

TERMOGRAFIA APLICADA AO CONTROLE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM USINAS NUCLEARES

EDSON MINELLI e ATTILIO BRUNO VERATTI

Gerência de Suporte e Teste (GST.O) – Divisão de Parada e Manutenção (DIPM.O) - Grupo de Manutenção Preditiva e Diagnostica Eletrobrás Termonuclear S/A – Rodovia BR-101 Km 132 – Praia de Itaorna – Angra dos Reis – RJ – Brasil.

Icon Tecnologia – Av. Macuco, 240 conj. 121 – São Paulo – SP – Brasil
e-mail: minelli@eletronuclear.gov.br - abv@icontec.com.br

1) Introdução:

Com a maturidade da geração nuclear de energia, a busca por padrões superiores de segurança e confiabilidade tem levado a um crescente interesse sobre o controle da eficiência energética das Usinas.

Dados operacionais revelam que as perdas entre o Reator e a Turbina podem variar entre 5 e 9%, perdas essas que tornam-se mais preocupantes devido ao aumento de competitividade do Setor Energético Brasileiro em razão da criação do mercado regulador de energia elétrica (ONS).

Apesar do mercado ainda se encontrar desequilibrado, com forte pressão do lado da demanda, esse quadro tende a se equalizar nos próximos 03 anos com a construção das Usinas de ciclo combinado e a gás.

Dentro desta conjuntura, nossa Organização vem buscando criar processos que elevem nossa eficiência térmica, inclusive desenvolvendo parcerias com a iniciativa privada como no caso da Icon Tecnologia e acreditamos, como veremos a seguir, que as técnicas de inspeção e análise termográfica podem dar uma grande contribuição nesse sentido.

Nesse trabalho trataremos de um conceito denominado por nós de Eficiência Energética em Plantas Nucleares (**EEPN**) de uma maneira ampla, ou seja, considerando o retorno financeiro necessário a manutenção da mais alta segurança e qualidade imprescindíveis em nosso ramo de negócio.

Dessa forma este conceito de EEPN engloba desde a energia térmica gerada no reator até a energia elétrica entregue à rede distribuidora. Parte deste conceito se baseia na manutenção de componentes por onde as perdas térmicas demonstram-se bastantes expressivas traduzindo-se em maior consumo de energia e podendo inclusive provocar interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Nosso trabalho irá se concentrar em três tópicos, como veremos a seguir:

Componentes Térmicos:

Este segmento talvez seja a maior inovação em termos de análise e inspeção termográfica, incluindo-se aqui os isolamentos térmicos dos circuitos principais e secundários, purgadores, caldeira auxiliar e válvulas de alívio e segurança. São esses equipamentos que resultam em grande parte pela perda de eficiência do ciclo térmico da Usina. Nesses casos é possível identificar falhas de

isolamento térmico, estimar a espessura de revestimentos, falha de purgadores e passagem de válvulas. Cabe ressaltar que existem outras técnicas que permitem a identificação de falhas nos equipamentos acima mencionados, mas nenhuma aponta para uma relação custo x benefício tão elevada quanto a inspeção e análise termográfica.

Componentes do Sistema Elétrico:

Este segmento é composto por disjuntores, chaves, barramentos e conexões elétricas que muitas vezes provocam paradas na operação da Usina ou interrupções no fornecimento de energia elétrica as distribuidoras.

Componentes Eletro-Mecânicos:

Aqui trataremos de mais uma nova área de aplicação da termografia, onde é possível em conjunto com outras tecnologias, aumentar a confiabilidade dos equipamentos com a conjugação da análise vibracional e da tribologia. Compõe este segmento bombas, motores elétricos, geradores, onde podemos verificar as condições dos mancais, acoplamentos e enrolamentos.

Em todos os itens acima a técnica da Termografia desempenha um importante papel na localização de falhas e quantificação de perdas, contribuindo efetivamente para um aprimoramento da **EEPN** e possibilitando elevados Retornos de Investimento (**RDI**).

O Retorno de Investimento (RDI) em uma Usina Nuclear pode atingir valores superiores a 50 vezes o capital investido em inspeções e equipamentos, sobretudo quando considerações ambientais e a segurança da população estão em jogo.

