



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**

**CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BRUNO ALMEIDA DE SOUZA**

**Monitoramento e Diagnóstico de Isoladores Poliméricos  
Utilizando Processamento Digital de Imagens Termográficas**

CAMPINA GRANDE, 19 FEVEREIRO DE 2016.

**BRUNO ALMEIDA DE SOUZA**

**Monitoramento e Diagnóstico de Isoladores Poliméricos  
Utilizando Processamento Digital de Imagens Termográficas**

*Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande em cumprimento às exigências do Programa de  
Mestrado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

CAMPINA GRANDE, 19 DE FEVEREIRO DE 2016.

*Dedico esse trabalho a Deus, meus pais  
e minha esposa que sempre estão  
comigo.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me dar a força para seguir em frente, por mostrar o caminho a seguir e nos momentos de dificuldade ser bondoso iluminando minha vida.

Aos meus pais que são exemplos de trabalho e persistência do bem, sempre mostrando que a família vem sempre a frente, sendo um porto seguro para os momentos difíceis e um sorriso de amor nos momentos felizes.

À Gislânia, meu amor, minha esposa, que se mostra sempre uma guerreira, a pessoa mais parecida comigo que conheci na vida, sempre um poço infinito de carinho e apoio. Sempre com um sorriso dizendo que tudo vai dar certo.

Ao professor Edson Guedes por abrir as portas da UFCG, ajudando-me em todos os momentos, orientando-me sempre pelo melhor caminho, mostrando a satisfação de fazer parte do crescimento de seus alunos. Um exemplo de professor dedicado que ama o que faz, espelho para aqueles que querem seguir na vida acadêmica.

À amiga Camila por me escolher participar de um grupo tão enriquecedor de conhecimentos, e por me auxiliar nos horários complicados. Antonio Neto obrigado pela ajuda fundamental, sempre com paciência e com um sorriso no rosto e Pedro pela importante ajuda, sempre fazendo as coisas parecerem mais simples, à Yorkismar por ajudar nos experimentos

Aos amigos que me ajudaram para que este trabalho seja realizado, Marconni, Marcus Tulio, Renata que ficaram dia e noite realizando a montagem do experimento e tendo paciência para esperar a estabilidade térmica dos isoladores, tornando as medições mais divertidas.

Agradeço aos demais amigos sem citar nomes que incentivaram à realização deste trabalho, e para sua conclusão.

Agradeço à CHESF pelo fornecimento dos isoladores poliméricos, objetos dos testes realizados, sem os quais não seria possível este trabalho.

A TODOS meu MUITO OBRIGADO, que Deus possa iluminar a vida de todos dando muita saúde, paz e amor.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é propor uma técnica de classificação de isoladores poliméricos que possibilite a recomendação do seu estado de degradação em operação, de modo a se determinar o momento mais adequado para realização de manutenções (trocas), conseqüentemente, contribuir para a redução das interrupções. A técnica se baseia na análise da radiação infravermelha (IF) emitida pelos isoladores ensaiados. Foram utilizados isoladores poliméricos de 230 kV com diferentes níveis de degradação como objetos de teste. As imagens IF obtidas durante os ensaios foram submetidas a um processamento de imagens utilizando o tipo de imagem RGB, de modo a minimizar os ruídos existentes. Uma rede neuronal para classificação do estado de degradação dos isoladores poliméricos foi proposta. As entradas da rede são as variações de temperaturas no corpo do isolador e temperatura ambiente, obtidas a partir da medição da RIF. A saída de rede foi o grau de criticidade do estado de degradação dos isoladores. Os resultados evidenciam a eficiência da técnica no auxílio à tomada de decisões, quanto à necessidade de substituição ou não dos isoladores. Enfatiza-se que isoladamente a técnica de medição da radiação infravermelha, por termovisão não é suficiente, para o diagnóstico de isoladores, contudo é essencial para diagnosticar falhas em isoladores poliméricos.

Palavras-chave: isoladores poliméricos, processamento digital de imagens, degradação, RIF, inspeção, rede neuronal artificial, termovisão.

## ABSTRACT

The objective of this work is to propose a polymeric insulators classification technique that allows the recommendation of its state of degradation in operation, in order to determine the most appropriate time to perform maintenance (exchanges), thus contributing to the reduction of interruptions . The technique relies on analysis of the infrared radiation (IF) emitted by the tested insulators. Polymeric insulators 230 kV were used with varying levels of degradation as test objects. The IF images obtained during the test were subjected to image processing using the RGB type image in order to minimize the existing noise. A neural network to classify the state of degradation of polymeric insulators was proposed. The network entries are the variations in temperature in the body of the insulator and temperature obtained from the measurement of the RIF. The network output was the degree of practicality the state of degradation of the insulators. The results show the technical efficiency in aid to decision-making, the need to replace or not the insulators. It is emphasized that the isolation technique of measuring infrared radiation, thermal imaging is not sufficient for the diagnosis of insulators, however it is essential to diagnose faults on polymeric insulators.

Keywords: polymeric insulators, digital image processing, degradation, RIF, inspection, artificial neural network, thermal imaging.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico ressaltando o número de registros para cada tipo de falha dos isoladores poliméricos. ....	6
Figura 2 – Imagens dos primeiros isoladores utilizados.....	7
Figura 3 – Diagrama com os elementos de um isolador polimérico. ....	8
Figura 4 – Fotografia de um isolador, caso de branqueamento do isolador polimérico com especial incidência em uma das faces, classificação “A”.....	10
Figura 5 - Exemplo de mudança de cor do revestimento de um isolador polimérico. ...	10
Figura 6 - Exemplo de fissuras nas abas do revestimento.....	11
Figura 7 – Fotografia com exemplo de fissuras nas abas do revestimento. ....	12
Figura 8 - Fotografia com exemplos de escamação avançada, nível C (esquerda) e ligeira nível A (direita). ....	12
Figura 9 - Fotografia de uma região de um isolador com ocorrência de erosão incipiente em uma aba nas proximidades do terminal metálico.....	13
Figura 10 - Fotografia expondo a deformação de abas com formas onduladas. ....	13
Figura 11 - Imagem do ângulo de contato formado por uma gota de água em uma superfície hidrofóbica. ....	14
Figura 12 - Fotografia de saias de Isolador polimérico e os vários níveis de envelhecimento da superfície hidrofóbica. ....	15
Figura 13 - Fotografia da lavagem de isolador com linha viva, sistema convencional com robô instalado em um guindauto de um caminhão. ....	16
Figura 14 - Isolador polimérico a) isolador com fratura frágil, b) descargas internas, c) excesso de carga mecânica. ....	18
Figura 15 - Fotografia de saias de isolador polimérico. a) formação de uma película de água na superfície b) formação de pequenas gotas na superfície do material, indicando uma boa hidrofobicidade. ....	19
Figura 16 – Fotografias de câmeras térmicas com sua evolução, a partir da década de 70 até os nossos dias.....	22
Figura 17 – Imagem de um termograma exibindo um isolador polimérico utilizados no experimento. ....	24
Figura 18 - Diagrama esquemático das etapas do procedimento digital de imagens. ....	26
Figura 19 - Processo de segmentação com a conversão RGB para HSI. (a) Imagem RGB, (b) Tonalidade, (c) Saturação, (d) Intensidade. ....	28
Figura 20 – Imagem da estrutura de um neurônio artificial. ....	29

Figura 21 - Fotografia do lote de 17 isoladores, dos quais serão escolhidos oito para os ensaios. ....	38
Figura 22 – Fotografia de um isolador polimérico utilizado no experimento. ....	39
Figura 23 – Imagem da representação gráfica do isolador de 230 kV a ser utilizado nos ensaios, juntamente com suas dimensões. ....	39
Figura 24 - Fluxograma do método de classificação do grau de degradação dos isoladores poliméricos. ....	40
Figura 25 - (a) Fotografia do isolador 12, (b) núcleo exposto do isolador 10 e (c) pino com corrosão bem acentuada no isolador 14. ....	43
Figura 26 - Fotografia do transformador a ser utilizado nos ensaios. ....	45
Figura 27 – Imagem da vista lateral da montagem experimental do conjunto mísula isolador (a), fotografia da estrutura já montada para o experimento (b). ....	46
Figura 28 – Fotografia da plataforma onde foram realizadas as medições. ....	46
Figura 29 – Imagem do formato da distribuição das plataformas separadas 120° de forma que se consiga ter uma visão completa em torno do isolador. ....	47
Figura 30 – Imagem do diagrama esquemático da montagem do experimento. ....	47
Figura 31 - Fotografia do arranjo experimental. ....	48
Figura 32 – Fotografia do termohigrômetro utilizado para medição da umidade e temperatura ambiente. ....	49
Figura 33 - Fluxograma do processamento de imagem. ....	50
Figura 34 - Imagem capturada pelo termovisor. ....	50
Figura 35 - Imagem capturada no software FLIR QuickReport, geração da matriz de pontos de temperatura. ....	51
Figura 36 - Imagem após o primeiro processamento, com os cortes horizontais e verticais. ....	52
Figura 37 – Imagem com os quatro pontos na imagem selecionados para eliminar os ruídos da imagem. ....	52
Figura 38 - Exemplo de saída de dados utilizando o critério 1. ....	53
Figura 39 - Exemplo de saída de dados utilizando o critério 2. ....	54
Figura 40 - Exemplo de saída de dados utilizando o critério 3. ....	54
Figura 41 - Imagem após o processamento digital da imagem. ....	55
Figura 42 – Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 1. ....	59
Figura 43 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 8. ....	60
Figura 44 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 3. ....	61
Figura 45 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 7. ....	61



Figura 46 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 16. ....	62
Figura 47 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 5. ....	63
Figura 48 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 11. ....	63
Figura 49 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 10. ....	64
Figura 50 – Imagem do isolador 11, medição no lado 0°, área de medição de temperatura máxima e mínima da última saia ao anel equalizador. ....	65
Figura 51 – Imagem do isolador 11, medição no lado 120°, área de medição de temperatura máxima e mínima da última saia ao anel equalizador. ....	65
Figura 52 – Imagem do isolador 11, medição no lado 240°, área de medição de temperatura máxima e mínima da última saia ao anel equalizador. ....	66

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de intervenção de acordo com avaliações à localização e progressão da degradação / dano. ....	9
Tabela 2 - Critérios de avaliação. ....	25
Tabela 3 - Quadro resumo com os principais trabalhos desenvolvidos sobre os temas em estudo. ....	35
Tabela 4 - Pesos atribuídos aos aspectos físicos avaliados nos isoladores poliméricos. ....	41
Tabela 5 - Classificação dos isoladores a partir do seu índice de degradação, destacados em isoladores críticos, intermediários e bons. ....	44
Tabela 6 - Parâmetros de classificação dos isoladores poliméricos. ....	56
Tabela 7- Ranking do índice de qualidade. ....	57
Tabela 8 - Classificação do grau de criticidade dos isoladores por inspeção visual e após utilizar PDI e RNA. ....	59

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
ATH	Alumina Trihidratada
CH <sub>4</sub>	Metano
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
EPDM	Monômero de Etileno-propilenodieno
EPRI	Electrical Power Research Institute
FOV	Field of view
FPA	Focal plane array
FRP	Fiber glass reinforced plastic
IDI	Índice de Degradação dos Isoladores
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
RIF	Radiação Infravermelha
LAT	Laboratório de Alta Tensão
PDMS	Polidimetilsiloxano
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
RNA	Rede neuronal artificial
SiH <sub>4</sub>	Silano

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1.1 Objetivo geral .....	3
1.1.2 Objetivos Específicos .....	3
1.2 Organização do trabalho.....	4
2. Fundamentação Teórica.....	5
2.1 Histórico isoladores poliméricos .....	6
2.2 Características construtivas .....	8
2.3 Características da Borracha de Silicone .....	9
2.4 Vantagens dos isoladores poliméricos.....	13
2.5 Desvantagens dos isoladores poliméricos .....	17
2.6 Inspeções em isoladores .....	19
2.7 Termografia .....	21
2.7.1 Princípios da termografia.....	21
2.8 Processamento digital das imagens .....	26
2.8.1 Aquisição de Imagens Digitais .....	27
2.8.2 Pré-processamento.....	27
2.8.3 Segmentação.....	27
2.8.4 Pós-processamento .....	28
2.8.5 Extração de Atributos .....	28
2.9 Redes Neurais .....	28
3. Revisão Bibliográfica .....	30
4. Material e Métodos .....	38
4.1 Material.....	38
4.2 Métodos .....	40
4.2.1 Classificação dos Isoladores .....	40
4.2.2 Montagem do Arranjo Experimental.....	44
4.2.3 Ensaios .....	48

4.2.4 Banco de dados.....	49
4.2.5 Processamento das imagens .....	49
4.2.6 Rede neuronal desenvolvida.....	55
5. Resultados e Análises .....	57
6. Conclusão .....	67
6.1 Trabalhos futuros.....	67
Referências .....	69

# 1. INTRODUÇÃO

---

A eletricidade se tornou a principal fonte artificial de geração de luz, calor e força utilizada no mundo moderno. Atividades simples como assistir à televisão ou navegar na internet são possíveis porque a energia elétrica é distribuída por intermédio de circuitos até as casas, fábricas, supermercados, centros comerciais e uma infinidade de outros lugares que precisam da eletricidade para funcionar. Uma grande parte dos avanços tecnológicos que se alcançou se deve à energia elétrica.

Obtida a partir de vários outros tipos de energia, a eletricidade é transportada e chega aos consumidores do mundo inteiro por meio de sistemas elétricos, compostos de quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo.

As usinas de energia elétrica são, geralmente, construídas longe dos centros consumidores tais como comércios, residências e indústrias, por isso que a eletricidade produzida pelos geradores tem que ser conduzida por longas distâncias, em um sistema de transmissão (CAMPELLO, 2008).

Ao sair dos geradores, a eletricidade começa a ser transportada por cabos aéreos revestidos ou não por camadas isolantes, fixados em torres de metal por isoladores que dão sustentação mecânica aos cabos e impedem descargas elétricas ao solo. O conjunto formado por cabos, isoladores e torres é denominado de rede de transmissão.

As empresas concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica devem trabalhar de maneira preventiva de forma que interrupções não programadas no sistema elétrico sejam menos frequentes. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) na Resolução 63/2004 define metas bastante desafiadoras para as empresas e o não cumprimento dos índices de qualidade e continuidade são punidos com multas de valores elevados (ANEEL, 2015).

Para que as companhias elétricas possam atuar dentro deste novo cenário apresentado a partir da Resolução 63/2004, segundo Shinohara (2007) “tem-se como exemplo, uma linha de transmissão de energia elétrica, que ao ser projetada para atender um longo período de operação, agora, passa a ser de fundamental importância que os componentes vitais, os quais operam em condições de agressividade atmosférica e do

solo, sejam inspecionados periodicamente para avaliar se estão dentro dos padrões de qualidade adequados”.

Para assegurar a continuidade do suprimento de energia elétrica segundo Nigri (1999) “é importante monitorar os equipamentos do sistema elétrico para se antecipar possíveis falhas. Para o caso específico de linhas de transmissão, por exemplo, o desempenho das instalações está diretamente relacionado com o desempenho dos seus isoladores”.

Apesar do seu baixo custo, quando comparado a outros equipamentos de uma linha de transmissão, o isolador apresenta uma importância fundamental na linha, garantindo a correta operação do sistema elétrico. A princípio, poderia se pensar em deixar em segundo plano a sua inspeção e manutenção, substituindo-os sempre que necessário. Entretanto, a grande quantidade de isoladores presentes num sistema elétrico torna inviável economicamente a sua substituição indiscriminada, como também, determinar quando seria o momento ideal da substituição, tornando necessário um acompanhamento criterioso de sua operação no sistema elétrico a fim de se conseguir prolongar sua vida útil.

Uma correta inspeção e diagnóstico de defeitos em isoladores surge como uma necessidade real nos sistemas elétricos, pois, dessa forma, é possível acompanhar o seu nível de degradação e garantir a sua correta operação. Diversas são as técnicas atualmente desenvolvidas para a inspeção de isoladores. Entretanto, não existe ainda um consenso em relação a melhor técnica a ser aplicada, devido às diversas vantagens e desvantagens apresentadas por cada uma delas.

A partir das investigações das técnicas para previsão do final da vida útil de isoladores poliméricos, foi concluído por Neri (2005) que, “dentre outros resultados, que uma linha muito promissora de predição de envelhecimento consiste na aplicação da termografia (técnica em que as medições de temperatura são realizadas na faixa do espectro infravermelho)”.

Segundo Alvares (2008) “a termografia se destaca dos demais métodos devido à ausência de contato físico de instrumentos de medição com as instalações, além de evitar a interferência na produção, uma vez que o trabalho é realizado com os equipamentos em pleno funcionamento. Acrescenta-se também como vantagem a

possibilidade de realizar a inspeção em um número razoável de dispositivos em um curto período de tempo”.

No presente trabalho, são analisados isoladores poliméricos para linhas de transmissão de 230 kV que são retirados de linhas de transmissão no sistema da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF). Eles apresentam diferentes níveis de degradação e tempos de utilização.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Uma metodologia auxiliar de inspeção para o diagnóstico das condições operacionais dos isoladores poliméricos é proposta como objetivo desta dissertação. Para tanto, medições em laboratório, técnicas de processamento de imagens e inteligência artificial foram utilizadas. A metodologia a ser apresentada traz uma nova visão para aprimorar as técnicas de inspeção já existentes, centrada na manutenção preventiva.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Fazer uma classificação dos isoladores poliméricos com base em uma inspeção visual;
- Propor um arranjo experimental de uma linha de transmissão que coloque a medição em laboratório em condições próximas às medições em campo. Além disso, o arranjo deve possibilitar a termovisão dos isoladores poliméricos, utilizando, para tanto, uma câmera de detecção de radiação infravermelha (RIF);
- Realizar ensaios nos isoladores com tensão nominal;
- Elaborar um banco de dados para agrupamento das imagens termográfica capturadas nos ensaios;
- Fazer o processamento digital das imagens termográficas obtidas pelo termovisor para obtenção de uma matriz de dados, de modo que as variações de temperatura no corpo do isolador e as variações de temperatura do isolador com o meio ambiente sejam representadas;
- Fazer o treinamento da RNA de modo que identifique padrões de defeitos e classifique o estado de degradação dos isoladores poliméricos;

- Fazer uma comparação das análises feitas por inspeção visual e as realizadas pela técnica elaborada no presente trabalho de pesquisa (RIF, PDI e RNA).

## **1.2 Organização do trabalho**

O texto desta dissertação está dividido em seis capítulos, iniciando com a presente Introdução.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre os assuntos que são abordados neste trabalho. Dentre eles, os principais conceitos sobre os isoladores poliméricos, termografia, processamento de imagens e redes neurais artificiais.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica apresentando os trabalhos mais relevantes nas áreas de isoladores poliméricos, medição da RIF, processamento digital de imagens e redes neurais artificiais.

No Capítulo 4 são descritos materiais e métodos empregados nas medições em laboratório e processamento de imagens, com o objetivo de implementar uma RNA para a classificação dos isoladores poliméricos quanto à criticidade do seu estado de degradação.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados e análises da técnica proposta para classificação dos isoladores, tendo em vista os ensaios realizados para a medição das termografias, o uso de processamento digital da imagens e a aplicação de uma RNA.

No capítulo 6, as conclusões técnicas oriundas da pesquisa e propostas para a continuidade da pesquisa são apresentadas. Elas são decorrentes dos estudos, das revisões, dos resultados e das análises realizadas ao longo do mestrado.

Nas Referências são listados todos os trabalhos que auxiliaram na elaboração desta dissertação, fornecendo dados e conhecimentos importantes.



## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

Uma introdução sobre isoladores e sua importância no sistema de transmissão de energia elétrica é descrita neste capítulo, como também, a evolução dos isoladores, o processo de fabricação de isoladores poliméricos, as suas principais vantagens e desvantagens. Além disso, o capítulo abordará também a termovisão, o processamento digital de imagens e as redes neuronais artificiais.

A função do sistema de isolamento é segregar áreas com diferentes níveis de tensões, seja entre partes energizadas ou entre a parte energizada e a terra. Os isoladores presentes nas linhas de transmissão possuem além da função de isolamento, propriedades mecânicas que o permitem suportar os esforços produzidos pelos condutores (peso e tração), os efeitos da variação de temperatura, do curto-circuito e do vento (CAMPELLO, 2008).

Segundo Garcia (2003) “cerca de 60% dos desligamentos em linhas de transmissão com tensão maior que 230 kV devem-se às falhas com isoladores elétricos de vidro. Para linhas de transmissão com tensões inferiores a 230 kV tem-se que aproximadamente 45% dos desligamentos são provocados pelos isoladores de vidro”.

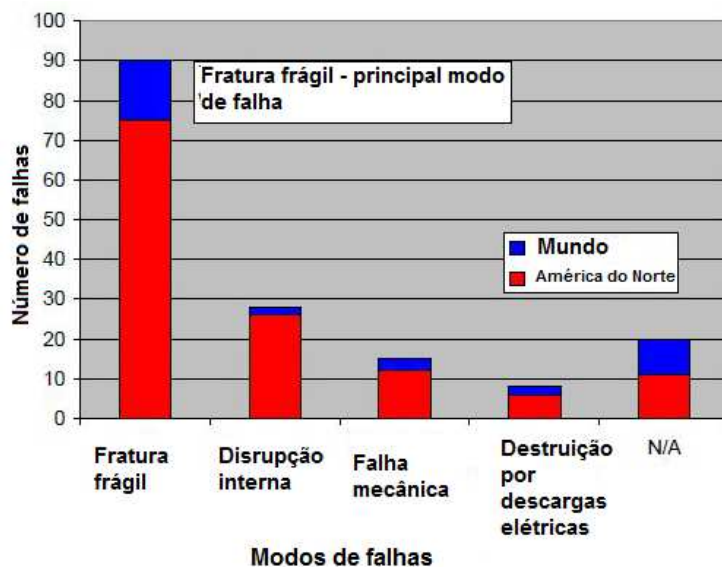
Para isoladores poliméricos existe bastante variação nos componentes de desligamentos de linhas de transmissão a depender do fabricante, poluição do ambiente, locais de instalações. A atribuição dos fatores que levam à falha dos isoladores poliméricos é um tanto quanto subjetiva, pois a maioria das vezes as companhias descartam a responsabilidade de danos na estrutura do isolador durante o processo de instalação, atribuindo-os para os fabricantes, apesar destes últimos, após investigação da falha, apontarem para condições deficientes de aplicação (EPRI - Electrical Power Research Institute, 2002).

Uma pesquisa a nível mundial foi realizada para identificar uma taxa de falha de isoladores poliméricos em diversos níveis de tensões, na pesquisa foi verificado que a taxa de falha de isoladores poliméricos é 1 a cada 65.500 exemplares vendidos no período de um ano, destes que falharam a maioria foram instalados em aplicações de suspensão. Os níveis de tensão que estavam instalados os isoladores que falharam foram 69 kV, 115-138 kV e 220-230 kV (EPRI, 2002).

No gráfico da Figura 1 de acordo com a Epri (2002) ressalta-se “o número de registros para cada tipo de falha dos isoladores poliméricos para uma pesquisa realizada em empresas de todo o mundo”. A parcela N/A corresponde a situações para as quais

não foi possível atribuir uma causa específica por falta de informação ou ainda por se encontrar em investigação. Note-se que o número de registros mundiais é reduzido, visto que a pesquisa incidiu predominantemente em empresas norte-americanas que sintetizaram as respostas das falhas dos isoladores poliméricos.

Figura 1 - Gráfico ressaltando o número de registros para cada tipo de falha dos isoladores poliméricos.



Fonte: Adaptado de Polymer Insulator Survey (2002).

## 2.1 Histórico dos isoladores poliméricos

Os primeiros isoladores começaram a ser construídos com madeira em 1839, com o avanço dos tempos novas tecnologias foram incorporadas e novos desenhos de isoladores foram criados, contemplando níveis de tensões cada vez mais altos (GORUR, 1999). Na Figura 2 são apresentadas imagens dos primeiros isoladores utilizados.

Figura 2 – Imagens dos primeiros isoladores utilizados.



Fonte: Janssen (2005 apud Ferreira, 2012).

Os isoladores poliméricos para aplicações exteriores se apresentaram comercialmente nos anos 60 e, desde então, foram vários os casos de aplicações a linhas de transmissão por todo o mundo. No período inicial, os processos de produção rudimentares e os tipos de materiais utilizados tornavam os isoladores suscetíveis a grande degradação, tanto por exigências mecânicas como elétricas. Conseqüentemente surgiram inúmeros relatos de falhas estruturais e de isolamento que comprometiam a estabilidade dos sistemas elétricos (QUEIRÓS, 2013).

Com a evolução dos materiais o desempenho encorajador dos materiais poliméricos conduziu a investigações de grande escala de forma a estender a sua duração média de vida acima dos 30 anos. A sua evolução consistiu no desenvolvimento e teste de vários materiais, projetos e métodos de produção, foram atingidos padrões elevados de confiança e de durabilidade, ultrapassando as dificuldades iniciais (QUEIRÓS, 2013).

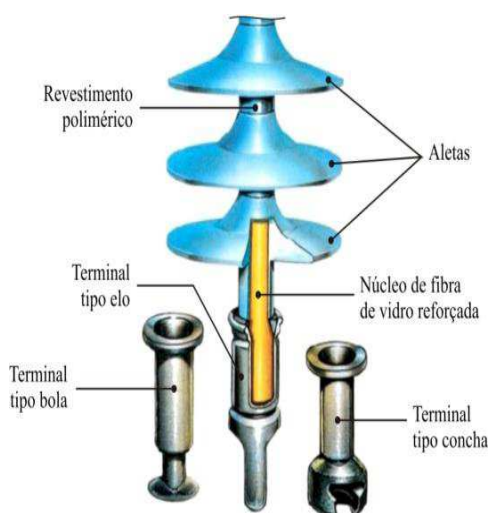
Os isoladores poliméricos gradualmente vêm substituindo seus similares de porcelana e vidro nas linhas de transmissão de energia. Dentre os principais materiais empregados na fabricação dos mesmos, destacam-se o EPDM (monômero de etileno-propileno) e a borracha de silicone. Nos últimos anos é possível notar a crescente tendência no emprego de isoladores poliméricos baseados na borracha de silicone, principalmente devido ao seu melhor desempenho na recuperação de sua característica hidrofóbica (GONZALÉZ, 2001).

## 2.2 Características construtivas

Os isoladores poliméricos alvo desta pesquisa são do tipo bastão, a sua fabricação é baseada no processo de injeção. O processo construtivo dos isoladores poliméricos do tipo bastão segundo Mobedjina, Johnnerfelt e Stenstrom (2006) “permitem a obtenção de produtos acabados com elevado grau de repetição”.

Usualmente um isolador polimérico tipo bastão é constituído por três partes fundamentais: o núcleo, os terminais de conexão e a superfície polimérica como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama com os elementos de um isolador polimérico.



Fonte: Roduflex (2004).

As principais características dos componentes do isolador são descritos a seguir:

**Núcleo:** constituído de fibra de vidro reforçada, sendo que o material empregado normalmente é uma fibra de vidro e uma resina epóxi como matriz. Possui como característica servir de matriz para a deposição da borracha de silicone durante o processo de injeção.

**Terminais de conexão:** normalmente são constituídas de aço forjado, alumínio ou outros materiais condutores e com boa resistência mecânica. Possui como característica principal servir de conexão e ancoragem entre a linha de transmissão de energia e a torre.

Superfície polimérica: a superfície polimérica é constituída de borracha de silicone, e ela é responsável principalmente pela isolação elétrica e proteção ao núcleo de FRP, contra intempéries.

## 2.3 Características da Borracha de Silicone

O revestimento exterior por materiais poliméricos têm como função principal proteger o núcleo dos mais variados impactos ambientais, minimizar as correntes de fuga, reduzir a probabilidade das descargas elétricas superficiais (flashover e backflashover), além de fornecer uma maior confiabilidade para condições de chuva e umidade.

O polímero aplicado na fabricação de isoladores deve ser capaz de resistir às condições meteorológicas sem comprometer as propriedades elétricas e mecânicas, ou seja, deve resistir às variações ocasionais de carga e temperaturas entre 40°C e 120°C, sem que se verifique envelhecimento precoce e espontâneo (QUEIRÓS, 2013).

