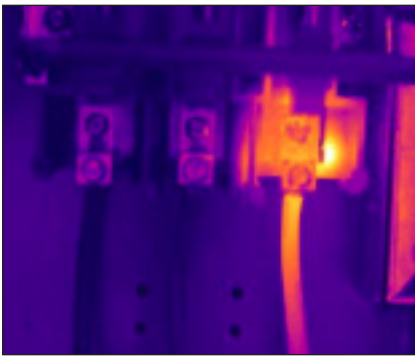


Evaluación de la Condición de conexiones eléctricas utilizando Termografía Infrarroja

Para establecer la verdadera 'condición' de una conexión eléctrica se debe determinar la causa raíz de por qué el conector está funcionando caliente.



Aun cuando la termografía pueda identificar un problema de conexión mediante el análisis del patrón térmico, la temperatura superficial del conector puede ser un pobre indicador de la naturaleza y severidad del problema. Por ejemplo, en la imagen de arriba, las tres fases están balanceadas, pero únicamente tienen aplicadas el 10% de la carga del circuito, por lo que la falla podría potencialmente convertirse en catastrófica a mayor carga o pico de corriente.

El método establecido para identificar problemas en conexiones eléctricas energizadas y con carga (preferiblemente tan altas como sea posible según NFPA 70B¹), es utilizando cámaras termográficas. Sin embargo, podría darse una interpretación errónea al establecer la condición de una conexión luego de haber localizado una anomalía. Históricamente se ha utilizado la medición de temperatura o el aumento de temperatura como indicadores de la severidad, donde la termografía infrarroja únicamente identifica la temperatura superficial, que al ser considerada sin tomar en cuenta otros factores, podría no ser confiable como indicador de la severidad². Algunos métodos han combinado el uso de límites específicos de temperatura, mientras que otros han utilizado la carga y correcciones de factores ambientales. Lo más cercano que poseemos a límites absolutos de temperatura son los de los cables conductores, conectores o dispositivos conectados a cables; los cuales típicamente podrían ser 60, 75, o 90°C. Cuando un cable NMD-75 (75°C) está conectado a uno Cu9Al (90°C) y a un dispositivo de 60°C, el límite de temperatura será de 60°C⁴. Pero cuando una falla en un conector genera una temperatura superficial menor de 60°C (por ejemplo, debido a la baja carga o temperatura ambiente), podrían existir conflictos de criterios acerca de la severidad y acción que se debe tomar. La realidad es que no existen muchos límites de temperatura más allá de los mencionados anteriormente para predecir que tan severo es un problema.

Para establecer la verdadera 'condición' de una conexión eléctrica se debe determinar la causa raíz de por qué el conector está funcionando caliente. Algunos años atrás un experto muy respetado en conexiones eléctricas me dijo que él pensaba que la termografía no resultaba muy útil y hasta podría ser confusa, pues los usuarios de la termografía podrían utilizar la temperatura como base de la priorización estableciendo, por ejemplo, que una conexión está funcionando bien cuando en realidad ya había fallado. La definición de 'falla' de dicho experto es que la conexión no debería funcionar más caliente que el conductor al cual está conectado, y que de estarlo no estaba funcionando adecuadamente por lo que su 'funcionalidad' falló. En su opinión, por sí misma la anomalía eventualmente no fallaría de manera catastrófica, pero cabe resaltar que no nos resulta posible conocer o predecir las condiciones futuras en una conexión que podrían causar que falle catastróficamente. Un ejemplo que viene a mi mente podría ser una repentina falla de fase a fase, o fase a tierra, donde podrían fluir miles de amperios y podríamos cuestionarnos cual elemento del circuito podría fallar primero abriendo el circuito, si la conexión caliente o el fusible de protección. Lo que también trae a mi mente una de las infames leyes de Murphy, donde en el evento de un corto circuito el componente más costoso podría quemarse protegiendo al fusible.

Este documento trata únicamente de las conexiones eléctricas y no de los dispositivos térmicos como: fusibles, breakers/disyuntores, protecciones de sobrecarga, contactores, capacitores, etc. También en su mayoría este documento no trata acerca del primer

Analogía de una Falla

Un inspector de casas o edificios podría realizar una inspección visual (no infrarroja) y podría notar una rajadura en el cartón-yeso o tabla-roca en el techo o cielo raso cerca de una viga. El inspector, normalmente un técnico, podría reportar que la rajadura puede ser debido a una 'falla potencial' de la viga.

El dueño de la casa podría preguntar al inspector si lo anterior se trata de un problema 'real' que necesita ser arreglado. El dueño de la casa podría luego llamar a un ingeniero y encontrar que la viga tiene una curvatura excesiva que está causando las rajaduras en el techo. Su reporte podría indicar que la viga ha tenido una 'falla de funcionamiento'.

El dueño de la casa podría preguntar si la viga tendrá una 'falla completa' y si el cielo raso caerá. Nuevamente, una pregunta imposible de responder, pues podría requerir una bola de cristal o costosas pruebas destructivas. En este punto se podría observar que la causa raíz del problema podría ser: el tamaño inadecuado de la viga, fundación inadecuada, inadecuado soporte de la columna, tamaño de la columna, etc. El ingeniero en su opinión profesional podría indicar que se necesita realizar mayor investigación o reparaciones para evitar la posibilidad de una 'falla completa'.