2) Monitoração de Componentes Térmicos:

A monitoração de componentes térmicos engloba os seguintes itens:

2.1) Detecção de Áreas de Falhas e Quantificação de Perdas Térmicas em Revestimentos.

O primeiro objetivo dessa modalidade de inspeção é a localização regiões não isoladas e de falhas em revestimentos de linhas de vapor nos ciclos principal e secundário, caldeiras, etc.

Já a quantificação da perda de energia tem por objetivo permitir o controle da quantidade de calor trocado por um equipamento com o ambiente, em função de suas condições de operação e estado do revestimento. Este dado é de grande importância para se conhecer sua

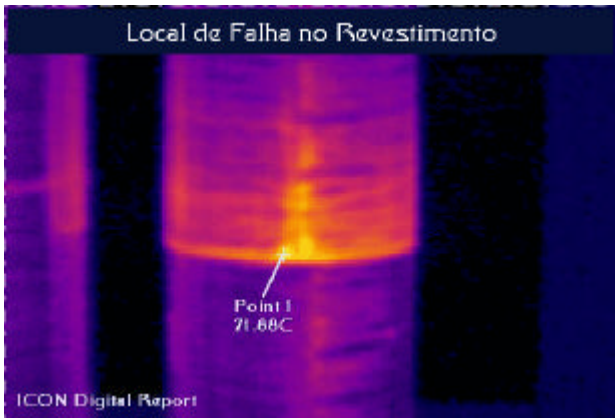


Figura 1:

eficiência térmica ou para a tomada de decisão quanto à troca ou reparo de revestimentos isolantes. O método adotado para o cálculo de perda térmica parte dos mecanismos de convecção e radiação, como se segue:

$$Q_{CNV} + Q_{RAD} = h(t_E - t_A) A T + S e (T_E^4 - T_A^4) A T$$

(Tabela 1)

Tabela 1

- Q_{CND} = calor transferido por condução em kcal/h m²
- Q_{CNV} = calor transferido por convecção em kcal/h m²
- Q_{RAD} = calor transferido por radiação em kcal/h m²
- t_i = temperatura da face interna da parede em graus C
- t_E = temperatura da face externa da parede em graus C
- T_A = temperatura do ar em graus C
- L = espessura da camada em metros
- k = condutividade térmica do material em kcal/m²h^oC
- h = coeficiente de transmissão de calor por convecção em kcal/m²h^oC
- s = constante de Stefan-Boltzmann
- e = emissividade do revestimento externo
- T_E = temperatura da face externa em graus Kelvin
- T_A = temperatura ambiente em graus Kelvin
- A = área em m²
- T = tempo em horas

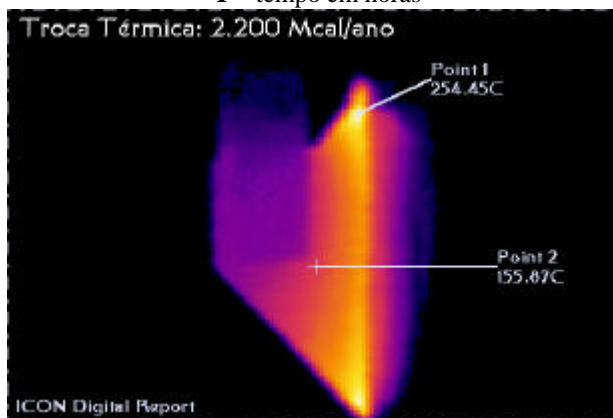


Figura 2:

Para a realização dessa tarefa são utilizados programas aplicativos que permitem, a partir das temperaturas tomadas externamente por termografia, o cálculo do número de calorías, BTU ou Kwh trocados com o ambiente em um dado período de tempo. Com tal informação, a decisão sobre a necessidade de reposição do revestimento é obtida através da comparação direta entre o custo dessa operação e o custo da energia trocada com o ambiente.

2.2) Avaliação da Espessura de Revestimentos (AER):

Em equipamentos que não permitam a verificação direta do estado dos revestimentos refratários (como na Caldeira Auxiliar do Sistema de Rejeito e Selagem da Turbina), é possível estabelecer-se uma correlação entre a espessura do revestimento e as temperaturas externas, medidas com o auxílio de radiômetros ou termovisores.