Os estágios evolutivos da degradação dos isoladores poliméricos tem se mostrado em vários aspectos visuais. Baseado nos aspectos visuais a EPRI (Electrical Power Research Institute) apresentou uma tabela de classificação de prioridade de intervenção. A tabela está dividida em quatro níveis, resultante de avaliações à localização e progressão da degradação/dano. As classificações A e B, na Tabela 1, representam degradações incipientes. A recomendação do EPRI é o seu monitoramento. Os estágio evolutivos classificados como C e D são rotulados como dano, e requerem a substituição do equipamento (EPRI, 2002).

Tabela 1 - Classificação de intervenção de acordo com avaliações à localização e progressão da degradação / dano.

Prioridade de Manutenção	Definição	Ação
A	Bom ou como novo	Não necessita de intervenção
B	Pouco desgaste ou decadência	Monitorar evolução da degradação
C	Grau moderado de dano	Considerar substituição
D	Grau elevado de dano	Remover isolador de serviço

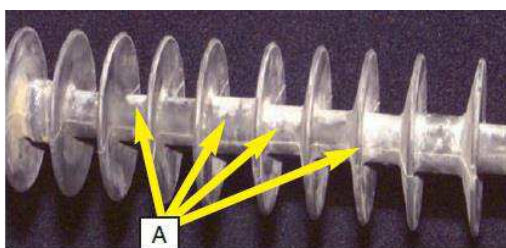
Fonte: Epri (2002).

Os mais importantes aspectos visuais que foram observados e classificados dentro dos estudos de isoladores são apresentados e discutidos a seguir.

- **Branqueamento**

O branqueamento ocorre devido ao aparecimento de pó branco na superfície do isolador. Geralmente a degradação não é homogênea, ocorre tanto nas abas como no núcleo. Ele, prevalece sobretudo perto dos terminais de ligação e do lado com maior incidência solar (QUEIRÓS, 2013). O branqueamento não representa risco ao funcionamento do equipamento e não são necessárias precauções especiais, logo possui uma classificação “A” de acordo com a Figura 4 (Field Guide, 2006).

Figura 4 – Fotografia de um isolador, caso de branqueamento do isolador polimérico com especial incidência em uma das faces, classificação “A”.



Fonte: Field Guide Visual Inspection of Polymer Insulators (2006).

- **Mudança de cor**

A mudança da cor base do revestimento pode ser causada pela oxidação, exposição à ultravioleta, contaminantes e/ou descargas parciais. Na Figura 5 é apresentada uma fotografia de um isolador com degradação tipo Mudança de cor (BURNHAM, 2008). Este tipo de degradação não representa perigo para o funcionamento estável do isolador. Contudo, como qualquer tipo de envelhecimento, há diminuição de algumas propriedades do material. A mudança de cor possui uma classificação A, de acordo com a Tabela 1 da Field Guide (2006).

Figura 5 - Exemplo de mudança de cor do revestimento de um isolador polimérico.



Fonte: Burnham (2008).

- **Fissuração**

A fissuração ocorre em isoladores poliméricos com baixa qualidade no seu processo industrial. As fissuras proporcionam rupturas das ligações químicas mais fracas do polímero e conseqüente propagação. O risco inerente a este fenômeno está diretamente relacionado com a profundidade das fissuras e local de sua ocorrência (BURNHAM, 2008). Assim sendo, este fenômeno pode ser classificado como nível B, se a fissuração ocorrer apenas nas abas, ou em casos com pouca profundidade no núcleo (Field Guide, 2006). Contudo, se existirem ocorrências de fissuras com profundidades superiores a 0,1 mm, a classificação da degradação corresponde a C ou D. Na Figura 6 é apresentada uma fotografia de um isolador polimérico com fissuras nas abas do revestimento (classificação B) e na mesma fotografia pode-se ver uma fissura no revestimento do núcleo, cujo estágio de degradação pode ser classificado como D.

Figura 6 - Exemplo de fissuras nas abas do revestimento.



- Fonte: Burnham (2008).

- **Trilhamento**

O trilhamento é caracterizado como uma atividade elétrica nos isolamentos. Assim, a ocorrência de micros fraturas na superfície de revestimento de forma dispersas, com aparência de rede e tendo profundidade baixa (limite de 0,1 mm), não representam perigo ao isolador. Assim sendo, este fenômeno pode ser classificado como nível “A” (Field Guide, 2006), ressalta-se que as fissuras não podem avançar na direção do núcleo. No seu artigo Burnham (2008) apresenta uma fotografia que bem caracteriza o trilhamento, na Figura 7 é exibida a fotografia.



Figura 7 – Fotografia com exemplo de fissuras nas abas do revestimento.

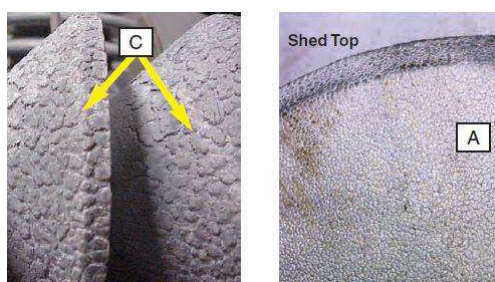


Fonte: Burnham (2008).

- **Escamação**

A degradação consiste na propagação generalizada dos fenômenos de quebra e fissuração do revestimento do isolador, que torna a superfície frágil ao toque. A escamação está limitada às primeiras gerações de isoladores poliméricos. O fenômeno da escamação era decorrente das técnicas pobres de fabricação que permitiam grandes perdas de material de preenchimento, quando sujeitas aos agentes ambientais. O risco à estabilidade do isolador é baixo, todavia, em casos de grande degradação, é aconselhável a substituição antecipada (QUEIRÓS, 2013). Na Figura 8 estão ilustrados dois tipos de textura da superfície resultantes de escamação, cada uma com diferentes níveis de prioridade de intervenção (Field Guide, 2006).

Figura 8 - Fotografia com exemplos de escamação avançada, nível C (esquerda) e ligeira nível A (direita).



Fonte: Field Guide Visual Inspection of Polymer Insulators (2006).

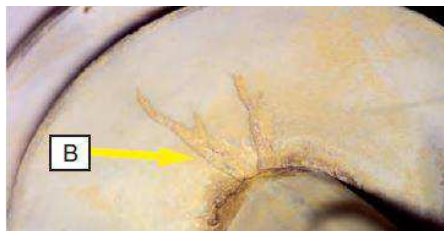
- **Erosão incipiente**

O fenômeno da erosão incipiente ocorre quando há perda irreversível de material composto na superfície do revestimento com penetrações menores a 0,1 mm, como pode ser visto na Figura 9. Esta degradação ocorre sobretudo nas proximidades dos terminais metálicos devido aos esforços elétricos provocados pelas altas concentrações



de campo elétrico. Na erosão incipiente pode ocorrer intensificação da erosão de forma acelerada, caso as condições de serviço sejam bastante severas. Neste caso a degradação é considerada com dano e é classificado como nível B no Field Guide (2006).

Figura 9 - Fotografia de uma região de um isolador com ocorrência de erosão incipiente em uma aba nas proximidades do terminal metálico.



Fonte: Field Guide Visual Inspection of Polymer Insulators (2006).

- **Ondulação das saias**

As saias podem adquirir forma ondulada quando sujeitas a temperaturas elevadas ou devido a condições incorretas de armazenamento/manuseamento. Esta modificação estrutural não apresenta riscos para o funcionamento normal do isolador, porém, o encurtamento da distância entre abas pode facilitar a ocorrência de descargas parciais entre elas. Na Figura 10 é exibida uma deformação das abas adquirindo forma ondulada.

Figura 10 - Fotografia expondo a deformação de abas com formas onduladas.



Fonte: Burnham (2008).

Além dos estágios evolutivos descritos acima, outra falha associada ao revestimento do isolador polimérico é perda de hidrofobicidade. A perda de hidrofobicidade não é, na maioria das vezes, visualmente diagnosticada, e devido a sua importância, ela será abordada no tópico de desvantagens dos isoladores poliméricos.

Algumas falhas nos isoladores poliméricos não estão associadas ao revestimento, são problemas associados aos defeitos internos. Para este tipo de falhas o uso da termografia tem auxiliado na identificação das falhas.

## 2.4 Vantagens dos isoladores poliméricos

O emprego de isoladores poliméricos nas linhas de transmissão vem crescendo a cada ano. Isto se deve ao fato destes materiais apresentarem inúmeras vantagens com relação aos isoladores cerâmicos. A seguir são relatadas as principais vantagens dos isoladores poliméricos, iniciando com a propriedade da hidrofobicidade.

- **Hidrofobicidade**

Uma das maiores vantagens dos isoladores poliméricos, em relação aos cerâmicos, é a capacidade de manter a sua hidrofobia, mesmo em ambientes poluídos, quando a hidrofobia é transmitida à camada de poluentes depositados na superfície do isolador. Young (1999) definiu a hidrofobia como “a propriedade que alguns materiais têm de repelir a água, evitando a formação de película de água”.

O termo “hidrofóbico” é referente às superfícies que têm aversão à água e, por definição, uma superfície hidrofóbica é aquela em que o ângulo de contato com a água é superior a  $90^\circ$ . Assim sendo, a hidrofobicidade de uma superfície é determinada pelo ângulo de contato: quanto maior o ângulo, maior a hidrofobicidade. Na Figura 11 tem-se o ângulo formado por uma gota de água em uma superfície hidrofóbica.

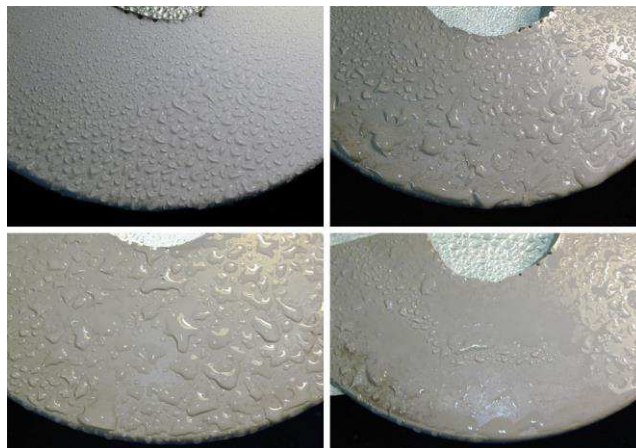
Figura 11 - Imagem do ângulo de contato formado por uma gota de água em uma superfície hidrofóbica.



Fonte: Sarkar (2010).

Adicionalmente, a Figura 12 exibe amostras de silicone nos vários estados evolutivos da sua hidrofobia. Os estados evolutivos foram obtidos pela degradação do silicone com o passar do tempo. A formação de pequenas bolhas na superfície do material, indica uma boa hidrofobicidade (YOUNG, 1999).

Figura 12 - Fotografia de saias de Isolador polimérico e os vários níveis de envelhecimento da superfície hidrofóbica.



Fonte: Young (1999).

- **Excelente desempenho sob poluição**

Os isoladores poliméricos também apresentam como vantagem o seu excelente desempenho sob poluição e devido ao seu excelente desempenho a sua aplicação, nessas condições, é altamente recomendada. Também em condições de poluição, a corrente de fuga nos isoladores poliméricos é menor quando se compara com os isoladores cerâmicos e o número de descargas superficiais (flashover) é menor. Isto se deve a propriedade da hidrofobicidade que mesmo em ambientes poluídos. Como a característica hidrofóbica dos isoladores poliméricos pode ser transferida à camada de poluição no decorrer do tempo, o que garante a manutenção da hidrofobicidade mesmo em ambientes poluídos, a necessidade de lavagens programadas é reduzida. Desta forma, a corrente de fuga é minimizada e consequentemente as perdas de energia (FERREIRA, 2007).

De maneira similar aos isoladores de vidro, quando instalados em ambientes poluídos, os isoladores poliméricos podem ser lavados sob alta pressão, sem riscos de danos na sua estrutura. Na Figura 13 é exibida uma fotografia de um processo de lavagem de cadeia de isoladores de vidro.

Figura 13 - Fotografia da lavagem de isolador com linha viva, sistema convencional com robô instalado em um guindauto de um caminhão.



Fonte: Sousa (2010).

- **Facilidade de manuseio e instalação**

O isolador polimérico apresenta dimensões reduzidas e massa aproximadamente 90% menor em comparação com os isoladores de vidro e porcelana. Estas propriedades permite uma maior facilidade no manuseio transporte e instalação, e o seu transporte são mais fáciis. , impactando na redução nos custos de mão de obra e de tempo para a sua instalação.

- **Resistência ao vandalismo**

Outra grande vantagem da aplicação de isoladores poliméricos é não ser atrativo ao vandalismo, quando se compara a sua utilização aos isoladores de vidros que são mais propensos a vandalismo. Nos isoladores poliméricos, quando da ação de vândalos, não ocorre mudança sonora ou física de grande impacto, mitigando a ação dos vândalos.

- **Vantagem ecológica**

O fato dos isoladores poliméricos serem materiais orgânicos permite a sua degradação do revestimento por parte de alguns agentes (UV, descargas elétricas), como também, possibilita a reciclagem dos componentes dos isoladores e sua reutilização para outros fins. Como eles não quebram, não contribuem para poluição do meio ambiente. Além disso, o perfil reduzido é esteticamente mais agradável (GUEDES, 2015).

- **Resistência ao fogo**

A integração de aditivos na formulação do polímero resulta numa defesa ativa da superfície do revestimento contra temperaturas superiores a 220°C devido à decomposição do composto de onde resulta a libertação de água e consequente arrefecimento (QUEIRÓS, 2013).

Em caso de incêndios das zonas circundantes, há uma segurança reforçada da estabilidade do isolador polimérico, para além da capacidade natural destes tipos de materiais suportarem temperaturas elevadas. As constantes de expansão térmica do corpo do isolador têm valores aproximados, o que resulta em maior robustez em casos de aumento da temperatura comparativamente aos cerâmicos. Contudo, em caso de incidência direta do fogo, o isolador será naturalmente carbonizado.

## **2.5 Desvantagens dos isoladores poliméricos**

Embora se tenha muitos benefícios com a utilização de isoladores poliméricos, o seu envelhecimento tende a ser um ponto crítico, principalmente, pela falta de técnicas confiáveis e universais de inspeção, monitoramento e diagnóstico. Os vários tipos de degradação apresentam locais ou regiões preferenciais, nos isoladores, para os diferentes defeitos/falhas, ou seja, para cada parte de um isolador polimérico existem degradações específicas, com diferentes graus de risco e necessidade de intervenção. A seguir, os tipos de falhas são relatados e comentados.

- **Difícil identificação de falhas internas**

As falhas em isoladores de vidro temperado pode provocar o seu estilhaçamento. Por outro lado, os isoladores poliméricos não apresentam muitas vezes indícios de que houve uma falha interna ou externa. Desta forma uma inspeção visual isolada pode levar a falso negativo ou a falso positivo na identificação de falhas em isoladores.

Para os isoladores poliméricos, a literatura ressalta os três tipos de falhas internas, descritos a seguir:

- a. *Fratura frágil* – é uma falha mecânica do núcleo de FRP por separação completa, em duas ou mais partes, de forma transversal, resultante da combinação de ataques químicos com a tensão mecânica exigida ao isolador em serviço (SCHMUCK e TOURREIL, 2003). Assim sendo, este fenômeno pode ser classificado como nível

D (Field Guide, 2006). Na Figura 14a é exibida uma fotografia exemplificando a fratura frágil.

- b. *Descarga interna* – é uma avaria elétrica que ocorre quando a umidade entra em contato com o núcleo de fibra de vidro. O contato proporciona a formação de um caminho condutor pelo interior do isolador por meio do aumento gradual de condutividade (QUEIRÓS, 2013). Devido aos riscos associados, este fenômeno pode ser classificado como nível D (Field Guide, 2006). Na Figura 14b é exibido um exemplo de um isolador polimérico que sofreu uma descarga interna.
- c. *Desacoplamento do núcleo* - a ligação entre o núcleo de fibra de vidro e os terminais metálicos deve assegurar a estabilidade do isolador e garantir coesão e distribuição dos esforços mecânicos exigidos. O aquecimento excessivo do núcleo FRP, a decomposição da matriz da resina e falta de compressão são exemplos de incertezas no processo de produção que, em combinação com cargas mecânicas, podem originar falhas de desacoplamento de núcleo, em serviço (BURNHAM, 2008). O desacoplamento do núcleo pode levar a queda física do condutor, assim sendo, este fenômeno pode ser classificado como nível D (Field Guide, 2006). Na Figura 14c é exibido um corte em um isolador que sofreu desacoplamento do núcleo.

Figura 14 - Isolador polimérico a) isolador com fratura frágil, b) descargas internas, c) excesso de carga mecânica.



Fonte: Field Guide Visual Inspection of Polymer Insulators (2006).

- **Menor resistência aos raios UV**

As radiações UV, em particular, são as principais responsáveis pela degradação do material polimérico, pois deterioram as estruturas químicas e mecânicas da superfície do material. As radiações UV provocam mudança de cor e podem comprometer suas propriedades dielétricas. Os isoladores poliméricos de uso externo, por estarem expostos às intempéries, estão sujeitos à influência da radiação UV da luz solar, capaz

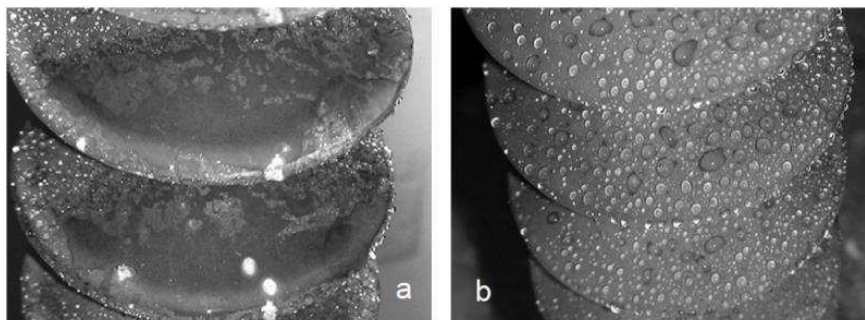
de degradar o revestimento à base de polímeros após longos períodos de exposição (GUEDES, 2015).

- **Perda de hidrofobia**

A perda de hidrofobia é um sinal claro de agressões ao revestimento do isolador, tanto por ações do meio ambiente como por atividades elétricas. Após períodos de repouso, parte do comportamento hidrofóbico pode ser recuperado, contudo, à medida que o isolador envelhece a sua capacidade de se regenerar é reduzida de forma gradual.

Um exemplo de perda de hidrofobicidade pode ser visto na Figura 15, em que se mostra fotografias de saias de isoladores poliméricos. Na Na Figura 15a é evidenciada formação de uma película de água na superfície (menor hidrofobicidade) e a Figura 15b se caracteriza pela formação de pequenas bolhas (maior hidrofobicidade).

Figura 15 - Fotografia de saias de isolador polimérico. a) formação de uma película de água na superfície b) formação de pequenas gotas na superfície do material, indicando uma boa hidrofobicidade.



Fonte: Zhao (2009).

## 2.6 Inspeções em isoladores

As inspeções em isoladores geralmente são rotineiras e acompanham o plano de inspeção das linhas de transmissão. Nestas inspeções são avaliadas a integridade e as condições de operação dos isoladores. Já o monitoramento, em geral, é realizado por análise térmica ou medição de corrente de fuga. Entretanto, não existe um procedimento padrão para a condução e análise dos resultados obtidos, normalmente quando alguma anormalidade é detectada, as empresas simplesmente substituem o isolador por um novo e não são feitos estudos adicionais para avaliar que tipo de problema ocorreu (QUEIRÓS, 2013).



As concessionárias, atualmente, utiliza-se de árias técnicas de análise do estado físico e dielétrico dos isoladores, nomeadamente:

- *Inspecção visual* — com auxílio de binóculos ou vigilância utilizando câmaras é possível determinar o estado da superfície do isolador, grau aparente de hidrofobia, grau de deposição de contaminação e ainda a exposição do núcleo dos isoladores poliméricos.
- *Câmeras ultravioletas* – a utilização de câmeras de radiação ultravioleta para medir a quantidade de descargas corona no corpo do isolador, detectando possíveis falhas associadas as fraturas frágeis, falhas em saias e trilhamentos (GUEDES, 2015).
- *Termografia* — As perfurações das saias, quebras, absorção de umidade, trilhamentos e ação de descargas parciais promovem o aquecimento local e pelo uso de câmaras de infravermelhos é detectada a variação de temperatura. Segundo Gubascki (2007) “o aparecimento de pontos com temperatura elevada está diretamente relacionado com fenômenos de descargas parciais e formação de trilhamentos ou erosões”.
- *Raio-X* — Dentre as técnicas de ensaios não destrutivos, a radiografia é uma técnica bastante difundida, devido à possibilidade de inspecionar falhas no interior dos isoladores, por imagem de alta qualidade. O raio X pode detectar quebras nos núcleos de fibra de vidro, separação do mesmo com os terminais metálicos (SHINOHARA, 2007).
- *Medição do campo elétrico* — a distribuição do campo elétrico ao longo do isolador é influenciada pela permissividade e condutividade dos materiais usados, bem como da sua geometria. Além disso, a presença de defeitos, poluição e umidade também afeta a distribuição de campo elétrico. Assim, um distorções de campo elétrico entre os valores medidos e os valores esperados pode indicar aumento de micro fraturas, perfurações ou quebras nos isoladores cerâmicos. Já nos poliméricos aponta para absorção de umidade no interior, separação entre revestimento e núcleo, trilhamento ou ainda quebras e outros danos mecânicos. Diagnósticos de falhas usando este tipo de técnica podem ser dificultados pela presença de água, uma vez que as gotas na superfície modificam significativamente a distribuição de campo (GUBANSKI, 2007).
- *Medição da corrente de fuga*— o aumento da corrente de fuga pela superfície do isolador evidência o aumento da deposição de contaminação, perda da resistividade e ainda diminuição da hidrofobia. Desta forma é diagnosticado um



envelhecimento da superfície dos isolador e consequente perda de capacidades dielétricas, bem como a necessidade de efetuar a sua limpeza.

- *Detecção de rádio interferência* — esta técnica de diagnóstico permite detectar ocorrência de descargas elétricas parciais por intermédio da emissão de rádio frequências as quais, dependendo do tipo de descarga e da sua intensidade, podem originar a degradação da superfície (FLORENTINO, 2015).

A inspeção com o uso de aeronaves não tripuladas com termovisores e câmeras ultravioletas, inspeção visual *in loco* é um processo que eleva a produtividade das equipes de inspeção de linhas, além de possibilitar maiores detalhes na inspeção, pois o drone pode visualizar o equipamento de vários ângulos.

Muitas outras técnicas podem ser utilizadas, sobretudo com maior complexidade em termos de material necessário à sua realização, algumas das quais são de aplicação especial para os poliméricos. As inspeções sob tensão são de grande importância para a confiabilidade do sistema, visto que avaliam o estado do isolador sem interrupção do serviço e nas condições reais de serviço.

## **2.7 Termografia**

A termografia é uma técnica que permite mapear um corpo ou uma região para distinguir as áreas de diferentes temperaturas, utiliza-se, para tanto uma câmera termográfica. O uso da termografia proporciona a melhoria significativa nos processos de manutenção preventiva, em sistemas elétricos. Além disso, o uso da termografia permite a aplicação de novas técnicas que possam auxiliar na tomada de decisão (ANDRADE, 2015).

Os custos para a utilização da termografia em inspeções são relativamente baixos, já que as empresas de transmissão e distribuição de energia já a utiliza há bastante tempo, como técnica de manutenção preditiva para os equipamentos das subestações e linhas de transmissão. A maioria das concessionárias aplica a termografia como técnica rotineira para a detecção de anormalidades na operação dos isoladores (TAVARES, 2007).

### **2.7.1 Princípios da termografia**

A palavra termografia vem do grego *therme*, que significa calor; e *grafia*, escrita. A termografia é uma técnica que permite mapear um corpo ou uma região com o intuito

de distinguir áreas de diferentes temperaturas, sendo, portanto uma técnica que permite a visualização artificial da luz dentro do espectro infravermelho (ANDRADE, 2015).

A tecnologia aplicada à termografia teve seu início com a descoberta da radiação infravermelha em 1800 por William Herschel. Quarenta anos mais tarde, John Herschel produziu a primeira imagem térmica e a registrou em papel, no qual deu o nome de termograma. O grande desenvolvimento da termografia foi resultado do interesse militar que já na I guerra mundial desenvolvia sistemas infravermelhos e durante a II Guerra Mundial obteve grandes avanços no desenvolvimento da visão noturna, mísseis guiados pelo calor e do primeiro “scanner” de linha (RAHISHAM e RAHMAN, 2012).

Rápidos avanços na tecnologia da termografia foram observados de 1970 até os nossos dias, atualmente as câmeras térmicas são portáteis, podem ser conectadas ao computador e possuem “softwares” para análise das imagens, facilitando ainda mais a aplicação da termografia em sistemas elétricos. Na Figura 16 são exibidas imagens de câmeras térmicas com as suas evoluções.

Figura 16 – Fotografias de câmeras térmicas com sua evolução, a partir da década de 70 até os nossos dias.



a) Detector resfriado a nitrogênio líquido, sistema de varredura óptico/mecânico, peso total de 37 kg.



b) Detector resfriado eletricamente, sistema de varredura óptico / mecânico, peso 6,1kg.



c) Detector não resfriado, FPA (Focal Plane Array), peso de 2,7 kg.



d) Detector não resfriado, FPA (Focal Plane Array), peso de 0,7 kg.

Fonte: Revista Furnas (2006).

- **Vantagens da Termovisão**

A inspeção por termografia avalia o estado de normalidade do funcionamento do equipamento de acordo com sua natureza. Assim, alguns equipamentos elétricos e eletrônicos em operação apresentam algum tipo de aquecimento natural, de acordo com seu projeto, características construtivas e carga no instante da inspeção. Alguns equipamentos como colunas de isoladores, para-raios, buchas de transformadores e as muflas devem ter perfis térmicos em seu estado normal baseados em critérios pré-definidos (ÁLVARES, 2008).

A aplicação da inspeção termográfica em equipamentos elétricos é capaz de apresentar os benefícios seguir:

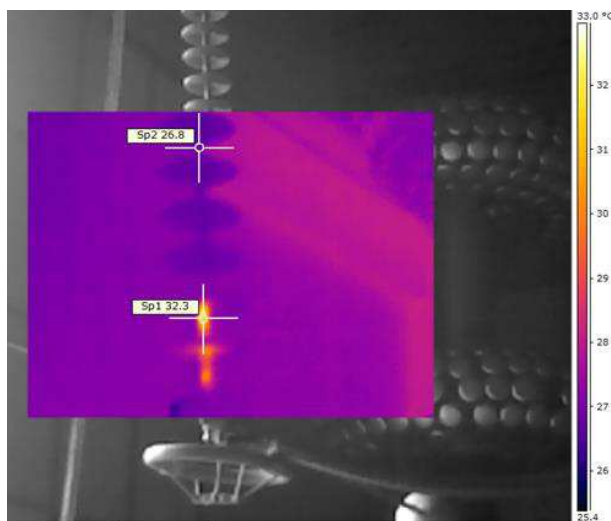
- *Manutenção preventiva*: permite prevenir danos que possam causar elevados custos nos reparos, pois pode detectar problemas em potencial.
- *Estoques*: prevenção de problemas em potencial permite menor investimento na estocagem, se houver menos queima de equipamentos os estoques podem ser menores.
- *Consumo de energia*: permite corrigir problemas que causam perda e consumo de energia em excesso, o sobreaquecimento gera consumo anormal.
- *Tempo*: inspeção de uma grande quantidade de equipamentos em menor período de tempo.
- *Avaliação das cargas nos painéis*: simplificação do diagnóstico durante o funcionamento do equipamento.
- *Apoio à equipe de manutenção*: avaliação da qualidade de serviços executados, pois se pode realizar uma termovisão posteriormente a execução do serviço e verificar se o problema de sobreaquecimento foi resolvido.
- *Planejamento*: permite um prévio planejamento antes da conclusão do serviço otimizando tempo.
- *Vida útil*: ao detectar o problema pode evitar a queima ou perda desnecessária de dispositivos.

- **Termograma**

O termograma é o registro da temperatura de superfície dos objetos sob mira (alvos) de um termovisor. A temperatura absoluta ou a distribuição da temperatura externa podem refletir um comportamento interno, desta forma a imagem térmica no infravermelho ou termograma pode ser a representação térmica do que acontece no interior do alvo focalizado.

A imagem de um termograma com fusão da fotografia de um isolador polimérico de 230 kV pode ser observada na Figura 17. O termograma é apresentado na forma de pseudocolorização que fornece uma relação de cor com temperatura, pelo termograma da Figura 17 pode se constatar facilmente uma diferença de cor nas últimas saias do isolador, essa variação de cor pode indicar o prenúncio de ocorrência de falha.