Si el dueño de la casa no está preparado para tomar en cuenta las sugerencias, al menos debería estar pendiente de observar si el tamaño de la rajadura aumenta, escuchar por cualquier ruido extraño y verificar que cualquier peso adicional sea removido del techo (por ejemplo, al caer nieve). Sin embargo, se debe resaltar que estarían tomando un riesgo debido a la 'falla de funcionamiento', es decir que la viga no está funcionando como fue diseñada y podría empeorar, o podría seguir igual durante mucho tiempo hasta que una condición inusual pudiera suceder, dando como resultado una 'falla catastrófica'. Por supuesto que si nunca ninguna condición inusual sucediera, podría que nunca suceda una falla catastrófica.

punto de conexión de los dispositivos, sino de los subsecuentes puntos de conexión adyacentes al dispositivo, como por ejemplo: no el punto de conexión del fusible al porta fusible, pero si el punto de conexión entre el porta fusible y el cable. Para las primeras conexiones de los dispositivos debemos referirnos a la sección final de este documento: 'Conexión eléctrica a dispositivos térmicos'.

Tipos de Falla

Como fue definido por Nolan y Heap en lo que es ahora un documento de referencia⁴ para el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, existen 3 clases de fallas: Potenciales, Funcionamiento y Completas. Para los propósitos de evaluar conexiones eléctricas agregaremos una cuarta clasificación: Catastrófica (en realidad vendría siendo como la Completa). Las clases de fallas son importantes, pues típicamente los supervisores podrían únicamente considerar dos clases al momento de evaluar los hallazgos térmicos: las Potenciales (que podrían nunca fallar) y las Catastróficas (circuito abierto). Si se desean aplicar sólidos principios de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad a sistemas eléctricos y en este caso específico a conexiones eléctricas, se debe contar con múltiples definiciones de las fallas como se indica a continuación:

Falla Potencial: "Un síntoma o advertencia detectable que una falla de funcionamiento está en proceso de ocurrir". En esta definición Nolan y Heap⁴ hacen la anotación que las fallas potenciales usualmente son detectadas por personal de mantenimiento. En el caso de una conexión eléctrica, todas las conexiones más calientes que el cable al que están conectadas podrían considerarse como una falla potencial y la mejor manera de detectarla es al descubrir con termografía una anomalía térmica en la conexión.

Falla de Funcionamiento: "La inhabilidad de un equipo de realizar una función de acuerdo al estándar de funcionamiento aceptable para el usuario" Moubray⁵. Nolan y Heap hacen la anotación que fallas de funcionamiento son usualmente detectadas por personal de operación, pero en el caso de sistemas redundantes podrían pasar desapercibidas. En el caso de una conexión eléctrica significaría que fallaría en cumplir uno o más de sus funciones para las que fue diseñada. Desafortunadamente por la naturaleza de la mayoría de conexiones eléctricas es difícil saber cuando ha sucedido una falla de funcionamiento hasta que la misma es completa o catastrófica. Algunas veces decoloración, derretimiento, arco o interferencia de radiofrecuencia podrían ser indicaciones que una falla de funcionamiento ha sucedido.

Falla: "La finalización de la habilidad de un elemento a realizar una función requerida". (ISO 14224 6) En el caso de una conexión eléctrica típicamente significa que por ejemplo, ha sucedido derretimiento de la conexión produciendo uno de dos resultados: una falla catastrófica, o soldando un componente. En el caso de soldar una conexión interruptora (ejemplo, la mordaza o la bisagra de un interruptor), la conexión continuará operando hasta que sea necesario que actúe y no será capaz de abrir. También llamada "falla completa"²

Falla Catastrófica (o Crítica): "Una forma de falla completa que resulta en la inmediata interrupción de la operación o uso"². Podría involucrar la pérdida de capital, equipos, tiempo de vida de los mismos o pérdida de ganancias. En el caso de una conexión eléctrica significaría en el mejor escenario la apertura de un circuito eléctrico y en el

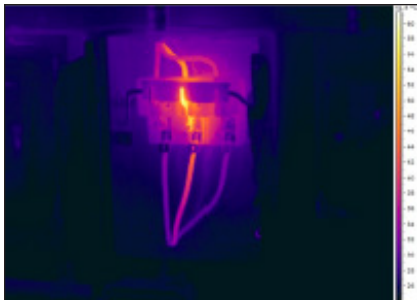


Figura 1a: Falla Potencial

La conexión tipo cuchilla de la desconexión están funcionando caliente, pero sin más análisis la única determinación que se puede realizar por el momento es una falla potencial. De existir la energía suficiente, el modo de falla de este componente podría ser tal que podría soldar los contactos resultando en una falla completa, pero no catastrófica. Sin embargo, de soldarse los contactos y si el operador trata de utilizar la desconexión para aislar el equipo, la desconexión podría fallar causando una explosión de arco eléctrico y hasta causando alguna herida o la muerte.

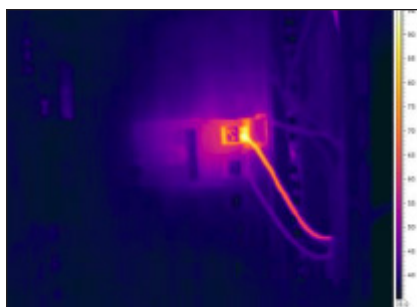


Figura 1b: Falla de Funcionamiento

El conector está funcionando a una temperatura que sobrepasa la capacidad de la aislación eléctrica del cable conductor al que está conectado (90°C). De seguir funcionando arriba de dicha temperatura, podría causar endurecimiento de los metales y podría hasta alcanzar el punto de 'voltaje de derretimiento de los metales'. Actualmente una falla completa es impredecible, pero podría ser inminente antes de la nueva inspección anual. De existir una falla podría ser catastrófica resultando en únicamente la interrupción de servicio en el mejor de los casos.

peor escenario una explosión de arco eléctrico e interrupción del servicio, pérdida de capital, daño colateral y hasta daños físicos o la muerte.⁷

El reto: ¿Fallas Potenciales, de Funcionamiento o Completas?

