

---

Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

## **Termografia Aplicada na Manutenção Preditiva de Retificadores de Proteção Catódica – Estudo de Caso**

Rodrigo M.S. Soares<sup>a</sup>, André L.O. Silva<sup>b</sup>, Mário C.M.F. Souza<sup>c</sup>  
Henrique K. Miyamoto<sup>d</sup>, Márcio Z. Fortes<sup>e</sup>, Vitor H. Ferreira<sup>f</sup>.

### **Abstract**

---

Cathodic protection is a technique used to combat and control the corrosion of metallic structures immersed in an electrolyte. For the protection of large structures, an external direct current is used connecting the anode (structure to be sacrificed) to the cathode (structure to be protected). Usually, rectifiers are used as the voltage source of this system, which is supplied by the secondary grid. These equipment's are inspected routinely defined by the maintenance sector, where electrical measurements and general information about the state of conservation of elements are usually obtained. Inserting the thermography in this context is possible to identify deviations, from the location of thermal loss points (Joule effect) on the equipment, increasing the reliability of the system and consequent reduction of the corrective actions, resulting from a better predictive maintenance. In this study, maintenance criteria were defined in order to qualify the inspections performed. The equipment with the highest temperature deviation was chosen for the case study and, after the correction, it was possible to obtain quantitative results of the conserved energy through the fundamental calorimeter equation.

**Keywords:** Cathodic Protection, maintenance, thermal effects, pipelines.

### **Resumo**

---

A proteção catódica é uma técnica utilizada para o combate e controle da corrosão de estruturas metálicas imersas em um eletrólito. Para proteção de grandes estruturas, é utilizada uma corrente contínua externa conectando o anodo (estrutura a ser sacrificada) ao catodo (estrutura a ser protegida). Usualmente, são utilizados retificadores como fonte de tensão deste sistema, cuja alimentação se dá pelo secundário da rede elétrica. Esses equipamentos são inspecionados com rotina definida pelo setor de manutenção, onde normalmente são obtidas medidas elétricas e informações gerais sobre o estado de conservação de seus

---

<sup>a</sup> Mestrando, Engenheiro Eletricista – GÁS NATURAL FENOSA.

<sup>b</sup> Mestrando, Engenheiro Eletricista – VALE DO RIO DOCE.

<sup>c</sup> Mestrando, Engenheiro Eletricista – ENEL.

<sup>d</sup> Mestrando, Engenheiro Eletricista.

<sup>e</sup> Doutor, Engenheiro Eletricista – UFF.

<sup>f</sup> Doutor, Engenheiro Eletricista – UFF.

elementos. Inserindo a termografia neste contexto será possível identificar possíveis desvios, a partir da localização de pontos de perda térmica (efeito Joule) no equipamento, aumentando a confiabilidade do sistema e consequente diminuição das manutenções corretivas, resultado de uma melhor manutenção preditiva. Neste estudo, critérios de manutenção foram definidos para qualificar as inspeções realizadas. O equipamento com o maior desvio de temperatura foi escolhido para o estudo de caso e, após a correção, foi possível obter resultados quantitativos da energia conservada através da equação fundamental da calorimetria.

**Palavras-chave:** Proteção catódica, manutenção, efeitos térmicos, tubulações.

## **Introdução**

---

A termografia é genericamente definida como a técnica de sensoriamento remoto que possibilita a medição de temperatura e a formação de imagens térmica de um componente, equipamento ou processo, a partir da radiação infravermelha. Através dessa tecnologia é possível detectar em estágio inicial, processos de falha gerados por anomalias térmicas em um determinado componente antes que ocorra interrupção de funcionamento dos equipamentos, podendo classificar e quantificar. A inspeção termográfica em sistemas elétricos identifica problemas causados por anomalias térmicas devido à relação corrente/resistência dos componentes, geralmente causadas por deficiências de contato. As principais causas de falha são: desgaste do uso normal, corrosão, contaminação química, fadiga e defeitos de montagem ou instalação.

