



Restauração do isolamento elétrico de termômetros termoresistivos através de recozimento utilizando indução eletromagnética

M V Melo¹, C S Quidorne¹, I Silva¹, A B C Carvalho¹, M R S Cibien¹, I M Silva¹, e E A A Junior²

¹ Laboratório de Metrologia, Instituto Nacional de Controle de Qualidade em Saúde -FIOCRUZ, Rio de Janeiro, 21040-900, Brasil

² Diretoria de Metrologia Legal, Inmetro, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Xerém, 25250-020, Brasil

marcus.melo@fiocruz.br

Resumo. Os termômetros de resistência de platina (TRP) são amplamente empregados no meio industrial e científico devido às suas características particulares, como robustez estrutural, precisão e grande faixa de trabalho de temperatura. Os TRP possuem diversas aplicações; entre elas, são utilizados na metrologia como padrões de calibração para a área de temperatura. No entanto, o uso desses instrumentos como padrões deve obedecer a requisitos mínimos para assegurar a confiabilidade metrológica das medições. Neste estudo, foi avaliada a eficácia do uso de indutores eletromagnéticos como fonte geradora de calor para aplicação da metodologia de recozimento de termorresistência, com o intuito de recuperar as propriedades de isolamento elétrico e atender aos critérios de uso desses instrumentos como padrões em calibrações na área de temperatura de um laboratório de metrologia.

Palavras-chave: termômetro; metrologia; indução eletromagnética.

1. Introdução

A metrologia desempenha um papel fundamental no desenvolvimento científico e industrial de uma nação, pois ela estabelece as bases para o desenvolvimento das ferramentas necessárias à excelência na produção e à inovação industrial, fornecendo competitividade e qualidade aos produtos fabricados pela indústria desse país (ALBERTAZZI, 2008).

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) estabelece e dissemina o conhecimento metrológico a nível nacional. Para isso, elabora, por meio de comitês técnicos, documentos orientativos sobre os procedimentos e métodos necessários para realizar medições em diversas grandezas (INMETRO, 2023).

No âmbito das calibrações na área de temperatura e umidade, foi elaborado em 2020 o documento orientativo "Orientação para acreditação de laboratórios para o grupo de serviços de calibração em temperatura e umidade" (DOQ-CGCRE-009) pelo Inmetro. Este documento estabelece orientações para a acreditação de laboratórios que realizam calibração de sensores e/ou instrumentos utilizados para medição de temperatura e umidade. Para efetuar medições nas escalas de temperatura Kelvin, Celsius e Fahrenheit, os laboratórios de metrologia utilizam padrões de temperatura, como termômetros de resistência de platina, para determinar a temperatura de referência durante a realização das calibrações. No entanto, para o uso desses instrumentos, é

necessário seguir critérios mínimos que garantam a confiabilidade metrológica.

Conforme o Inmetro (2020), um termômetro de resistência de platina (TRP) de referência deve ser de quatro fios e deve possuir características de construção que garantam uma estabilidade do valor de $R(t)$ medido no ponto do gelo ou no ponto triplo da água igual ou menor a $0,01^{\circ}\text{C}$ para TRP com $R(0)$ diferente de 100Ω e igual ou menor a $0,025^{\circ}\text{C}$ para TRP de 50Ω . Além disso, a resistência de isolamento deve ser maior do que $100\text{M}\Omega$ à temperatura ambiente quando excitada com uma tensão entre 10V e 100V .

Devido às características de construção do TRP, o manuseio deve ser realizado de maneira cuidadosa, pois existem alguns fatores que podem comprometer seu isolamento elétrico, como rachaduras, contaminação do material isolante e oxidação. Esses defeitos podem ocorrer devido a choques mecânicos ou exposição dos terminais de saída ao meio térmico, principalmente quando o meio térmico é líquido. Em um TRP que apresente esse tipo de dano, pode haver diminuição do isolamento elétrico para valores abaixo do mínimo recomendado pelo DOQ-CGCRE-009. Nessa condição, os termômetros termorresistivos não podem ser utilizados como padrão nas calibrações de temperatura e precisam ser substituídos.

Tendo em vista o custo envolvido na aquisição e substituição de um TRP, o método chamado de recozimento pode ser utilizado para restaurar as propriedades do termômetro por meio de um processo sistemático de aquecimento.

