



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO AUTOMÁTICO DE PRUEBAS PARA LA VERIFICACIÓN DE CONTINUIDAD Y RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ALAMBRE ESMALTADO DE COBRE PARA EL LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE LA EMPRESA ECUATRAN S.A”**

**ACOSTA CARRASCO EDWIN JAVIER  
GARCÉS CADENA ANDRÉS ALEJANDRO**

**Latacunga, 2014**

# CAPÍTULO I

# MARCO TEÓRICO



# TRANSFORMADORES



MONOFÁSICOS



TRIFÁSICOS



PADMOUNTED

# ***PARTES DEL TRANSFORMADOR***



ALAMBRE DE COBRE  
PARA BOBINAS



NÚCLEO



PARARRAYOS



ACEITE  
DIELÉCTRICO

# PRUEBAS AL ALAMBRE DE COBRE

NORMA NEMA MW 1000-2008

Dimensionales
Adherencia y Flexibilidad
Elongación
Choque térmico
Recuperación Elástica
Rigidez Dieléctrica
Continuidad

# CONTINUIDAD

Verificar la calidad del esmaltado del alambre, mediante detección de fallas.

Parámetro	Valor
Voltaje de Prueba	1500 VDC
Longitud de muestra	30m $\pm$ 2
Velocidad de recolección de alambre	18 m/min.

# RIGIDEZ DIELECTRICA

La prueba de rigidez dieléctrica se base en romper el aislamiento de la muestra de alambre en un punto determinado al aplicarle alto voltaje AC

Parámetro	Valor
Frecuencia	60 Hz.
Potencia	> 500 VA.
Voltaje	Variable (0 – 7000V o superior)
Velocidad de incremento de voltaje	500 V/s (+/- 10%)

