

amplitud - frecuencia donde se debe realizar un análisis tratando de determinar la relación entre las armónicas de la frecuencia fundamental y las causas mecánicas que las producen. Por ejemplo, en el caso de las vibraciones producidas por los engranajes de las cajas de velocidades, que tienen una señal periódica pero compleja, conociendo el número de dientes de las ruedas y su velocidad de giro es posible asociar los picos del dominio de las frecuencias y sus armónicas con un determinado engranaje. Supongamos que una rueda dentada de una caja de velocidad tiene una velocidad de giro de 2000 rpm y tiene 45 dientes, la frecuencia resultante fundamental será de 90000 ciclos (pulsos) por minuto o 1500 hz. Si existe algún valor de amplitud cuyo pico es significativo en el espectro y está localizado en este valor de frecuencia (1500hz) o en un múltiplo de la misma (3000,4500 o 6000 hz., etc) , se puede llegar a la conclusión que el origen de este pico está generado por defectos de la rueda de 45 dientes girando a 2000 rpm.

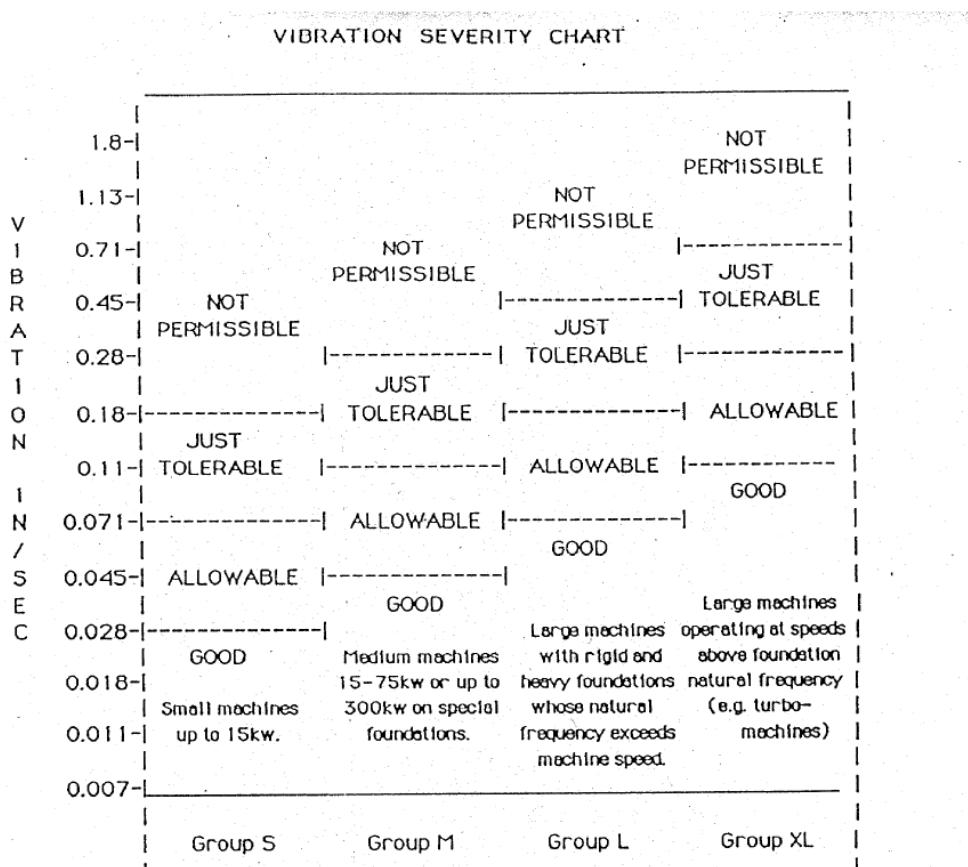


Figura 4.3.11

Comercialmente se consiguen equipos analizadores de vibraciones que están compuestos por la sonda (acelerómetro), el analizador portátil y un software para instalar en una PC donde se procesarán las mediciones, se realizarán los informes y se guardarán en una base de datos. Una vez instalado el software en la PC se cargan los datos de las máquinas que se van a analizar, la frecuencia y toda otra información que se requiera para realizar el barrido. Estos datos se transfieren de la PC al analizador y un operador entrenado realizará las mediciones en planta de acuerdo a la rutina establecida. También el operador podrá ingresar información y datos a través del teclado del analizador. Terminadas las mediciones el equipo se conecta a la PC y se cargan en esta los relevamientos, donde el operador podrá analizarlos mediante las opciones que le brinda el software y comparar con el historial de ese equipo para, finalmente, emitir un informe del que se desprenderá, tal vez, la necesidad de intervención sobre la máquina. En instalaciones complejas en las que se justifica la inver-

sión existen monitores que controlan permanentemente los niveles de vibración y que llegado el caso pueden disparar una alarma y eventualmente realizar la parada del equipo. Los equipos que se controlan bajo esta modalidad son las turbinas, los generadores, compresores y ventiladores. Esto es de particular importancia si se considera el caso de los rodamientos de turbinas que pueden llegar a fallar súbitamente no dando tiempo a predecir la falla.