A termografia é uma técnica pela qual o usuário pode identificar anormalidades observando o padrão de radiação emitido pelo material investigado. As câmeras termográficas não medem a temperatura diretamente. Em vez disso, eles medem a radiação que é convertida em temperatura (1).

A imagem térmica é conseguida através de uma técnica que converte um padrão de radiação invisível para o olho humano, em uma imagem visual. Para conseguir isso, um termógrafo é usado para transformar a energia irradiada de objetos em um sinal de vídeo eletrônico e, finalmente, em uma imagem visível (2).

A inspeção termográfica é uma importante ferramenta de manutenção preditiva na detecção de problemas térmicos em componentes dos mais variados materiais, sendo uma técnica não-invasiva, segura e com baixo custo. Portanto, vários estudos são realizados, provando que a termografia é uma técnica confiável com várias aplicações (3).

A falha em uma tubulação poderá resultar em consequências catastróficas. Segundo Senouci (4) escreveu que, devido aos oleodutos e gasodutos, transportarem milhões de dólares de mercadorias todos os dias é necessário estudar o modo de falha preditiva usando modelos de redes neurais artificiais para ajudar os tomadores de decisão a prever falhas nesses sistemas. As tubulações metálicas estão sujeitas à degradação ao longo do tempo, principalmente devido à corrosão (5).

Em uma empresa de distribuição de gás natural, a manutenção deve desempenhar um papel de protagonismo, tanto pela natureza da operação quanto aos ativos estarem distribuídos pelo solo e subsolo das grandes cidades. Uma maneira de proteger as tubulações metálicas contra a corrosão é a proteção catódica por corrente impressa, técnica consolidada mundialmente e de extrema importância para manter a tubulação polarizada e livre de corrosão eletroquímica. Durante o processo de revisão dos procedimentos de manutenção preventiva, observou-se a necessidade de melhorar a manutenção preditiva dos retificadores. Deste modo, iniciou-se uma pesquisa correlacionando a proteção catódica com alguns métodos de inspeção elétrica

consolidados em todo o mundo. A termografia provou ser a melhor opção entre as técnicas relacionadas à inspeção elétrica e foi escolhida como base para a elaboração deste estudo.

## Metodologia

Para aquisição dos dados de campo foi utilizado o termovisor da marca FLIR modelo E6 que conta com as seguintes características: resolução de 160 x 120, ou seja, 19.200 pixels com possibilidade de captação da temperatura de objetos na faixa de -20 °C à 250 °C (Figura 1).



**Figura 1 – Termovisor marca FLIR modelo E6. Fonte: FLIR**

A distância focal, compreendida entre o alvo e a câmera termográfica, deve ser a mínima capaz de captar todo o objeto em estudo, pois quanto menor à distância, mais precisos serão os dados obtidos.

A emissividade ( $\epsilon$ ) pode variar de 0 a 1 e pode ser compreendida como uma unidade que valora a capacidade de irradiar energia que um corpo possui, sendo influenciada pelo tipo de material, condição da superfície, comprimento de onda da radiação emitida e temperatura.

A temperatura refletida pode ser interpretada como a temperatura de referência que a câmera termográfica utiliza como base para calcular a variação de temperatura do objeto focalizado.

Os retificadores inspecionados com o termovisor obedeceram aos seguintes critérios:

- Distância focal máxima: 1 metro;
- Emissividade padrão considerada: 0,95;
- Temperatura refletida = Temperatura Ambiente.

A diferença entre o valor máximo de temperatura e o valor de referência (temperatura ambiente) determina o critério para definir o  $\Delta T$ .

A máxima temperatura admissível (MTA) para baixa tensão, de acordo com a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas para componentes elétricos prevê a seguinte classificação: Para cabos isolados e terminais, a MTA = 70 °C. Para barramentos e conexões (Cobre/Alumínio) a MTA = 100 °C. Em contato e articulações de seccionadoras e

disjuntores, a MTA = 100 °C. Para corpos de fusíveis, a MTA = 100 °C (6). De acordo com a norma ABNT NBR 5410:2004 as partes acessíveis de componentes de instalação posicionados dentro da zona de alcance normal, não devem atingir temperaturas que possam causar queimaduras em pessoas, respeitando a temperatura máxima admissível de 80 °C para partes acessíveis não destinadas a serem tocadas em serviço normal e 70 °C para partes acessíveis previstas para serem tocadas, mas não empunhadas (7).