# CAPÍTULO II

# DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

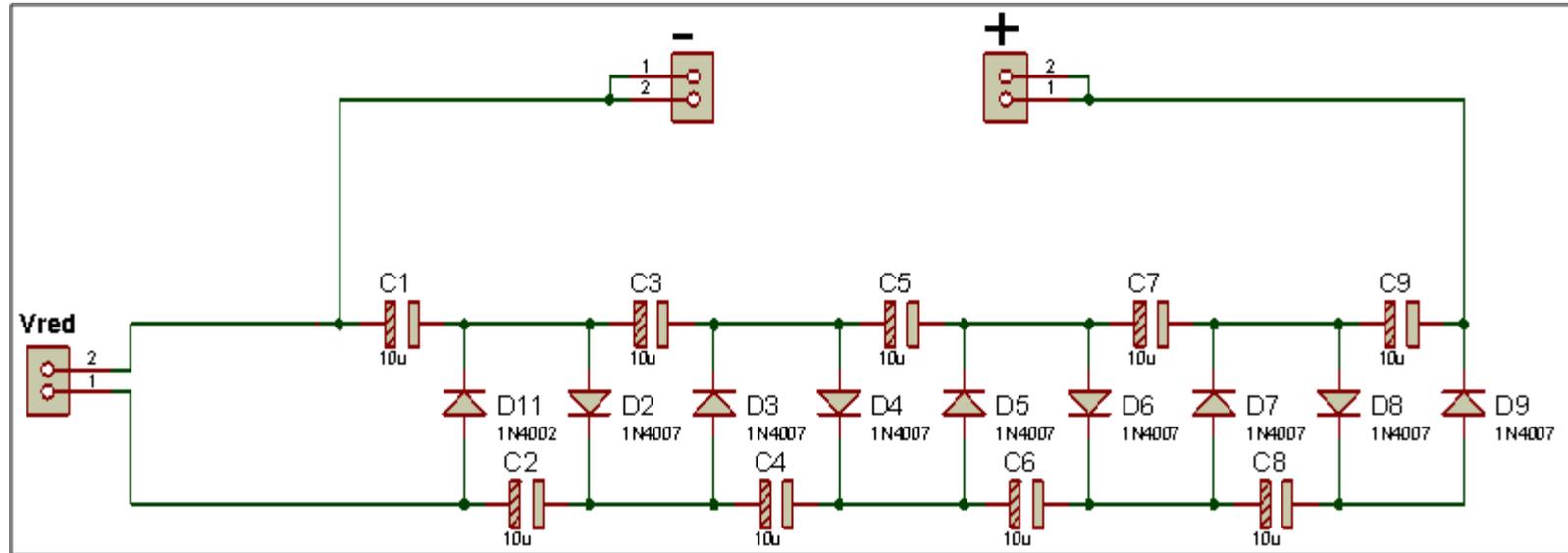


# ANTECEDENTES



# DISEÑO DE FUENTE DC

## FUENTE 1500 VDC



$$V_{ID} > 2VP$$

$$V_{tc} > 2VP$$

Diodo 1N4007

$$V_{ID} > 2(166.02V)$$

Capacitor Electrolítico 10uF/450 V

$$V_{ID} > 332.05V$$

$$V_{tc} > 332.05V$$

# DISEÑO DE FUENTE DC

$$V_{RED} = 117.4 \text{ V}$$

$$V_p = 166.02 \text{ V}$$

# Etapas	Cálculo	Voltaje (VDC)
3	$V_{OUT} = V_p + 2V_p$	498.06
4	$V_{OUT} = 4V_p$	664.08
5	$V_{OUT} = V_p + 4V_p$	830.10
6	$V_{OUT} = 6V_p$	996.12
7	$V_{OUT} = V_p + 6V_p$	1162.14
8	$V_{OUT} = 8V_p$	1328.16
9	$V_{OUT} = V_p + 8V_p$	1494.18
10	$V_{OUT} = 10V_p$	1660.20

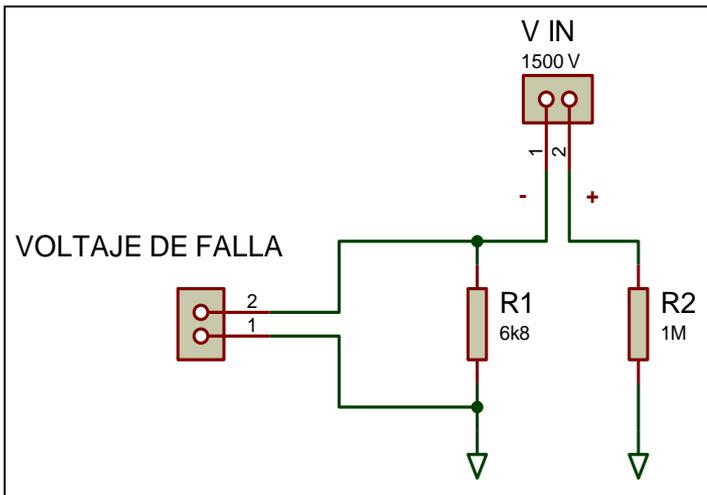
# CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN EL ESMALTADO DEL ALAMBRE

$$V_{in} = 1500 \text{ VDC.}$$

$$V_{FALLA} = V_{R1} = 10 \text{ V.}$$

$R_2 = 1 \text{ M}\Omega$  (Asumimos este valor debido a que ésta resistencia es comercial)

$$R_1 = ?$$



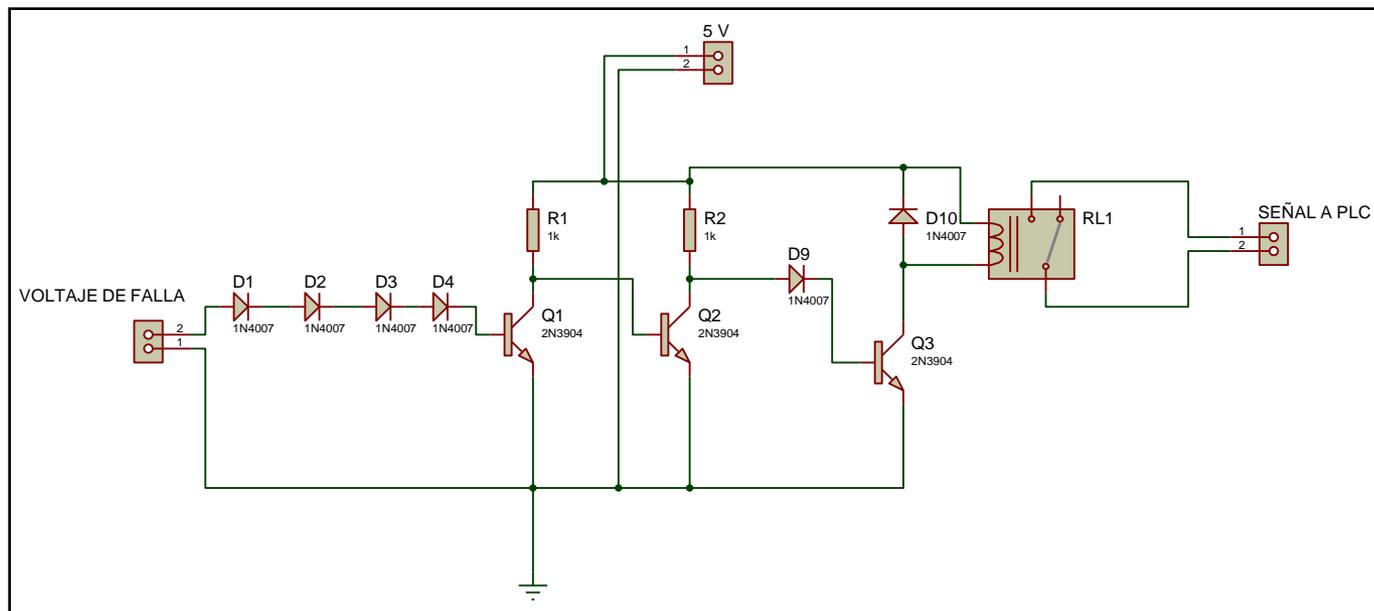
$$V_{R1} = \frac{V_{in} \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

