

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

Hallo Vicente, Pruna Edwin, Acosta Javier, Garcés Andrés

Ingeniería Mecatrónica. Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Latacunga, Ecuador.

vdhallo@espe.edu.ec

eppp83@yahoo.com@gmail.com

edxav@hotmail.com

agarcesc7@gmail.com

Resumen – El presente proyecto muestra el diseño y construcción de un equipo automático de pruebas para la verificación de continuidad del esmaltado y rigidez dieléctrica del alambre redondo de cobre. El equipo se construyó con la finalidad de reducir el tiempo de pruebas del alambre de cobre en el laboratorio de control de calidad de la empresa Ecuatrán S.A. El diseño se lo realizó a partir de características para las pruebas eléctricas del alambre mencionadas en la norma NEMA MW-35C. El sistema de control está conformado principalmente por un PLC, un panel touch y varios circuitos electrónicos. Los resultados obtenidos permiten concluir que este equipo optimiza tiempo en las pruebas del alambre, además de disminuir el riesgo de accidentes en los operadores.

Palabras Clave:

Prueba de Continuidad, Rigidez Dieléctrica, Nema MW-35C, Alambre de Cobre.

Abstract – This project shows the design and construction of automatic equipment for testing and verification of continuity of the insulated film and dielectric breakdown of the round wire copper. The equipment was built with the aim to reduce the testing time of the copper wire in the laboratory of quality control of the company ECUATRAN S.A. The design is carried out on the basis of characteristics for the electrical tests of the wire mentioned in the standard NEMA MW-35C. The control system is mainly formed by a PLC, a touch panel and several electronic circuits. The results obtained allow us to conclude that this equipment optimizes time testing of the wire, in addition to decrease the risk of accidents in the operators.

Key words:

Test of Continuity, Dielectric Breakdown, Nema MW-35C, Wire Copper.

INTRODUCCIÓN

El control de calidad de la materia prima es fundamental para garantizar la calidad del producto terminado, razón para que el alambre esmaltado de cobre, parte principal de la bobina de un transformador, este sujeto a las pruebas de continuidad y rigidez dieléctrica establecidas bajo la Norma NEMA MW-35C.

Prueba de continuidad

La prueba de continuidad tiene como elemento principal una fuente de 1500 VDC y tiene como objetivo detectar la discontinuidad del esmaltado del alambre. La norma indica que es permitido un número de 5 fallas como máximo para una muestra de alambre de 30 metros, que debe recogerse a una velocidad de 18m/min [1]. El contacto positivo de la fuente está conectado a un extremo de la muestra de alambre, mientras que el contacto negativo se encuentra conectado a unas escobillas de carbón que hacen el contacto mientras el alambre sigue su trayectoria para ser recogido. El proyecto, bajo indicaciones de la empresa, cuenta con un contacto del polo negativo en una cuba de agua, haciendo las veces de las escobillas de carbono, obteniendo resultados más confiables para la empresa.

Prueba de rigidez

La prueba de rigidez dieléctrica consiste en encontrar el valor del voltaje de ruptura del esmalte. A una muestra de alambre se realiza una trenza con un peso indicado de acuerdo a su calibre. Luego se aplica un voltaje variable de 0 a 18 KV con una velocidad de incremento de 500 V/s [1]. Cuando se produce la ruptura del esmalte, se produce un destello de luz en un punto de la muestra de alambre, indicando que se produjo un cortocircuito. Este valor de voltaje al que se produjo la ruptura es registrado y comparado con lo que indica la norma.

I. DISEÑO DEL EQUIPO

A. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTINUIDAD

Los parámetros fundamentales para la prueba de continuidad según la norma NEMA MW-35C son:

- Fuente de Alimentación: de 1500 VDC
- Longitud de muestra de alambre para prueba: 30m.
- Medio de contacto: Escobillas de Carbono

Debido a que en la empresa han desarrollado un método de prueba mediante contacto por agua se implementó este sistema adicional.

El diseño de la fuente DC se lo realizó a partir de un multiplicador de voltaje. Un circuito multiplicador de voltaje es un arreglo de capacitores y diodos rectificadores que se utiliza con frecuencia para generar altos voltajes de Corriente Directa [2].

