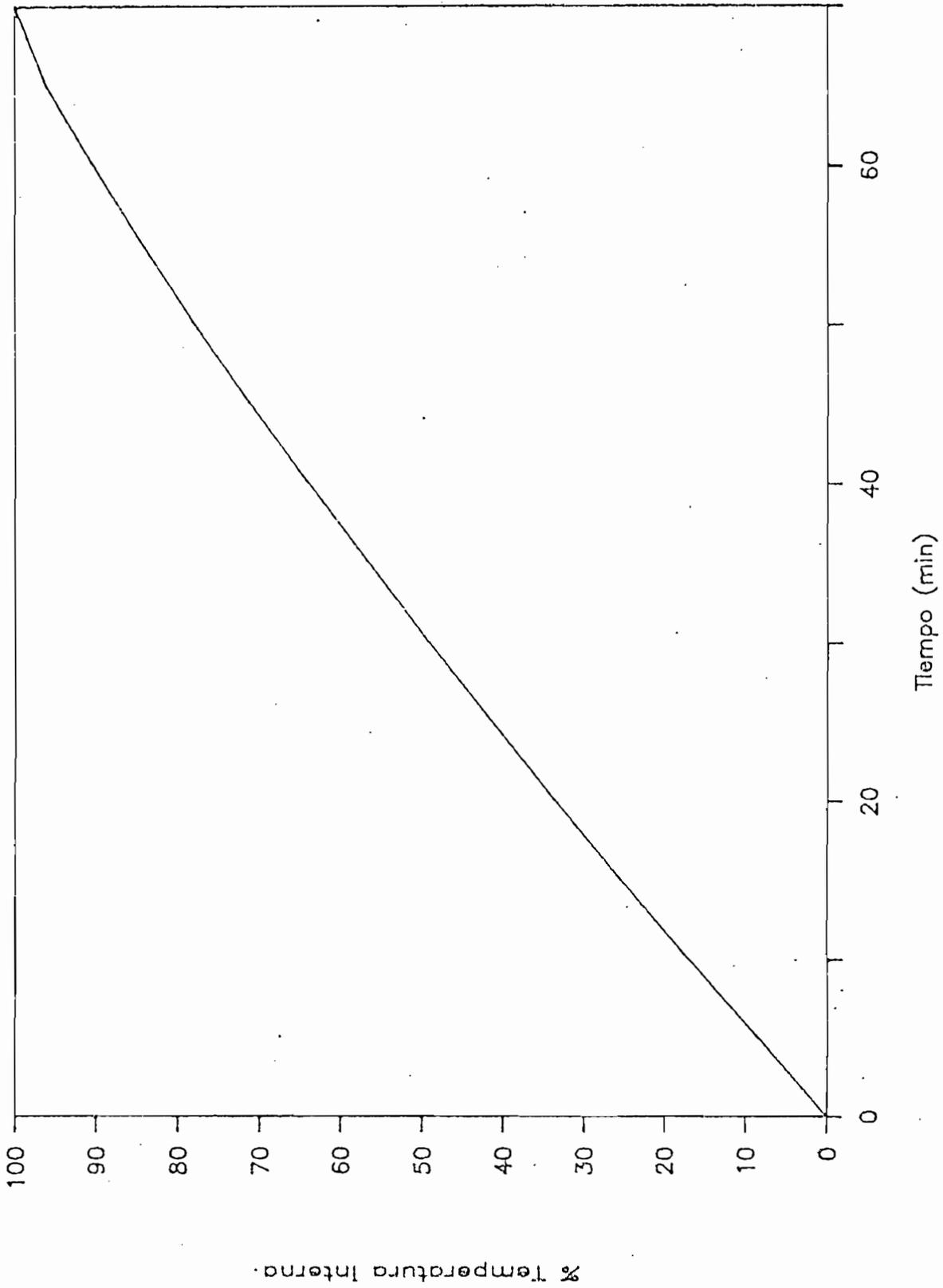
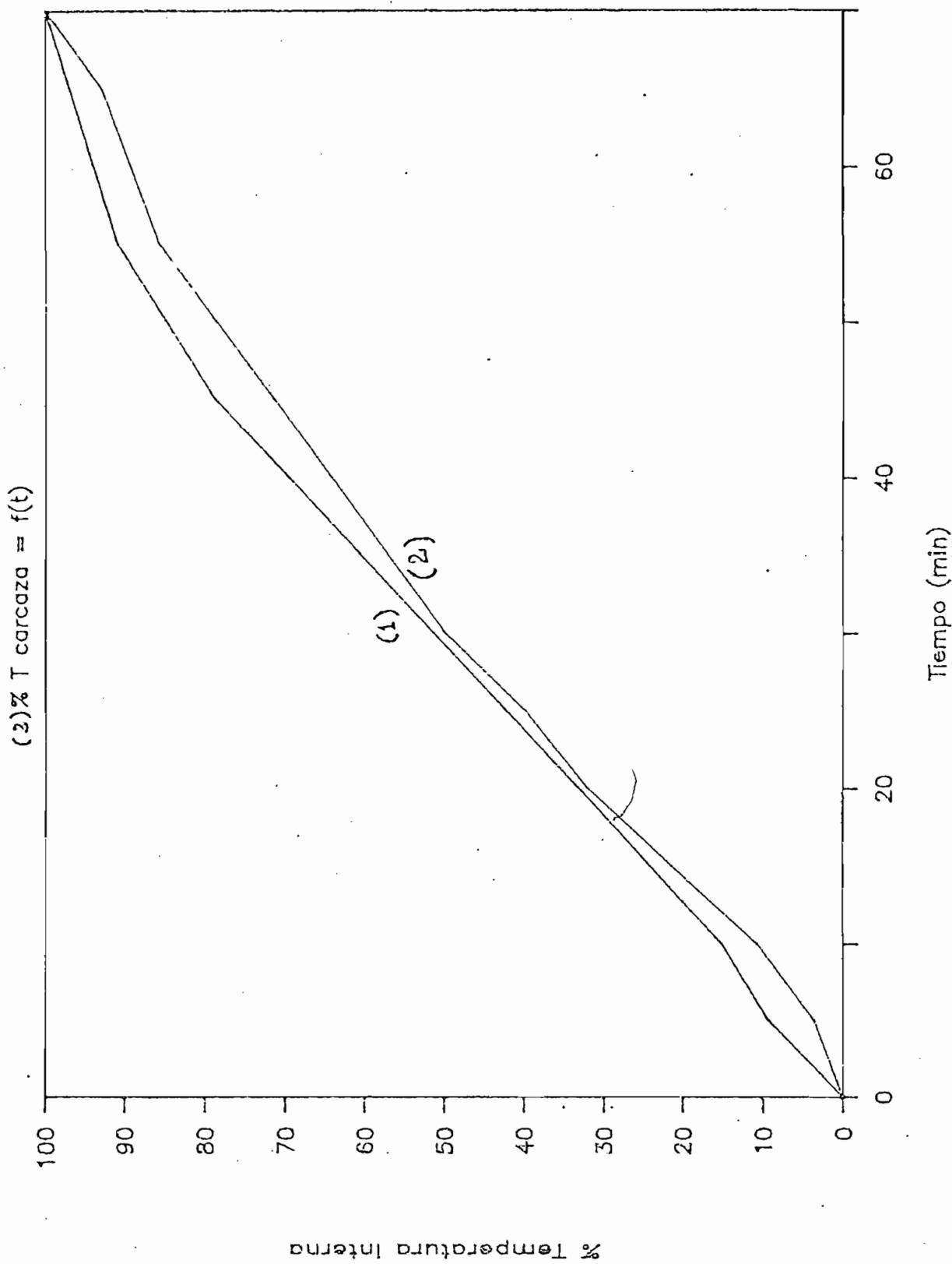


Fig. 4.18. % T vidrio = f(t), con carga



El obtener estas curvas para la máxima temperatura permite evaluar el diseño, no se realiza en este punto la misma prueba para temperaturas intermedias por cuanto en el diseño sólo se considera la temperatura máxima de operación para el dimensionamiento de los componentes. Pero se puede concluir a priori que si el sistema trabaja adecuadamente para la condición máxima, en las condiciones intermedias lo hará de igual forma inclusive se tendría unas curvas de respuestas parecidas a las obtenidas sólo con cambio en el tiempo de respuesta.

Las pruebas a temperaturas intermedias se realizarán para determinar la calidad del sistema de control.

- b) De la prueba con carga, cuya respuesta se presenta en las figuras 4.17 y 4.18 se desprende que como era de esperar el sistema tiene una respuesta parecida a la prueba en vacío con la diferencia que para alcanzar la temperatura final el equipo requiere un tiempo mayor de operación, lo cual se debe a que la carga térmica introducida es relativamente grande (ver anexo F).

4.4.2.2. Pruebas eléctricas

Con estas pruebas se busca establecer el comportamiento del diseño eléctrico de alta y baja tensión.

a.- PRUEBAS DE ALTO VOLTAJE

Estas pruebas están encaminadas a evaluar el comportamiento del sis

tema: bushing, electrodos de alta y tierra y los perfiles ecualizadores. Verificando la distancia de aislamiento y determinando el voltaje de operación libre de corona.

a.1. Prueba de aislamiento

Esta prueba se realizará según la norma IEC., 76, 1967. (23).

Por norma, para evaluar si un sistema de alto voltaje esta bien aislado (distancia de aislamiento y configuración adecuada para el voltaje de diseño), se debe someter al sistema al sobrevoltaje de frecuencia industrial correspondiente al voltaje de diseño, por espacio de un minuto.

Como la mufla esta diseñada para soportar 30 kV_{STP} el sobrevoltaje aplicado fue de 60.4 kV STP, (en Quito se corrige por variación de la densidad a 547 mm Hg y 19°C, el factor es de 0,71), el equipo pasa la prueba.

a.2. Detección de corona

Esta prueba se realizó según la norma IEEE, Std. 454, 1973 (21). Para establecer la presencia de corona en un equipo, por recomendación de la norma, hay que establecer la presencia de corona en todos los equipos auxiliares para determinar así si la corona es debida sólo al equipo que interesa.

Esta prueba permitió establecer los siguientes valores de carga en

los pulsos de corona que se producen en la mufla a diferentes voltajes.

TABLA 4.3.

MEDICION DE CORONA EN LA MUFLA*

VOLTAJE (KV)	CARGA DE LOS PULSOS (pc)
4	0
6	0
8	5
10	18
12	50
12.5	224
13.0	282 (audible)
13.5	1000 (audible)

* Prueba realizada a 548,49 mmHg y 20,2°C.

Como el objeto de esta prueba es el de establecer el voltaje hasta el cual la mufla se consideraría libre de corona, se decidió revisar los resultados obtenidos en pruebas de detección de micro descargas (22) y realizar otras tantas que permitan establecer el nivel de voltaje útil para este tipo de estudios. En la Tabla 4.4. se presenta un resultado de detección de microdescargas (22), los otros resultados se presentan en la tabla F-3 del apéndice F.

TABLA 4.4.

PRUEBA DE DETECCION DE DESCARGAS PARCIALES

MATERIAL	VOLTAJE (KV)	GRADIENTE DE POTENCIAL (KV/cm)	CARGA DE LOS PULSOS (pc)
Lámina de poliester de 12x12 cm x 0.1 cm en aire.	2	20	50
	4	40	100
	5	50	3000

En base a estos resultados se puede establecer que un valor adecuado de voltaje para considerar a la mufla libre de corona será aquel que presente como máximo pulsos de 50 pc.

En la tabla 4.3. se encuentra que la mufla presenta pulsos de 50 pc a 12 kV, además si se evalúa la energía de los mismos con la expresión siguiente (21):

$$E = \frac{1}{2} QV \quad (4.25)$$

donde:

E = energía de los pulsos de corona (nJ)

Q = carga de los pulsos de corona (pc)

V = voltaje aplicado (KV)

Se obtiene que en este nivel de voltaje la energía de los pulsos tendría un valor máximo de 300 nJ, lo cual hace que el equipo esté dentro de los valores permitidos por la norma (21), la misma que establece una energía de 700 nJ para considerar a un equipo aislado en aire libre de corona.

Luego de establecer el nivel permisible de corona corresponde establecer el voltaje de iniciación de corona (CIV) y el de extinción de corona (CEV), obteniéndose:

$$CIV = 12.5 \text{ kV}$$

$$CEV = 11.5 \text{ KV}$$

Por lo expuesto se puede concluir diciendo que la mufla está libre de corona para una tensión inferior a los 12.5 KV.

b. PRUEBAS EN BAJO VOLTAJE

Estas pruebas tienen por objeto verificar si se satisface tanto el valor de la resistencia eléctrica de los calefactores como el factor de potencia del mismo.

Se realizaron dos tipos de pruebas: Prueba del voltímetro - amperímetro con tensión continua, para determinar la resistencia de los calefactores y prueba del voltímetro, amperímetro, vatímetro, con tensión alterna para determinar el factor de potencia. Los resultados obtenidos en estas pruebas se muestran en las tablas 4.5. y 4.6.

TABLA 4.5.

MEDICION DE LA RESISTENCIA DE LOS CALEFACTORES

<u>VOLTAJE</u> <u>(V)D.C.</u>	<u>CORRIENTE</u> <u>(A)</u>	<u>RESISTENCIA</u> <u>()</u>
24	4.1	5.86
24	4.0	6.00
24	4.0	6.00
24	4.0	6.00
24	4.1	5.86

TABLA 4.6.

MEDICION DEL FACTOR DE POTENCIA

<u>VOLTAJE</u> <u>(V)A.C.</u>	<u>CORRIENTE</u> <u>(A)</u>	<u>POTENCIA S</u> <u>(VA)</u>	<u>POTENCIA P</u> <u>(W)</u>
24	4.1	98.4	98
24	4.1	98.4	98
24	4.0	96.0	98
24	4.0	96.0	98
24	4.1	98.4	98

En base a estos resultados se encuentra que la resistencia de los ca

Los factores medidos es de 5.97Ω , frente a 5.94Ω que es la resistencia de diseño, se tiene un error del 0.5 % lo cual garantiza una adecuada construcción.

Respecto del factor de potencia, éste es unitario, lo cual satisface plenamente las expectativas de diseño.

4.4.2.3. Prueba del control de temperatura

Esta prueba permitirá comprobar si el control de temperatura está operando de acuerdo a los requerimientos de diseño, esto es permitir controlar la temperatura desde 50°C a 300°C en pasos discretos de 25°C , con un error de estabilización de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Para realizar esta prueba se utilizó el termómetro disponible en el laboratorio (tipo puente), con el cual se tomó la medida de temperatura en el mismo sitio donde está la termocupla, además se varió el selector de temperatura a cada posición de temperatura en pasos de 25°C y se tomó lecturas de la temperatura alcanzada por el mismo hasta la desconexión y la temperatura en la que se volvía a conectar para así determinar la banda de error, los valores obtenidos en esta prueba son los mostrados en la tabla 4.7.

De los resultados expuestos se puede observar que el valor de ΔT está entre $\pm 2^{\circ}\text{C}$, encontrando que sólo en una temperatura (150°C) existe un error de -3°C en la reconexión, lo cual se puede atribuir a una mala lectura o a una variación en la resistencia que pone la señal del selector en el control.

TABLA 4.7.

DETERMINACION DEL ERROR EN EL CONTROL DE TEMPERATURA

TEMPERATURA SELECCIONADA °C	TERMOMETRO DE LA MUFLA				TEMPERATURA MEDIDA			
	Desconexión		Reconexión		Desconexión		Reconexión	
	°C	ΔT^*	°C	ΔT	°C	ΔT_1^*	°C	ΔT_1
50	51	+1	48	-2	50	1	48	0
75	75	0	73	-2	76	-1	74	-1
100	101	+1	98	-2	101	0	98	0
125	126	+1	124	-1	125	1	123	+1
150	151	+1	147	-3	151	0	148	-1
175	174	-1	173	-2	175	-1	173	0
200	200	0	198	-2	201	1	199	-1
225	226	+1	224	-1	*	-	-	-
250	249	-1	247	-3	*	-	-	-
275	276	+1	273	-2	*	-	-	-
300	302	+2	299	-1	*	-	-	-

$$*\Delta T = T_{\text{termó.}} - T_{\text{selec}}$$

$$*\Delta T_1 = T_{\text{termó}} - T_{\text{medida}}$$

* Estas medidas no se pudieron tomar debido a que el termómetro no tiene sino una capacidad de 210°C.

En definitiva se puede decir que se ha satisfecho el requerimiento de obtener una temperatura controlada de hasta 300°C con un error de ± 2 °C.

El valor de ΔT_1 es un valor que sirve para contrastar el termómetro, el resultado indica que el termómetro esta dando lecturas confiables con un error de $\pm 1^\circ\text{C}$, lo cual corrobora la precisión del sistema.

Se puede finalizar diciendo que se han alcanzado las metas trazadas en el diseño.

CÁPITULO V

PRUEBAS DE APLICACION EN EL ENVEJECIMIENTO

El envejecimiento de un material no es sino los cambios causados en sus propiedades físicas o químicas por uno o varios esfuerzos aplicados al mismo a lo largo de un tiempo. (13)

Estos cambios pueden ser evaluados por la medición de algunas propiedades tales como: voltaje de ruptura; tangente de pérdidas dieléctricas etc. o también estableciendo y calibrando modelos que permitan predecir el estado del material.

Si una propiedad del material (p), sufre variación por un esfuerzo aplicado, se puede establecer una función $F(p)$, la misma que si presenta una velocidad de cambio R se la puede representar como:

$$F(p) = Rt \quad (5.1)$$

Donde:

t = tiempo.

Si la propiedad decae hasta un valor límite (criterio de falla) la propiedad no podrá reducirse más sin deteriorar el material como tal y su aplicación. El tiempo que dicha propiedad soporte hasta alcanzar el valor límite se denomina vida del material, que analíticamente se representa así:

Si $t = L$

$$P = P_L$$

entonces $F(P_L) = R \cdot L$ (5.2)

Donde:

L = vida del material respecto de la propiedad p .

5.1. MODELOS SIMPLES DE ENVEJECIMIENTO

5.1.1. Modelo de envejecimiento térmico

El envejecimiento térmico de los materiales fue planteado por Dakin en 1948, como una reacción química, modelando la velocidad de cambio del material como una función basada en la conocida fórmula de Arrhenius así: (12; 13)

$$R_t = A \exp \left(- \frac{E_a}{T} \right) \quad (5.3)$$

Donde:

A = constante del material.

E_a = relación de la energía de activación del material respecto de la constante de Boltzman.

T = temperatura absoluta $|\text{°K}|$

R_t = velocidad de envejecimiento térmico $|\frac{1}{S}|$

Como es lógico la vida de un material es una función inversa de su velocidad de envejecimiento así:

$$L_t = k_t \exp\left(-\frac{E_a}{T}\right) \quad (5.4)$$

Donde:

L_t = vida térmica

$$k_t = \frac{1}{A}$$

Ahora bien si se toman por condiciones de frontera del material la vida en condiciones ambientales esto es:

$$a \quad T_0 \quad \rightarrow \quad L_0$$

aplicándolas en la expresión 5.4. se tiene:

$$k_t = L_0 \exp\left(-\frac{E_a}{T_0}\right) \quad (5.5)$$

Por lo anotado la vida térmica del material será:

$$L_t = L_0 \exp\left[-E_a \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (5.6)$$

Pero el factor exponencial de la ec. 5.6.

$$\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} = \frac{T - T_0}{T \cdot T_0}$$

Si $T \rightarrow \infty$ entonces $\frac{T - T_0}{T \cdot T_0} = \frac{1}{T_0}$

Si $T \rightarrow T_0$ entonces $\frac{T - T_0}{T T_0} = 0$

Por tanto $\frac{T - T_0}{T T_0} = \Delta T$ ya que son cantidades pequeñas, si esta última expresión se reemplaza en la expresión 5.6.

Se obtiene:

$$L_t = L_0 \exp - E_a \Delta T \quad (5.7)$$

Aplicando logaritmos en 5.7. se obtiene:

$$\ln L_t = \ln L_0 + (- E_a \Delta T) \quad (5.8)$$

La misma que en un papel semilogarítmico son rectas con pendiente $- E_a \Delta T$.

5.1.2. Modelo de envejecimiento eléctrico

Los investigadores de envejecimiento de materiales dieléctricos han formulado dos modelos de envejecimiento eléctrico así: Modelo de Potencia inversa y modelo exponencial. (12)

a) MODELO EXPONENCIAL

Se lo propone como: (12)

$$L_e = k \exp - h G \quad (5.9)$$

Donde:

L_e = vida eléctrica.

k = constante.

h = constante.