$$R_1 = \frac{V_{R1} \cdot R_2}{V_{in} - V_{R1}}$$

$$R_1 = \frac{10 \text{ V} \cdot 1 \text{ M}\Omega}{1500 \text{ V} - 10 \text{ V}}$$

$$R_1 = 6.71 \text{ K}\Omega \approx 6.8 \text{ K}\Omega$$

# CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN EL ESMALTADO DEL ALAMBRE



$V_{\text{Diodo}}: 0.7 \text{ (V. medido)}$

$V_{\text{Total}}: V_{D1} + V_{D2} + V_{D3} + V_{D4}$

$V_{\text{Total}}: 2.8$

# DISEÑO DE FUENTE AC

## CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR

Parámetro	Valor
Voltaje de Entrada	120 V
Voltaje de Salida	18 KV
Potencia	1 KVA
Frecuencia	60 Hz

## CIRCUITO DETECTOR DE SOBRE-CORRIENTE

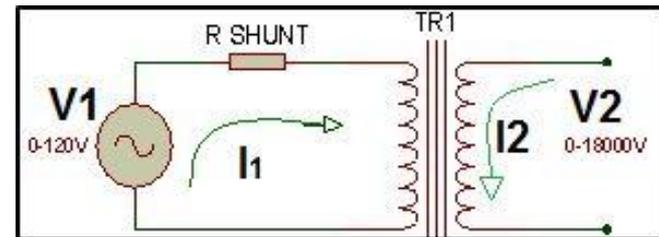
Voltaje Primario:  $V_1 = 120V$

Voltaje Secundario:  $V_2 = 18000V$

Corriente en el Primario:  $I_1 = ?$

Corriente en el secundario:  $I_2 = 10mA$

Relación de Transformación:  $m = 150.82$



$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = m$$

$$\frac{I_1}{I_2} = m$$

$$I_1 = I_2 \cdot m \quad I_1 = 10mA \cdot 150.82$$

$$I_1 = 1.5A$$

# CIRCUITO DETECTOR DE SOBRE-CORRIENTE

## CÁLCULOS

Datos:

$$I_1 = 1.5A$$

$$R_{Shunt} = 1.5\Omega$$

$$1 \quad V_{R_{shunt}} = I_{Primario} \cdot R_{Shunt}$$

$$V_{R_{shunt}} = 1.5 A \cdot 1.5\Omega$$

$$V_{R_{shunt}} = 2.25V$$

$$2 \quad V_{R_{shunt} RMS} = 2.25 V \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{R_{shunt} RMS} = 3.18 V$$