Muchos supervisores esperan que los usuarios de la termografía, ya sea que trabajen para la compañía o contratistas, les informen si las anomalías térmicas son un problema que necesita ser reparado y cuando. Sin proveer más información, sería como solicitarles que tuvieran una bola de cristal para ver el futuro, por lo que podría resultar imposible responder todo lo anterior. Toda anomalía térmica es definitivamente una falla potencial y podría llegar a ser de funcionamiento o completa. El cambio inesperado en algunas de las variables que afectan el funcionamiento del equipo podría lograr que una falla de funcionamiento se convierta en catastrófica. El poder diferenciar entre una falla potencial y una de funcionamiento podría requerir análisis que podría no ser posible de realizar en equipo energizado.

Por lo anterior el reto es claro: los encargados de mantenimiento no siempre cuentan con los recursos para reparar todas las 'fallas potenciales', pero desde la perspectiva del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad deberían estar preparados para reparar cualquier 'falla de funcionamiento'. El usuario de la termografía debe ser capaz de diferenciar entre ambas, pero lo anterior podría no ser posible sin pruebas adicionales y otras herramientas de análisis.

Reconociendo la Fallas de Funcionamiento

Para establecer si una falla de funcionamiento ha ocurrido debemos entender el criterio de diseño y función de la conexión. En términos simples, el propósito de una conexión eléctrica es transportar corriente eléctrica tan eficientemente como el conductor conectado. Sin embargo, existen tres criterios de diseño para este transporte:

- 1) Transportar la corriente máxima de manera continua para la que fue diseñada de la misma manera que el conductor conectado. Esto típicamente es definido por el código eléctrico como el 80% de la especificación del dispositivo de protección (fusible o breaker). Ejemplo: un circuito de 15A será capaz de transportar 12A de manera continua.
- 2) Transportar la corriente máxima de corta duración para la que fue diseñada tan eficientemente como el cable conectado. Esto permite altas corrientes temporales creadas por dispositivos como por ejemplo, motores durante el encendido. Típicamente estas corrientes pico podrían ser hasta 8 veces más grandes que la corriente máxima, pero tendrán una corta duración de segundos. Fusibles o Breakers especialmente diseñados permitirán dicha corriente de corta duración, de la misma manera debería soportarla las conexiones y conductores del circuito. Esta alta corriente temporal podría causar calentamiento en la conexión pero debería ser capaz de disiparla fácilmente.
- 3) Transportar la corriente instantánea de corto para la que fue diseñada, tan eficientemente como el conductor conectado. Corrientes de corto circuito pueden ser miles de veces más grandes que la corriente continua para la que fue diseñada. Esta corriente instantánea de corto (extremadamente alta corriente), podría causar calentamiento en la conexión, pero debería ser disipada sin causar sobrecalentamiento.

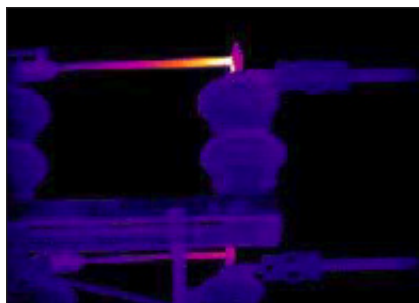


Figura 1c: Falla (Completa)

La función de una desconexión de subestación es de aislar un circuito para mantenimiento. Una anomalía térmica como la que se muestra podría nunca causar una falla catastrófica (circuito abierto), pero ya presenta una falla de funcionamiento y podría soldar las conexiones, haciendo difícil o hasta imposible aislar o abrir el circuito durante una parada programada.



Figura 1d: Falla Catastrófica (o Crítica)

No existen termogramas de una falla catastrófica pues cuando sucede deja de funcionar. Sólo existen imágenes visuales de las consecuencias, una falla de alta energía eléctrica en conexiones típicamente resulta en un daño significativo a los conductores y equipos adyacentes, así como la falta de servicio. La naturaleza explosiva de un arco eléctrico, causado por metal vaporizado, podría causar incendios, lesiones o hasta la muerte. Por lo anterior se indica que la termografía es necesaria para inspeccionar todos los sistemas críticos de distribución eléctrica. Imagen cortesía de Bermuda Electric and Light Company.

miento. El sobrecalentamiento es una condición donde el calor es generado más rápidamente de lo que el componente puede disipar.

En adición para conexiones atornilladas y operables:

- 4) Mantener el criterio general de permitir que el componente conectado pueda ser removido, desensamblado, cambiado o desconectado; ya sea de manera rutinaria o periódica. Ejemplo, desconexiones tipo cuchilla, conexiones atornilladas, seccionadores, etc.

En las cuatro situaciones anteriores, el conector no debería sufrir daños, degradación o reducción del tiempo de vida. Otros criterios de diseño del conector puede incluir: permitir cierta vibración, corrosión, cambio en la carga, ciclos térmicos, diferentes metales, operación, etc.

En general, esto significa que una conexión eléctrica debería tener al menos la superficie equivalente del conductor al que está conectado. De ser cierto lo anterior, también debería tener la misma resistencia, disipación de energía, etc. Sin embargo, en la práctica típicamente se aplica un factor de diseño al conector para que tenga más área superficial que el conductor al que está conectado, lo que permite que pueda ‘perdonar’ algunos factores inesperados como: cierto grado de instalación incorrecta, degradación del conector en función del tiempo, etc., lo que podría dar como resultado una ‘disminución’ en el área superficial de contacto. Teóricamente, un conector eléctrico propiamente instalado y mantenido debería poseer menor resistencia y menos pérdida de energía (generación de calor) que el conductor al que está conectado. Para los propósitos de inspecciones eléctricas con termografía, se considera que una conexión cumple con el criterio de su diseño si al momento de poseer carga no presenta mayor temperatura que el conductor al que está conectado.