G = gradiente eléctrico.

Las condiciones de frontera para este modelo son:

El material tendrá una vida L_0 cuando $G = 0$, aplicadas estas condiciones en la ec. 5.9. se obtiene:

$$k = L_0$$

Por tanto:

$$L_e = L_0 \exp - hG \quad (5.10)$$

Si se aplican logaritmos a ambos miembros se obtendrá graficando en papel semilogarítmico una recta con pendiente $- hG$.

b) MODELO DE POTENCIA INVERSA

Se lo concibe como: (12)

$$L_e = C \exp^{-n} \quad (5.11)$$

Donde:

$C = \text{constante.}$

$n = \text{constante.}$

Si se aplican las mismas condiciones de borde que en el modelo anterior se encuentra que a $G = 0$ la vida L_e tiende a infinito, lo cual esta en desacuerdo con un modelo real por tanto hay que introducir condiciones que hagan válido este modelo.

Las nuevas condiciones de frontera serán:

En todo material eléctrico existe un gradiente de potencial, debido a la presencia de partículas cargadas por tanto existirá un G_0 por debajo del cual la vida del material es L_0 así aplicando en la ec. 5.11. se obtiene:

$$C = \frac{L_0}{G_0^{-n}} \quad (5.12)$$

Por lo tanto:

$$L_e = L_0 \left(\frac{G}{G_0} \right)^{-n} \quad (5.13)$$

Aplicando logaritmos y graficando en papel bilogarítmico se obtendría una recta con pendiente $-n$.

5.2. MODELO DE ENVEJECIMIENTO COMBINADO

Se puede plantear un modelo de envejecimiento combinado, utilizando las expresiones de los modelos separados, para lo cual se deben considerar modelos del mismo tipo, razón por la que este modelo se lo

hará utilizando modelos exponenciales.

Pero al aplicar esfuerzos combinados a un material aparecerán fenómenos de superposición y de reacción combinados.

Si la velocidad de cambio de las propiedades se expresa por: (12)

$$R = A \exp\left(-\frac{Ea}{T}\right) \exp\left| \left(a + \frac{b}{T}\right) f(G) \right| \quad (5.14)$$

donde:

a = constante

b = constante

f(G) = función del gradiente de potencial.

Si se escoge:

$$f(G) = G \quad (5.15)$$

y la vida del material es el inverso del cambio en las propiedades.

$$L = \frac{1}{A} \exp\left(+\frac{Ea}{T}\right) \exp\left| -\left(a + \frac{b}{T}\right) G \right| \quad (5.16)$$

Aplicando las condiciones de borde: la vida es L_0 a temperatura ambiente (T_0) sin gradiente de potencial se tiene:

$$\frac{1}{A} = L_0 \exp\left(-\frac{Ea}{T_0}\right) \quad (5.17)$$

Si además para que cada modelo se satisfaga individualmente se pone:

$$a + b/T_0 = h \quad (5.18)$$

La expresión 5.16. quedará como:

$$L = L_0 \exp^{-Ea\Delta T} \exp^{-hG} \exp^{+b\Delta TG} \quad (5.19)$$

De donde como se puede observar si se pone $G = 0$ ausencia de esfuerzo eléctrico se presenta el modelo de envejecimiento térmico y si se pone $T = T_0$ ausencia de esfuerzo térmico se presenta el modelo de envejecimiento eléctrico. Desde este punto de vista se establece que el modelo combinado se puede representar como:

$$L = \frac{L_t L_e}{L_0} \exp^{+ b\Delta TG} \quad (5.20)$$

Haciendo el gráfico de esta función en un sistema: $G, T, \ln(L)$, se encuentra una superficie de comportamiento del material, cuya forma típica es como la mostrada en la figura 5.1. (12)

Una vez planteado el modelo aparece la utilidad de la mufla, ya que con ayuda de este equipo se someterá a un set de muestras de un material aislante polimérico y se encontrarán resultados, con los cuales se calibrará el modelo, esto es encontrar el valor de las constantes.

Al tener calibrado el modelo se pueden introducir puntos de operación del material y encontrar la vida del mismo bajo estas condiciones. Adicionalmente se pueden realizar gráficos donde se puedan encontrar los puntos de operación y la vida esperada.

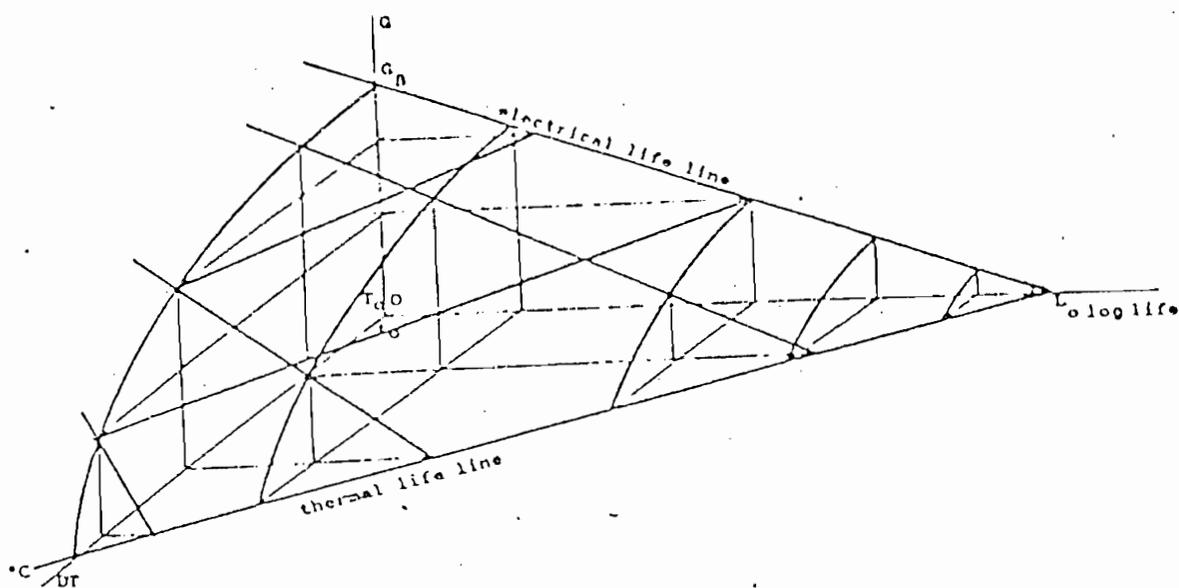


Fig. 5.1. La superficie de vida del aislamiento eléctrico bajo temperatura y voltaje tomando un simple modelo para la vida eléctrica.

(Reproducida de: IEEE. Trans. Elect. Insu. Vol. EI-16 No. 4 Ag. 81).

5.3. PRUEBAS EN MATERIALES DE TIPO POLIMÉRICO

5.3.1. Pruebas de envejecimiento térmico

Estas pruebas se realizan con el objeto de demostrar la aplicación del equipo en estudios de envejecimiento de dieléctricos.

El proceso de envejecimiento que se analiza con más detalle es el de envejecimiento térmico, realizándose una prueba de envejecimiento combinado, con la finalidad de mostrar la bondad del equipo y por que adicionalmente se requiere mucho más tiempo debido a las combinaciones que se pueden hacer entre voltaje y temperatura.

El material escogido para realizar estas pruebas es el polímero de nominado comercialmente "polivinil 040", el mismo que químicamente es un cloruro de polivinilo.

Para establecer algunas de sus propiedades, que marquen los límites del esfuerzo térmico que se pueda aplicar y adicionalmente permita evaluar el envejecimiento se realizaron las siguientes mediciones, tablas 5.1. y 5.2.

TABLA 5.1.

CARACTERISTICAS INICIALES DEL POLIVINIL 040

<u>Característica</u>	<u>Valor</u>	
Espesor	0.40	[mm]
Densidad	1.35×10^3	[Kg/m ³]
Voltaje de perforación	18.00	[KV]
Gradiente de potencial de perforación	450.00	[KV/cm]
Tangente de pérdidas dieléctricas	6.99	[%]

TABLA 5.2.

CARGA DE LOS PULSOS DE CORONA MUESTRAS NUEVAS DE POLIVINIL 040

<u>VOLTAJE</u> (KV)	<u>GRADIENTE DE</u> <u>POTENCIAL</u> (KV/cm)	<u>CARGA DE LOS PULSOS</u>	
		<u>(Pc)</u>	<u>(*) %</u>
1.0	25	49.626	0
1.5	37.5	4371.850	43.51
2.0	50	7789.990	77.92
2.5	62.5	9983.700	100.00

(*) Carga racionalizada tomando como 100% el máximo valor de la carga de los pulsos.

Se debe anotar además que el cloruro de polivinilo (P.V.C.) obtenido de la polimerización del monómero vinil cloro, se caracteriza por ser un polímero de elevado peso molecular y tener un porcentaje

de cristalización bajo (10%).

Además no puede ser sometido a temperaturas iguales o mayores a 115 °C por períodos largos, ya que se produce su descomposición, liberándose ácido clorhídrico que es altamente corrosivo. (25).

5.3.1.1. Resultados del envejecimiento

En busca de establecer un criterio de falla para el material o el fin de su vida útil como aislante eléctrico se decidió evaluar la variación de dos propiedades del material; la carga de los pulsos de corona y la tangente de pérdidas dieléctricas (método tradicional de análisis).

Para que los resultados obtenidos tengan validez se tomaron muestras de una misma pieza de material (P.V.C.), según lo exige la norma IEEE St. 98, 1972. (24)

A este conjunto de muestras, se las dividió en grupos de tres muestras y cada grupo fue sometido por diferentes espacios de tiempo a diferentes temperaturas. En el análisis de resultados se considera el producto tiempo x temperatura lo que permitirá dar a los resultados el tratamiento estadístico sugerido en la norma IEEE St. 101, 1972 (26), en base de los cuales se calibrará el modelo de envejecimiento térmico.

Los resultados obtenidos se presentan como tablas en el apéndice G, tablas G1 a G6 y como gráficos racionalizados en las figuras 5.2 a 5.7.

Se debe acotar que las muestras fueron sometidas a temperaturas de 50, 75, 100°C por espacios de tiempo tales que el producto tiempo - pro temperatura se mantenga en valores de 2400, 3600, 4800 (horas °C), con la finalidad de buscar un patrón de comportamiento tridimensional, que permita predecir lo adecuado o no del procedimiento.

Al analizar los gráficos de la variación de los pulsos de corona a diferentes temperaturas, figuras 5.3. a 5.6. se puede hacer el siguiente comentario.

Para todas las temperaturas con un tiempo de exposición tal que $t \times T$ sea igual a 2400 se nota una tendencia del material a mejorar sus características, la misma que no es acentuada para temperaturas de 50 y 75°C, pero con 100°C, el mejoramiento es muy notorio. Este fenómeno puede tener su explicación en que al ser fabricado el material se introdujeron partículas de humedad, las mismas que al calentarse tienden a escapar con el reblandecimiento del material, pero a temperaturas inferiores a 100°C el agua no se evapora totalmente, siendo por tanto ésta una posible explicación del resultado presentado (*).

Para todas las demás condiciones se observa que la respuesta del material es bastante parecida, teniéndose una mayor degradación del mismo mientras mayor es el producto tiempo por temperatura ($t \times T$).

(*) Anderson J. C., Leaver R. D., Ciencia de los materiales, Alexander J. M., Dawlings R.D., Editorial Limusa, México, 1978.

