

Aparamenta didáctica para enseñanza de inspección termográfica aplicada al mantenimiento eléctrico

Priscila R. A. de Almeida, Raquel P. Pereira y Pablo R. Muniz

Title—Didactic Switchgear for Teaching Thermographic Inspection for Electrical Maintenance

Abstract—Infrared thermography is one of the main techniques of predictive maintenance. It consists of measurements of temperature at a distance and analysis of thermograms. Thermography is widely used in the electrical sector because most electrical equipment presents thermal disturbances before a failure. Currently, there is difficulty in teaching and learning thermographic inspection because practical lessons are usually performed in no suitable teaching equipment. The using actual electrical installations for thermography practical class is not recommended due to the need for the insertion of failures, which is risky for people's safety and can cause arcing and interruption of electricity supply. Thus, in this paper, a prototype was developed for use as a didactic resource for thermography. For this, a set of switchgear was designed and built that simulated common electrical failures: open circuit, poor contact, undersizing of conductors, and interruption of parallel conductors. The assembled didactic switchgear was used in pilot classes with technical and upper-level students from the electricity area who had already taken the class through a real electrical switchgear. All students considered the didactic switchgear better than the real one, with a 100% satisfaction index. From the proposed switchgear and the pilot classes, a tutorial for practical classes and a teaching manual were developed. It was concluded that the didact resource proposed, classes with the proposed set of switchgear, is better than classes in actual facilities, considering the control of teaching resources and the operational safety, as well as people's safety.

Index Terms—infrared imaging, engineering education, electrical fault detection, predictive maintenance, educational technology

I. INTRODUCCIÓN

Laboratorios de enseñanza son reconocidos por permitir el descubrimiento científico y promover una variedad de habilidades que incluyen comunicación, conocimiento, trabajo en equipo y ética [1], [2]. Estudios demuestran que la mayoría

de los profesores y estudiantes creen que las clases prácticas y colaborativas contribuyen a un mejor aprendizaje, y son un componente académico importante de sus cursos [3], [4]. Lecciones prácticas han sido utilizadas durante mucho tiempo para involucrar a los estudiantes en experiencias concretas con objetos y conceptos que mejoran la comprensión de la ciencia [5]. Específicamente para la termografía infrarroja, investigaciones recientes con estudiantes en los niveles de primaria, secundaria y preparatoria han revelado que el uso de imágenes térmicas en actividades de laboratorio conduce a avances significativos en el aprendizaje de procesos físicos y químicos [6]. Las clases prácticas dependen del desarrollo de materiales de apoyo apropiados. Los recursos de instrucción deben ser utilizados junto a métodos de enseñanza para que este conjunto de aprendizaje facilite la recepción, el procesamiento de la información y el aprendizaje.

El objetivo de este artículo es presentar los resultados de clases piloto que evaluaron la enseñanza-aprendizaje de la termografía infrarroja aplicada al mantenimiento predictivo de conjuntos eléctricos, mediante el uso de un conjunto prototipo de conmutadores.

Actualmente hay dificultad en enseñanza de inspección termográfica debido a falta de equipo didáctico para este propósito. No se recomienda aula instalación eléctrica real debido a la necesidad de inserción de fallas, que no es adecuado a seguridad de trabajo. La seguridad en el aula es una preocupación frecuente en el aprendizaje experimental. [4], [7]. A lo largo del año 2017, se consultaron sitios web de proveedores de conjuntos didácticos y las bases de información de patentes de varios países. Sin embargo, estas búsquedas no revelaron resultados para equipos didácticos para este fin. A pesar de la existencia de sistemas de entrenamiento para misiones con soporte de visión termográfica. [8], tampoco se encontró ningún sistema virtual para la calificación en inspección termográfica de equipos eléctricos.

La termografía infrarroja es una de las principales técnicas de mantenimiento predictivo. Consiste en mediciones de temperatura realizadas a distancia con imágenes térmicas y posterior análisis de sus termogramas. [9]–[11]. Es realizada en áreas donde el conocimiento sobre la temperatura y los patrones de calor proporcionarán datos relevantes sobre un sistema, proceso o estructura. La termografía puede ser utilizada para detectar defectos en componentes mecánicos de todo tipo, como recubrimientos refractarios, tuberías y escapes de gas. Es

ampliamente utilizada en el sector eléctrico, ya que la mayoría de los equipos eléctricos presentan discrepancias térmicas antes de una falla [12]. Por lo tanto, es posible detectar defectos incluso cuando todavía son incipientes, lo que reduce los costos de mantenimiento y el tiempo de apagado.