Causa raíz para la falla de funcionamiento de una conexión eléctrica

Entender la causa raíz de la falla de funcionamiento de una conexión eléctrica es esencialmente evaluar el riesgo de una falla catastrófica. Desafortunadamente una cámara infrarroja no es un equipo de Rayos-X y únicamente observa los patrones térmicos superficiales, más no la temperatura interna de la conexión. La realidad es que la temperatura en los puntos de contacto internos de una conexión eléctrica con carga, será mucho más alta que la temperatura externa de la superficie.¹⁰

Tabla 1. Algunas razones para la falla del conector

<i>Diseño inadecuado</i>	<i>Incompatibilidad de materiales</i>
<i>Preparación y ensamblaje inadecuado</i>	<i>Torque inadecuado</i>
<i>Vibración excesiva</i>	<i>Ambiente corrosivo</i>
<i>Temperatura ambiente excesiva</i>	<i>Evento fuera de condiciones normales</i>

Existen muchas posibles razones para una conexión caliente, la razón más obvia, pero que también es uno de los diagnósticos erróneos más comunes es una ‘conexión floja’. El término ‘flojo’ es una designación errónea, que realmente debería ser identificada como ‘torque inadecuado’. Aun cuando el torque sea el adecuado, la fuerza de contacto en los interfaces eléctricos podría decaer debido al pobre diseño de algún conector

Ejemplo de aproximación de vatios



Información:

Temperatura: 30°C

Aumento de Temp: 7°C

Carga: 6 A

Capacidad máxima: 200A

Voltaje de derretimiento: 0.5V

Análisis

Estimación de disipación de vatios de falla: Probablemente 2-3 vatios pero haciendo un estimado conservador =1 vatio.

Potencia de Falla (P) = I²R
 $R = P / I^2 = 1/6^2 = 0.027 \text{ ohms}$.
 (valor típico <10 micro-Ohms)

Caída de voltaje en la conexión:
 $\Delta V = I * R = 0.16 \text{ V}$
 (1/3 del voltaje de derretimiento)

Evaluación

Cuanta corriente es necesaria para alcanzar los 0.5V del voltaje de derretimiento? (falla de funcionamiento)
 $\Delta V/R = I = 0.5/0.027=20A$
 aprox. (generando aprox. 9 vatios de calor)

¿Y para 100A?

275W y 2.8V Podría fallar catastróficamente antes de llegar a dicha corriente, talvez causando algún arco eléctrico que pudiera haber herido a alguna persona que estuviera cercana, causando fuego, o interrupción del proceso. Por lo cual la termografía con el análisis y acción adecuada podría reducir dichos riesgos!

causando sobrecalentamiento y/o deformación, debido al descenso de contacto. En adición a un torque inadecuado, la conexión podría presentar otro tipo de falla como: trasrocada, sucia, corroída o sobre-apretada (hasta el punto de deformación o creando rajaduras). Aun cuando todas las anteriores pudieran ser síntomas de una conexión eléctrica anómala, las mismas no son 'la causa raíz' y no describen el potencial modo de falla, como se muestran a continuación en la Tabla 1.

¿Cómo proceder con una conexión caliente?

La simple y más fácil respuesta es asumir que todas las conexiones que presentan una anomalía térmica (identificada utilizando el criterio de NFPA 70B) tienen una falla de funcionamiento que debe ser investigada y reparada. En algunos casos, lo anterior puede ser realizado sin interrumpir de manera significativa o a un costo mayor que el de únicamente el tiempo de mantenimiento y material. Lo anterior producirá mayor confiabilidad, aun cuando podría representar un costo de mantenimiento inmediato.

En una planta con limitado tiempo de mantenimiento, donde sea requerida una gran confiabilidad en los equipos, o en un lugar que opera todo el tiempo (24/7/365) y donde las paradas por mantenimiento implican pérdida de producción, puede que sea necesario tomar una decisión basada en el análisis de riesgos. En dicho caso, se debería considerar la probabilidad y consecuencia de una falla, donde para evaluar la probabilidad de falla se debería tomar en consideración varios factores, por ejemplo:

- ¿Qué está causando la falta de contacto?
- ¿Empeorará la falla por si misma?
- ¿Cuándo podría suceder una falla completa?
- ¿Qué factores podrían acelerar para que potencialmente suceda una falla completa?
- ¿Qué factores poco probables podrían causar una rápida falla completa?

La segunda parte del análisis de riesgos es evaluar la consecuencia del evento, en caso que el componente falle de manera inesperada, por ejemplo:

- ¿Cuál es la probabilidad que personal pueda salir herido por un arco eléctrico, fuego, etc?
- ¿Cuál es la probabilidad de pérdida de servicio, funcionamiento, monetaria, etc?
- ¿Cuál es la probabilidad de pérdida de equipos o capital?
- ¿Cuál es la probabilidad de pérdida adicional o ambiental causada por la falla?
- ¿Cuál es la probabilidad de fallas colaterales como por ejemplo, fuego o explosión?

¿Por qué una anomalía térmica podría empeorar por si misma?