A Avaliação de Espessura de Revestimentos (aplicativo AER-ICON) é realizada a partir do cálculo do fluxo de calor que passa através da parede do equipamento. Esse cálculo leva em conta o uso de paredes multi-camada (geralmente até 5 camadas) com diferentes espessuras e condutividades térmicas para cada material.



Figura 3:

Com base na temperatura interna do processo e nas características físicas dos materiais que compõem a parede, pode-se estabelecer uma correlação entre a temperatura externa e a espessura restante de revestimento naquele local.

Dessa forma, os valores de temperatura externa convertem-se em uma valiosa fonte de informação para os operadores que podem, a partir dessa avaliação, decidir quando da conveniência de reparos ou paradas.

O grande benefício dessa análise é a possibilidade de se estabelecer os valores limites de espessura de revestimento aceitáveis e o acompanhamento das fases finais da campanha, com o objetivo de prolongá-la com segurança, diminuir tempos de parada e aumentar a produtividade do equipamento.

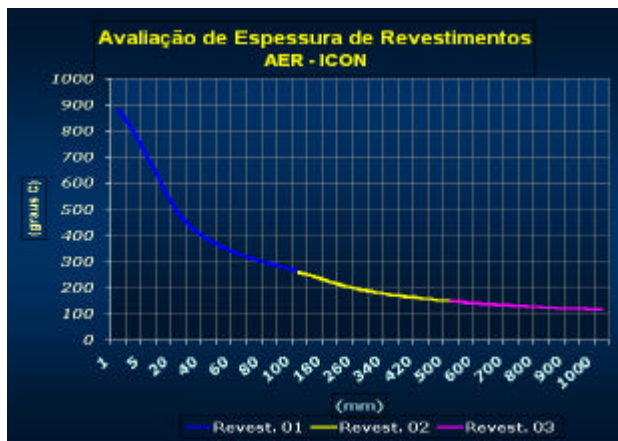


Figura 4:

2.3) Controle da Operação de Purgadores

O purgador tem papel fundamental na drenagem do condensado dos sistemas de vapor e, quando apresenta defeito, pode gerar problemas, tais como:

- Perda de vapor, diminuindo a eficiência do sistema.
- Pressurização das linhas de retorno, podendo prejudicar o funcionamento de outros purgadores.
- Alagamento do sistema, causando queda da temperatura (que se torna mais grave se for um purgador de processo).

Vazamentos de fluidos através de uma válvula normalmente fechada são facilmente observados pela inspeção termográfica em razão do pequeno delta de temperatura à montante e à jusante da válvula. No caso de válvulas normalmente abertas, bloqueios apresentam grandes deltas de temperatura. Isso pode ocorrer inclusive em válvulas de retenção. Essas inspeções são de grande utilidade em Usinas Nucleares, devido ao uso de ácido bórico em vários processos.

Levando-se em conta as condições do processo, como pressão e temperatura, é possível estabelecer critérios de análise através de gradientes térmicos antes e após o purgador.

Ainda em fase de desenvolvimento, estamos trabalhando com a seguinte relação entre o estado operacional dos purgadores e o gradiente térmico entre a entrada e a saída dos mesmos:

A aplicação da termografia na análise de purgadores tem se mostrado rápida e eficaz.

Rápida, não só porque o tempo de inspeção pode ser até 3 vezes menor em relação a métodos convencionais, mas também porque com apenas uma imagem é possível avaliar conjuntos de purgadores instalados em paralelo.

Eficaz, pelo fato de não ser uma avaliação subjetiva, ou seja, a termografia nos fornece a imagem com a distribuição térmica, sendo possível avaliar com boa margem de segurança as condições reais do purgador.

Outro aspecto importante é que a imagem pode ser feita à distância, o que pode facilitar a inspeção, quando o purgador estiver em local de difícil acesso. Por esse motivo tem se mostrado economicamente mais viável do que as outras existentes no mercado, apresentando excelente relação custo x benefício e resultados expressivos.

3) Monitoração do Sistema Elétrico

A detecção termográfica de um componente elétrico defeituoso baseia-se na identificação de uma anomalia térmica no sistema.