El análisis de los termogramas indicará si hay fallas en el equipo. Como regla general, los puntos calientes representan un defecto probable. Sin embargo, hay casos en que las temperaturas están por debajo de lo esperado [13], [14]. Los defectos más comunes en equipos e instalaciones eléctricas son

TABLA I
ACCIONES RECOMENDADAS PARA MANTENIMIENTO DE EQUIPOS ELÉCTRICOS
SEGÚN LOS RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA [11].

Diferencia de temperatura entre componentes similares	Sobrecalentamiento en relación con la condición estándar del propio equipo.	Acción recomendada
1-3 °C	1-10 °C	Continuar monitoreando
4-15 °C	11-20 °C	Reparar lo antes posible
---	21-40 °C	Monitorear continuamente hasta que la reparación esté hecha.
Arriba de 15 °C	Arriba de 40°C	Reparar inmediatamente

cortocircuito, circuito abierto, desequilibrio de fase, contacto deficiente y sobrecarga. [9]. La corrección de fallas depende de la filosofía de mantenimiento de la empresa, con apoyo de criterios técnicos. Sin embargo, en las comparaciones de temperaturas entre componentes similares, hay recomendaciones de mantenimiento como se muestra en la Tabla I.

En el conmutador educativo propuesto, se implementaron conceptos básicos de termografía que simulaban defectos eléctricos más recurrentes, teniendo en cuenta los criterios diagnósticos presentados en la Tabla I. El conjunto de conmutadores fue diseñado y montado inicialmente sin defectos. El análisis termográfico fue realizado en todo el equipo sin fallas, y luego se implementaron las fallas. La termografía infrarroja realizada en el equipo defectuoso demostró que cada falla implementada era detectable a través de los protocolos de inspección termográfica habituales. Luego, para probar el conjunto didáctico, se realizaron dos clases piloto. Finalmente, fueron desarrollados un tutorial para la lección práctica y un manual de enseñanza para apoyar al maestro.

II. DESARROLLO

A. Metodología para la inserción de fallos en el dispositivo de conmutación

Cualquier cambio en la resistencia eléctrica de un dispositivo que conduce corriente eléctrica aumenta el consumo de energía eléctrica en respecto a la condición de referencia, debido a la mayor disipación de energía. [15]. Las temperaturas del equipo pueden ser observadas a través de la inspección termográfica y las fallas son detectadas a través del análisis de los termogramas recolectados. Las fallas más comunes en componentes

eléctricos que causan cambios en los patrones de temperatura son cortocircuitos o circuitos abiertos, interrupción de cables en paralelo, desequilibrio de carga, instalación incorrecta, contacto deficiente y sobrecargas [16]. A continuación, se detallan los fallos insertados en la aparamenta y el método utilizado:

1) Circuito abierto

La falta de flujo de corriente hace que un conductor de circuito abierto presente un patrón térmico más frío en comparación con un conductor adyacente bajo carga [9]. Para insertar este fallo, se utilizaron interruptores, interrumpiendo la circulación de la corriente eléctrica.

2) Instalación inadecuada

Las capacidades de corriente eléctrica de cables eléctricos y otros dispositivos están directamente relacionadas con su disipación térmica y condiciones de operación. Durante períodos prolongados de funcionamiento adecuado, la corriente transportada por cualquier conductor debe ser tal que no se exceda la temperatura máxima de servicio continuo del cable [17]. Si el conductor es de sección insuficiente o las condiciones de instalación (factor de agrupación, ubicación de la instalación, protección, caída de voltaje, temperatura atmosférica, etc.) son inadecuadas, se sobrecalentará, lo que llevará su aislamiento a una condición de riesgo debido al aumento del efecto Joule.

Para permitir que el alumno observe la diferencia de temperatura en dos conductores de diferentes calibres, bajo la misma corriente y correctamente dimensionado, se reemplazó un cable de sección transversal de 2,5 mm² por un conductor de 1 mm². Los cables adyacentes a este conductor son de 2,5 mm². Se espera que, incluso cuando esté correctamente dimensionado, el cable de 1 mm² se caliente más de un conductor de 2,5 mm² bajo la misma corriente, ya que tiene una mayor resistencia eléctrica a la conducción de la corriente. Se decidió no reducir demasiado la sección de los cables, ya que la degradación de los conductores sería muy grande y tendrían que mantenerse con frecuencia.

