UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Mantenimiento y pruebas a equipos eléctricos de distribución y protección

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniera Eléctrica Electrónica

P R E S E N T A

Brenda Romero Alvarez

ASESOR DE INFORME

Ing. Rodolfo Soto Carrasco

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

Índice

Introducción y Objetivo 3

Antecedentes 3

Definición del problema o contexto de la participación profesional 6

- *Interruptores electromagnéticos* 6
  - → Prueba de resistencia de aislamiento 7
  - → Prueba de resistencia de contactos 8
  - → Prueba a unidad de disparo 10
- *ATS* 12
  - → Resistencia de contactos de utilidad 15
  - → Resistencia de contactos en fuente secundaria o de emergencia 15
  - → Resistencia de solenoide 16
- *PDU* 17
  - → Resistencia de contactos a interruptor principal 17
  - → Resistencia de aislamiento 17
  - → Relación de transformación 18

Metodología utilizada 18

Teoría de la prueba de resistencia de aislamiento. 18

Teoría de relación de transformación 21

Teoría de la prueba de resistencia de contactos. 22

Teoría de la prueba a unidad de disparo. 23

Teoría de la resistencia de un solenoide. 23

Conclusiones 25

Referencias 29

Introducción y Objetivo

Durante un año y diez meses me he encontrado laborando para una empresa, la cual surgió de la visión de un campo laboral mayoritario en un futuro no lejano para el mantenimiento preventivo y correctivo de equipo eléctrico para conocer las condiciones con las cuales opera el equipo actualmente y así poder garantizar el suministro de energía eléctrica en el sistema de una forma segura y confiable; específicamente la empresa tiene como mercado el área de los DATA CENTER, los cuales, con la evolución de la tecnología son cada vez más presentes, importantes e indispensables. Un claro ejemplo, es el avance que se ha tenido en el campo bancario, puesto que la mayoría de sus transacciones ya son virtuales y se debe tener un sistema eficiente y robusto para evitar pérdidas millonarias, por supuesto, sin un sistema eléctrico electrónico eficiente, robusto y seguro, no podría ser posible.

El presente trabajo tiene por objetivo describir las diferentes actividades profesionales que desarrollo como ingeniera eléctrica electrónica en dicha empresa, la cual, además de brindar el mantenimiento preventivo y correctivo a equipo eléctrico de Baja Tensión (BT) y Media tensión (MT), realiza la venta de refaccionamiento para dichos equipos.

En este documento se mostrarán los diferentes procedimientos que se utilizan para el mantenimiento y pruebas eléctricas en interruptores electromagnéticos, Automatic Transfer Switch (ATS), Power Distributor Unit (PDU), transformadores de potencia. Se busca mostrar la capacidad de resolución de problemas como ingeniera eléctrica que he logrado durante el tiempo laborado en dicha empresa para mantener los equipos en buen estado y con un funcionamiento eficiente.

Antecedentes

En la empresa donde desarrollo mis actividades, nos enfocamos en darle mantenimiento a los equipos eléctricos en las subestaciones eléctricas en centros de datos ya que aproximadamente un ochenta por ciento del mantenimiento y de las pruebas eléctricas implican evaluar la integridad del aislamiento y es muy importante para garantizar el suministro de energía eléctrica y no perder la carga, además de garantizar la prolongación de su vida útil.

Para un data center ("instalación física que las organizaciones utilizan para alojar sus aplicaciones y datos críticos"[1]), se tiene una subestación de tipo interior y de maniobra, estas subestaciones se encuentran dentro de un edificio o en el interior de un predio, regularmente son

[1] Definición de CISCO recuperada de: https://www.cisco.com/c/es_mx/solutions/data-center-virtualization/what-is-a-data-center.html

subestaciones que distribuirán la energía a diversos elementos eléctricos dependiendo de las necesidades que se tengan.

Una subestación eléctrica se compone de diversos elementos, como son:

- Apartarrayos: protegen los aislamientos de las instalaciones contra las sobretensiones transitorias producidas por descargas atmosféricas o equipos de maniobra, permite el aislamiento físico de la instalación.
- Transformadores de potencia: "máquina eléctrica estática que transfiere energía eléctrica de un circuito a otro conservando la frecuencia constante. Opera bajo el principio de inducción electromagnética y tiene circuitos eléctricos que están enlazados magnéticamente y aislados eléctricamente".[2] Su principal función es para realizar la variación de los valores de tensión de un circuito de corriente alterna, manteniendo su potencia.
- Interruptores de potencia: permite conducción o interrupción de corriente en un circuito bajo condiciones normales de carga o falla.
- Transformadores de instrumento: modifican y transforman de manera precisa la magnitud de la corriente o tensión de un circuito a valores menores manejables y seguros para su utilización en instrumentos que requieran de esas magnitudes y poder realizar funciones de medición y protección.

[2] Definición de SDINDUSTRIAL recuperada de: https://sdindustrial.com.mx/blog/subestacion-electrica-que-es/

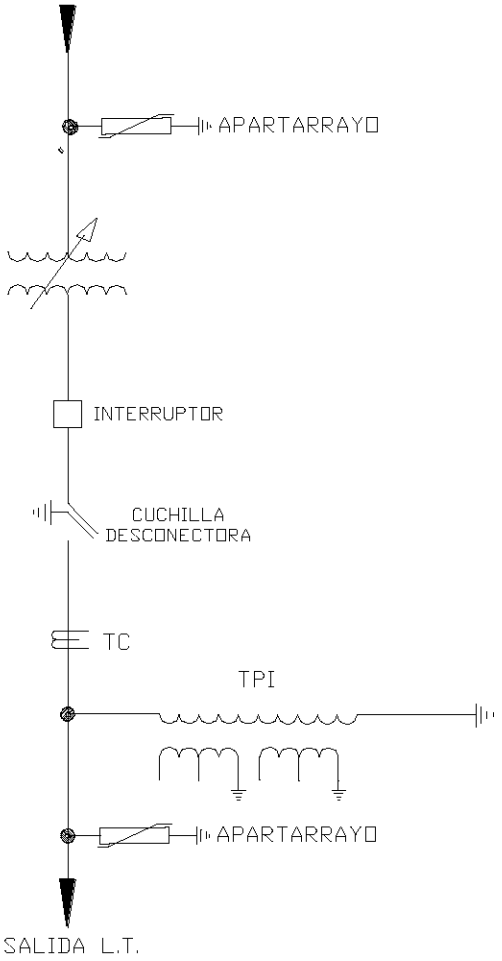


Figura. Ejemplo de Diagrama unifilar.