Figura 17 – Imagem de um termograma exibindo um isolador polimérico utilizados no experimento.



Fonte: Próprio Autor.

- **Critérios de avaliação**

Depois de realizada uma inspeção termográfica em determinado equipamento, um critério de avaliação deve ser adotado para especificar os procedimentos a serem efetivados. Existem normas e recomendações de associações profissionais e de concessionárias de energia elétrica que estabelecem critérios de avaliação para determinar a necessidade e urgência para manutenção preventiva ou reparo. Na Tabela 2 é possível observar o exemplo de critérios de avaliações feitas pela 'International Electrical Testing Association' para equipamentos que também pode ser utilizada para isoladores poliméricos (EPPERLY at al, 1999, p. 34).

Tabela 2 - Critérios de avaliação.

Diferença de temperatura entre equipamentos similares, nas mesmas condições de carga.	Diferença entre a temperatura do equipamento e ambiente.	Ação recomendada
1°C a 3°C	1°C a 3°C	Possível deficiência;
4°C a 15°C	11°C a 20°C	Indica provável deficiência; reparar quando possível.
---	22°C a 40°C	Monitorar continuamente até que uma manutenção corretiva possa ser efetuada.
> 16°C	> 40°C	Reparar imediatamente.
Obs.: As temperaturas especificadas variam dependendo do tipo do equipamento.		

Fonte: Neta MTS Epperly et al (1999, p. 34).

Como toda técnica de inspeção de isoladores poliméricos a termovisão apresenta algumas desvantagens, em seguida serão destacadas as principais desvantagens do uso da termovisão na inspeção de isoladores.

- **Desvantagens da termovisão**

Como desvantagem da termovisão pode-se mencionar os objetos que ficam no fundo da imagem. O termovisor não seleciona apenas o objeto a ser inspecionado, mas sim toda a área de captura da câmera, desta forma pode levar a erros de interpretação pelo termografista.

A termovisão necessita da interpretação pelo ser humano das imagens, desta forma, ao analisar as imagens pode ocorrer uma interpretação errada pelo ser humano dos termogramas. Por conseguinte, a aplicação de processamento digital de imagens, para separar apenas o objeto desejado, torna-se relevante, evitando que outros objetos possam induzir a incertezas de interpretação dos termogramas.

Outra limitação da termovisão ocorre quando os defeitos nos equipamentos não acarretam aumento de temperatura, deste modo, eles não podem ser identificados pelos termovisores, como exemplo pode-se citar a mudança de cor ou branqueamento nos isoladores poliméricos.

Na termovisão é necessário varrer todo corpo do isolador, pois visualizando apenas uma face do isolador podem ser omitidas variações de temperatura. A técnica da termovisão não é universal para todos os equipamentos, conseqüentemente é necessário conhecer os padrões térmicos dos equipamentos para qual se pretende fazer as medições.

Devido à importância do processamento digital de imagens para uma análise mais confiável e a sua aplicação nesta pesquisa, na próxima seção serão descritos os seus conceitos básicos.

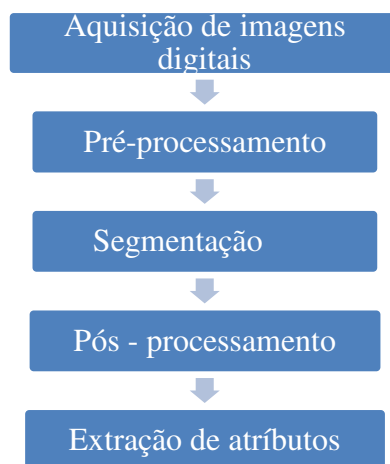
## 2.8 Processamento digital das imagens

O Processamento Digital de Imagens (PDI) é a manipulação de uma imagem por computador de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens. O objetivo de se usar PDI é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação, inclusive gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos (SPRING, 1996).

O processamento digital de imagens é utilizado em vários ramos da engenharia, sua aplicação vai desde sensoriamento remoto de áreas urbanas, detecção de queimadas em florestas até exames de diagnóstico por imagem na área médica. O PDI é um estágio preparatório da atividade de interpretação das imagens. Posteriormente quando as imagens são captadas, após o processamento, pode-se utilizar ferramentas de apoio à decisão como redes neurais, e assim o PDI auxilia na redução da influência de incertezas na classificação. Nesta pesquisa pretende-se integrar o PDI com uma RNA para identificar padrões de falhas em isoladores poliméricos de 230 kV.

O PDI é subdividido em várias etapas. Um diagrama esquemático das etapas do processamento de imagens é ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Diagrama esquemático das etapas do procedimento digital de imagens.



Fonte: Próprio Autor.

### **2.8.1 Aquisição de Imagens Digitais**

O processo de digitalização de imagens é constituído por dois elementos. O primeiro elemento é um dispositivo físico que deve ser sensível ao espectro de energia eletromagnético como, por exemplo, ao espectro da luz infravermelha. Este dispositivo deve produzir em sua saída um sinal elétrico proporcional à quantidade de energia percebida. O segundo elemento é um digitalizador, dispositivo capaz de converter o sinal elétrico analógico da saída do sensor em um sinal digital, conforme descrito por Guedes (2015).

### **2.8.2 Pré-processamento**

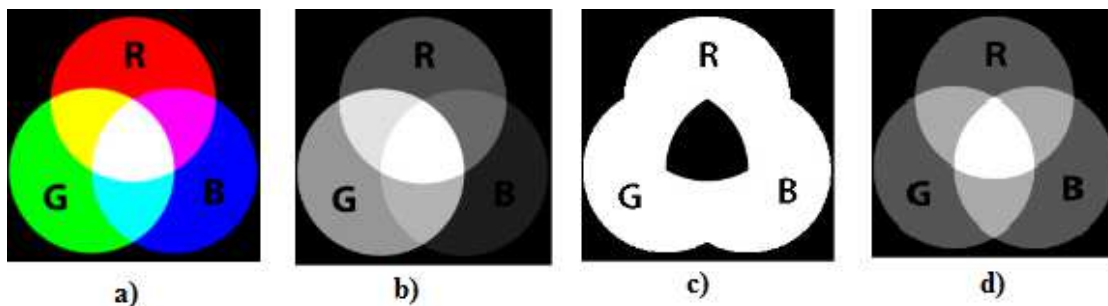
O pré-processamento consiste na maior parte das transformações lineares e não-lineares aplicadas à imagem, visando as metas de: melhoramento de contraste; remoção de ruído; obtenção das regiões de interesse; correlação e codificação das informações para transmissão da imagem, amostragem dos píxeis em uma nova escala; e finalmente, treinamento e extração de características de imagem para segmentação. Muitas aplicações requerem apenas operações de pré-processamento. As informações de interesse podem também ser extraídas das imagens e representadas de uma outra forma (ALBUQUERQUE, 2003).

### **2.8.3 Segmentação**

A segmentação é considerada, dentre todas as etapas do processamento de imagens, a etapa mais crítica do tratamento da informação. É na etapa de segmentação que são definidas as regiões de interesse para processamento e análise posteriores. Como consequência deste fato, quaisquer incertezas ou distorções presentes nesta etapa se refletem nas demais etapas, de forma a produzir ao final do processo resultados não desejados que podem contribuir de forma negativa para a eficiência de todo o processamento (ALBURQUERQUE, 2003).

Além disso, a segmentação é um processo adaptativo, sendo necessário sempre se adequar às características particulares de cada tipo de imagem a ser processada e, por isso, não se tem um modelo formal de segmentação de uma imagem. A aplicação do processo de segmentação pode ser observada na Figura 19.

Figura 19 - Processo de segmentação com a conversão RGB para HSI. (a) Imagem RGB, (b) Tonalidade, (c) Saturação, (d) Intensidade.



Fonte: Nascimento (2010).

### 2.8.4 Pós-processamento

O pós-processamento é a etapa que sucede a segmentação. Nesta etapa os principais defeitos ou imperfeições da etapa anterior são corrigidos. As correções são feitas utilizando técnicas de morfologia matemática com aplicação de filtros morfológicos que analisam quantitativamente os pixels da imagem. A morfologia matemática é uma das grandes áreas do PDI. Fundamentalmente, têm-se duas linhas de descrição de seus métodos, os operadores booleanos de conjuntos (união, interseção, complemento, etc.) e a noção de forma básica chamada de elemento estruturante (GUEDES, 2015).

### 2.8.5 Extração de Atributos

A extração de atributos é considerada a última etapa do processamento das imagens. Consiste na extração das informações úteis da imagem já processada, tais como tons de vermelho da imagem, parte da imagem que contém mais informações de distorções.

## 2.9 Redes Neurais

As redes neuronais artificiais são modelos computacionais inspirados no sistema nervoso de seres vivos. As RNA possuem a capacidade de aquisição e manutenção do conhecimento (baseado em informações) e podem ser definidas como um conjunto de unidades de processamento, caracterizadas por neurônios artificiais. Estes são interligados por um grande número de interconexões (sinapses artificiais), sendo as mesmas representadas por vetores/matrizes de pesos sinápticos (SILVA, 2010).

Um sistema neuronal biológico é composto basicamente de três estruturas – os receptores, a rede neuronal propriamente dita e os atuadores. A estrutura principal deste sistema é o cérebro, representado pela rede neuronal que recebe continuamente informação, percebe-a e toma decisões apropriadas. Os receptores convertem estímulos do corpo humano ou do ambiente externo em impulsos elétricos que transmitem

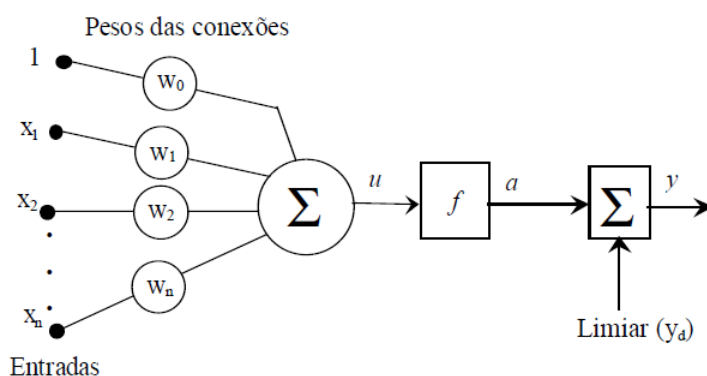


informações para a rede neuronal. Os atuadores convertem impulsos elétricos gerados pela rede neuronal em respostas discerníveis como saídas do sistema (HAYKIN, 2001).

O cérebro, a rede neuronal propriamente dita, é composto de uma imensa rede de estruturas com sensores e transmissores interligados. Os neurônios são capazes de armazenar grande quantidade de informações e selecioná-las de acordo com os estímulos recebidos pelas suas estruturas receptoras. Para formar uma rede neuronal, os neurônios são interligados por intermédio de sinapses ou ligações sinápticas, que são responsáveis pela transmissão de informações entre os neurônios. A transmissão é feita por meio da propagação dos impulsos elétricos resultantes dos estímulos externos recebidos.

A estrutura de um neurônio artificial está apresentada na Figura 20. Basicamente, o modelo de neurônio é composto por três estruturas principais – as sinapses ou entradas (e respectivos pesos sinápticos), o somador (junção aditiva) e a função de ativação ( $f$ ).

Figura 20 – Imagem da estrutura de um neurônio artificial.



Fonte: Rosenblatt (1957 apud Florentino, 2015).

Neste capítulo foi apresentada a fundamentação teórica, descrevendo os isoladores e a sua importância para o sistema elétrico. Como também descreveu-se os princípios da termografia e sua aplicação no sistema elétrico, o processamento de sinais e as redes neuronais artificiais. No próximo capítulo será feita uma revisão bibliográfica visando apresentar os trabalhos mais relevantes sobre a aplicação de termografia a isoladores elétricos.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Neste capítulo é apresentada algumas técnicas e estudos em isoladores poliméricos que serviram de referência para este trabalho. Assim, a revisão bibliográfica descreve e ressalta as contribuições dos trabalhos mais relevantes na área de isoladores poliméricos, termografia e processamento digital de imagens. A revisão se concentrou no período de 2005 a 2015.

No trabalho de dissertação de Neri (2005), foram avaliadas as técnicas de medição de descargas parciais, da radiação UV e da radiação infravermelha. Para tanto, ele utilizou seis isoladores poliméricos de 69 kV todos novos, sendo um considerado sem nenhum problema de fabricação, o qual ele considerou como referência. Nos outros cinco isoladores, foi implantado um tipo de defeito. Na pesquisa, os isoladores foram submetidos a um processo de envelhecimento natural e foram observadas as variações da umidade. Além disso, Neri (2005) realizou medições de descargas parciais, medição de temperatura a seco, medição de temperatura com névoa, simulação de comportamento do campo elétrico. O autor concluiu que a inspeção de isoladores poliméricos associando os detectores de corona e infravermelho é uma promissora técnica para detecção de isoladores defeituosos, entretanto é necessário confirmar a eficácia da técnica em situações reais de campo.

No trabalho de dissertação de Santos (2006) teve como objetivo definir as principais limitações e influências sobre uma inspeção termográfica em subestações de alta tensão desabrigadas. Analisar, desde a influência de quem executa a inspeção (termografista), as limitações do equipamento utilizado para se fazer a inspeção (termovisor), as condições do equipamento sob inspeção, até as influências de fatores ambientais sobre a medição e analisar as anomalias térmicas encontradas eram os objetivos da dissertação. Na dissertação está descrita, de modo prático e por intermédio de ensaios em laboratório ou em campo, a implicação dessas influências e a discussões dos meios de reduzi-las ou evitá-las.

Além disso, Santos (2006) desenvolveu uma metodologia de inspeção capaz de obter resultados mais confiáveis, possibilitando uma análise mais consistente dos defeitos encontrados, na pesquisa ele procurou abordar de forma geral as limitações da aplicação da termografia infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas. O trabalho também tratou de isoladores de forma a mostrar a interferência humana na inspeção e colocou como trabalhos futuros desenvolver um sistema de auxílio à tomada de decisões e interpretação dos termogramas.

Na dissertação de Ferreira (2007), visando uma compreensão mais abrangente do trilhamento de núcleo e sua formação, uma técnica de criação de indícios de trilhamento de núcleo em laboratório foi proposta. Além disso, observações dos indicadores físicos da origem e propagação do trilhamento de núcleo foram realizadas. No trabalho foi utilizada uma câmera de radiação ultravioleta e um termovisor para inspecionar os níveis de descargas corona nas proximidades do isolador e as temperaturas superficiais no isolador. Como parte das conclusões do autor foi observado que anéis equalizadores influenciam os padrões térmicos e de descargas corona. Para ponderar a influência dos anéis equalizadores nos níveis de descargas corona e temperaturas superficiais nos isoladores, foram avaliadas várias configurações de anéis.

Além disso, Ferreira (2007) simulou computacionalmente, utilizando método dos elementos finitos, as condições de distribuição de campo e potencial elétrico nas configurações de anéis equalizadores permitindo assim, a representação gráfica do campo e potencial elétricos, além de um entendimento mais abrangente. Por fim, um anel equalizador otimizado para aplicação em isoladores poliméricos classe 230 kV foi projetado, construído e avaliado, visando prolongar a vida útil dos isoladores. Os resultados dos experimentos de análise dos efeitos da concentração demonstram que o uso de anéis equalizadores subdimensionados é prejudicial aos isoladores poliméricos.

No trabalho de dissertação Barros (2011) são avaliadas as técnicas de inspeção utilizando medições de descargas parciais e de radiação UV, emitidas por descargas corona. Para o experimento o autor realizou em laboratório ensaios com três isoladores de classe 72,5 kV e, dentre eles, um novo e sem defeito, para servir como referência. No experimento com os isoladores poliméricos foram aplicados diferentes níveis de poluição, o objetivo foi verificar a sensibilidade da câmera UV quando se varia o ganho UV e o efeito da distância da câmera ao objeto de teste. Os resultados evidenciam uma região linear entre 120 e 160. Nesta região, comprovou-se que o ganho UV é o mais independente da contagem de pontos/min.

Barros (2011) concluiu que a distância de observação se trata de um fator decisivo com relação ao nível de descargas corona captadas. Para tanto, técnicas de inspeção utilizando medições de descargas parciais (DP), em laboratório, e de radiação ultravioleta (UV), emitidas pela descarga corona foram avaliadas. As imagens UV foram processadas, visando obter apenas a região de ocorrência do corona em termos de concentração de píxeis. Uma correlação entre níveis de DP e dados obtidos a partir da

câmera UV (pontos de descarga/minuto) e, do processamento de imagens (concentração de píxeis do corona) foi realizada.

O trabalho de dissertação de Queirós (2013) descreveu de uma forma mais detalhada a tecnologia dos isoladores poliméricos em face do estado de evolução. O autor faz evidência a vários relatos de aplicação de isoladores poliméricos nos diferentes níveis de tensão dos sistemas elétricos e consequentes dados de desempenho. No trabalho foram apresentados registros dos vários tipos de degradação verificados nas estruturas de isoladores poliméricos e cerâmicos e os principais agentes responsáveis pela degradação, além de uma comparação entre as vantagens técnicas e econômicas entre os isoladores. Também, na dissertação foram apresentados os resultados dos ensaios de suportabilidade dielétrica para os isoladores, poliméricos e de porcelana, destinados a redes de 150 kV, consequentemente análise do desempenho de ambos.

No artigo de Yunseog (2013) foram apresentados estudos das causas de falhas de isoladores poliméricos que estavam em campo, especialmente sob condições de contaminação, as falhas ocorreram devido ao envelhecimento dos isoladores poliméricos de 765 kV instalados na usina termoeletrica de Switchyard na Coreia. Neste trabalho, vários testes como a inspeção visual, teste de hidrofobia, teste ESDD / NSDD e inspeção UV / IR foram realizados para revelar a principal causa das falhas. A erosão da superfície do polímero e montagem final foram minuciosamente inspecionados durante a inspeção visual para comparar unidades que falharam. Para o teste de hidrofobicidade, o método de pulverização definido na norma IEC foi usado para obter resultados normalizados. ESDD e medição NSDD foram realizadas com base em IEC 60815-1. E também, três cálculos de campos elétricos dimensionais foram realizados para verificar o efeito de campo elétrico para o envelhecimento e insuficiência dos isoladores.

Além disso, Yunseog (2013) fez a modelagem de campo elétrico com um pacote de software de cálculo comercial com base no método dos elementos finitos. A partir dos resultados do teste, foi identificada a causa de falha na destruição da haste por atividades de descarga. Como conclusão, notou-se que o controle das atividades de corona é a coisa mais importante para evitar falhas sob condição contaminação. Para isso, o anel de corona e design final apropriado em escala real devem ser revistos antes de fabricação e instalação dos isoladores poliméricos.

Lyang Guo (2014) criou modelos elétricos em 3D de equipamentos. Ele realizou cálculos do processo de transferência de calor do interior dos equipamentos e

distribuição do calor para a superfície externa dos equipamentos. O cálculo foi feito com base nos desenhos de concepção dos equipamentos utilizando o método de elementos finitos. O modelo foi configurado com uma fonte de calor especial, as características parâmetros dos materiais e outros parâmetros desconhecidos sondado com algoritmo iterativo. Os resultados foram comprovados pela detecção por infravermelhos dos equipamentos reais e os equivalentes modelos físicos. E concluiu que o aumento da temperatura pode ser utilizado para avaliar a defeitos internos dos equipamentos elétricos em subestações.

A dissertação de Guedes (2015) teve como objetivo propor uma técnica de classificação de isoladores poliméricos que possibilitou a indicação do seu estado de degradação em operação, de modo a se determinar o momento mais adequado para realização de intervenções (trocas) e, conseqüentemente, contribuir para a redução das interrupções. A técnica se baseou na análise da radiação ultravioleta (UV) emitida por isoladores ensaiados. A autora utilizou isoladores poliméricos de 230 kV com diferentes níveis de degradação como objetos de teste. As imagens UV obtidas durante os ensaios foram submetidas a uma técnica de processamento de imagens, de modo a minimizar os ruídos existentes. A partir dos resultados obtidos, foi proposto um sistema utilizando lógica *Fuzzy* para classificação do estado de degradação dos isoladores poliméricos a partir da medição da radiação UV e a umidade relativa do ar. A técnica se mostrou promissora no auxílio à tomada de decisões quanto à necessidade de intervenção ou não ao equipamento inspecionado.

El-Refaie (2015) descreve um trabalho pesquisa que tem como objetivo melhorar a distribuição de campo elétrico nos isoladores poliméricos, reduzindo o valor do campo elétrico máximo, a fim de melhorar o seu desempenho a longo prazo. O trabalho foi realizar modificações das dimensões dos isoladores por intermédio de uma técnica de otimização. Esta técnica combina exame de otimização de partículas (PSO) e algoritmo método dos elementos finitos (MEF). Um algoritmo PSO foi implementado usando o software MATLAB, por outro lado, a intensidade do campo elétrico foi calculada usando pacote de software comercial COMSOL Multiphysics que é capaz de calcular o campo elétrico em duas e três dimensionais.

Para o trabalho, El-Refaie (2015) utilizou, como amostras, quatro isoladores de 11 kV com perfis diferentes. A influência de vários parâmetros, tais como comprimento, diâmetro, ângulo de inclinação, número de aletas e tipos de arranjos foi estudada. Os parâmetros de perfil isoladores foram verificados após a otimização de acordo com a IEC / TS 60815-3. Os resultados obtidos indicam que o valor máximo do campo elétrico

pode reduzir significativamente usando a técnica proposta. O trabalho é capaz de fornecer suporte teórico para projetar e selecionar o perfil de isoladores poliméricos com a finalidade de se obter um melhor desempenho.

No trabalho de dissertação Rocha (2015) um classificador otimizado para reconhecer três níveis de degradação, a partir da análise do espectro eletromagnético irradiado, foi utilizado. Oito métodos de classificação para avaliar o grau de degradação física do isolador foram avaliados. Em todos os métodos é utilizada uma rede neuronal artificial, do tipo MLP, com três camadas. Duas antenas foram utilizadas para a coleta do espectro, uma bicônica e outra log-periódica. O espectro analisado foi de 30 MHz até 1 GHz.

No artigo de Jarrar (2015) foi apresentado um método automatizado para classificar e avaliar a condição da superfície da borracha de silicone. O autor utilizou técnicas de processamento digital de imagens. Uma base de dados composta de 358 imagens foi recolhida e processada, representando sete graus de hidrofobicidade. Uma taxa de reconhecimento de 95,67% foi conseguida ao usar características combinadas de ambas as técnicas usando regressão passo a passo como técnica de seleção de recursos para formar o vetor de característica de entrada. O sistema desenvolvido reduz a intervenção humana, portanto reduz as possibilidades de incertezas de classificação.

Young Liu (2015) no seu artigo identificou gotas de água sobre isolador polimérico com a finalidade de refletir os efeitos da gota nos parâmetros de flashover. O autor utilizou uma técnica de processamento digital de imagens (escala de cinza) para definir o aumento de descargas superficiais. Ele, mostrou também que a localização da gotícula tem influência sobre a descarga disruptiva.

Na Tabela 3 é apresentado um resumo com os principais trabalhos envolvidos sobre os temas em estudo.

Tabela 3 - Quadro resumo com os principais trabalhos desenvolvidos sobre os temas em estudo.

Ano	Pesquisadores	Contribuição	IF <sup>1</sup>	PI <sup>2</sup>	RN <sup>3</sup>
2005	Neri	Realizou medições da temperatura nos isoladores, com aplicação de névoa limpa, produziu resultados expressivos na maior parte dos casos, entretanto, alguns dos pontos aquecidos encontrados, podem ser atribuídos a defeitos externos aos isoladores, tais como: sujeira ou imperfeições na superfície do isolador.	X		
2006	Santos	Utilizou técnicas de termovisão como ferramentas de auxílio na prevenção de falhas do sistema elétrico, utilizando a radiação infravermelha. Mostrou que na técnica de termovisão os problemas mesmo sendo difíceis de quantificar, são possíveis, tendo um conhecimento prévio, reduzi-los ou evitá-los.	X		
2007	Ferreira	Estudou o fenômeno do trilhamento de núcleo em isoladores poliméricos, sob várias perspectivas. Uma técnica de criação de indícios de trilhamento de núcleo em laboratório foi criada e apresentou resultados promissores. Outra perspectiva é a necessidade do monitoramento da degradação dos isoladores, que conduziu à observação e à quantificação de dois indicadores físicos de origem e propagação do trilhamento de núcleo: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Descargas corona nas proximidades do isolador, indicador direto da intensidade de campo elétrico na região.</li> <li>• Temperaturas superficiais nos isoladores.</li> </ul>	X		
2011	Barros	Utilizou técnicas de processamento de imagens com três isoladores de classe 72,5 kV, dentre eles, um novo e sem defeito, para servir como referência. A técnica de quantificação do corona utilizando processamento de imagens foi implementada, na qual níveis de corona aumentam de acordo com o grau de poluição e degradação dos isoladores para pequenas variações de umidade relativa do ar.		X	
2013	Queirós	Estudou a tecnologia de isoladores poliméricos de forma detalhada e fez comparações com isoladores cerâmicos, fez ensaios termográficos em ambos os isoladores, foi concluído que isoladores poliméricos representam uma aposta cada vez mais segura para aplicação em linhas elétricas.	X		

<b>2013</b> Yunseog	Estudou as causas de falhas em isoladores de 765 kV instalados em uma usina termoeletrica na Coreia, utilizou-se diversos metodos para analise das falhas, tais como, inspeção visual, teste de hidrofobia, teste ESDD / NSDD e inspeção UV / IR, conclui que o controle das atividades de corona é a coisa mais importante para evitar falhas sob condição contaminação.	<b>X</b>
<b>2014</b> Lyang Guo	Criou modelos elétricos em 3D de equipamentos, realizou cálculos do processo de transferência de calor do interior dos equipamentos e distribuição do calor para a superfície externa dos equipamentos. Concluiu que o aumento da temperatura na superfície pode ser utilizada para avaliação interna defeitos dos equipamentos elétricos em subestações.	<b>X</b>
<b>2015</b> Guedes	Utilizou isoladores de 230 kV para testes com um detector de radiação ultravioleta e correlacionou com a umidade, em seguida utilizou processamento de imagens e lógica Fuzzy para detectar os isoladores com defeitos ou na iminência de falhas.	<b>X</b>
<b>2015</b> El-Refaie	Selecionou quatro modelos diferentes de isolador composto perfis de 11 kV para ser otimizado usando FEM combinado com o algoritmo PSO. A distribuição de campo elétrico para todos os modelos tem sido melhorada e a porcentagem de redução máxima na intensidade de campo elétrico foi de cerca de 17%.	
<b>2015</b> Rocha	Utilizou um classificador otimizado para reconhecer três níveis de degradação, a partir da análise do espectro eletromagnético irradiado. Em todos os métodos é utilizada uma rede neuronal artificial, do tipo MLP, com três camadas. Duas antenas foram utilizadas para a coleta do espectro, uma bicônica e outra log-periódica. O espectro analisado foi de 30 MHz até 1 GHz.	<b>X</b>
<b>2015</b> Jarrar	Desenvolveu um método automatizado sistema para classificar e avaliar a condição da superfície de silicone material de borracha utilizando técnicas de processamento digital de imagens. Uma base de dados composta de 358 imagens foi recolhida e processadas representando sete graus de hidrofobicidade.	<b>X</b>



<b>2015</b>	Young Liu	Identificou que gotas de água sobre o isolador polimérico com a finalidade de refletir os efeitos da gota nos parâmetros de flashover. Foi utilizado PDI para definir o aumento de descargas superficiais, mostrou também que a localização da gotícula tem influência sobre a descarga disruptiva.				<b>X</b>
<b>2016</b>	Esta dissertação	Utilizou oito isoladores poliméricos de 230 kV que estavam em linhas de transmissão, os isoladores foram testados utilizando um detector de radiação infravermelho. Uma técnica foi proposta para auxiliar na classificação do estado de degradação dos isoladores que utiliza PDI e RNA.	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
<sup>1</sup> <b>Emprego de câmera infravermelho</b> <sup>2</sup> <b>Emprego de processamento de imagens</b> <sup>3</sup> <b>Implementação de rede neuronais</b>						

Fonte: Próprio Autor.

O próximo capítulo será dedicado à descrição dos material aplicados e métodos utilizados para medições da RIF em isoladores poliméricos de 230 kV.