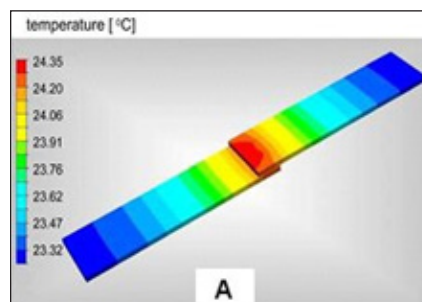
La respuesta fácil, porque algo está ocurriendo que reduce la superficie de contacto de la superficie. La razón común para lo anterior puede ser debido al desgaste por contacto causado por el micro-movimiento de una superficie contra la otra, que potencialmente podría suceder debido a las siguientes razones: vibración externa, armónicos, ciclos térmicos, etc. Una segunda causa para la reducción del área de contacto podría ser la presencia de micro-arcos eléctricos entre la separación de una conexión deformada o mal instalada. Una tercera causa para la reducción del área de contacto puede ser la presencia de un agente corrosivo externo.

Lo más preocupante de lo anterior es que sin más pruebas o sin desarmarlo, puede que nunca se pueda determinar la causa del contacto inadecuado. En algunas ocasio-

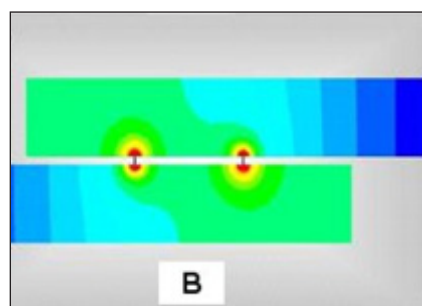
Figura 3a: Modelación térmica.

Ejemplo: 100 A

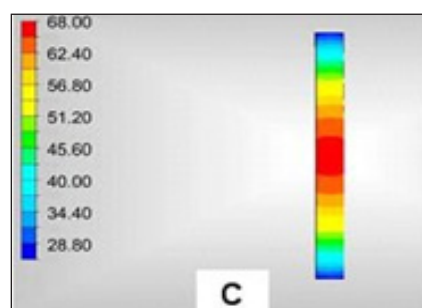
(Imágenes cortesía de referencia #10)



A. Modelo térmico de una conexión con temperatura superficial máxima de 24°C o un aumento de 1°C



B. Modelo térmico lateral mostrando la máxima temperatura en los puntos resistivos de contacto



C. Modelo térmico lateral mostrando la máxima temperatura interna en los puntos de contacto (68°C)

nes también se podría utilizar ultrasonido para detectar la presencia de arcos eléctricos dentro de la conexión, que es solo uno de los posibles fenómenos que podrían suceder internamente. En algunos casos podría ser posible medir una caída de voltaje en el conector, donde la impedancia y la cercanía al ‘voltaje de derretimiento’ puede ser establecido. Pero en la mayoría de los casos lo anterior no es posible, seguro, o práctico de realizar.

Existen dos posibles acciones para evaluar la severidad y la probable cercanía a una ‘falla completa’: El método de aproximación de los vatios y La modelación térmica.

Método de aproximación de los vatios

Para utilizar este método se necesita una línea de visión directa a la anomalía y también conocer la corriente al momento de la inspección. Usuarios entrenados de la termografía comprenden acerca del análisis de patrones térmicos y tratan de anticipar el grado del problema. Para propósitos del análisis es importante considerar la superficie total afectada (la zona caliente), el material, la masa del dispositivo, las condiciones de radiación y convección del entorno, y la temperatura máxima y promedio de la zona afectada. Luego simplemente el profesional debe preguntarse, ¿Cuál es mi mejor estimación de los vatios que crearán un patrón térmico en dicha superficie? Una aproximación de la magnitud de los vatios es todo lo que se necesita. Cuando no es posible calcular la magnitud de los vatios, se puede realizar una estimación basado en la ecuación de Stefan-Boltzmann para la transferencia de calor, agregando la ecuación de Newton para la transferencia de calor por convección. En estos cálculos el área total es la zona afectada por el calor y la temperatura superficial es el promedio de la temperatura medida con la cámara termográfica de la zona afecta.

El siguiente paso es tomar una medición de la corriente y calcular la magnitud de la ‘Resistencia de falla’, dividiendo los vatios estimados entre la corriente al cuadrado. Esto dará como resultado la resistencia en ohmios de la conexión, donde al multiplicar el valor por 1000 se obtendrá el valor en mili-ohms y al multiplicarla por otros 1000 se obtendrá el valor en micro-ohms.

Al conocer los micro-ohms se puede aplicar la corriente de diseño para calcular la caída de voltaje a través de la conexión. Si dicho valor se acerca al ‘voltaje de derretimiento’, existe una alta probabilidad para una falla completa. Para verificar los valores del ‘voltaje de derretimiento’, favor revisar la Tabla 2.

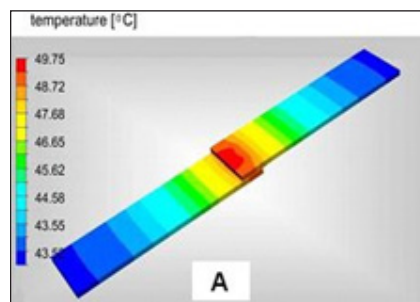
La desventaja de este método es que no puede lidiar con algunos criterios de diseño (2 y 3), debido a que son eventos transitorios y que la capacitancia térmica del material

Tabla 2		
Voltajes de ablandamiento y derretimiento de algunos metales (Ref #9)		
Material	Voltaje ablandamiento	Voltaje derretimiento
Al (Aluminio)	0.1	0.3
Cu (Cobre)	0.12	0.43
Ag (Plata)	0.09	0.37
Au (Oro)	0.08	0.43
Sn (Estaño)	0.07	0.13
Zn (Zinc)	0.1	0.17
Ni (Níquel)	0.16	0.16

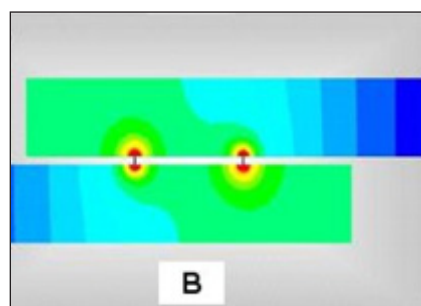
Figura 3b: Modelación térmica.