Na maioria dos casos essa anomalia é uma elevação de sua temperatura em função de um aumento anormal de sua resistência ôhmica devido a ocorrência de oxidação, corrosão ou falta de contato. Dessa forma, um componente defeituoso se apresenta como um ponto quente em comparação com o ambiente ou outros componentes similares em bom estado.

Menos freqüentes, mas não menos importantes, são os casos nos quais o componente defeituoso se revela por estar frio em relação aos demais (no caso de ter havido interrupção no circuito).

Para serem efetivas, as inspeções devem ser realizadas nos períodos de maior demanda, quando os pontos deficientes da rede tornam-se mais evidentes. Os componentes mais freqüentemente inspecionados são: conectores, chaves seccionadoras, barramentos, fusíveis, grampos, disjuntores, bancos de capacitores, transformadores de corrente e de potência.

Os parâmetros a serem analisados fazem parte da metodologia desenvolvida por um dos autores (Eng. Atílio Bruno Veratti), a qual foi adotada como norma pela Petrobrás – Petróleo Brasileiro (N-2475) e, por considerar a Máxima Temperatura Admissível (MTA) para cada componente, excede os padrões de segurança da norma norte-americana MIL-STB-2194 SH.

São os seguintes os parâmetros considerados:

- Correção de Carga e Vento: nem todas as medições são realizadas em condições ideais (100% de carga e sem vento). Para tanto são realizados cálculos que permitem projetar a temperatura para tais condições, prevendo situações mais adversas. A Usina Nuclear de Angra I adota um modelo avançado de correção de temperatura através do cálculo da potência dissipada pelo componente através dos mecanismos de radiação e convecção.

- Critério de Classificação de Componentes Aquecidos (CFCA)



Figura 5

Detectados em níveis de gravidade: correlacionando a temperatura medida com a Máxima Temperatura Admitida (MTA) para o referido componente.

- Classificação da Abrangência da falha:

Classificando em três níveis a maneira como a falha afeta a Planta:

Local: falha não compromete a operação ou segurança da Planta

Setorial: falha afeta em parte a operação ou segurança da Planta

Global: falha grave que afeta a operação ou segurança de toda a Planta

- Classificação de Risco ao Sistema Produtivo:

correlacionando-se a Gravidade e a Abrangência das falhas obtém-se o Risco ao Sistema Produtivo, principal parâmetro para a tomada de decisões quanto às intervenções a serem realizadas.

- Análise Estatística para identificação dos componentes que apresentaram maior índice de problemas:

Permitindo a análise das causas das falhas e a tomada de decisões quanto a necessidade de maior frequência nas inspeções ou troca do fornecedor do componente. A redução ou eliminação desse defeito aumentará a confiabilidade da instalação como um todo, fator imprescindível para um programa efetivo de qualidade total.

- Levantamentos de séries históricas objetivando a análise da evolução do número de ocorrências ao longo de um período, bem como da tendência resultante. A tendência mede a eficácia do programa de inspeções implantado, caso não se obtenha um resultado decrescente as causas deverão ser identificadas.

Outro aspecto importante implantado na Usina Nuclear de angra dos Reis é a produção direta de Relatórios Digitais de Terceira Geração (padrão HTM), o que facilita sobremaneira o arquivamento e a divulgação das informações via Intranet/Internet.

4) Monitoração de Componentes Eletro-Mecânicos

4.1) Motores Elétricos

Na inspeção de motores elétricos a termografia é utilizada de modo conjugado com outras técnicas na avaliação do estado operacional desses equipamentos. Os aquecimentos detectados com a utilização de sistemas infravermelhos são provocados por aumento da resistência elétrica (mau contato ou sobrecarga), atrito (falta de lubrificação) e vibração. Dadas suas características de velocidade, a termografia permite a verificação de grande número de equipamentos em curto espaço de tempo.