Fig.5.2 Corona inicial en el P.V.C 040

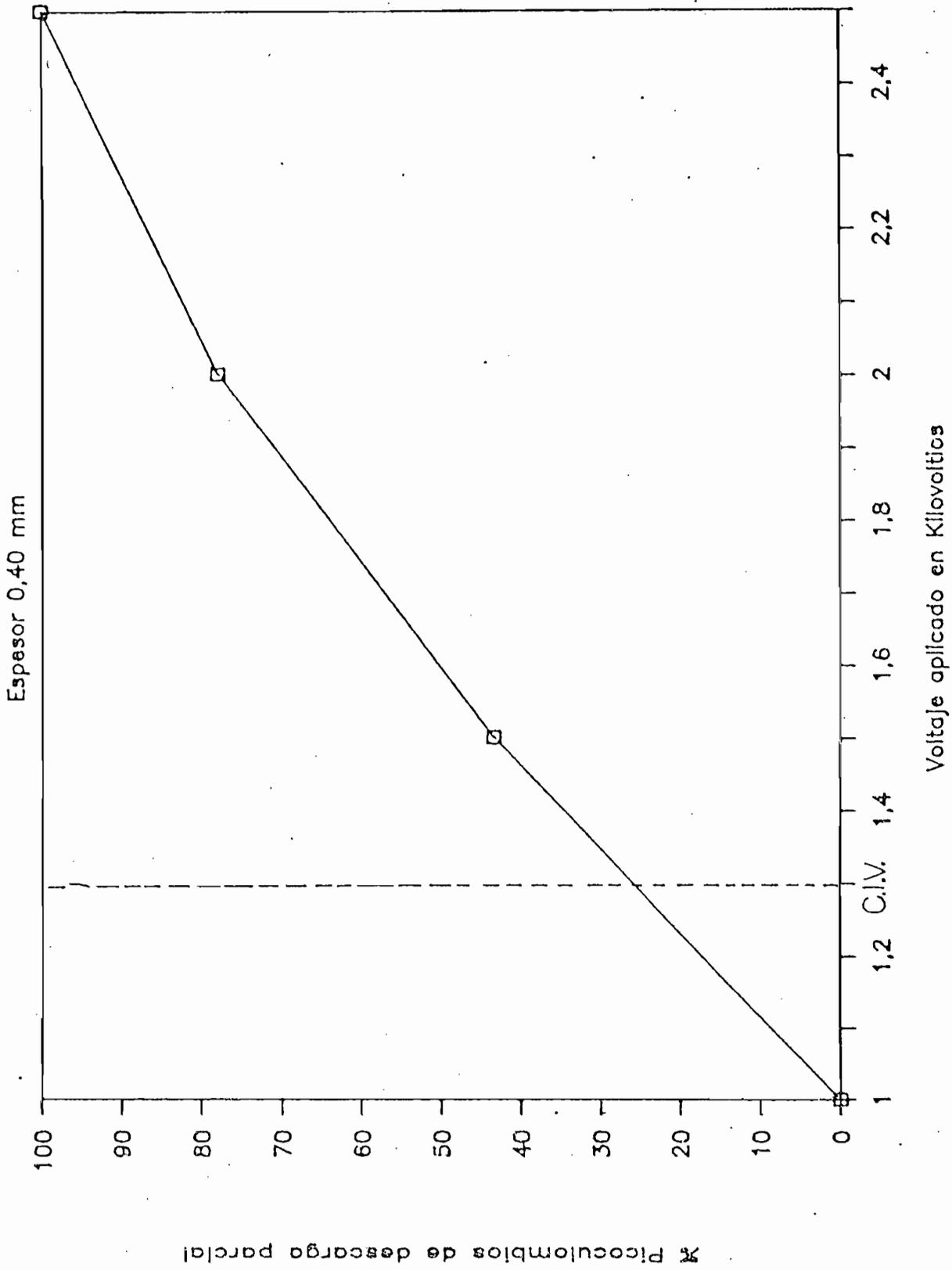


Fig.5.3 Variación de Microdescargas

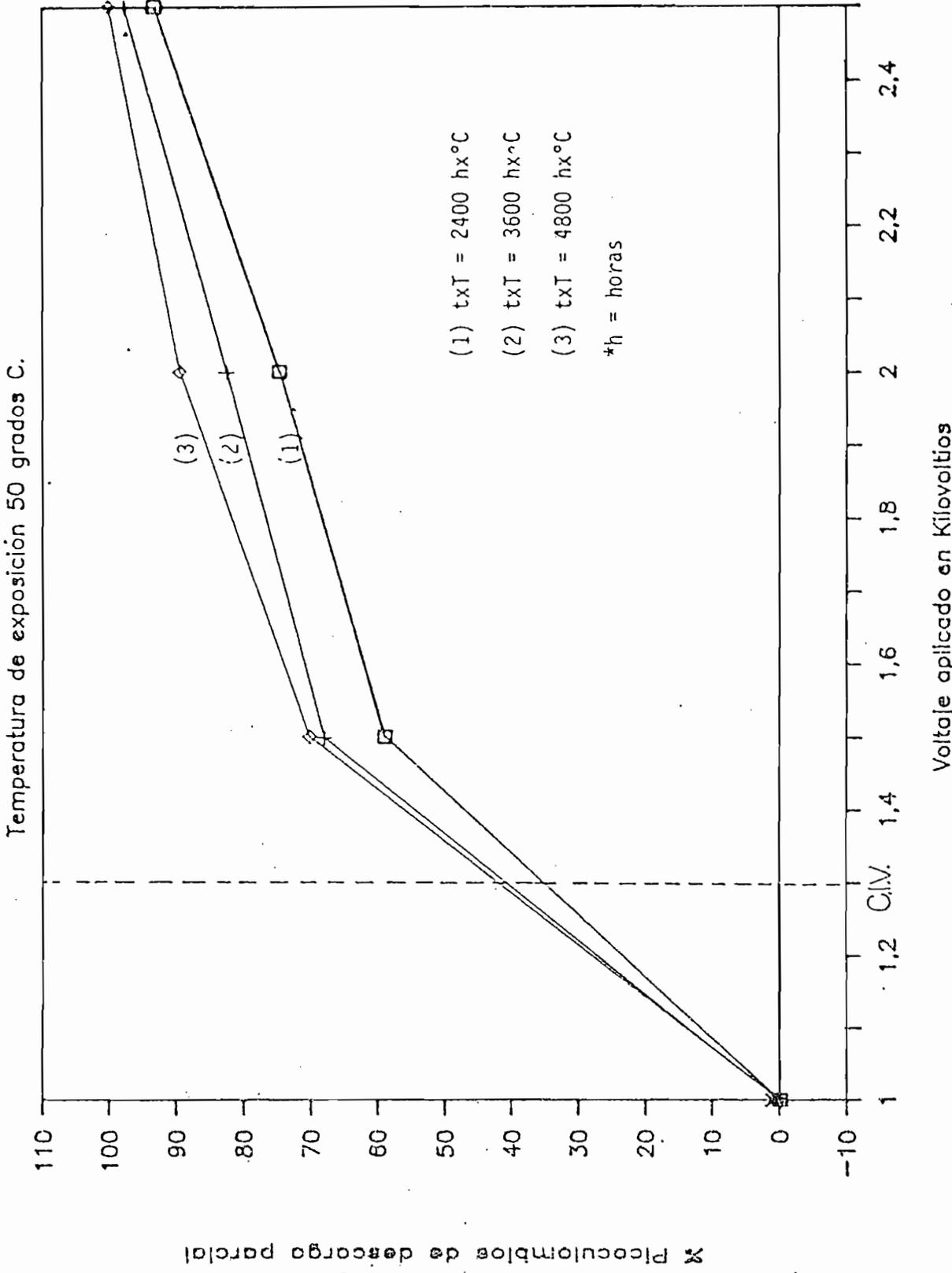


Fig.5.4 Variación de Microdescargas

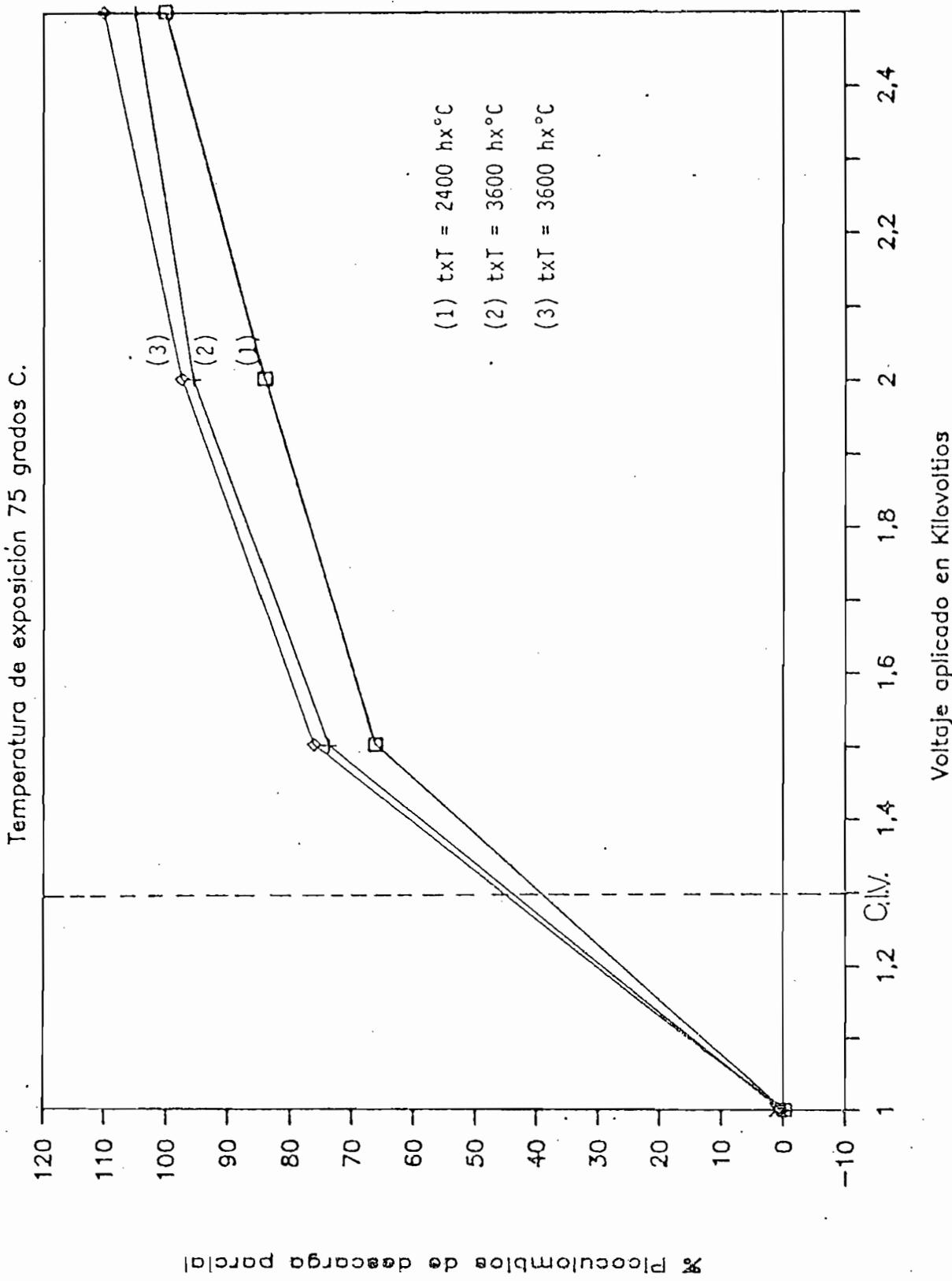


Fig.5.5 Variación de Microdescargas

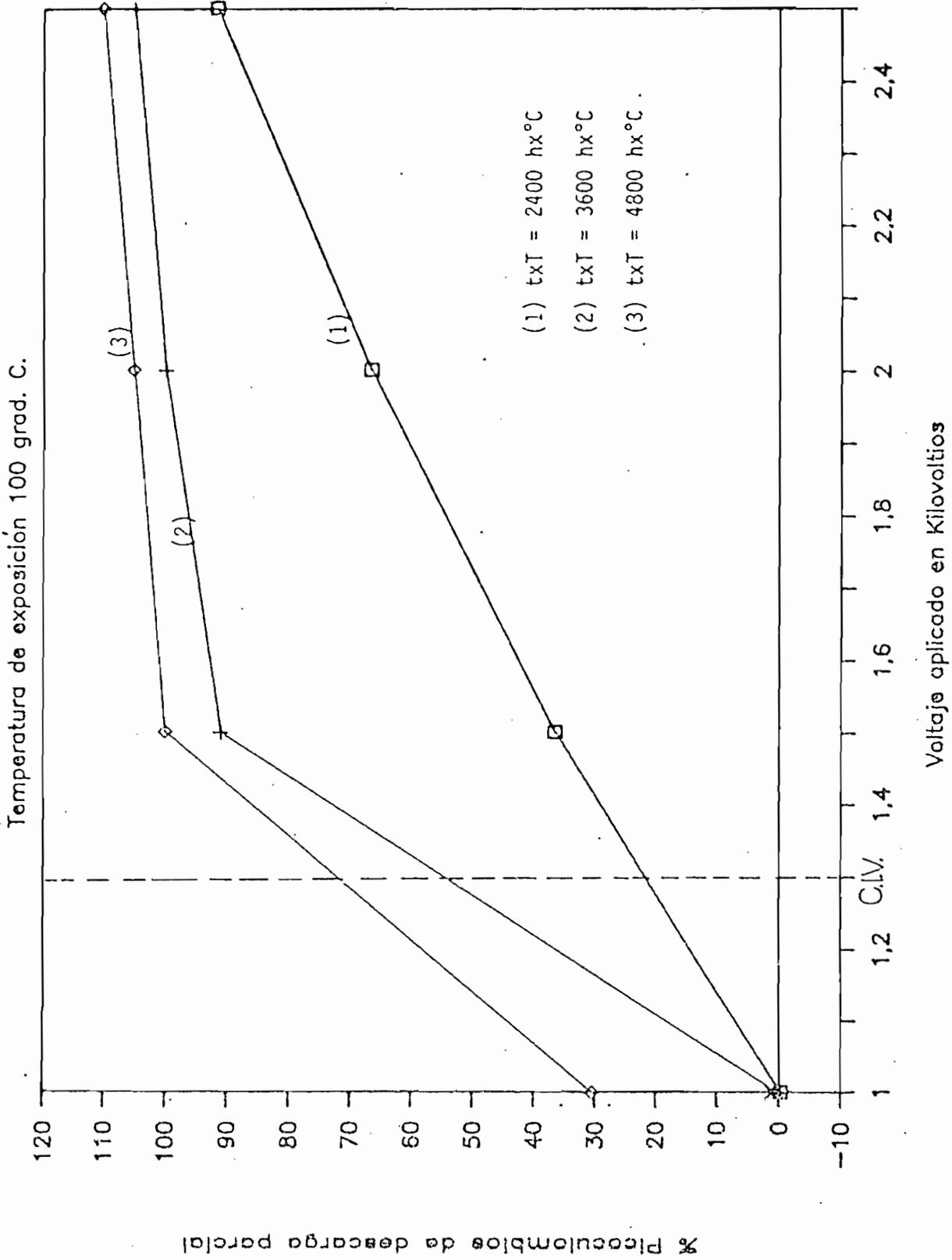


Fig.5.6 Variación de la Tg.de pérdidas

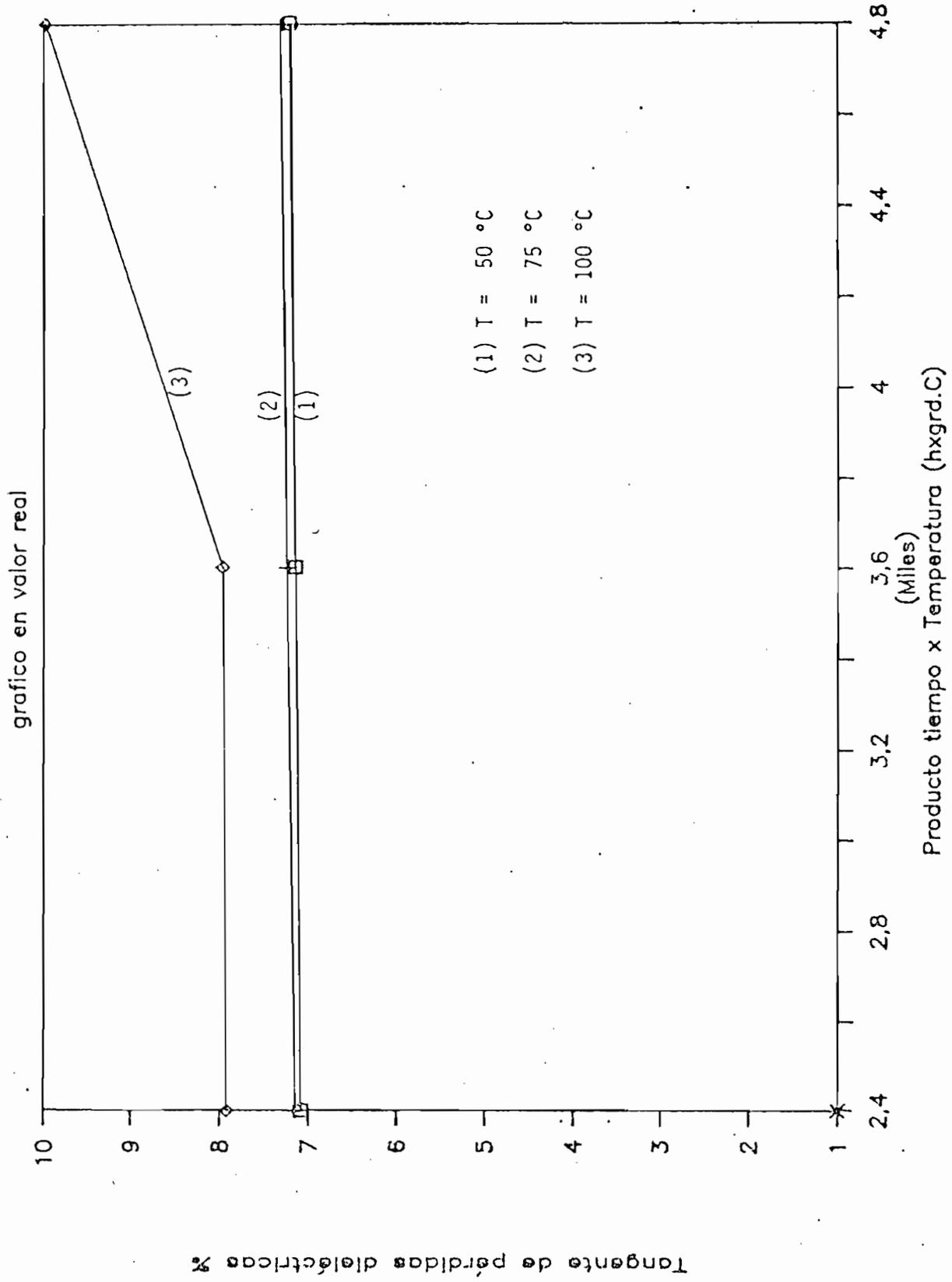
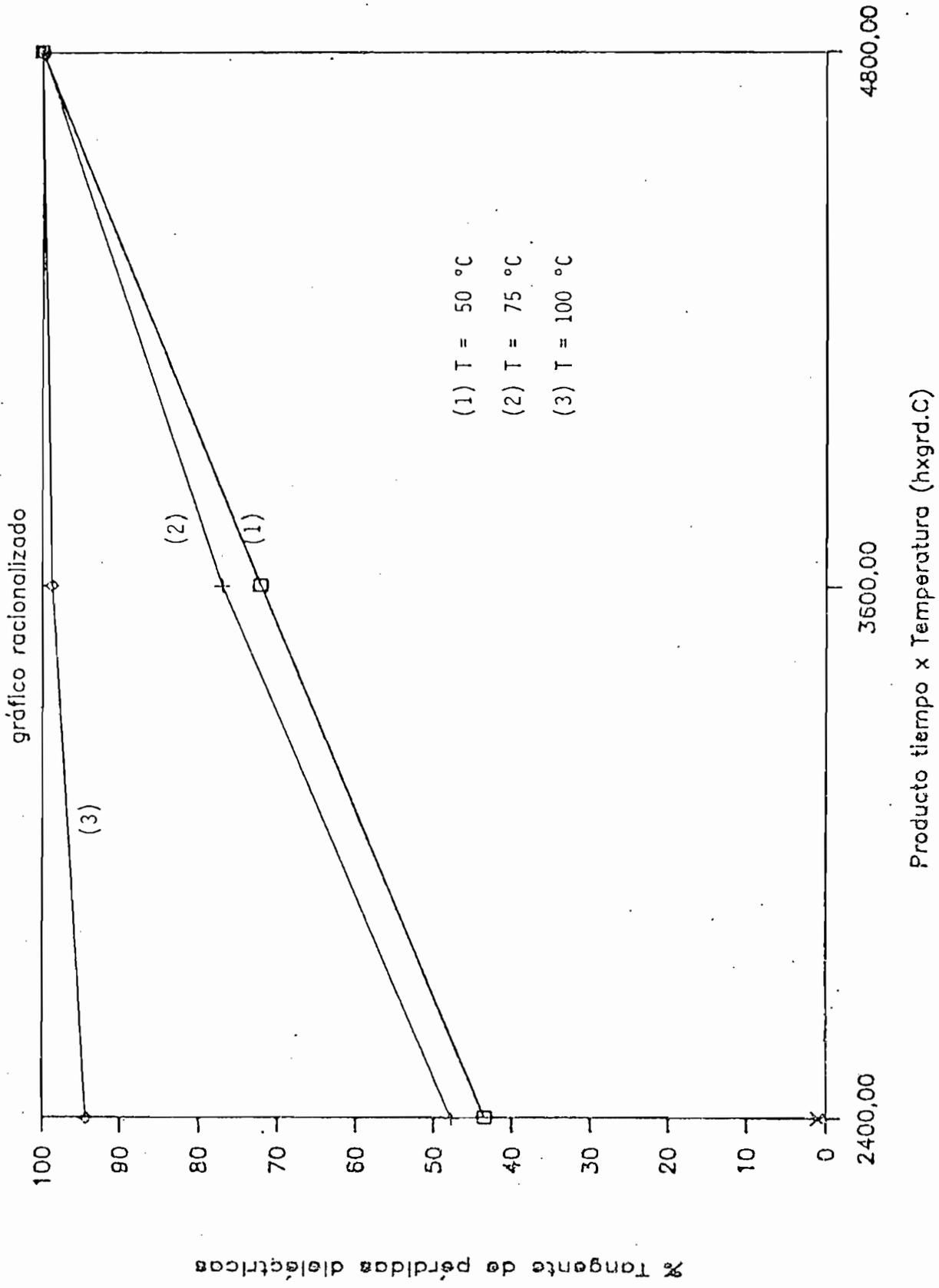


Fig.5.7 Variación de la Tg.de pérdidas



Esta variación es un comportamiento típico de envejecimiento, que se debe a una despolimerización del material, o a la descomposición del material a temperaturas mayores, lo cual concuerda con el concepto de envejecimiento, que se señaló al principio de este capítulo.

En estos gráficos (Fig. 5.2. a 5.4) se ha introducido una línea paralela al eje de las ordenadas, marcada CIV, la misma que señala el voltaje de iniciación de corona, esto es importante señalar ya que sólo así se explica el cambio brusco en el comportamiento de las microdescargas.

La otra característica que se analiza es la tangente de pérdidas dieléctricas, mediciones que se realizaron utilizando el puente de Schering. La variación de este parámetro se presenta en la figura 5.6. y 5.7. Se observa de ellos que la tangente de pérdidas varía con la temperatura en forma lenta hasta llegar a 75°C, acelerándose su variación en 100°C, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por microdescargas.

Esto indica que para las temperaturas de 50 y 75°C el comportamiento del material se ve influenciado por algún fenómeno químico similar, no así a los 100 grados donde al parecer entra en juego otro tipo de fenómenos, como la descomposición por ejemplo.

Una de las ventajas de este material para ser estudiado es que las variaciones debidas al envejecimiento son notorias inclusive a simple vista, como se muestra en la Fotografía 11.

Fig.5.8 Variación comparativa de Tg.per.

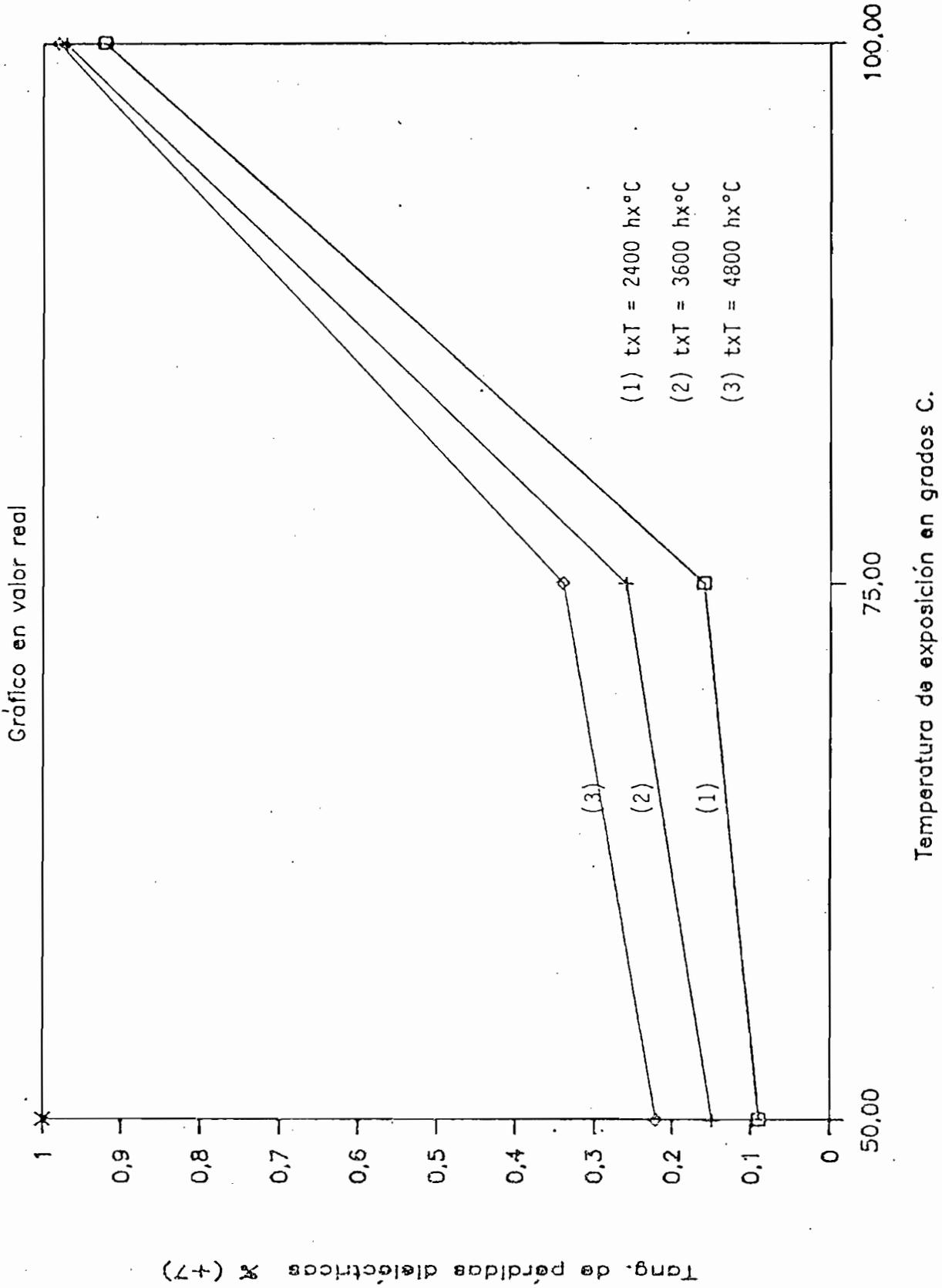
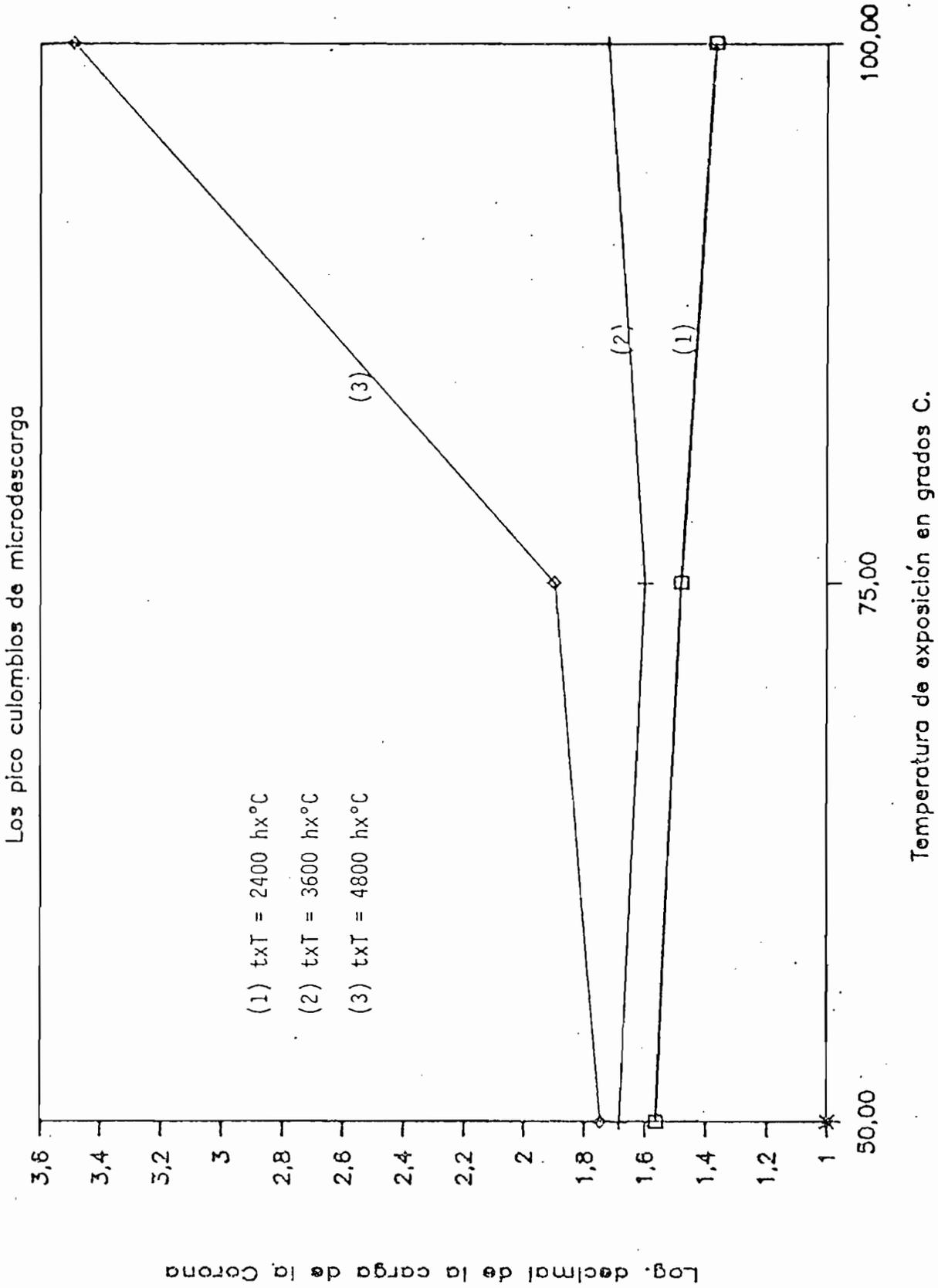


Fig.5.9 Variación comparativa de P.coul.