3) Interrupción de cables paralelos

Los conductores paralelos de la misma fase pueden producir un perfil térmico inesperado. Si hay un mal contacto en uno de los cables o si el conductor está desconectado, la corriente será significativamente más grande en cables con buenas conexiones y menor en cables con conexiones defectuosas. Por lo tanto, puede haber una mayor disipación de energía en buenas conexiones que en malas conexiones [14].

Se utilizaron dos cables para cada fase del interruptor diferencial instalado en la aparamenta. Un interruptor de desconexión, cuando está abierto, interrumpirá la conducción de la corriente en uno de los cables paralelos de fase S.

4) Mal contacto

Esta falla está asociada con una disminución en el área de conducción de flujo de corriente entre las conexiones eléctricas [18], que podría haber sido causada por baja presión entre los contactos, contactos oxidados o desgastados, una soldadura mal

formada u otros factores [19].

El contacto deficiente se produjo al bajar la superficie del conector tipo ojal a aproximadamente un 25% del área original. Para ello, se insertó papel aislante Nomex entre las dos partes [20], como se muestra en Fig. 1.

Para determinar si el contacto deficiente se realizó con éxito, las resistencias eléctricas de los cables fueron medidas con un milímetro y sus resultados fueron comparados a las resistencias de los cables sin defectos. En todos los casos, el aumento de la resistencia del conductor fue superior al 64%.

Como ilustración, Fig. 2 muestra el termograma obtenido en los conductores de entrada y salida de la aparatura desarrollada después de la inserción de fallas. Se observa que la diferencia de temperatura entre los puntos Sp1 y Sp2 es de 47,2 °C. Ambos conductores están sujetos a las mismas condiciones operativas y son constructivamente similares, por lo que se esperarían temperaturas similares si no hubiera fallas. Por lo tanto, esta discrepancia de temperatura indica la existencia de una falla. El calor generado es más grande donde se localiza la falla, y una parte de la energía térmica se propaga por conducción o convección hacia los alrededores. [15]. En este ejemplo, se ha insertado un mal contacto en el conductor identificado por el punto Sp1.

B. Diseño de la aparatura y montaje sin defectos

Para insertar un número satisfactorio de fallas y considerando la cantidad de componentes requeridos, se decidió ensamblar un circuito de arranque del motor eléctrico trifásico (Y- Δ) estrella-triángulo. Teniendo en cuenta las características de la fuente de alimentación y los circuitos de carga de los laboratorios de clase en los que se utilizaría la aparatura didáctica, sus características de diseño son: trifásico, tensión nominal de 220 V, corriente máxima de 20 A, potencia máxima de 7,6 kVA.

Por lo tanto, para garantizar el correcto funcionamiento del equipo de conmutación, se realizó una inspección termográfica con una cámara termográfica Flir E60, cuyas imágenes se analizaron a través del *software* Flir Tools.

Después de la ejecución y el registro termográfico de esta etapa, los fallos podrían insertarse en el conjunto didáctico.

C. Practical class effectiveness proofing

Para verificar si la aparatura desarrollada en este artículo proporciona una mejor educación de inspección termográfica, se desarrolló una clase piloto cualitativa con estudiantes de diferentes niveles de educación, de ambos sexos y diferentes edades, que preferiblemente han tomado clases previamente con el método habitual de insertar fallas en una instalación eléctrica real, permitiendo una comparación cualitativa entre estos dos métodos.

El objetivo es comparar el método habitual con el método de enseñanza propuesto, desde el punto de vista de los posibles usuarios estudiantes de la aparatura.

Fig. 3 presenta el diagrama de energía eléctrica de la aparatura. El contactor C1 alimenta la carga. El contactor C2

conecta la carga en Wye (Y) y el contactor C3 la conecta en Delta (Δ).