Ao expor o TRP a uma fonte de calor controlada, é esperado que ocorra uma redução da oxidação interna, evaporação de contaminantes e correção das rachaduras. Isso proporciona ao termômetro a recuperação de suas características de fabricação e, conseqüentemente, o isolamento elétrico necessário para que ele possa ser utilizado como padrão em calibrações de temperatura.

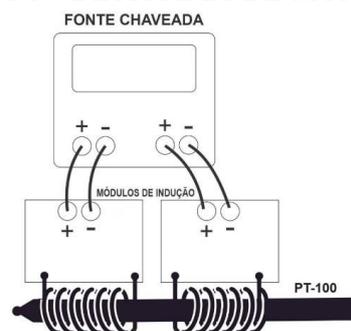
O recozimento pode ser realizado utilizando muflas e fornos de alta temperatura, no entanto, essa abordagem não é viável para um laboratório de metrologia de pequeno porte. Além dos riscos envolvidos no manuseio, esses equipamentos requerem um alto custo de aquisição e instalação, o que torna a utilização desse método mais dispendiosa do que a aquisição de um novo sensor termorresistivo.

Portanto, este trabalho propõe verificar a viabilidade do uso de indutores eletromagnéticos como fonte alternativa de calor. Teoricamente, o funcionamento desses indutores poderia fornecer calor de forma mais eficiente, segura e com menor custo para aplicação do método de recozimento.

2. Metodologia

A montagem do sistema foi realizada usando suportes que possibilitassem a adaptação da disposição dos instrumentos, permitindo encontrar o melhor posicionamento para a aplicação do método de recozimento. Os módulos de indução foram conectados em paralelo com a fonte chaveada para evitar quedas de tensão, permitindo que operassem com sua potência nominal, como é possível observar na Figura 1.

FIGURA 1 - DIAGRAMA DE MONTAGEM



Fonte: Próprio do Autor (2023).

Utilizando acessórios como garras e hastes, o TRP foi posicionado de forma a ficar o mais próximo possível do centro das espirais dos módulos de indução, garantindo assim a máxima eficiência no processo de aquecimento. Os módulos foram, por sua vez, colocados em uma bancada junto com a fonte de alimentação. Optou-se pelo uso de dois módulos de indução para cobrir a maior área possível do termômetro. Na Figura 2, é possível observar o registro da montagem final do sistema antes da aplicação do método.

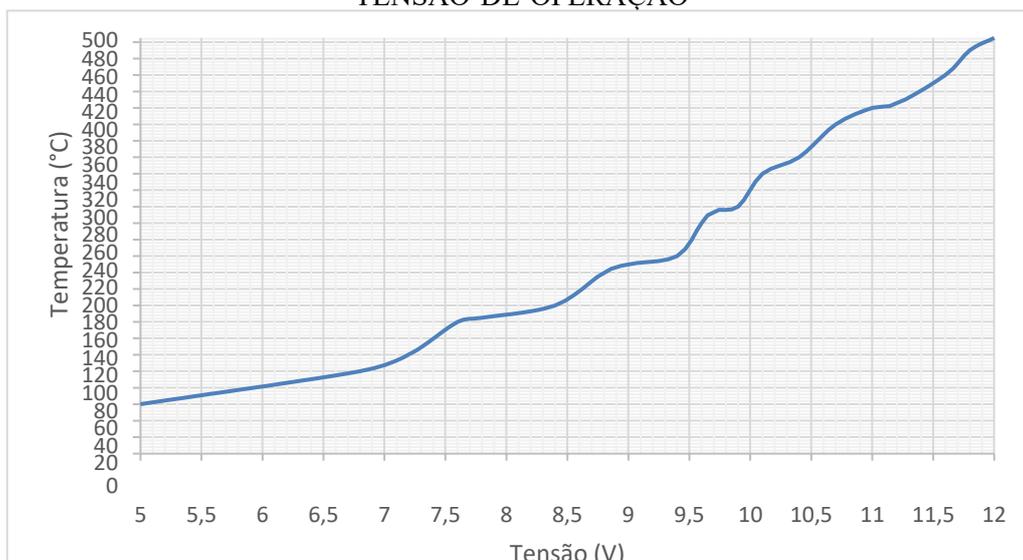
FIGURA 2 - MONTAGEM DO SISTEMA



Fonte: Próprio do Autor (2023).