Finalmente en busca de establecer cual de los métodos de evaluación es el más sensible, se realizan gráficos comparativos de las respuestas obtenidas, mostrados en las figuras 5.8. y 5.9. de los mismos que se puede concluir que la evaluación de microdescargas es un método muy sensible ya que se puede detectar inclusive variaciones que indican un mejoramiento del material para cortos periodos de exposición a diferentes temperaturas, lo cual no se detecta en la variación de la tangente de pérdidas.

Adicionalmente se puede señalar que el evaluar envejecimiento mediante la detección de microdescargas es válido para cualquier temperatura y para cualquier tiempo de exposición debido a su sensibilidad. No así con la tangente de pérdidas dieléctricas que presenta una resolución confiable para largos periodos de exposición y temperaturas relativamente grandes, como se puede observar de la similitud entre las curvas correspondientes a $t \times T = 4800$ ($h^{\circ}C$). Figuras 5.8. y 5.9.

En base a estos resultados y tomando en cuenta algunos limitantes físicos adicionales se procede a establecer la vida esperada para el material, debiendo acotar que esto es meramente ilustrativo ya que en una aplicación concreta se deberán hacer muchas pruebas adicionales a diferentes temperaturas y tiempos.

5.3.1.2. Calibración del modelo del envejecimiento térmico

Para calibrar el modelo de envejecimiento térmico dado por: (12)

$$L_t = L_0 \cdot \exp^{-E_a / \Delta T}$$

Es necesario establecer algunas premisas que hagan valido al mismo, las mismas que son:

1. La constante E_a que es la relación de la energía de activación del material respecto de la constante de Boltzman debe tener un valor tal que concuerde con la condición de aislante del mismo.

Para tener un parámetro de comparación se puede recordar que en los semiconductores puros la energía que separa la banda de conducción de la de balencia es del orden de 1 a 2 eV y en materiales como el Tungsteno y el Torio se tienen funciones de trabajo de 4.5 eV y 2.6 eV respectivamente, estos valores están dados un material cuya configuración molecular es cristalina, no así con el p.v.c., que es un material caracterizado como amorfo, lo cual hace variar el valor de esta energía.

Pero será importante analizar las condiciones de operación del mencionado material, ya que si se somete al mismo a un esfuerzo debido a campo eléctrico por ejemplo esta energía se ve reducida debido a la interacción entre la barrera de energía intrínseca del material y la energía que se entrega con el campo eléctrico, adicionalmente la característica de los polímeros de tener enlaces polares, podría permitir que el comportamiento electrónico del material se asemeje al de los semiconductores.

2. Por lo tanto el criterio de falla o vida del material para una de

terminada temperatura deberá ser tomado a base de los datos obtenidos de la variación de las microdescargas o de la tangente de pérdidas.

Así se ha encontrado que la vida del material tiene íntima relación con las microdescargas, lo cual implica que de su variación se puede sacar un criterio que permita evaluar el tiempo de vida,

3. La comparación con resultados obtenidos en investigaciones en este campo son de gran ayuda, puesto que si bien no se trata del mismo material, sin embargo da una luz en el propósito que interesa.

Así por ejemplo para el poliéster se ha encontrado que la vida del mismo para algunas temperaturas es: a 165°C una vida de 1050 horas y a 200°C un valor de 180 horas (WECHSLER R., IEEE, Power Meeting, New York, 1964, pág. 21).

Ahora bien de los resultados obtenidos que se presentan en el numeral anterior y considerando lo anotado se puede preveer los siguientes tiempos de vida para el material.

Se ha anotado que el p.v.c. no se puede exponer a temperaturas superiores a los 155°C por que se descompone, por tanto al someter la muestra a 100°C por un espacio considerable de tiempo (48 horas, resultados más críticos), se nota que el material se ha degradado tanto visual como cuantitativamente en gran medida, (figura 5.5) lo cual hace pensar que en estas condiciones su vida será muy corta, pudiendo por tanto tener un valor de una 180 a 200 horas.

La temperatura de 75°C es una temperatura de gran connotación en el

comportamiento de los polímeros ya que un tiempo largo de operación en estas condiciones acarrea una alteración del mismo por fenómenos de post t despolimerización, por lo expuesto y en base a los resultados presentados antes se puede decir que el material tendrá una vida de 1800 a 2000 horas.

Adicionalmente el p.v.c. es un material que se degrada incluso con la influencia de la temperatura ambiente (*) pero en forma lenta. Si la temperatura por tanto está cercana a este valor como es el caso de 50°C, la vida por tanto será relativamente larga, lo cual se comprueba de los resultados obtenidos (Fig. 5.3) y por la observación de las muestras, por lo tanto en esta condición se puede considerar una vida de 12.000 a 14.000 horas.

Establecida la vida del material para las temperaturas mencionadas, el paso siguiente es la calibración del modelo por regresión (26).

La ecuación de regresión utilizada es:

$$Y = a + bX \quad (5.22)$$

Donde: $Y = \text{Log} (L_t)$ $b = - (\text{Log } e) E_a$
 $a = \text{Log} (L_0)$ $X = \Delta T$ con T en °K

Para evaluar las constantes a y b se utiliza el principio de ajuste por mínimos cuadrados siendo (26):

$$b = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (5.23)$$

(*) Anderson J. C., Leaver R. D., Ciencia de los materiales
 Alexander J. M., Rawlings R. D., Editorial Limusa, México, 1978.

$$a = \frac{\Sigma Y - b \Sigma X}{N} \quad (5.24)$$

Donde: N = número de puntos considerados.

Los cálculos realizados se presentan en la Tabla 5.3.

TABLA 5.3.

TRATAMIENTO MATEMATICO

N = 6

Temperatura °C	X = ΔT (%/K) $\times 10^{-4}$	X ² = ΔT^2 (1/°K) $\times 10^{-7}$	Lt (h)	Y = Log Lt	X.Y
50	3.40451	1.15906	14.000	4.14613	14.11553
50	3.40451	1.15906	12.000	4.07918	13.88761
75	5.62863	3.16815	2.000	3.30103	18.32272
75	5.62863	3.16815	1.800	3.25527	18.58027
100	7.55461	5.70713	200	2.30103	17.38338
100	7.55461	5.70713	180	2.2552	17.03770
	33.17550	20.06868		19.33791	98.62397

De donde $b = -4911.37 \text{ } |^{\circ}\text{K}|$

$a = 5.88$

Por lo tanto $Ea = 11308.85 \text{ } |^{\circ}\text{K}|$

$L_0 = 764384.29 \text{ } |\text{horas}|$

Lo cual hace que el modelo calibrado sea:

$$L_t = 764384.29 \exp^{-11308.85 \Delta T}$$

La gráfica de este modelo se presenta en la figura 5.10.

Como se anotó al inicio de este literal, el factor de comprobación es la energía de activación, la misma que calculada a partir de E_a es:

$$E_a = 0.99 \text{ eV}$$

Lo cual indica que el material tiene el comportamiento comparable al esperado.

5.3.2. Prueba de envejecimiento combinado

Esta prueba se realiza únicamente con el objeto de probar la bondad del equipo para trabajar con alto voltaje y temperatura, puesto que ésta es una condición de diseño.

La prueba se realiza utilizando una muestra de polivinil 0.40 de las mismas dimensiones que los utilizados en las pruebas de envejecimiento térmico.

Los resultados obtenidos de esta prueba se presentan en la Tabla 5.4 siendo las condiciones de prueba: Temperatura 75°C, voltaje 2.5 KV, tiempo 24 horas.

Fig.5.10 CURVA DE VIDA DEL PVC040

$$Lt=764384,29 \exp(-11308,85 \cdot Dt)$$

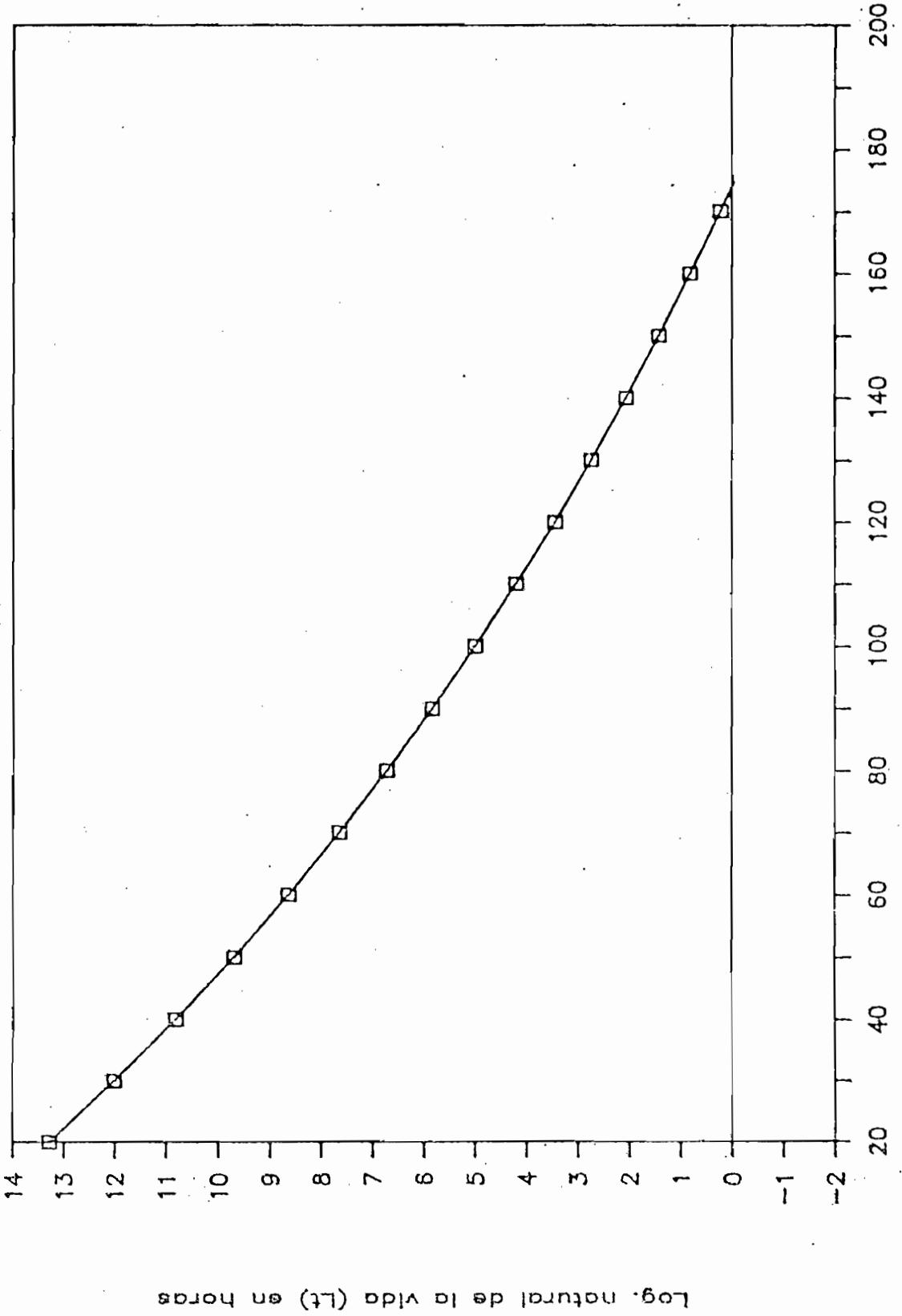


TABLA 5.4.

PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO COMBINADO

Voltaje enveje- cimiento (KV)	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)	Voltaje (KV)	Carga de los pulsos de corona (Pc)	Tangente de pérdidas (%)
2.5	75	24	1.0	2200	11.073
			1.5	10000	(*)
			2.0	10000	-
			2.5	10000	-

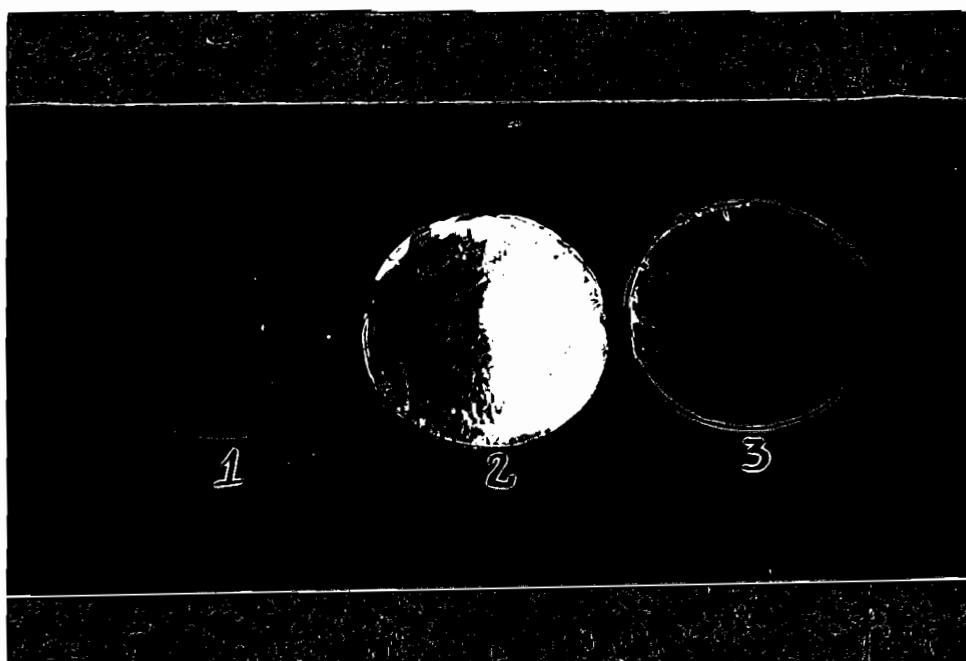
(*) La tangente de pérdidas se evalúa sólo para 1 KV.

Si se comparan estos resultados con los presentados en el Apéndice G, se observa que al aplicar alto voltaje a más de la temperatura, degrada al material en forma mucho más severa y más rápida que la temperatura solamente, haciendo que desde el punto de vista de las microdescargas el material presente pulsos con carga mayor que los encontrados para muestras sometidas a 100°C por 48 horas.

El valor de tangente de pérdidas medido 11.073% indica que el material deja de servir como aislante ya que para ser considerado como tal la tangente de pérdidas no puede ser mayor al 10%. (25).

Por lo expuesto se puede concluir diciendo que el hacer estudios de envejecimiento combinado, que es una condición más real para un material aislante, puede llevar a establecer valores de vida mucho meno

res que los obtenidos al hacer estudios de envejecimiento simples.



- (1) Muestra sin envejecer.
- (2) Muestra envejecida a 75 °C .
- (3) Muestra envejecida a 100 °C.

Fotografía 11. Estado final de las muestras envejecidas.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El análisis de los fenómenos de transferencia de calor y el modelo matemático planteado, permitió hacer el diseño térmico del equipo en forma tal que al construirse se satisficieron los requerimientos planteados.
- El haber estudiado minuciosamente los problemas de campo eléctrico que se presentaron en el estudio, permitió garantizar una operación con hasta 30 KV y tener un nivel libre de corona de 12.5 KV, lo cual tiene importancia ya que el bushing utilizado para ingresar con el alta tensión esta diseñado para que en condiciones normales se lo instale en sistema de hasta 7,96 KV, necesitando adicionalmente estar su parte baja sumergida en aceite.
- Diseñar y construir el control de temperatura implica el análisis de todas las fuentes de error y aún más el blindar al equipo para evitar la influencia del ruido, lo cual permite que el control opere hasta 300°C con pasos discretos de 25°C y con un error de $\pm 2^\circ\text{C}$.
- Hay que resaltar el hecho que los componentes utilizados se los encuentra en el mercado nacional, pero existe el problema del elevado costo de muchos de ellos, lo cual repercute en el costo del equipo, sería conveniente que en las universidades se tenga una dependencia que permita adquirir los componentes necesarios a menor precio y así dar un aliciente al desarrollo de tecnologías.

- El sistema de aislamiento térmico aparentemente es muy costoso ya que las pérdidas son bajas (3.68%) pero esto no es rigurosamente válido si se piensa que por un lado se requiere una elevada precisión del equipo, lo cual será mejor mientras menos influencia del medio ambiente se tenga, mejor aislado, y por otro si se evalúa el costo de esta energía perdida en períodos largos de funcionamiento, este puede ser comparable al aislamiento en períodos cortos de tiempo si se permitieran más pérdidas.

- Será importante si en el futuro se tiene la capacidad de construir aisladores de cerámica, diseñar y construir un bushing a medida de los requerimientos de la mufla, lo cual puede hacer que el equipo mejore aún más sus características en lo que a voltaje libre de córona se refiere.

- Al realizar las pruebas de aplicación se ha encontrado que un mecanismo válido para evaluar el envejecimiento es la detección de microdescargas, ya que resulta ser un sistema muy sensible a las variaciones producidas en el material. Esto sugiere que en lo posterior se realicen investigaciones tendientes a obtener patrones de envejecimiento para diferentes materiales utilizados en la industria eléctrica y en base a ellos plantear un modelo de envejecimiento que permita evaluar la vida de un equipo en conjunto, como por ejemplo un transformador.

- Si se hacen pruebas de envejecimiento será conveniente hacerlas en forma combinada ya que un material aislante al estar instalado en un equipo eléctrico estará sometido a esfuerzos térmicos, de campo

eléctrico e incluso químicos. Esto es importante ya que el resultado de aplicar el envejecimiento combinado al polivinil 040 arrojó valores que muestran una variación de sus características frente al envejecimiento térmico.

- Finalmente se deberá recordar al operar con el equipo que su vida dependerá de la forma como se manipule al mismo, recomendando atenderse a las instrucciones dadas en el manual de operación.

APENDICE A

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL COMPUTADOR

Los siguientes listados presentan la forma como se modeló el sistema en el computador, así como los resultados obtenidos en el mismo, luego de utilizar el programa "DISEÑO DE AISLADORES", del Ing. René Co^orrea.

Se acompaña en los listados una descripción de las variables en las cuales se identifica el tipo de sistema simulado. En este caso se simuló un aislador 52 - 4 mitad: dándose una relación de dimensiones entre el aislador y los espacios de la matriz de 0.012 m, lo cual representa que la matriz total tiene una dimensión de 39.6 cm.