#### 4.4 Análisis termográfico

Este método permite la detección de anomalías funcionales o constructivas a través de la captación de la radiación infrarroja emitida por la temperatura producida por alguna deficiencia de los equipos. Para ello existe una cámara especialmente diseñada que permite registrar la radiación de los cuerpos calientes mediante imágenes y medir su temperatura, y luego ser llevado y post procesado en computadora por un software y base de datos.

Las ondas electromagnéticas, de las que la radiación visible y la infrarroja forman parte, se clasifican en función de su longitud de onda o bien su frecuencia. La unidad de medida de la longitud de onda es el micrón ( $\mu\text{m}$ ) y el intervalo utilizado en la clasificación de las ondas electromagnéticas va desde los  $10^{-6} \mu\text{m}$  de los rayos  $\gamma$  hasta las decenas de kilómetros en las ondas de radio. (Figura 4.4.1)

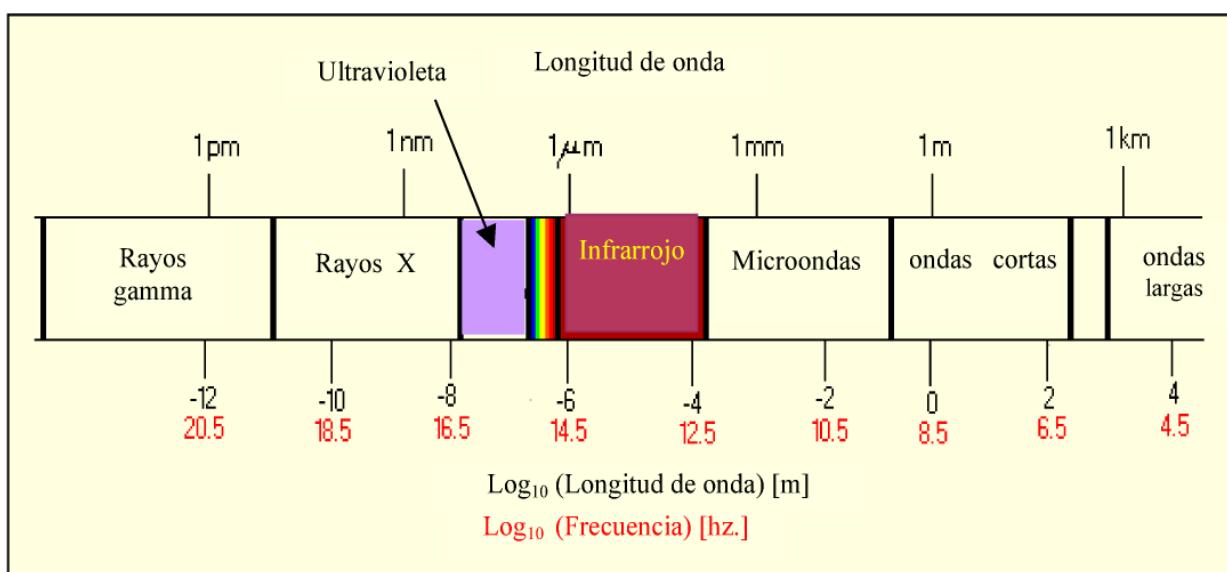


Figura 4.4.1

Todos los cuerpos emiten energía en función de la temperatura a la que se encuentran por lo tanto cuanto más alta sea su temperatura mayor será su emisión. Los objetos que nos rodean son visibles no por la radiación propia emitida por ellos sino porque reflejan la luz del ambiente circundante. Esto no quiere decir que no haya emisión de los cuerpos sino que esta se encuentra en el rango de las longitudes de onda fuera del espectro visible tal como la infrarroja. El hecho se puede comprobar si se dispone de la instrumentación sensible a la radiación infrarroja. Con ella se pueden distinguir los objetos porque estos tendrán una temperatura distinta a la del medio ambiente aunque solo sea fracciones de grado. Si un cuerpo se calienta lo suficiente se tendrá una determinada emisión aún en el caso del espectro visible, ya que si el cuerpo caliente se encuentra en la oscuridad se percibirá levemente enrojecido. El espectro visible está comprendido en el rango de 0.38 a 0.78  $\mu\text{m}$  en tanto que la radiación infrarroja tiene una mayor longitud de onda.

La radiación infrarroja puede reflejarse sobre superficies pulidas tal lo hace la luz visible en un espejo como así también tiene la capacidad de atravesar con poca atenuación delgados espesores de plástico transparente. Por otra parte la radiación visible no puede atravesar cuerpos sólidos construidos de silicio o germanio, que permiten el paso de rayos infrarrojos. Esta propiedad es aprovechada para la construcción de ópticas de instrumentos para la radiación infrarroja de manera de proteger a las lentes de la reflexión de los rayos solares.

La cámara infrarroja permite al operador obtener la distribución térmica de la superficie de un objeto pero no medir que pasa en el interior del elemento. Esto quiere decir que cualquier problema de naturaleza térmica, para poder ser relevado, debe estar o ser llevado a la superficie.