$$3 \quad V_{R_{shunt} DC} = V_{R_{shunt} RMS} - 2V_{Diodo}$$

$$V_{R_{shunt} DC} = 3.18V - 2(0.7)V$$

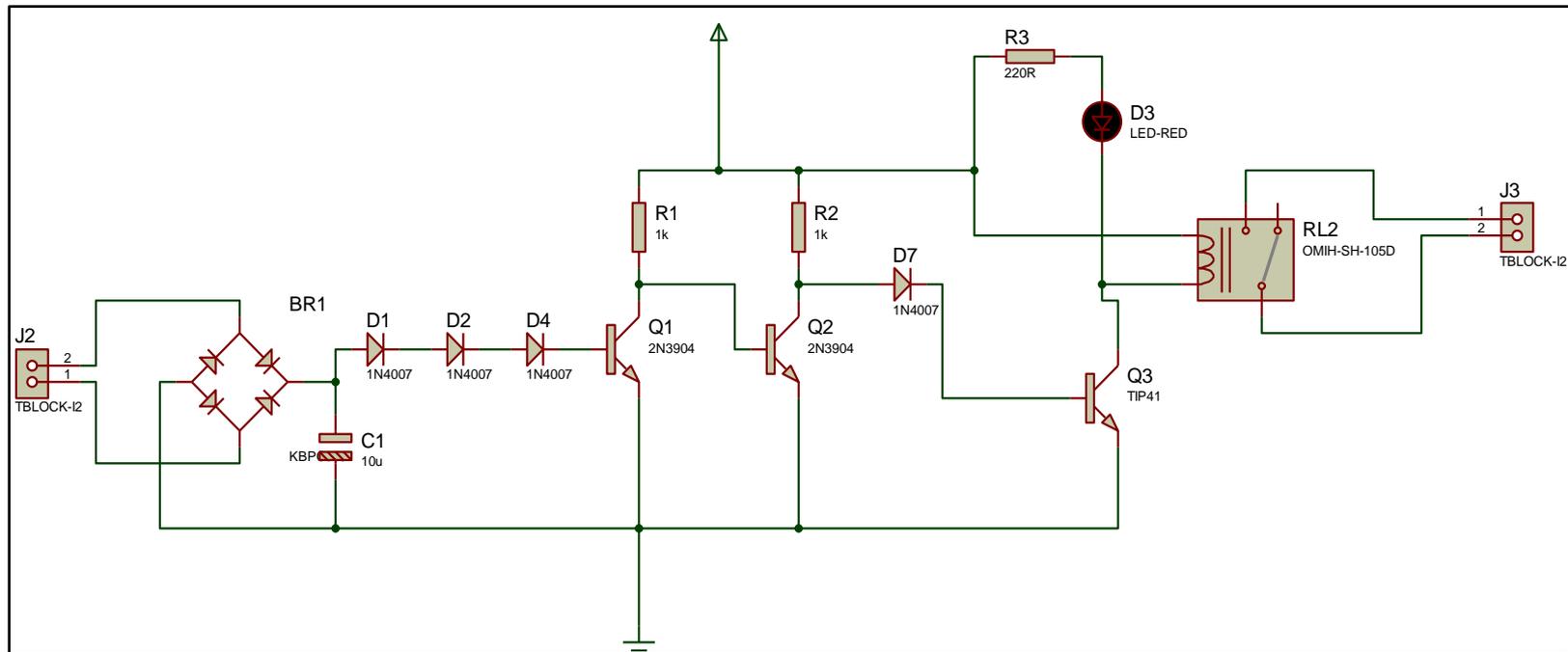
$$V_{R_{shunt} DC} = 1.78 V$$

$$4 \quad \text{Numero de Diodos} = \frac{V_{R_{Shunt} DC}}{V_{Diodo}}$$

$$\text{Numero de Diodos} = \frac{1.78 V}{0.7 V}$$

$$\text{Numero de Diodos} = 2.5 \approx 3$$

# CIRCUITO DETECTOR DE SOBRE-CORRIENTE



## CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO PARA ENTRADA ANALÓGICA

1  $V_{rms} = V_2 * \sqrt{2}$

$$V_{rms} = 9V * \sqrt{2}$$

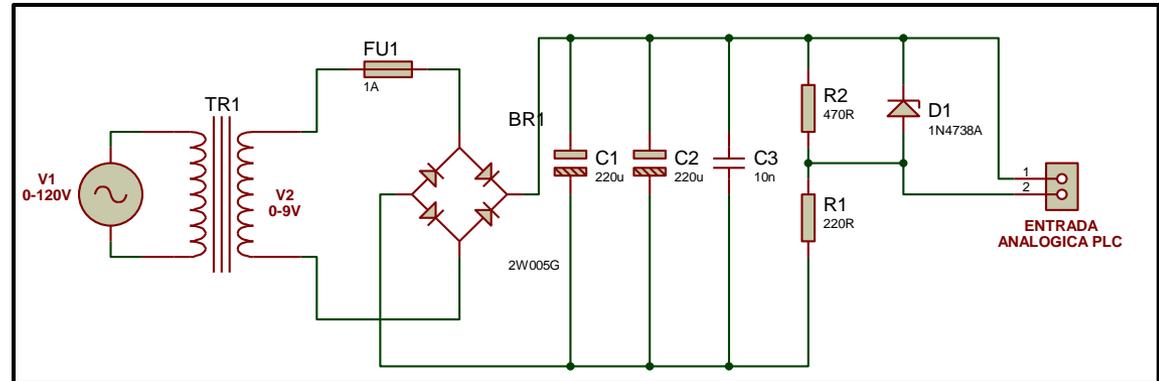
$$V_{rms} = 12.72V$$

Luego se encuentra el voltaje continuo entregado:

2  $V_{dc} = V_{rms} - 2V_{Diodo}$

$$V_{dc} = 12.72 - 2(0.7V)$$

$$V_{dc} = 11.32V$$



Cálculo del voltaje de caída en  $R_2$ , para poder seleccionar el diodo zener adecuado:

3

$$V_{R2} = \frac{V_{dc} * R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{R2} = \frac{11.32V * 470\Omega}{220\Omega + 470\Omega}$$

$$V_{R2} = 7.71V$$

## SELECCIÓN DEL PLC

### ENTRADAS REQUERIDAS EN EL PLC Y TIPO DE SEÑAL

# de Entrada	NOMBRE DE VARIABLE	TIPO
1	Sensor Presencia Alambre (Agua)	Digital
2	Sensor Presencia Alambre (Escobillas)	Digital
3	Fallas del Alambre	Digital
4	Sensor de Sobre-Corriente	Digital
5	Inicio Variac	Digital
6	Fin Variac	Digital
7	Sensor Ventana Rigidez	Digital
8	Paro de Emergencia	Digital
1 <sup>a</sup>	Voltaje de Rigidez Dieléctrica	Analógica