Respeitando os limites de segurança definidos, e sendo estes limites mais conservadores do que a MTA, será considerado como temperatura máxima admissível, a temperatura de 70 °C para partes acessíveis previstas para serem tocadas, mas não empunhadas e 80 °C para partes acessíveis não destinadas a serem tocadas em serviço normal. Estes limites determinam a intervenção no componente elétrico (com urgência ou não).

As prioridades de atendimento definida na Tabela 1, determina a criticidade ao atendimento frente à elevação de temperatura encontrada, sugerida por Ferreira (8) e adaptada seguindo a realidade do setor de manutenção. Esta tabela servirá como base para definir os critérios a serem adotados frente às temperaturas máximas obtidas nos equipamentos em campo.

**Tabela 1 – Tabela de prioridade de atendimento**

Prioridade	Varição de Temperatura Verificada ( $\Delta T$ ) (°C)	Risco	Ação Recomendada
4	1 a 15	Baixo	-
3	16 a 25	Médio	Reparo em até 1 ano
2	26 a 40	Alto	Reparo em até 3 meses
1	> 40	Muito Alto	Reparo Imediato

Conforme apresentado em Sales (9) unindo-se a termografia ao conceito de calor sensível, compreendido como a quantidade de calor recebida ou cedida por um corpo através da variação da sua temperatura, pode-se valorar, por exemplo, a energia cedida ao ambiente devido ao sobreaquecimento de um equipamento (Equação 1).

$$Q = C_p m T \quad (1)$$

Onde  $C_p$  é o calor específico (J/(g°C)),  $m$  é a massa do objeto (g) e  $T$  é a variação de temperatura (°C).

## **Resultados e discussão**

Foram inspecionados 65 retificadores com o auxílio da termografia. A partir dos dados termográficos levantados neste grupo de equipamentos, foi selecionado o pior caso para manutenção corretiva. Segue na tabela 2 o resumo das inspeções termográficas realizadas nos 65 equipamentos. Neste resumo, verifica-se a maior temperatura obtida nos componentes a partir da medição com o termógrafo e a diferença de temperatura entre a temperatura máxima obtida e a temperatura ambiente média considerada para os dias de medição, de 28,7 °C:

Tabela 2 – Equipamentos inspecionados com termografia

Equip.	Max. Temp. °C	$\Delta T$ °C	Equip.	Max. Temp. °C	$\Delta T$ °C	Equip.	Max. Temp. °C	$\Delta T$ °C
Ret. 01	47,9	19,2	Ret. 23	33,3	4,6	Ret. 45	60,1	31,4
Ret. 02	30,8	2,1	Ret. 24	28,8	0,1	Ret. 46	39,6	10,9
Ret. 03	28,7	0	Ret. 25	43,7	15	Ret. 47	53,8	25,1
Ret. 04	46,9	18,2	Ret. 26	44,4	15,7	Ret. 48	60,6	31,9
Ret. 05	33,7	5	Ret. 27	40,3	11,6	Ret. 49	54,4	25,7
Ret. 06	37,1	8,4	Ret. 28	53,8	25,1	Ret. 50	77,6	48,9
Ret. 07	28,7	0	Ret. 29	30	1,3	Ret. 51	71,6	42,9
Ret. 08	28,8	0,1	Ret. 30	52,2	23,5	Ret. 52	49,6	20,9
Ret. 09	109	80,3	Ret. 31	37,5	8,8	Ret. 53	48,3	19,6
Ret. 10	57,3	28,6	Ret. 32	42,8	14,1	Ret. 54	37,1	8,4
Ret. 11	30,4	1,7	Ret. 33	47,5	18,8	Ret. 55	28,9	0,2
Ret. 12	34,1	5,4	Ret. 34	55,6	26,9	Ret. 56	36,2	7,5
Ret. 13	30,4	1,7	Ret. 35	54,5	25,8	Ret. 57	36,2	7,5
Ret. 14	84,4	55,7	Ret. 36	39,1	10,4	Ret. 58	47,1	18,4
Ret. 15	45,7	17	Ret. 37	52,5	23,8	Ret. 59	33,6	4,9
Ret. 16	51	22,3	Ret. 38	39,6	10,9	Ret. 60	40,1	11,4
Ret. 17	32,2	3,5	Ret. 39	39	10,3	Ret. 61	49,1	20,4
Ret. 18	62,3	33,6	Ret. 40	40,3	11,6	Ret. 62	34,7	6
Ret. 19	30,1	1,4	Ret. 41	31,6	2,9	Ret. 63	42,1	13,4
Ret. 20	30,5	1,8	Ret. 42	30,3	1,6	Ret. 64	158,2	129,5
Ret. 21	31,3	2,6	Ret. 43	40,5	11,8	Ret. 65	48,8	20,1
Ret. 22	31,6	2,9	Ret. 44	63,9	35,2			