Una vez analizados los resultados se desprenden los siguientes criterios:

1. Como la ampliación de zonas peligrosas lo indica, existen elevadas concentraciones de campo (12 kV/cm) entre las coordenadas I(29 a 32); J(28 a 32) que corresponden al área de contacto entre el bushing y la placa de tierra. Por lo tanto en esta zona se debe ampliar el estudio con un sistema de mayor resolución que permita dar con la solución.
2. Al observar la lámina A-11 se encuentra que las potenciales se han distribuido a partir de la 6ta. columna por tanto la matriz utilizada es muy grande, lo cual permite reducir la dimensión de

cada espacio a un valor de 0.0091 m. Con lo cual la dimensión total de la matriz será de 30 cm. Al variar estas dimensiones no se alterarían los resultados sino únicamente hay que afectar los valores obtenidos por un factor de 1.32.

Se afirma que esto no altera los resultados ya que el programa calcula los potenciales por el método de las diferencias finitas esto es:

$$V_0 = \frac{1}{4} (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)^{(*)} \quad (\text{A.1})$$

donde:

V = voltaje que se busca.

V_i = voltaje del punto i $i = 1, 2, 3, 4$ equidistantes

Pero este cambio lleva a establecer un nuevo valor de potencial peligroso que será de (16 kV/cm) en la zona de unión del bushing con la cámara.

Los resultados encontrados se presentan en este apéndice en las láminas siguientes.

(*) Correa René, "DISEÑO DE AISLADORES", Tesis, E.P.N., 1982.

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD

CURSO DE GRADO

RESEÑALADO POR: RENE CORREA

PROGRAMA DIGITAL PARA ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO ELECTRICICO DE LOS AISLADORES

SE RESUELVE LA ECUACION DE LAPLACE POR EL METODO DE DIFERENCIAS FINITAS

ING. PAUL AYCGRA G.

DESCRIPCION DE VARIABLES

MAX	>	DIMENSIONA LA MATRIZ DONDE SE SIMULA EL AISLADOR A ANALIZARSE
YCLT	>	ES EL VOLTAJE PARA QUE FUE DISEÑADO EL AISLADOR (VOLTIOS)
INDI	>	TIPO DE AISLADOR ANALIZADO
INDU	>	FORMA DEL AREA CONTAMINADA ANALIZADA
UAP	>	PERMITIVIDAD DEL MATERIAL ANALIZADO (ADIMENSIONAL)
UPV	>	PERMITIVIDAD DE CAPA DE VIDRIO (ADIMENSIONAL)
UCI	>	PERMITIVIDAD DE LOS MATERIALES CONTAMINANTES (ADIMENSIONAL)
CLND	>	CONDUCTIVIDAD DEL AISLADOR (MHOS/METRO)
CVVDC	>	CONDUCTIVIDAD DEL CONTAMINANTE (MHOS/METRO)
DELL	>	RELACION DE ACELERACION
ALFA	>	FACTOR DE ACELERACION
IX	>	COORDENADA X DE INICIO DE AREA CONTAMINADA ANALIZADA
JY	>	COORDENADA Y DE INICIO DE AREA CONTAMINADA ANALIZADA
I92	>	COORDENADA X DE FIN DE AREA CONTAMINADA ANALIZADA
J92	>	COORDENADA Y DE FIN DE AREA CONTAMINADA ANALIZADA
I2,J2	>	BARREN LA MATRIZ BUSCANDO AREAS PELIGROSAS (INDICES)
NPV	>	INDICA SI SE ESTA EL AISLADOR COMPLETO O UN AREA PELIGROSA
U	>	ARREGLO QUE ALMACENA LOS DATOS INICIALES DE POTENCIALES DEL AISLADOR
V	>	ARREGLO QUE ALMACENA LOS DATOS FINALES DE POTENCIALES DEL AISLADOR
Z	>	VALOR DE DIFERENCIA DE POTENCIAL CONSIDERADO PELIGROSO (VOLTIOS-PORCENTAJES)
DIB	>	ARREGLO QUE ALMACENA LOS CARACTERES EQUIPOTENCIALES DEL AISLADOR
E	>	ARREGLO QUE ALMACENA LOS DATOS DE CAMPO ELECTRICICO DEL AISLADOR
P	>	ARREGLO QUE ALMACENA LOS DATOS DE DENSIDAD DE CORRIENTE DEL AISLADOR
ITERAT	>	EN EL AISLADOR
CCNV	>	INDICA EL NUMERO DE ITERACIONES QUE SE EMPLEARON HASTA LLEGAR A LA SOLUCION
NNIF	>	FACTOR DE CONVERGENCIA
NNIF	>	NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES
FN	>	FRECUENCIA NOMINAL (HZ)
FP	>	FRECUENCIA PARA EL ANALISIS DEL AREA CONTAMINADA (HZ)

A I S L A D O R D E S U S P E N S I O N C L A S E 52-4 MISAD

D A T O S D E E N T R A D A

MAX = 33 VOLT = 1000.00 ALFA = 1.532 DELL = 0.01200000
INDI = 8 Z = 40.00 UAB = 3.000 CONO = 0.00000020
INDJ = 4 CONDC = 0.00010 UPV = 5.0000 UCT = 100J.0000
IX = 12 JY = 23 CONV = 0.0010 MHIT = 70
FN = 50. FP = 3000.

EXISTE UNA AREA PELIGROSA EN I= 29 Y EN J= 30

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES= 12

68	72	75	79	83	87	91	95	100
66	70	74	78	82	86	91	95	100
64	68	72	76	81	85	90	95	100
62	66	71	75	80	84	89	94	100
61	65	69	73	78	83	89	94	100
58	62	67	72	77	82	88	94	100
55	60	65	70	75	81	87	93	100
52	57	62	67	73	79	86	93	100
49	54	59	65	70	77	85	92	100

GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 51.48 B = 55.99 C = 60.92 D = 65.93
 E = 70.40 F = 74.20 G = 78.72 H = 84.32
 W = 87.24 S = 93.07 R = 99.99

BOLETA TECNICA

E	F	G	H	Q	S	R				
D	E	F	G	Q	S	R				
D	E	F	G	H	S	R				
C	D	E	F	G	H	Q	S	R		
B	C	D	E	F	G	H	Q	S	R	
A	B	C	D	E	F	G	H	Q	S	R

EXISTE UNA AREA PELIGROSA EN I= 30 Y EN J = 30

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES= 16

61	65	69	74	78	83	89	94	100
58	62	67	72	77	82	88	94	100
55	60	64	69	75	81	87	93	100
52	57	62	67	73	79	86	93	100
49	53	58	64	70	77	84	92	100
44	49	55	61	67	75	83	91	100
40	45	51	57	64	72	81	90	100
35	40	46	52	59	68	79	89	100
30	35	41	47	52	64	76	88	100

QUITO

GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 34.85 B = 41.55 C = 46.89 D = 52.63
 E = 59.30 F = 65.01 G = 70.38 H = 77.07
 W = 82.76 S = 89.27 R = 99.99

E	F	G	H	Q	S	R				
E	F	G	H	Q	S	R				
D	E	F	G	H	Q	S	R			
C	D	E	F	G	H	Q	S	R		
B	C	D	E	F	G	H	Q	S	R	
A	B	C	D	E	F	G	H	Q	S	R

EXISTE UNA AREA PELIGROSA EN I= 30 Y EN J= 31

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES= 1

*	78	83	89	94	100	100	100	100	100	100	*
*	76	82	88	92	97	99	99	100	100	100	*
*	74	80	86	91	95	98	100	100	100	100	*
*	72	78	85	91	96	99	99	100	100	100	*
*	70	76	83	91	100	99	100	100	100	100	*
*	65	73	82	89	95	98	99	100	100	100	*
*	61	70	79	87	93	98	100	100	100	100	*
*	57	67	77	86	94	98	99	100	100	100	*
*	52	64	76	88	100	100	100	100	100	100	*

GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 54.89 B = 59.23 C = 64.06 D = 67.79
 E = 71.93 F = 76.74 G = 80.29 H = 85.82
 Q = 86.47 S = 94.26 R = 100.00

*	U	Q	S	R	R	R	R	R	R	*
*	F	H	S	S	R	R	R	R	R	*
*	E	G	H	S	R	R	R	R	R	*
*	E	F		R	R	R	R	R	R	*
*		E	Q	S	R	R	R	R	R	*
*		D	F	S	R	R	R	R	R	*
*		C	F	R	R	R	R	R	R	*

EXISTE UNA AREA PELIGROSA EN I= 34 Y EN J= 31

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES= 1

*	U	U	0	0	0	16	32	48	64	*
*	U	U	0	1	4	14	24	36	48	*
*	U	U	0	2	5	10	18	25	31	*
*	U	U	0	1	3	7	11	14	15	*
*	U	U	0	0	0	3	5	5	0	*
*	U	U	0	0	0	1	2	3	0	*
*	U	U	0	0	0	1	2	2	1	*
*	U	U	0	0	0	1	2	3	2	*
*	U	U	0	0	0	1	2	3	4	*

GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 3.08 B = 8.03 C = 15.51 D = 20.74
 E = 26.09 F = 32.79 G = 38.67 H = 45.73
 Q = 47.25 S = 58.41 R = 62.25

*				C	F	Q	R	*
*		A	A	C	E	C	F	*
*		A	A	B	D	C	F	*
*				A	A	A	A	*
*				A	A	A	A	*
*				A	A	A	A	*
*				A	A	A	A	*

----- EXISTE UNA AREA PELIGROSA EN I = 31 Y EN J = 29 -----

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES = 14

*	36	39	43	46	49	54	59	65	70	*
*	32	35	38	42	45	50	55	60	65	*
*	28	31	34	37	41	45	50	55	61	*
*	24	26	29	32	36	40	45	50	57	*
*	20	22	24	27	30	34	38	44	52	*
*	15	16	18	21	23	27	31	36	42	*
*	10	11	12	14	16	19	23	26	31	*
*	5	5	6	7	8	11	14	17	20	*
*	0	0	0	0	0	2	5	7	10	*

GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 3.17 B = 9.36 C = 16.18 D = 21.45
 E = 29.90 F = 35.54 G = 42.14 H = 48.80
 W = 54.59 S = 61.35 R = 67.42

POLITECNICA

*	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*					
*	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*				
*	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*			
*	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*		
*	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*	
*	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*

EXISTE UNA AREA PELIGROSA EN I = 31 Y EN J = 30

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES = 16

*	49	54	59	65	70	77	85	92	100	*
*	44	50	55	61	67	75	83	91	100	*
*	40	45	51	57	64	72	81	90	100	*
*	35	40	45	52	59	68	78	88	100	*
*	30	34	39	46	52	61	71	81	100	*
*	25	27	33	39	47	57	67	78	100	*
*	15	19	24	31	40	52	67	83	100	*
*	7	11	15	20	28	43	61	80	100	*
*	0	2	5	7	10	32	55	77	100	*

QUITO

GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 5.84 B = 12.40 C = 22.25 D = 31.34
 E = 42.06 F = 50.94 G = 57.70 H = 68.36
 Q = 78.24 S = 85.22 R = 99.98

*	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*					
*	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*				
*	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*			
*	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*		
*	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*	
*	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	*

EXISTE UNA AREA PELIGROSA EN I = 31 Y EN J = 31

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES = 1

70	77	85	92	100	100	100	100	100	100
65	74	82	89	95	98	99	100	100	100
61	70	79	87	93	98	100	100	100	100
57	66	76	86	94	98	99	100	100	100
52	62	73	85	100	99	100	100	100	100
42	55	69	81	92	96	99	100	100	100
31	48	63	77	83	95	100	100	100	100
20	40	58	75	89	95	99	100	100	100
10	32	55	77	100	100	100	100	100	100

GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 14.09 B = 23.52 C = 32.73 D = 41.29
 E = 49.55 F = 56.07 G = 63.71 H = 71.04
 I = 77.41 S = 88.74 R = 99.99

ROMA GIGIA

L	L	S	R	R	R	R	R	R	R
C	H	S	R	R	R	R	R	R	R
F	G	S	R	R	R	R	R	R	R
U	H	R	R	R	R	R	R	R	R
C	E	Q	S	R	R	R	R	R	R
U	F	Q	S	R	R	R	R	R	R
C	F	Q	R	R	R	R	R	R	R

EXISTE UNA AREA PELIGROSA EN I = 32 Y EN J = 29

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES = 16

20	23	25	28	30	36	41	47	52	*
15	17	20	22	25	29	33	37	42	*
10	12	14	16	18	22	25	28	31	*
5	7	9	10	10	14	17	19	20	*
0	3	5	4	0	7	11	12	10	*
0	1	3	3	2	5	7	8	7	*
0	1	1	2	2	3	4	4	5	*
0	0	0	1	1	1	2	2	2	*
0	0	0	0	0	0	0	0	0	*

QUITO

GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 0.00 B = 5.61 C = 10.90 D = 17.01
 E = 20.83 F = 27.36 G = 31.05 H = 36.68
 Q = 42.25 S = 47.59 R = 52.74

E	F	F	G	H	Q	S	R	*
U	D	E	E	G	H	H	C	*
U	C	C	D	E	F	F	C	*
A	B	B	C	A	C	C	C	*
A	A	A	B	B	B	B	D	*
A	A	A	A	A	A	A	D	*
A	A	A	A	A	A	A	A	*

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES = 16

*	30	36	41	47	52	64	76	88	100	*
*	23	28	34	41	48	59	72	85	100	*
*	15	21	27	33	41	53	67	82	100	*
*	7	14	19	24	30	44	60	78	100	*
*	0	8	12	16	10	33	51	71	100	*
*	0	5	9	12	15	27	41	56	75	*
*	0	3	6	8	12	19	28	38	50	*
*	0	1	3	4	6	10	14	19	25	*
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*

GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 0.01 B = 13.24 C = 22.76 D = 29.19
 E = 40.38 F = 50.84 G = 58.86 H = 70.31
 I = 75.98 S = 85.34 R = 89.00

PROTECCION CIVICA

*	D	E	F	F	G	H	S	R	R	*
*	C	D	E	F	G	H	S	R	R	*
*	B	C	D	E	F	G	S	R	R	*
*	A	B	C	D	E	F	H	R	R	*
*	A	A	B	B	D	E	G	S	R	*
*	A	A	A	B	C	B	E	F	C	*
*	A	A	A	A	A	A	A	A	A	*

EXISTE UNA AREA PELIGROSA EN I = 32 Y EN J = 31

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES = 33

*	52	64	76	88	100	100	100	100	100	*
*	42	55	68	83	94	99	100	100	100	*
*	31	40	52	63	79	91	100	100	100	*
*	20	36	51	68	84	95	100	100	100	*
*	10	25	43	61	81	95	100	100	100	*
*	7	14	25	38	55	74	88	100	100	*
*	5	11	20	31	45	63	81	95	100	*
*	2	7	14	21	31	45	63	81	95	*
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*

QUITO

GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 14.07 B = ***** C = ***** D = *****
 E = ***** F = ***** G = ***** H = *****
 I = ***** S = ***** R = *****

*	A	A	A	A	A	A	A	A	A	*
*	A	A	A	A	A	A	A	A	A	*
*	A	A	A	A	A	A	A	A	A	*
*	A	A	A	A	A	B	B	C	C	*
*	A	A	A	A	B	D	E	F	F	*
*	A	A	A	A	C	F	G	H	R	*

EXISTE UNA AREA PELIGROSA EN I= 33 Y EN J= 30

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES= 16

U	2	5	7	10	32	55	77	100
U	2	5	9	15	28	43	59	75
U	2	4	8	13	22	31	41	50
U	1	3	5	8	14	20	24	25
U	1	2	2	0	7	10	9	0
U	0	1	1	1	4	5	4	0
U	0	0	1	1	2	2	1	0
U	0	0	0	0	1	1	0	0
U	0	0	0	0	0	0	0	0

GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 0.00 B = 11.11 C = 24.15 D = 31.62
 E = 42.94 F = 52.27 G = 59.34 H = 72.73
 U = 77.33 S = 90.91 R = 100.00

BOLETA TECNICA

A	A	B	B	D	F	Q	R
A	A	B	B	C	D	E	F
A	A	A	B	B	C	C	A
A	A	A	A	A	B	B	A
A	A	A	A	A	A	A	A
A	A	A	A	A	A	A	A
A	A	A	A	A	A	A	A
A	A	A	A	A	A	A	A

EXISTE UNA AREA PELIGROSA EN I= 33 Y EN J = 31

CAMPO DE DISTRIBUCION DE AREA PELIGROSA

NUMERO DE ITERACIONES= 16

10	32	55	77	100	100	100	100	100
7	24	41	56	68	73	75	75	73
5	17	23	38	45	50	51	50	47
2	10	17	22	24	29	31	28	21
U	5	9	9	0	13	15	11	4
U	3	5	5	3	6	7	3	4
U	1	2	3	2	3	2	0	4
U	0	1	1	1	0	0	1	4
U	0	0	0	0	1	2	3	4

QUITO

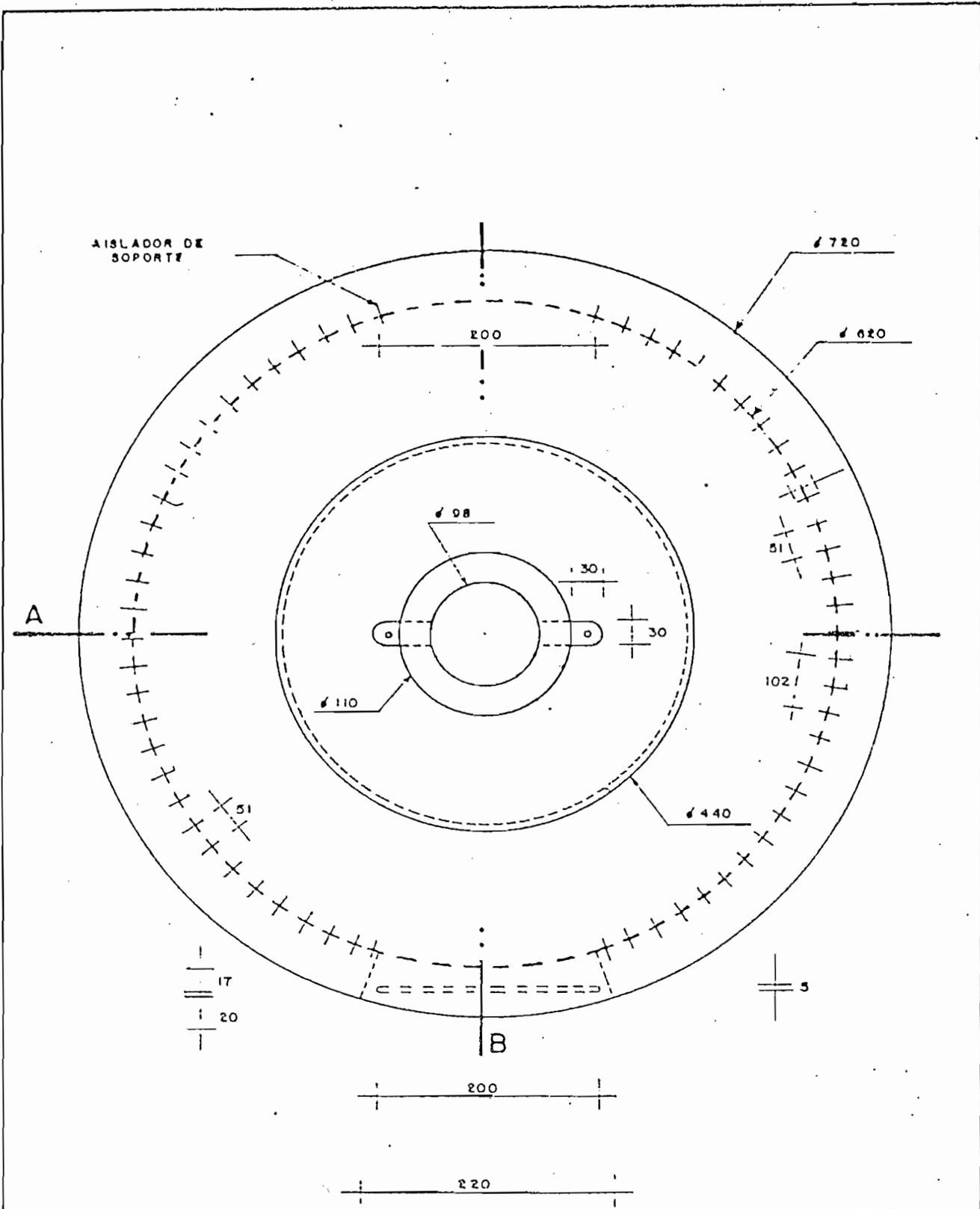
GRAFICACION DEL CAMPO DE DISTRIBUCION

A = 3.03 B = 12.49 C = 23.17 D = 30.04
 E = 43.13 F = 49.75 G = 57.89 H = 70.80
 U = 74.72 S = 90.91 R = 100.00

U	D	C	O	R	R	R	R
A	L	E	C	H	Q	Q	Q
A	D	D	E	F	F	F	F
A	B	B	C	C	D	D	C
A	A	A	A	A	B	B	A
A	A	A	A	A	A	A	A
A	A	A	A	A	A	A	A
A	A	A	A	A	A	A	A