## 4.MATERIAL E MÉTODOS

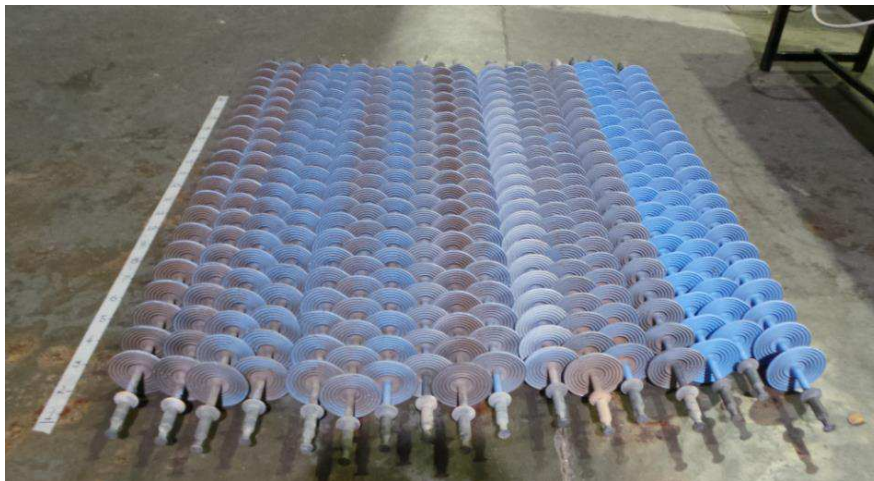
---

No capítulo é descrito o material aplicado e os métodos empregados nas medições termográficas de isoladores poliméricos utilizados em linhas de transmissão de 230 kV. As medições foram realizadas no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG. O objetivo é a partir dos termogramas de isoladores poliméricos, com auxílio do processamento de imagens e de redes neurais artificiais, classificar os isoladores quanto a seu estado de degradação.

### 4.1 Material

Os objetos de testes utilizados nos experimentos são isoladores poliméricos com revestimento de borracha de silicone para linhas de transmissão de 230 kV. Os isoladores foram fornecidos pela CHESF e apresentam diferentes estados de degradação. Uma fotografia dos isoladores é exibida na Figura 21.

Figura 21 - Fotografia do lote de 17 isoladores, dos quais serão escolhidos oito para os ensaios.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 22 é exibida uma fotografia de um isolador utilizado no experimento. Os isoladores foram instalados com um anel equalizador com 158 mm de diâmetro.

Figura 22 – Fotografia de um isolador polimérico utilizado no experimento.

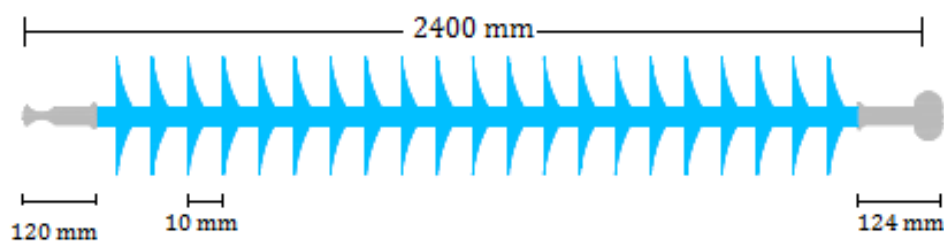


Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 23 é exibida uma imagem da representação gráfica do isolador de 230 kV utilizado no experimento. Os isoladores utilizados nos ensaios apresentam as seguintes especificações:

- Tensão de operação: 230 kV;
- Número de saias: 21;
- Comprimento: 2,4 m;
- Peso: 8,8 kg;
- Terminal: tipo concha/bola;
- Carga mecânica suportável 222 kN.

Figura 23 – Imagem da representação gráfica do isolador de 230 kV a ser utilizado nos ensaios, juntamente com suas dimensões.



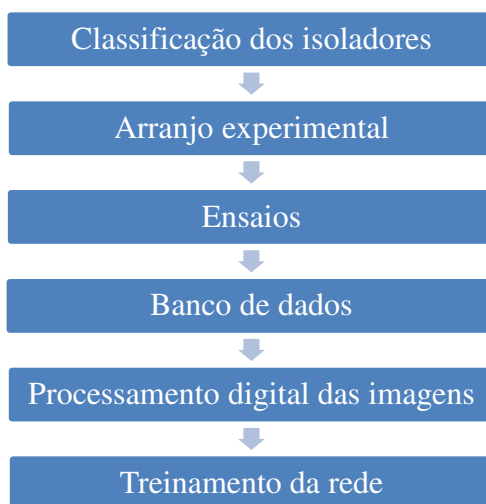
Fonte: Guedes, 2015.

## 4.2 Métodos

No registro das imagens termográficas um termovisor da marca FLIR, modelo T300 foi utilizado. As principais características do termovisor são peso (incluindo bateria) de 0,88 kg, resolução infravermelha de 320 x 240 *pixels* e variações de medição de temperatura de -20°C a +120°C ou de 0°C a 350°C.

Na Figura 24 é exibido um fluxograma com as etapas necessárias à classificação do grau de degradação dos isoladores poliméricos, utilizando-se a medição do nível de radiação infravermelha.

Figura 24 - Fluxograma do método de classificação do grau de degradação dos isoladores poliméricos.



Fonte: Próprio Autor.

Cada etapa da classificação do grau de degradação dos isoladores poliméricos foi detalhada nos tópicos a seguir.

### 4.2.1 Classificação dos Isoladores

Os isoladores utilizados no experimento foram cedidos pela CHESF e apresentavam condições operativas ou de envelhecimento diferentes, por serem amostras retiradas de campo. Os isoladores foram submetidos a condições distintas durante seu tempo de operação no sistema elétrico. Por conseguinte, foi imprescindível a classificação desses isoladores, a partir de uma análise dos aspectos físicos do isolador. Para tanto, eles foram enumerados e uma inspeção visual minuciosa realizada

em cada equipamento separadamente, de modo a identificar e registrar os danos existentes.

A classificação por inspeção visual dos isoladores poliméricos foi realizada por seis engenheiros eletricitas com experiência em alta tensão, todos tem trabalhos realizados com isoladores poliméricos e experiência na identificação de pontos de falhas em isoladores.

Na inspeção foram avaliados os aspectos físicos do isolador, tais como: exposição do núcleo, nível de poluição, estado de degradação das ferragens, estado de degradação das saias, nível de erosão e estado de degradação do selo. Aos aspectos físicos foram atribuídos valores em uma escala de 1 a 5, na qual o valor 1 foi atribuído quando o aspecto físico avaliado for considerado praticamente como novo e 5 quando o aspecto físico for crítico.

A cada aspecto físico avaliado foi atribuído um peso correspondente a sua importância para a falha do isolador, pois cada um dos aspectos possui diferentes contribuições. Portanto, utilizou-se de forma repetida, um grau de degradação de 1 a 5, na qual o valor 1 foi atribuído ao item avaliado com menor importância para a falha do isolador polimérico e 5 ao item com maior importância. Os pesos atribuídos podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Pesos atribuídos aos aspectos físicos avaliados nos isoladores poliméricos.

Fator Avaliado	Peso do Fator
Nível de exposição do núcleo	5
Nível de erosão do isolador	4
Nível de poluição	3
Estado de corrosão dos terminais	1
Estado de degradação das saias	2
Estado de degradação do selo	4

Fonte: Próprio Autor.

Os fatores propostos para análise dos isoladores foram:

- *Nível de exposição do núcleo*: procuram-se pontos onde o núcleo está exposto devido à degradação do polímero que o reveste.
- *Nível de erosão do isolador*: trata-se de uma avaliação a procura de fissuras no polímero, mesmo que está ainda não exponha o núcleo.
- *Nível de poluição*: avalia-se o quão poluído encontra-se o isolador.

- *Estado de corrosão dos terminais*: avalia-se o nível de oxidação dos terminais, dando uma atenção maior ao terminal que se conecta a fase.
- *Estado de degradação das saias*: identificam-se os cortes, arranhões, presença de excessos de materiais e qualquer espécie de dano físico nas saias.
- *Estado de degradação do selo*: verifica-se o quanto o selo está danificado.

Na sequência do experimento foi feita uma avaliação de cada isolador, para isso foi inicialmente enumerados os isoladores (de 1 a 17), e em seguida foi realizado o procedimento descrito abaixo:

1. Registrar a situação geral do equipamento avaliando o nível de poluição que este apresenta em toda a sua extensão, com atenção especial às saias próximas ao terminal de fase, onde a concentração de campo elétrico é maior;
2. Procurar em toda a extensão do isolador, da aleta 1 até à 21 (iniciando a contagem do terminal de fase para o terminal do terra) falhas estruturais como: exposição do núcleo, degradação das saias e o nível de erosão;
3. Avaliar o estado dos terminais e quão desgastada está a vedação entre o núcleo e os conectores metálicos.

Com todos os isoladores devidamente avaliados, foi calculado o Índice de Degradação do Isolador (IDI), que é a média ponderada das notas atribuídas às características avaliadas em relação aos pesos estabelecidos. Os valores do IDI variam de 1 a 5 e são dados pela Equação 1:

$$IDI_n = 2 * \frac{\sum_{i=1}^6 P_i N_i}{\sum_{i=1}^6 P_i} \quad (1)$$

Em que:

$n$  é o número do isolador avaliado;

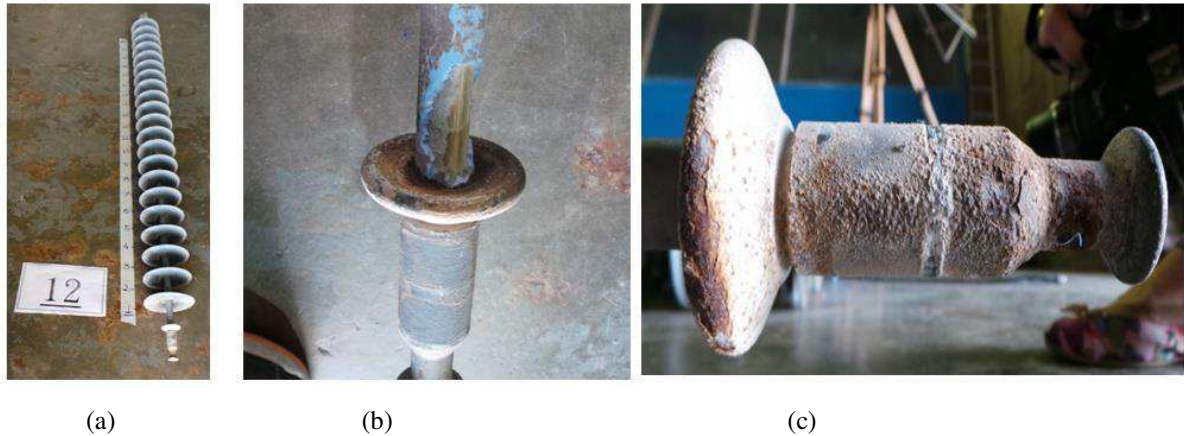
$i$  é a numeração do fator avaliado;

$P_i$  é o peso do fator  $i$ ;

$N_i$  é a nota dada ao fator  $i$ .

Na Figura 25 são exibidas fotografias de alguns dos isoladores poliméricos utilizados no experimento após as avaliações detalhadas dos engenheiros do LAT, após avaliações detalhadas, foram registrados os pontos de defeito dos isoladores.

Figura 25 - (a) Fotografia do isolador 12, (b) núcleo exposto do isolador 10 e (c) pino com corrosão bem acentuada no isolador 14.



Fonte: Próprio Autor.

Os isoladores foram, então, classificados e agrupados, quanto à criticidade, em três níveis ou estados de degradação: (1) Isoladores em bom estado,  $IDI < 3$ ; (2) apresentando condições operacionais de desgaste médio para o sistema,  $3 \leq IDI \leq 5$ ; (3) apresentando condições operacionais críticas para o sistema  $IDI > 5$ .

Após o preenchimento das planilhas de avaliação, os resultados foram computados e a partir da média das avaliações se construiu a Tabela 5, que contém a classificação final dos isoladores pelo seu índice de degradação.

Tabela 5 - Classificação dos isoladores a partir do seu índice de degradação, destacados em isoladores críticos, intermediários e bons.

Isolador	Tensão de Operação (kV)	Índice de Degradação do isolador (IDI)	Estado
10	230	8,263	Isolador Crítico
11	230	8,079	Isolador Crítico
5	230	5,421	Isolador Crítico
9	230	5,079	Isolador Crítico
4	230	4,421	Isolador Médio
12	230	3,895	Isolador Médio
8	230	3,789	Isolador Médio
16	230	3,789	Isolador Médio
7	230	3,658	Isolador Médio
6	230	3,553	Isolador Médio
14	230	3,342	Isolador Médio
17	230	3,105	Isolador Médio
13	230	3,053	Isolador Médio
15	230	3,053	Isolador Médio
1	230	0	Isolador Bom
2	230	0	Isolador Bom
3	230	0	Isolador Bom

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.2 Montagem do Arranjo Experimental

Os ensaios foram realizados nas dependências do LAT, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Durante os ensaios, foi utilizado um sistema de geração de alta tensão alternada, composto de dois transformadores combinados em uma topologia tipo cascata. O sistema completo pode gerar até 600 kV/600 kVA. Na Figura 26 é exibida uma fotografia do transformador utilizado no experimento.



Figura 26 - Fotografia do transformador a ser utilizado nos ensaios.

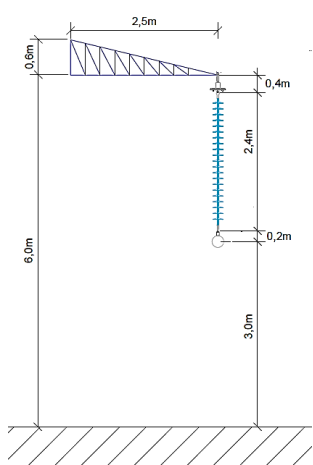


Fonte: Próprio Autor.

A montagem com o isolador polimérico no LAT foi concebida da forma mais similar possível à condição que o mesmo teria em uma linha de transmissão. Além disso, foram adotadas como padrão de medição nove pontos distintos, distanciados  $120^\circ$  geométricos, mas com três raios diferentes, desta forma foi arranjada uma varredura de  $360^\circ$  em torno do isolador. Para a realização do arranjo experimental foram projetadas e montadas as estruturas que auxiliam para suporte do isolador, na Figura 27(a) exibe o desenho do projeto da mísula e a forma como o isolador ficará posicionado.

Os efeitos de campo elétrico provocado pelo condutor fase foram emulados por um tubo metálico com 4 cm de diâmetro e 3 m de comprimento. Nas extremidades do tubo foram conectadas esféricas metálicas ocas com 15 cm de diâmetro. A conexão do divisor capacitivo ao isolador foi feita com um tubo metálico flexível com 10 cm de diâmetro. Estas providências são suficientes para minimizar a ocorrência de descargas corona. Na Figura 27(b) é exibida uma fotografia da montagem no laboratório da estrutura pronta. O isolador ficou posicionado a 3 metros de altura do solo, a mísula de sustentação tem 2,5 metros de comprimento em forma de uma pirâmide de base retangular de 1 metro por 60 centímetros.

Figura 27 – Imagem da vista lateral da montagem experimental do conjunto mísula isolador (a), fotografia da estrutura já montada para o experimento (b).



(a)



(b)

Fonte: Próprio Autor.

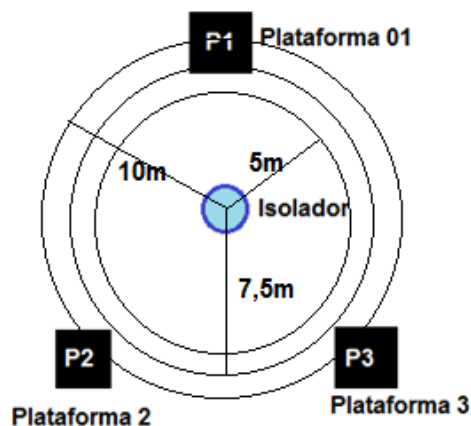
Para se analisar o efeito da distância de observação, as plataformas foram dispostas as distâncias de 5; 7,5 e 10 metros do isolador. Na Figura 28 é exibida uma fotografia de uma das plataformas de onde foram realizadas as medições. Na Figura 29 é exibida uma imagem da vista superior da disposição do isolador e os pontos de medições de forma que é possível fazer medições em 360° nos isoladores poliméricos.

Figura 28 – Fotografia da plataforma onde foram realizadas as medições.



Fonte: Próprio Autor.

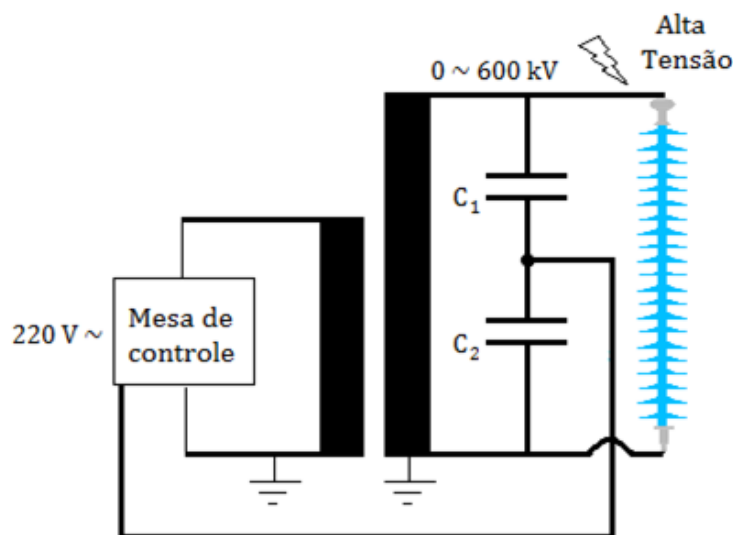
Figura 29 – Imagem do formato da distribuição das plataformas separadas  $120^\circ$  de forma que se consiga ter uma visão completa em torno do isolador.



Fonte: Próprio Autor.

Para a medição da tensão aplicada usou um divisor capacitivo. O controle e regulação do nível de tensão para o valor desejado é realizada na cabine de comando. Na Figura 30 é exibida uma imagem do diagrama esquemático da montagem do experimento.

Figura 30 – Imagem do diagrama esquemático da montagem do experimento.



Fonte: Guedes (2015).

Posteriormente na saída do transformador foi conectada à configuração projetada utilizando um condutor oco de 60 mm de diâmetro. O condutor foi apoiado por um conjunto de isoladores interconectados em um formato de “V”, sendo posicionado a uma distância segura do solo e dos demais equipamentos. Na Figura 31 é exibida uma fotografia do arranjo experimental.

Figura 31 - Fotografia do arranjo experimental.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.3 Ensaios

Ao finalizar a montagem do experimento, foram iniciados os ensaios na tensão nominal de operação (fase-terra), ou seja, aproximadamente 133 kV, de modo que se consiga simular uma situação próxima ao campo. Após a energização do isolador polimérico foi necessário um período de duas horas até que se iniciem as medições por termografia. Este é o tempo necessário para que o isolador alcance o equilíbrio térmico.

Antes de cada medição foi configurado o termovisor com a emissividade, distância do termovisor ao isolador, temperatura refletida do objeto, temperatura ambiente e umidade. Com a utilização do termovisor foram capturadas 142 imagens de oito isoladores, ou seja, duas imagens de cada ponto de medição. Posteriormente estas imagens foram agrupadas e colocadas em um banco de dados.

A RIF captada pelo termovisor é influenciada diretamente tanto pela temperatura ambiente, umidade relativa, temperatura de reflexão, distância do objeto medido e emissividade. Contudo, todos estes parâmetros são ajustáveis no equipamento. Para as medições foram ajustados os parâmetros da seguinte maneira:

- Emissividade foi utilizado o valor de 0,94 (ALVARES, 2008);
- Distância de medição varia entre 5 m, 7,5 m e 10 m;
- Temperatura refletida 20°C (MANUAL DE TERMOGRAFIA INFRARED TRAINING CENTER, 2010);

- Para medição da umidade relativa do ar foi utilizado um termohigrômetro digital portátil com grau de exatidão de  $\pm 5\%$ . O instrumento foi posicionado em local próximo ao isolador ensaiado. Na Figura 32 é exibida uma fotografia do termohigrômetro utilizado para medição da umidade e temperatura ambiente.

Figura 32 – Fotografia do termohigrômetro utilizado para medição da umidade e temperatura ambiente.



Fonte: Próprio Autor.

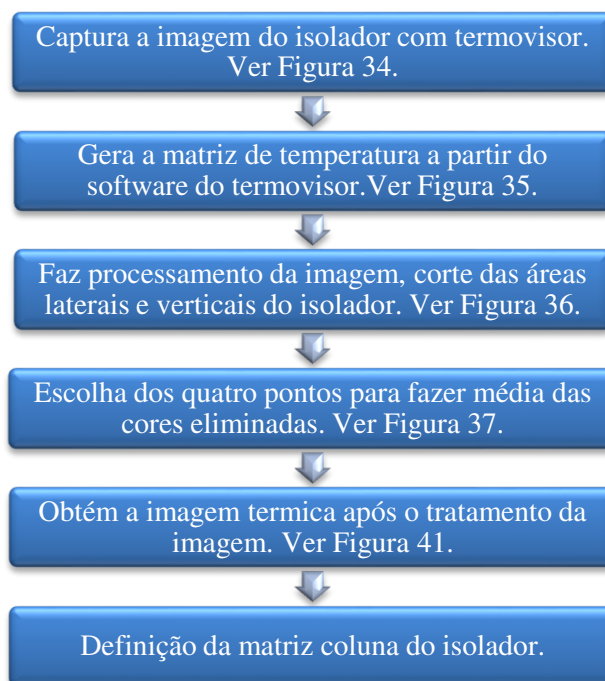
#### 4.2.4 Banco de dados

Um banco de dados foi criado de forma a agrupar as imagens dos isoladores, separando as imagens por lado de medição, distância de medição e sequência de captura da imagem.

#### 4.2.5 Processamento das imagens

O fluxograma das etapas necessárias ao processamento digital das imagens é exibido na Figura 33 e para o processamento foram utilizados os softwares Matlab, FLIR *QuickReport* Versão 1.2 e Excel 2013.

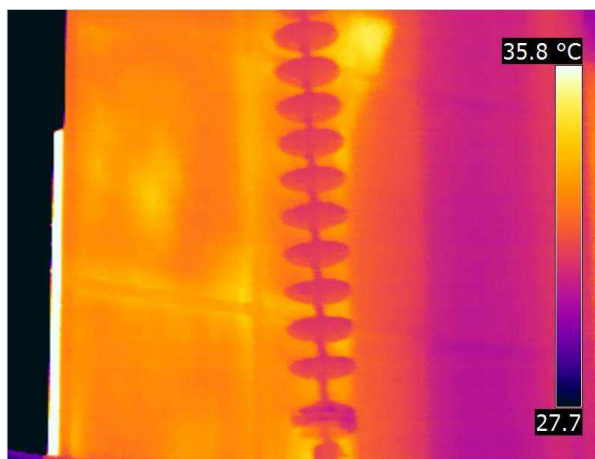
Figura 33 - Fluxograma do processamento de imagem.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 34 exibe a imagem capturada pelo termovisor antes de qualquer tratamento de imagem.

Figura 34 - Imagem capturada pelo termovisor.



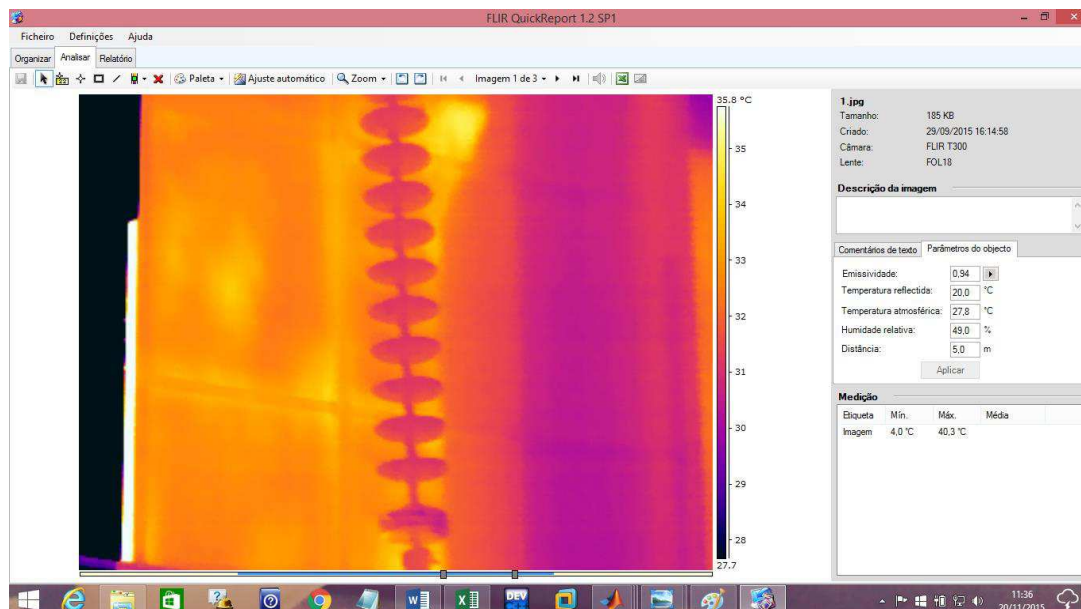
Fonte: Próprio Autor.

Com as imagens agrupadas no banco de dados foi utilizado o software FLIR *QuickReport* Versão 1.2 para analisar os dados capturados. O software transforma o mapa térmico da imagem capturada pelo termovisor em uma matriz  $A_{ixj}$ , em que  $i=240$  e  $j=320$ , sendo cada elemento é um dado de temperatura da imagem. Essa matriz contempla toda a imagem térmica, ou seja, além do objeto em estudo a imagem também captura possíveis reflexos de objetos, ruídos de fundos, objetos do laboratório e



lâmpadas acesas. Na Figura 35 é exibida a imagem de uma termografia de um isolador utilizando o software FLIR *QuickReport*.

Figura 35 - Imagem capturada no software FLIR QuickReport, geração da matriz de pontos de temperatura.

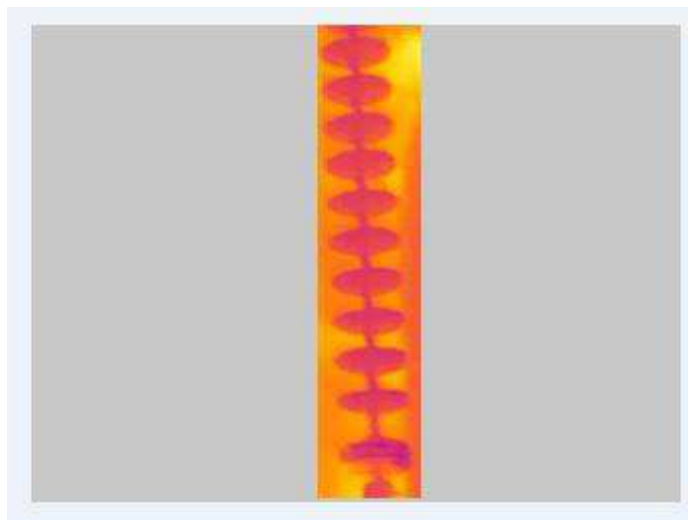


Fonte: Próprio Autor.

Deste modo, foi necessária uma técnica de processamento de imagens, para que seja quantificado somente a radiação infravermelha do isolador polimérico. O tratamento da imagem possibilitará eliminar os ruídos da imagem e transformar a matriz  $A_{240 \times 320}$ , em um vetor. Para o processamento da imagem foi utilizada a representação RGB.

Inicialmente a matriz que está em formato Excel (.XLS) é transformada para o formato de texto (.TXT). Em seguida é feito o carregamento da imagem do isolador e da matriz de temperaturas  $A_{ixj}$  associadas ao isolador, no software Matlab. Então, é executada a rotina de processamento da imagem. Na rotina do software são escolhidos de forma manual dois pontos para se fazer cortes verticais e horizontais no isolador de modo a eliminar a maior parte dos ruídos da imagem. Na Figura 36 é exibido a imagem do isolador após os cortes.