El instrumento permite el relevamiento de temperaturas anómalas en cuerpos sin protección o cobertura previa. Las protecciones o pantallas de plexiglás si bien deja pasar la luz visible, es una barrera para la radiación infrarroja. Si se apunta el instrumento sobre estas pantallas lo único que relevará es la temperatura de la propia pantalla. Sin embargo las delgadas películas de plástico transparente como polietileno o PVC dejan pasar los rayos infrarrojos pero con una pequeña pérdida.

El instrumento capta la radiación infrarroja que todos los cuerpos emiten en función de la temperatura a la que se encuentran. Cuando un cuerpo emite energía, ésta se debe a la absorción de la energía circundante emitida por otros cuerpos y a la propia energía. Esta energía emitida no es exactamente igual para todos los materiales de los cuerpos que están a la misma temperatura sino que depende del estado y tipo de superficie de dichos cuerpos. Cuando la energía radiante incide sobre la superficie de un cuerpo parte se refleja y parte es absorbida. Igualmente podemos decir de la energía interna de este cuerpo, la que al llegar a la superficie desde adentro parte se emite y parte se refleja hacia adentro. Aceptamos sin demostración, de acuerdo a la física, que una buena superficie receptora también es una buena superficie emisora y al contrario una mala superficie receptora es una mala superficie emisora. De aquí que *la mejor superficie receptora también es la mejor superficie emisora*: el cuerpo que absorba toda la energía que sobre él incide será el mejor emisor. Este cuerpo al absorber toda la energía no refleja nada y por lo tanto aparecerá como “negro”. Así se tiene a un objeto físico ideal llamado “cuerpo negro” o “radiador completo”. El nombre de cuerpo negro no es apropiado porque aunque éste no refleje energía emite toda la que tiene y si su temperatura es lo suficientemente alta se lo podrá ver como incandescente. La energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo por unidad de superficie y por unidad de tiempo se llama *emitancia radiante E (joule/seg.m<sup>2</sup>)* de la superficie. Por lo antedicho el mejor emisor es el cuerpo negro, en consecuencia se tendrá la *emitancia radiante del cuerpo negro En*. La emitancia radiante de cualquier cuerpo a una temperatura dada es una fracción de la emitancia radiante de un cuerpo negro a la misma temperatura, o sea:

$$E = e \cdot E_n$$

En donde  $e$  es la emitancia relativa o emisividad de la superficie

$e$  valdrá 0 para un reflector perfecto y 1 para la superficie idealmente negra o sea el mejor emisor

Mediante un sensor ubicado dentro de la cámara se genera una señal eléctrica que es procesada por el software incorporado y permite obtener la distribución térmica bidimensional del objeto. Para poder realizar esto el instrumento necesita conocer la temperatura ambiente, el rango de temperaturas a relevar y sobre todo la *emitancia relativa*. En la tabla 4.4.1 se listan algunos de los valores de la emitancia relativa de algunos elementos comunes en una planta de acuerdo al estado de su superficie.

Tabla 4.4.1

Elemento	Estado de la superficie	Emitancia relativa
Motor eléctrico	Fundición pintado color plateado	0.47
Motor eléctrico	Fundición pintado color azul	0.96
Motor eléctrico	Fundición pintado color verde	0.96
Motor eléctrico	Fundición pintado color amarillo	0.90
Motor eléctrico	Plástico semi brillante negro	0.96
Bomba centrífuga	Fundición color azul	0.96
Bomba a engranajes	Fundición pintado color negro	0.96
Tanques depósitos	Chapa pintada	0.96
Recipiente acumulador	Fundición	0.96
Reductor	Fundición pintado color verde	0.96
Reductor	Fundición pintado color azul	0.96
Reductor	Fundición pintado color gris claro	0.96
Reductor	Fundición pintado color amarillo	0.90
Pinzas de soldadoras	Cobre oxidado	0.80
Morsetería	Plástico claro	0.90
Interruptores	Plástico blanco	0.90
Interruptores generales	Plástico negro	0.96
Blindo barra	Aluminio anodizado	0.55

Si no se toma en consideración  $e$  se está cometiendo un error. Una forma práctica de conocer la emisividad es pegando una cinta negra de electricista cuyo valor de  $e$  se conoce y vale 0.95 aproximadamente. Con este valor de  $e$  se ajusta la cámara. Luego se espera unos segundos hasta que la cinta tome la temperatura del cuerpo y se mide la temperatura con la misma cámara sobre la cinta. Acto seguido se saca la cinta y el valor de la temperatura medida por el instrumento sobre el mismo punto anterior cambiará. Entonces se modifica el valor de la emisividad en la cámara hasta que la lectura de la temperatura del punto alcance el valor anterior. Entonces se lee en el instrumento el valor  $e$  obtenido. Es importante tener en cuenta que, de acuerdo a la experiencia, para poder determinar con cierta seguridad la emitancia relativa se necesita que el cuerpo se encuentre al menos 15 o 20 °C por encima de la temperatura ambiente.