## SELECCIÓN DEL PLC

### SALIDAS REQUERIDAS EN EL PLC Y TIPO DE SEÑAL

# de Salida	NOMBRE DE VARIABLE	TIPO
1	Encender Sistema de Continuidad Agua.	Digital
2	Encender Sistema de Continuidad Escobillas.	Digital
3	Encender Sistema de Alto Voltaje	Digital
4	Retorno VARIAC.	Digital

## DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

Los principales parámetros que influyen directamente en el diseño mecánico de la máquina son:

Módulo de elasticidad normal del cobre ( $E$ ) =  $12,2 \cdot 10^4$  MPa

Límite de fluencia máximo del cobre ( $S_y$ ) = 379MPa

Diámetro máximo del alambre (Calibre AWG 9)  $\varnothing$  = 2,906 mm

Velocidad promedio de avance del alambre ( $V_A$ ) = 500 mm/s

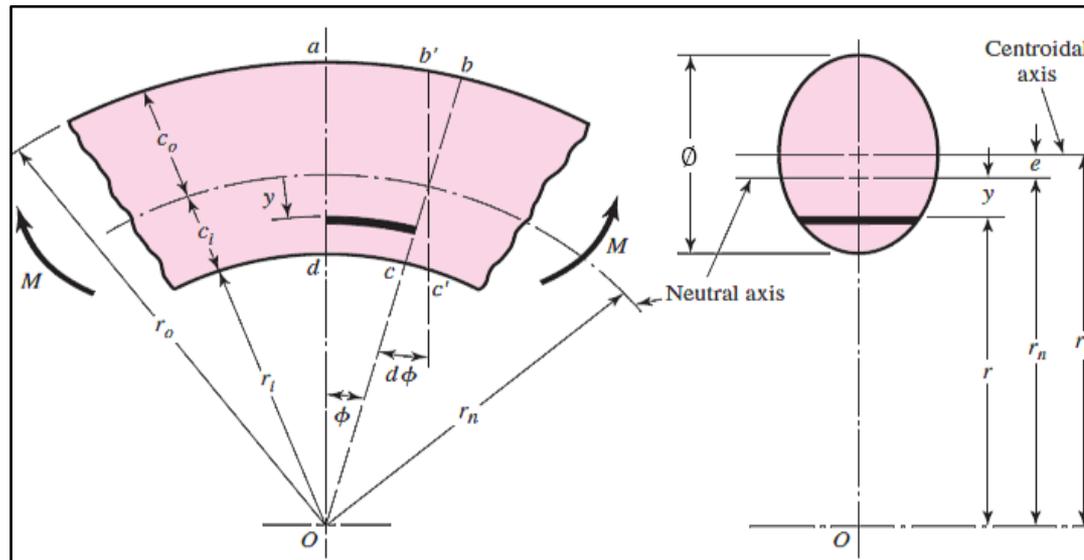
Radio de las poleas guías del alambre ( $r_{i1}$ ) = 16 mm.

Radio del tambor para enrollamiento del alambre ( $r_{i2}$ ) = 63 mm

Factor de carga del sistema ( $K_C$ ) = 2.0

Factor de seguridad mínimo requerido ( $FS$ ) = 2.5

## ANÁLISIS DE UN ELEMENTO CURVO SOMETIDO A FLEXIÓN



$r_i$  = radio de la fibra inferior del alambre  
 $r_o$  = radio de la fibra superior del alambre  
 $\emptyset$  = diámetro del alambre = 2,906 mm  
 $R$  = radio del alambre = 1,453 mm  
 $c_o$  = distancia de la fibra superior al eje neutro

$c_i$  = distancia de la fibra inferior al eje neutro  
 $r_n$  = radio del eje neutro del alambre  
 $r_c$  = radio del eje centroidal del alambre  
 $e$  = distancia entre E.centroidal y E.neutro

## FUERZA EN LOS POLEAS GUÍAS

1

$$\sigma_{o1} = \frac{M_1 \cdot c_{o1}}{A \cdot e_1 \cdot r_{o1}}$$

$$\sigma_{o1} = \frac{4 \cdot F_1 \cdot r_{c1} \cdot c_{o1}}{\pi \cdot \emptyset^2 \cdot e_1 \cdot r_{o1}}$$

$$\sigma_{o1} = \frac{4 \cdot F_1 \cdot 17,453 \cdot 1,4833}{\pi \cdot 2.906^2 \cdot 0,03 \cdot 18,906}$$

$$\sigma_{o1} = \frac{6,88}{mm^2} \cdot F_1$$

Sabiendo que:

$$A = \frac{\pi}{4} \emptyset^2$$

$$M_1 = F_1 \cdot r_{c1}$$

2

$$\sigma_{o1} \geq K_C \cdot S_y$$

$$F_1 = \frac{2 \cdot 379 \text{ N/mm}^2}{\frac{6,88}{mm^2}}$$

$$F_1 = 110,2N$$

## FUERZA EN EL TAMBOR PARA ENROLLAMIENTO DEL ALAMBRE

$$1 \quad \sigma_{o2} = \frac{M_2 \cdot c_{o2}}{A \cdot e_2 \cdot r_{o2}}$$

$$\sigma_{o2} = \frac{4 \cdot F_2 \cdot r_{c2} \cdot c_{o2}}{\pi \cdot \emptyset^2 \cdot e_2 \cdot r_{o2}}$$

$$\sigma_{o2} = \frac{4 \cdot F_2 \cdot 64,453 \cdot 1,4612}{\pi \cdot 2,906^2 \cdot 0,0082 \cdot 65,9066}$$

$$\sigma_{o2} = \frac{26,27}{\text{mm}^2} \cdot F_2$$

$$2 \quad \sigma_{o2} \geq K_C \cdot S_y$$

$$F_2 = \frac{2 \cdot 379 \text{ N/mm}^2}{\frac{26,27}{\text{mm}^2}}$$

$$F_2 = 28,85 \text{ N}$$

$$F_T = 2 \cdot F_1 + F_2$$

$$F_T = 249,25 \text{ N}$$

## SELECCIÓN DEL MOTOR-REDUCTOR

$$V_A = \omega_t \cdot \frac{\phi_t}{2}$$

$$\omega_t = \frac{2 \cdot 0.5 \text{ m/s}}{0.136 \text{ m}}$$

$$\omega_t = 7,35 \text{ rad/s} = 70,2 \text{ rpm}$$

$$T = F_T \cdot r_{n2}$$

$$T = 249,25 \text{ N} \cdot 64,4448 \text{ mm}$$

$$T = 16062,8 \text{ N mm} = 16,06 \text{ Nm}$$

$$Pot = Fr \cdot V$$

$$Pot = 249,25 \text{ N} * 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 124,63 \text{ W}$$