Algunos otros elementos importantes que se mencionarán en el documento y que son necesarios en una subestación eléctrica (cuando el proyecto así lo requiera) son:

- ATS (Automatic Transfer Switch): permite realizar la conmutación de potencia de una instalación receptora entre la red de compañía (utilidad) y la que parte de un generador eléctrico (emergencia). Los centros de datos, hospitales, fábricas y una amplia gama de otros tipos de instalaciones que requieren un tiempo de actividad continuo o casi continuo, por lo general, "utilizan una fuente de energía de emergencia (alternativa), como un generador o una fuente de energía de respaldo cuando su fuente de energía normal (primaria) no está disponible".[3]

[3] Recuperada de: https://www.eaton.com/mx/es-mx/products/low-voltage-power-distribution-control-systems/automatic-transfer-switches/automatic-transfer-switch-fundamentals.html

- PDU (Power Distributor Unit): "una unidad de distribución de energía es un dispositivo con múltiples salidas que se utiliza para controlar y distribuir la energía eléctrica, principalmente a los racks de ordenadores y dispositivos de red instalados dentro de un centro de datos"[4].
- Relevadores: "interruptores compactos y autónomos que activan un cortocircuito cuando se detecta una falla en condiciones de sobrecorriente, sobretensión, sobrefrecuencia y subfrecuencia, y flujo de potencia inverso, etc".[5]

Definición del problema o contexto de la participación profesional

Parte de mis actividades en la empresa donde laboro es realizar pruebas y mantenimiento a diferentes equipos eléctricos, estas pruebas dependerán del equipo, por ejemplo:

- *Interruptores electromagnéticos:*

Los interruptores electromagnéticos son dispositivos electrónicos que se utilizan en circuitos de media y alta tensión para controlar la electricidad de manera automática. Están diseñados para operar de forma ininterrumpida, alcanzando así los niveles óptimos de calidad y seguridad. Un interruptor de este tipo "está compuesto por embobinados primarios y secundarios, imanes permanentes, contactos, varillas y muelles".[6] Se utilizan principalmente en subestaciones de centros de datos debido a que ofrecen una protección avanzada de activación automática a través de los contactos de cierre y apertura para que el relevador permita aislar los distintos elementos de la subestación en caso de una falla y así garantizar la protección de la carga.

Antes de realizar la prueba es necesario:

1. Verificar que el equipo esté completamente desenergizado para evitar electrocución.
2. Sacar el interruptor electromagnético del gabinete del tablero eléctrico.
3. Quitar las cámaras de arqueo y limpiarlas con algún químico dieléctrico (lexpure), después de una inspección visual (observar que no se encuentren flameos o laminillas en mal estado) para, posteriormente, colocarlas de nuevo.
4. Quitar la grasa y algún otro químico que tengan los contactos del interruptor.

Las pruebas que se realizan al interruptor son:

---

[4] Definición de TIER4 recuperada de: https://www.tier4.com.mx/que-es-la-unidad-de-distribucion-de-energia-pdu-y-el-interruptor-de-transferencia-automatica-ats/

[5] Definición de TE CONNECTIVITY recuperado de: https://www.te.com/es/products/relays-and-contactors/relays/protective-relays.html?tab=pgp-story

[6] Definición de ELECTROPREGNTAS recuperado de https://electropreguntas.com/interruptor-electromagnetico-caracteristicas-y-usos/#google_vignette

→ Prueba de resistencia de aislamiento: "esta prueba se realiza aplicando un voltaje (específicamente uno de corriente continua (CC) altamente regulado y estabilizado) a través de un dieléctrico, midiendo la cantidad de corriente que fluye a través de este y luego calculando (usando la Ley de Ohm) una medición de la resistencia".[7] La medida de resistencia es en [MΩ].

Las especificaciones de pruebas de mantenimiento para equipos y sistemas de distribución de energía eléctrica de la Asociación Internacional de Pruebas Eléctricas (The InterNational Electrical Testing Association, NETA) proporcionan valores realistas y útiles, siendo así que los valores aceptables de resistencia de aislamiento dependen del equipo que estemos probando.

Tensión nominal del equipo	Tensión de prueba de CC de resistencia de aislamiento mínima	Resistencia de aislamiento mínima recomendada en [MΩ]
250	500	25
600	1000	100
1000	1000	100
5000	2500	1000
15000	2500	5000

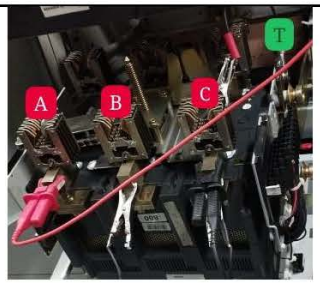
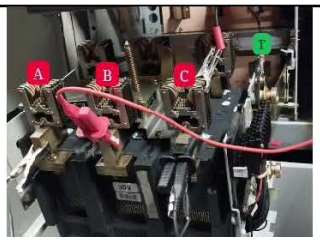
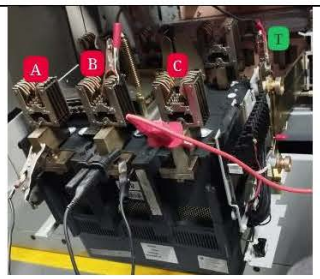
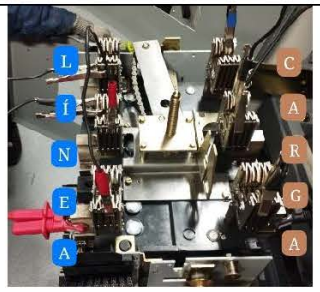
Tabla 1. Tensión de prueba y valores de aislamiento mínimos recomendados por NETA[8].

La resistencia de aislamiento es importante ya que es un indicador de la calidad del aislamiento utilizado en un circuito eléctrico el cual exteriorizará un aislamiento deficiente el cual puede dar lugar a una corriente de fuga, que puede causar problemas graves más allá de afectar al sistema eléctrico pues pueden suceder incendios, electrocución, etc., que afectan directamente al usuario.

Para realizar la prueba:

1. Se utiliza el equipo de medición MEGGER modelo MIT525 el cual ofrece pruebas de 250[V], 500[V], 1[kV], 2.5[kV], 5[kV] 10[kV].
2. Se realizarán 4 diferentes conexiones con cierto estado en el interruptor (cerrado o abierto):

[7] Recuperado de https://www.kin.energy/blogs/post/pruebas-de-aislamiento-el%C3%A9ctrico-y-su-importancia
[8] Tabla recuperada de STANDARD ANSI/NETA ATS-2021

Conexión de fases	Estado del interruptor	Imagen de referencia
A vs B+C+GND	Cerrado	
B vs A+C+GND	Cerrado	
C vs A+B+GND	Cerrado	
Línea vs Carga	Abierto	

3. En cada conexión se observará el valor de la resistencia que se tiene entre las fases, la cual sabemos que un valor de [MΩ] o mayor será aceptable.

→ Prueba de resistencia de contactos: esta prueba se realiza aplicando una Corriente Continua (CC) altamente regulada y estabilizada, midiendo la cantidad de resistencia que posee el contacto entre la parte de línea y carga del interruptor. La medida de resistencia es en [μΩ].

El equipo de medición que utilizamos tiene dos cables de corriente y dos cables de potencia debido a que una medición de cuatro hilos de CC anula los errores gracias al hilo del cable de la sonda y los valores de resistencia de contacto en la lectura final, lo que garantiza mediciones más precisas.