El intervalo de temperaturas se debe escoger en función de lo que se quiere medir. Esto se puede ingresar manualmente en el instrumento indicando un mínimo y un máximo de temperaturas y quedará invariable sin importar la cantidad de energía que se emite o bien dejar que el instrumento lo establezca automáticamente. En el primer caso  $e$  obtendrá una buena definición pero si hay objetos que tienen una temperatura por encima de del rango escogido se saturarán las imágenes y se perderá nitidez. Por el contrario si el rango se impuso automáticamente no será tan preciso pero se detectan todos los puntos calientes de manera separada. El caso práctico más notable es ingresar y dejar fija la temperatura inferior y dejar libre la máxima. Esto permite detectar anomalías en puntos relativamente más fríos que se encuentran vecinos a puntos que por su funcionamiento son muy calientes.

La resolución térmica es la menor diferencia de temperatura que se puede relevar. Los termógrafos comerciales tienen una resolución de 0.1°C aunque en la práctica no es necesaria tanta exactitud.

Se puede adquirir destreza en el uso del termógrafo con pocas horas de práctica pero lo que realmente es complicado es la interpretación de las imágenes captadas. Hay que recordar que las superficies brillantes reflejan la radiación visible y también la infrarroja, lo que a veces puede inducir a error considerando cuerpos calientes donde solo es un reflejo. Pero esto se puede capitalizar a nuestro favor sobre todo en lugares poco accesibles. Mediante espejos o superficies pulidas se puede captar las imágenes de los puntos calientes con mínima pérdida de los valores de temperatura reales. Si hay necesidad de tomar muestras de elementos a la intemperie en días soleados la cosa se complica por los reflejos solares. Para solucionar esto se buscan ángulos distintos para evitar los reflejos o bien si eso no es posible se interpone un objetivo a base de silicio que es permeable a la radiación infrarroja pero opaco a la radiación visible. Cuando se quiere relevar la temperatura de puntos situados en superficies curvas es importante que se oriente el eje del objetivo de la cámara en la dirección del radio de la curvatura de la superficie. (Figura 4.4.2)

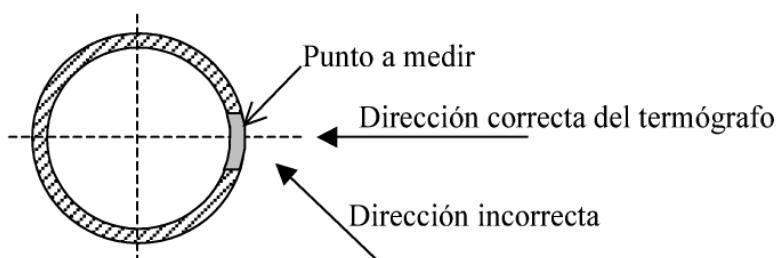


Figura 4.4.2

Una vez tomadas las imágenes se graban en la cámara y se transfieren a la PC donde con una base de datos se las archiva, clasificándolas según el código del lugar o equipo medido, número previamente establecido en un lay out. El software permite la creación de una galería de imágenes archivadas de anteriores pasadas lo que facilita determinar cuales fueron los puntos relevados y comparar dos idénticos puntos en momentos diferentes. Para ello es importante que en el software se registre el rango de temperaturas a la que cada medición se realizó para que sean comparables las mediciones. También el programa permite la emisión de un informe con los datos del equipo, la temperatura ambiente y la relevada, la emisividad y la distancia de registro. También muestra la imagen junto a un espectro de temperaturas pudiendo marcar con el puntero dentro de la imagen los sitios de interés. Los valores de las temperaturas de dichos puntos se indicarán en un cuadro lateral. El operador deberá compilar en un campo de descripción del problema un comentario técnico de lo que ocurre en el punto de análisis.(Figura 4.4.3)

#### 4.4.1 Aplicaciones de la termografía

##### Aplicaciones eléctricas:

En los armarios y tableros de comando de la máquinas se encuentran componentes tales como transformadores, interruptores, relés, cables y morsetería. Si no hay un correcto apriete de los elementos de unión se reduce la superficie de contacto de los elementos y por consiguiente la corriente pasará por una sección menor con el consecuente calentamiento. De esta manera es posible realizar un barrido rápido sobre el equipo que realizar toda la secuencia de chequeo operando solamente en aquellos puntos donde se están flojos los contactos. (Figura 4.4.4)

El cálculo equivocado de la sección los conductores traerá como consecuencia un calentamiento que será detectado con la termografía.(Figura 4.4.5)

## Aplicaciones mecánicas:

Los elementos mecánicos también pueden ser analizados mediante la termografía. En la figura 4.4.6 se observa un reductor de velocidad que se ha calentado fruto de la falta de lubricación. Se observa que el motor no presenta exceso de temperatura por lo que la causa del calentamiento localizado no sería el sub dimensionamiento del conjunto sino la falta de lubricación del reductor. En la figura 4.4.7 se muestra el calentamiento de una bomba hidráulica a causa de estar obstruido el circuito de refrigeración. Otro instrumento basado en el mismo principio termográfico es el termómetro infrarrojo que permite medir al instante la temperatura de un punto. Es un dispositivo con forma de pistola que al ser apuntado sobre el elemento y accionado el comando, emite un haz láser en forma de cono. De esta manera la imagen de este cono sobre la superficie a medir determina una circunferencia dentro de la cual el sensor mide la temperatura media. Hay que tener cuidado con esto porque, al sensar la media de la temperatura del punto caliente, a medida que se aleja el instrumento del punto a medir mas se agranda el círculo y habrá diferencias entre la lectura y la temperatura real.