De acordo com a classificação de prioridade definida na Tabela 1, das 65 inspeções em retificadores realizadas, 38 estão dentro dos limites estabelecidos, sem necessidade de ação para reparo, correspondendo a 58,46% dos locais visitados. A outra parte, que corresponde a 41,54% dos locais (27 retificadores), necessita de reparo. Destes, 16 equipamentos foram classificados como prioridade 3 e necessitam de reparo em até 1 ano, o que corresponde à 24,61% dos retificadores visitados. 6 equipamentos foram classificados como prioridade 2 e necessitam de reparo em até 3 meses, o que corresponde à 9,23% dos retificadores visitados. 5 equipamentos foram classificados como prioridade 1 e necessitam de reparo imediato, o que corresponde à 7,69% dos equipamentos visitados e, apresentam temperatura máxima superior ao indicado para conexões elétricas na ABNT NBR5410:2004 com risco à segurança, queima e parada do equipamento. A consequência disto, além da manutenção corretiva, seria a parada de um equipamento que provê a proteção anticorrosiva de redes de distribuição de gás natural de alta (pressão > 4 bar) e média pressão (pressão > 1 bar e ≤ 4 bar). A inspeção comum não detectou os desvios citados, visto que não possuía a ferramenta adequada para isto.

Com  $\Delta T$  de 129,5 °C, o retificador 64 foi escolhido para estudo de caso e manutenção corretiva. Segue na Figura 2 e Figura 3 a imagem térmica deste equipamento, antes da intervenção corretiva. Observa-se que existem dois lados para acesso, definidos como lado A e lado B. No Lado A ficam as proteções e conexões elétricas. No lado B, ficam as conexões do TAP e painel de medidas elétricas. Estas imagens foram realizadas no dia 01 de junho de 2017 e a temperatura ambiente máxima e mínima para o dia, segundo o site AccuWeather (10), foi respectivamente de 30 °C e 19 °C.