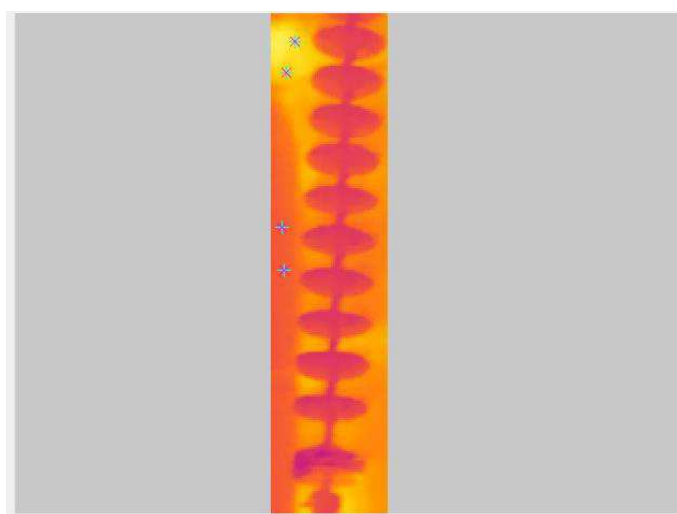
Figura 36 - Imagem após o primeiro processamento, com os cortes horizontais e verticais.



Fonte: Próprio Autor.

Em seguida são escolhidos quatro pontos, onde é feita uma média referente às cores escolhidas e suas proximidades. As cores são retiradas da imagem, permitindo a eliminação das cores de fundo próximas ao isolador. Neste processo, alguma informação de temperatura do isolador pode ser perdida. Para minimizar incertezas, deve-se atentar para não se selecionarem tons que representam as temperaturas mais altas e mais baixas do isolador. Na Figura 37 é exibida uma imagem com os quatro pontos escolhidos na imagem.

Figura 37 – Imagem com os quatro pontos na imagem selecionados para eliminar os ruídos da imagem.



Fonte: Próprio Autor.



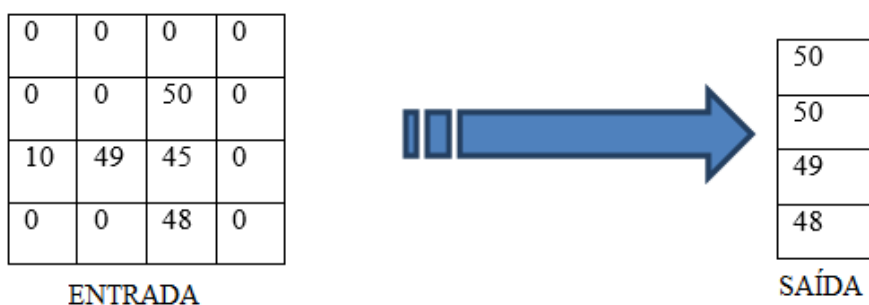
Neste ponto do processamento da imagem tem-se uma matriz com 240 linhas e 320 colunas, mas tudo o que não faz parte do isolador transformou-se em zeros na matriz. O passo seguinte é fazer com que essa matriz possa ser significativamente representada por um vetor. Para isso é necessário definir-se qual a coluna da imagem que define de forma satisfatória o perfil térmico do equipamento.

Para a definição de qual valor vai compor o vetor de temperaturas foram adotados os critérios 1, 2 e 3.

1. Se todas as colunas de uma mesma linha for zero, é utilizada a temperatura diferente de zero mais próximo da linha superior ou inferior.
2. Se os valores de temperatura das duas colunas próximas forem diferentes de zero, se faz uma média dos valores.
3. Se em uma mesma linha há valores diferentes de zero em diferentes colunas é escolhido sempre o maior valor de temperatura.

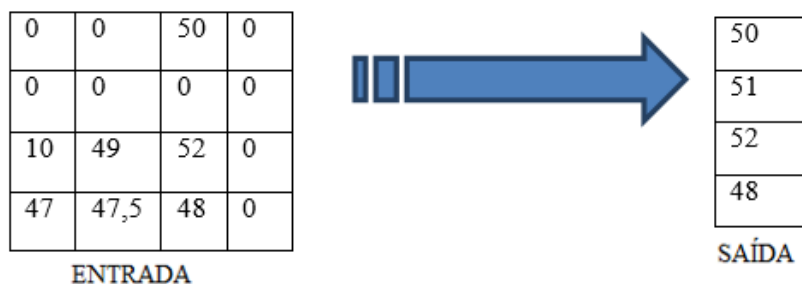
Nas Figura 38, 39 e 40 são apresentados exemplos em matrizes reduzidas de ordem 4, nestes casos foram representados os valores da temperatura que será armazenado no vetor de saída correspondente aos critérios 1, 2 e 3, respectivamente. As matrizes foram criadas para exemplificar qual será a saída do vetor de temperaturas para uma determinada entrada de pontos de temperatura, no lado esquerdo tem-se a matriz de entrada e no lado direito o vetor correspondente as saídas de temperaturas.

Figura 38 - Exemplo de saída de dados utilizando o critério 1.



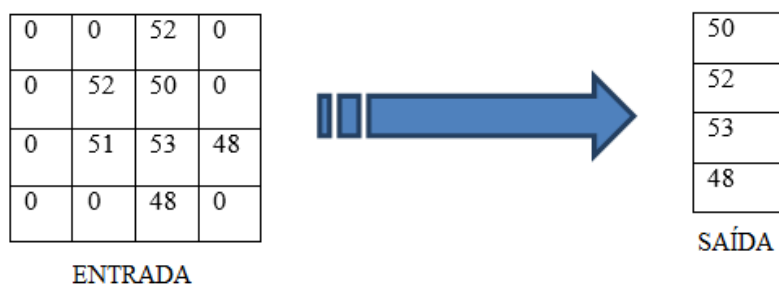
Fonte: Próprio Autor.

Figura 39 - Exemplo de saída de dados utilizando o critério 2.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 40 - Exemplo de saída de dados utilizando o critério 3.

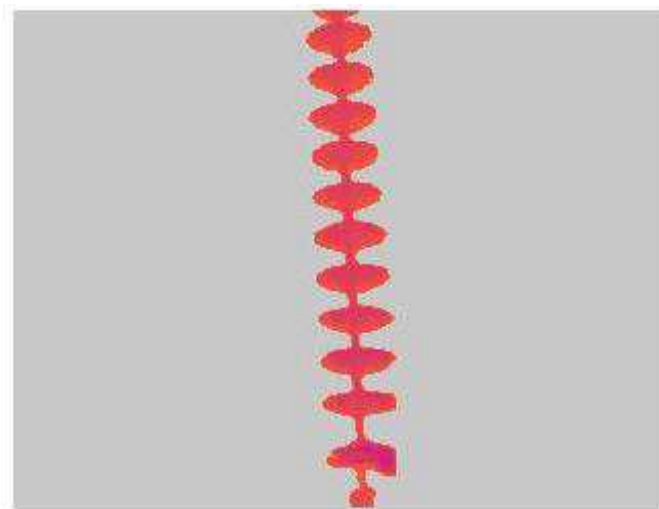


Fonte: Próprio Autor.

Com a utilização dos critérios 1, 2 e 3 sempre é escolhido o maior valor de temperatura entre todas as colunas, desta forma temperaturas menores como das ferragens ou aletas não farão parte do vetor de temperaturas que representa o isolador.

Na Figura 41 é exibida a imagem do isolador após o PDI. A imagem agora permite a seleção de uma coluna com os valores de temperatura ao longo do isolador. Uma nova seleção foi feita utilizando o software Excel 2013, onde são escolhidos os valores dos dez menores valores de temperatura e dos dez maiores. O vetor obtido foi utilizado como dados de entrada da rede neuronal.

Figura 41 - Imagem após o processamento digital da imagem.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.6 Rede neuronal desenvolvida

Com o intuito de reduzir a subjetividade do processo após o processamento da imagem foi desenvolvida no Toolbox do Matlab uma rede neuronal tipo supervisionada para classificação dos isoladores.

Para entrada da rede neuronal foram processadas 142 imagens, destas imagens 100 foram utilizadas para treinamento, 21 para validação dos dados de entrada e 21 para teste de desempenho da RNA. A classificação do estado de criticidade do isolador foi o parâmetro de saída da rede e foram consideradas três possíveis saídas: (1) isolador bom, (2) isolador médio, (3) isolador crítico.

Para classificar o estado de criticidade do isolador foram utilizados os critérios de avaliação da Tabela 1 que é baseada nas recomendações feitas pela 'International Electrical Testing Association' (EPPERLY et al, 1999, p. 34). Na Tabela 6, tem-se os critérios de classificação dos isoladores desta pesquisa. Desta forma o estado de criticidade do isolador foi considerado Bom quando, ao longo do corpo de isolador, as diferenças de temperaturas são menores que 4°C. O estado de criticidade do isolador foi considerado Médio quando, ao longo do corpo de isolador, as maiores diferenças de temperaturas ocorreram entre 4°C a 15°C. O estado de criticidade do isolador foi considerado Crítico quando, ao longo do corpo de isolador, ocorreram diferenças de temperaturas superiores a 16°C.

O outro parâmetro de entrada da rede neuronal foram as diferenças de temperaturas do equipamento com relação ao meio ambiente. Para este caso diferenças

de temperaturas de até 4°C, o isolador é considerado “Bom”. Para diferenças de temperaturas entre 4°C a 20°C, o isolador é considerado “Médio”. Para diferenças acima de 20°C entre isolador e meio ambiente o isolador é considerado “Crítico”. Na Tabela 6 é exibida de forma resumida os parâmetros de classificação dos isoladores poliméricos.

Quando os critérios de saída da rede neuronal apresentam divergência, ou seja, pelo parâmetro de diferença de temperatura no corpo do isolador há uma classificação e pelo parâmetro de diferença de temperatura entre o isolador e o meio ambiente há outra classificação, foi adotado um critério conservador de forma que sempre é escolhida a classificação mais crítica para o isolador.

No apêndice A é exibida uma tabela com todas as classificações da RNA, é apresentado também as temperaturas mínimas e máximas de cada isolador a partir de sua imagem termográfica e a temperatura ambiente, também é apresentada a classificação de cada imagem segundo a classificação da RNA.

Tabela 6 - Parâmetros de classificação dos isoladores poliméricos.

Temperatura	Critério de criticidade		
	Bom	Médio	Crítico
Diferença de temperatura no isolador	<4°C	4°C a 15°C	>15°C
Diferença de temperatura isolador - ambiente	<4°C	4°C a 20°C	>20°C

Fonte: (EPPERLY at al, 1999, p. 34)

No próximo capítulo será apresentado os resultados e análise da pesquisa, será feita uma análise dos ângulos de medições e as divergências de diagnóstico entre a inspeção visual e a utilização da técnica abordada na pesquisa.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados, inicialmente, os resultados obtidos com a inspeção visual do estado de degradação dos isoladores utilizando o IDI. Em seguida, serão apresentados os resultados das termovisões, além das influências das variações de distâncias e ângulos de medições. Também serão apresentados os resultados obtidos após o processamento das imagens captadas com a câmera detectora de radiação infravermelha. E, por fim, a rede neuronal implementada será apresentada e aplicada, permitindo a classificação do estado de degradação dos isoladores.

A análise da criticidade dos isoladores, pela inspeção visual foi feita em 17 isoladores, conforme foi descrito no sub-item Classificação de isoladores do item Métodos. Para esta pesquisa foram escolhidos oito dentre os 17. Na Tabela 7, tem-se o resultado da classificação por inspeção visual dos isoladores.

Tabela 7- Ranking do índice de qualidade.

Ranking do índice de qualidade		
Isolador	Índice de degradação do isolador (IDI)	Estado do isolador
Isolador1	0	Bom
Isolador3	0	Bom
Isolador7	3,7	Médio
Isolador8	3,8	Médio
Isolador16	3,8	Médio
Isolador5	5,4	Crítico
Isolador11	8,1	Crítico
Isolador10	8,3	Crítico

Fonte: Próprio Autor.

Quando se analisa as temperaturas dos isoladores em relação ao ângulo de observação, constatou-se que os níveis de temperaturas apresentam valores distintos, isto é, houve variações significativas das temperaturas máximas e mínimas nos isoladores quando as imagens foram feitas em ângulos diferentes. Pela constatação conclui-se que é imprescindível a medição da temperatura em toda a superfície externa do isolador, tomando como partida vários ângulos diferentes.

No apêndice B são exibidos todos os gráficos dos perfis de temperatura dos isoladores com suas variações de ângulos e distâncias de medições, também são exibidos três gráficos que sintetizam as variações de temperatura de todos os isoladores no ângulo 0°, desta forma pode-se diferenciar os isoladores de acordo com suas classificações de criticidade.

Para as distâncias de medições escolhidas, 5; 7,5 e 10 m, não foram constatadas variações significativas de temperaturas no isolador. Há de se considerar que as distâncias e suas variações utilizadas em laboratório podem ser pequenas.

As análises de classificação foram feitas se baseando nos dois parâmetros de entrada da rede neuronal. Assim, por uma questão de conservadorismo, a classificação final se baseia no critério mais severo ou crítico.

Das 142 imagens analisadas pela rede neuronal, tem-se 71 ou 50% das imagens indicando o grau de criticidade: Isolador Bom; 53 ou 37,3% das imagens indicando o grau de criticidade: Isolador Médio; e 18 ou 12,7% das imagens indicando o grau de criticidade: Isolador Crítico, para este grau recomenda-se a troca ou substituição do isoladores com urgência.

Após o processamento das imagens e classificação da rede neuronal tem-se que os isoladores objeto da pesquisa foram classificados de acordo com a Tabela 6. A rede neuronal acertou em 100% a classificação dos isoladores nos três parâmetros quando foram observados os critérios da temperatura com saída da rede neuronal, tendo como referência as variações de temperatura da Tabela 6. Após comparar os resultados da inspeção visual e do uso da ferramenta PDI e RNA foi observado diferenças de classificação de cinco dos oito isoladores do experimento, conforme pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação do grau de criticidade dos isoladores por inspeção visual e após utilizar PDI e RNA.

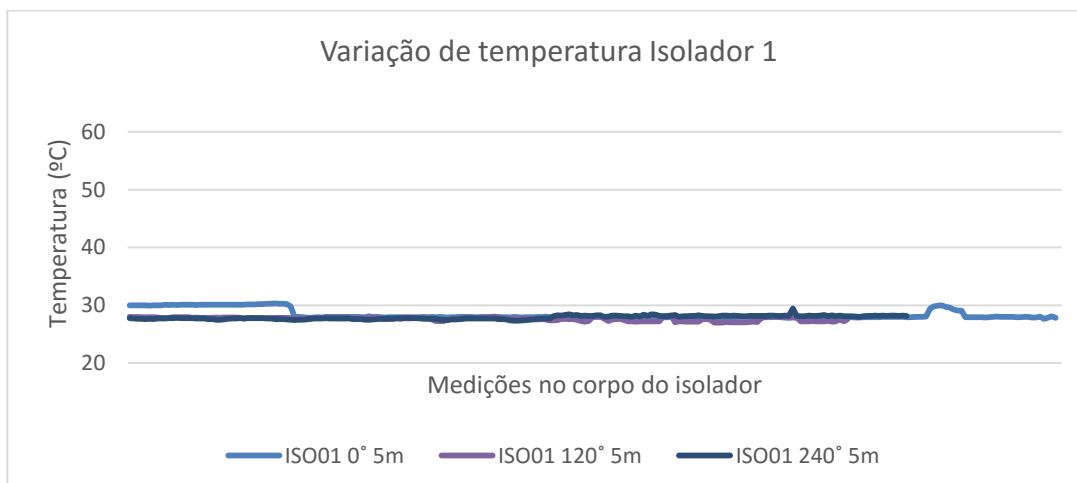
Isolador	Inspeção visual	Utilizando PDI e RNA	Acerto
Isolador 1	Bom	Bom	Sim
Isolador 7	Médio	Bom	Não
Isolador 16	Médio	Bom	Não
Isolador 3	Bom	Médio	Não
Isolador 5	Crítico	Médio	Não
Isolador 8	Médio	Médio	Sim
Isolador 11	Crítico	Médio	Não
Isolador 10	Crítico	Crítico	Sim

Fonte: Próprio Autor.

O isolador 1 foi classificado como “Bom” pela inspeção visual e pelo método desenvolvido no presente trabalho utilizando de PDI e RNA. As medições de temperatura indicaram que o isolador apresentou variações de temperatura em seu corpo menores que 4°C. Portanto o isolador foi classificado como “Bom”.

Na Figura 42 é exibido o gráfico do perfil de temperatura do isolador 1, no gráfico manteve-se a distância de medição constante em 5 m, já que a variação da distância de medição não se mostrou relevante para as distâncias medidas no laboratório e variou-se o ângulo de medição em 0°, 120° e 240°. Pôde-se notar que ao longo de todo o corpo do isolador não houve grande variação de temperatura ficando estas variações menores que 4°C para todos os ângulos de medições.

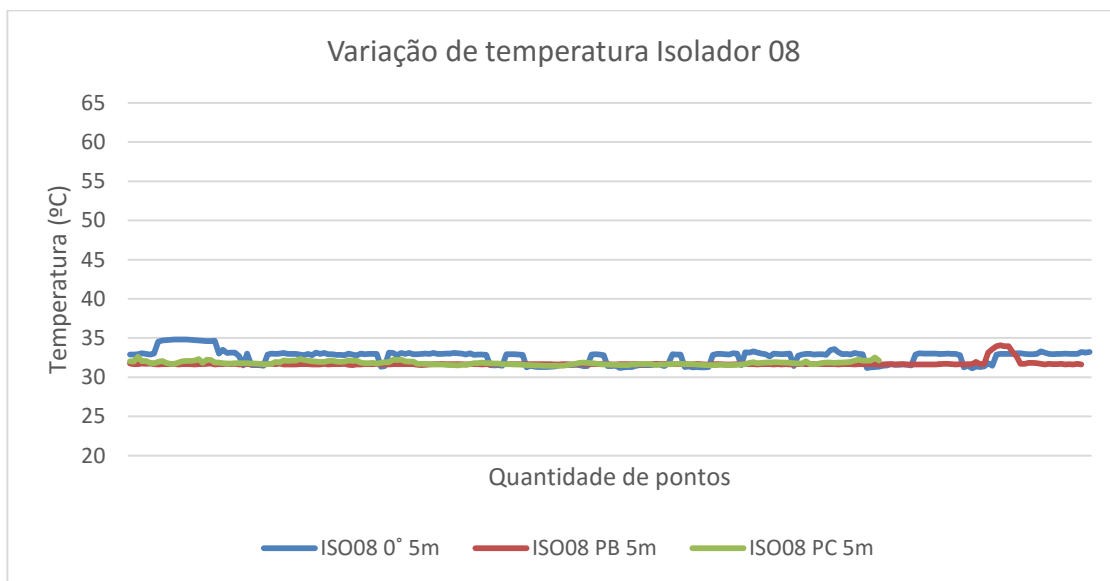
Figura 42 – Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 1.



Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar a classificação o isoladores 8, foi observado que ele também manteve a classificação “Médio” igual a inspeção visual. Na Figura 43 é exibido o gráfico do perfil térmico do corpo do isolador mantendo a distância de medição em 5 m e variando os ângulos de medição em 0°, 120° e 240°, pôde-se observar que ao longo do corpo do isolador há variações de temperaturas um pouco acima de 4°C.

Figura 43 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 8.

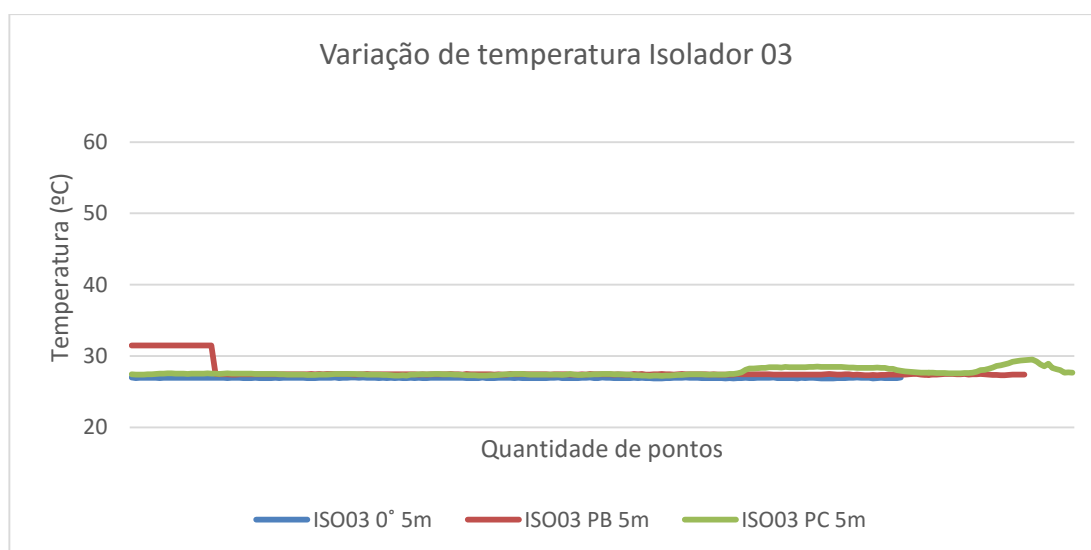


Fonte: Próprio Autor.

O isolador 3 teve uma classificação “Bom” na inspeção visual e médio na inspeção utilizando a metodologia da pesquisa, o gráfico exibido na Figura 44 fornece a variação de temperatura ao longo do isolador. Pode-se observar que a temperatura ultrapassou os 4°C ao longo do corpo do isolador, embora a ultrapassagem seja mínima e apenas em um dos ângulos de medição. Dessa forma, recomenda-se o acompanhamento do isolador, com futuras medições de modo que seja acompanhada a evolução de temperaturas ao longo do tempo.



Figura 44 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 3.

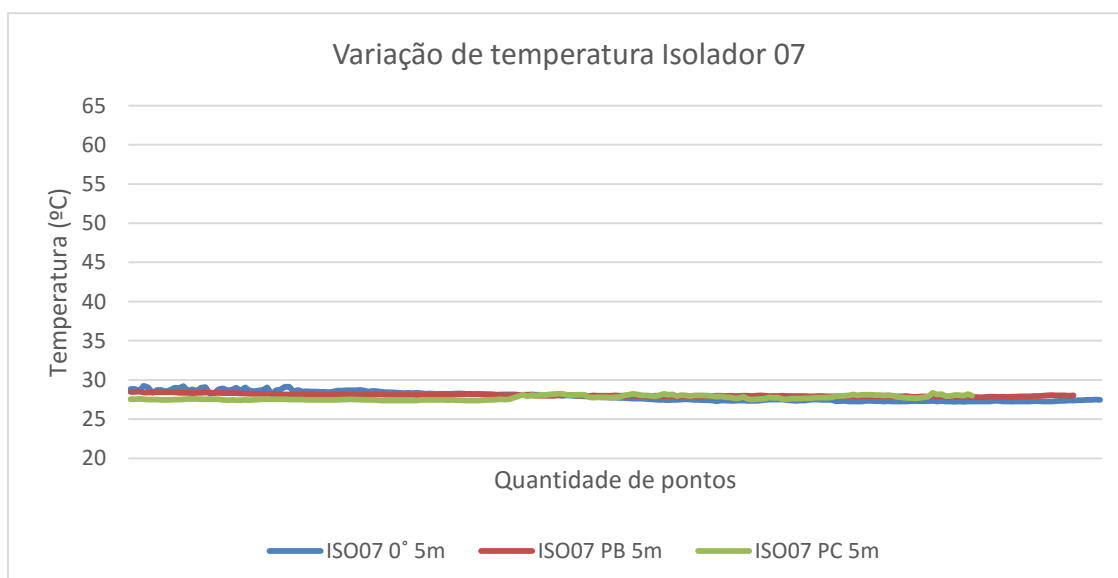


Fonte: Próprio Autor.

Os isoladores 7 e 16, apesar de terem pequenas falhas nas suas saias, as falhas não provocam aumento de temperatura, portanto os isoladores tiveram a classificação “Bom”, pelo critério da temperatura, diferente dos isoladores 1 e 8, houve divergência entre a classificação visual e a classificação utilizada a metodologia desta pesquisa.

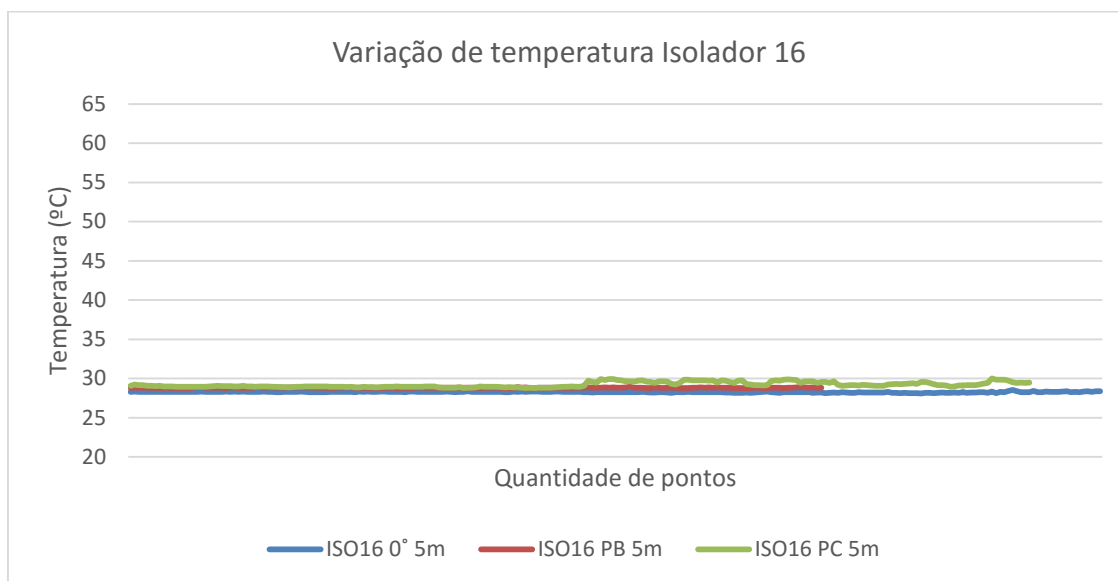
Nas Figura 45 e 46 são exibidos os gráficos com as temperaturas ao longo dos isoladores 7 e 16, pode-se notar que os gráficos são quase uma reta e as variações de temperatura ao longo do corpo dos dois isoladores são menores que 4°C, com a distância de medição fixada em 5 m e variando os ângulos de medições.

Figura 45 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 7.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 46 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 16.

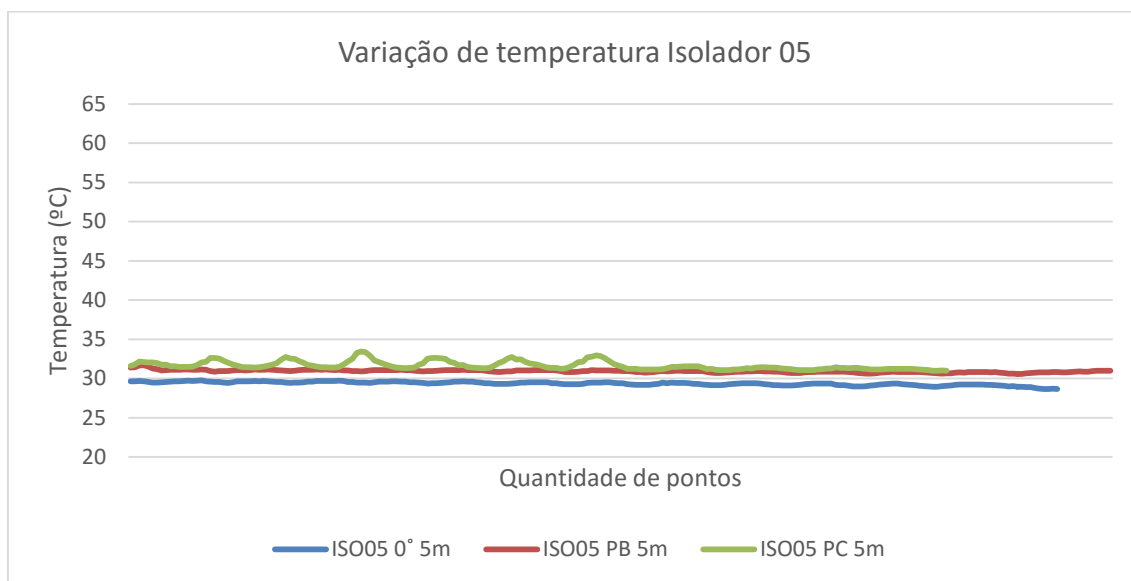


Fonte: Próprio Autor.

Os isoladores 5 e 11 foram classificados como “Médio” pelo critério de temperatura e pela inspeção visual tiveram a classificação “Crítico”. Uma nova inspeção visual foi realizada e constatou que os isoladores apresentavam defeitos físicos externos mais severos, tais como saias danificadas e ferrugem nas suas ferragens. Contudo, os defeitos não foram suficientes para proporcionar a elevação mais acentuada da temperatura. A aplicação complementar de outras técnicas pode identificar/classificar o isolador como “Crítico”.