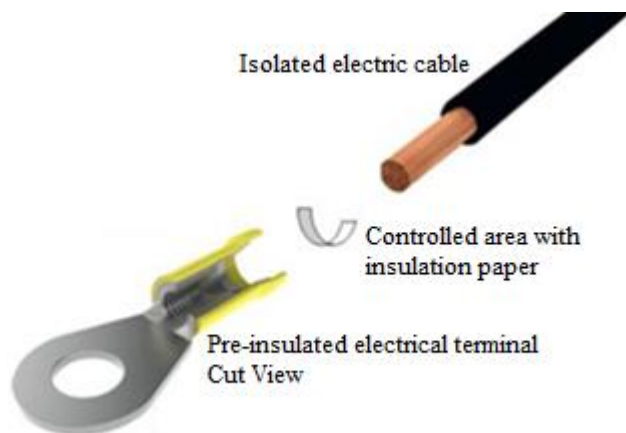
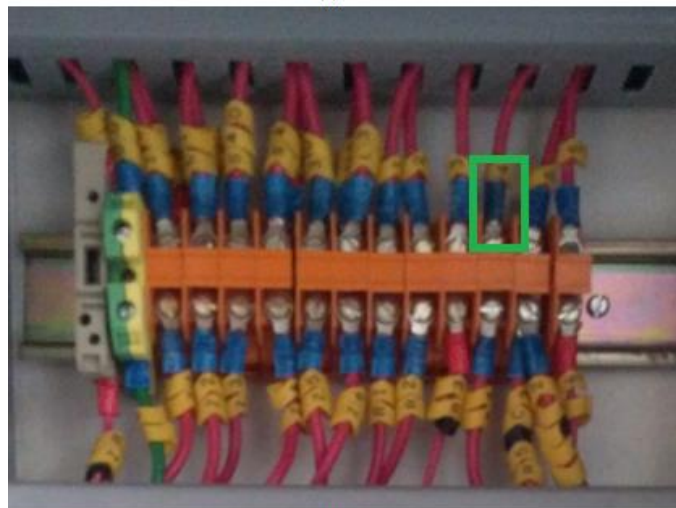


Fig. 1. Manipulación del área de contacto entre el cable conductor y el terminal de contacto. Reimpreso con permiso de [20].



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Termograma que muestra un mal contacto en el conductor de salida de la aparamenta. (b) Imagen de la instalación real; el rectángulo identifica la ubicación del contacto deficiente en el dispositivo.