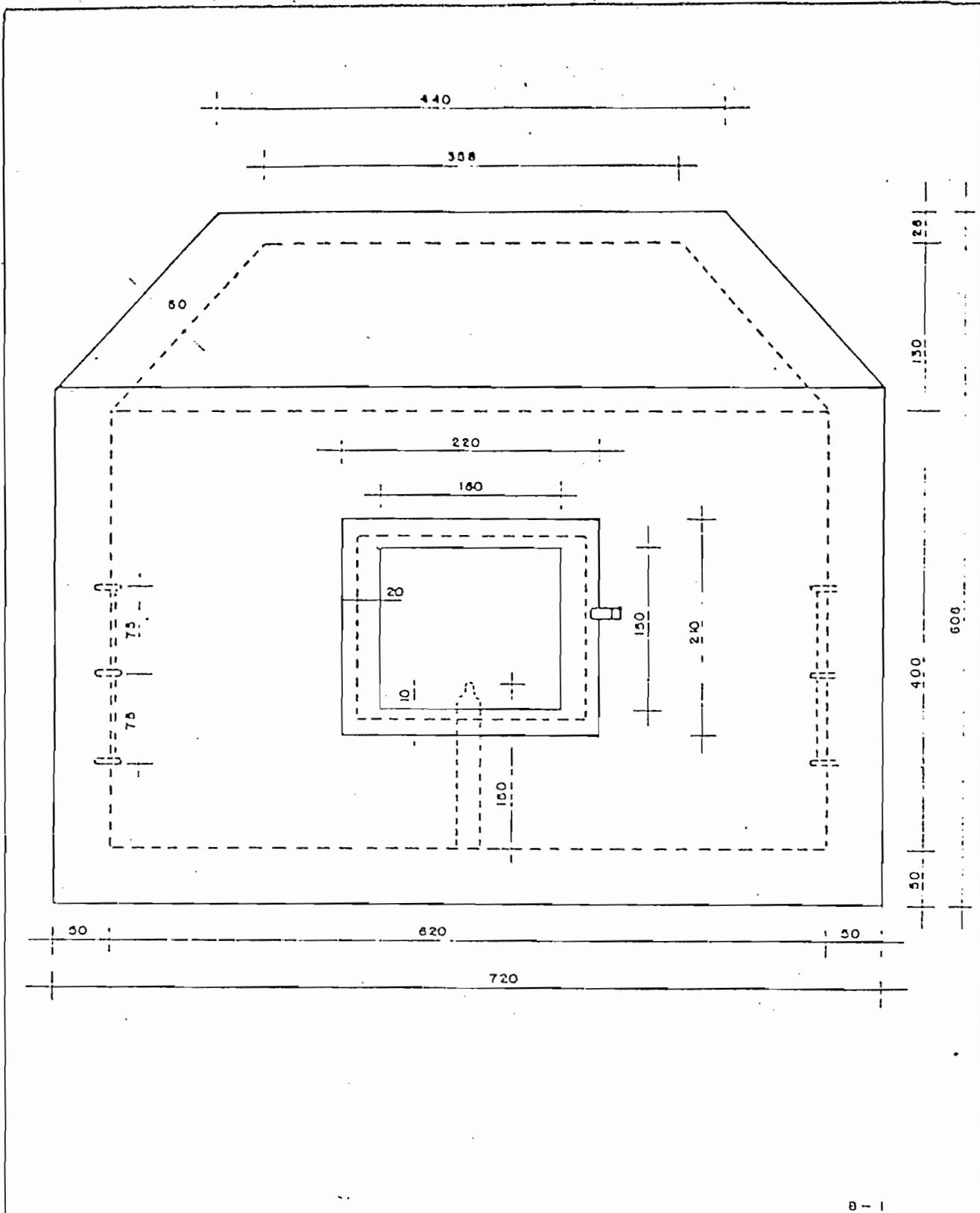
APENDICE B

PLANOS DE LA MUFLA



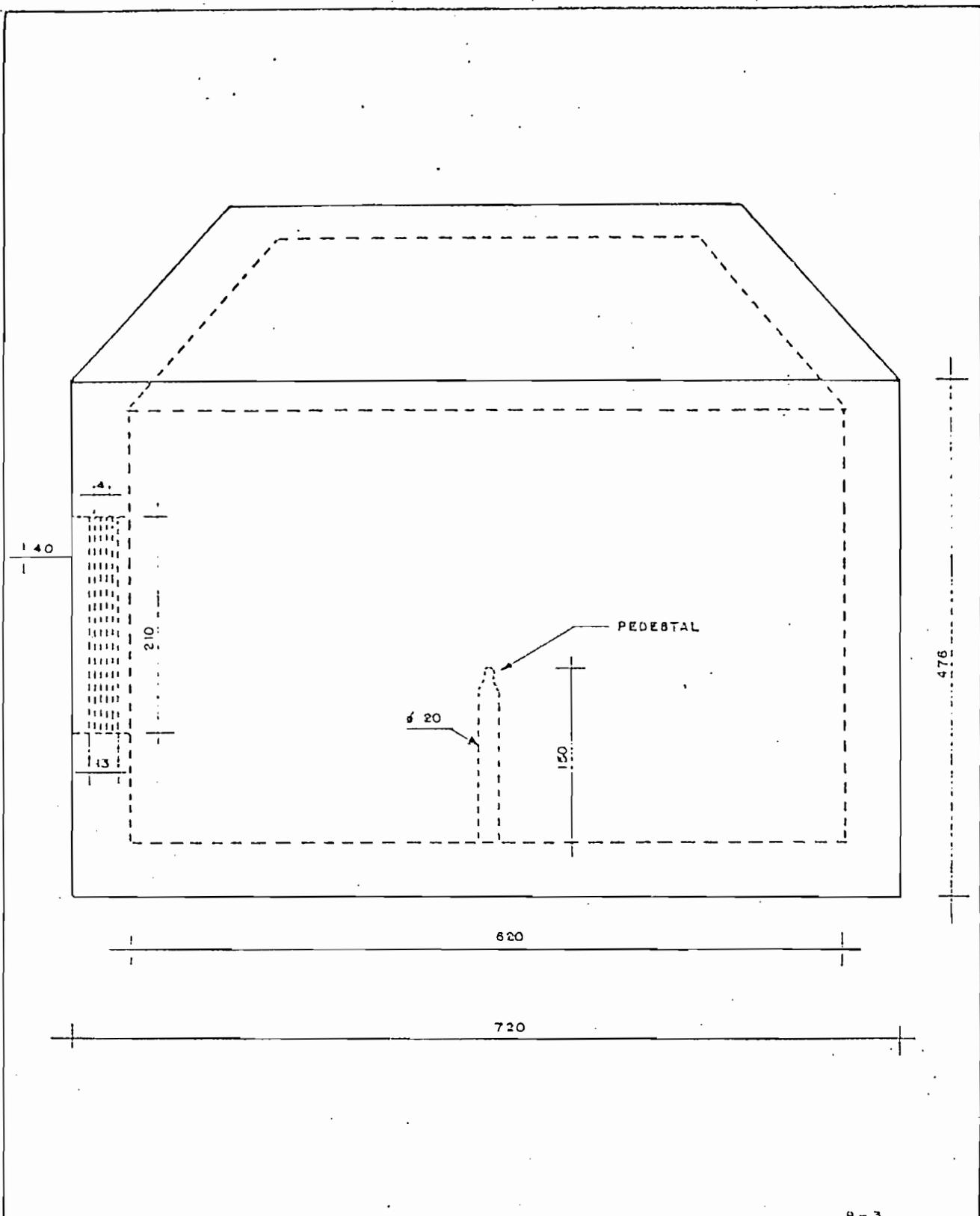
B-1

<p>ESCUELA POLITECNICA NACIONAL</p>		<p>FECHA:</p>	<p>REVISO: ING. PAUL AYORA</p>
<p>TESIS DE GRADO</p>		<p>DIBUJO: HECTOR FIALLO</p>	<p>APROBO:</p>
<p>VISTA SUPERIOR DE LA MUFLA</p>		<p>ESCALA: 1:5</p>	<p>LAMINA: 1/4</p>



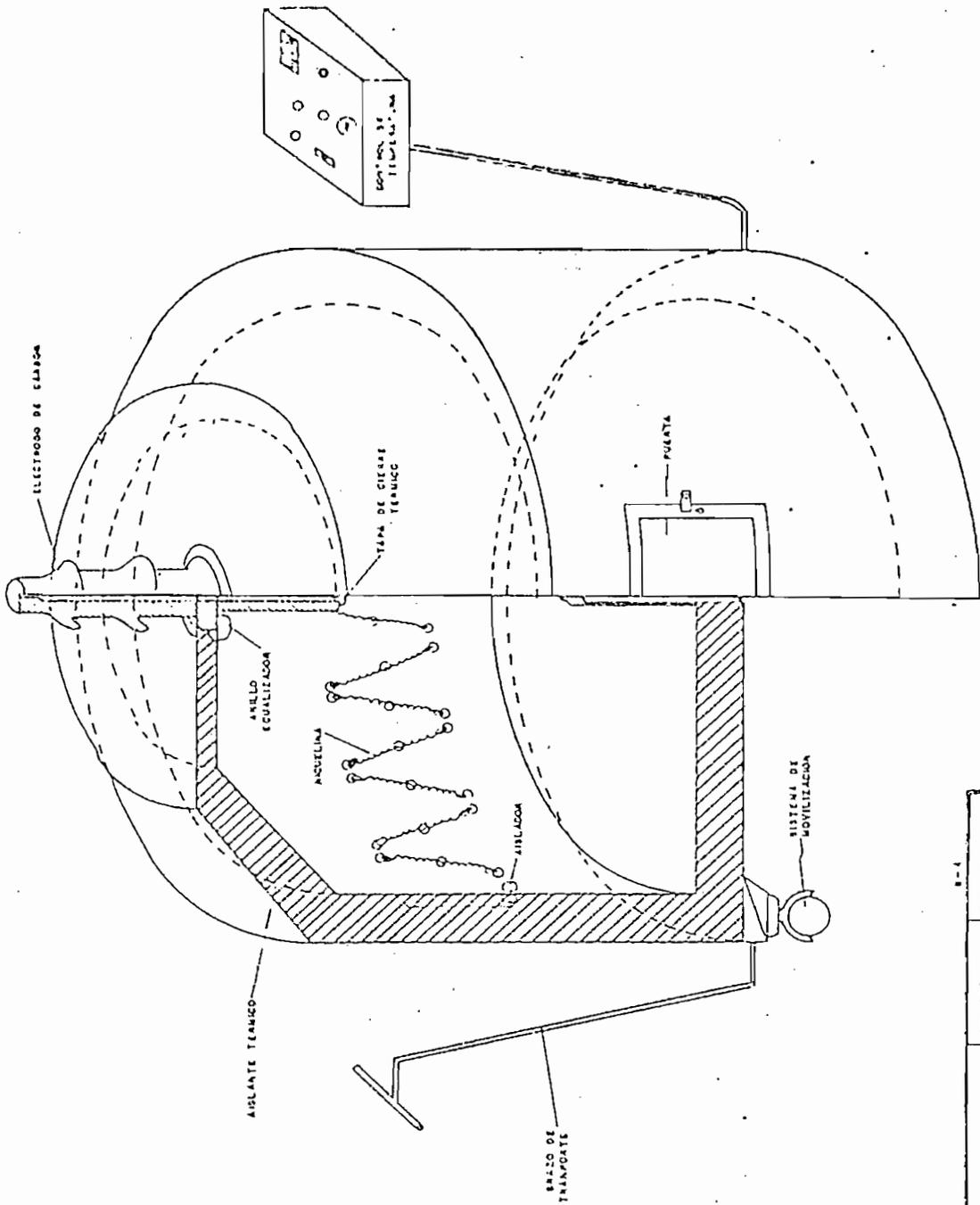
B - 1

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		FECHA:	REVISO: ING. PAUL AYORA
TESIS DE GRADO	VISTA FRONTAL DE LA MUFLA	DIBUJO: HECTOR FIALLO	APROBO:
		ESCALA: 1:5	LAMINA: 2/4



B-3

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		FECHA:	REVISO: ING. PAUL AYORA
TESIS DE GRADO		DIBUJO: HECTOR FIALLO	APROBO:
		ESCALA: 1:5	LAMINA: 3/4
VISTA LATERAL DE LA MUFLA			

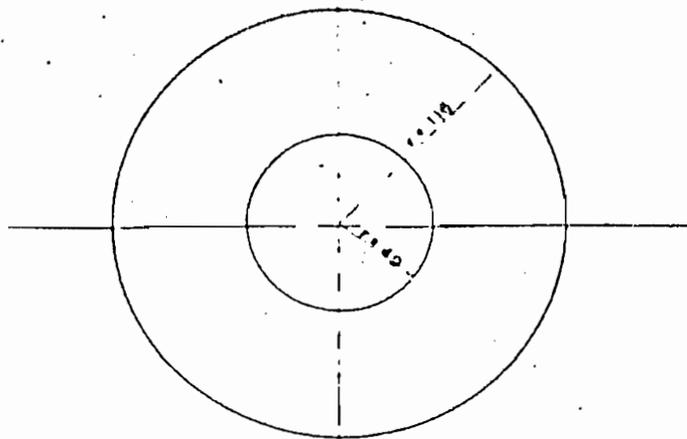


CORTE A-B

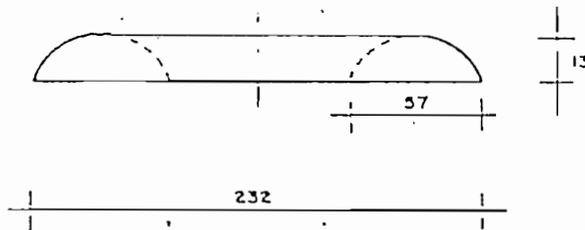
B-4

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	FECHA:	REVISO:
		IMP. 1-2-74
TESIS DE GRADO	DIBUJO:	APROBO:
	RECTOR: FIELLO	L. AMIN:
	ESCALA:	4/2
		1/3

UNIVERSIDAD
CUARTO DE CORTE

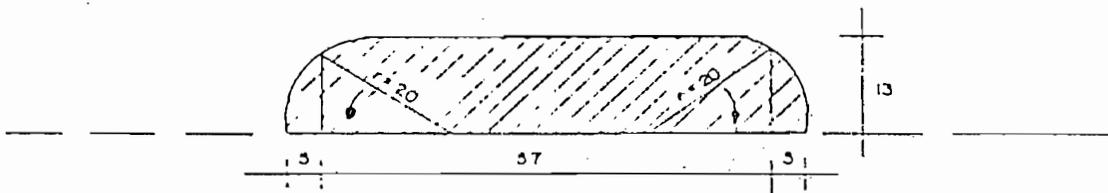


VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL

ESCALA 1:40

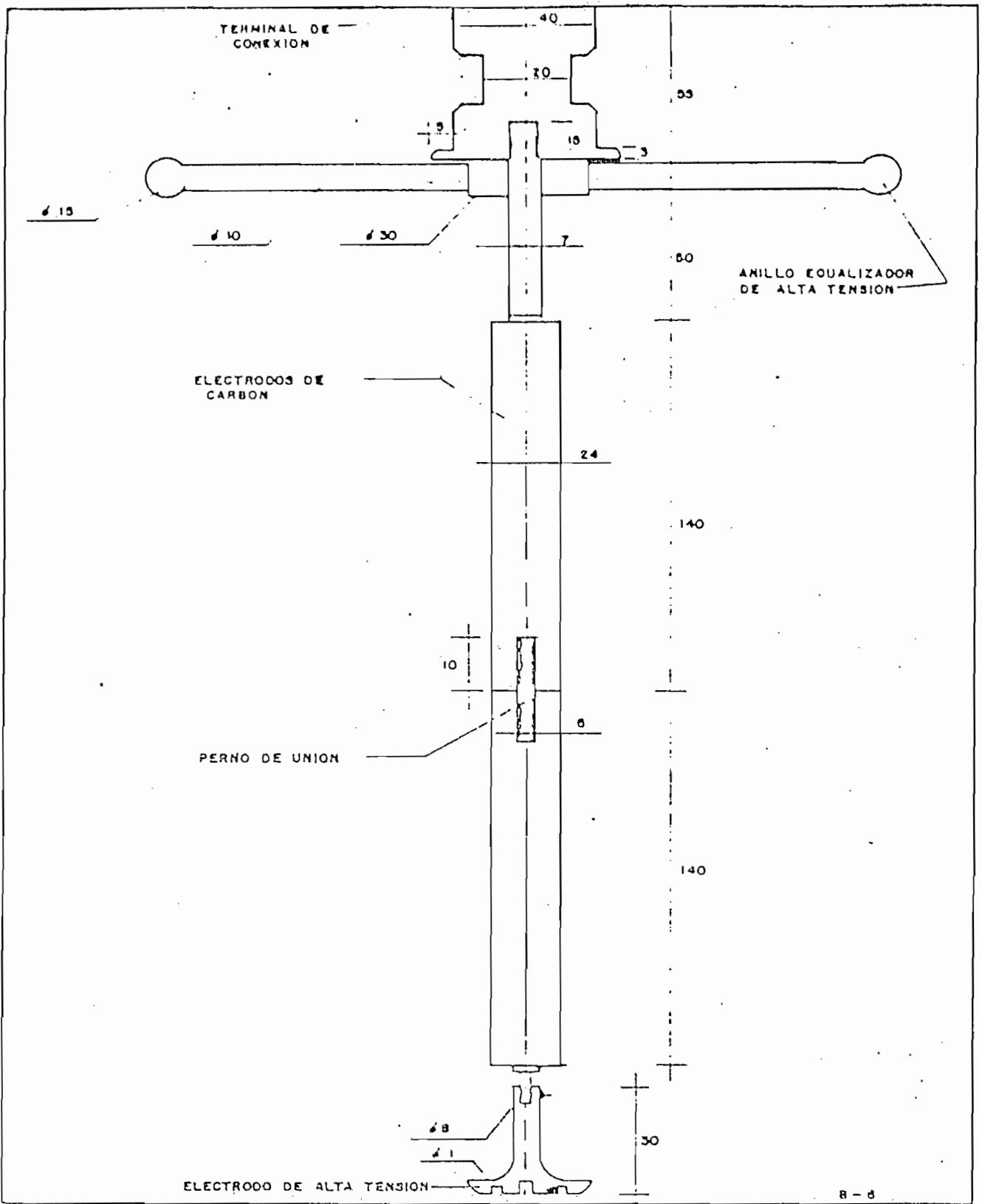


SECCION TRANSVERSAL

ESCALA 1:1

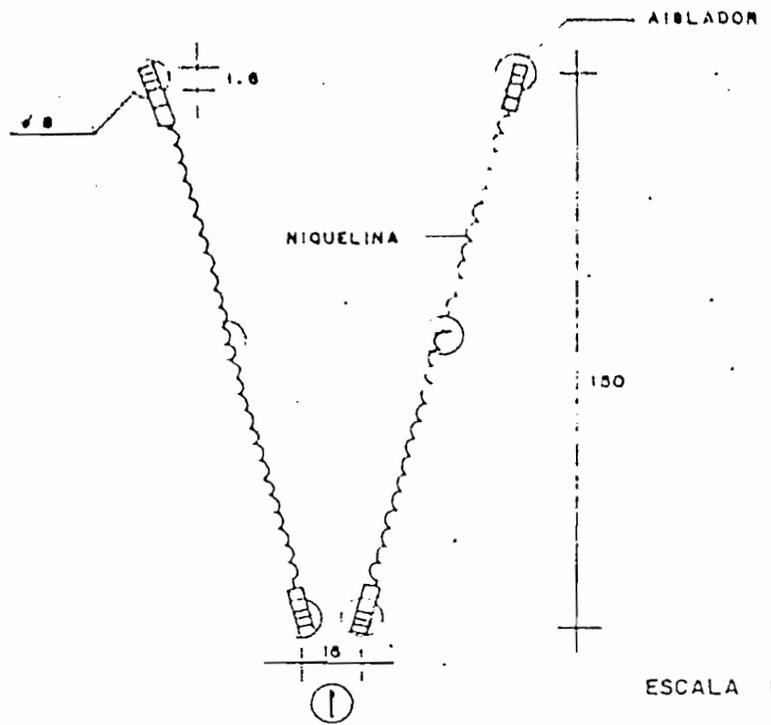
B-3

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		FECHA:	REVISO: ING. PAUL AYORA
ANILLO ECUALIZADOR DE TIERRA		DIBUJO: HECTOR FIALLO	APROBO:
		ESCALA:	LAMINA: 1/1
TESIS DE GRADO			