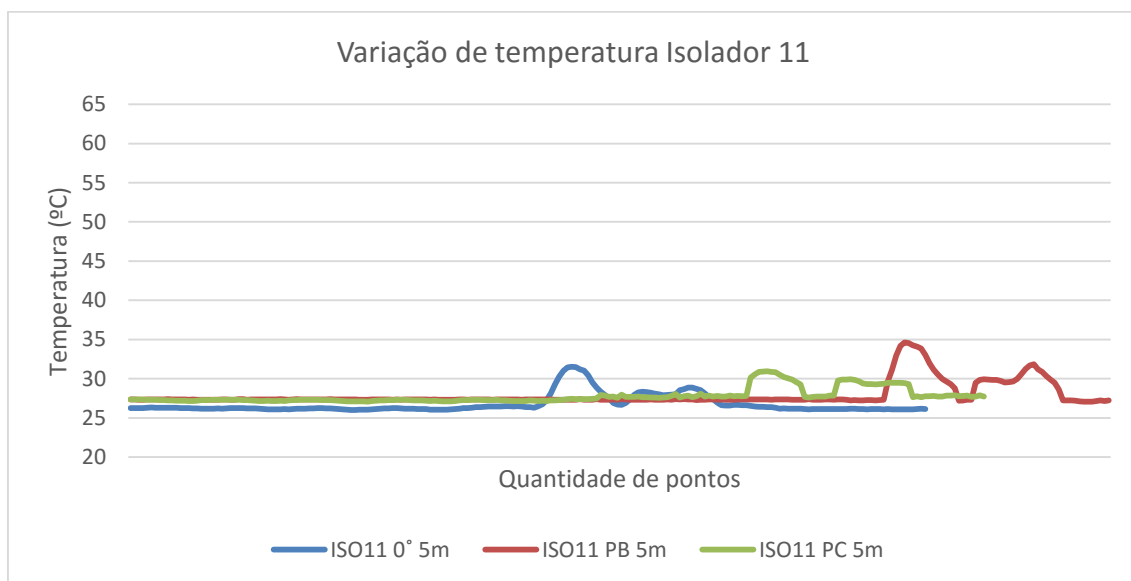
Nos isoladores 5 e 11, como pode ser observado no gráficos da Figura 47 e Figura 48, existem variações de temperaturas maiores que 4°C em ambos os isoladores. Mas no isolador 11 a variação de temperatura ao longo do corpo do isolador é maior, por exemplo na fase 120° do isolador 11, há uma variação de temperatura próxima a 10°C. Como esperado quando há variações mais elevadas de temperatura no corpo do isolador a parte mais quente fica concentrada nas últimas saias do isolador no seu lado fase.

Figura 47 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 5.



Fonte: Próprio Autor.

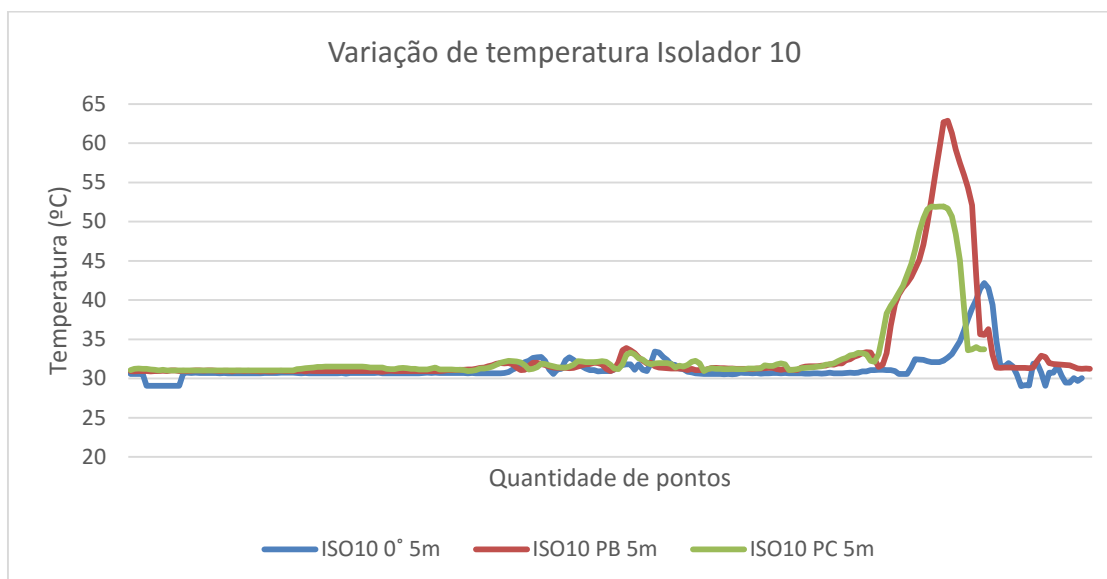
Figura 48 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 11.



Fonte: Próprio Autor.

O isolador 10 apresentou classificação “Crítica” em ambos os critérios de análise, um gráfico com o perfil térmico do isolador é exibido na Figura 49. Podem-se ainda observar grandes variações de temperaturas a depender do ângulo de medição da temperatura, também pode-se observar que as temperaturas mais altas estão no lado fase do isolador.

Figura 49 - Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do isolador 10.



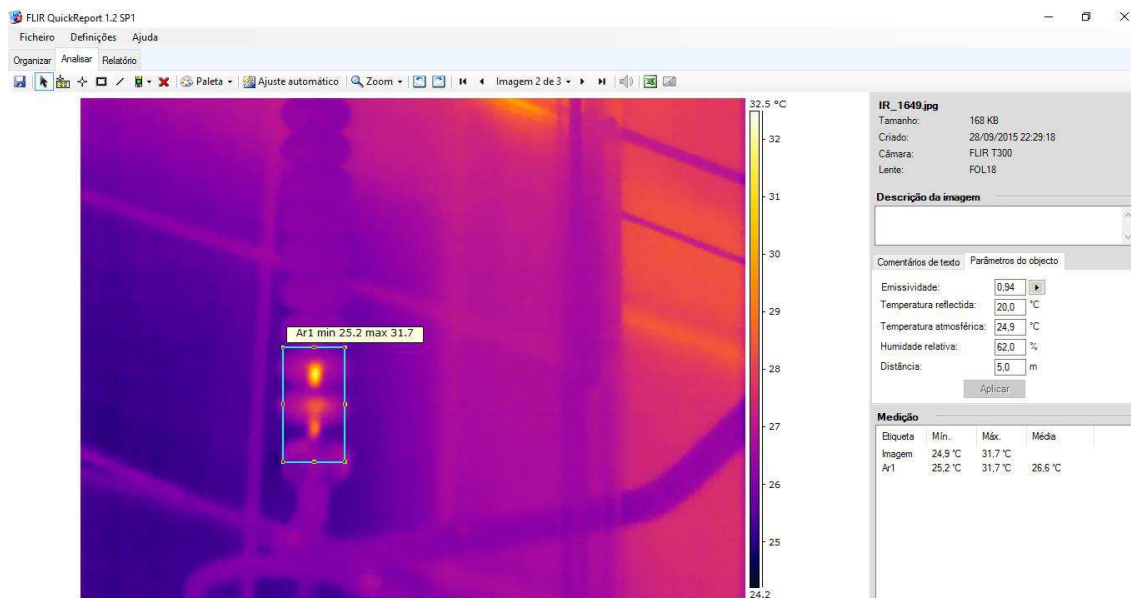
Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar as variações de ângulos conclui-se que existe a necessidade de medições de temperatura por RIF em toda área superficial do isolador, ângulos diferentes. Como exemplo pode-se citar o isolador 11, pela medição no ângulo 120° apresentou o variação máxima de temperatura de 3,8°C, deste modo sua classificação foi considerada “Bom”, já no ângulo 240° apresentou variação de temperatura de 7,5°C, sendo classificado como “Médio”.

No experimento adotou-se o critério conservador, sempre que houve divergência de classificação entre temperaturas de ângulos diferentes ou entre temperatura do isolador e o isolador e meio ambiente.

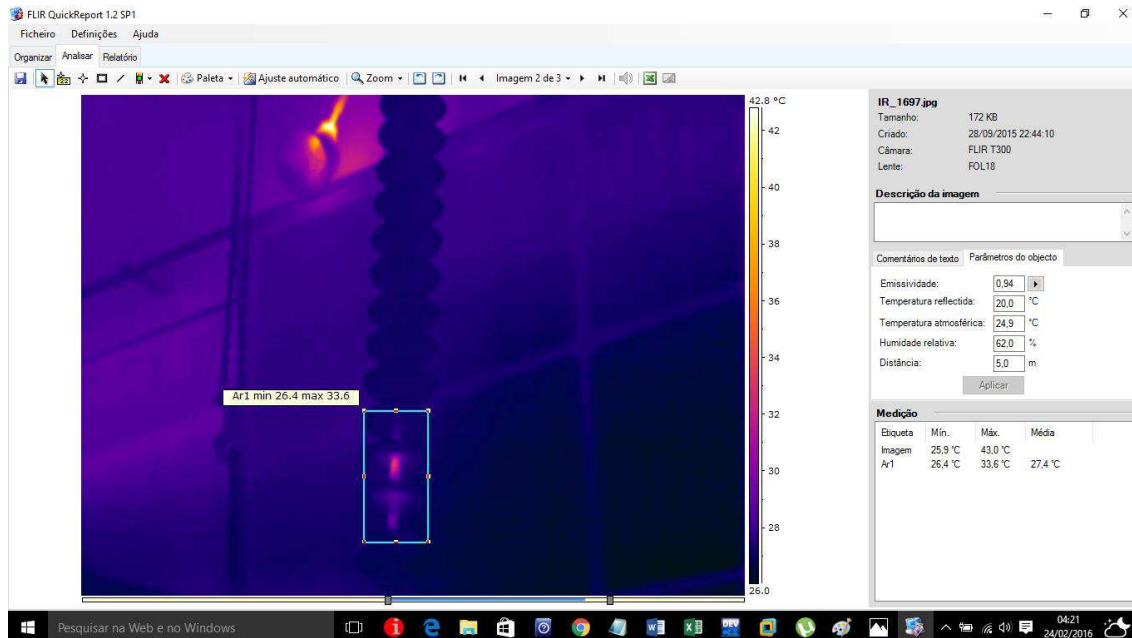
Na Figura 50 é exibida a imagem do Isolador 11, lado 0°, na área de medição da última saia ao anel de equalização tem-se uma temperatura máxima de 31,7°C, na Figura 51 é exibida uma imagem do isolador 11 no ângulo de 120°, pode-se notar que a temperatura máxima da área entre a última saia e o anel de equalização é 33,6°C, na Figura 52 é exibida a medição do isolador 11 no ângulo de 240°, pode-se notar que a temperatura máxima 30,8°C, desta forma para um mesmo isolador em ângulos diferentes podem ter classificações diferentes.

Figura 50 – Imagem do isolador 11, medição no lado 0°, área de medição de temperatura máxima e mínima da última saia ao anel equalizador.



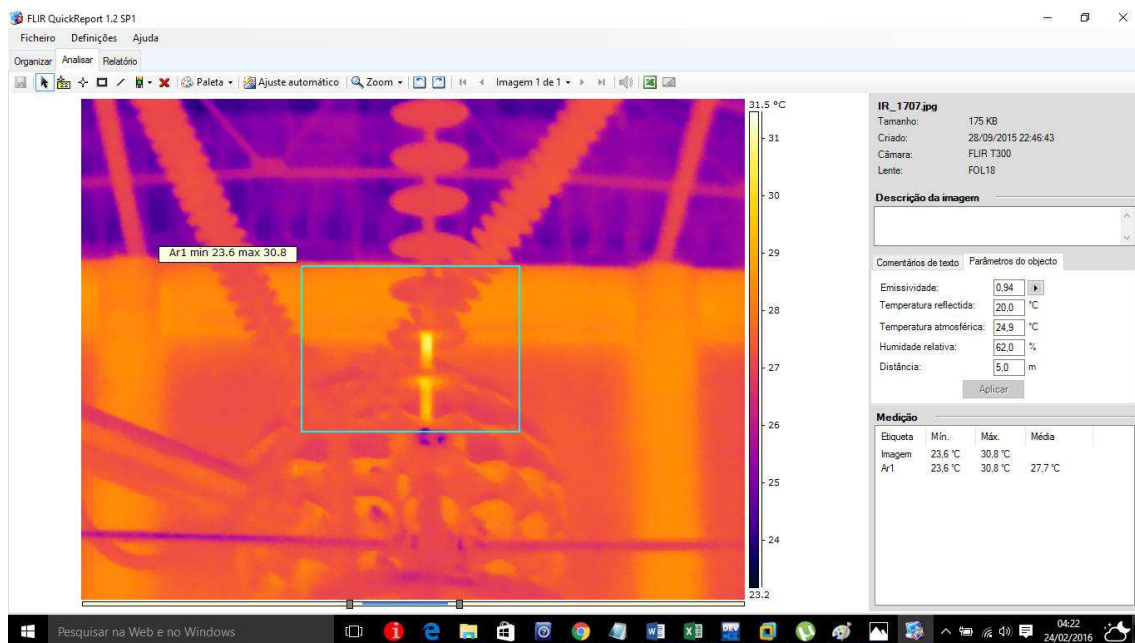
Fonte: Próprio Autor.

Figura 51 – Imagem do isolador 11, medição no lado 120°, área de medição de temperatura máxima e mínima da última saia ao anel equalizador.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 52 – Imagem do isolador 11, medição no lado 240°, área de medição de temperatura máxima e mínima da última saia ao anel equalizador.



Fonte: Próprio Autor.

A partir das análises foi observado que uma classificação levando em conta apenas a inspeção visual é insuficiente. Além de aumentar os custos de manutenção, não existe uma confiabilidade nos resultados, podendo conduzir a falso negativo, com a indicação da permanência de isoladores, isto é, um isolador que na inspeção visual apresentou-se como Bom e na classificação pelo critério da temperatura o mesmo isolador foi classificado como Crítico, dessa forma pondo em risco a confiabilidade do sistema elétrico.

No presente capítulo foi verificado os resultados da pesquisa, além das análise da influência dos ângulos e das distâncias de medição, no próximo capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho e algumas propostas para trabalhos futuros sobre isoladores poliméricos.

## 6. CONCLUSÃO

---

No presente trabalho, foram analisados isoladores poliméricos para linhas de transmissão de 230 kV, com diferentes níveis de degradação e tempos uso em campo, com uma câmera de detecção de radiação infravermelha. As imagens captadas pela câmera de detecção de RIF foram processadas, de modo a eliminar os ruídos das imagens e foi utilizada uma rede neuronal para classificar os isoladores pelo seu grau de criticidade: isolador bom, isolador médio e isolador crítico. O sistema tinha como objetivo o auxílio à tomada de decisão quanto à necessidade de intervenção ou não aos isoladores poliméricos.

Pelos resultados pode-se concluir que a inspeção visual é ineficiente na classificação dos isoladores poliméricos de forma confiável. Métodos com maior grau de confiabilidade, tais como o proposto neste trabalho são necessários, contudo não suficientes.

O processamento de imagem utilizando RGB se mostrou eficiente no tratamento das imagens e eliminação dos ruídos existentes nas imagens, diferente do que acontece quando imagens são tratadas em escala de cinza. As imagens coloridas proporcionam ao operador maior facilidade de interpretação das imagens após o PDI, já que o operador continua a verificar imagens com a facilidade de distinguir diferenças de temperatura como diferenças entre cores.

Pelos resultados, conclui-se que existe a necessidade de medições de temperatura por RIF em toda área superficial do isolador, ângulos diferentes.

As distâncias de medição, entre o termovisor e o isolador, neste experimento, não afetaram os valores da temperatura medidos. Vale salientar que as variações foram pequenas.

A técnica proposta neste trabalho, para a classificação do nível de degradação dos isoladores usando processamento digital de imagens e rede neurais artificiais, apresentou resultados promissores, em conformidade com os resultados obtidos nos ensaios. Assim, esta ferramenta se apresenta como uma das técnicas eficientes no auxílio à tomada de decisões quanto à necessidade de intervenção ou não aos isoladores. Enfatiza-se que isoladamente a técnica não é suficiente para o diagnóstico de isoladores, contudo pode ser de grande contribuição.

## 6.1 Trabalhos futuros

Como continuação a pesquisa realizada, propõe-se:

- Desenvolvimento de um algoritmo não assistido para classificação de isoladores poliméricos utilizando imagens termográficas;
- Realizar medições com termovisor em linhas de transmissão do sistema elétrico;
- Realizar mais medições em outros isoladores tanto em laboratório quanto em campo de forma que se tenha um banco de dados maior;
- Associar a medição de RIF a outras técnicas de inspeção, tais como raios-X, medição de ruído ultrassônico, corrente de fuga e radiação ultravioleta;
- Realizar medições de descargas parciais conforme a IEC 60270, de modo a detectar possíveis defeitos internos ao isolador e fazer comparações dos resultados obtidos no experimento.



## REFERÊNCIAS

- ANEEL. Disponível em: <<http://www.aneel.com.br>>. Acesso em 10/06/2015.
- ANDRADE, D. R. R. **Termografia aplicada na manutenção preditiva de sistemas elétricos RIT**. Revista Inovação Tecnológica Volume 5, número 1 – 2015 ISSN: 2179-2895.
- ALVARES, R. C. **Diagnóstico de falhas em para raios utilizando termografia**, pp 96. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008.
- ANEEL. **Resolução 63/2004**, Cap II, Art. 14, Brasília, DF, 2004.
- BARROS, W. P. P. **Análise do Efeito Corona para Diagnóstico de Isoladores Poliméricos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2011.
- BATTENFELDIMT, Disponível em: <<http://www.battenfeldimt.com/en/home.html>>. Acesso em 25/03/2015.
- DIAHAM, S. **Detection of joule heating in polyimide films at high electric field and high temperature by infrared thermography**. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2014 IEEE Conference on Oct. 2014.
- E. M. El-Refaie, M. K. Abd Elrahman and M. Kh. Mohamed. **Compose insulators profile optimization using particles sward algorithm and finite element method**. Faculty of Engineering, Helwan University – Cairo, Egypt. The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015.
- FERREIRA, T. V. **Curso de isoladores um panorama**. pp 1-15, Recife, 2012.
- FERREIRA, T. V. **Estimação Inteligente da poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos VECSE do Ruído Ultrassônico**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Abril 2011.
- FERREIRA, T. V. **Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2007.
- FIELD GUIDE. **Visual inspection of polymer insulators**. EPRI, Palo Alto, CA, 1013283, 2006.
- FLORENTINO, M. T. B.; MEDEIROS, M. V. B.; MEDEIROS, Y. L.; FERREIRA, T. V.; GERMANO, A. D.; COSTA, E. G. **Monitoring Polymeric**

**Insulators with an Ultrasonic Noise Based Technique.** ISH 19 - The 19th International Symposium on High Voltage Engineering. Pilsen, 2015.

- GIANELLI, B. F. **Caracterização do Efeito Corona em Isoladores Poliméricos do Tipo Bastão Submetidos à Poluição Salínica.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências, 2008.
- GUEDES, P. G. G. **Classificação das condições de degradação de isoladores poliméricos pelos níveis de radiação UV e a lógica Fuzzy.** Dissertação pela Universidade Federal de Campina Grande, julho 2015.
- GUIDE for Visual Identification of Deterioration & Damages on Suspension Composite Insulators, STRI Guide 5, 2003.
- GONZALES, E.G.C. **Propriedades dielétricas de composições de silicone para uso em isoladores de Linhas de Transmissão.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2001. Grupo III Linhas de Transmissão, GLT 009. Campinas: XVI SNPTEE, 2001.
- GORUR, R. S., CHERNEY E. A. and BURNHAM J. T. **Outdoors Insulators.** pp 56-64, Phoenix, Arizona, 1999.
- GORUR, R. S., MISHRA, J. **Electrical performance of RTV silicon rubber coatings, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation.** v. 3, n.2, p. 299 – 306, 1996.
- GUBANSKI, S. M. **Properties of silicone rubber housings and coatings, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation.** v. 27, n.2, p. 374 – 382, 1992.
- GUEDES, C. P. G. **Classificação das condições de degradação de isoladores poliméricos pelos níveis de radiação UV e a lógica Fuzzy.** 2015.
- HAYKIN, S.: **Redes Neurais – Princípios e prática.** 2ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- JANSSEN, F. **Influência dos parâmetros de envelhecimento nas propriedades elétricas de isoladores cerâmicos para sistemas de potência.** São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2005. Dissertação de Mestrado.
- JARRAR, I. **Utilizing Digital Image Processing Techniques to Evaluate the Condition of Non-Ceramic Insulators.** Department of Electrical Engineering, American University of Sharjah, Sharjah, UAE, 2015.

- JARRAR, I., K. Assaleh, and A. El-Hag. **Using a Pattern Recognition Based Technique to Assess the Hydrophobicity Class of Silicone Rubber Materials**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, in the press, 2014.
- JARRAR, I., A. El Hag and N. Qaddoumi. **Online techniques to detect defects in Non-Ceramic Insulators (NCI)**. GCC Cigre, Doha, Qatar, Nov-2010.
- ISOLADORES SANTANA, Disponível em: <<http://www.isoladoressantana.com.br/santana-nova>>. Acesso em 25/03/2015.
- BURNHAM, J. **Guideline for visual identification of damaged polymer insulators**. Transmission department, Juno Beach, 1998.
- KIM, S. H., CHERNEY, E.A. & HACKAM, R. **Effects of Filler Level in RTV Silicone Rubber Coatings Used in HV Insulators**. IEEE Transactions on Electrical Insulation, v.27, n.6, p.1065 - 1072, december 1992.
- KINDERSBERGER, J. et al. **Service performance, material design and applicaton of composite insulators with silicone rubber housing**. In: CIGRÉ SC 33-303. Paris: CIGRE SC 33-303, 1996. p. 1-5.
- LYANG GUO. **Analysis on internal defects of electrical equipments in substation using heating simulation for infrared diagnose**. North China Electric Power Research Institute – China, 2014.
- MAILLARD, P. **Curso Processamento digital de imagens**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.
- MANUAL DE TERMOGRAFIA INFRARED TRAINING CENTER, 2010.
- MARTINS, A. J. C. **Revestimento à base de silicone para isoladores de alta tensão**. In: SEMINÁRIO DE MATERIAIS DO SETOR ELÉTRICO, 1990.
- MOBEDJINA, M., JOHNNERFELT, B. & STENSTRÖM, L. **Design and testing of polymer-housed surge arresters**. March 2015.
- NASCIMENTO, C. P. O. **Introdução a técnicas de segmentação de imagens**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pará, 2010.
- NERI, M. G. G.; GOUVEIA, F. A. O.; COSTA, E. G.; SILVA, K. M.; FERREIRA, T. V. **Utilização de Redes Neurais na Identificação de Descargas Parciais**. SBSE -Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Belém, PA, 2010.

- NERI, M. G. G. **Avaliação de Técnicas de Monitoramento de Isoladores Poliméricos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.
- NIGRI, A. I. **Desempenho de Linhas de Transmissão. Ponto de Vista da Manutenção**. XV SNPTEE– Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu, PR, 1999.
- NÓBREGA, R. S. Da. **Modelo eletrotérmico de um para-raios de óxido de zinco: simulação e experimentos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, março de 2006.
- Polymer Insulator Survey 2002. **Utility Field Experience and In-Service Failures**. Volume 1007752, 2003.
- PHILPS A. **Review for the state of the art and application of polymer materials / insulation used in distribution class (12 - 46 kV class) substations**. EPRI, Palo Alto, CA, 1002627, 2003.
- QUEIRÓS, J. P. M. **Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores poliméricos com isoladores em materiais convencionais**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2013.
- QUEIROZ, Corina Jará de. **Análise de Transformações Geométricas para o Georeferenciamento de Imagens do Satélite CBERS-I**. Dissertação de Mestrado. UFRGS - CEPSRM, 2003. Disponível em: <[www.ufrgs.br/srm/DissertaçõesPos/A18.html](http://www.ufrgs.br/srm/DissertaçõesPos/A18.html)>. Acesso em abril 2006.
- RAHISHAM & RAHMAN, A. **Investigations of ZnO microvaristor for stress control on polymeric outdoor insulators**. Tese de doutorado, Cardiff University, 2012.
- REVISTA FURNAS, ANO XXXII N° 329, FEVEREIRO 2006.
- RODURFLEX. The history of RODURFLEX® – quite a long story covering more than 3 decades. Disponível em: <<http://www.lappinsulator.com/downloadcenter/catalogs.asp>>. Acesso em Junho de 2014.
- SARKAR D.K., Saleema N. 2010. **One-step fabrication process of superhydrophobic green coatings**. Surface and Coatings Technology. 204, 2483-2486.

- SHINOHARA A. H. **Aplicação da Radiografia Digital como Técnica Preditiva para Diagnóstico dos Equipamentos de Linhas de Transmissão e Subestações.** UFPE, 2007.
- SCHMUCK, F., TOURREIL, C. **Brittle fractures of composite insulators an investigation of their occurrence and failure mechanisms and risk assessment.** CIGRE WG, páginas 22–03, 2003.
- SILVA, A. M., **Curso Processamento digital de imagens de satélite.** Centro de Eventos da PUCRS - de 07 a 12 de outubro de 2001. Porto Alegre - RS. Disponível em [www.cartografia.org.br](http://www.cartografia.org.br). Acesso em: 19 fev. 2007.
- SOUSA, R. O. **Uma nova técnica de lavagem de isoladores de rede elétrica de distribuição.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2010.
- SOUZA, B. A. de. **Monitoramento e Diagnóstico de Isoladores Poliméricos Utilizando Processamento Digital de Imagens de Radiação Infravermelha.** Submetido ao SBSE 2016, Natal, RN, 2016.
- SPRING. **Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling.** Camara G, Souza RCM, Freitas UM, Garrido J. *Computers & Graphics*, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.
- SWIFT, D. A. **Hidrofobicity of silicone rubber insulators, some intriguing experimental findings.** In: CIGRÉ COLLOQUIUM, 1995. Zimbabwe: CIGRÉ Colloquium, 1995, p. 33 – 95.
- TAVARES, E. **Monitoramento e Diagnóstico de Para-Raios a ZnO através de Redes Neurais Artificiais.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2007.
- WANDERLEY NETO, E. T. **Monitoramento e Diagnóstico de Para-Raios a ZnO através de Redes Neurais Artificiais.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2007.
- YOUNG, H. M., SPELLMAN, C. A., HADDAD, A., WILLIAMS, D. L. **Quantification of polymeric insulator hydrophobicity using image processing techniques.** 12th International Symposium on High Voltage Engineering, (ISH' 2001).
- YOUNG LIU. **Induced by Discrete Water Droplets on Polymer Insulator,** Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University) School of Electrical Engineering and Automation Tianjin University, Tianjin 300072, China, 2015.

- YUNSEOG LIM, Younghong Kim, Hoseong Ahn, Sangbeom Kim, Kooyong Shin and Dongil Lee. **Failure cause analysis of 765 kV polymer insulators installed at thermal power plant switchyard.** Power System Lab., KEPCO Research Institute, Korea. The 18th International Symposium on High Voltage Engineering, Seoul, Korea, August, 2013.