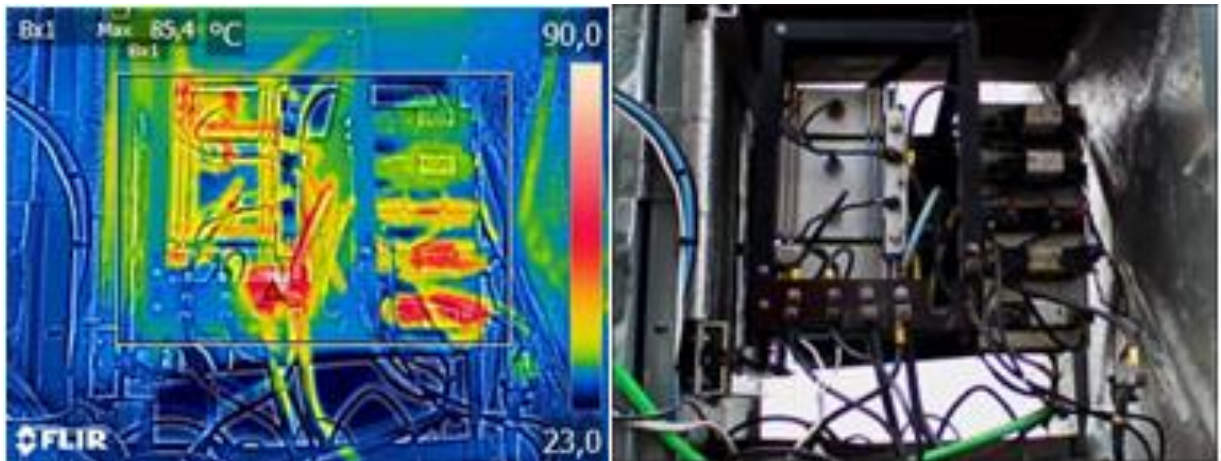


Figura 2 – Imagem térmica retificador 64 – Lado A

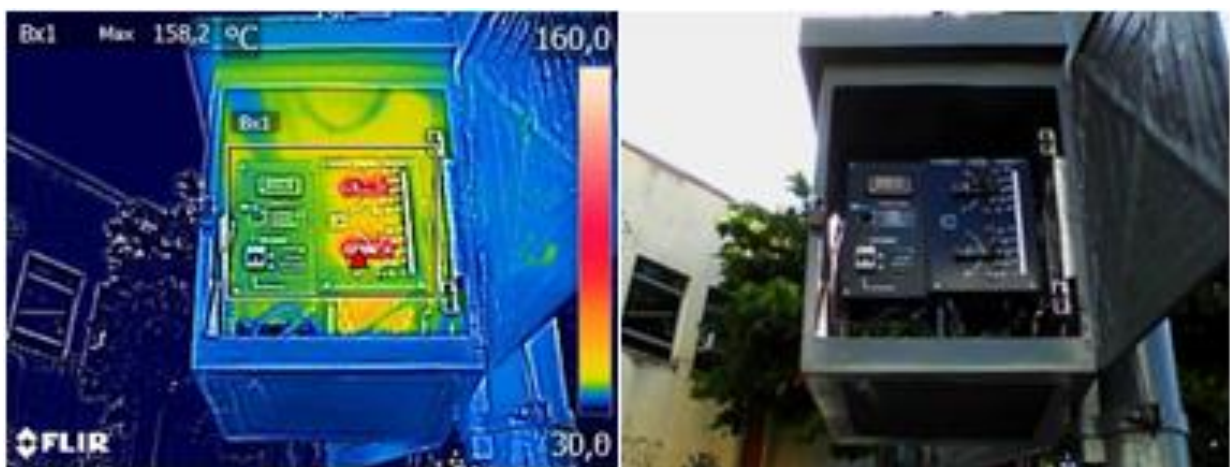


Figura 3 – Imagem térmica retificador 64 – Lado B

Dados de funcionamento do retificador 64 antes da intervenção:

- Tensão de saída de  $V_{cc} = 23,32$  V (Tensão Máxima 50 V);
- Corrente de saída de  $I_{cc} = 29,1$  A (Corrente Máxima 30 A);
- TAP G3/F3 (G - Grosso ; F- Fino).

Foram identificados 5 elementos com pontos quentes no retificador 64, de acordo com a Tabela 3:

Tabela 3 – Elementos com desvio de temperatura, retificador 64

Elemento	Lado	Máx. Temp. (°C)	$\Delta T$ (°C)
Terminal de Conexão	A	85,4	55,4
Fusível	A	73,8	43,8
Shunt	A	61,1	31,1
TAP Grosso	B	158,2	128,2
TAP Fino	B	131,2	101,2

Após identificar os elementos com desvio de temperatura, foram realizados pequenos reparos a fim de adequar o sistema ao especificado na Tabela 1 e, conseqüentemente, melhorar a eficiência energética do equipamento. Segue na Tabela 4 o resumo das intervenções realizadas e posteriores temperaturas obtidas.

Tabela 4 – Ação de manutenção e temperaturas posteriores à intervenção.