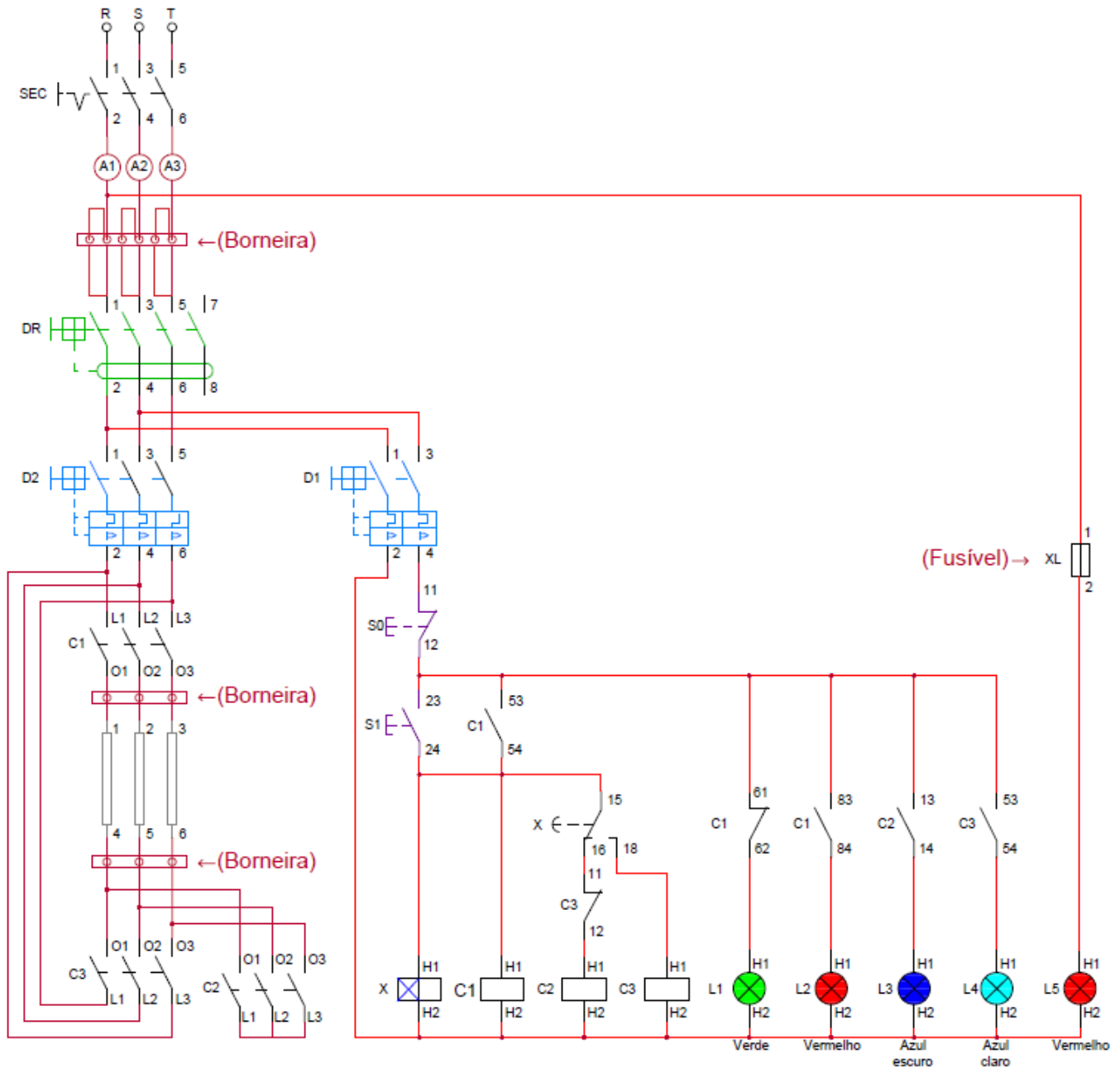


Fig. 3. Diagrama de energía de la aparamenta eléctrica.

III. RESULTADOS

A. Aparamenta terminada

La inspección termográfica realizada en la aparamenta mostró que todas las fallas insertadas, excepto la interrupción de cables en paralelo, pueden ser detectadas mediante la inspección por termografía bajo aplicación de protocolos de inspección habituales, y que no era necesario realizar ajustes. Aunque es difícil de percibir, debido a que presenta un aumento de temperatura de 2,3 K, la falla interrupción de cables en paralelo se puede usar como un recurso de instrucción porque muestra que las fallas se pueden ocultar

mediante la irradiación de calor de otros dispositivos cercanos. Además, el análisis termográfico indicó que las fallas se implementaron de manera asertiva. De esta manera, se realizó la organización final del aparato y sus partes fueron identificadas físicamente. Fig. 4 muestra la aparamenta externa e internamente.

B. Clases piloto

Las clases piloto se llevaron a cabo el 7 y 10 de noviembre de 2017, para las clases de mantenimiento industrial en los cursos de Ingeniería Eléctrica y Técnico Eléctrico, en el

Instituto Federal de Espírito Santo, Campus Vitória. Treinta y uno estudiantes asistieron a la clase, de ambos sexos, mujeres (26%) y hombres (74%), y de 17 a 41 años, como se puede ver en Fig. 5. Este rango de edad y proporción de

género son similares a las individualidades de estudiantes brasileños de colegios y universidades en 2016 [21], datos más recientes disponibles.