$$Pot_M = \frac{Pot}{\eta_R \cdot \eta_M}$$

$$Pot_M = \frac{124,63}{0,9 \cdot 0,6}$$

$$Pot_M = 230,8 \text{ W} = 0,31 \text{ hp}$$



# DISEÑO DE LA ESTRUCTURA SOPORTE

## Análisis de Esfuerzos

$\sigma d = \text{Esfuerzo de diseño}$

$Sy = \text{Resistencia a la flexion} = 320\text{MPa}$

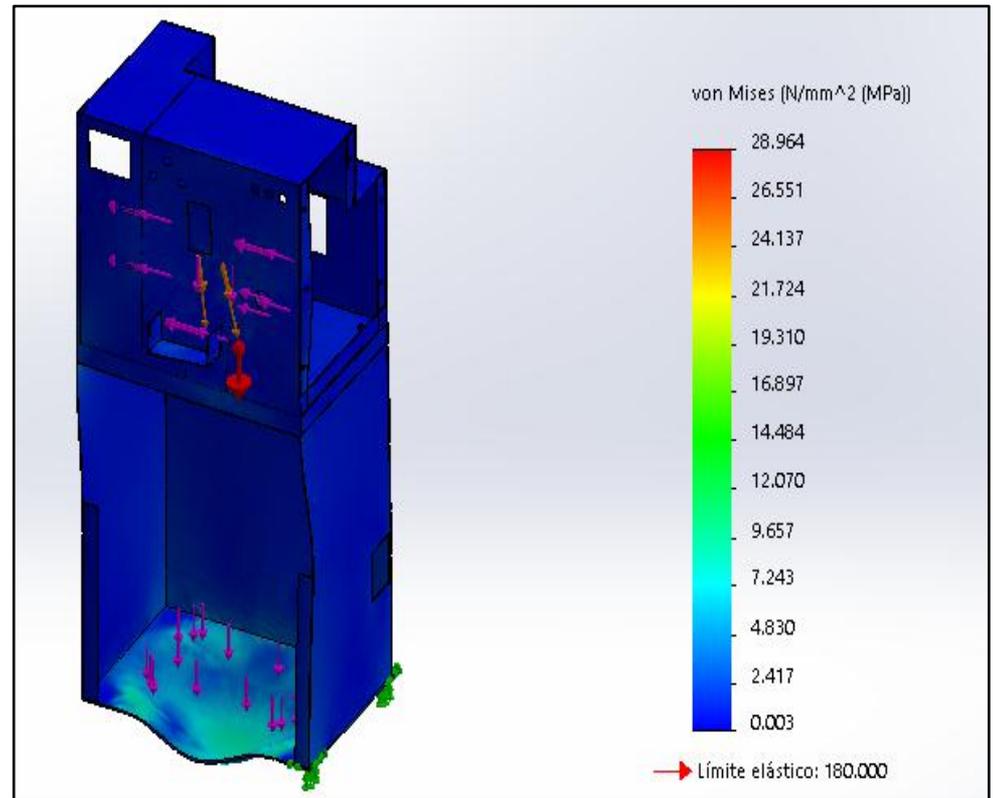
$N = \text{factor de seguridad}$

$$\sigma d = \frac{Sy * 0.577}{N}$$

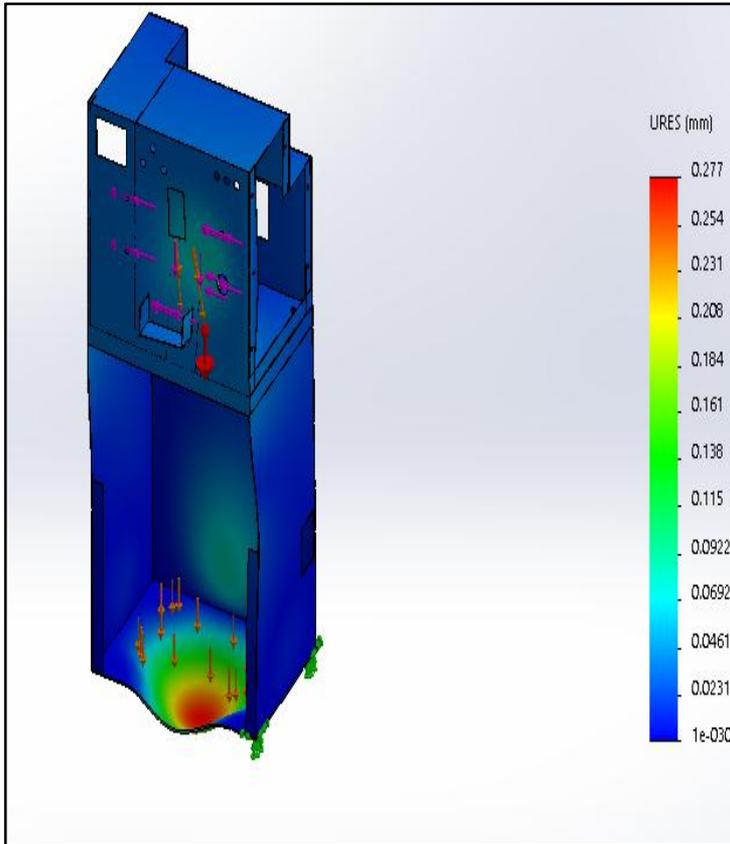
$$\sigma d = \frac{(320\text{MPa}) * 0.577}{6}$$