Elemento	Lado	Antes da manut. Temp. Máxima (°C)	Temp. Amb. 30°C $\Delta T$ (°C)	Após a manut. Temp. Máxima (°C)	Temp. Amb. 30°C $\Delta T$ (°C)	Ação corretiva efetuada
Terminal de Conexão	A	85,4	55,4	37,8	7,8	Troca do elemento isolador e reaperto das conexões.
Fusível	A	73,8	43,8	43,2	13,2	Reaperto das conexões.
Shunt	A	61,1	31,1	33,7	3,7	Reaperto das conexões.
TAP Grosso	B	158,2	128,2	41,9	11,9	Troca de parafusos e conexões oxidadas.
TAP Fino	B	131,2	101,2	30,1	0,1	Troca de parafusos e conexões oxidadas.

Segue na figura 4 e figura 5 a imagem térmica do equipamento após as intervenções realizadas:

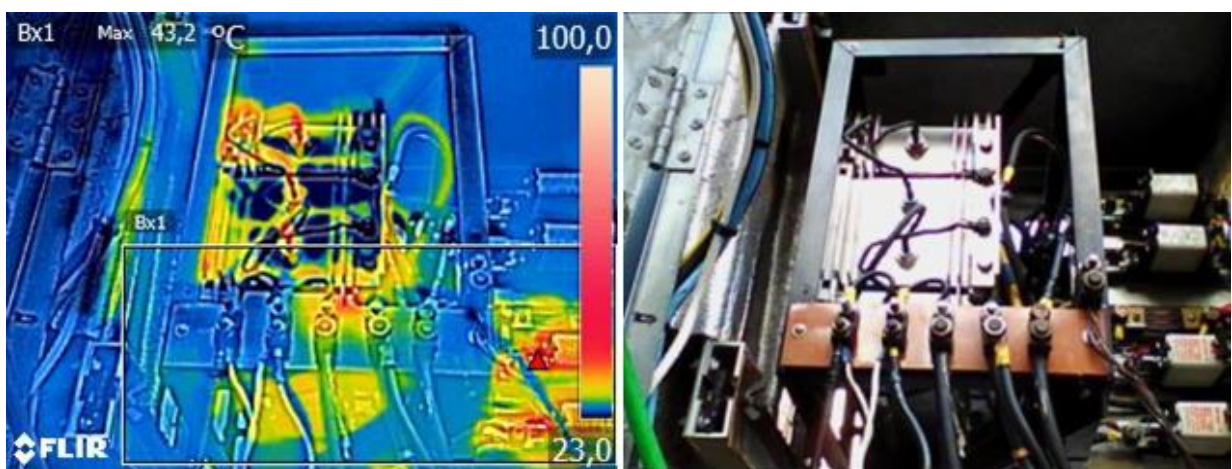


Figura 4 – Imagem térmica retificador 64, após a intervenção – Lado A

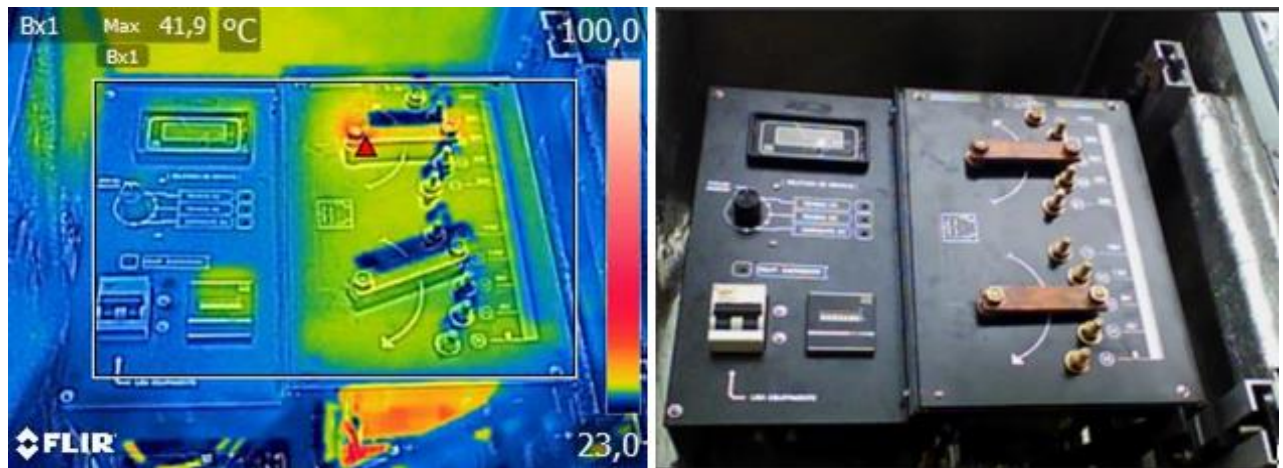


Figura 5 – Imagem térmica retificador 64, após a intervenção – Lado B

Dados de funcionamento do retificador 64 após a intervenção:

- Tensão de saída de  $V_{cc} = 23,35$  V (Tensão Máxima 50 V);
- Corrente de saída de  $I_{cc} = 29,0$  A (Corrente Máxima 30 A);
- TAP G3/F3 (G - Grosso ; F- Fino).

De acordo com a Equação 1, a energia conservada ( $Q$ ) pode ser calculada a partir dos pontos de diminuição de temperatura após a manutenção ( $\Delta T_m = \Delta T_{antes} - \Delta T_{depois}$ ), nos elementos verificados pelo termovisor, conforme Tabela 5:

Tabela 4 – Ação de manutenção e temperaturas posteriores à intervenção.

Elemento	Material	Calor Específico (J/(g°C))	Massa considerada (m)			Diferença $\Delta T_m$ (°C)	$Q = C_p m \Delta T_m$		
			Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)		Q (J)	Q (W/h)	
Terminal de Conexão	Cobre	0,3932	8,93	1,12	10	47,6	187,40	0,05	
