

## **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA COM CARGA NOMINAL E COM CARGA REDUZIDA EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Jean Lucas Osovski, Aldo Zanella

Instituto Federal de Santa Catarina

Câmpus Jaraguá do Sul – Rau, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica

e-mail: [lucasosovski@gmail.com](mailto:lucasosovski@gmail.com), [azanella@ifsc.edu.br](mailto:azanella@ifsc.edu.br)

Trabalho de Conclusão de Curso – 10/12/2025

**Resumo** – Os motores de indução trifásicos exigem avaliação adequada de seu comportamento térmico, uma vez que a elevação de temperatura afeta diretamente a vida útil do isolamento. Este trabalho compara o ensaio de elevação de temperatura em carga nominal (100%) com o método de carga reduzida com extrapolação aplicado a um motor de 30 kW. O objetivo é verificar se os valores estimados em 70%, 80% e 90% de carga reproduzem, dentro de  $\pm 3$  °C, o valor obtido em ensaio nominal.

A metodologia segue as normas IEC 60034-1, IEEE Std 112 e ABNT NBR 17094-3, utilizando medições por resistência elétrica e por sensores Pt100. Foram avaliados o método normativo de extrapolação (dois pontos) e um método experimental simplificado (um ponto), além de regressões entre  $\Delta T$ , corrente  $I_r$  e a variável  $(I_n/I_r)^2$ . O consumo energético da bancada foi monitorado por analisador de potência para comparar as condições de 70% e 100% de carga.

Os resultados demonstram que o método de carga reduzida, especialmente pela resistência, estimou o  $\Delta T$  nominal com erro inferior a  $\pm 3$  °C e elevada linearidade ( $R^2 \approx 0,99$ ). Observou-se ainda redução de aproximadamente 8,8% na potência ativa da bancada em 70% de carga. Conclui-se que o método reduzido é tecnicamente viável e energeticamente vantajoso em relação ao ensaio convencional.

**Palavras-chave:** motores de indução trifásicos; ensaio de elevação de temperatura; eficiência energética.

### **I. INTRODUÇÃO**

Os motores de indução trifásicos são os principais responsáveis pelo acionamento de sistemas industriais em todo o mundo. Sua ampla aplicação se deve à robustez, ao custo reduzido e à facilidade de operação. Contudo, o desempenho e a vida útil desses motores estão diretamente relacionados ao controle térmico, uma vez que o aumento da temperatura afeta a integridade do isolamento e pode causar falhas prematuras [1].

O ensaio de elevação de temperatura é um procedimento normativo essencial para verificar a conformidade térmica do motor com a classe de isolamento especificada [2, 3, 4]. Esse ensaio avalia o aquecimento dos enrolamentos e demais componentes sob condições de operação nominal, assegurando que o motor possa operar de forma contínua sem ultrapassar os limites de temperatura admissíveis.

Tradicionalmente, o ensaio é realizado em carga nominal, o que exige infraestrutura de potência significativa, longos

períodos de estabilização térmica e elevado consumo energético. Diante da crescente busca por eficiência energética e otimização de recursos laboratoriais, métodos alternativos foram propostos dentre eles, o ensaio em carga reduzida com extrapolação linear, que permite prever a temperatura nominal com base em medições realizadas sob cargas parciais [5].

Este artigo apresenta uma análise comparativa entre os dois métodos, avaliando a proximidade dos resultados e a viabilidade do uso da carga reduzida como método equivalente. O foco é verificar se as diferenças de temperatura observadas permanecem dentro da variação de  $\pm 3$  °C, considerada a faixa de incerteza experimental tolerada pelos laboratórios de ensaio.

### **II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O aquecimento em motores elétricos resulta das perdas internas geradas durante a conversão de energia elétrica em mecânica. As principais fontes de calor são:

- Perdas no cobre (Joule), proporcionais ao quadrado da corrente elétrica;
- Perdas no ferro, associadas aos fenômenos de histerese magnética e correntes parasitas;
- Perdas mecânicas, relacionadas ao atrito e à ventilação [1, 2, 3, 4].

O equilíbrio térmico é atingido quando a taxa de geração de calor iguala a taxa de dissipação, sendo o regime permanente caracterizado por uma variação inferior a 1 °C/h [1, 2, 3]. A elevação de temperatura influencia diretamente na vida útil do isolamento dos enrolamentos. Cada aumento de 10 °C acima da temperatura de operação do isolamento reduz pela metade a vida útil do motor [1].

Essas considerações reforçam a importância dos ensaios de elevação de temperatura, cuja finalidade é assegurar que o projeto térmico do motor atenda aos limites estabelecidos para sua classe de isolamento, conforme normas internacionais como IEC 60034-1 (2022), IEEE Std 112 (2017) e nacional ABNT NBR 17094-3 (2023) [2, 3, 4].

A seguir está apresentado os subitens descrevendo como é realizado os ensaios.

#### **A. Ensaio em dinamômetro elétrico**

Os dinamômetros elétricos são dispositivos utilizados para aplicar carga mecânica controlada ao motor sob teste, permitindo reproduzir condições específicas de torque e velocidade necessárias para a execução dos ensaios previstos nas normas [2, 3, 4]. Nos ensaios de elevação de temperatura,



a utilização de dinamômetros é fundamental, pois esses equipamentos garantem repetibilidade das condições de carga.

### 1) Dinamômetro regenerativo

Entre os diferentes tipos existentes, destaca-se o dinamômetro regenerativo, amplamente empregado em laboratórios modernos devido à sua eficiência energética. O dinamômetro regenerativo é constituído por um motor elétrico auxiliar, geralmente do tipo máquina síncrona ou de indução em operação servo controlada, acoplado mecanicamente ao motor ensaiado. O dinamômetro é comandado por um inversor de frequência, capaz de operar tanto como acionamento quanto como freio [1, 5].

Durante o ensaio, o dinamômetro atua como máquina geradora, absorvendo o torque produzido pelo motor sob teste e convertendo essa energia mecânica em energia elétrica. Diferentemente dos dinamômetros dissipativos, que convertem essa energia em calor, o dinamômetro regenerativo devolve a energia absorvida para a rede elétrica, reduzindo significativamente o consumo energético do ensaio. Essa característica é especialmente relevante em ensaios prolongados, como os testes de elevação de temperatura, que podem demandar várias horas até que o regime permanente seja atingido [4].

### 2) Princípios de operação

O funcionamento do dinamômetro regenerativo baseia-se em malhas de controle de torque e velocidade, implementadas no inversor de frequência. A arquitetura típica inclui:

- sensor de torque no eixo;
- sensor de velocidade (encoder);
- malha de torque para aplicação de carga mecânica.

O sistema controla continuamente a potência do motor ensaiado, garantindo que a carga mecânica aplicada permaneça constante durante todo o período de aquisição térmica. Esse controle é essencial, pois as normas exigem que a corrente e/ou o torque sejam mantidos dentro de faixas durante o processo de estabilização térmica [2, 3, 4].

### 3) Interconexão entre barramento CC dos inversores

Uma técnica empregada em laboratórios avançados consiste na conexão direta entre os barramentos CC (*DC links*) do inversor que comanda o dinamômetro e do inversor que alimenta o grupo gerador. Nessa configuração, parte da energia regenerada pelo dinamômetro é transferida diretamente ao inversor do grupo gerador, reduzindo ainda mais a necessidade de troca de potência com a rede elétrica.

Essa estratégia traz dois benefícios principais:

- Redução significativa do consumo de energia do ensaio;
- Aumento da eficiência global do conjunto motor–dinamômetro.

Essa abordagem é frequentemente utilizada em laboratórios de pesquisa e bancadas de testes industriais, especialmente em ensaios longos como os de elevação de temperatura [1, 6, 7].

### 4) Aplicação nos ensaios de elevação de temperatura

O dinamômetro regenerativo proporciona condições de ensaio altamente estáveis, permitindo:

- controlar precisamente o ponto de carga (70%, 80%, 90% ou 100%);
- manter rotação e torque constantes durante o período de estabilização térmica;
- reduzir a interferência de perturbações externas;
- minimizar o consumo energético total, fator relevante em ensaios de 4 a 12 horas;

### B. Métodos de determinação da elevação de temperatura

As normas descrevem dois métodos principais para determinação da elevação de temperatura dos enrolamentos:

- 1) Método direto (termometria): consiste na medição da temperatura por meio de sensores aplicados diretamente nos pontos de maior aquecimento do motor, como o estator e o rotor. É indicado para motores de grande porte e protótipos, onde a inserção dos sensores é viável.
- 2) Método indireto (resistência elétrica): determina a elevação de temperatura a partir da variação da resistência dos enrolamentos antes e após o ensaio. É amplamente utilizado em motores de produção, pois dispensa sensores internos e apresenta boa precisão.

O método indireto baseia-se na variação da resistência do cobre com a temperatura, sendo a forma simplificada expressa pela Equação 1:

$$\Delta T = \frac{R_2 - R_1}{R_1 \alpha}, \quad (1)$$

onde:

- $\Delta T$  - elevação de temperatura;
- $R_1$  - resistência medida a frio ( $\Omega$ );
- $R_2$  - resistência medida a quente ( $\Omega$ );
- $\alpha$  - coeficiente de temperatura do cobre ( $0,00393^\circ\text{C}^{-1}$ )

Contudo, as normas recomendam o uso da forma completa, que considera a temperatura ambiente durante as medições e utiliza a constante térmica do material do condutor. A equação normalizada é dada pela Equação 2:

$$\Delta T = \left( \frac{R_2 - R_1}{R_1} \right) (K + T_1) - K, \quad (2)$$

onde:

- $T_1$  - temperatura ambiente durante a medição a frio ( $^\circ\text{C}$ );
- $K$  - constante térmica do material condutor.

Essa forma é amplamente utilizada em laboratórios de ensaio, pois simplifica o cálculo e já incorpora o fator de correção da temperatura ambiente, eliminando a necessidade de converter o coeficiente de temperatura  $\alpha$  [1, 2, 3, 4].

### C. Métodos de ensaio de elevação de temperatura

Os ensaios de elevação de temperatura podem ser realizados por diferentes procedimentos, dependendo da infraestrutura do laboratório e das exigências normativas. Os

dois métodos mais empregados são: o ensaio em carga nominal e o ensaio em carga reduzida com extrapolação, ambos descritos em normas internacionais [2, 3, 4]

1) Ensaio em carga nominal

O método convencional consiste em operar o motor em 100% da carga nominal, mantendo as grandezas elétricas estabilizadas até que se atinja o equilíbrio térmico, definido pelas normas como um gradiente inferior a 1 °C/h [2, 3, 4]. Esse método fornece a medição direta do  $\Delta T$  em carga nominal, porém apresenta maior tempo de ensaio e consumo energético elevado, especialmente em motores de maior potência.

2) Ensaio de carga reduzida com extrapolação

O método de carga reduzida fundamenta-se no comportamento das perdas Joule, que variam proporcionalmente ao quadrado da corrente elétrica ( $I^2R$ ). Assim, ao realizar ensaios no motor em carga reduzida, torna-se possível prever a elevação de temperatura correspondente a 100% de carga através de extrapolação linear.

A Figura 1 apresenta um exemplo de curva obtida a partir dos ensaios em carga reduzida, representando a elevação de temperatura em função da relação quadrática entre a corrente nominal e a corrente medida ( $I_n/I$ )<sup>2</sup>.

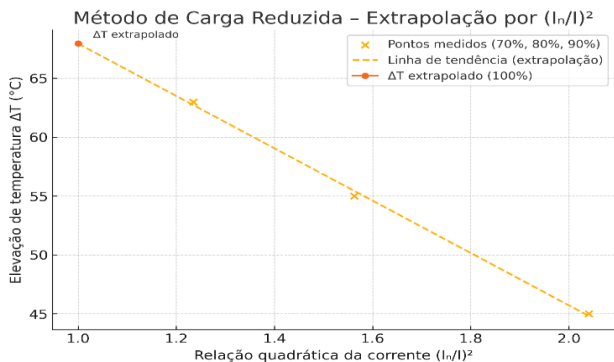


Fig. 1. Curva de temperatura pela relação de corrente [2, 3, 4]

No gráfico da Figura 1, os pontos correspondentes às medições experimentais em 70%, 80% e 90% da carga nominal são mostrados juntamente com a linha de tendência linear, utilizada para representar o comportamento térmico do motor na faixa de carga reduzida. A extrapolação até o ponto em que  $(I_n/I)^2 = 1$ , permite estimar o valor da elevação de temperatura equivalente à carga nominal, conforme previsto pelo método gráfico normativo. O ponto extrapolado é destacado na figura, indicando o  $\Delta T$  estimado para operação em 100% da carga.

A literatura e as normas técnicas mostram que, em faixas usuais de operação, a elevação de temperatura dos enrolamentos apresenta dependência aproximadamente linear com uma variável proporcional às perdas no cobre, isto é, ao quadrado da corrente [2, 3, 4]. Neste trabalho, modela-se a elevação de temperatura como função linear da variável adimensional  $x$ , conforme Equação 3.

$$\Delta T = ax + b, \quad (3)$$

em que  $a$  é o coeficiente angular e  $b$  é o intercepto. A variável  $x$  é definida pela relação quadrática entre a corrente nominal ( $I_n$ ) e a corrente do ensaio ( $I_r$ ), conforme a Equação 4.

$$x = \left(\frac{I_n}{I_r}\right)^2. \quad (4)$$

As normas descrevem um método de extrapolação baseado em dois pontos experimentais da curva térmica: um obtido em carga reduzida e outro obtido em ensaio a vazio. A partir desses dois pontos, é possível determinar o valor da elevação de temperatura correspondente à carga nominal por meio de uma expressão derivada da equação da reta aplicada à curva  $\Delta T \times I^2$ . A Equação 5 apresenta a forma analítica utilizada para determinar a elevação de temperatura correspondente a 100% de carga a partir desses dois pontos:

$$\Delta T = \Delta T_r + \frac{I_n^2 - I_r^2}{I_r^2 - I_o^2} (\Delta T_r - \Delta T_o), \quad (5)$$

onde:

- $\Delta T_r$  - temperatura final do ensaio a carga reduzida (°C);
- $\Delta T_o$  - temperatura final do ensaio a vazio (°C);
- $I_r$  - corrente durante ensaio a carga reduzida (A);
- $I_o$  - corrente durante ensaio a vazio (A);
- $I_n$  - corrente nominal (A).

Essa equação é matematicamente equivalente à equação geral da reta aplicada ao eixo  $I^2$ . O método normativo reflete o comportamento físico do aquecimento nos enrolamentos, cuja componente dominante depende diretamente do termo  $I^2R$ . Assim, a extrapolação térmica da Equação 5 corresponde diretamente ao método gráfico normativo descrito pelas normas técnicas.

Conforme previsto pelas normas técnicas, o procedimento de extrapolação deve incluir obrigatoriamente:

- um ensaio com carga reduzida, cuja corrente não deve ser inferior a 70% da corrente nominal, e;
- um ensaio a vazio, ambos executados em tensão e frequência nominais [2, 3, 4].

Embora o método normativo exija dois pontos, é possível estimar a elevação de temperatura nominal utilizando somente um ponto de carga reduzida. Para isso, assume-se que o intercepto térmico associado às perdas independentes da carga é pequeno na faixa analisada, de modo que o modelo pode ser aproximado para uma reta passando pela origem. Nessas condições, a extrapolação reduz-se conforme Equação 6.

$$\Delta T \approx \left(\frac{I_n}{I_r}\right)^2 \Delta T_r. \quad (6)$$

Essa expressão corresponde ao caso especial do modelo linear em que  $b \approx 0$ . Embora útil do ponto de vista prático, trata-se de um método não normativo, devendo ser empregado apenas de forma experimental e comparativa em relação ao método recomendado oficialmente.

### III. METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os procedimentos experimentais adotados para a realização dos ensaios de elevação de temperatura nos motores de indução trifásicos. As atividades descritas compreendem a preparação dos equipamentos, a metodologia de medição das resistências elétricas a frio e a quente, os critérios de estabilização térmica e os pontos de carga utilizados.

#### A. Preparação do motor e instrumentação

Para os ensaios foi utilizado um motor de indução trifásico com potência nominal de 30 kW. Como parte da preparação da bancada, instalou-se um analisador de potência trifásico na entrada de alimentação da bancada de ensaios. O instrumento foi conectado imediatamente a montante dos inversores responsáveis pela alimentação do grupo gerador e do dinamômetro regenerativo, permitindo registrar potência absorvida pela bancada. Essa configuração torna possível monitorar a potência absorvida pela bancada durante todo o ciclo de ensaio, possibilitando a comparação do desempenho energético entre os métodos de carga nominal e de carga reduzida com extrapolação.

Para a determinação da elevação de temperatura pelo método indireto, as resistências elétricas dos enrolamentos foram medidas utilizando uma fonte CC e um multímetro digital de alta precisão, conforme recomendações das normas IEC 60034-1 (2022), IEEE Std 112 (2017) e nacional ABNT NBR 17094-3 (2023) [2, 3, 4].

As medições eram realizadas conforme os seguintes passos:

- 1) Medição da resistência a frio ( $R_1$ ): efetuada com o motor completamente estabilizado à temperatura ambiente.
- 2) Registro da temperatura ambiente ( $T_1$ ): medição realizada por sensor externo posicionado próximo ao motor, sem interferência de fontes térmicas adicionais.
- 3) Medição da resistência a quente ( $R_2$ ): executada imediatamente após o desligamento do motor, no menor tempo possível, para evitar o resfriamento natural dos enrolamentos.

#### B. Procedimento de ensaio

Os ensaios seguiram a seguinte sequência:

- 1) Ensaio a vazio

O motor era acionado sem carga mecânica imposta pelo dinamômetro. A estabilização térmica era monitorada até que a taxa de variação da temperatura fosse inferior a  $1\text{ }^\circ\text{C/h}$ . As resistências foram medidas imediatamente após a interrupção da alimentação.

- 2) Ensaio em carga reduzida

O dinamômetro regenerativo aplicou carga mecânica correspondente a 70%, 80% e 90% da corrente nominal. A operação permaneceu até o estabelecimento de regime

permanente. Ao final, eram realizadas as medições de resistência a quente.

- 3) Ensaio em carga nominal

O motor opera em 100% da carga nominal, seguindo o mesmo procedimento de estabilização térmica. Este ensaio serviu como referência para comparação com o método de carga reduzida.

#### C. Determinação da elevação de temperatura

Os valores de elevação de temperatura podem ser calculados utilizando a forma completa normalizada (Equação 2). Para extrapolação em carga reduzida, dois métodos são avaliados:

1. Método normativo (dois pontos): conforme Equação 5, utilizando os ensaios em carga reduzida e a vazio.
2. Método experimental (um ponto): aproximação dada pela Equação 6, assumindo intercepto térmico desprezível.

### IV. RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios de elevação de temperatura são apresentados a seguir, com ênfase na comparação entre os valores medidos em carga nominal e os valores extrapolados a partir dos ensaios em carga reduzida. Para facilitar a interpretação, são incluídos gráficos de dispersão e a curva  $\Delta T \times (\ln/I_r)^2$  utilizada no processo de extrapolação.

#### A. Análise da repetibilidade das medições

A repetibilidade dos três ensaios em cada ponto de carga foi avaliada inicialmente pelos gráficos de dispersão apresentados na Figura 2 (método da resistência) e Figura 3 (método Pt100). Cada marcador representa uma repetição individual, permitindo observar tanto a variabilidade intrínseca quanto a separação entre os métodos normativo e experimental.

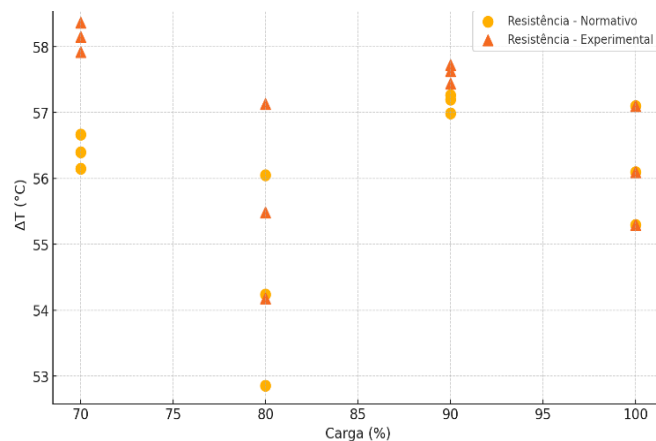


Fig. 2. Gráfico dispersão para método da resistência [do autor]

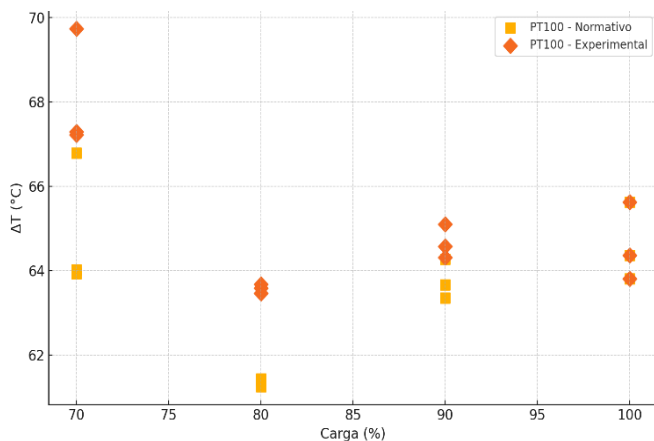


Fig. 3. Gráfico dispersão para método Pt100 [do autor]

Observa-se que, para ambos os métodos de medição, a dispersão é pequena e as repetições agrupam-se de forma consistente. A maior variação é observada nas cargas mais baixas (70%) com aproximadamente 7,35% para o ponto de maior dispersão em relação a medição em 100% de carga, fenômeno associado à maior sensibilidade térmica causada pela menor elevação absoluta de temperatura.

### B. Comparação entre os métodos

A Tabela 1 apresenta os valores médios obtidos através de extrapolação térmica para as cargas de 70%, 80% e 90%, comparando-os com a referência térmica real medida a 100% de carga. Além disso, são fornecidos os desvios-padrão de cada condição e o erro médio (em °C) entre o valor extrapolado e o valor real a 100%. A análise a seguir aprofunda-se em cada método, trazendo interpretações estatísticas, térmicas e metrológicas.

**TABELA I**  
**Temperatura média e erros para cada método**

Método	Carga (%)	Média (°C)	Desvio Padrão	Erro (°C)	Erro (%)
Resistência normativo	70	56,41	0,26	+0,24	+0,43
	80	54,39	1,60	-1,78	-3,17
	90	57,15	0,14	+0,98	+1,74
Resistência experimental	70	58,16	0,22	+1,98	+3,53
	80	55,60	1,48	-0,57	-1,01
	90	57,60	0,15	+1,43	+2,55
Pt100 normativo	70	64,91	1,62	+0,31	+0,55
	80	61,36	0,10	-3,24	-5,77
	90	63,77	0,47	-0,83	-1,48
Pt100 experimental	70	68,09	1,43	+3,49	+6,21
	80	63,57	0,11	-1,03	-1,83
	90	64,66	0,40	+0,06	+0,11

Para verificar a validade da extrapolação, comparou-se o valor extrapolado, obtido com base nas Equações 5 e 6, com o valor efetivamente medido em 100%. A análise demonstrou que:

- 1) O método da resistência apresentou os menores desvios e erros, com todas as estimativas permanecendo dentro do intervalo de  $\pm 3$  °C em relação ao valor real medido em 100%. Tanto a abordagem normativa (dois pontos) quanto a

- experimental (um ponto) demonstraram comportamento quase idêntico, indicando elevada estabilidade da técnica. Os erros variaram entre aproximadamente  $-3,17$  % e  $+3,53$  %, revelando um resultado consistente comparando ao valor padrão dos laboratórios e apresentado nas normas de até 7%.
- 2) Os métodos baseados em Pt100 apresentaram valores médios maiores, o que já era esperado, pois o sensor mede diretamente regiões próximas ao ponto mais quente do enrolamento. Essa característica intrínseca resulta em temperaturas naturalmente superiores às obtidas pela resistência, que representa o aquecimento médio do conjunto. Ainda assim, os erros permaneceram dentro de faixas aceitáveis, variando entre  $-5,77$  % e  $+6,21$  %.
- 3) O método Pt100 apresentou as maiores discrepâncias, especialmente no método experimental (um ponto), que registrou o maior erro individual da tabela ( $+3,49$  °C a 70% de carga). Entretanto, mesmo essas discrepâncias continuam representando um desvio relativo pequeno quando comparado ao valor de referência, correspondendo a uma variação aproximada de 6,21%.
- 4) Os desvios-padrão foram, em sua maioria, baixos, variando de aproximadamente 0,10 °C a 1,62 °C, demonstra boa repetibilidade dos ensaios. Os menores desvios ocorreram nos métodos experimentais com Pt100, enquanto os maiores desvios apareceram no método normativo com Pt100 a 70%, indicando que o comportamento térmico local pode apresentar maior variação para as cargas mais baixas.
- 5) Os valores obtidos pelo método da resistência exibem maior proximidade e menor dispersão em relação ao valor real, evidenciando que a extrapolação baseada na variação resistiva é mais estável e menos sensível às variações térmicas internas do motor.
- 6) O método experimental (um ponto) mostra forte equivalência ao método normativo (dois pontos). Essa proximidade evidencia que a extrapolação realizada a partir de um único nível de carga reduzida é capaz de capturar adequadamente a tendência térmica do motor, mantendo um erro comparável ao procedimento mais completo. Isso reforça a viabilidade do método experimental como alternativa prática para redução do tempo de ensaio, consumo de energia e ocupação de bancada.

### C. Relação elevação térmica por corrente

A Figura 4 apresenta a relação entre a elevação de temperatura média ( $\Delta T$ ) e a corrente média de ensaio ( $I_r$ ) para as quatro condições avaliadas (70%, 80%, 90% e 100% da carga). Cada ponto do gráfico representa a médias das repetições realizadas em cada nível de carga.

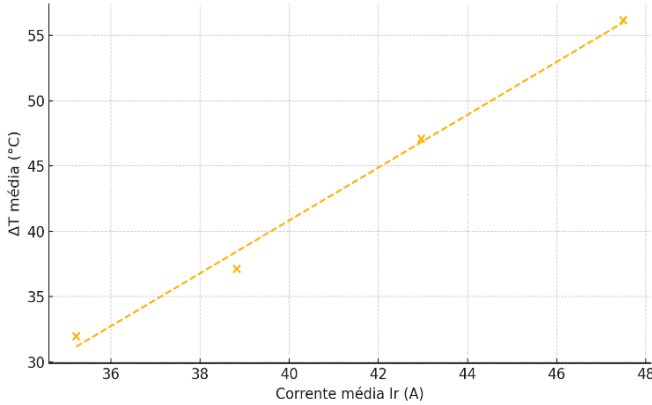


Fig. 4. Elevação por corrente [do autor]

O gráfico da Figura 4 evidencia o comportamento crescente esperado para motores de indução, em que o aumento da corrente resulta em elevação proporcional das perdas Joule e, conseqüentemente, da temperatura final dos enrolamentos. Para avaliar a adequação do modelo linear, foi ajustada uma regressão conforme Equação 7.

$$\Delta T = 2,023I_r - 40,09. \quad (7)$$

Para avaliar o comportamento térmico do motor em função da corrente ( $I_r$ ), foi realizada uma análise de regressão linear entre essas duas variáveis. A linearidade do conjunto de dados foi examinada por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Utilizando um *software* estatístico, o valor obtido de  $R^2 = 0,9928$  indica que 99,28% da variação da temperatura ( $\Delta T$ ) pode ser explicada diretamente pela variação da corrente. Esse resultado demonstra que existe uma forte relação linear entre os parâmetros analisados, evidenciando que o aumento de corrente produz incrementos proporcionais e consistentes na elevação de temperatura.

A Figura 5 apresenta a relação entre a elevação de temperatura média e a variável adimensional definida pelas normas,  $(I_n/I_r)^2$ , utilizada para projeção térmica em ensaios com carga reduzida.

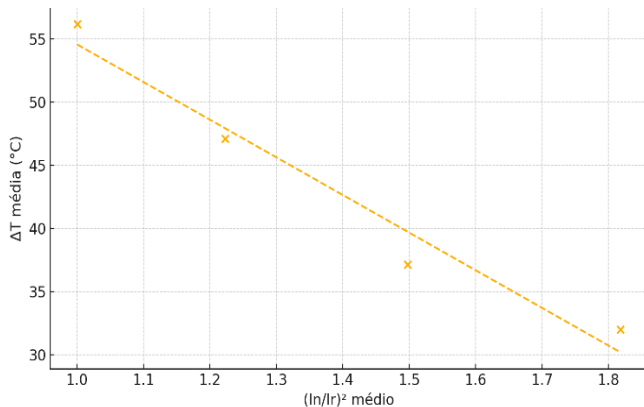


Fig. 5. Elevação pela relação quadrática da corrente [do autor]

A regressão linear ajustada sobre os valores médios resultou no modelo conforme Equação 8.

$$\Delta T = -29,81 \left( \frac{I_n}{I_r} \right)^2 + 84,37, \quad (8)$$

Esse valor apresenta boa concordância com o valor medido experimentalmente por resistência (56,17 °C), com erro aproximado de 2 °C.

#### D. Avaliação da potência absorvida e consumo de energia

A avaliação da potência absorvida durante os ensaios foi realizada utilizando um analisador de potência instalado a montante da bancada. As Figura 6 apresenta a tela capturada durante os ensaios com 100% da carga, permitindo observar a potência ativa total fornecida ao sistema e as correntes de linha.

	Element 1	Element 2	Element 3	Σ A(3P4W)
Voltage	300V	300V	300V	
Current	50mA	50mA	50mA	
Urms [V]	382.30	383.46	382.62	382.79
Irms [A]	40.37	44.89	56.67	47.31
P [W]	6.33k	7.23k	10.65k	24.21k
S [VA]	8.91k	9.94k	12.52k	31.37k
Q [var]	6.27k	6.82k	6.58k	19.67k
λ	0.7101	0.7277	0.8506	0.7717
φ [°]	644.76	643.31	631.72	39.49
fU [Hz]	59.958	59.957	59.957	
fI [Hz]	59.956	-----	-----	

Fig. 6. Medições com 100% de carga [do autor]

A Tabela 2 resume os valores de potência ativa e corrente média obtidos diretamente das medições. Além de, os valores de consumo de energia considerando que o ensaio tem duração de três horas e 30 minutos.

**TABELA II**

#### Medições de potência e corrente na entrada da bancada

Carga (%)	Potência ativa (kW)	Consumo energia (kWh)	Corrente (A)
70	22,07	77,24	42,5
100	24,21	84,73	47,3

Com base nos ensaios, a potência absorvida exclusivamente pelo motor na condição nominal é de 31,76 kW. Comparando esse valor com a potência ativa medida na entrada da bancada (24,21 kW), verifica-se que cerca de 7,55 kW, equivalentes a aproximadamente 23,8% da potência absorvida pelo motor, são regenerados pelo dinamômetro e devolvidos à rede elétrica. Assim, a bancada efetivamente consome da rede cerca de 76,2% da potência convertida pelo motor.

Ao comparar as duas condições de carga, observa-se que a potência ativa medida na entrada da bancada reduz-se de 24,21 kW (100%) para 22,07 kW (70%), o que corresponde a uma redução de aproximada de 8,8% na potência consumida pela bancada. Essa redução está diretamente associada à menor corrente média, de 47,3 A para 42,5 A, e, conseqüentemente, à diminuição das perdas Joule ( $I^2R$ ) no sistema. Essa diferença evidencia que o ensaio em carga reduzida demanda consideravelmente menos potência, tornando-se mais eficiente do ponto de vista operacional, especialmente em laboratórios que realizam grande volume de ensaios ou

trabalham com motores de maior potência. Ainda assim, mesmo com a redução na potência consumida, a análise térmica demonstrou que a extrapolação obtida a partir dos ensaios de 70%–90% fornecem valores de  $\Delta T$  muito próximos ao ensaio nominal, reforçando a viabilidade técnica do método de carga reduzida.

Em um cenário prático de laboratório, considerando um mês de ensaios em que o consumo médio de energia absorvida pelos motores é de 81,87 kWh, a aplicação dos percentuais obtidos experimentalmente permite estimar a contribuição energética do sistema regenerativo e do uso do método de carga reduzida. Mantendo o regime nominal, a energia efetivamente demandada da rede pela bancada seria da ordem de 62,39 kWh (correspondente a 76,2% de 81,87 kWh), enquanto aproximadamente 19,48 kWh ( $\approx 23,8\%$ ) seriam regenerados e devolvidos à rede elétrica.

Caso, em condição equivalente, os ensaios fossem realizados com carga reduzida (70%), a demanda energética da bancada sofreria uma redução adicional de aproximadamente 8,8%, passando para cerca de 56,9 kWh. Isso representa uma economia próxima de 5,5 kWh em relação à condição de ensaio em carga nominal, ou cerca de 6,7% quando comparada ao consumo total absorvido pelos motores.

Considerando que esse laboratório realiza 216 ensaios de elevação de temperatura por mês, a adoção sistemática do método de carga reduzida resultaria em uma redução energética total estimada de aproximadamente 1185,8 kWh no período analisado. Esses resultados evidenciam o potencial do método de carga reduzida, aliado ao uso do dinamômetro regenerativo, para reduzir o consumo energético global da instalação sem comprometer a confiabilidade da avaliação térmica

#### IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise comparativa entre o ensaio de elevação de temperatura em carga nominal e o método de carga reduzida com extrapolação aplicado a motores de indução trifásicos, seguindo as diretrizes das normas IEC 60034-1, IEEE Std 112 e ABNT NBR 17094-3.

Com base nos resultados experimentais obtidos para o motor avaliado, verificou-se que o método de carga reduzida é capaz de estimar, com coerência, a elevação de temperatura em regime nominal, mantendo erro inferior a  $\pm 3$  °C, limite aceito em laboratórios de ensaio.

A análise estatística evidenciou baixa dispersão entre repetições, mostrando boa estabilidade térmica e reprodutibilidade do procedimento. A regressão linear aplicada confirmou o comportamento proporcional, fundamento que sustenta o método de extrapolação previsto em normas. Tanto as medições pela variação da resistência quanto pelos sensores Pt100 integrados apresentaram concordância entre os métodos, com pequenas variações justificáveis pelo posicionamento físico dos sensores.

A avaliação energética demonstrou ainda a relevância prática do método reduzido. Comparando-se os ensaios em 70% e 100% da carga, observou-se redução aproximada de 8,8% na potência ativa medida na entrada. Considerando um laboratório que, ao longo de um mês, teve 81,87 kWh de

energia absorvida pelos motores, a aplicação sistemática do método de carga reduzida poderia representar economia expressiva de energia, além de redução do tempo total de ensaio.

Dessa forma, os resultados confirmam que o método de carga reduzida, quando aplicado de forma adequada e dentro das condições estabelecidas pelas normas técnicas, constitui uma alternativa viável, confiável e energeticamente vantajosa em comparação ao ensaio convencional em carga nominal.

#### REFERÊNCIAS

- [1] UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7**. AMGH Editora, 2014.
- [2] *IEEE Std 112-2017: Standard test procedure for polyphase induction motors and generators*. New York: IEEE, 2017.
- [3] ABNT NBR 17094-3, *Máquinas Elétricas Girantes – Métodos de Ensaio – Parte 3*, 2023.
- [4] IEC 60034-1, *Rotating Electrical Machines – Rating and Performance*, 2022.
- [5] KUCHENBECKER, Walter Evaldo; TEIXEIRA, Júlio Carlos. Revisão dos métodos de ensaio para elevação de temperatura em máquinas elétricas girantes. Artigo técnico. Jaraguá do Sul: WEG, [s.d.]. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/he8/haf/WEG-revis-o-dos-m-todos-de-ensaio-para-eleva-o-de-temperatura-em-m-quinas-el-tricas-girantes-artigo-tecnico-portugues.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- [6] DE SOUSA, Leandro Braz; SASS, Felipe; FORTES, Márcio Zamboti. Comparação dos métodos de ensaio de motores de indução trifásicos utilizando ABNT NBR 17094-3:2018 e IEC 60034-2-1:2014. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, n. 5, p. 746–754, 2021.
- [7] MARTINS, Leonardo Estevo; et al. *Estruturação de procedimentos de ensaio para motores de indução trifásicos*. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/218635/TCC%20Leonardo%20Estevo%20VERSAO%20FINAL.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 nov. 2025.