En la siguiente imagen se representa la medición de los cuatro hilos:

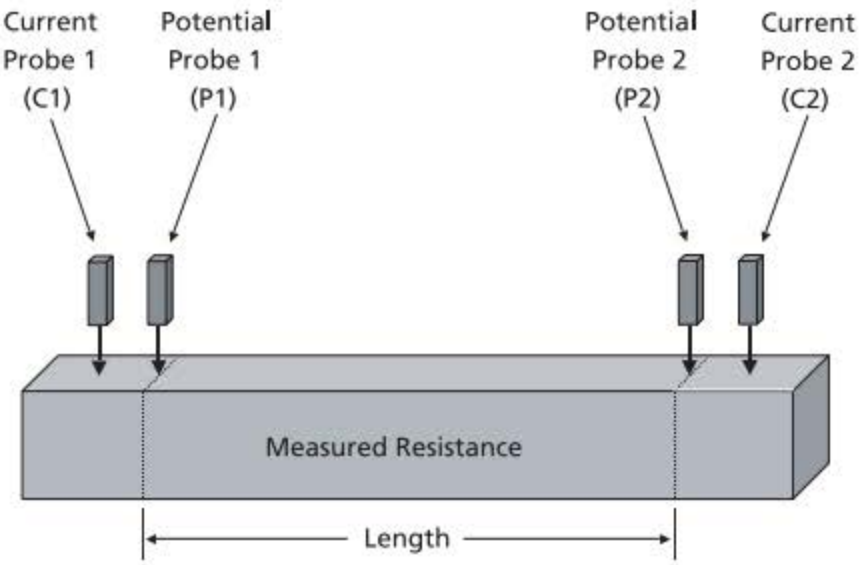


Figura. Ejemplo simplificado de la medición de cuatro hilos[9].

La medición de resistencia de contactos es muy importante debido a que son necesarias para evitar daños a largo plazo en equipos existentes y para minimizar la energía que se pierde en forma de calor, por la corrosión química, la vibración, la pérdida de par entre las superficies de contacto, el agotamiento o la manipulación incorrecta, lo que reduce además, la eficiencia del interruptor y puede conllevar fallas en un sistema de transmisión activo, lo que produce la pérdida de energía en una subestación.

"Ellas muestran cualquier restricción en el flujo de corriente que puede impedir que una máquina genere su potencia plena o permitir que fluya corriente insuficiente para activar dispositivos de protección en caso de una falla"[10].

Para realizar la prueba:

1. Se utiliza el equipo de medición MEGGER modelo DLRO10HDX el cual ofrece pruebas de 100[μA] con rango de resistencia de 0-2.5 [kΩ] y 0-250 [Ω], 1[mA] con rango de resistencia de 0-25 [Ω], 10[mA] con rango de resistencia de 0-2.5 [Ω], 100[mA] con rango de resistencia de 0-250 [mΩ], 1[A] con rango de resistencia de 0-25 [mΩ], 10[A] con rango de resistencia de 0-2.5 [mΩ].
2. Se realizarán 3 diferentes pruebas donde una punta estará en cada fase de carga con la otra punta en la misma fase en el lado de carga, se realizará con el interruptor cerrado:

[9] Recuperado de "Guía para mediciones de baja resistencia" 2017 Autor Marca Megger, https://www.voltimum.es/sites/www.voltimum.es/files/pdflibrary/dlro-guide_eses.pdf
[10] Ibid.

Conexión de fases	Estado del interruptor	Imagen de referencia
A (Línea y carga)	Cerrado	
B (Línea y carga)	Cerrado	
C (Línea y carga)	Cerrado	

3. En cada conexión se observará el valor de la resistencia que se tiene en las fases, la cual sabemos que siendo un valor de [μΩ] será aceptable.

→ Prueba a unidad de disparo: este componente puede ser electromecánico o de estado sólido (electrónico) y es muy importante en un interruptor ya que su principal función es disparar o abrir el mecanismo en caso de que exista una falla o sobrecarga en el circuito.

"El comportamiento operacional que va a tener el dispositivo en lenguaje de protecciones eléctricas se conoce como curva de protección, es decir, bajo cuánto flujo de corriente y en qué tiempo debe operar. El comportamiento de esas curvas de operación en un interruptor con unidad de disparo va a depender de las funciones que tenga integradas la unidad de disparo, o sea las funciones LSIG"[11](Long time, Short time, Instantaneous, Ground).

Para esta prueba se deben tener los tiempos de disparo del interruptor en diferentes tiempos que se tenga ante una falla o sobrecorriente:

- ❖ Instantáneo (Instantaneous).
- ❖ Tiempo corto (Short time)
- ❖ Tiempo largo (Long time)
- ❖ Tierra (Ground).

Antes de realizar esta prueba es necesario:

1. Verificar que el equipo esté completamente desenergizado para evitar electrocución.
2. Sacar el interruptor electromagnético del gabinete y tenerlo en una posición cómoda para realizar la prueba.

[11] Recuperado de: https://radthink.com.mx/la-importancia-de-las-funciones-lsig-en-unidades-de-disparo-de-interruptores-de-baja-tension/

3. Verificar qué tipo de unidad se tiene para saber el instrumento que se utilizará (ya sea alguna maleta de pruebas específica al tipo y marca de interruptor, software, etc.)
4. Lo ideal sería tener los tiempos de operación de la unidad obtenidos de la misma, se debe verificar que también se encuentren visibles en la unidad, por ejemplo:

Figura. Ejemplo de visualización de tiempos de disparo.

Para realizar la prueba:

1. Teniendo el software o la maleta de pruebas se deben guardar los ajustes y eventos que haya tenido el interruptor, además de saber cómo es su estado actual, tenemos información para descartar problemas con la unidad o el circuito.
2. Con el interruptor cerrado se deben realizar las diferentes inyecciones de corriente que marque en los tiempos marcados y observar que funciona en el tiempo y corriente que se tiene en los ajustes.

Figura. Ejemplo de Curva de ajustes de un interruptor

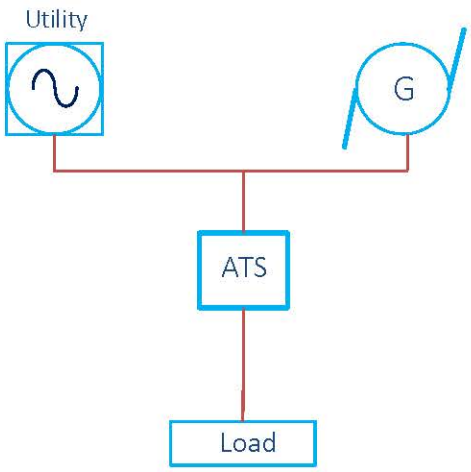
- *ATS*

Un conmutador automático de transferencia es un interruptor eléctrico el cual permitirá que cambie el suministro de energía entre la fuente receptora (utilidad) a una fuente de reserva (emergencia) cuando se produce una interrupción del suministro de energía en cualquiera de las fuentes o existe una falla, es decir, si falla o se interrumpe el suministro de la utilidad el contacto cambiará a una fuente de emergencia o reserva y cuando ya se tenga de nuevo el suministro de utilidad el contacto regresará a la fuente principal. También es capaz de poner en marcha generadores para que funcionen los elementos eléctricos que hasta que se restablezca el suministro eléctrico de la fuente primaria, que generalmente es un servicio que brinda Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Es esencial disponer de energía ininterrumpida en un centro de datos. Para su correcto mantenimiento, los sistemas conectados a la red eléctrica deben ser debidamente revisados y probados. "Para garantizar la fiabilidad de un ATS durante un corte de energía, los administradores de un centro de datos deben supervisarlo regularmente. Como las unidades de ATS pueden pasar grandes cantidades de energía y eso puede crear presión en los contactos eléctricos, es vital realizar actividades de mantenimiento regulares"[12].