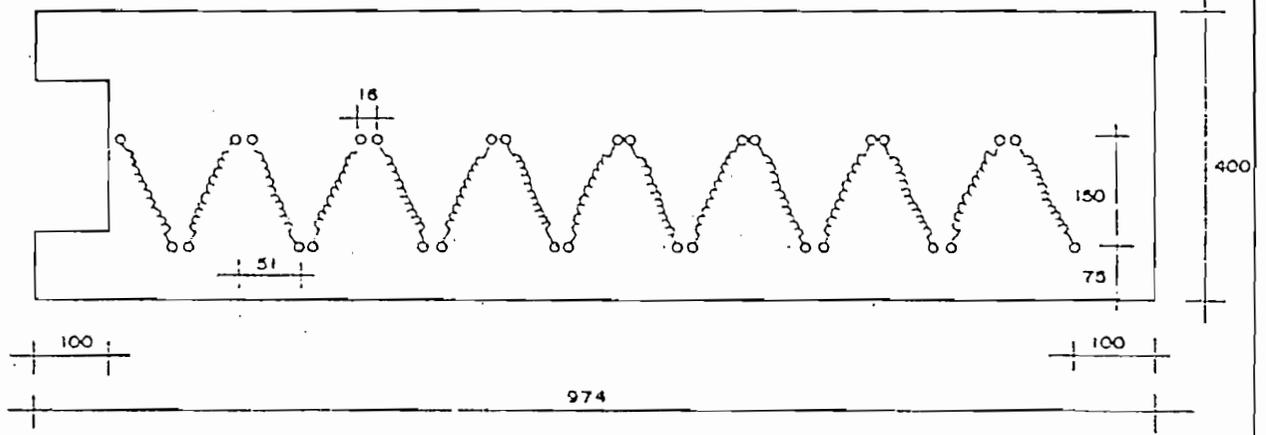


8-8

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		FECHA:	REVISO: ING. PAUL AYORA
TESIS DE GRADO		DIBUJO: HECTOR FIALLO	APROBO:
		SECCION TRANSVERSAL ELECTRODO DE ALTA TENSION	ESCALA: 1:2
			LAMINA: 1/1



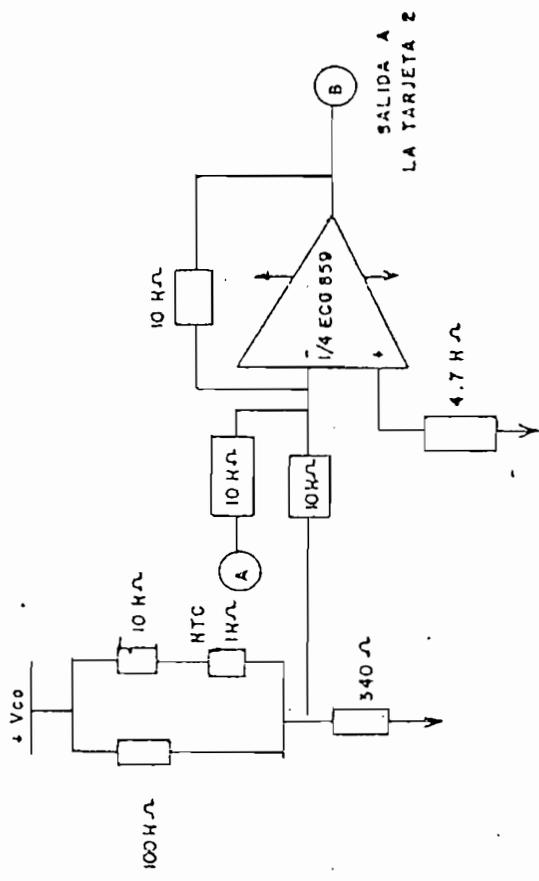
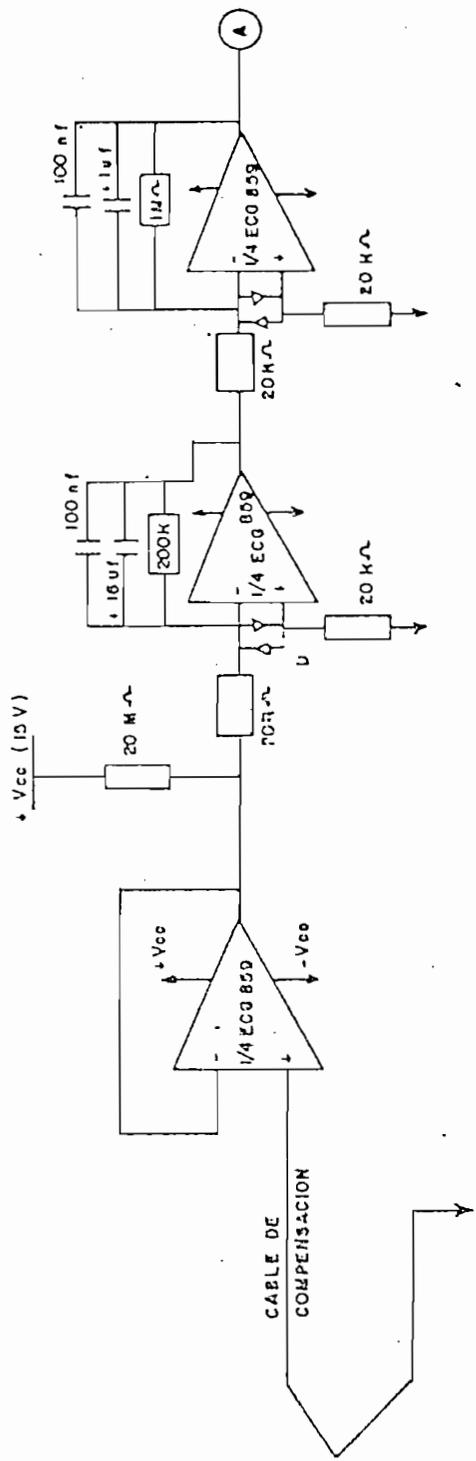
ESCALA 1:2



ESCALA 1:6.7

B-7

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		FECHA:	REVISO: ING. PAUL AYORA
TESIS DE GRADO	① CONEXION DE NIQUELINAS	DIBUJO: HECTOR FIALLO	APROBO:
	② DISPOSICION DE LAS NIQUELINAS EN CADA SEMICAMARA	ESCALA:	LAMINA: 1/1

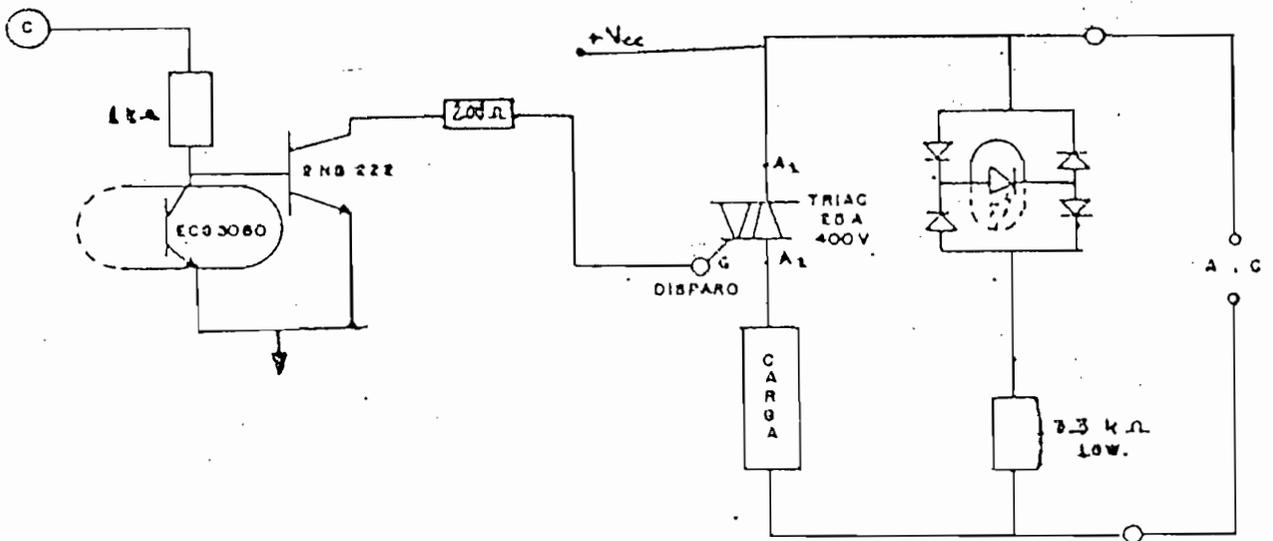


Notas

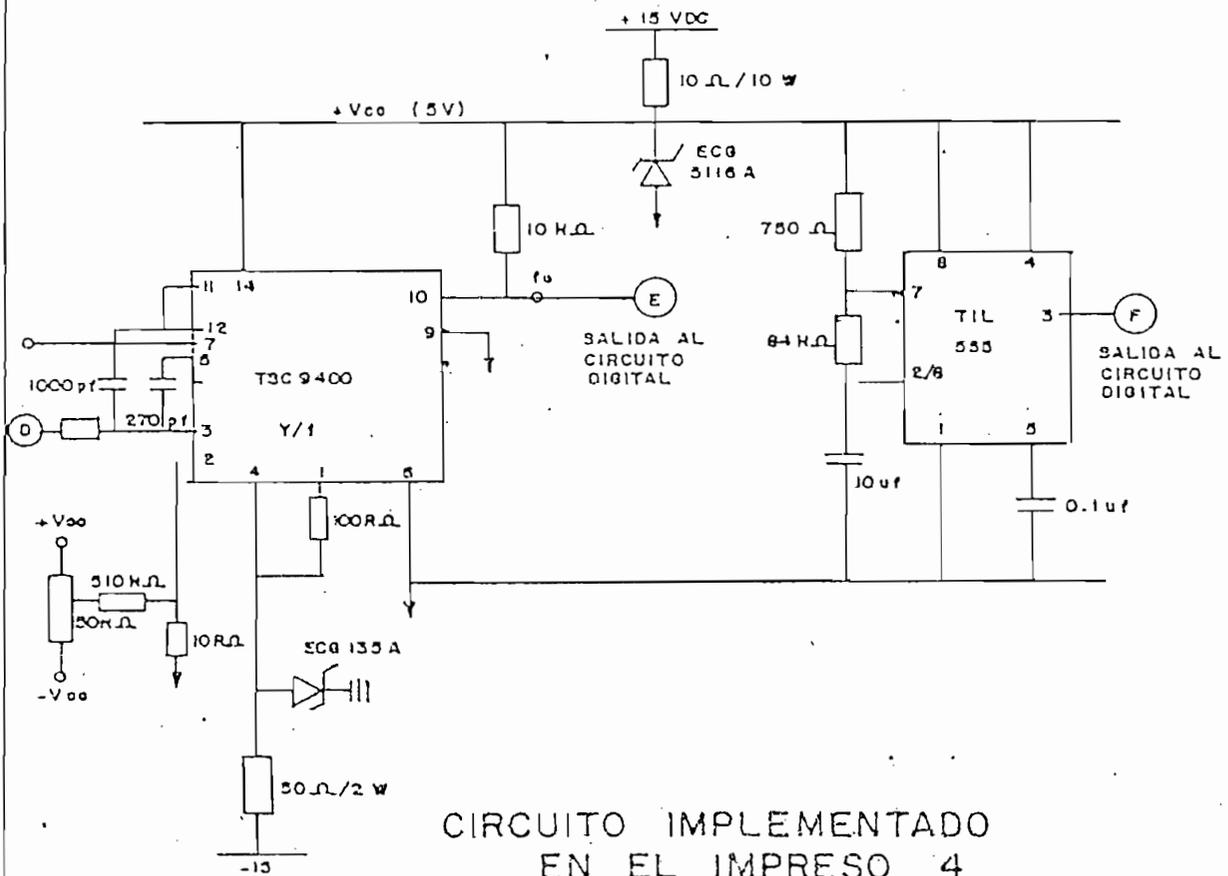
- D1--4 -- EGG 109
- Todas las resistencias son de precisión
- El ECG 859 se polariza entre ± 15 Vdc

ETAPAS QUE SE INSTALARON EN EL IMPRESO I

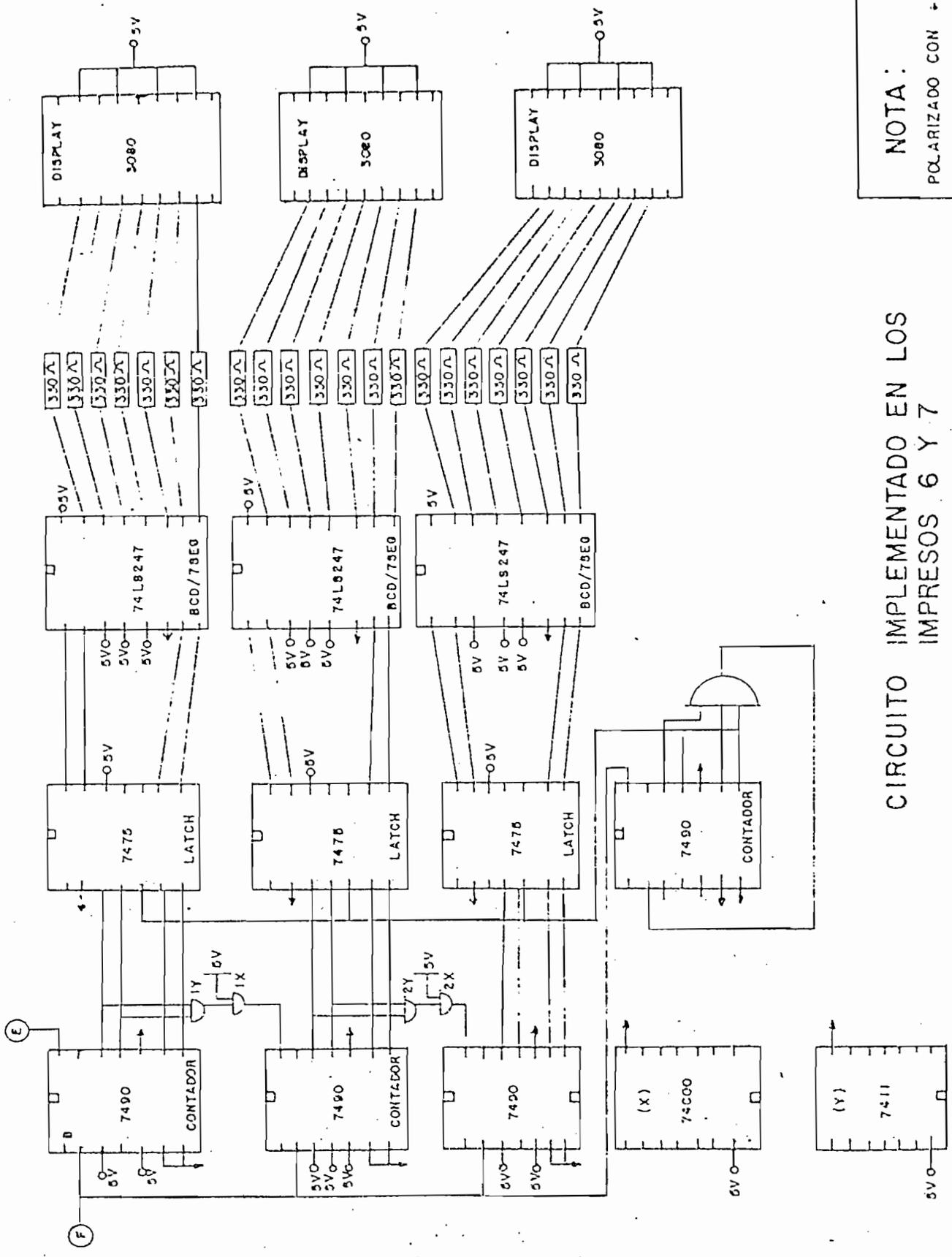
SALIDA A LA TARJETA 2



CIRCUITO IMPLEMENTADO
EN EL IMPRESO 3



CIRCUITO IMPLEMENTADO
EN EL IMPRESO 4



CIRCUITO IMPLEMENTADO EN LOS IMPRESOS 6 Y 7

NOTA:
POLARIZADO CON + 5VDC

APENDICE C

PRUEBAS PARA DETERMINAR LOS COEFICIENTES DE VARIACION DE LA RESISTENCIA CON LA TEMPERATURA EN LAS NIQUELINAS

Para realizar estas pruebas se compraron todas las niquelinas que se requerían más dos adicionales, total 10 niquelinas; de este conjunto de muestras se tomó una al hazar para someterle a las pruebas.

Las pruebas se las realizó implementando el siguiente circuito: Fig. C.1.

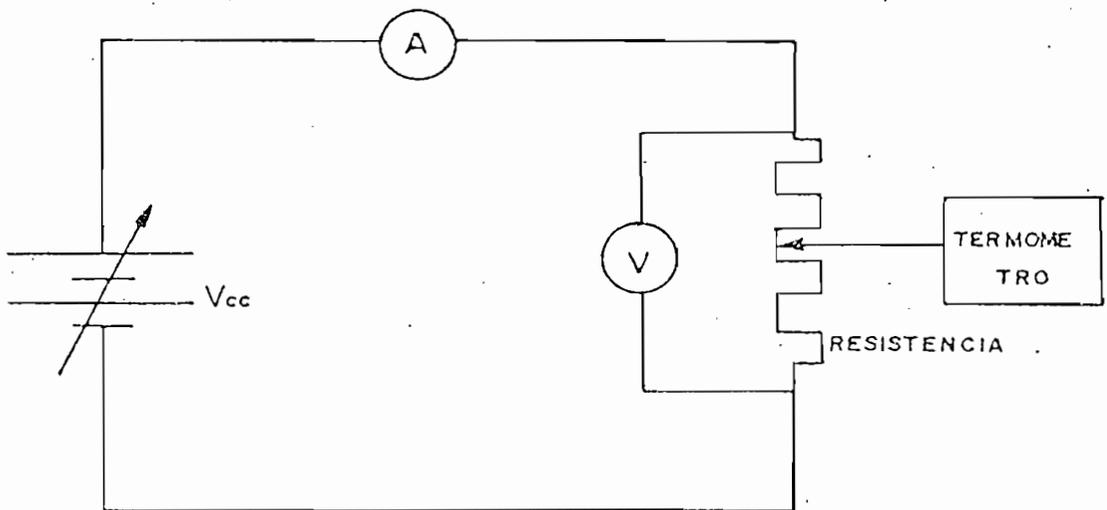


Fig. C.1. Circuito de pruebas.

La expresión a calibrarse es:

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2) \quad (1)$$

Por tanto la resistencia R_0 se determinó con un puente de Wheastone a una temperatura ambiente de 18°C y fue: $R_0 = 5.681$ a 18°C (sólo un segmento de niquelina), los valores obtenidos fueron:

TABLA C.1.

TEMPERATURA ($^\circ\text{C}$)	RESISTENCIA (Ω)
24	5.7755
46	5.81633
72	5.84828
127	5.89109
175	5.912698
219	5.92105
290	6.04651
316	6.140351
265	6.17257

Para encontrar el valor de α_1 y α_2 se recurre al método de recurrencia del polinomio con $n-m$ grados de libertad el cual se presenta a continuación.

C.1. METODO DEL ERROR MINIMO CUADRATICO

Si se tiene un set de medidas (n) y un número m de incógnitas el sistema se puede representar matricialmente como:

$$|A|_n = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{1m} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{nm} & \dots & a_{nm} \end{vmatrix} \quad (2)$$

$$|B| \quad | \alpha |$$

Donde estaremos resolviendo el sistema con $n-m$ grados de libertad.