Ejemplo: 200 A

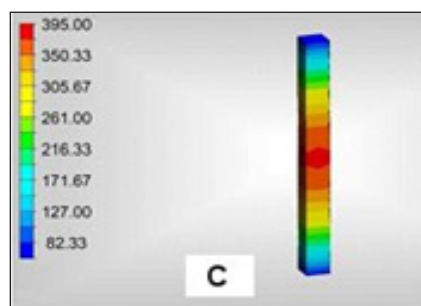
(Imágenes cortesía referencia #10)



A. Modelo térmico de una conexión con temperatura superficial máxima de 49°C o un aumento de 26°C



B. Modelo térmico lateral mostrando la máxima temperatura en los puntos resistivos de contacto



C. Modelo térmico lateral mostrando la máxima temperatura interna en los puntos de contacto (395°C)

jugará un papel para saber si el 'voltaje de derretimiento' se podría alcanzar. En adición, alta convección natural o forzada hacen muy difícil utilizar esta técnica.

Thermal Modelling Method

Este método involucra el utilizar diseño tridimensional en computadora de un componente, además de utilizar el programa de análisis finito de diferencia para determinar la cantidad de vatios requeridos en el punto de contacto para producir internamente las temperaturas y patrón externo similar al observado con la cámara termográfica.

Luego de haber establecido los vatios se aplica la misma técnica de análisis descrita en el método anterior de aproximación de vatios para calcular la cercanía al voltaje/temperatura de derretimiento para las diferentes corrientes de diseño. La ventaja de esta técnica es que la determinación de los vatios será más precisa y si se desea también pueden ser analizadas situaciones transitorias asociadas a los criterios de diseño (2 y 3).

¿Qué pasa si los métodos de modelo térmico o aproximación de vatios no pueden ser utilizados? Como por ejemplo, cuando no se conoce la carga. De no ser posible o práctico aplicar estos métodos, entonces la única solución para minimizar el riesgo es monitorear continuamente o en intervalos.

Monitoreo Continuo

De los dos métodos de monitoreo, el método continuo de una conexión eléctrica es el preferido aunque puede ser costoso. En este método una cámara infrarroja o un medidor de punto infrarrojo es colocado para continuamente observar una conexión y verificar el aumento de temperatura. En algunos casos se podrían predefinir alarmas que podrían ser enviadas a una estación de monitoreo o control. Este tipo de monitoreo es únicamente efectivo cuando se cuenta con una directa línea de visión, como podría ser el caso de sub-estaciones en el exterior o gabinetes eléctricos de distribución con ventanas infrarrojas instaladas. Típicamente, para obtener una línea directa de visión el panel deberá ser abierto o la cubierta removida, lo que en ciertas situaciones podría crear potenciales condiciones inseguras en el caso de realizar monitoreo continuo. Debido a que las cámaras infrarrojas y los medidores de punto infrarrojo cada vez son más pequeños, podría ser posible montar estos dispositivos dentro del gabinete con la puerta o cubierta cerrada (de contar con distancias seguras). El monitoreo continuo posee la ventaja de detectar factores inesperados que potencialmente podrían causar una falla catastrófica en la conexión, pero también posee la desventaja de los costos relacionados a la compra e instalación de los equipos. Grandes industrias podrían considerar adquirir estos equipos previamente a manera de tenerlos listos para instalarlos temporalmente en el evento de una anomalía en un componente crítico. A medida que el precio de las cámaras infrarrojas continúa disminuyendo, simultáneamente con el incremento de funciones e interface de red, se abre más la posibilidad al uso de sistemas infrarrojos y es económicamente viable al detectar fallas térmicas en equipo crítico y en situaciones donde es compleja la reparación o muy costoso el tiempo fuera de funcionamiento.

Monitoreo por Intervalo

Aun cuando es menos preferido que el monitoreo continuo, el monitoreo por intervalo puede ser útil para tratar de minimizar el riesgo catastrófico. Este método consiste en inspeccionar frecuentemente la 'falla potencial' para identificar cuando la falla podría ser

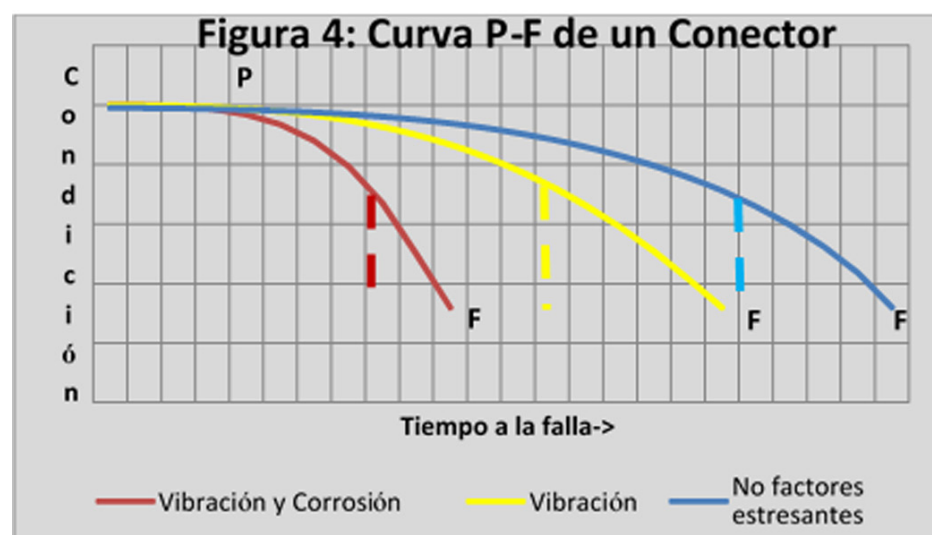
Existen muchas variaciones a este concepto, pero el fundamento puede ser el mismo, donde 'P' es el Punto de la detección de una falla potencial (en este caso con termografía).