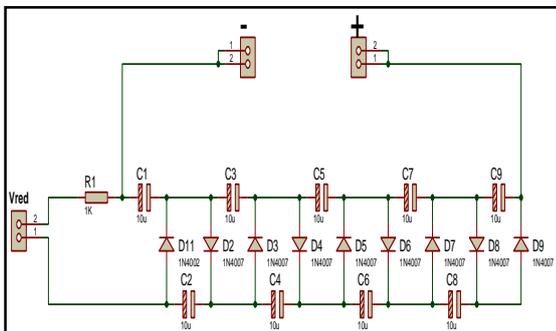


Fig. 1. Diseño del multiplicador de voltaje

A partir de la fuente de 1500 VDC se diseñó un circuito divisor de tensión para obtener un nivel de voltaje adecuado a ser tratado antes de llevarlo a la entrada digital del PLC.

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

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

$R_2 = 1M\Omega$ (Asumimos este valor debido a que esta resistencia es comercial)

$R_1 = ?$

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

(1)

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

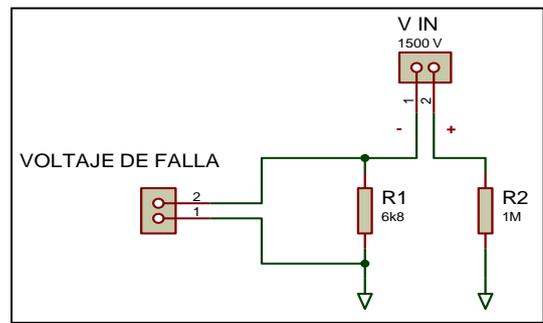


Fig. 2. Circuito divisor de tensión

El circuito comparador de voltaje lleva la señal de falla al PLC y se basa en activar un micro relé dependiendo del nivel de voltaje de entrada.

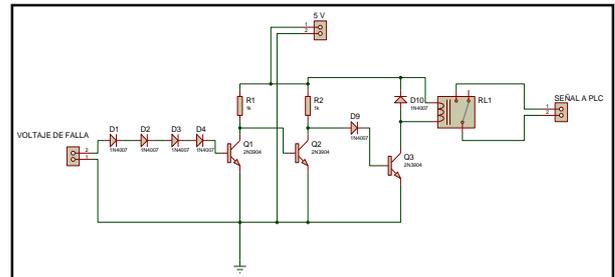


Fig. 3. Circuito comparador de voltaje para detección de fallas

Finalmente debido a la necesidad de confirmar la presencia de alambre durante la prueba de continuidad se diseñó un circuito el cual tiene como elemento principal un sensor óptico que obtiene una señal a partir del movimiento de una de las poleas por las que atraviesa el alambre en el instante de la prueba.

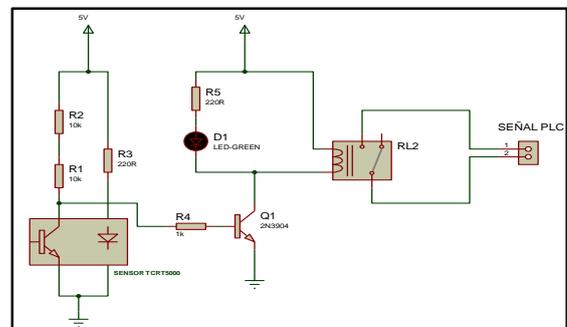


Fig. 4. Circuito para detección de presencia de alambre

B. DISEÑO DEL SISTEMA DE RIGIDEZ DIELECTRICA

Los parámetros fundamentales para la prueba de rigidez dieléctrica según la norma NEMA MW-35C son [1]:

- Frecuencia: 60 Hz.
- Potencia de la transformador elevador: > 500 VA
- Voltaje: Variable (de 0 a 7000V o superior)
- Velocidad de incremento de voltaje: 500 V/s
- Corriente de falla: Rango de 5 a 15 mA.

El diseño del sistema para la prueba de rigidez dieléctrica se lo realizó con el objetivo de detectar el cortocircuito al instante en el que se produce la ruptura del esmalte del alambre.

Este circuito está conformado principalmente por una resistencia Shunt conectada en serie al devanado primario del transformador.

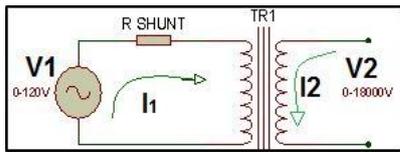


Fig. 5. Conexión de resistencia Shunt

A partir de estos datos se realizaron los siguientes cálculos:

- 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: $m = 150.82$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = m \quad (2)$$

$$I_1 = 1.5A$$

Teniendo la corriente en el devanado primario se calcula el voltaje de caída en la resistencia Shunt.

$$V_{Rshunt} = I_{primario} \cdot R_{shunt} \quad (3)$$

$$V_{Rshunt} = 2.25V$$

Con el valor del voltaje en la R_{shunt} se procede a la siguiente etapa del circuito.