Los interruptores de transferencia automática se clasifican en una de estas cuatro categorías, según el funcionamiento y la interrupción de energía asociada para la que se utilizan.

[12] Recuperado de https://www.tier4.com.mx/que-es-la-unidad-de-distribucion-de-energia-pdu-y-el-interruptor-de-transferencia-automatica-ats/



- *ATS de transición abierta*

Un ATS de transición abierta se utiliza en un sistema que puede controlar la breve interrupción de energía cuando se cambia entre una utilidad y la energía de emergencia. Esta interrupción suele durar menos de un segundo, pero realiza una transferencia segura de la energía para que ningún equipo o persona que se encuentre alrededor de los dispositivos esté en peligro. Este principio de funcionamiento del interruptor de transferencia automática incluye la apertura de la fuente conectada antes de transferir la energía a la fuente alternativa.

Se puede analizar una ATS de transición abierta con una tabla de verdad en donde 0 es sistema abierto y 1 sistema cerrado:

Utilidad	Emergencia
0	0
0	1
1	0

- *ATS de transición cerrada*

Un ATS de transición cerrada, también conocido como interruptor de transferencia "make-before-break", se utiliza en lugares donde no se acepta ni siquiera una breve pausa en el suministro de energía. Lleva incorporados sistemas que permiten que ambas opciones de alimentación funcionen simultáneamente, y también permiten una conmutación suave, manteniendo las medidas de seguridad adecuadas. Un ATS de transición cerrada es más crítico y caro que la versión de transición abierta.

Como en el caso anterior se puede representar con una tabla de verdad:

Utilidad	Emergencia
0	0
0	1
1	0
1	1

- *ATS de carga suave*

Al igual que el ATS de transición cerrada, un interruptor de transferencia de carga suave puede ajustar la cantidad de energía eléctrica que se maneja en diversas situaciones. Por lo general, se utiliza para sincronizar las fuentes mientras se transfieren las fuentes vivas y se unen con un impulso de carga de rampa a la opción de energía de reserva. También se utiliza para transferir energía entre las dos fuentes con una transición mínima de tensión o frecuencia. Aunque es bastante caro, permite a las empresas tener una mayor flexibilidad frente a múltiples situaciones que puedan requerir energía de reserva.

- *Interruptor de transferencia estática*

Un conmutador de transferencia estática utiliza semiconductores de potencia para conmutar la energía entre dos fuentes. Debido a la ausencia de piezas mecánicas en movimiento, la transición de la energía eléctrica puede realizarse rápidamente. Estos interruptores de transferencia se utilizan en lugares con fuentes de energía independientes y fiables. La carga debe estar protegida incluso de una ligera interrupción de un cuarto del ciclo de energía eléctrica, o de posibles caídas o sobretensiones en la fuente de energía primaria.[13]

Principalmente ejecuto pruebas en ATS de transición cerrada, ya que en un centro de datos no se permite que haya interrupciones pues implicaría muchas pérdidas económicas, aunque podría utilizarse una ATS de carga suave, su elección dependerá de un estudio para saber qué tan crítica será la carga puesto que su adquisición es mucho más cara.

Antes de realizar las pruebas es necesario:

1. Verificar que el equipo esté completamente desenergizado para evitar electrocución.
2. Quitar relevador que manda señal de arranque de generador de emergencia.
3. Realizar limpieza de cables, gabinete, contactos y elementos que se encuentren dentro de la ATS.

[13] https://www.tier4.com.mx/que-es-la-unidad-de-distribucion-de-energia-pdu-y-el-interruptor-de-transferencia-automatica-ats/

Para este elemento se realizan las siguientes pruebas:

→ Resistencia de contactos de utilidad.

1. Colocar ATS con los contactos en la utilidad.
2. Se utiliza el equipo de medición marca MEGGER modelo DLRO10HDX el cual ofrece pruebas de 100[μA] con rango de resistencia de 0-2.5 [kΩ] y 0-250 [Ω], 1[mA] con rango de resistencia de 0-25 [Ω], 10[mA] con rango de resistencia de 0-2.5 [Ω], 100[mA] con rango de resistencia de 0-250 [mΩ], 1[A] con rango de resistencia de 0-25 [mΩ], 10[A] con rango de resistencia de 0-2.5 [mΩ].
3. Se realizarán 3 diferentes pruebas donde una punta estará en cada fase del contacto de utilidad con la otra punta en la misma fase en el lado donde se encuentran las terminaciones de los cables:

Conexión de fase	Imagen de referencia
A	
B	
C	

4. En cada conexión se observará el valor de la resistencia que se tiene en las fases, la cual sabemos que siendo un valor de [μΩ] será aceptable.

→ Resistencia de contactos en fuente secundaria o de emergencia:

1. Colocar ATS con los contactos en fuente de emergencia.
2. Se utiliza el equipo de medición MEGGER modelo DLRO10HDX el cual ofrece pruebas de 100[μA] con rango de resistencia de 0-2.5 [kΩ] y 0-250 [Ω], 1[mA] con rango de resistencia de 0-25 [Ω], 10[mA] con rango de resistencia de 0-2.5 [Ω], 100[mA] con rango de resistencia de 0-250 [mΩ], 1[A] con rango de resistencia de 0-25 [mΩ], 10[A] con rango de resistencia de 0-2.5 [mΩ].

3. Se realizarán 3 diferentes pruebas donde una punta estará en cada fase del contacto de fuente de emergencia con la otra punta en la misma fase en el lado donde se encuentran las terminaciones de los cables:

Conexión de fase	Imagen de referencia
A	
B	
C	

4. En cada conexión se observará el valor de la resistencia que se tiene en las fases, la cual sabemos que siendo un valor de [μΩ] será aceptable.

→ Resistencia de solenoide (el cuál cumple la función de cambiar de posición la ATS, con ayuda de un resorte al transformar energía magnética en mecánica, y así colocarla en emergencia o regresarla a utilidad):

Para realizar la prueba:

1. Con ayuda de un multímetro se toma la resistencia en las terminales del solenoide (de utilidad y emergencia), generalmente se encuentran de lado derecho de la ATS, contrario de donde se encuentra el solenoide.