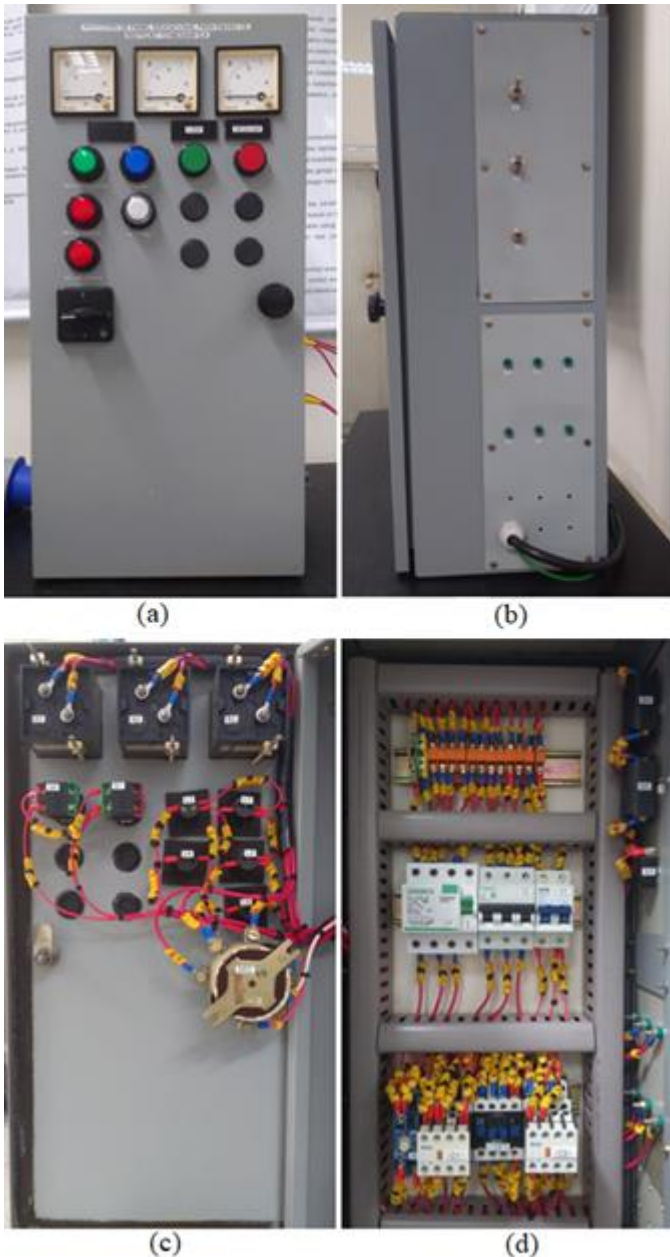


Fig. 4. Aparamenta terminada. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral. (c) Dispositivos conectados a la puerta de la unidad de control. (d) Dispositivos dentro de la aparamenta.

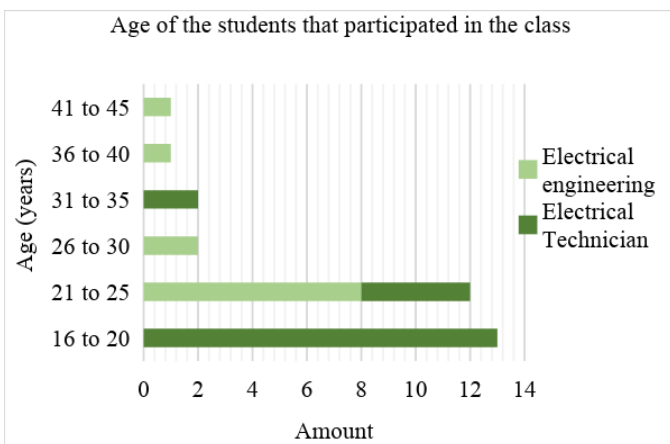


Fig. 5. Edad de los alumnos que participaron en clase.

La clase se realizó mediante el método didáctico de elaboración conjunta, donde se expusieron la aparamenta y el grupo, los estudiantes y los autores, se identificaron los componentes, se analizó el funcionamiento del circuito, se realizó el análisis termográfico del dispositivo y asimismo el proceso. El proceso conjunto de elaboración por parte de los estudiantes y maestros generalmente conduce a un resultado educativo que podría ser útil para las clases. [22]. Al final de la clase, los estudiantes llenaron un formulario de evaluación sobre la aparamenta didáctica. Este procedimiento puede alcanzar un alto nivel de calidad en el aprendizaje y en la construcción de nuevos productos [23]. Las preguntas cualitativas en las que los estudiantes deben estar de acuerdo o en desacuerdo fueron:

- ¿La aparamenta le permitió visualizar, en la actividad práctica, los síntomas defectuosos detectables por inspección termográfica? (*Hipótesis: el prototipo es didácticamente efectivo*)
- En un proceso práctico, ¿puede indicar que lo que ha visto aquí será útil? (*Hipótesis: la aparamenta emula situaciones reales*)
- ¿Es la cantidad de fallas insertada suficiente para un buen aprendizaje? (*Hipótesis: la aparamenta muestra suficiente variedad de situaciones*)
- ¿Ha tenido alguna experiencia con la inspección termográfica antes? (*Hipótesis: la aparamenta puede compararse con el método de enseñanza actual*)
- Comparando los recursos didácticos utilizados en las dos clases sobre termografía, ¿cuál fue mejor?