Esta etapa consiste en la rectificación del voltaje alterno que ofrece la R_{shunt} , para obtener un voltaje continuo.

$$V_{RshuntRMS} = 2.25V \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{RshuntRMS} = 3.18V$$

$$V_{RshuntDC} = V_{RshuntRMS} - 2V_{Diodo} \quad (4)$$

$$V_{RshuntDC} = 1.78V$$

Teniendo el voltaje de 1.78V y sabiendo que por cada diodo se produce una caída de voltaje de 0.7 V se calcula el número de diodos necesarios para que el circuito entregue una señal cuando el voltaje de la R_{shunt} sobre pase 1.78V.

$$V_{Diodo} = 0.7$$

$$NumerodeDiodos = \frac{V_{RshuntDC}}{V_{Diodo}} \quad (5)$$

$$NumerodeDiodos = 2.5 \approx 3$$

De esta manera la bobina del micro relé se activa, enviando la señal al PLC y este procede a desconectar el sistema de alto voltaje.

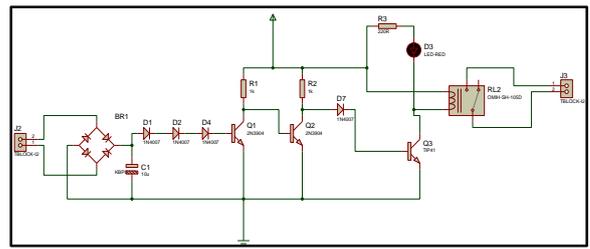


Fig. 6. Circuito detector de sobre-corriente

Ante la necesidad de obtener el valor de voltaje en el que se produce la ruptura del esmalte del alambre se implementó un transformador reductor (110V/9V) en paralelo al devanado primario del transformador elevador (110V/18KV) con el objetivo de obtener un voltaje manejable que se lo rectificó y filtró antes de llevarlo a la entrada analógica del PLC.

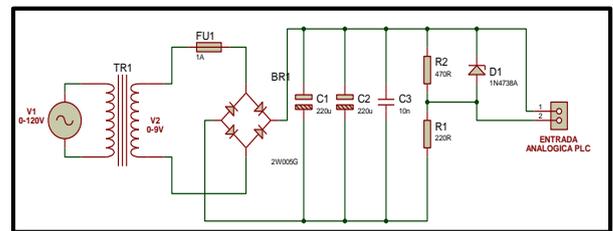


Fig. 7. Circuito de acondicionamiento para entrada analógica

C. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Plc Siemens s7-1200

Un PLC es un sistema de control basado en un microprocesador y los elementos necesarios para que este microprocesador opere de forma conveniente [3].

Se seleccionó el PLC s7-1200 debido a que este posee el número de entradas y salidas ideales para la aplicación.

Tabla 1. Entradas al PLC y tipo de señal.

#	NOMBRE DE VARIABLE	TIPO
1	Sensor Agua	Digital
2	Sensor 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*	Voltaje de Rigidez Dieléctrica	Analógica

Tabla 2. Salidas al PLC y tipo de señal.

#	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



Fig.9. Máquina ensamblada

Comfort panel siemens ktp-400

A demás se seleccionó el Panel Touch Siemens KTP-400 Comfort principalmente por la compatibilidad que tiene con el PLC siemens s7-1200, por la capacidad de almacenamiento de datos y por el tamaño que es ideal para la aplicación. La industria de HMI surgió de la necesidad de estandarizar el monitoreo y control de sistemas a distancia, PLC's y otros mecanismos de control. [4]

Variador de frecuencia Sinamics g110

Para poder cumplir con los requerimientos de la norma NEMA MW-35C en cuanto a la velocidad de ejecución de la prueba de continuidad, es necesaria la utilización de un variador de frecuencia. Este dispositivo nos permite tener flexibilidad en el control de velocidad de la prueba.

La característica principal para la selección del variador de frecuencia es la potencia del motor con el que se va a trabajar.

II. CONSTRUCCIÓN

A. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS

A partir del diseño se elaboraron los diversos circuitos electrónicos en placas de baquelita.