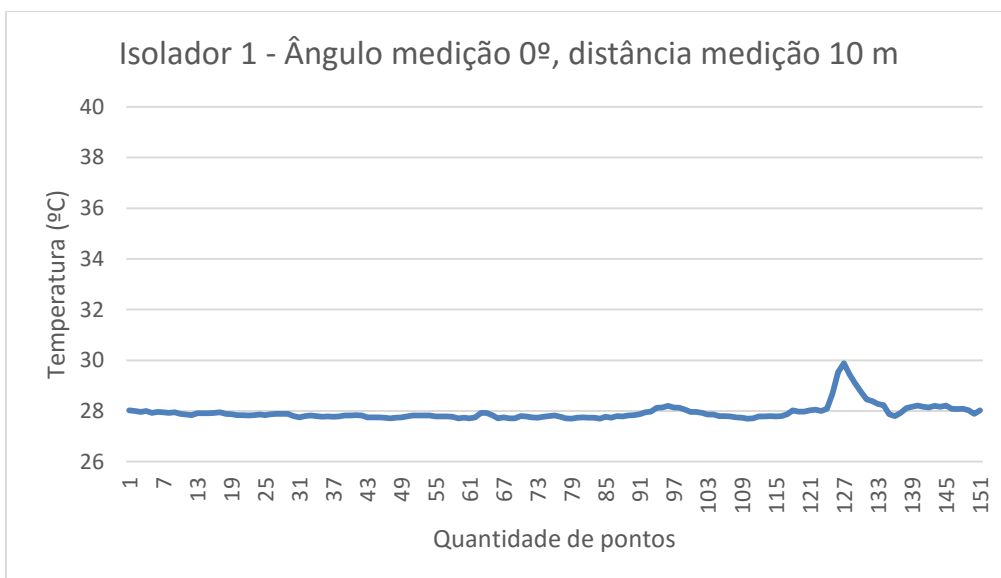
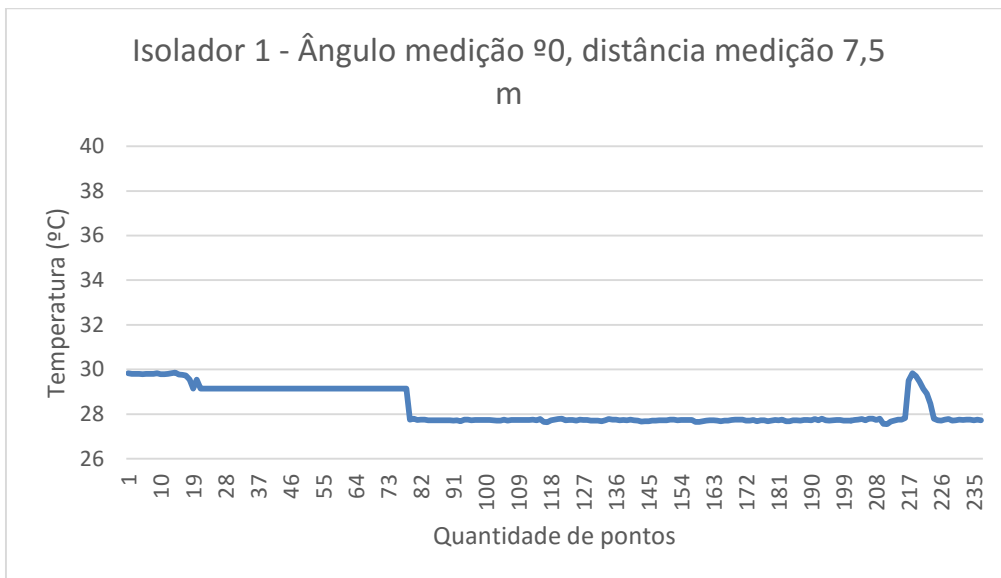
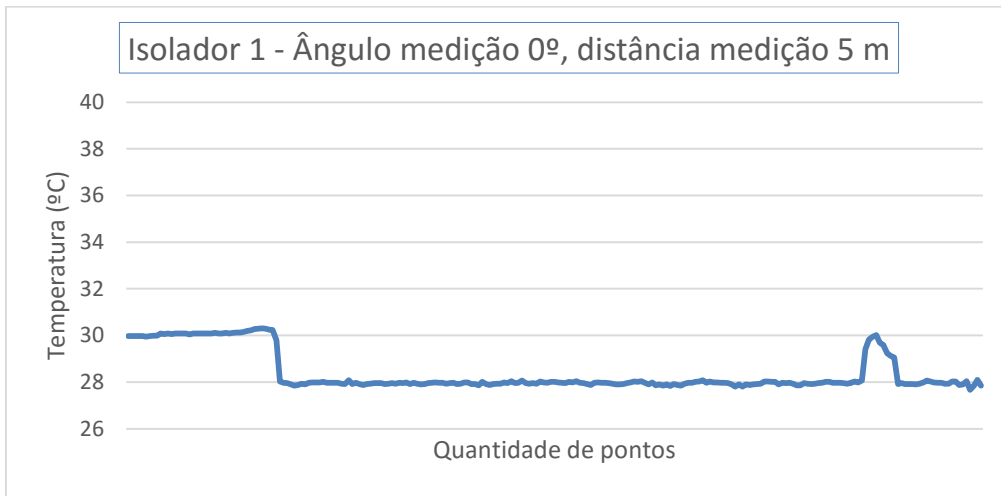
APÊNDICE A – Tabela da classificação das imagens termográficas utilizando PDI e RNA.

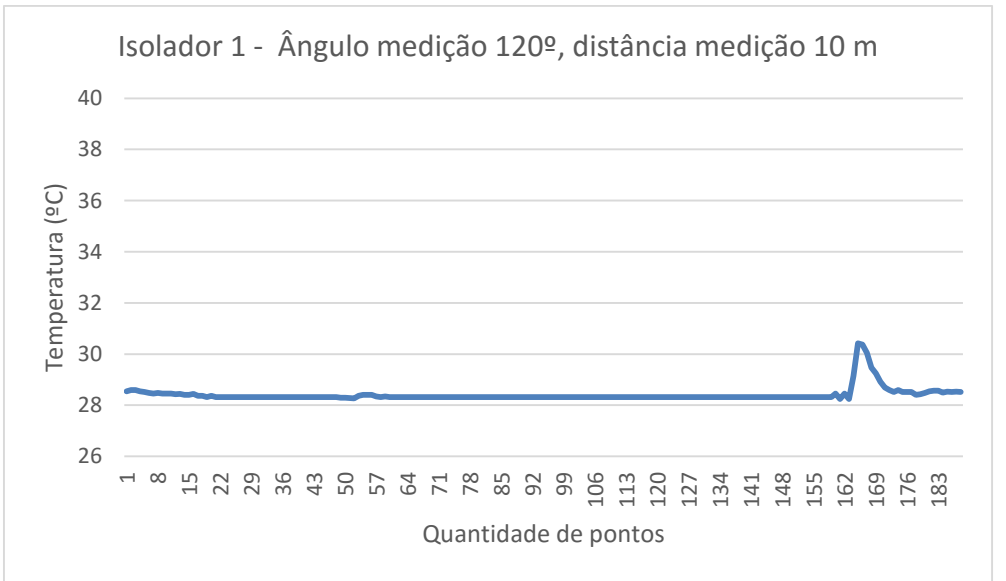
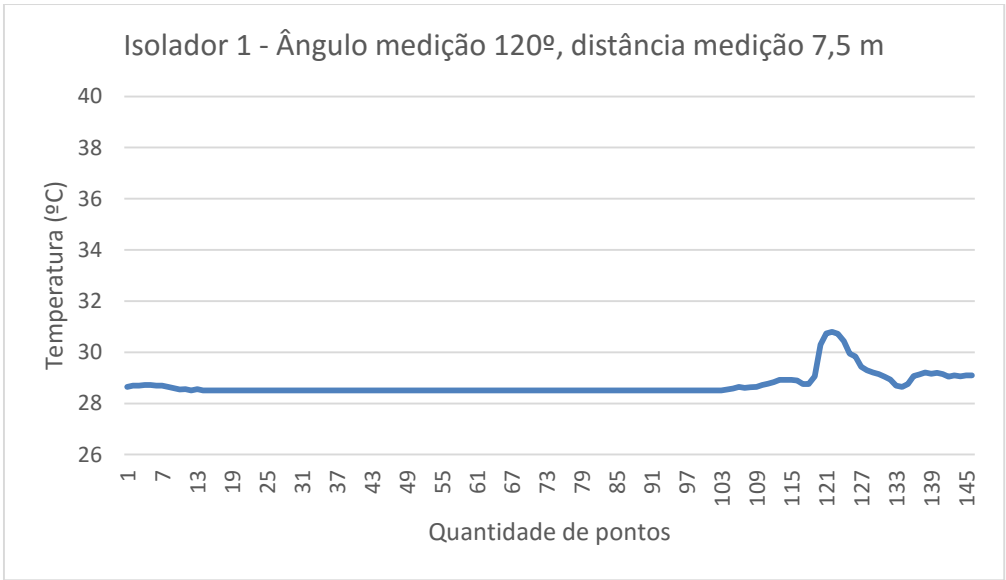
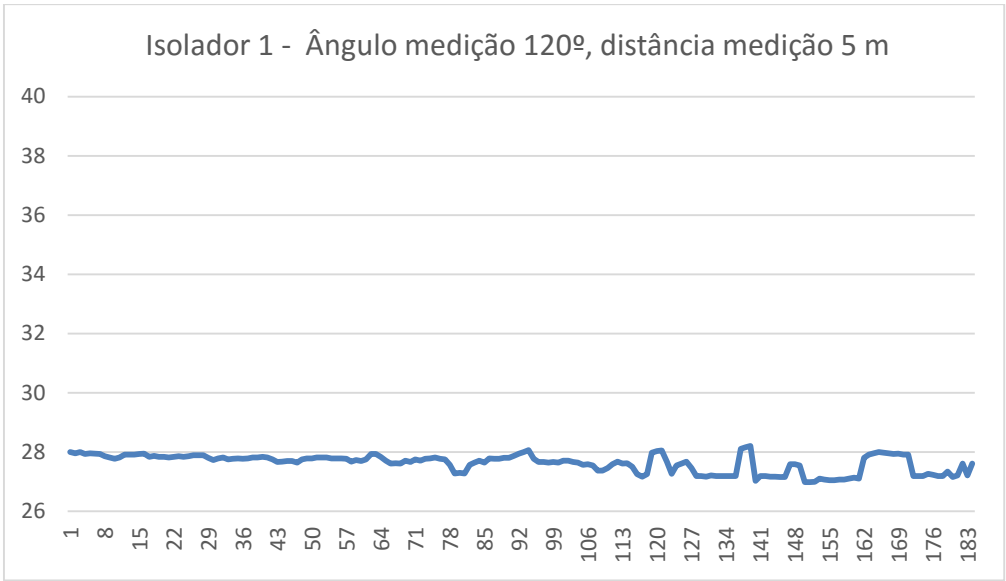
Isolador	Classificação Utilizando PDI e RNA	Ângulo de Medição(°)	Distância de Medição (m)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Mínima no Isolador (°C)	Temperatura Máxima no Isolador (°C)
Isolador 1	Médio	0	5	26	27,67	30,3
Isolador 1	Médio	0	7,5	26	28,13	30,16
Isolador 1	Médio	0	10	26	27,82	30
Isolador 1	Bom	120	5	26	27,71	29,83
Isolador 1	Bom	120	7,5	26	27,7	29,88
Isolador 1	Bom	120	10	26	27,46	29,59
Isolador 1	Bom	240	5	26	26,98	28,21
Isolador 1	Médio	240	7,5	26	28,39	31,53
Isolador 1	Médio	240	10	26	28,51	30,8
Isolador 3	Médio	0	5	26	29,02	32,03
Isolador 3	Médio	0	7,5	26	28,25	30,42
Isolador 3	Médio	0	10	26	27,77	30,03
Isolador 3	Bom	120	5	26	27,35	29,45
Isolador 3	Bom	120	7,5	26	27,51	28,61
Isolador 3	Bom	120	10	26	27,57	28,54
Isolador 3	Bom	240	5	26	27,57	29,69
Isolador 3	Bom	240	7,5	26	27,77	29,82
Isolador 3	Bom	240	10	26	27,55	29,47
Isolador 5	Bom	0	5	25,5	26,86	27
Isolador 7	Bom	0	7,5	25,5	26,66	27,32
Isolador 7	Bom	0	10	25,5	26,9	27,99
Isolador 7	Bom	120	5	25,5	26,63	27,86
Isolador 7	Bom	120	7,5	25,5	26,94	27,87
Isolador 7	Bom	120	10	25,5	26,83	27,96
Isolador 7	Médio	240	5	25,5	27,3	31,47
Isolador 7	Bom	240	7,5	25,5	27,61	28,64
Isolador 7	Bom	240	10	25,5	27,22	28,29
Isolador 8	Bom	0	5	25,5	27,79	28,75
Isolador 8	Bom	0	7,5	25,5	27,55	28,1

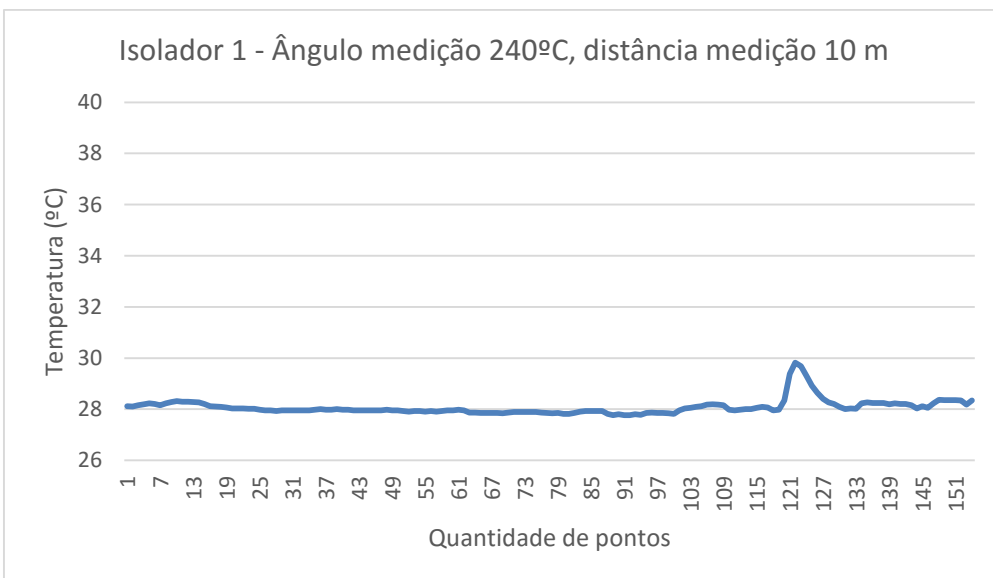
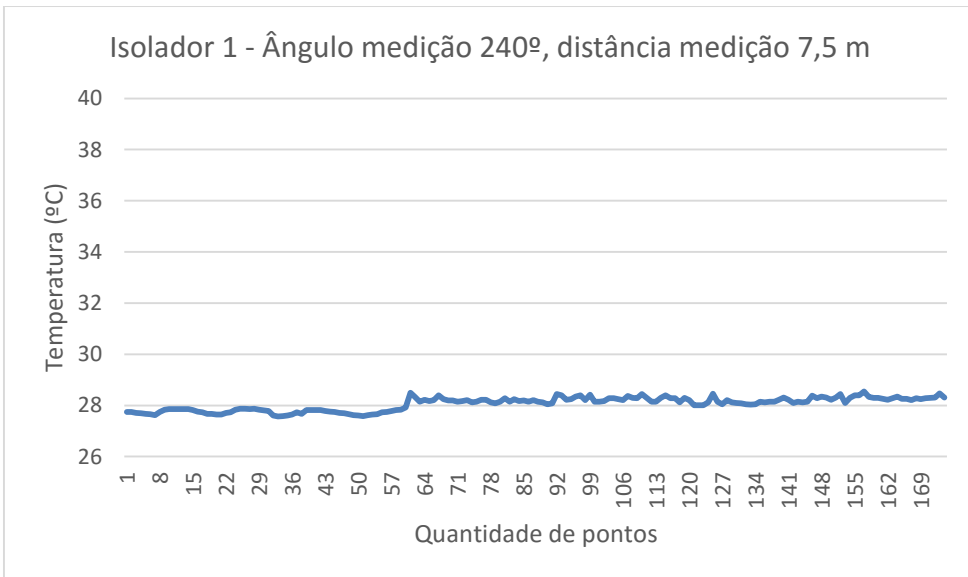
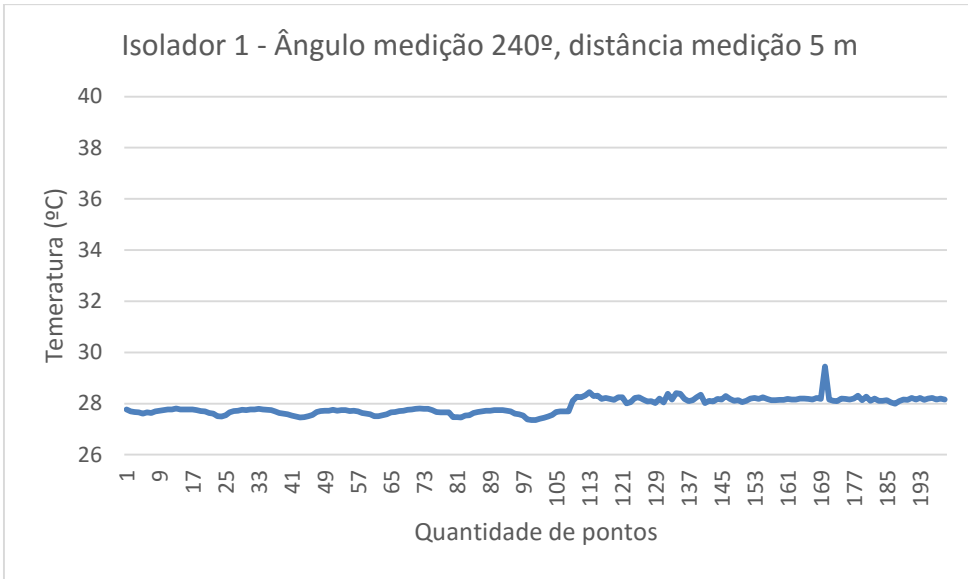
Isolador 8	Bom	0	10	25,5	27,46	28,09
Isolador 8	Bom	120	5	25,5	27,21	29,51
Isolador 8	Bom	120	7,5	25,5	26,93	29,34
Isolador 8	Médio	120	10	25,5	26,99	29,83
Isolador 8	Bom	240	5	25,5	27,06	29,14
Isolador 8	Bom	240	7,5	25,5	26,99	27,75
Isolador 8	Bom	240	10	25,5	26,97	29,03
Isolador 10	Bom	0	5	27,8	28,65	29,75
Isolador 10	Bom	0	7,5	27,8	29,08	29,62
Isolador 10	Bom	0	10	27,8	29,99	30,01
Isolador 10	Médio	120	5	27,8	30,08	31,86
Isolador 10	Bom	120	7,5	27,8	30,6	31,7
Isolador 10	Bom	120	10	27,8	30,47	31,01
Isolador 10	Médio	240	5	27,8	30,64	31,95
Isolador 10	Bom	240	7,5	27,8	30,98	31,62
Isolador 10	Médio	240	10	27,8	31,1	31,94
Isolador 11	Bom	0	5	27,8	30,99	31,74
Isolador 11	Médio	0	7,5	27,8	30,97	33,45
Isolador 11	Médio	0	10	27,8	31,25	32,15
Isolador 11	Médio	120	5	27,8	30,81	34,14
Isolador 11	Médio	120	7,5	27,8	31,11	32,85
Isolador 11	Médio	120	10	27,8	30,8	33,11
Isolador 11	Médio	240	5	27,8	31,17	33,32
Isolador 11	Bom	240	7,5	26,8	27,23	29,26
Isolador 11	Bom	240	10	26,8	26,94	27,14
Isolador 16	Bom	0	5	25,9	27,3	27,62
Isolador 16	Bom	0	7,5	25,9	27,23	28,67
Isolador 16	Bom	0	10	25,9	27,2	28,15
Isolador 16	Bom	120	5	25,9	27,3	27,77
Isolador 16	Bom	120	7,5	25,9	27,81	28,54
Isolador 16	Bom	120	10	25,9	27,87	28,49
Isolador 16	Bom	240	5	25,9	27,62	28,47
Isolador 16	Bom	240	7,5	25,9	27,48	28,32
Isolador 16	Bom	240	10	25,9	27,34	28,06

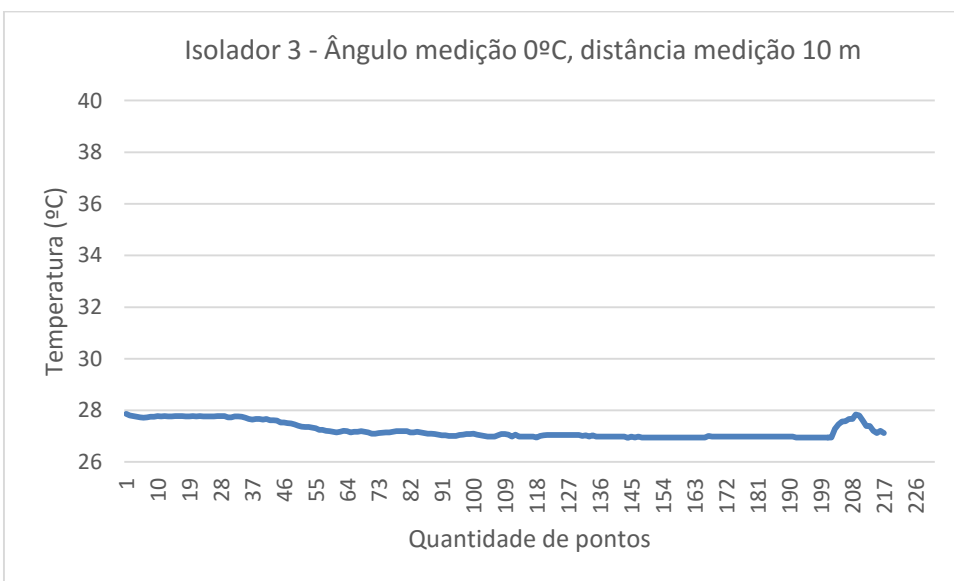
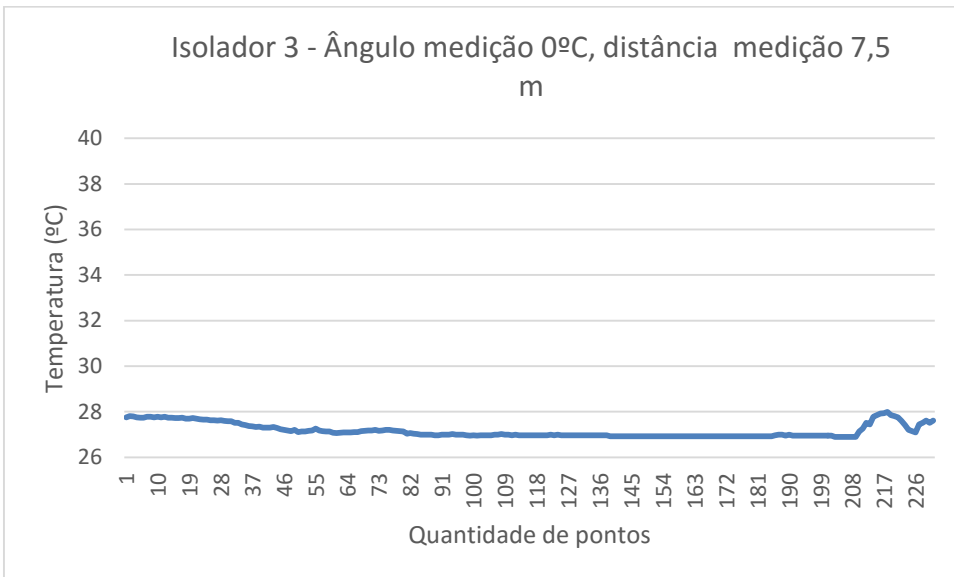
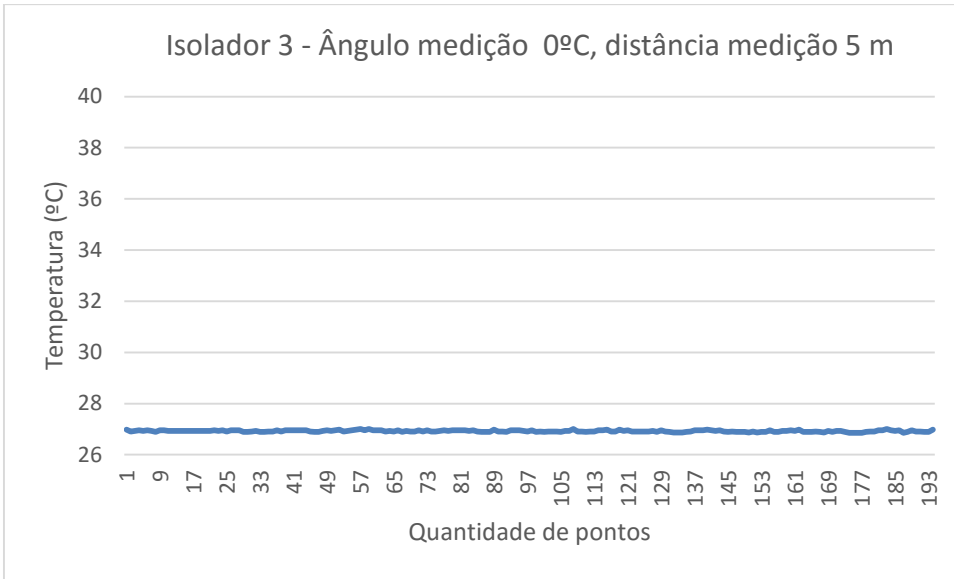


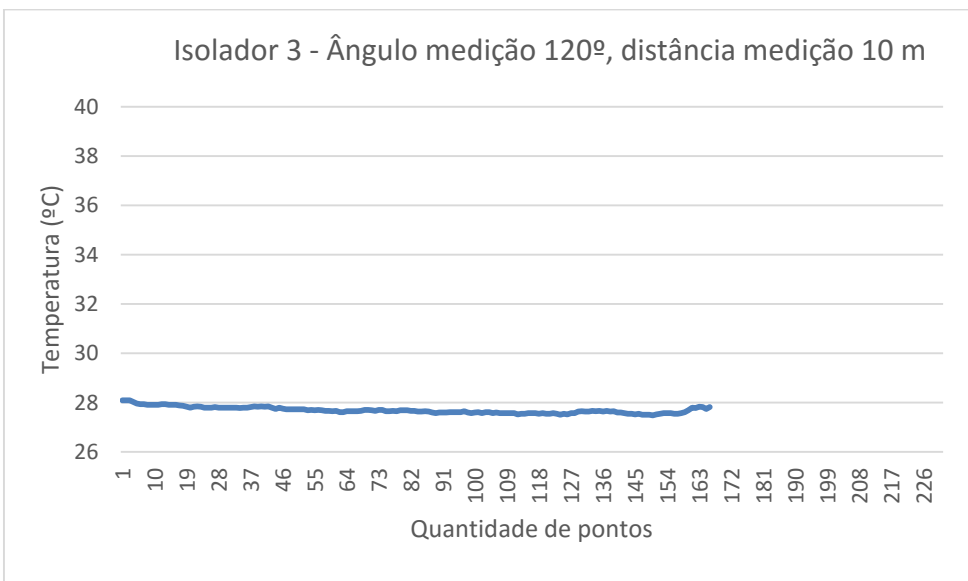
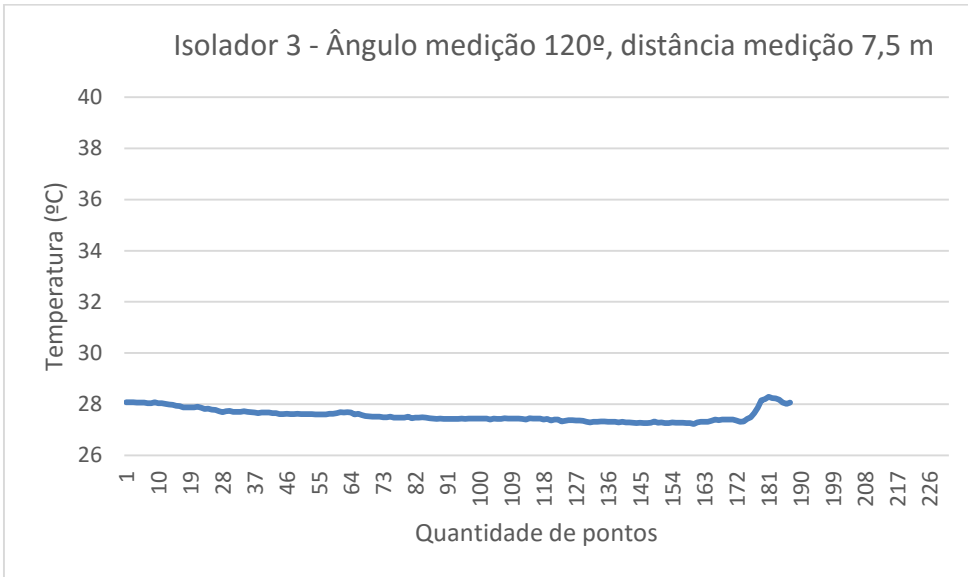
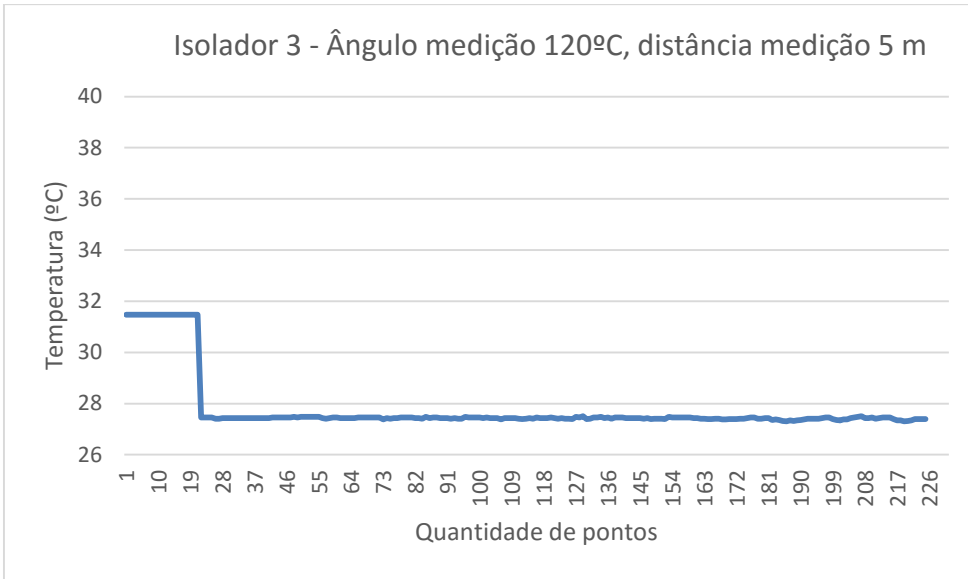
APÊNDICE B – Gráficos dos perfis térmicos dos isoladores poliméricos no ângulo 0°.