Las respuestas del formulario mostraron que todos los estudiantes declararon que la aparamenta les permitía visualizar, en la actividad práctica, los síntomas defectuosos detectables por inspección termográfica. Dijeron que esta lección será útil en un proceso práctico. Además, todos los estudiantes consideraron la cantidad de fallas insertadas (ocho fallas) suficiente para un buen aprendizaje.

Antes de que se llevara a cabo la clase piloto, aproximadamente el 94% de los estudiantes ya habían tenido contacto con la técnica de termografía por clases en instalaciones reales. Estos estudiantes participaron en una lección práctica sobre termografía que consistió, brevemente, en obtener una imagen termográfica de uno de los contactores de un panel eléctrico que funcionaba correctamente, luego aflojando una de las conexiones de fuerza del contactor, insertando un contacto deficiente, repitiendo la inspección termográfica, y analizando los resultados. Hubo dos estudiantes que no asistieron a la clase de práctica de termografía anterior, pero los 29 estudiantes restantes consideraron la aparamenta propuesta en este documento como un mejor recurso didáctico.

Otras observaciones cualitativas deben ser grabadas:

- La clase se desarrolló completamente sin la necesidad de intervención física en los circuitos de alimentación, como se suele hacer en instalaciones reales. Todos los defectos fueron insertados y eliminados con control externo desde la aparamenta, de forma segura. La inserción de fallas a través de una manera controlada garantiza que no se produzcan

chispas o variaciones en la resistencia de la conexión, un hecho común al intentar insertar fallas en instalaciones reales.

- Las fallas pueden ser insertadas y eliminadas rápidamente, con efecto inmediato, de manera segura y didáctica. Tal procedimiento en instalación real conllevaría riesgos de descarga eléctrica o arco eléctrico, o interrupciones en el suministro de energía a la instalación.

- El prototipo podría transportarse y colocarse en condiciones ergonómicas adecuadas.

- La aparatenta tiene su propia protección residual diferencial (DR), bajo nivel de corriente de cortocircuito, a diferencia de los sistemas de potencia reales.

Las sugerencias de los estudiantes hechas a lo largo de la clase piloto fueron ponderadas y algunas de ellas fueron aceptadas, mejorando aún más la lección práctica para los estudiantes

C. Tutorial del estudiante para la clase práctica y manual del maestro

Para guiar al maestro durante las clases, se desarrollaron un tutorial para el alumno para las clases prácticas y un manual del maestro de la aparatenta. El tutorial recomienda que el análisis termográfico del prototipo didáctico se realice primero con la carga conectada en configuración Wye y luego con la carga conectada en configuración Delta, ya que, después de esta conmutación, las fallas se hacen más visibles debido al aumento de la corriente eléctrica en aproximadamente tres veces, lo que se consideró un buen recurso didáctico.

En el manual de enseñanza, se presentan la ubicación de las fallas, las fallas introducidas, los síntomas esperados y los termogramas obtenidos durante el desarrollo del tutorial. Los termogramas adquiridos permiten que el análisis termográfico se realice comparando elementos similares del circuito o el estándar térmico de la aparatenta sin fallas al termograma con las fallas insertadas. Fig. 6 (a) y (b) muestran los termogramas de un contactor realizado con carga en estrella en el panel con y sin fallas, respectivamente. En Fig. 6 (a), se observa que las temperaturas en las conexiones de los cables de alimentación a los terminales de alimentación del contactor, puntos Sp1 y Sp2, están cercanas, lo que indica que no hay fallas. Al observar Fig. 6 (b), se puede notar una diferencia de 20,5 °C entre Sp3 y Sp4, lo que indica un posible fallo. Se insertó un mal contacto a esta conexión. El análisis de los dos termogramas juntos muestra una discrepancia de 35,9 °C entre Sp2 y Sp4 que representa el mismo conductor de circuito. A partir de estos datos, se deduce la existencia de una falla en este conductor. En el manual del maestro, el análisis termográfico de todos los termogramas del panel con y sin falla insertada, bajo cargas conectadas en estrella y delta, se describen en detalle.