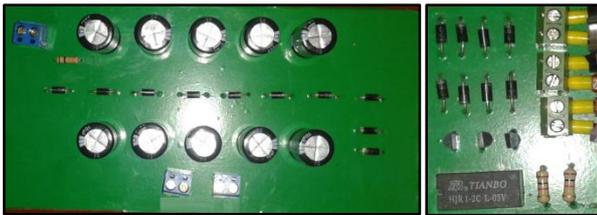


Fig.8 .Circuitos electrónicos

B. CONSTRUCCIÓN DE PARTE MECÁNICA

La primera parte consiste en la fabricación de la estructura superior e inferior por separado. El material utilizado en esta construcción es el acero al carbono AISI 1008 laminado en caliente con espesor de 2.4 mm disponible en la empresa.

C. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA HMI

El programa que se utilizó para el desarrollo de la HMI es el TIA PORTAL V12.0 y la Touch Panel Ktp-400. El software es muy amigable para la programación siendo de gran ayuda en el desarrollo de la aplicación.

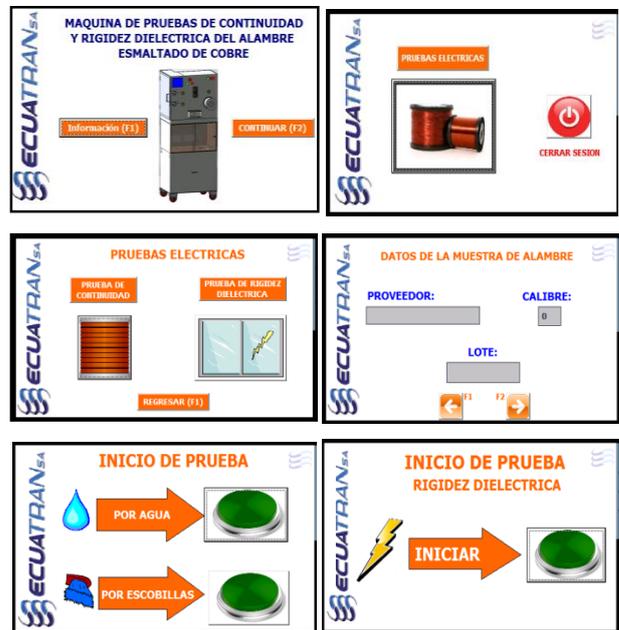


Fig.10. Pantallas de navegación en touchscreen

D. DIAGRAMAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

Los diagramas de funcionamiento inicial, prueba de continuidad y prueba de rigidez se observan a continuación.

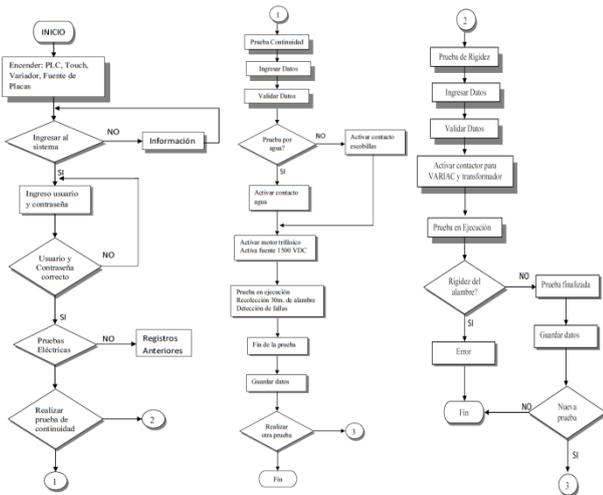


Fig.15. Diagrama de flujo del funcionamiento principal, prueba de continuidad y prueba de rigidez.

III. PRUEBAS Y RESULTADOS.

A. PRUEBAS DEL TRANSFORMADOR

Con la ayuda de un medidor de relación de transformación (TTR) se verificó el voltaje de salida del transformador. El valor medido con el TTR es de 150.85. Teniendo en cuenta que el voltaje de entrada del transformador es 120V, determinamos que el voltaje de salida es de 18 KV. Una vez realizada la conexión del VARIAC y el acople del servomotor al eje del mismo, se verifica el funcionamiento del incremento de voltaje con la ayuda de un multímetro, el voltaje que varía entre 0 – 120V alimenta al devanado primario del transformador.