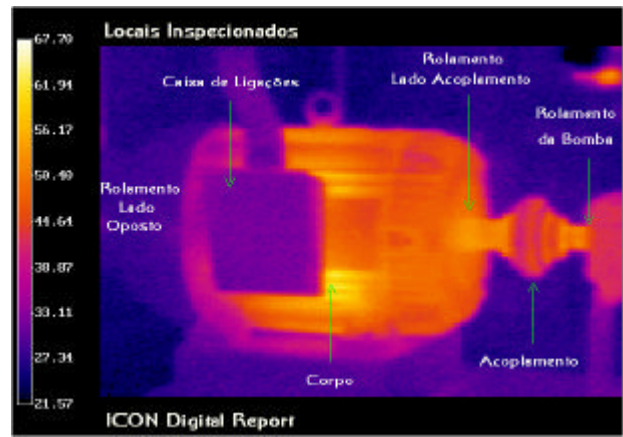


Figura 6

É importante ressaltar que termografia e análise de vibração são técnicas de inspeção que operam complementarmente. Muitas vezes, o componente pode ser retirado de operação por exceder os limites de temperatura sem que tenha excedido os limites de vibração. Em outras ocasiões ocorre o contrário. Normalmente os trabalhos técnicos sobre a inspeção de motores costumam apresentar como limites de temperatura os constantes nas normas (tabelas I e II) sem uma correlação com dados práticos, obtidos em campo.

Limites de Temperatura (°C)					
Classe de Isolamento	A	E	B	F	H
Temperatura ambiente (°C)	40	40	40	40	40
Elevação de temperatura (°C)	60	75	80	100	100
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média (°C)	5	5	10	15	15
Temperatura do ponto mais quente (°C)	105	120	130	155	180

Tabela I

Limite de Temperatura Externa (°C) Limites especificados por entidades classificadoras para motores de construção naval					
Classe de Isolamento	A	E	B	F	H
Germanischer Lloyd	100	115	120	140	-
American Bureau of Shipping	105	115	125	145	-
Bureau Veritas	100	115	120	140	-
Norske Veritas	95	110	115	135	-
Lloyd Register of Shipping	95	110	115	135	-
RtNa	95	115	120	-	-

Tabela II

No entanto, em nossas inspeções (que superam 40.000 motores inspecionados ao longo de 10 anos) observamos que cerca de 90% dos motores elétricos opera abaixo dos 70°C (com temperatura ambiente de até 40°C). Essa relação cai para 75% (de motores operando abaixo dos 70°C) quando a temperatura ambiente varia entre 45°C e 55°C.

Já os motores elétricos que apresentem superaquecimento costumam queimar em temperaturas abaixo das máximas especificadas pelas normas. Em muitos casos isso ocorre

com os valores de vibração ainda dentro dos limites toleráveis (assim como outros motores são retirados de operação por excederem os valores de vibração, estando com temperaturas aceitáveis).

Por esse motivo desenvolvemos uma tabela prática que utilizamos em nossos serviços, a qual tem se revelado mais representativa do estado operacional dos motores elétricos (tabela III).

Limite de Temperatura Externa (°C) ICON Tecnologia					
Classe de Isolamento	A	E	B	F	H
Máxima temperatura externa	90	100	110	130	140
Temperatura de alerta	70	80	90	110	120

Tabela III

Os aquecimentos podem também se manifestar nos rolamentos, sobretudo do lado do acoplamento. É importante salientar que, embora a temperatura máxima de trabalho do rolamento possa ser mais elevada que a medida, nesse tipo de ocorrência o rolamento é a fonte do aquecimento, estando a pelo menos 10°C acima da temperatura do motor.

Em todos os casos pesquisados a análise subsequente dos componentes comprovou a relação entre os aquecimentos e o desgaste dos rolamentos.

4.2) Mancais:

Os limites de temperatura para de mancais variam grandemente de acordo com o tipo de mancal (rolamento ou deslizamento) e o tipo de lubrificação adotado. Em mancais de deslizamento de grande porte (laminadores, por exemplo), não só a temperatura, mas também a distribuição de temperaturas é levada em conta. Os limites com os quais estamos trabalhando no presente momento são:

Limites de temperatura para rolamentos comuns (°C) (Vibrations Magazine)		
Tipo de Lubrificação	Alerta	Máximo
Graxa	70 - 100	>100
Banho de óleo	65 - 95	>95
Circuito de óleo	60 - 85	>85

Temperatura ambiente: 40°C

Tabela IV

4.3) Acoplamentos:

Nos acoplamentos o aquecimento pode ser devido ao desalinhamento ou à falta de lubrificação (no caso de acoplamentos auto-compensados). Em ambos os casos adota-se um aquecimento de 20°C em relação ao ambiente como limite de alerta. Acima desse valor recomenda-se a verificação do mesmo.