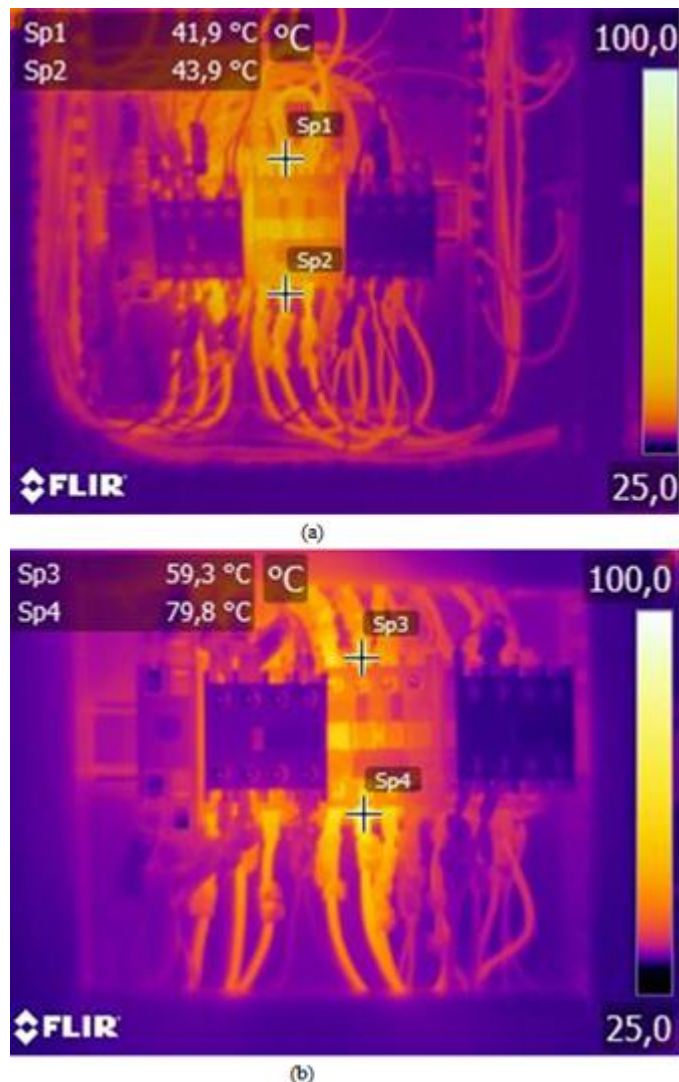


Fig. 6. Termograma del contactor C2 (a) bajo carga conectada en estrella y panel sin falla y (b) bajo carga conectada en estrella y panel con mal contacto.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo, se presentó la prueba didáctica de un prototipo de aparatenta eléctrica para enseñanza y aprendizaje de inspección termográfica aplicada al mantenimiento eléctrico en un entorno educativo. Para esto, se diseñó y construyó un panel eléctrico para alimentar eléctricamente una carga estrella-delta y simular fallas eléctricas comunes detectables por termografía infrarroja.

Circuitos abiertos, subdimensionamiento de conductores y contactos defectuosos se insertaron en la aparatenta. Estos fallos son detectables a través de la aplicación de los protocolos de análisis habituales. Además, la interrupción de cable paralelo requiere más esfuerzo por parte del estudiante, como un buen recurso de instrucción para mostrar que las fallas pueden ser enmascaradas por la irradiación de calor de otros dispositivos.

La inspección termográfica realizada en la aparatenta también revela al estudiante que el aumento de temperatura está relacionado con el aumento de la corriente eléctrica en el dispositivo inspeccionado. Este efecto se reproduce



Priscila Ribeiro Amorim de Almeida nació en Iúna, ES, Brasil, en 1994. Recibió el título de Ingeniería Eléctrica B.Sc. Licenciada en 2018 por el Instituto Federal de Espírito Santo, Brasil.



Raquel Perim Pereira nació en Vitória, ES, Brasil, en 1999. Ella es estudiante de técnica eléctrica en el Instituto Federal de Espírito Santo, Brasil.



Pablo Rodrigues Muniz nació en Vitória, ES, Brasil, en 1980. Recibió tanto el B.Sc. Grado en 2002 y el M.Sc. Licenciado en 2006 por la Universidad Federal de Espírito Santo, Brasil y Ph.D. egresado de la Universidad Federal de Bahía, Brasil, en 2014. Actualmente es profesor en el Instituto Federal de

Espírito Santo, Brasil, y sus intereses de investigación son la eficiencia energética y el mantenimiento predictivo mediante termografía infrarroja.