B. CALIBRACIÓN PRUEBA DE CONTINUIDAD

Para la calibración de la prueba de continuidad del equipo construido se volvió a comprobar que entre los contactos tambor y agua o escobillas exista 1500 VDC $\pm 2\%$. Posteriormente para verificar que el número de fallas detectadas por el equipo construido sea semejante al número de fallas del sistema antiguo se procedió a realizar pruebas bajo las mismas condiciones en ambos sistemas. Se escogió 3 calibres de cables diferentes para someterlos a la prueba de continuidad. En primer lugar se realizó las pruebas mediante el sistema manual utilizado en la fábrica, obteniendo los siguientes resultados:

TABLA 3. Número de fallas obtenidas en distintos calibres (Prueba de continuidad mediante método antiguo).

Calibre AWG #	# de fallas método antiguo
17	15
17	16
17	14
18	0
18	0
18	1
18	0
25	4
25	4
25	6
25	7

TABLA 4. Número de fallas obtenidas en distintos calibres (Prueba de continuidad en equipo nuevo método agua).

Calibre AWG #	# de fallas equipo método agua
17	17
17	16
17	15
17	17
18	0
18	0
18	1
18	1
25	5
25	8
25	9
25	7

TABLA 5. Número de fallas obtenidas en distintos calibres (Prueba de continuidad en equipo nuevo método escobillas).

Calibre AWG #	# de fallas equipo (método escobillas)
17	4
17	3
17	5
17	4
18	0
18	0
18	0
18	0
25	2
25	2
25	3
25	2

Debido a la diferencia de resultados entre el contacto por agua y el contacto por escobillas, la empresa hace énfasis en realizar la prueba únicamente por agua debido a que las fallas detectadas con este tipo de contacto son mucho más confiables para la política de calidad que persigue la empresa.

C. CALIBRACIÓN PRUEBA DE RIGIDEZ

La prueba de rigidez consiste en obtener el valor de voltaje de ruptura del esmalte del alambre, gracias a la entrada analógica del PLC se pudo registrar este valor.

Debido a que la entrada analógica del PLC recibe una entrada en bits se procedió a realizar un escalamiento para visualizar el valor de voltaje en KV, siendo esta la principal calibración para esta prueba.

Se realizó una medición directa en el devanado secundario del transformador con una punta de alto voltaje para comprobar que el escalamiento este correcto, comparando de esta manera el valor visualizado en la pantalla y el valor entregado por el multímetro.

TABLA6. Número de fallas obtenidas en distintos calibres

Voltaje medido (KV)	Voltaje Visualizado en la Pantalla (KV)	% Error
3.1	3.2	3.2
5.4	5.3	1.85
7.7	7.8	1.29
10.3	10.1	1.94
12.5	12.7	1.6
14.6	14.8	1.36
17.8	17.6	1.12
		Promedio de Error : 1.77%

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.
- En la prueba de continuidad la norma NEMA MW-35C indica que el contacto debe ser por escobillas de carbono, pero la empresa no confía en los resultados obtenidos, por lo que la empresa se mantiene en el uso del contacto por agua. El equipo quedó calibrado para este método.
- 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.

- El operador tiene mayor seguridad en la prueba de rigidez dieléctrica gracias al equipo construido. Anteriormente la prueba resultaba peligrosa por el alto voltaje que se suministra a la muestra de alambre para provocar la ruptura del esmalte.
- 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.

REFERENCIAS

- [1] ANSI/NEMA MW 1000/2008.MagnetWire.Revisión 2-2010.
- [2] SPELLMAN (2014). Multiplicador de Voltaje. Recuperado el 14 de Julio de 2013, de <http://www.spellmanhv.com/es/Technical-Resources/Faqs/Technology-Terminology/What-is-a-voltage-multiplier.aspx>
- [3] Peña, J. (2003). Introducción a los Autómatas Programables. Aragon: UOC.
- [4] Escobar, I. (2010). Tecnológico De Estudios Superiores Del Oriente Del Estado De México. Recuperado de <http://www.tesoem.edu.mx/alumnos/cuadernillos/2010.022.pdf>



Vicente Hallo. Es graduado de la Escuela Politécnica Nacional en Ingeniería Eléctrica, cuenta con una Maestría en Energía y Medio ambiente. Director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Latacunga.



Edwin Pruna. Es Ingeniero Electrónico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, actualmente cursa una maestría en Gestión de Energías. Docente del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Latacunga.



Javier Acosta. Es graduado de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE en el año 2014. Áreas de Interés: Automatización de procesos, Software CAD/CAM, Robótica.



Andrés Garcés. Es graduado de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE en el año 2014. Áreas de Interés: Automatización de procesos, Diseño de elementos de máquinas, Robótica, Software CAD/CAM.