A tensão de saída da fonte chaveada foi ajustada ao longo de sua faixa de operação, que varia de 5V até 12V. O objetivo era encontrar a tensão de operação do módulo de indução correspondente à temperatura de controle necessária para o aquecimento controlado do TRP. Para isso, foi utilizado um TRP com defeito que já não apresentava nenhum valor de isolamento elétrico. Através dos testes, obtivemos o gráfico mostrado na Figura 3, e os valores encontrados foram utilizados para o controle de temperatura durante a aplicação do método.

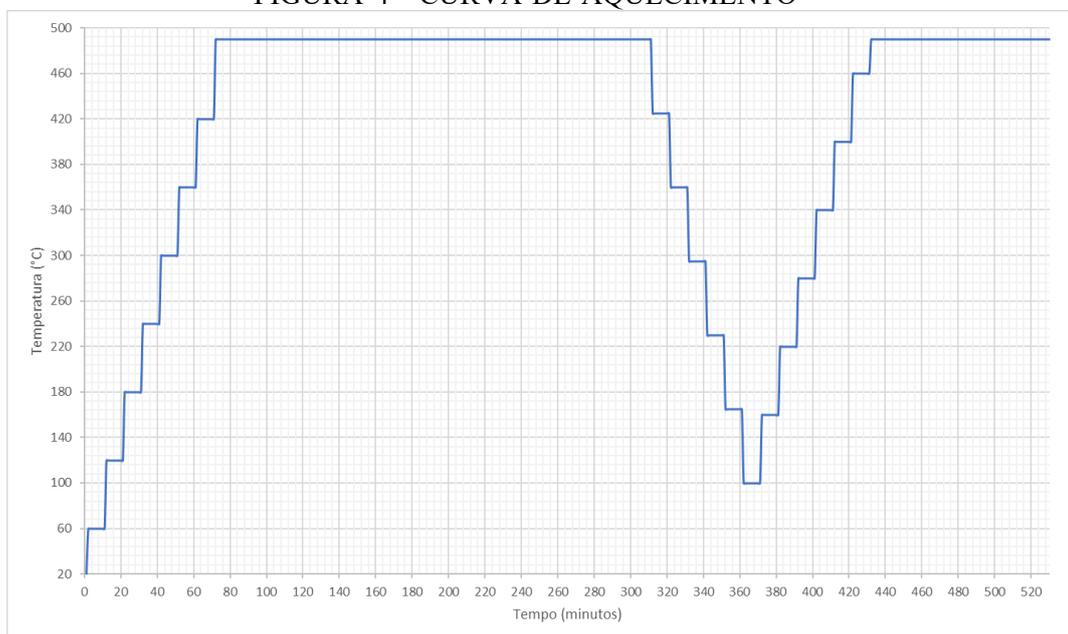
FIGURA 3 - CURVA DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE OPERAÇÃO



Fonte: Próprio do Autor (2023).

Para aplicar o método de recozimento, os TRPs foram aquecidos de forma controlada, ajustando a temperatura em função da tensão de operação dos indutores. A temperatura final de aquecimento escolhida foi de aproximadamente 490°C. No entanto, foram definidas rampas de aquecimento para que o processo ocorresse de maneira gradual e uniforme. A escolha da temperatura final de 490°C baseou-se na observação de que os indutores apresentavam superaquecimento quando operados próximo ao seu valor máximo de temperatura, que é cerca de 530°C. Portanto, por questões de segurança, optou-se por utilizar uma temperatura final que corresponde a 90% da capacidade dos indutores. A Figura 4 mostra a curva de aquecimento aplicada na área coberta pelos indutores.

FIGURA 4 - CURVA DE AQUECIMENTO



Fonte: Próprio do Autor (2023).

Para cobrir toda a extensão da bainha do TRP, o processo de aquecimento foi dividido em duas etapas. A primeira etapa consistiu no aquecimento da parte que compõe o sensor do TRP, enquanto a segunda etapa abrangeu o restante da bainha até atingir a parte onde está localizado o selo do termômetro. Essa divisão foi necessária devido à limitação da área coberta pelas espiras do módulo de indução. É importante ressaltar que a parte da bainha que abriga o sensor requer um processo de aquecimento mais cuidadoso para evitar danos aos filamentos de platina, como pode ser observado na Figura 5.

FIGURA 5 - DIAGRAMA DE DIVISÃO DA HASTE DA TERMORESISTÊNCIA



Fonte: Próprio do Autor (2023).

O primeiro segmento da bainha foi aquecido gradualmente da temperatura ambiente do laboratório, cerca de 20°C, até aproximadamente 490°C. Esse processo foi realizado em um intervalo de 70 minutos, com degraus de elevação de temperatura de aproximadamente 60°C, e a temperatura foi mantida por 10 minutos em cada degrau. Após atingir a temperatura de 490°C, o primeiro segmento foi mantido nessa temperatura por 240 minutos, permitindo que o processo de recozimento removesse a oxidação da platina, eliminasse as impurezas do isolamento e homogeneizasse sua estrutura de isolamento. Após os 240 minutos, iniciou-se o processo de redução da temperatura, com a temperatura sendo reduzida a cada 10 minutos em degraus de 65°C, até atingir a temperatura de 100°C.

Posteriormente, com o auxílio de luvas de proteção, o sistema foi movido para que o segundo segmento do TRP pudesse ser aquecido. Seguindo a mesma dinâmica utilizada anteriormente, a temperatura foi elevada até atingir 490°C e mantida nesse patamar por 50 minutos. Em seguida, o sistema foi movido cuidadosamente para que o terceiro segmento do TRP fosse coberto, e essa região também foi mantida a 490°C por 50 minutos. Após esse período, o sistema foi desligado, permitindo que o TRP esfriasse naturalmente até atingir a temperatura ambiente do laboratório.

3. Resultados e discussão

Após a aplicação do método, utilizando o megômetro (MT0090), os valores de isolamento elétrico dos dois TRPs do tipo PT-100, identificados como MT0036 e MT0093, foram medidos novamente. Os valores medidos de isolamento antes e após a aplicação do método foram registrados na Tabela 1.

TABELA 1 – RESULTADOS MEDIÇÃO

Identificação do PT-100	Isolamento Elétrico Inicial	Isolamento Elétrico Final	Unidade
MT0036	44,1	108,8	MΩ
	44,1	108,8	
	44,1	108,8	
MT0093	31,3	10,33	
	31,3	10,33	
	31,3	10,33	

Fonte: Próprio do Autor (2023).

Com base nos resultados da Tabela 1, pode-se observar que houve um aumento desejado no valor de isolamento elétrico do TRP MT0036, valor que está adequado ao mínimo recomendado pelo DOQ-CGCRE-009. No entanto, o valor de isolamento elétrico do TRP MT0093 apresentou uma redução inesperada.

Os resultados encontrados para o TRP MT0036 atenderam ao objetivo proposto neste trabalho. Conforme esperado, houve um aumento de 56,38% no valor do isolamento elétrico.

Os módulos de indução ZVS (MA712) de 240W, em conjunto com a fonte chaveada de 12V 600W, forneceram fonte de calor suficiente para a aplicação da técnica, apresentando estabilidade e controle preciso durante a aplicação das rampas de aquecimento e resfriamento, conforme mostrado na figura 4, eliminando a necessidade de uso de fornos e outros meios de aquecimento. O custo de montagem do sistema proposto representa aproximadamente 0,2% do valor comercial estimado de um forno de alta temperatura com o mesmo desempenho observado nas rampas de aquecimento da figura 4. Além disso, pode-se considerar que o tempo necessário para aplicação do método utilizando os indutores é inferior ao tempo necessário na utilização de fornos, pois com os indutores, os degraus de temperatura foram atingidos com variações de tempo inferiores a um

minuto.

Portanto, comprovou-se a viabilidade de emprego do sistema utilizado neste trabalho como fonte de aquecimento controlado para a aplicação do método de recozimento de termômetro de resistência de platina. No entanto, essa viabilidade depende das limitações do sistema de aquecimento e das características do TRP.

Os resultados obtidos para o TRP MT0093 não corresponderam às expectativas, e há algumas hipóteses para explicar essa discrepância. Uma delas é que o método de recozimento utilizado pode não ter sido adequado às especificações do fabricante deste TRP, pois não havia disponíveis os valores de temperatura e tempo necessários para criar uma curva de aquecimento específica para o modelo MT0093. Outra possibilidade é que os danos causados ao instrumento tenham sido muito extensos, ultrapassando os limites de reversão pelo método de recozimento.

4. Considerações finais

Neste trabalho exploramos o uso da indução eletromagnética como fonte de calor para o recozimento de termômetros de resistência de platina. O recozimento desempenha um papel fundamental na recuperação das propriedades elétricas e mecânicas desses instrumentos após exposição a condições adversas.

Em conclusão, o aquecimento por indução se mostrou uma abordagem promissora para o recozimento de termômetros de resistência de platina, oferecendo benefícios notáveis em termos de eficiência, controle e uniformidade do aquecimento. Durante este estudo, exploramos os princípios fundamentais do recozimento, os conceitos por trás do aquecimento por indução e as implicações práticas de sua aplicação em termômetros de resistência de platina. Os resultados obtidos confirmaram a capacidade da indução eletromagnética em proporcionar um aquecimento rápido e uniforme, possibilitando a eficaz recuperação das propriedades desejadas nos materiais analisados.

Assim, ao considerar as conclusões deste estudo, é fundamental reconhecer a importância de escolher os parâmetros do processo de recozimento com cuidado, pois esses fatores críticos têm um impacto direto na eficácia do processo e na integridade dos termômetros de resistência de platina. Portanto, ao aplicar a técnica de recozimento, é essencial realizar uma análise criteriosa das especificações do fabricante e das condições de danos aos termômetros para determinar os valores ideais de temperatura e tempo de exposição. Dessa forma, garantimos que o processo de recozimento seja realizado com sucesso e que os termômetros recuperem suas propriedades elétricas e mecânicas de maneira eficiente, estendendo sua vida útil e utilidade em aplicações de metrologia.

Em resumo, este estudo reforça a viabilidade da indução eletromagnética como uma fonte de calor eficaz para o recozimento de termômetros de resistência de platina. Os benefícios em termos de controle de temperatura, uniformidade e eficiência do aquecimento são evidentes. Espera-se que os resultados desta pesquisa inspirem futuros estudos a explorar ainda mais o potencial dessa técnica. Isso poderá contribuir para o aprimoramento dos processos de manutenção e recuperação de termômetros, garantindo sua confiabilidade e prolongando sua vida útil.

Referências

- [1] Albertazzi AG, Souza AR. Fundamentos da Metrologia Científica e Industrial. 1ª ed. São Paulo: Editora Manole; 2008. 424 p. ISBN 8520421164.
- [2] Joselito JE. Definição, Tipos e Como funciona a Termoresistência Pt100. 1 vídeo (5min e 28s.). 2017. Publicado pelo canal: Curso Termometria Instrumentação Industrial. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=pGUMklj9xII>. Acesso em: 14 nov. 2022.
- [3] Fluke. Principles and Practical Tips About Electrical, Flow, Pressure, RF, and Temperature Calibration. Fluke Calibration Web Seminar Series. 2019. Disponível em: https://players.brightcove.net/5229431846001/default_default/index.html?videoId=62113033



2801. Acesso em: 14 nov. 2022.
- [4] Halliday D. Fundamentos de Física: Eletromagnetismo. 9ª ed. 3 v. Editora LTC; 2012. 388 p. ISBN 8521619057.
- [5] Inmetro (Brasil). Orientação para Acreditação de Laboratórios para o Grupo de Serviços de Calibração em Temperatura e Umidade: Documento de Caráter Orientativo. 7ª ed. Abril 2009. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/pesquisa_link.asp?seq_tipo_documento=5&cod_uo_numeracao=00774&num_documento=009. Acesso em: 12 nov. 2022.
- [6] Kilhian K. Relações entre as Escalas Termométricas. O Baricentro da Mente. 27 dez. 2010. Disponível em: <https://www.obaricentrodamente.com/2010/12/relacoes-entre-as-escalas-termometricas.html>. Acesso em: 13 nov. 2022.
- [7] Merlin V. Transformadores: Conceitos Preliminares. Manutenção de Cabine. 12 nov.2019. Disponível em: <https://manutencaodecabine.com.br/transformador-de-forca/>. Acesso em: 14 nov. 2022.
- [8] Preston-Thomas, H. The international temperature scale of 1990 (ITS-90). 24 oct. 1989. Disponível em: https://www.nist.gov/system/files/documents/pml/div685/grp01/ITS-90_metrologia.pdf. Acesso em: 13 nov. 2022.