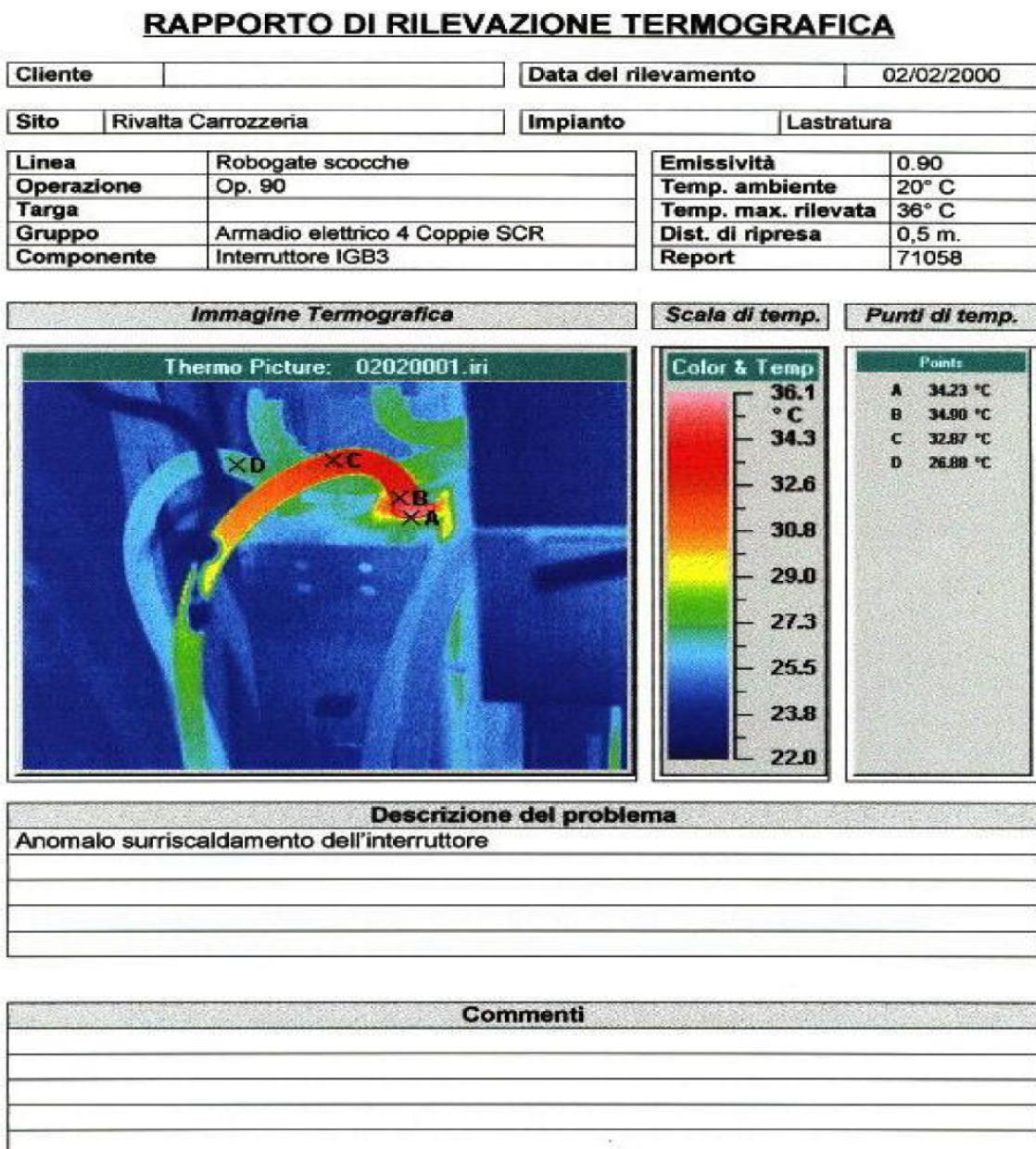


Figura 4.4.3

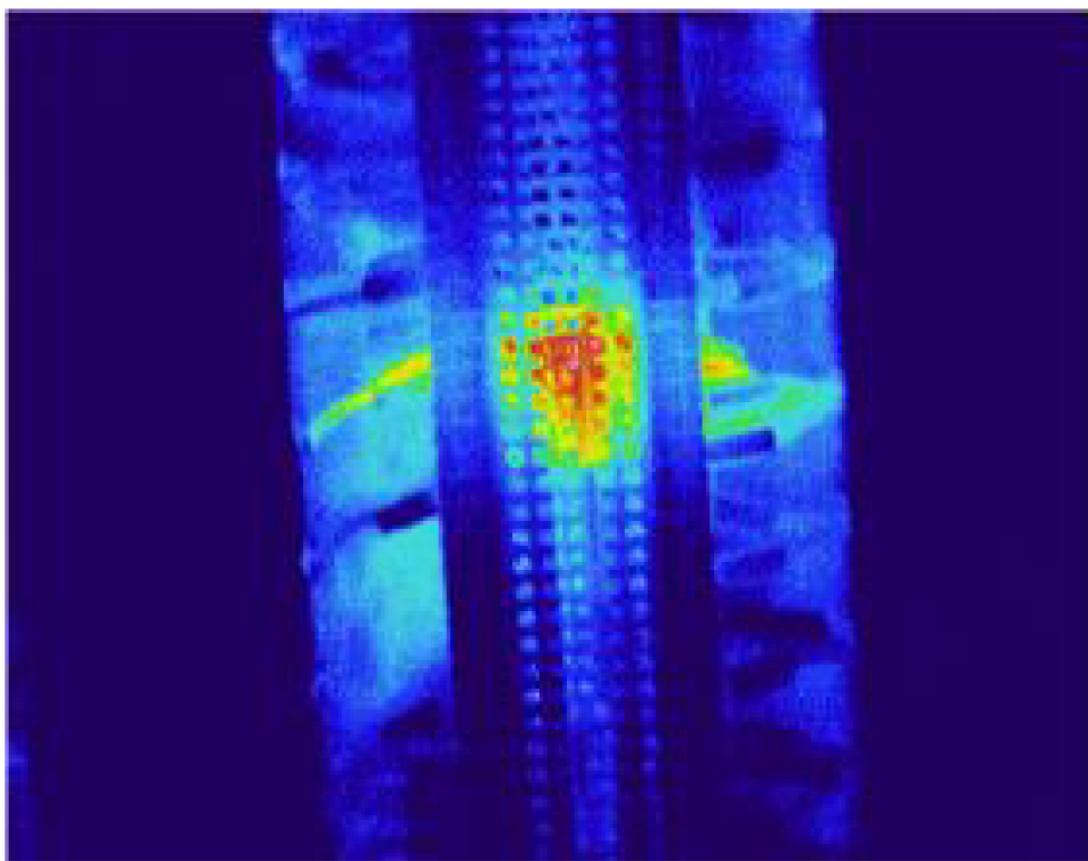


Figura 4.4.4: Bornes sin ajustar

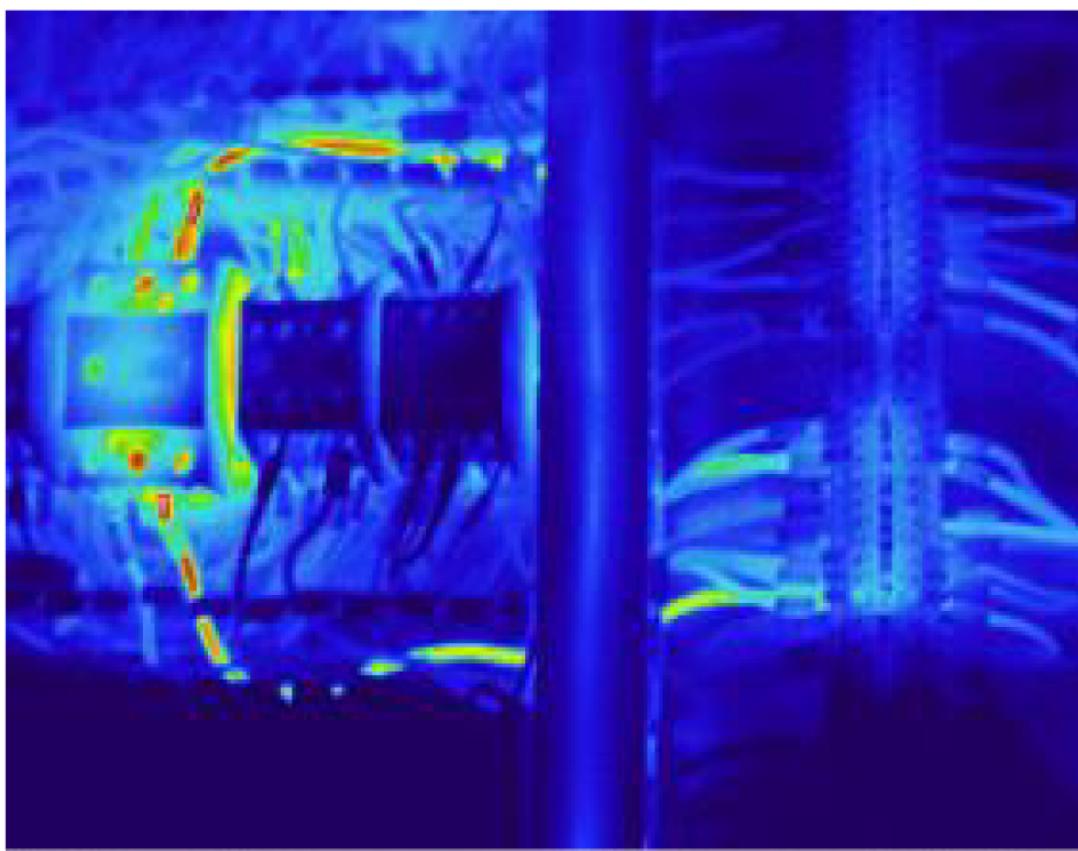


Figura 4.4.5: Cable subdimensionado

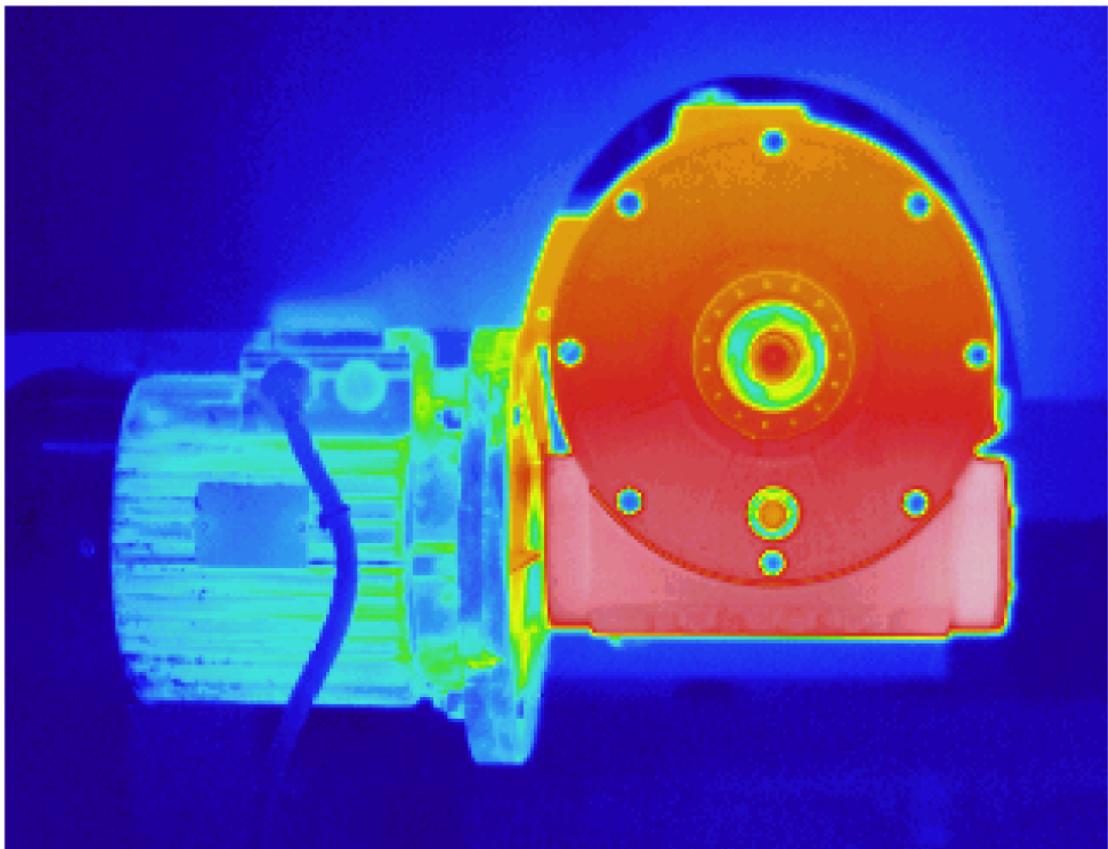


Figura 4.4.6: Reductor con falta de lubricación

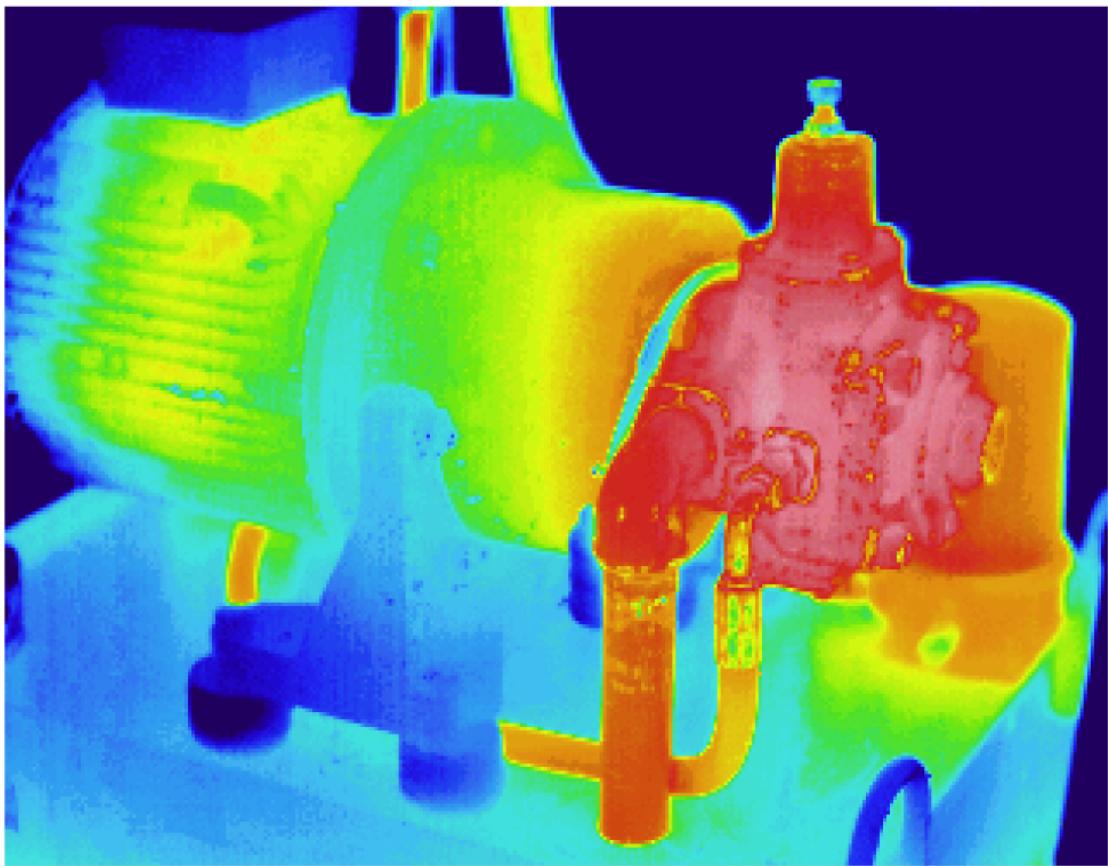


Figura 4.4.7: Bomba hidráulica con falta de refrigeración

## 4.5 Análisis de lubricantes

### 4.5.1 Consideraciones generales

El presente párrafo tiene por objetivo evidenciar la importancia que la lubricación y la gestión de los fluidos tiene en la vida de los equipos. Existen indicadores a nivel mundial que expresan lo costoso que resulta no gestionar apropiadamente la lubricación ya sea en la selección del lubricante, hecho vinculado al diseño del equipo, como en la provisión, almacenamiento y fundamentalmente en el control del estado del lubricante. En equipos que