Fusível	Alumínio	0,9204	2,7	12	32,4	32,5	969,27	0,27	
Shunt	Cobre	0,3932	8,93	1,12	10	27,4	107,88	0,03	
TAP Grosso	Cobre	0,3932	8,93	1,12	10	116,3	457,88	0,13	
TAP Fino	Cobre	0,3932	8,93	1,12	10	101,1	398,04	0,11	
<b>Total</b>								2120,47	0,59

O cabo utilizado nas conexões do borne, shunt, TAP grosso e fino é de 10 mm<sup>2</sup>. O tamanho do contato considerado entre o cabo e o elemento de conexão, foi de 2 cm. O volume em cm<sup>3</sup> então, para estes elementos, foi de 1,12 cm<sup>3</sup>. A conexão do fusível, em alumínio, possui a dimensões de 8 cm de largura, 3 cm de altura e 0,5 cm de espessura, dando um volume total de 12 cm<sup>3</sup>. Os valores de calor específico e densidade do cobre e alumínio foram retirados respectivamente das referências (11) e (12).



O retificador funciona sem intervalo de parada. Considerando a energia total economizada por hora e extrapolando este valor para o ano (8760 horas), haverá uma economia de 5,16 kWh/ano, para este equipamento.

## Conclusões

A termografia aplicada na inspeção dos retificadores de proteção catódica demonstra-se como eficiente ferramenta, predizendo desvios anteriormente não detectados através da inspeção comum, aumentando a confiabilidade do sistema e melhorando os índices do setor de manutenção.

Dentre as 65 inspeções realizadas, foram detectados desvios na temperatura de componentes em 41,54% dos equipamentos. Considerando que a empresa possui 270 retificadores, e extrapolando o percentual de desvios a todos os equipamentos, poder-se-ia ter 112 retificadores com necessidade de manutenção, programada e/ou imediata.