Si a ambos lados de la ec. (2) premultiplicamos por $|B|^t$ tenemos

$$|B|^t \cdot |A| = |B|^t \cdot |B| \cdot | \alpha | \quad (3)$$

Pero $|B|^t \cdot |B|$ es una matriz $m \times m$ cuyo determinante es distinto de cero, siendo por tanto invertible, luego si premultiplicamos la expresión por $\{|B|^t \cdot |B|\}^{-1}$ tendremos:

$$\{|B|^t \cdot |B|\}^{-1} |B|^t |A| = \{|B|^t \cdot |B|\}^{-1} \cdot \{|B|^t \cdot |B|\} | \alpha |$$

Como $|B|^t \cdot |B|$ es escalar el orden de multiplicación de la matriz por su inversa siempre dará la matriz unitaria, por tanto:

$$| \alpha | = \{|B|^t \cdot |B|\}^{-1} |B|^t |A|$$

Siguiendo este método se calibra la expresión 1 con 7 grados de libertad obteniéndose los siguientes valores para los coeficientes:

$$\alpha_1 = 0.00031751 \quad |1/^\circ\text{C}|$$

$$\alpha_2 = -2.23264 \times 10^{-7} \quad |1/^\circ\text{C}^2|$$

APENDICE D

MANUAL DE OPERACION

Para garantizar una operación adecuada de la mufla se deberá seguir el siguiente procedimiento:

1. Para mover la mufla se deberá desconectar el cable de extensión de la termocupla, para evitar su posible deterioro. Para hacerlo hay que desconectar en la parte de abajo de la mufla.
2. Llevar el equipo a un sitio donde se tenga acceso a:
 - a) Tensión alterna de 60 Hz, 120 V, capacidad de 2.5 |KW|

Tensión continua de ± 15 V y $+ 5$ V_{DC} con capacidad de 2.5 |W|
 - b) Si se va a trabajar adicionalmente en envejecimiento eléctrico, esto implicará operar con alta tensión, por tanto se deberá instalar el equipo dentro de la jaula de Faraday.
3. Una vez definido el sitio, se deberá reinstalar el cable de extensión de la termocupla, cuidando de mantener la polaridad indicada en los terminales.
4. Si se va a someter a la muestra sólo a envejecimiento térmico, se deberá alimentar el panel de control a través de los terminales dispuestos con este objeto, debiendo hacerlo con las señales y en

los sitios indicados a continuación:

TIPO	VALOR	DENOMINACION	OBSERVACIONES
A.C.	120 Vrms	F N 120V 60 Hz	Alimentar la fase donde se indica "F" y el neutro por "N". Estos terminales están en la parte posterior.
D.C.	+ 15 V _{DC}	+ 15 V _{DC}	Terminal negro en la parte inferior derecha del frente del panel.
D.C.	- 15 V _{DC}	- 15 V _{DC}	Terminal rojo en la parte inferior derecha del frente del panel.
D.C.		G N D	Terminal celeste en la parte inferior derecha del frente del panel.
D.C.	+ 5 V _{DC}	5 V _{DC}	Terminal negro al centro del frente del panel.

5. Si se va a trabajar con envejecimiento combinado, se deberán hacer las mismas conexiones indicadas en (4) excepto la de la tensión alterna, la misma que deberá ser conectada a través de los

contactos de la protección de falla a tierra, se debe llegar al panel en la forma indicada en (4). El sistema de protección se deberá calibrar inicialmente realizando descargas entre los electrodos.

Adicionalmente se deberá instalar el descargador a la entrada de la señal alterna para proteger el sistema contra sobrevoltajes.

6. Seleccionar la temperatura a la que se desea trabajar moviendo a la posición indicada la perilla del selector.
7. Tomar la lectura que indique el reloj.
8. Poner el interruptor del panel en "ON", en caso de trabajar con alto voltaje se deberá poner el voltaje que se requiera a través del panel del laboratorio.

El alto voltaje no podrá ser mayor a 21.5 KV en Quito, Para estudios donde es nociva la corona no sobrepasar los 12 KV.

9. El equipo estará trabajando.
10. El sistema operará por el tiempo que se desee, siempre y cuando el material no se deteriore.

Se deberá antes de someter al material a envejecimiento establecer datos tales como:

- Temperatura máxima o de descomposición.
- Voltaje de perforación.

Los mismos que serán valores límite del esfuerzo aplicado.

11. Si transcurrido un tiempo se detecta que el sistema se ha desconectado, indicará esto que la muestra a fallado debiéndose tomar la lectura final del registrador de tiempo para por diferencia establecer la vida del material bajo esas condiciones, esto si se trabaja con alto voltaje, caso contrario el tiempo de trabajo dependerá del usuario.
12. Para apagar el sistema se deberá primero retirar la alta tensión y cortocircuitar los capacitores, se debe tener cuidado de descargar los terminales de las muestras que también son capacitancias, en caso de haber realizado pruebas sólo de envejecimiento no se requiere hacer esto, luego desconectar la alimentación de 120 V, 60 Hz del panel de control, realizado esto poner el interruptor del panel en OFF y finalmente desconectar la fuente de tensión continua.
13. Será conveniente dejar el sistema inmóvil por un tiempo prudencial (1 hora) para cambiarlo de sitio.

NOTA: Para hacer mantenimiento del equipo se recomienda revisar el capítulo IV de la tesis.

APENDICE E

ANALISIS DE COSTOS

a) COSTO DEL EQUIPO

A continuación se presenta la cuantificación del costo de fabricación de la mufla, el mismo que para hacerlo de carácter general se lo presenta en forma condensada, haciendo desagregación entre las diferentes etapas del sistema y el costo de mano de obra, como se indica en las tablas E-1, E-2 y E-3.

TABLA E-1

COSTO DE MATERIALES POR ETAPAS

ETAPA	DESCRIPCION	COSTO S/.	*COSTO USD
1	Materiales utilizados para construir la cámara térmica.	25.271,00	149
2	Materiales utilizados para construir el sistema de alta tensión.	12.000,00	71
3	Materiales utilizados para construir el circuito electrónico.	29.271,40	173
Tm	Costo total de materiales.	66.542,40	393

*Se considera 170 sucres = 1 dólar.

TABLA E-2

COSTO DE MANO DE OBRA POR ETAPAS

ETAPA	DESCRIPCION	COSTO S/.	*COSTO USD
1	Mano de obra utilizada en la construcción de la cámara de la mufla.	40.000	235,3
2	Mano de obra utilizada en la construcción del sistema de alta tensión.	3.000	17,7
3	Mano de obra utilizada en la construcción del circuito <u>e</u> lectrónico.	30.000	176,4
Tino	Costo total de mano de obra.	73.000	429,41

* Se considera 170 sucres = 1 dólar.

TABLA E-3

COSTO TOTAL POR ETAPA

ETAPA	COSTO S/.	COSTO USD
1	65.271	384,3
2	15.000	88,7
3	59.271,4	349,4
Tco	139.542,4	822,4

b) COMENTARIOS SOBRE EL COSTO

Al establecer que el costo del equipo es de S/. 139.542,4 (822,4 USD), se puede ver que el equipo tiene un precio reducido frente a los costos que se encuentran para equipos de laboratorio en el mercado internacional, así por ejemplo un termómetro digital para termocuplas tiene un costo de 550, lo cual le hace comparable con el precio del equipo construido.

Adicionalmente se debe observar que los componentes utilizados fueron adquiridos en el mercado nacional, por tanto los costos incluyen aranceles de importación que están alrededor del 300% del valor de la mercadería, lo cual hace que el equipo sea más caro de lo que podría ser si las partes hubiesen sido adquiridas libres de aranceles.

APENDICE F

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

F.1. RESPUESTA TERMICA

La respuesta térmica del equipo se la obtuvo en vacío, esto es sin la presencia de objetos que no se hayan considerado en el diseño, por tanto el sistema estuvo compuesto por la cámara, los radiadores, el electrodo de alta tensión, el "bushing" y el pedestal porta electrodos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla F-1.

Adicionalmente se obtuvo la respuesta del sistema con carga, con este objeto se instalo en el interior de la mufla dos electrodos de 14 cm. de diámetro hechos de hierro con un peso de 2 Kg y un aislador clase ANSI 55-6, los resultados obtenidos bajo estas condiciones se presentan en la Tabla F - 2.

F.2. DETECCION DE CORONA EN LA MUFLA

A continuación se presentan algunos resultados adicionales de la prueba de detección de corona, los mismos que sirvieron para tener un valor referencial de los pulsos que se presentan al hacer estudios con materiales y en base a estos garantizar la utilidad del equipo al hacer este tipo de estudios, el mismo que sirve para evaluar y establecer el envejecimiento de los materiales. Los resultados se presentan en la Tabla F-3.

TABLA F-1

RESPUESTA TERMICA DE LA MUFLA EN VACIO

Tiempo (min.)	Temp. interna		Temperatura de la segunda cubierta de vidrio (exte- rior)		Temperatura de la carcaza	
	°C	%	°C	%	°C	%
0	18	0	18	0	18	0
5	46	9.93	23	8.82	19	7.14
10	74	19.86	28	17.65	20	14.29
15	101	29.43	33	26.47	21	21.43
20	128	39.00	38	35.29	22.5	32.14
25	154	48.23	45	47.06	24	42.86
30	179	57.09	52	58.82	25.5	53.57
35	203	65.60	58	70.60	27	64.29
40	226	73.76	62	76.47	28	71.43
45	248	81.56	65	82.35	29	78.57
50	269	89.00	68	88.24	30	85.70
55	289	96.10	72	94.012	31	92.90
63	300	100.00	74	100.00	32	100.00

TABLA F-2

RESPUESTA TERMICA DE LA MUFLA CON CARGA

Tiempo (min.)	Temp. interna		Temperatura de la segunda cubierta de vidrio (exte- rior)		Temperatura de la carcaza	
	°C	%	°C	%	°C	%
0	10	0	18	0	18	0
5	42	8.51	23	9.1	18.5	3.57
10	66	17.02	27	15.15	19.5	10.71
15	90	25.53	32	24.24	21	21.43
20	113	33.69	37	33.33	22.5	32.14
25	135	41.49	42	42.42	23.5	40.01
30	157	49.29	47	51.52	25	50.00
35	178	56.74	52	60.61	26	57.14
40	199	64.18	58	69.70	27	64.29
45	219	71.28	63	78.79	28	71.43
50	238	78.01	66	84.85	29	78.57
55	256	84.40	70	90.91	30	85.71
60	273	90.42	72	93.94	30.5	89.29
65	289	96.10	73	96.97	31	92.86
70	300	100.00	75	100.00	32	100.00

TABLA F-3

PRUEBAS DE DETECCION DE CORONA

MATERIAL	VOLTAJE APLICADO (KV)	GRADIENTE DE POTENCIAL (KV/cm.)	CARGA DE LOS PULSOS (pc)
Papel craft negro im- pregnado de 14 x 14 cm x 0.1 mm Peso 1.685 gr.	0.15	15	56
	0.30	30	88
	0.50	50	432
Papel bond de 14 x 14 cm x 0.069 mm Peso 1.42 gr	0.20	28.95	70
	0.40	57.95	92
	0.50	72.48	780
	0.60	86.96	Perforación
Material compuesto poliester - carga 20%, 5% de 12 x 12 cm x 2.1 mm Peso 40.32 gr.	1.0	4.76	0
	1.5	7.14	0
	1.7	8.19	0
	2.0	9.52	0
	2.4	11.43	0
	2.6	12.38	3.16
	3.0	14.29	descargas sup.
3.4	16.19	Perforación	
Cartón comercial	0.5	4,17	0

.../...

MATERIAL	VOLTAJE APLICADO (KV)	GRADIENTE DE POTENCIAL (KV/cm.)	CARGA DE LOS PULSOS (pc)
de 12 x 12 cm x 1.2 mm	1.0	8.34	0
Peso 19.007 gr	1.5	12.50	0
	2.0	16.67	0
	3.0	25.00	0
	3.3	27.50	0
	3.7	30.83	980
	4.0	33.33	>1000
	5.0	41.66	>1000
Papel crepe blanco	0.4	133.33	228
12 x 12 cm x 0.03 mm	0.6	200.00	274
Peso 0.5970 gr.	0.8	266.67	306
	0.9	300.00	Perforación

Estos valores como se puede observar muestran que el rango de operación para la mufla de 12.5 kV con 50 pc y 300 nJ es un rango muy bueno para hacer el análisis de micro descargas en materiales como una forma de evaluar el envejecimiento.

APENDICE G

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ENVEJECIMIENTO

Las muestras fueron expuestas a temperaturas de 50°C, 75°C y 100°C, por espacios de tiempo tales que se mantenga el producto tiempo por temperatura constante para tres puntos, e iguales a 2400, 3600, 4800 (°C x hora).

Los resultados obtenidos tanto para la carga de los pulsos de corona como para la tangente de pérdidas dieléctricas han sido tratados estadísticamente, para así presentar el valor esperado para cada propiedad y condición que se presentan a continuación.

TABLA G1

CARGA DE LOS PULSOS DE CORONA PARA MUESTRAS SOMETIDAS A 50°C

t (h)	T (°C)	t x T (°Ch)	VOLTAJE KV	GRADIENTE DE POTENCIAL KV/cm	CARGA DE PULSOS (Pc)	(%)*
48	50	2400	1.0	24.94	36.3	- 0.13
			1.5	37.41	5906.6	58.96
			2.0	49.88	7466.6	74.66
			2.5	62.34	9313.3	93.25
72	50	3600	1.0	24.90	48.6	- 0.01
			1.5	37.36	6826.6	68.22
			2.0	49.81	8260.0	82.65
			2.5	62.27	9773.3	97.88
96	50	4800	1.0	24.88	56.0	0.004
			1.5	37.32	7030.0	70.27
			2.0	49.76	8950.0	89.59
			2.5	62.20	10000.0	100.16

*t = tiempo; T = temperatura; Pc = pico coulombios.

TABLA G2

CARGA DE LOS PULSOS DE CORONA PARA MUESTRAS SOMETIDAS A 75 °C

<u>t</u> <u>(h)</u>	<u>T</u> <u>(°C)</u>	<u>t x T</u> <u>(°Ch)</u>	<u>VOLTAJE</u> <u>KV</u>	<u>GRADIENTE</u> <u>DE POTENCIAL</u> <u>KV/cm</u>	<u>CARGA DE</u> <u>PULSOS</u> <u>(Pc)</u>	<u>(%)</u> [*]
32	75	2400	1.0	24.57	30.0	- 0.1975
			1.5	36.85	6630.0	66.24
			2.0	49.14	9413.3	84.19
			2.5	61.43	10000.0	100.16
48	75	3600	1.0	24.54	40.0	- 0.097
			1.5	36.82	7440.0	73.991
			2.0	49.09	9573.3	95.87
			2.5	61.36	10000.0	105.16
64	75	4800	1.0	24.53	80.0	0.31
			1.5	36.79	7630.0	76.31
			2.0	49.06	9753.3	97.68
			2.5	61.32	10000.0	110.16

(*) Tomando los valores mínimos y máximos de los datos de carga inicial.

TABLA G3

CARGA DE LOS PULSOS DE CORONA PARA MUESTRAS SOMETIDAS A 100°C

<u>t</u> <u>(t)</u>	<u>T</u> <u>(°C)</u>	<u>t x T</u> <u>(°Ch)</u>	<u>VOLTAJE</u> <u>KV</u>	<u>GRADIENTE</u> <u>DE POTENCIAL</u> <u>KV/cm</u>	<u>CARGA</u> <u>DE</u> <u>PULSOS</u> <u>(Pc)</u>	<u>(%)</u>
24	100	2400	1.0	24.41	28.3	- 0,26
			1.5	36.62	3693.3	36.678
			2.0	48.83	6656.6	66.51
			2.5	61.04	9156.6	91.6747
		3600	1.0	24.39	53.3	0.037
			1.5	36.59	9113.3	91.24
			2.0	48.78	10000.0	100.160
			2.5	60.97	>10000.0	>105.00
48	100	4800	1.0	24.36	3086.6	30.57
			1.5	36.54	10000.0	100.160
			2.0	48.72	>10000.0	>105.00
			2.5	60.90	>10000.0	>110.00

TABLA G4

TANGENTE DE PERDIDAS DIELECTRICAS PARA MUESTRAS SOMETIDAS A 50°C
MEDIDAS A 1KV

<u>t</u> <u>(h)</u>	<u>T</u> <u>(°C)</u>	<u>txT</u> <u>(°Cxh)</u>	<u>Tg δ</u> <u>(%)</u>	<u>Tg δ racionalizada*</u> <u>(%)</u>
0	18	0	6.9900	0
48	50	2400	7.0891	43.48
72	50	3600	7.1547	72.27
96	50	4800	7.2179	100.00

(*) Tomando como 100% el valor mayor.

TABLA G5

TANGENTE DE PERDIDAS DIELECTRICAS PARA MUESTRAS SOMETIDAS A 100
°C MEDIDAS A 1 KV

<u>t</u> <u>(h)</u>	<u>T</u> <u>(°C)</u>	<u>txT</u> <u>(°Cxh)</u>	<u>Tg δ</u> <u>(%)</u>	<u>Tg δ racionalizada*</u> <u>(%)</u>
0	18	0	6.99000	0
32	75	2400	7.1562	47.80
48	75	3600	7.2582	77.13
64	75	4800	7.3377	100.00

* Tomando como el 100% el valor mayor.

TABLA G6

TANGENTE DE PERDIDAS DIELECTRICAS PARA MUESTRAS SOMETIDAS A 100°C
 MEDIDAS A 1KV

<u>t</u> <u>(h)</u>	<u>T</u> <u>(°C)</u>	<u>txT</u> <u>(°Cxh)</u>	<u>Tg</u> <u>(%)</u>	<u>Tg</u> racionalizada* <u>(%)</u>
0	18	0	6.9900	0
24	100	2400	7.9211	94.33
36	100	3600	7.9652	98.78
48	100	4800	7.9771	100.00

(*) Tomando como el 100% el valor mayor.

En busca de la causa por la que se da este comportamiento se realizaron mediciones del espesor y el diámetro de las muestras, encontrándose los valores dados en la tabla G7.

TABLA G7

VARIACION DE LAS DIMENSIONES

MUESTRA	DIMENSIONES	
	<u>ESPESOR (mm)</u>	<u>DIAMETRO (cm)</u>
0h x 18°C	0.4000	14
48h x 50°C	0.4010	14
72h x 50°C	0.4015	14
96h x 50°C	0.4019	14
32h x 75°C	0.4070	14
48h x 75°C	0.4074	14
64h x 75°C	0.4077	14
24h x 100°C	0.4096	14
36h x 100°C	0.4100	14
48h x 100°C	0.4105	14

Estos resultados indican que el material a sufrido un esponjamiento, lo cual puede deberse a un agrandamiento de las cavidades gaseosas - en su interior, las mismas que se amplian en dirección al menor acumulamiento de material el mismo que se tiene en sentido del espesor.

Esto permite por tanto explicar por que se tiene una variación en la respuesta del material.

BIBLIOGRAFIA

1. KERN Donald, Procesos de Transferencia de Calor, Mc Graw Hill, Nueva York, 1982.
2. KREITH Frank, Principios de Transferencia de Calor, Herrera Hermanos MDF, México, 1974.
3. JOHNSON Curtis, Process Control Instrumentation Technology, John Wiley and Sons, New York, 1977.
4. NIETO Wilson, Diseño y Construcción de un Horno Solar para Cocción de Alimentos, Tesis EPN, Quito, 1986.
5. BANDA Hugo, Electrónica Industrial, Area de Control, E.P.N., Quito, 1986.
6. RENEDO J., Electrónica y Automática Industriales, Marcombo, España, 1980.
7. OMEGASCOPE, Practical Temperature Measurements, Stamford Connecticut, 1982.
8. KHAN A., An Improved Linear Temperature / Voltage Converter Using Thermistor in Logartimic Network, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, IM-34, No. 4, Dec. 1985.
9. MEEK y GRAGGS, Electrical Breakdown of Gases, Editorial MEEK, New

York, 1981, pág. 539 - 546.

10. ROTH Arnold, Técnica de las Altas Tensiones, Editorial LABOR, Barcelona, 1968.
11. COBINE J. D., Gaseous Conductors, Dover Publications, New York, 1968.
12. SIMONI L., A General Approach to the Endurance of Electrical Insulation Under Temperature and Voltage, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI - 16, No. 4, Agosto 1981.
13. BRANCATO L., Insulation Aging a Historical and Critical Review , IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-13 No. 4, Agosto 1978. ✓
14. SPITTA Albert, Instalaciones Eléctricas, Tomo I, Editorial Dossat s. a., España, 1981.
15. NATIONAL SEMICONDUCTOR, Industrial Blocks, Life Support Policy , Santa Clara Calif., 1984.
16. TEXAS INSTRUMENTS, TTL Data Book for Engineer Design, Second Edition, 1983.
17. TELEDYNE SEMICONDUCTOR, Data Acquisition Design Handbook, Mountain View California, 1983.
18. ESPINOSA Renán Alfonso, Sistemas Digitales III, EPN, Quito, 1983.