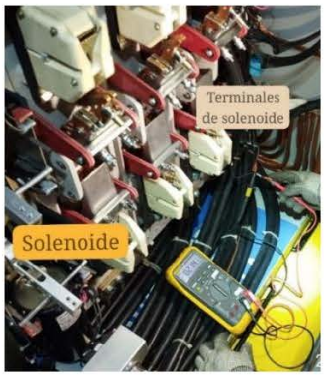


Figura. Ejemplo de medición de la resistencia del solenoide.

- *PDU*

Un PDU (Unidad de distribución de energía, por sus siglas en inglés) tiene como función principal distribuir la energía eléctrica de manera eficiente y segura a los equipos de la red, su principal utilidad es en lugares en donde se requiere una gran capacidad de distribución de energía eléctrica. Estos dispositivos se conectan directamente a la fuente de alimentación de la red y distribuyen la energía eléctrica a otros equipos a través de múltiples salidas.

Se pueden clasificar en dos principales grupos:

→ **"PDU Básicas**: grandes regletas de alimentación sin protección contra sobretensiones. Están diseñadas para proporcionar tomas de corriente estándar para los equipos de un data center y no tienen capacidad de supervisión o acceso remoto.

→ **PDU inteligentes**: ofrecen distribución de energía y otras funciones como medición de energía, supervisión, conmutación remota de tomas de corriente, control remoto de las mismas y notificaciones de posibles problemas."[14]

Un PDU consta de los siguientes elementos a los cuales son a los que se realizan las pruebas:

- Transformador de potencia.
- Interruptor principal.

Antes de realizar las pruebas es necesario:

1. Verificar que el equipo esté completamente desenergizado para evitar electrocución.
2. Inspección de torque en barras y zapatas, operación mecánica del interruptor, aterrizamiento adecuado.
3. Verificar que los tornillos de los TC's se encuentren en buen estado ya que, de no ser así, podría provocar un corto circuito al energizar el PDU.
4. Realizar limpieza de cables, gabinete, contactos y elementos que se encuentren dentro del PDU.

Para este elemento se realizan las siguientes pruebas:

→ Resistencia de contactos a interruptor principal.

Para el transformador:

→ Resistencia de aislamiento.

1. Se realizan 2 conexiones: Baja Tensión vs Alta tensión + Tierra (B vs A+T) y Alta Tensión vs Baja tensión + Tierra (B vs A+T).
2. En cada conexión se aplicará el voltaje de prueba durante un periodo de 1 minuto, tomando la lectura cada 15 segundos (Método de absorción dieléctrica).

[14] Recuperado de https://www.redestelecom.es/especiales/pdu-definicion-funciones-y-otras-cuestiones/

→ Relación de transformación.

La prueba se realiza con un probador de relación de transformación TTR (Transformer Test Ratio).

1. Se tomará cómo devanado primario el de mayor tensión y secundario el de menor tensión (transformador reductor).
2. El equipo de pruebas de relación de transformación (TTR) cuenta con dos cables de alta tensión y dos cables para baja tensión. Ambos tienen una marca de polaridad.
3. Para la medición se debe considerar la conexión que tenga el transformador:

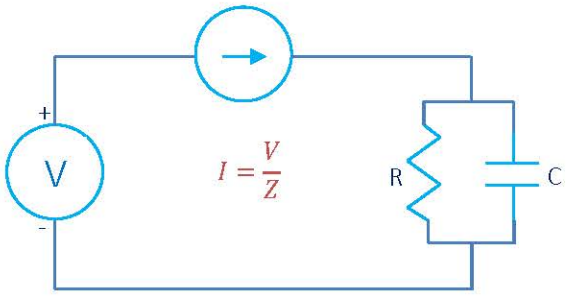
- Para conexión delta (Δ) - estrella (Y):
  a) Para la fase A se debe conectar el cable de alta tensión con marca de polaridad a la terminal H1 y el otro cable de alta tensión a la terminal H3. El cable de baja tensión con marca roja se debe conectar a la terminal X1 y el otro cable a la terminal X0.
  b) Para la fase B se debe conectar el cable de alta tensión con marca de polaridad a la terminal H2 y el otro cable de alta tensión a la terminal H1. El cable de baja tensión con marca roja se debe conectar a la terminal X2 y el otro cable a la terminal X0.
  c) Para la fase C se debe conectar el cable de alta tensión con marca de polaridad a la terminal H3 y el otro cable de alta tensión a la terminal H2. El cable de baja tensión con marca roja se debe conectar a la terminal X3 y el otro cable a la terminal X0.
- Para conexión estrella (Y) - delta (Δ):
  a) Para la fase A se debe conectar el cable de alta tensión con marca de polaridad a la terminal H1 y el otro cable de alta tensión a la terminal H0. El cable de baja tensión con marca roja se debe conectar a la terminal X1 y el otro cable a la terminal X3.
  d) Para la fase B se debe conectar el cable de alta tensión con marca de polaridad a la terminal H2 y el otro cable de alta tensión a la terminal H0. El cable de baja tensión con marca roja se debe conectar a la terminal X2 y el otro cable a la terminal X1.
  e) Para la fase C se debe conectar el cable de alta tensión con marca de polaridad a la terminal H3 y el otro cable de alta tensión a la terminal H0. El cable de baja tensión con marca roja se debe conectar a la terminal X3 y el otro cable a la terminal X2.

Metodología utilizada

Teoría de la prueba de resistencia de aislamiento.

El aislamiento en cualquier tipo de equipo eléctrico se representa como dos separados por un material aislante. Por ejemplo, para el caso de un cable, el electrodo de tensión es el conductor que lleva la corriente y el electrodo de tierra es el blindaje del propio cable.

La prueba de resistencia de aislamiento consiste básicamente en aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos y medir la corriente que circula por el circuito. El equipo de prueba está integrado por una fuente de corriente directa y un medidor de la corriente que circula por el circuito, como se ilustra en el diagrama.



El elemento bajo prueba está representado por una resistencia en paralelo con un capacitor ya que la corriente que circula por el circuito no sólo depende de la resistencia del aislamiento, sino también de su capacitancia.

Cuando se realiza la prueba de resistencia de aislamiento, lo que se hace es medir la diferencia de potencial y la corriente que circula por el circuito y, por la ecuación de Ohm, determinar la impedancia del objeto bajo prueba.