A principal motivação para inserir a termografia na inspeção dos retificadores de proteção catódica é o aumento da confiabilidade do sistema, consequência da diminuição das manutenções corretivas por aquecimento. Sendo o retificador o equipamento que provê a força eletromotriz necessária para que o sistema de proteção anticorrosiva em gasodutos funcione, considerando que estes ativos estão instalados no subsolo de grandes cidades, a busca pela melhoria contínua nos processos que diminuam a probabilidade de acidentes faz parte da política da empresa, que busca resguardar a segurança e o meio ambiente, bem como garantir a qualidade e a continuidade dos serviços prestados. Portanto, a inspeção termográfica revela-se uma excelente ferramenta aplicada à inspeção de retificadores de proteção catódica e passará a fazer parte da rotina da empresa analisada neste estudo.

## Referências bibliográficas

- (1) ABDEL-QADER I., YOHALI S., ABUDAYYEH O., AND YEHIA S. Segmentation of thermal images for non-destructive evaluation of bridge decks, **NDT E International**, 41, 395–405. DOI:10.1016/j.ndteint.2007.12.003.
- (2) CHAUDHURI P., SANTRA P., YOELE S., PRAKASH A., REDDY D.C., LACHHVANI L.T., GOVINDARAJAN J AND SAXENA Y.C.. Non-destructive evaluation of brazed joints between cooling tube and heat sink by IR thermography and its verification using FE analysis, **NDT E International**, 39, 88–95. DOI:10.1016/j.ndteint.2005.08.002.
- (3) HUDA A.S.N. AND TAIB S.. Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment, **Applied Thermal Engineering**, 61, 220–227. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2013.07.028.
- (4) SENOUCI A., ELABBASY M., ELWAKIL E., ABDRABOU B. AND ZAYED T. A model for predicting failure of oil pipelines, **Structure and Infrastructure Engineering**, 10, 375-387. DOI: 10.1080/15732479.2012.756918.
- (5) JARVIS R., CAWLEY P. AND NAGY P.B. Current deflection NDE for the inspection and monitoring of pipes, **NDT E International**, 81, 46–59. DOI:10.1016/j.ndteint.2016.03.006.
- (6) “Why\_Thermography\_is\_Good\_for\_Business.pdf”. [Online]. Disponível em: [http://www.newark.com/pdfs/techarticles/Why\\_Thermography\\_is\\_Good\\_for\\_Business.pdf](http://www.newark.com/pdfs/techarticles/Why_Thermography_is_Good_for_Business.pdf). [Acessado: 09-jul-2017].
- (7) “Instalações elétricas de baixa tensão - nbr\_5410:2004 – Pág. 60 e Tab. 29”. [Online]. Disponível em:

- 
- [https://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/normas%20e%20relat%F3rios/NRs/nbr\\_5410.pdf](https://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/normas%20e%20relat%F3rios/NRs/nbr_5410.pdf). [Acessado: 09-jul-2017].
- (8) FERREIRA U.M., FORTES M.Z., DIAS B.H. AND MACIEL R.S. Thermography as a Tool in Electric Panels Maintenance, **IEEE Latin America Transactions**, 13, 3005–3009. DOI:10.1109/TLA.2015.7350052.
- (9) SALES R.B.C., PEREIRA R.R., AGUILAR, M.T.P. AND CARDOSO A.V. Thermal comfort of seats as visualized by infrared thermography, **Applied Ergonomics**, 62, 142–149. DOI:10.1016/j.apergo.2017.03.003.
- (10) AccuWeather, Tempo em Junho em Rio de Janeiro 2017 - Previsão AccuWeather para Rio de Janeiro Brasil (PT-PT), (2017). [Online]. Disponível em: <http://www.accuweather.com/pt/br/rio-de-janeiro/45449/june-weather/45449>. [Acessado: 16-jul-2017]
- (11) “Capacidade Calorífica e Calor específico”. [Online]. Disponível em: <http://alimentoseengenharia.blogspot.com.br/2013/05/capacidade-calorifica-e-calor-especifico.html>. [Acessado: 09-jul-2017].
- (12) “Tabela de densidade dos materiais”. [Online]. Disponível em: <ftp://ftp.feq.ufu.br/claudio/densidade2.pdf>. [Acessado: 09-jul-2017].