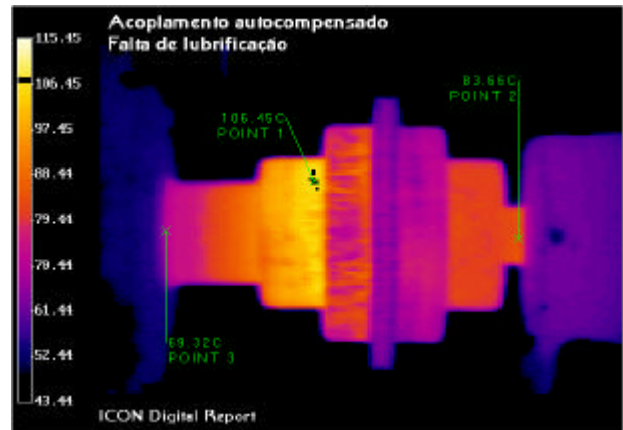


Figura 6:

5) Outras Aplicações Específicas da Termografia na Área Nuclear

Além das aplicações mencionadas anteriormente, que também são aplicáveis as plantas nucleares, a inspeção termográfica pode ser utilizada em processos específicos tais como:

- Verificação de obstrução no Anel Coletor de Spray do Envoltório de Contenção.
- Avaliação quanto à vazamentos das Válvulas de Alívio do Pressurizador.
- Quebras de vácuo nos Condensadores (aliado aos testes com Hélio).
- Avaliação de Nuvem Térmica. (Através dessa técnica é possível fazer uma avaliação da superfície da água nas regiões de descarga da Usina)

Biografia dos autores:

Attílio Bruno Veratti

(abv@icontec.com.br) (www.termonautas.com.br)

- Engenheiro formado pela FEI em 1977.
- Especialista em sistemas termográficos com 21 anos de experiência e cursos na Inglaterra, Holanda e Estados Unidos pela Agema Infrared Systems.
- Implantou atividade de inspeções termográficas na empresa Optronics Sistemas Ópticos e Eletrônicos, sendo posteriormente gerente de marketing da mesma.
- Realiza trabalhos de inspeção termográfica e cursos em diversos países da América Latina como: Argentina, Chile, Paraguai e Colômbia.
- Autor do livro Termografia - Princípios e Aplicações.
- Gerenciou a implantação da Trafo Service Manutenções Elétricas.
- Autor do CD "Termografia"
- Atualmente diretor da empresa ICON Tecnologia e consultor de diversas empresas na área de desenvolvimento de novas aplicações da Termografia.
- Responsável pelo site de pesquisa e banco de informações www.termonautas.com.br.

Edson Minelli

(minelli@eletronuclear.gov.br)

- Trabalha na Central Nuclear desde 1986
- Desenvolveu o Programa de Manutenção Preditiva de Angra 1, que inclui análise vibracional, tribológica, termográfica, diagnose de válvulas de retenção e motores diesel e análise de fluxo magnético.
- Encarregado do Grupo de Manutenção Preditiva e Diagnostica de Angra 1
- Autor do Procedimento de Análise e Inspeção termográfica (PN-T 012)

Bibliografia

A Termografia Aplicada À Manutenção Preventiva e Preditiva

- Autor: Atílio Bruno Veratti (ICON Tecnologia) – 1996

Novos Rumos da Termografia Inspeção de Sistemas de Geração de Vapor - Atílio Bruno Veratti (ICON Tecnologia) e Valdir Donizete da Silva (Rhodia Filamentos) - 1998.

Termografia – Princípios, Aplicações e Qualidade – Atílio Bruno Veratti (ICON Tecnologia) – 1997

Manual do Aplicativo AER – ICON Tecnologia – 1986

Manual do Aplicativo SIE2000 – ICON Tecnologia - 2000

Nota:

Este trabalho estará disponível nos sites www.termonautas.com.br e www.eletronuclear.gov.br