$$\sigma d = 34.62 \text{ MPa.}$$

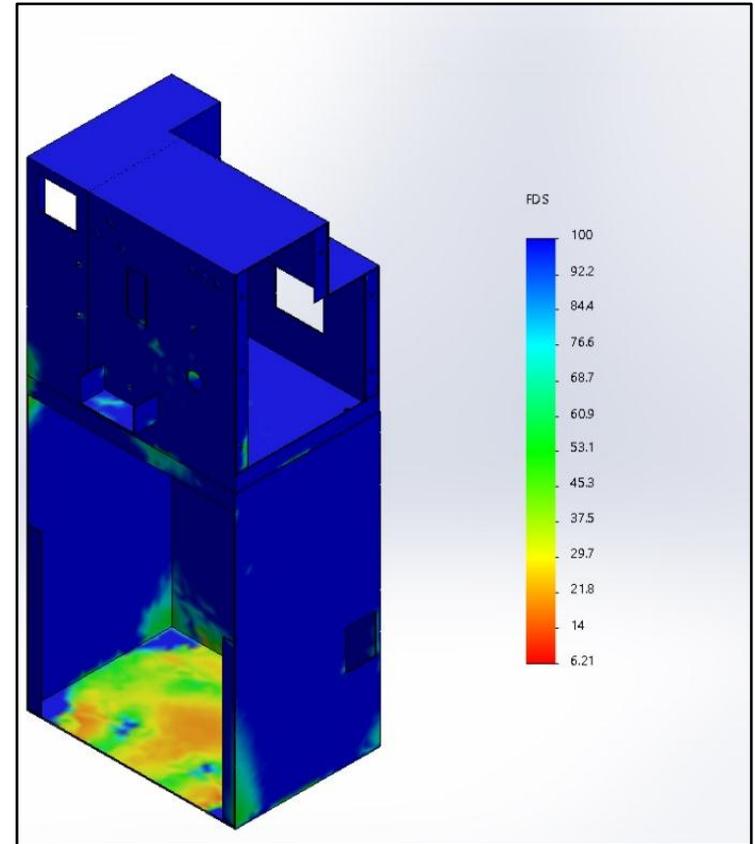
$$\sigma' < \sigma d$$



## DEFORMACIÓN



## FACTOR DE SEGURIDAD



# CAPÍTULO III

# IMPLEMENTACIÓN Y CONSTRUCCIÓN



# ELABORACIÓN PLACAS ELECTRÓNICAS



## CONEXIONES DEL TRANSFORMADOR



## TABLERO DE CONTROL



## CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA MECÁNICA

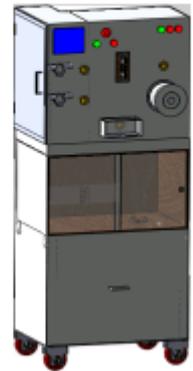


## ENSAMBLAJE FINAL DE LA MÁQUINA



## IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA HMI

 **MAQUINA DE PRUEBAS DE CONTINUIDAD Y RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ALAMBRE ESMALTADO DE COBRE**



**Información (F1)** **CONTINUAR (F2)**

 **PRUEBAS ELECTRICAS**



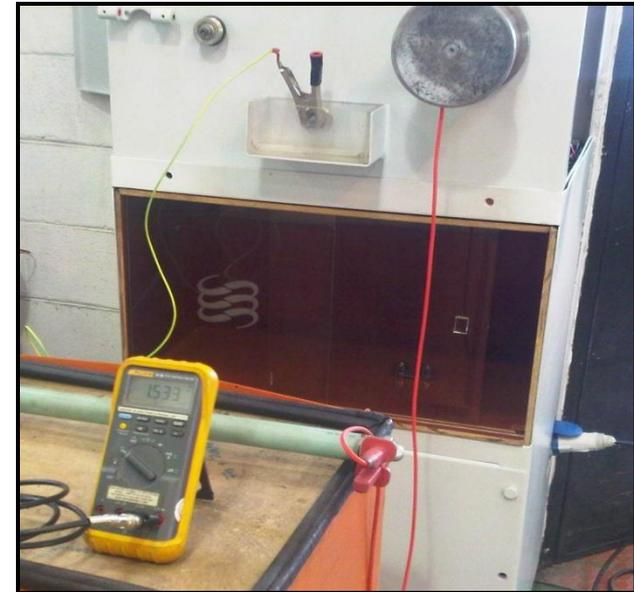
**CERRAR SESION**

# CAPÍTULO IV

## PRUEBAS Y RESULTADOS



# PRUEBAS A LAS FUENTES DE ALTO VOLTAJE



# PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PLC Y TOUCH SCREEN



## CALIBRACIÓN DEL EQUIPO



## VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

“El diseño y construcción de un equipo automático permitirá la realización de las pruebas de continuidad del esmaltado y rigidez dieléctrica del alambre redondo de cobre en menor tiempo y mayor confiabilidad”

# CAPÍTULO V

# CONCLUSIONES

# Y

# RECOMENDACIONES



## CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño y construcción de la máquina de pruebas de continuidad y rigidez dieléctrica del alambre esmaltado, permitiendo de esta manera evitar el uso de los equipos que se utilizan normalmente para los transformadores.
- La calibración para la prueba de continuidad se realizó mediante una comparación de resultados entre el sistema antiguo y el sistema de la máquina, obteniendo valores similares en los resultados.
- El número de fallas en cada muestra de alambre de un mismo carrete en la prueba de continuidad no es el mismo pero si se mantiene en un rango, debido a que cada muestra que se prueba es nueva y el esmaltado no es totalmente continuo.

- La prueba de rigidez dieléctrica del alambre esmaltado antes se realizaba con un equipo que contaba con un voltímetro analógico, por lo que el valor del voltaje de rigidez registrado por el operador no era el exacto. El equipo construido registra el valor exacto del voltaje de rigidez del alambre, permitiendo visualizar este valor en la pantalla.
- El registro de datos de las muestras de alambre se almacenan en una memoria USB externa para una posterior verificación de resultados.
- Se redujo notablemente hasta en un 80% el tiempo de realización de las pruebas, permitiendo de esta manera que se prueben más muestras de alambre sin inconvenientes y con tan solo un operador.

## RECOMENDACIONES

- Realizar mantenimiento preventivo en el tablero de control, para prolongar la vida útil de la máquina.
- Trimestralmente realizar una prueba de TTR al transformador de 18KV, ubicado en la parte inferior de la máquina.
- Verificar siempre la conexión a tierra que debe tener la máquina para la prueba de rigidez dieléctrica.
- No olvidar retirar el esmalte del extremo del alambre antes de ajustarlo al tambor metálico.
- Durante la prueba de continuidad del alambre no tocar el tambor metálico que recoge el alambre, ya que en el tambor tiene el contacto positivo de 1500V DC.

# GRACIAS POR SU ATENCIÓN