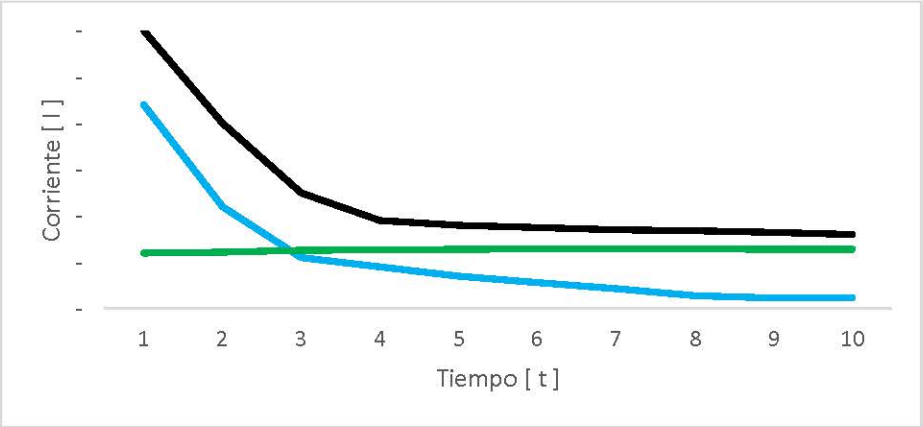
Al realizar la prueba de resistencia de aislamiento, el sistema aislante se comporta de acuerdo con dos efectos: el resistivo y el capacitivo.

Efecto resistivo: la parte resistiva del aislamiento se comporta linealmente de acuerdo con la ecuación de Ohm.

$$R = \frac{V}{I}$$

Efecto capacitivo: cuando se tiene un aislamiento sin aplicarle diferencia de potencial, las cargas eléctricas positivas y negativas se encuentran distribuidas al azar y al momento de aplicar una diferencia de potencial, las cargas eléctricas tienden a alinearse (polarización).

En la gráfica se ilustra el comportamiento de la corriente circulante en el aislamiento durante una prueba de resistencia de aislamiento.



- La parte resistiva (verde) es una corriente constante.
- La parte capacitiva (azul) ilustra el efecto capacitivo.
- La corriente total (negro) es la suma de las dos.

Los valores de resistencia de aislamiento en interruptores son generalmente altos y los efectos de la temperatura, absorción y polarización son despreciables por lo que la prueba tiene una duración de sólo 1 minuto y no se realiza corrección por temperatura.

Para el caso de los transformadores se utiliza el Método de Absorción Dieléctrica (el cual se toma en cuenta ya que en "equipos donde se utilizan resinas aislantes modernas o aislaciones secas como transformadores secos, la corriente de absorción puede hacerse próxima a cero en dos o tres minutos desde el comienzo de la prueba"[15]) Debido a que la corriente de absorción puede hacerse casi cero, existe una variante del índice de polarización (IP), denominado Índice de Absorción Dieléctrica (IAD) la cual se define como:

"El cociente entre el valor de resistencia de aislamiento medido en 1 minuto y el valor medido en 30 segundos."[16]

Este índice representa el grado de absorción que tiene el aislamiento del transformador. Entre mayor sea se considera que el aislamiento se encuentra en mejores condiciones de operación. En la práctica, se recomienda que el índice de absorción sea mayor a 1.5 (según la norma IRAM 2325).

Para calcular el IP E IAD se tienen las siguientes expresiones:

$$IP = \frac{R_{a10min}}{R_{a1min}}$$

[15] Recuperado de TECNICAT – Índices de Polarización y de Absorción https://catmiron.com.ar/images/descargas/nota-tecnica-6-ndices-de-polarizacion.pdf
[16] Recuperado de INTEC 2004

Donde: $IP = Indice\ de\ polarización$

$R_{a10min} = resistencia\ de\ aislamiento\ a\ 10\ min$

$R_{a10min} = resistencia\ de\ aislamiento\ a\ 1min$

$$IAD = \frac{R_{a1min}}{R_{a30s}}$$

Donde: $IAD = índice\ de\ Absorción\ Dieléctrica$

$R_{a10min} = resistencia\ de\ aislamiento\ a\ 1\ min$

$R_{a30s} = resistencia\ de\ aislamiento\ a\ 30\ segundos$

Índice de Absorción Dieléctrica	Índice de polarización	Estado de Aislamiento
IAD < 1,1	IP < 1	Peligroso
1,1 < IAD ≤ 1,25	IP < 1,5	Cuestionable
1,25 < IAD ≤1,4	1,5 ≤ IP < 2	Aceptable
1,4 < IAD ≤ 1,6	2 ≤ IP < 3	Bueno
1,6 < IAD	3≤ IP < 4	Muy bueno
	4 ≤ IP	Excelente

Tabla. Estado de aislamiento por RAD e IP según norma IRAM 2325

Teoría de relación de transformación.

El transformador está integrado por dos bobinas devanadas en un mismo núcleo, como se ilustra en la figura.

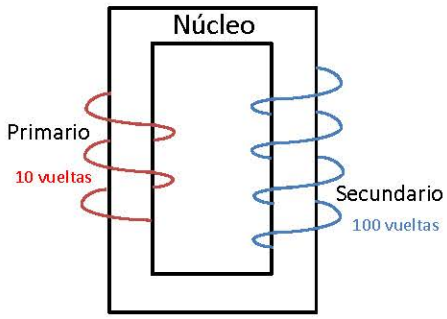


Figura. Configuración de un transformador.

A la bobina donde se aplica la diferencia de potencial se le conoce como devanado primario (azul) y a la otra bobina como devanado secundario (rojo) y es la encargada de reducir o aumentar la diferencia de potencial dependiendo del número de vueltas que tenga.

Con base en lo anterior, se tiene la relación de transformación, la cual se define como:

$$RT = \frac{N_P}{N_s} = \frac{V_P}{V_s}$$

Donde: $RT = Relación\ de\ transformación$

$N_p = número\ de\ vueltas\ del\ devanado\ primario$

$N_s = número\ de\ vueltas\ del\ devanado\ secundario$

$V_p = diferencia\ de\ potencial\ del\ devanado\ primario$

$V_s = diferencia\ de\ potencial\ del\ devanado\ secundario$

"La prueba de relación de transformación tiene como objetivo verificar la polaridad y la relación de transformación de los devanados de un transformador, para asegurar que no existan cortocircuitos entre espiras ni errores en las conexiones de boquillas y cambiadores de derivaciones, además de que, se pueden detectar falsos contactos y circuitos abiertos"[17].

Para transformadores trifásicos con conexión delta - estrella o estrella - delta debe hacerse una corrección al voltaje del lado de la conexión en estrella ya que este se mide entre fase y neutro, y no entre fases, por lo cual se debe dividir entre la raíz de tres.

Para constatar que el resultado sea satisfactorio se debe calcular el error relativo porcentual el cual debe ser ±0.5%:

$$\%e = \frac{RT_{teórica} - RT_{prueba}}{RT_{teórica}}\ x\ 100\% < \pm 0.5\%$$

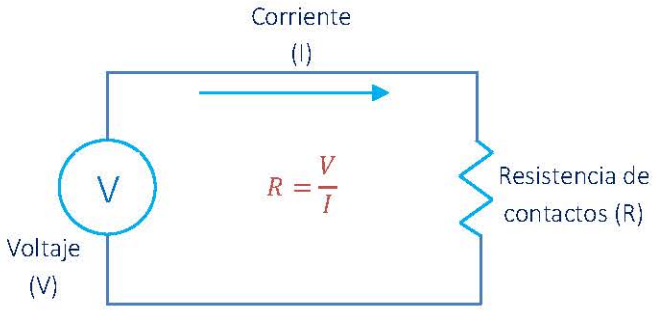
Teoría de la prueba de resistencia de contactos.