usan sistemas de circulación cerrada de fluidos de potencia como los hidráulicos, este control es particularmente importante en el diagnóstico del estado de la máquina, en otras palabras, el análisis de la condición de los fluidos es un factor importante en la predicción de fallas. El desarrollo de un programa de monitoreo de las condiciones de los aceites en equipos con circuitos hidráulicos se debe sustentar en los siguientes puntos:

- 1) Análisis de la salud del fluido
- 2) Control de las condiciones del equipo
- 3) Análisis del desgaste del equipo.

El primer punto consiste en el análisis de las propiedades físicas y químicas que el fluido tiene para asegurar su capacidad de operar de acuerdo a lo establecido por el diseño del equipo. Cualquier desviación de las especificaciones del fluido conduce rápidamente al deterioro del equipo. Estas características son homogéneas en todo el circuito por lo que, para determinar las condiciones, se pueden tomar muestras en cualquier punto del sistema. Si existe degradación del fluido este examen lo detectará siendo esto tal vez síntoma de problemas en el equipo. Pero aún en el caso de no encontrar anomalías en las propiedades del fluido no se puede tener la certeza de que el equipo no tenga problemas.

Es así que pasamos al segundo punto en el que se realiza el control de la salud operativa de la máquina. En esta etapa los controles están enfocados a la detección de contaminantes sólidos, humedad, líquidos diluidos y la temperatura del sistema. Cualquiera de estos factores lleva seguramente a la aparición de fallas en el sistema. Las condiciones del fluido pueden cambiar muy rápidamente por lo que es necesario establecer un adecuado plan de monitoreos del fluido. La frecuencia de estos estará en función del impacto que dicho factor tiene en la máquina y de la importancia que el equipo tiene dentro del proceso productivo.

Por último el análisis de la condición del fluido debe permitir detectar la presencia de desgaste o rotura en los componentes del circuito. Si los dos pasos anteriores se cumplen con la regularidad adecuada a la criticidad del equipo, los riesgo de que aparezcan daños o desgaste son mínimos. A veces se ordena una espectrografía para determinar la presencia de partículas metálicas producto del desgaste, lo que no es satisfactorio porque esta técnica permite detectar partículas menores de seis micrones y detecta la presencia de un determinado elemento. Además es necesario realizar un estudio de la morfología de las partículas metálicas para llegar a una conclusión valedera del tipo de desgaste.

### 4.5.2 Características de los lubricantes

Usaremos el término de lubricante para referirnos a todas las sustancias líquidas, pastosas o sólidas que tienen las siguientes funciones: