# SISTEMA PARA MONITORAMENTO TERMOGRÁFICO

# SYSTEM FOR THERMOGRAPHIC MONITORING

Alex Prado Nascimento Junior, Evandro Vieira dos Santos, João Souza Fernandes, Matheus Doglio Pereira, Uriel Carvalho Freire, Alexandre Shozo Onuki

*Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica*
E-mail para contato: es108224@alunos.unisanta.br

*RESUMO – Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema termográfico de baixo custo voltado ao monitoramento contínuo de componentes elétricos. O protótipo foi construído com o sensor MLX90640BAA integrado a um ESP32 e validado em bancada utilizando três disjuntores monofásicos sob diferentes condições de carga. Durante os testes, foram simuladas falhas por afrouxamento de terminais, que resultaram em elevações térmicas de até 30 °C nos pontos de contato. O sistema identificou com eficiência as anomalias térmicas e demonstrou sua viabilidade como alternativa econômica para aplicações em manutenção preditiva e preventiva.*

*Palavras-chave: termografia, manutenção preditiva, detecção de falhas, ESP32, MLX90640.*

*ABSTRACT - This work presents the development of a low-cost thermographic system for the continuous monitoring of electrical components. The prototype was built using the MLX90640BAA sensor integrated with an ESP32 microcontroller and validated on a test bench with three single-pole circuit breakers under different load conditions. During testing, failures were simulated by loosening terminals, which resulted in temperature increases of up to at the contact points. The system efficiently identified thermal anomalies and demonstrated its feasibility as an economical alternative for predictive and preventive maintenance applications.*

Keywords: Thermography; Predictive maintenance; Continuous monitoring; Operational efficiency.

## 1 INTRODUÇÃO

A termografia consolidou-se como uma ferramenta fundamental para a manutenção preditiva de sistemas elétricos, permitindo a avaliação de condições operacionais sem contato físico e sem interrupção do funcionamento dos equipamentos (JAFFERY, 2014). Essa

tecnologia possibilita o monitoramento térmico e a identificação precoce de anomalias, reduzindo riscos de falhas e aumentando a confiabilidade das instalações (SILVA, 2021).

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento e calibração de um sistema termográfico de baixo custo, voltado à detecção automática de falhas em componentes elétricos. Foram realizados testes experimentais para o levantamento de padrões térmicos e validação das leituras, utilizando diferentes componentes e condições de carga. O sistema permite identificar variações térmicas anormais e localizar com precisão pontos críticos de aquecimento.

Por fim, este estudo demonstra o potencial da integração entre termografia e análise computacional para o aprimoramento da manutenção preditiva, contribuindo para maior eficiência operacional e redução de custos decorrentes de paradas não programadas.

# 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa, de natureza experimental, analisou falhas em componentes elétricos por meio de monitoramento termográfico, visando identificar aquecimentos anormais e padrões de falha. O sistema de medição de temperatura é composto por sensor MLX90640BAA associado a um microcontrolador ESP32, responsáveis pela coleta e transmissão dos dados térmicos. Após calibração, os testes foram conduzidos em uma bancada com três disjuntores monofásicos espaçados 8 cm, garantindo maior precisão nas medições. O conjunto de algoritmos desenvolvido, foram implementados no programa Microsoft Excel que possibilitou a aferição da assertividade do sistema desenvolvido no processo de detecção de mau contato em conexões elétricas, vale destacar que para os testes em questão foi desenvolvido um protótipo para controle da temperatura ambiente e geração de corrente elétrica.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item foram apresentadas as descrições do desenvolvimento realizado neste trabalho.

## 3.1 Desenvolvimento de sistema de medição termográfica

O sistema de medição foi desenvolvido com foco em baixo custo e bom desempenho. Utilizou-se o microcontrolador ESP32 (modelo WROOM32) e o sensor termográfico MLX90640BAA, que fornece uma matriz de 32×24 pixels via protocolo I²C, permitindo o

monitoramento térmico em tempo real. Também foram integrados sensores de corrente elétrica e temperatura ambiente (AHT10) para correlação dos dados durante os testes.

## 3.2 Definição do conjunto de algoritmos para identificação de falhas

Nos itens descritos a seguir foram apresentados a seguir foram descrito o processo para desenvolvimento do conjunto de algoritmos para identificação sobre aquecimento dos contatos elétricos.

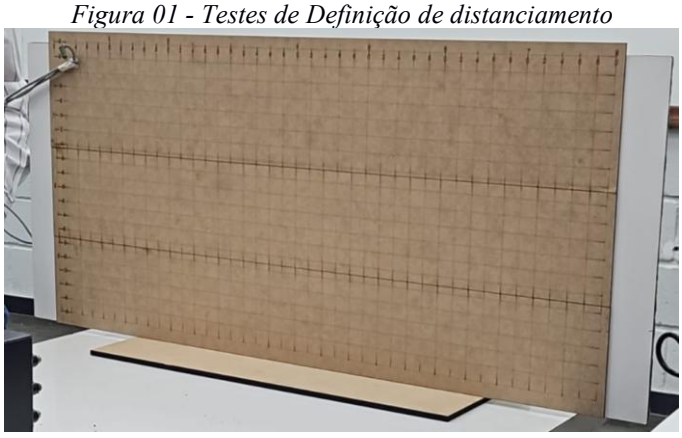
### a) Procedimentos para determinação do padrão de comportamento térmico

A determinação do padrão de comportamento térmico constituiu-se em uma etapa fundamental da pesquisa, pois definem o comportamento da temperatura em diversas condições operacionais. Tais informações foram cruciais para a subsequente definição e execução dos testes de falhas propostos neste trabalho.

- **Definição da distância do sistema de sensoriamento de temperatura**

Para a definição do protocolo ideal de medição de falhas, procedeu-se à realização de um estudo comparativo com base em três ensaios distintos de aquisição termográfica, variando-se a distância entre o sensor e o equipamento elétrico inspecionado. As distâncias avaliadas foram de 50, 30 e 20 cm, a figura 01 ilustra tal procedimento.

*Figura 01 - Testes de Definição de distanciamento*



A análise dos resultados demonstrou que a distância de 20 cm proporcionou a maior resolução e consequentemente, a maior precisão e assertividade na detecção e na delimitação

da falha no componente, portanto, tal valor foi estabelecido como a distância operacional de referência para todos os testes de falhas realizados no escopo deste trabalho.

- **Definição da área do sensoriamento de temperatura**

Nesta fase foi necessário determinar através de levantamento (laboratório ou campo) a área da irradiação temperatura de cada conexão elétrica a ser analisada, vale citar que o processo é de suma importância para processo em questão e que tal parâmetro é denominado como $A_{sens}$.

- **Definição da metodologia para determinar as faixas para escalonamento das variáveis de análise (temperatura ambiente e corrente elétrica)**

Este tipo de análise é realizado através de comparativo entre padrões, para tanto foram primeiramente definidas as variáveis que influenciam diretamente no comportamento da temperatura (corrente elétrica e temperatura ambiente) a metodologia para isso é apresentado a seguir

O procedimento para estabelecer a temperatura ambiente inicial começa com a definição da Faixa de Temperatura $FT_{amb}$ que será utilizada pelo usuário (por exemplo, 10 - 25°C), dependendo do local do equipamento. Em seguida, é preciso definir o Número de Intervalos $NI_{amb}$ que deve ser baseado na análise de dados anteriores (nos testes realizados, foram escolhidos cinco intervalos). A formulação do intervalo $IE_{amb}$ para o escalonamento é calculada através da equação (1).

$$IE_{amb} = \frac{FT_{amb}}{NI_{amb}} \quad (1)$$

Onde:

$IE_{amb} = Intervalo\ de\ Temperatura\ ambiente\ adotado$ ℃;

$FT_{amb} = Faixa\ de\ Temperatura\ ambiente\ adotada$ ℃;

$NI_{amb} = Número\ de\ Intervalos\ da\ Temperatura\ ambiente.$

Em relação a corrente elétrica o procedimento é análogo, onde são estabelecidas Faixa de operação típica $FT_{cor}$ que será utilizada pelo usuário (por exemplo, 10 – 40A) e o Número de Intervalos $NI_{cor}$ que deve ser baseado na análise de dados anteriores (nos testes realizados,

foram escolhidos cinco intervalos). A formulação do intervalo $IE_{cor}$ para o escalonamento é determinada pela equação (2).

$$IE_{cor} = \frac{FT_{cor}}{NI_{cor}} \quad (2)$$

Onde:

$IE_{cor} = Intervalo\ da\ corrente\ elétrica\ adotado$ ℃;

$FT_{cor} = Faixa\ de\ corrente\ elétrica\ adotada$ ℃;

$NI_{cor} = Número\ de\ Intervalos\ de\ corrente\ elétrica$ .

- **Definição dos padrões do padrão térmico**

Determinadas as faixas de corrente elétrica e temperatura ambiente, são compostos os casos típicos combinados as faixas descritas no item anterior, exemplo (caso 03 – Corrente Elétrica 22 – 25 A e a Temperatura Ambiente 20 – 25°C), para cada configuração é realizado um número de ensaios $NE_{padrão}$ considerando que as conexões estão perfeitas, sendo através dos mesmos é determinado a temperatura máxima registradas em cada ponto de medição $T_{mMáxima}$. Em cada valor é adicionado um percentual $VP_{máximo}$ para criar uma faixa que o usuário define como situações normais, vale destacar que tal temperatura resultante foi denominada com $T_{Máxima}$.

**b) Algoritmos para determinação dos desvios de temperatura de cada Pixels**

Para a realização do processo proposto, foi analisado o pixel de forma individual. Essa abordagem permitiu detectar variações sutis de temperatura, identificar pontos quentes e avaliar o gradiente térmico em áreas críticas, possibilitando a determinação de possíveis falhas por sobreaquecimento ou mal contato, a equação (3) descreve a técnica adotada.

$$V_{Desvio} = \frac{Vm_{an} - T_{Máxima}}{(T_{Máxima} - T_{mMáxima})} \quad (3)$$

*Onde:*

$T_{Máxima} = Temperatura\ máxima$

$T_{mMáxima} = Temperatura\ máxima\ medida$

$V_{Desvio} = Desvio\ da\ temperatura$

$Vm_{an} = Temperatura\ máxima\ da\ amostra\ analisada$

Vale ressaltar que o Valor analisado $Vm_{an}$ for menor que a Temperatura Máxima $T_{Máxima}$ o resultado do desvio será nulo.

### c) Classificação dos valores dos desvios medidos

Com a finalidade de classificar os desvios $V_{Desvio}$ obtido, foi associado a tais valores um Fator de Ponderação $FP_{desvio}$ pelo usuário, vale salientar que, de forma geral o valor deve ser progressivo em razão do maior valor do desvio e que o sistema tem por objetivo principal determinar um fator para aferir a criticidade da elevação de temperatura em determinada área $A_{sens}$, na tabela 01 é ilustrado os parâmetros adotados no trabalho.

*Tabela 01 – Exemplo da Classificação dos Desvios*

| Desvios $V_{Desvio}$ | | | Classificação | Fator Ponderação $FP_{desvio}$ |
|---|---|---|---|---|
| 0,0 | ≥ | 1,0 | Risco Baixo | 0,5 |
| 1,0 | ≥ | 2,0 | Risco Médio | 1,0 |
| 2,0 | ≥ | 4,0 | Risco Alto | 4,0 |
| 4,0 | ≥ | ∞ | Risco Extremo | 8,0 |

No exemplo apresentado, foi adota o seguinte critério de escolha.

- **Baixo desvio:** pequenas variações dentro da faixa aceitável;
- **Médio desvio:** indica início de instabilidade térmica;
- **Alto desvio:** representa condição de alerta para possível falha;
- **Desvio extremo:** indica falha crítica ou anomalia iminente.

### d) Identificação de Sobre aquecimento de Contato

Com a definição dos Fatores $FP_{desvio}$, a cada pixel, o sistema realizará a contabilização de tais índices em uma determinada Área $A_{sens}$ o resultado da somatória é denominado como fator de falha $FF_{total}$ , o maior valor determina o ponto de falha.

## 3.3 Criação de estrutura para realização de testes

Foi desenvolvida uma estrutura com enclausuramento do sensor e do disjuntor, reduzindo dispersões térmicas e definindo a distância ideal para medições. O sistema inclui

circuito com ESP32, barramentos SDA e SCL, e monitor serial para análise gráfica. O processamento dos dados foi feito em C++, considerando comunicação e amostragem.

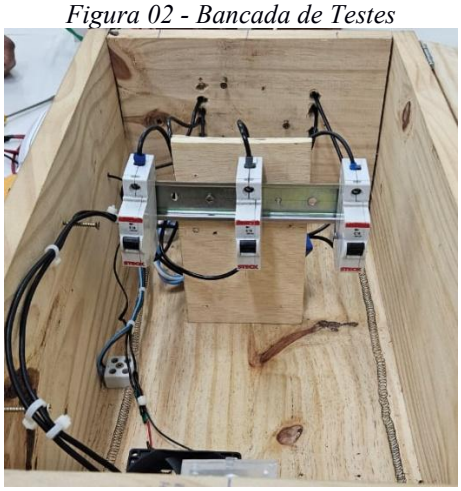
**a) Definição do equipamento para construção do Protótipo para os testes**

Utilizaram-se disjuntores unipolares de 20A, condutores variados, fonte de corrente trifásica de até 50A e caixa de madeira com resistores para controle térmico.

**b) Montagem do Protótipo para os testes**

O protótipo integra disjuntor, cabos e sensores em estrutura que permite controle da temperatura ambiente, conforme apresentado na Figura 02.

*Figura 02 - Bancada de Testes*



**c) Desenvolvimento para Aquisição e Tratamento dos Dados**

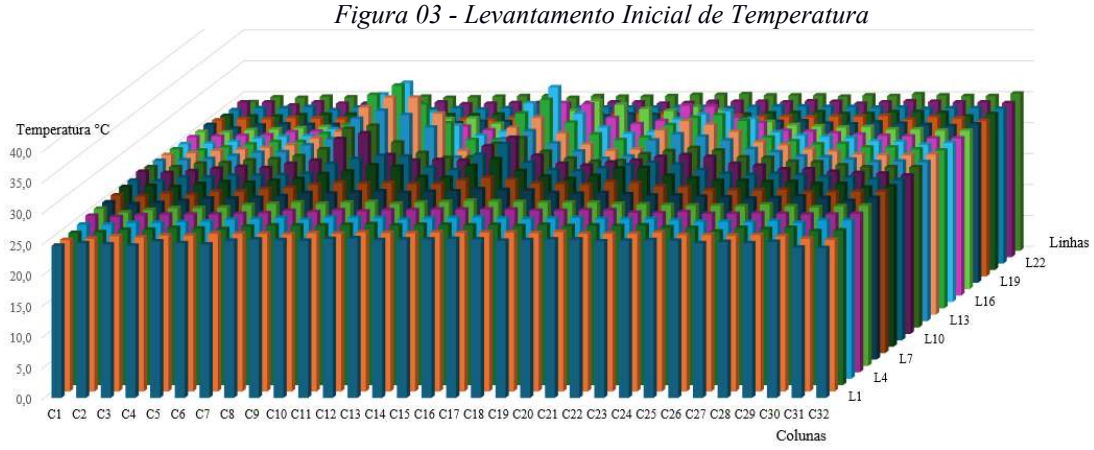
Os dados obtidos pela câmera termográfica foram exportados em formato CSV, possibilitando a leitura e o processamento no Microsoft Excel. O software foi utilizado como ferramenta de apoio para a interpretação dos resultados, permitindo a aplicação de fórmulas comparativas e a criação de modelos de correlação térmica.

**d) Testes Iniciais de Leitura de Temperatura**

Ensaios preliminares foram realizados para calibrar os sensores e validar o método de aquisição de dados, com ajustes de sensibilidade e comparação com valores térmicos de

referência. A análise dos padrões térmicos permitiu otimizar a distância de medição, obtendo precisão satisfatória nas leituras, um dos registros iniciais foi descrito na figura 03, na mesma é possível o comportamento da temperatura em cada pixel e que o sistema capta a imagem através de 32 colunas por 24 linhas, ou seja, a figura é representada por 768 registros térmicos.

*Figura 03 - Levantamento Inicial de Temperatura*

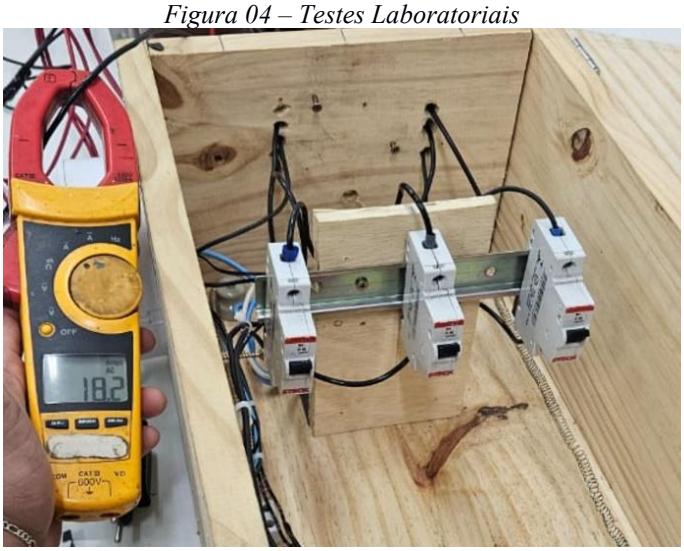



Os ensaios realizados permitiram identificar pontos críticos em componentes elétricos. Simulações de falhas, como o afrouxamento de terminais e a alteração dos valores da corrente e temperatura ambiente, foram conduzidas para observar o comportamento térmicos dos contatos do disjuntor. Através da matriz de temperatura obtida, foi possível quantificar e localizar as anomalias térmicas associadas a essas condições.

## 3.4 Configurações Utilizadas nos Testes em Laboratório

Os testes apresentados neste documento foram configurados com corrente elétrica variando entre 17,5 e 18,5A e temperatura ambiente variando entre 24 e 28°C, na figura 04 é ilustrado o momento inicial do processo.

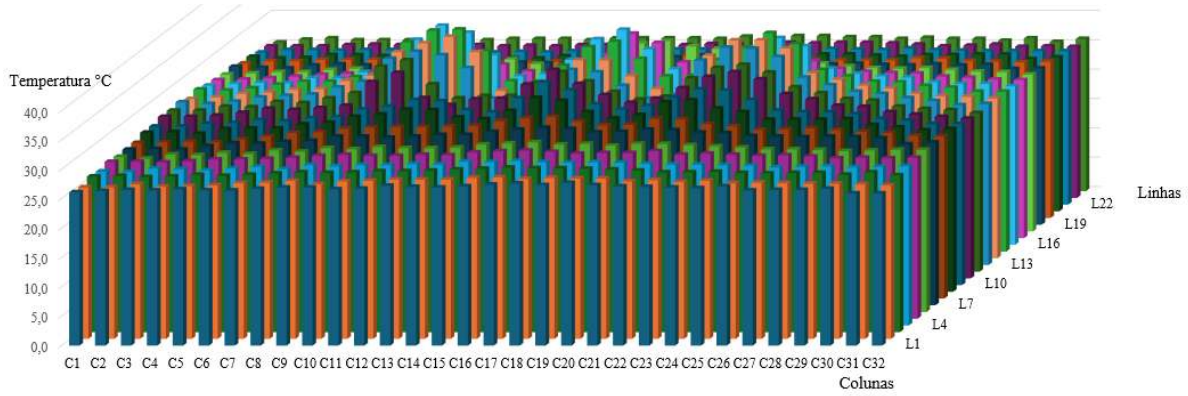
*Figura 04 – Testes Laboratoriais*



## 3.5 Determinação dos valores máximos de temperatura

Nestes testes foram realizadas cinco medições de temperatura, vale destacar que considerando os valores já estabilizados e se utilizou o processo citado anteriormente, na figura 05 é possível verificar o comportamento de tal parâmetro considerando $VP_{máximo} = 5\%$.

*Figura 05 - Padrão Obtido de Temperatura*




## 3.6 Simulação de falha

Para simulação de falha foi afrouxado o parafuso de fixação do condutor no disjuntor para provocar de forma propositalmente uma falha, vale considerar que em todos os seis contatos foi realizado a movimentação em ¾ volta, tal procedimento elevou em até 30°C em alguns pontos medidos.

## 3.7 Resultados Obtidos

Os resultados dos desvios do caso exemplificado, foram descritos na figura 06, é possível verificar que o mau contato provocou um aumento de temperatura generalizado.

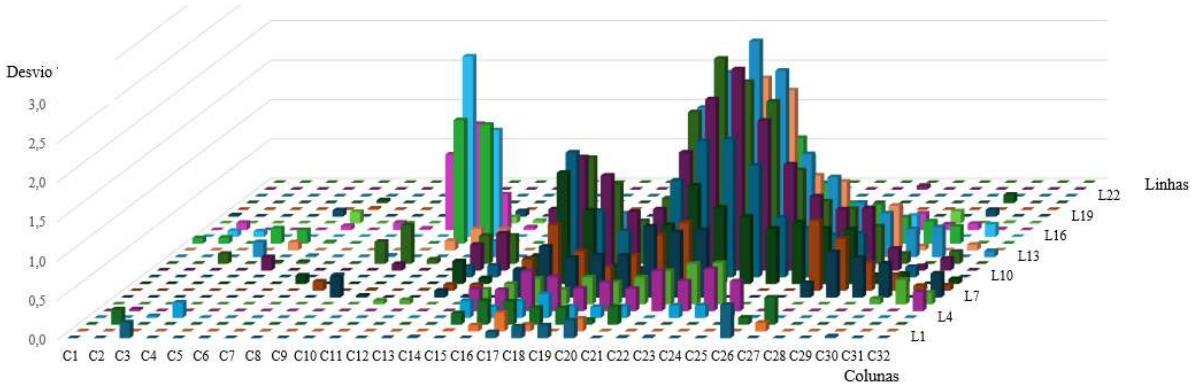



*Figura 06 - Levantamento dos Desvios de Temperatura*

Considerando que no caso existem seis Áreas $A_{sens} = 6$ (seis contatos) e que foram adotados os valores da Tabela 01, o resultado indica sobre aquecimento no contato da direita superior, pois o valor do fator de falha $FF_{total} = 49$ superior aos demais como ilustra a figura 07.

*Figura 7 - Processo Final de Detecção de Falha*

| Contato Esquerdo Superior | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0,50 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,50 | 0,00 | 0,50 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 0,50 |
| 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,00 | 0,50 |
| 0,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 |
| Linha = 16 / Coluna = 11 | | | | |
| Celula M13 | | | | |
| **Fator de Falha** | | | **8,0** | |

| Contato Centro Superior | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| 0,00 | 0,50 | 1,00 | 0,50 | 0,50 |
| 0,00 | 0,50 | 1,00 | 0,50 | 0,50 |
| 0,50 | 0,50 | 1,00 | 1,00 | 0,50 |
| 0,50 | 0,50 | 1,00 | 1,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| Linha = 16 / Coluna = 17 | | | | |
| Celula S13 | | | | |
| **Fator de Falha** | | | **17,5** | |

| Contato Direito Superior | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,00 | 0,00 |
| 0,50 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,50 | 1,00 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,50 |
| 1,00 | 4,00 | 4,00 | 1,00 | 1,00 |
| 1,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 1,00 |
| 1,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 1,00 |
| Linha = 16 / Coluna = 23 | | | | |
| Celula Y13 | | | | |
| **Fator de Falha** | | | **49,0** | |

| Contato Esquerdo Inferior | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 4,00 | 1,00 | 0,00 |
| 0,50 | 0,50 | 1,00 | 0,50 | 0,50 |
| 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,00 |
| Linha = 10 / Coluna = 11 | | | | |
| Celula Y19 | | | | |
| **Fator de Falha** | | | **16,0** | |

| Contato Centro Inferior | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Linha = 10 / Coluna = 17 | | | | |
| Celula Y19 | | | | |
| **Fator de Falha** | | | **4,0** | |

| Contato Direito Inferior | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 1,00 |
| 1,00 | 1,00 | 4,00 | 4,00 | 0,50 |
| 0,50 | 0,50 | 1,00 | 1,00 | 0,50 |
| 0,50 | 0,50 | 0,50 | 1,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,50 | 0,00 | 0,50 |
| 0,00 | 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,00 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Linha = 10 / Coluna = 23 | | | | |
| Celula Y19 | | | | |
| **Fator de Falha** | | | **33,0** | |

Vale destacar que, em todos os casos simulados foram verificadas a detecção da falha, demonstrando a uma elevada assertividade, no processo de identificação do defeito em questão.

# 4 CONCLUSÃO

O estudo comprovou a eficácia do monitoramento termográfico na detecção precoce de falhas em componentes elétricos, identificando aquecimentos anômalos causados por conexões frouxas e sobrecarga de corrente. Apesar das limitações de resolução do sensor, o sistema mostrou-se viável para monitoramento contínuo, validando sua aplicação em manutenção preditiva e preventiva.

# 5 REFERÊNCIAS

JAFFERY, Z. A.; DUBEY, A. K. Design of early fault detection technique for electrical assets using infrared thermograms. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 63, p. 753-759, 2014.

SILVA, Alison Candido da et al. Análise de equipamentos por termografia infravermelha. 2021.