La circulación de la corriente eléctrica en un conductor genera siempre un efecto natural de calentamiento. Sin embargo, cuando existen puntos de contacto a presión o contactos deslizables, el efecto de calentamiento se puede volver crítico debido a posibles puntos de alta resistencia (falsos contactos) que pueden elevar la temperatura varios cientos de grados Celsius. Tal es el caso de los contactos de los interruptores, cuchillas desconectadoras y cambiadores de derivaciones en transformadores (Cambiadores de TAP's).

La resistencia de los contactos debe ser muy baja (del orden de μΩ) para evitar el calentamiento excesivo en los puntos de unión.

Conociendo el valor de la corriente circulante y midiendo la caída de tensión en los contactos, se calcula la resistencia utilizando la ecuación de Ohm.

[17] Recuperado de INTEC 2004 https://www.tecsaqro.com/tecsa/reportes_imagenes/3649_1.pdf



Para eliminar el efecto de la resistencia de los cables, se utiliza un circuito de 4 hilos (como ya se mencionó anteriormente). La prueba de resistencia de contactos tiene como objetivo detectar oportunamente los problemas de sobrecalentamiento originados por falsos contactos.

Teoría de la prueba a unidad de disparo.

El objetivo principal de las funciones LSIG son detectar sobrecargas y fallas de cortocircuito, por lo que se debe realizar un estudio de coordinación de protecciones. Para entrar en un mejor contexto se necesita conocer cuáles son las funciones LSIG y que tareas desempeñan como protección:

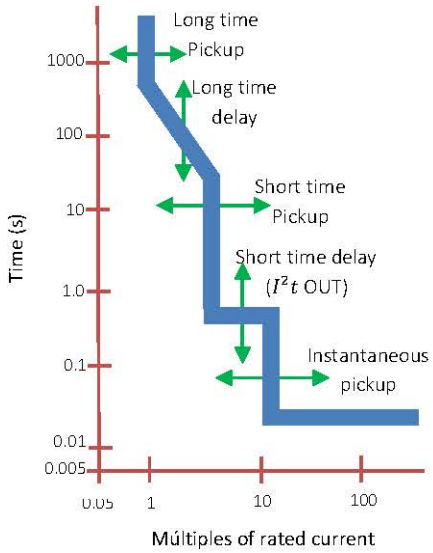


Figura. Curva típica para disparo de un interruptor [18]

Teoría de la resistencia de un solenoide.

"Un solenoide es un hilo de esmalte (hilo de la bobina) enrollado en forma cilindrica, fabricado con materiales resistentes como el metal para generar una disciplina magnética uniforme.

[18] IEEE Std 242-2001 Chapter 7

Actúa como un electroimán cuando la corriente eléctrica lo atraviesa"[19]. Normalmente se utiliza para realizar movimiento de los objetos.

La resistencia de la bobina de un solenoide determinará la intensidad de corriente que se activa cuando se aplica la tensión nominal (Ley de Ohm). Los valores comunes pueden variar entre unos cuantos Ω y algunos miles de Ω. La resistencia debe verificarse para, además de saber el valor de la corriente, podremos observar si el hilo aún conservan un buen aislamiento y no están generando un corto circuito, lo que podría provocar un problema al accionar la ATS.

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Donde: R = resistencia.

ρ = resistividad.

L = longitud.

A = área transversal de la bobina.

[19] Recuperado de https://electrositio.com/que-es-un-solenoide-y-el-area-magnetica-del-solenoide/

Conclusiones

En el presente trabajo se pudo plasmar la manera en la que realizo diferentes pruebas a algunos equipos eléctricos que son fundamentales para la buena operación de una subestación, por supuesto dependiendo de las necesidades que se tengan en el sitio, además de dar a conocer los métodos que son utilizados para poder entender y posteriormente saber el estado en el que se encuentran y así determinar si aún es un elemento que cumplirá con sus funciones para tratar de evitar alguna falla que dañe la carga, al usuario o incluso a los operadores, pues sabemos que uno de las principales propósitos de un trabajo seguro es salvaguardar a quienes se encuentren operando el sistema.

Además de lo anterior, las pruebas que se realizan en los distintos elementos eléctricos tienen como finalidad:

- Utilizarlas como un requisito de instalación para ayudar a garantizar que se cumplan las especificaciones y verificar la conexión correcta para garantizar una buena operación.
- Utilizarlas como una medida de control de calidad al momento de adquirir una pieza del equipo eléctrico (repuestos) o bien, para el reemplazo de algún elemento.
- Dar mantenimiento preventivo.
- Utilizarlas como una herramienta de solución de problemas en caso de tenerlos.

  Para realizar los mantenimientos de los diferentes equipos es necesario tener en cuenta cada de uno de los siguientes listados de actividades:

Para interruptores electromagnéticos:

1. Verificar la ausencia de diferencia de potencial con el medidor de voltaje y con el multímetro.
2. Realizar la extracción del Interruptor del gabinete.
3. Verificar que los diversos elementos se encuentren en buen estado (placa de datos visible, gabinete del interruptor, tornillería, componentes y cableado de control).
4. Realizar inspección visual verificando que no haya flameos, cables flojos o desconectados.
5. Realizar limpieza del gabinete con espuma dieléctrica.
6. Realizar limpieza exterior de interruptor con espuma dieléctrica.
7. Realizar limpieza y lubricación de conectores y mecanismo con NC123 y Lexpure.
8. Realizar la operación manual de carga de resorte.
9. Realizar la operación manual de cierre y apertura del interruptor.
10. Verificar la continuidad de los contactos auxiliares
11. Realizar la prueba de resistencia de aislamiento:

- Verificar que el interruptor este en posición “cerrado” para prueba fases A vs B+C+G, B vs A+C+G, C vs A+B+G.
- Verificar que el interruptor este en posición “abierto” para prueba en línea vs carga.

12. Realizar la prueba de resistencia de contactos:
    - Verificar que el interruptor se encuentre en posición “cerrado” y realizar la prueba en cada fase.
13. Realizar la prueba de unidad de disparo (esta dependerá de la marca y modelo del interruptor, pero se enunciarán las actividades esenciales):
    - Cerrar el interruptor.
    - Conectarse con software de la marca y modelo del interruptor para respaldar ajustes y eventos.
    - Se realizan las pruebas de disparo necesarias de acuerdo con los ajustes que se tienen en el interruptor sin modificarlos (generalmente se tienen disparos por tiempo corto, tiempo largo, falla a tierra e instantáneo), cada vez que se quiera disparar el interruptor se debe cargar la bobina de disparo manualmente.
14. Realizar la inserción del interruptor.
15. Verificar que al insertar el interruptor las banderas de estado cambien.
16. Esperar a que el usuario final encienda el tablero para que el interruptor se cargue y cierre eléctricamente para verificar que todo se encuentra en buen estado.