inminente. Lo anterior típicamente es realizado estableciendo la cantidad del aumento y los límites de alarma. El problema con el monitoreo por intervalo es que asume que la falla sucederá por la degradación del componente, típicamente en respuesta a factores que estresarán el problema. Pero este tipo de monitoreo será inefectivo en el caso de un evento inesperado como por ejemplo, corto circuito o picos de voltaje o corriente. Los encargados de mantenimiento deben estar preparados para aceptar que aun cuando es baja la posibilidad que un evento inesperado suceda, el riesgo de una falla catastrófica es real, por lo que las consecuencias deberían ser mitigadas.

Luego de haber encontrado una anomalía y de haber determinado realizar monitoreo cada cierto intervalo de tiempo, se debe tratar de realizar inspecciones lo más frecuente que sea posible. Si existen factores que puedan acentuar o estresar una falla, como carga pico, construcción, etc., el monitoreo debe tratar de realizarse lo más cercano cuando dichos factores sucedan.

Frecuencia de la Inspección

Nolan y Heap desarrollaron el concepto de la curva de falla "P-F" que se muestra en la figura 4. Existen muchas variaciones a este concepto, pero el fundamento puede ser el mismo, donde 'P' es el Punto de la detección de una falla potencial (en este caso con termografía). Luego es seguido por un período donde la falla se desarrolla hasta que ocurre la falla. Algunos personas sugieren que un intervalo de mantenimiento predictivo adecuado se definirá por el tiempo entre la detección del potencial problema y la falla de funcionamiento, dividido entre dos $(P-F)/2$ como se muestra en la Figura 4. El punto de Falla "F" representa la falla debido a la degradación y la falla de funcionamiento para cumplir con los criterios de diseño 1, 2 ó 4. La línea punteada representa la falla del criterio de diseño 3, un suceso impredecible de una extremadamente alta corriente instantánea.



Factores estresantes y situaciones de falla

A continuación, se presentan algunos escenarios para ilustrar como la curva P-F puede ser diferente en distintos escenarios:

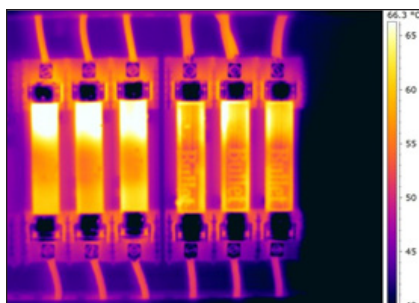


Figura 5a: Condición Normal

Los dispositivos térmicos normalmente conducirán calor a las conexiones y los conductores. El conductor toma una temperatura intermedia, menor al dispositivo pero mayor al conductor.



Figura 5b: Falla Potencial

La conexión es más caliente que el dispositivo térmico y el conductor.

Situación 1. Una carga máxima normal fluyendo en el circuito todos los días 24/7. Temperatura ambiente controlada, que no contiene agentes externos adversos corrosivos, ni vibración externa. Los mecanismos en el conector con falla están minimizados.

Situación 2. Igual a la situación 1, pero el circuito es encendido y apagado frecuentemente todos los días. El mecanismo de falla existe debido al desgaste creado por la expansión y contracción térmica a medida que el conector con anomalía térmica se calienta y enfría cada vez que es encendido y apagado.

Situación 3. Igual a la situación 1, pero la anomalía en el conector térmico está localizada en: una planta de tratamiento de agua, piscina pública, planta de procesamiento de alimento, establo, papelera o planta química con ambiente corrosivo como cloro, amoníaco, sulfatos, etc. El mecanismo de falla existe debido al medio ambiente.

Situación 4. Igual a la situación 1, pero la anomalía térmica está localizada en un ambiente con vibración inducida externamente. Aun cuando algunos conectores se diseñan para soportar alguna vibración, ejemplo: conexiones de motor, etc., algunas otras fuentes de vibración no siempre son anticipadas en el diseño, ejemplo: proximidad a un compresor, construcción, tránsito de vehículos, etc.

Cuando múltiples factores estresantes pueden existir simultáneamente, el tiempo a la falla puede ser más rápido. Una anomalía térmica en un conector de la unidad de control de un motor de 50 Hp en una planta nuclear podría tener una curva p-f con tiempo de 3 o 4 años, en un intervalo de inspección de 2 años (que es el intervalo máximo recomendado por EPRI), mientras que una planta de carne o una planta de tratamiento de agua, con 4 factores de estrés combinados, el tiempo de la curva p-f puede ser de 6 meses, requiriendo un intervalo de inspección cada 3 meses.

Conexión eléctrica a dispositivos térmicos

Evaluar conexiones eléctricas conectadas a dispositivos térmicos como fusibles, breakers, contactores, transformadores o capacitores pueden ser complejo de analizar por la adyacencia. La segunda ley de la termodinámica indica que el calor fluirá de caliente a frío, y que prefiere el camino con menor resistencia que típicamente podría ser el 'frío' y conductivo (térmica y eléctricamente) cable. Para que el calor llegue a los cables deberá pasar por el conector, calentándolo aún un poco más que el cable, lo anterior no debido a una 'falla de funcionamiento'. En este caso debemos analizar el componente, patrón térmico, temperatura y situación para evaluar si en realidad se trata de un problema en la conexión. Si el dispositivo térmico está expuesto y se cuenta con una buena línea de visión, el análisis será más fácil, ¿Cuál está más caliente, el componente o la conexión? Si el componente es el más caliente, entonces la conexión no es el problema. Si la conexión es la más caliente, la conexión podría tener una 'falla de funcionamiento', lo cual podría ser una situación aún más seria comparado con la conexión entre dos conductores sin un dispositivo térmico, debido a que la conexión podría causar que el dispositivo térmico se caliente aún más y que a su vez también tenga una 'falla de funcionamiento'. Un ejemplo podría ser un fusible o una protección de sobre-corriente, donde al ocurrir lo anterior se podría observar un patrón térmico de calor fluyendo en dirección hacia dichos elementos, debido a que se vuelven el camino con menor resistencia. En sistemas trifásicos, también se podría utilizar el proceso de comparación del patrón térmico de fase a fase, y en sistemas monofásicos se podría comparar el patrón térmico de la línea de entrada y la línea de salida.

References

1. NFPA 70B, Recommended *Practice for Electrical Equipment Maintenance*, National Fire Protection Association, 2006
2. McIntosh, G.B., *NFPA 70B Fault Severity Guidelines for Electrical Thermography*, Ontario Electrical Contractors Magazine, 2010
3. UL standard 489. Underwriters Laboratories, *Molded-Case Switches and Circuit-Breaker Enclosures*
4. Pauley, J, Square D Company, Bulletin No. 0110DB9901R2/02, *Wire Temperature Ratings and Terminations*, March 2002
5. Nowlan, F.S, Heap, H.F., *Reliability Centered Maintenance*, Report A066-579, 1978
6. Moubray, John, *Reliability-Centred Maintenance RCM II*, Elsevier Sci & Tech Book Div; 2nd edition, 1999
7. ISO 14224, International Standards Organization, Petroleum, petrochemical and natural gas industries -- Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment, 2006
8. Dodson, Nolan, *Reliability Engineering Handbook*, CRC Press; 1999
9. Timsit, Roland, S. The Connector TekNote, May 2001, Timron Scientific Consulting Inc., www.timron-inc.com
10. Timsit, R.S., Wilson, C., McIntosh G., Contact Spot Temperature and the Temperature of External Surfaces in an Electrical Connection, Proceedings of ICEC&ICREPEC, 2012

Resumen

La predicción de una falla en una conexión eléctrica basada únicamente en temperatura no es posible. Hasta que no conozcamos las causa raíz del problema, los límites térmicos de los materiales utilizados, otros límites térmicos, la variación máxima de la carga, los factores ambientales inusuales y otros factores de estrés que podrían presentarse en el componente; el determinar si la anomalía térmica es una falla potencial o de funcionamiento será extremadamente difícil.

A continuación, se presentan algunas de las soluciones para una conexión con anomalía térmica en orden de preferencia:

- 1) Si algún material conocido ha sobrepasado su límite térmico, se debe asumir que una falla de funcionamiento ha sucedido y se debe reparar. En muchos casos para una conexión el límite será menor a 90°C o la temperatura límite del aislamiento.
- 2) De no haber sucedido el inciso (1), se podría asumir que todas las conexiones con anomalía térmica son fallas de funcionamiento y se deben reparar.
- 3) Si el inciso (2) no resulta posible o si se quiere saber si se trata de una falla de funcionamiento o potencial, se podría realizar el análisis de vatios o modelación térmica para establecer la aproximación del valor de micro-ohm en la conexión con falla. Luego, usando este valor y los tres criterios de diseño de carga se debe establecer si el voltaje de derretimiento podría ocurrir, de ser afirmativo lo anterior una falla de funcionamiento o hasta catastrófica podría suceder.
- 4) Si el inciso (3) no es posible de realizar o no es confiable, entonces se debe considerar monitoreo continuo o de intervalos, entendiendo que si algún factor de estrés podría suceder estos métodos podrían no prevenir una falla completa o catastrófica. De suceder un factor de estrés inusual, se debe verificar el conector tan pronto como sea posible para investigar si la temperatura ha aumentado.

Cada vez que nos preguntan acerca de predecir una falla necesitaríamos: Primero una bola de cristal, segundo un buen seguro para protegernos y tercero conocer de algún otro trabajo en caso de ser necesario como empleado. La realidad de la naturaleza humana es que por lo regular no se recuerda los cientos de problemas que se han identificado con termografía y se repararon exitosamente, sino se pone más énfasis en una falla catastrófica que pudiera haber sido diagnosticada erróneamente como una 'anomalía menor'.

Agradecimientos

El autor quisiera agradecer la información técnica y conocimiento provisto por el Dr. Roland Timsit de Timron Scientific Consulting Inc. El Dr. Timsit posee un amplio conocimiento y experiencia en conexiones y contactos eléctricos, y comparte mucha información en su sitio web. Muchos documentos relacionados y algunos de los que se hacen referencia en este documento pueden ser descargados en: <http://www.timron-inc.com/>

El autor también quisiera agradecer el trabajo y conceptos en la evaluación equipos eléctricos de todos los miembros de The Snell Group, en particular a la edición y conocimientos provistos por Roy Huff. El análisis de imágenes térmicas evoluciona constantemente debido a todas las diferentes aplicaciones de la termografía, The Snell Group provee importante información en su sitio web www.thesnellgroup.com/espanol.