Para Automatic Transfer Switch:

1. Retirar el relevador que manda la señal de arranque a la planta de emergencia.
2. Esperar a que sea desenergizado la ATS, verificando que ninguna de las fuentes esté energizada (luces indicadoras apagadas).
3. Verificar la ausencia de diferencia de potencial con el medidor de voltaje y con el multímetro.
4. Retirar cable de mando de arranque de planta de emergencia.
5. Aspirar exceso de polvo y quitar con sopladora a partes de fuerza cuidando del control.
6. Realizar inspección visual verificando que no haya flameos, cables flojos o desconectados.
7. Limpieza de cables de fuerza y control con NC123.
8. Limpieza interior y exterior del gabinete.
9. Realizar reapriete de tornillería de control y fuerza.
10. Realizar prueba mecánica de operación al switch de potencia.

11. Realizar la prueba de resistencia de contactos (se realiza dejando la ATS cerrada en fuente normal y después en fuente de emergencia, en cada fase).
12. Realizar prueba de resistencia en el solenoide en fuente normal y emergencia.
13. Retirar herramienta y objetos ajenos al tablero.
14. Dejar ATS en fuente emergencia.
15. Volver a colocar relevador de mando de arranque de planta de emergencia.
16. Reconectar cable de mando de arranque después de que la ATS haya sido energizada.

Para Power Distribution Unit:

1. Verificar la ausencia de diferencia de potencial con el medidor de voltaje y con el multímetro.
2. Verificar que el arreglo de fases sea el correcto y se tenga espacio entre las barras.
3. Inspección del torque adecuado en barras y zapatas.
4. Inspección de tornillería de TC's.
5. Verificar que se tenga un aterrizamiento adecuado (los cables estén bien conectados y sin flameos).
6. Verificar la correcta operación mecánica del interruptor (cierre-apertura).
7. Prueba de resistencia de contactos a interruptor principal.
8. Prueba a la unidad de disparo del interruptor.
9. Realizar prueba de resistencia de aislamiento a transformador cada 15 segundos hasta 1 minuto (por norma).
10. Realizar prueba de relación de transformación a transformador.
11. Limpieza interior y exterior del gabinete.

El costo de un mantenimiento preventivo a los equipos eléctricos mencionados dependerá de diversos factores, como son, lugar donde se realizará el servicio, tipo y cantidad de equipos, el alcance a realizar y periodicidad del tiempo de ejecución. Recabando esta información, el costo de un mantenimiento preventivo aproximadamente representa menos del 0.1% de las ganancias de un día de operación en un data center.

Los mantenimientos se realizan en el momento donde no se afecten las operaciones o servicios que dependan del data center, es decir, cuando no se pone en riesgo la carga, por lo que regularmente se realizan en eventos nocturnos o fines de semana, esto dependerá totalmente de la operación de cada data center, es por eso que los datas center cuentan con sistema de redundancia N+1 o 2N (en donde N es la cantidad necesaria de un sistema), con la finalidad de reducir la posibilidad

de una interrupción, pues esto implicaría en la mayoría de las veces, pérdidas millonarias. Un caso real documentado fue en el año 2017 en donde durante 3 días la compañía British Airways tuvo que cancelar más de 400 vuelos, dejó varados a más de 75,000 pasajeros y se tuvieron pérdidas económicas de aproximadamente 200 millones de dólares, por una interrupción en su data center[20].

Debido a que los mantenimientos preventivos son muy importantes para garantizar que los equipos no fallen durante la operación del data center y se tenga suministro de energía 24/7/365, este trabajo es una especie de manual el cual funge como base para aquellos que dedican su trabajo a esta área y se considere que el impacto que se tendría al interrumpir el suministro de energía implicaría pérdidas de datos o información relevante en las aplicaciones de un data center, además de pérdidas económicas. Por lo tanto, considero que mi trabajo es esencial ya que al realizar los mantenimientos preventivos se anticipa que se tenga un suministro de energía continua reduciendo las fallas por tiempo de uso.

El presente trabajo ha sido el resultado de varios años inmersa en la industria de los data centers, de actualizarme día a día y sobre todo de buscar la mejora continua. Se realizó principalmente con el fin de apoyar a compañeros y compañeras del área eléctrica e incluso aquellos que no están tan inmersos en el tema para lograr que se comprenda la importancia de algunos elementos en subestaciones eléctricas interiores, además de mostrar algunas pruebas eléctricas para aquellos que comienzan una vida laboral y que en muchas ocasiones es complicado sumergirse a ese mundo sin un apoyo adicional.

También considero que es un trabajo dedicado a aquellos, que, como yo, consideran la ingeniería eléctrica un mar inmenso de áreas de conocimiento y no saben a dónde dirigirse (la mayoría cuando somos estudiantes), pues, aunque muchas veces es bueno tener muchos retos, no se puede abarcar todas los mercados o ramas de dicha ingeniería. Espero que este trabajo los apoye a aclarar sus ideas y tengan esa pasión por lo que hacen.

[20] Recuperado de reportaje "¿Cuál es el costo de una interrupción en un Data Center? El impacto financiero por vulnerabilidad de la infraestructura" por Data Center Dynamics

Referencias

- INTEC 2024
- https://www.cisco.com/c/es_mx/solutions/data-center-virtualization/what-is-a-data-center.html
- https://sdindustrial.com.mx/blog/subestacion-electrica-que-es/
- https://www.eaton.com/mx/es-mx/products/low-voltage-power-distribution-control-systems/automatic-transfer-switches/automatic-transfer-switch-fundamentals.html
- https://www.tier4.com.mx/que-es-la-unidad-de-distribucion-de-energia-pdu-y-el-interruptor-de-transferencia-automatica-ats/
- https://www.te.com/es/products/relays-and-contactors/relays/protective-relays.html?tab=pgp-story
- https://electropreguntas.com/interruptor-electromagnetico-caracteristicas-y-usos/#google_vignette
- https://www.kin.energy/blogs/post/pruebas-de-aislamiento-el%C3%A9ctrico-y-su-importancia
- STANDARD ANSI/NETA ATS-2021
- https://www.voltimum.es/sites/www.voltimum.es/files/pdflibrary/dlro-guide_eses.pdf
- https://radthink.com.mx/la-importancia-de-las-funciones-lsig-en-unidades-de-disparo-de-interruptores-de-baja-tension/
- https://www.tier4.com.mx/que-es-la-unidad-de-distribucion-de-energia-pdu-y-el-interruptor-de-transferencia-automatica-ats/
- https://www.redestelecom.es/especiales/pdu-definicion-funciones-y-otras-cuestiones/
- https://catmiron.com.ar/images/descargas/nota-tecnica-6-ndices-de-polarizacion.pdf
- IEEE Std 242-2001 Chapter 7
- https://electrositio.com/que-es-un-solenoide-y-el-area-magnetica-del-solenoide/
- https://www.datacenterdynamics.com/es/features/cual-es-el-costo-de-una-interrupcion-en-un-data-center/