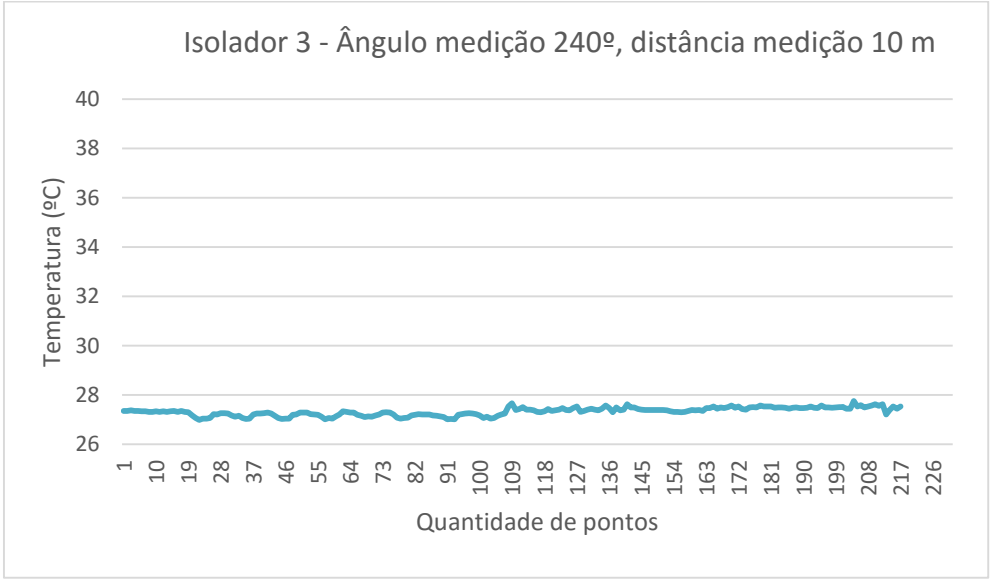
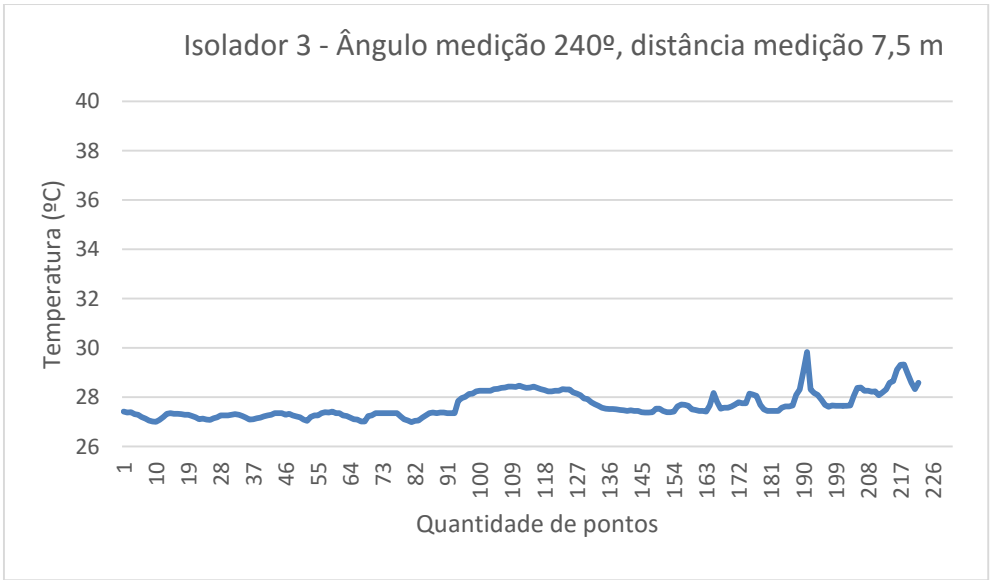
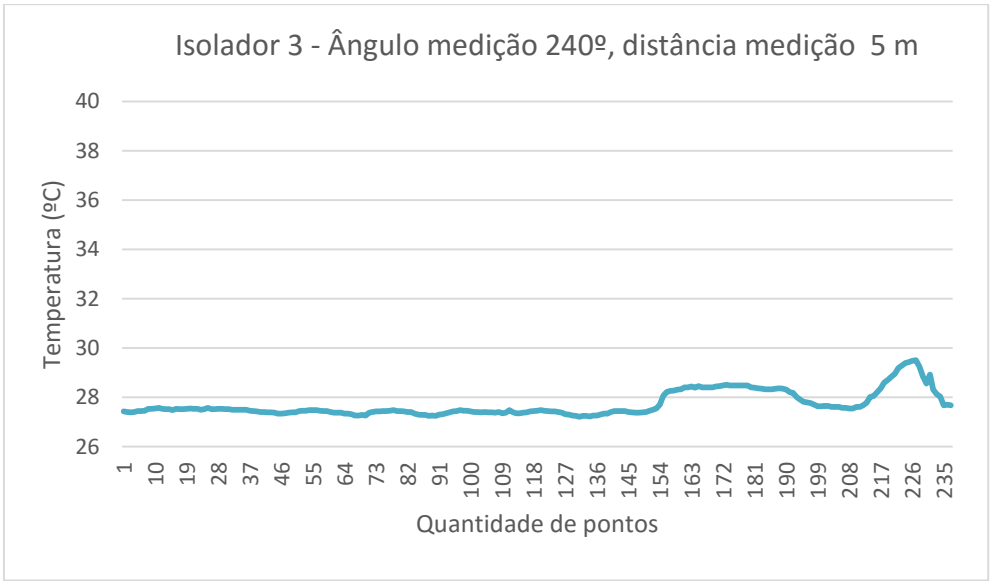


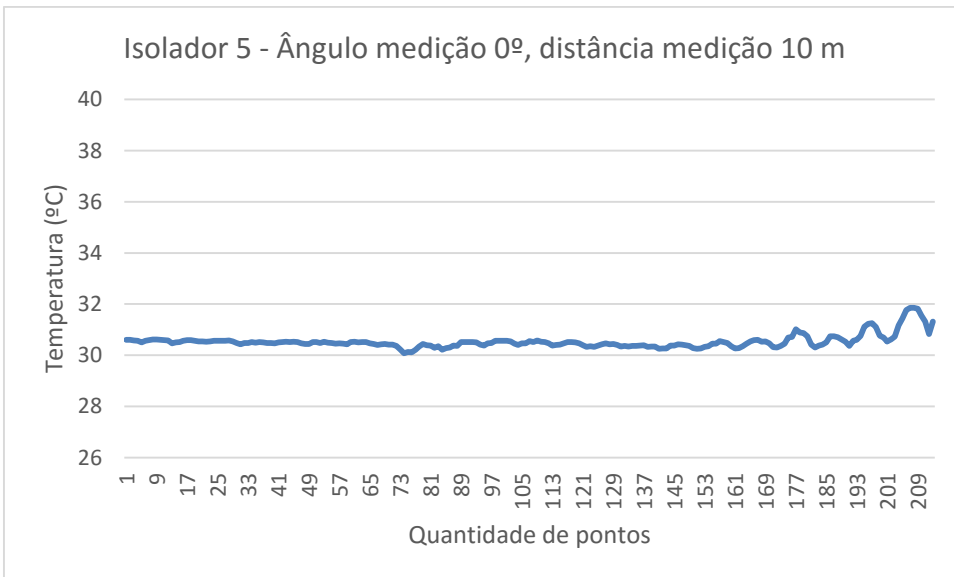
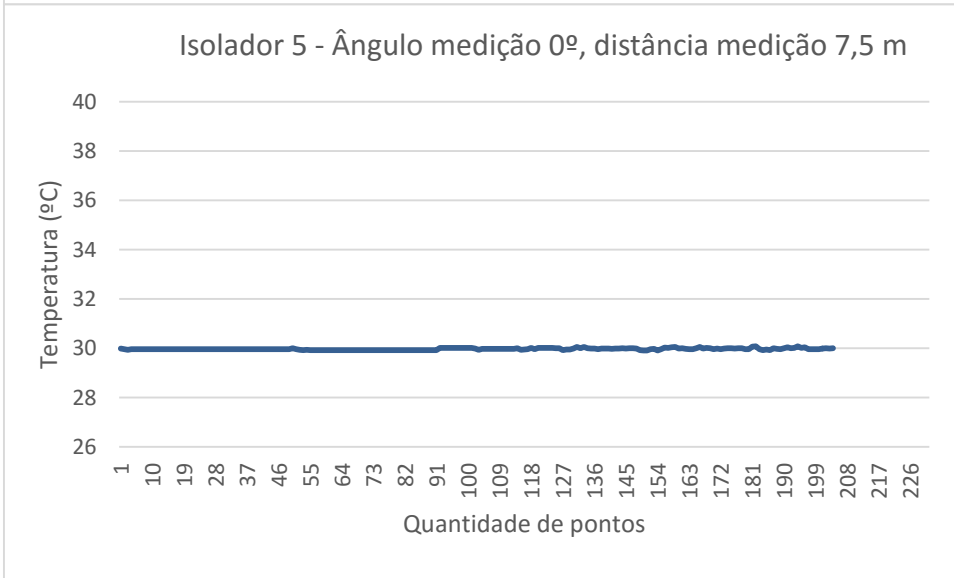
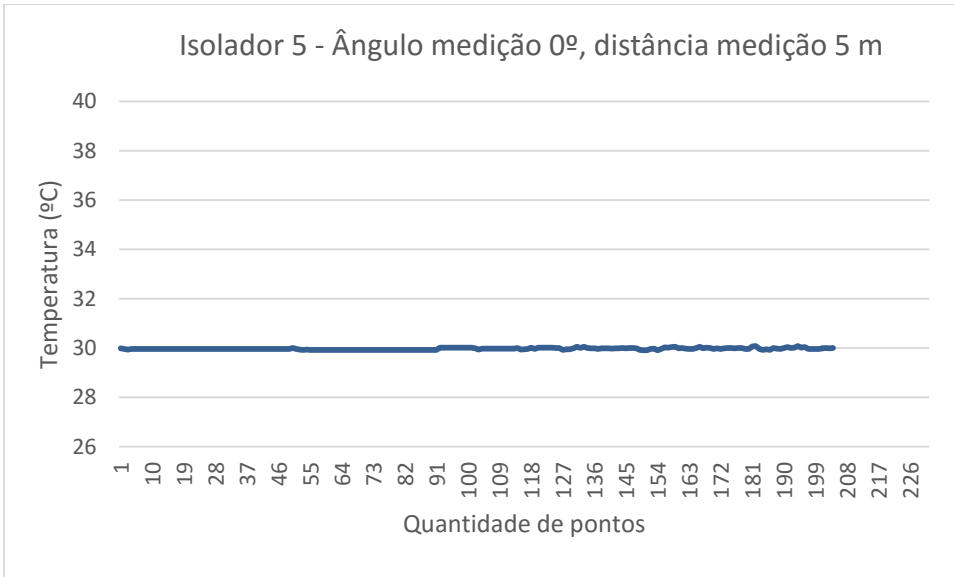


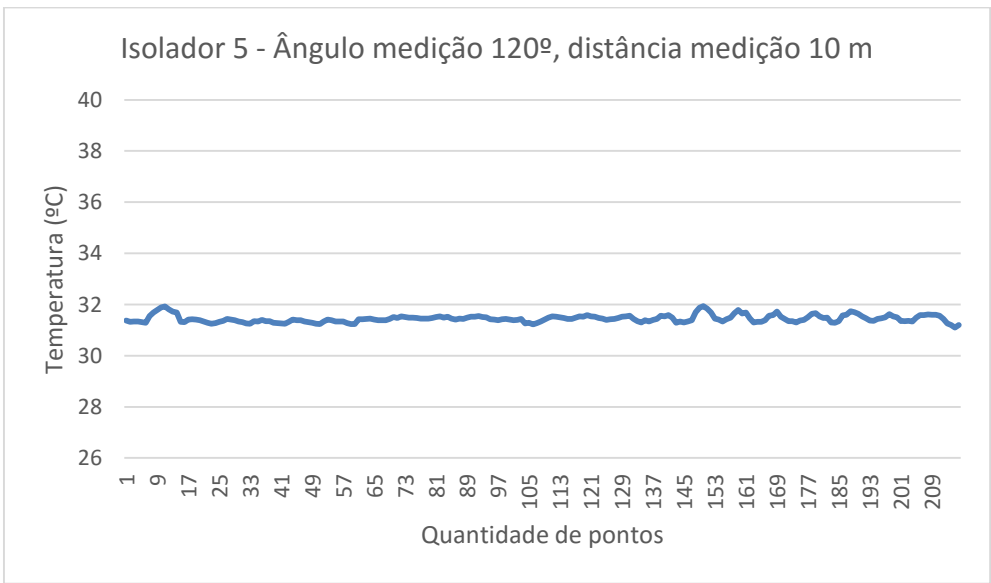
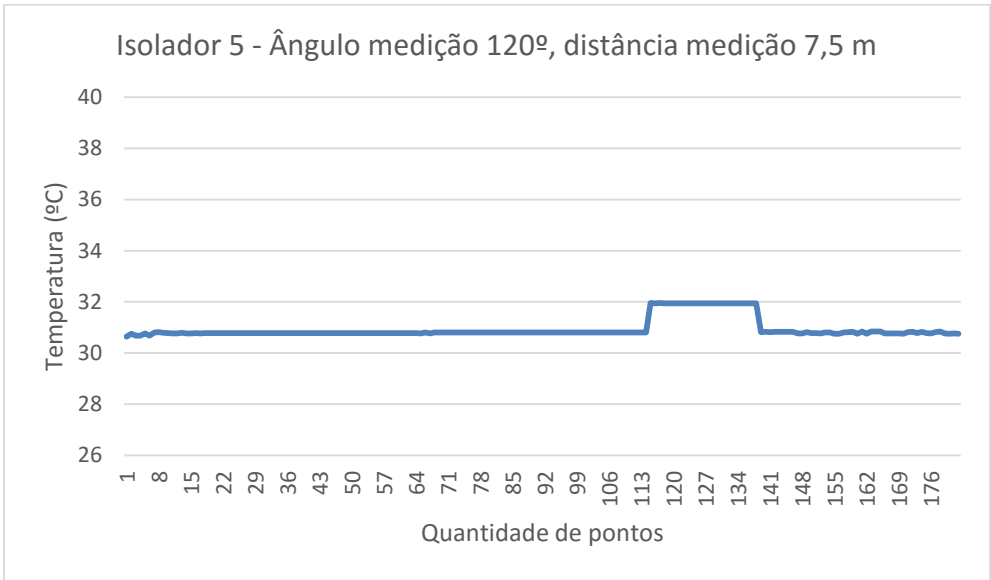
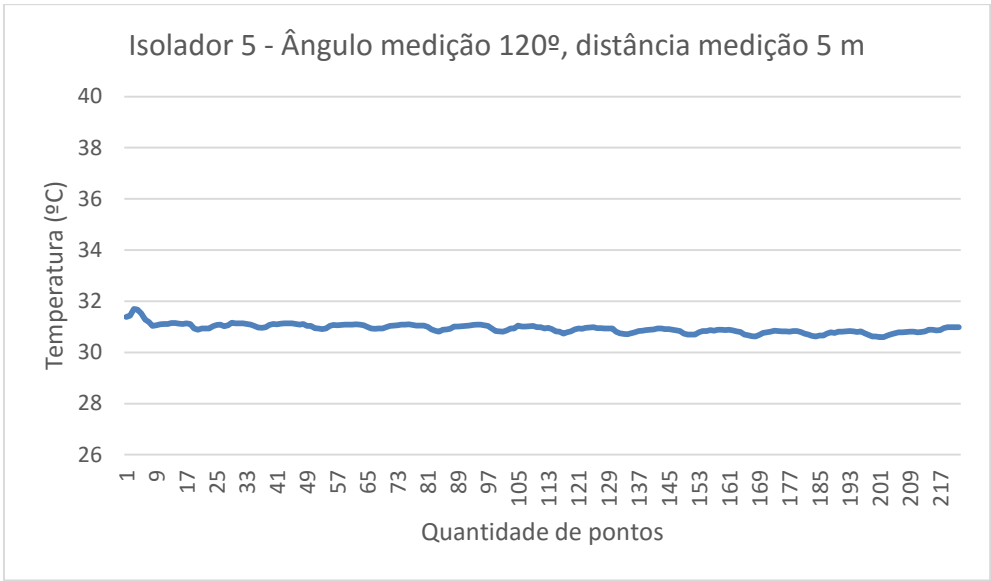




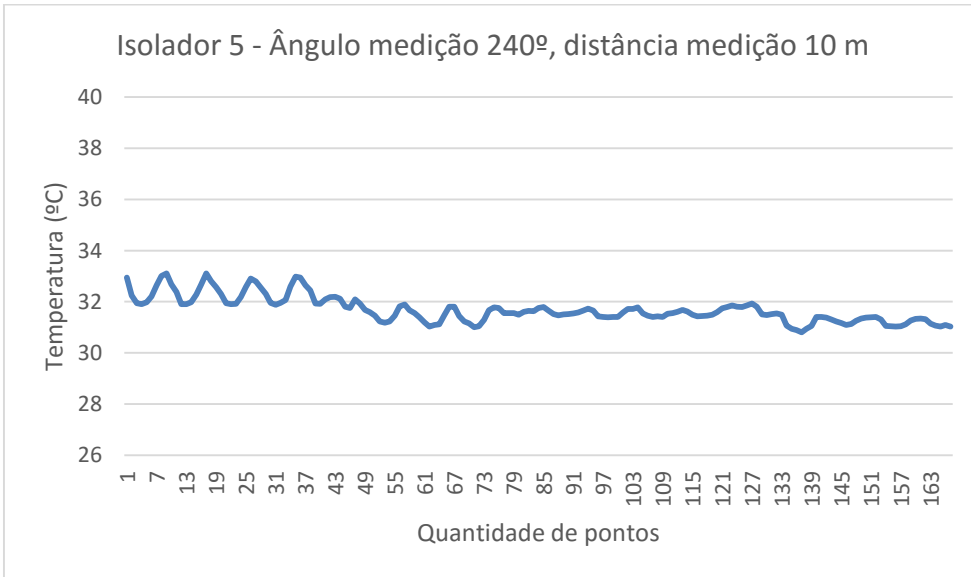
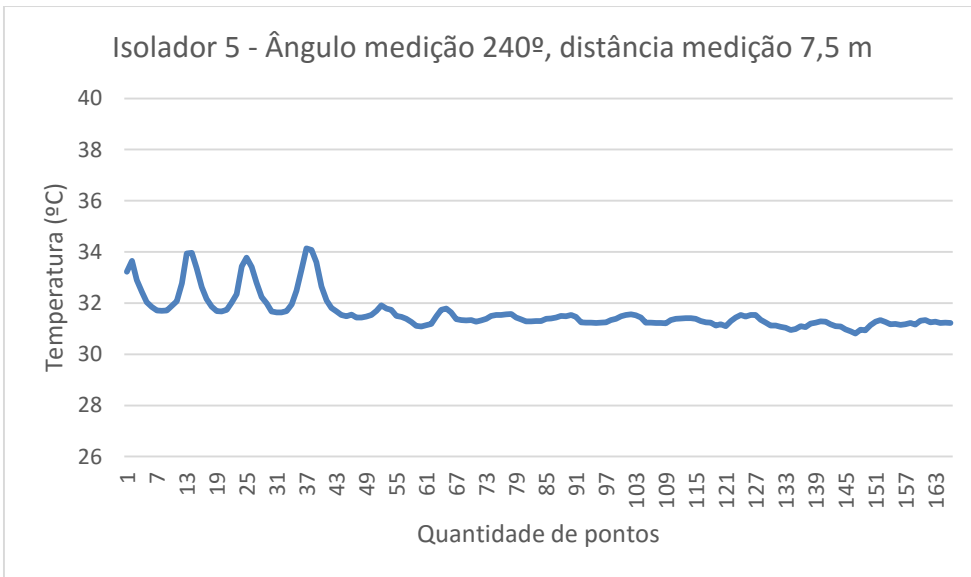
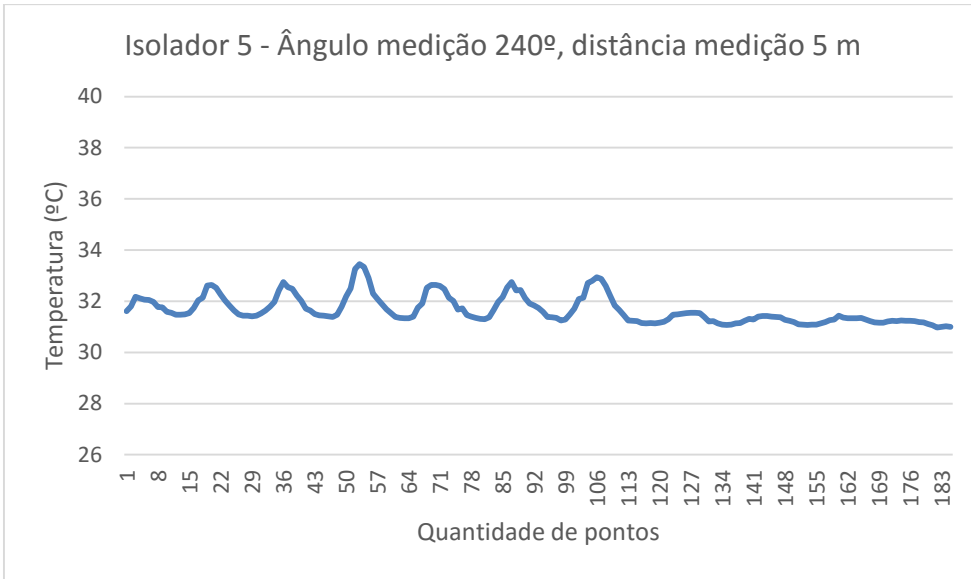


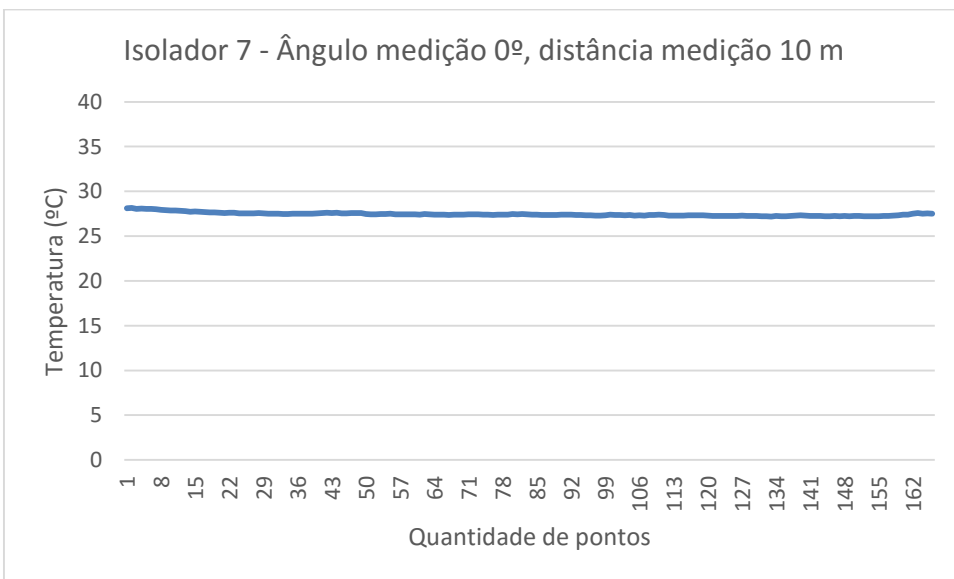
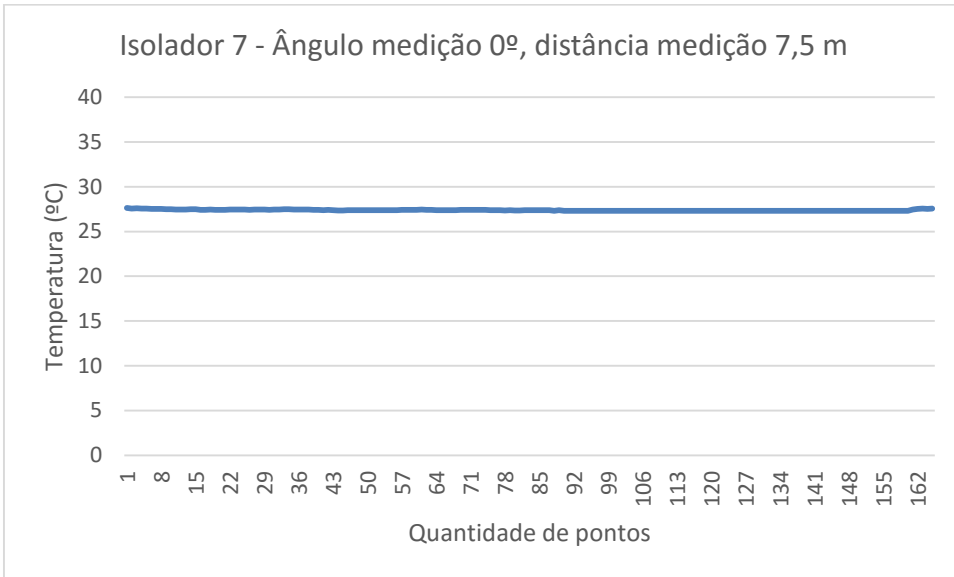
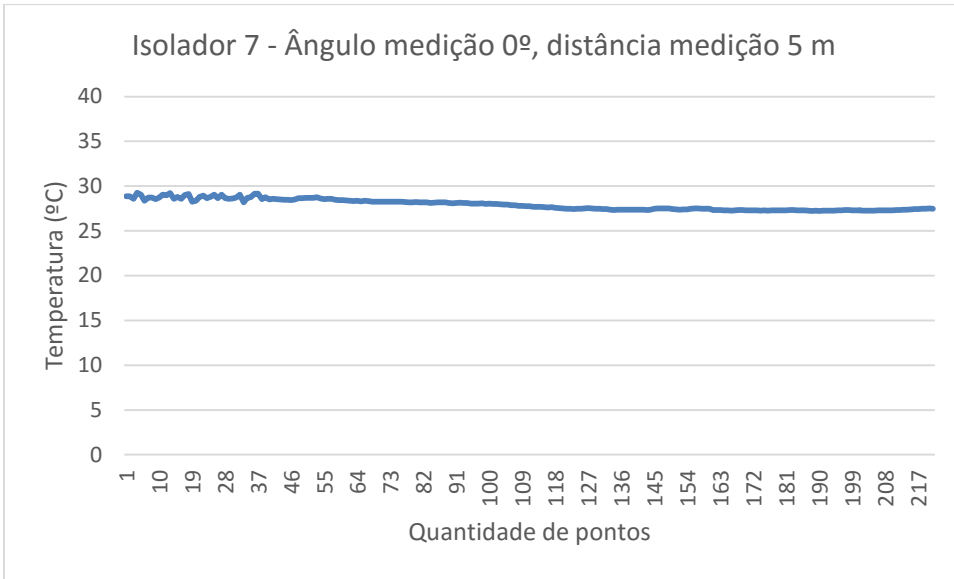


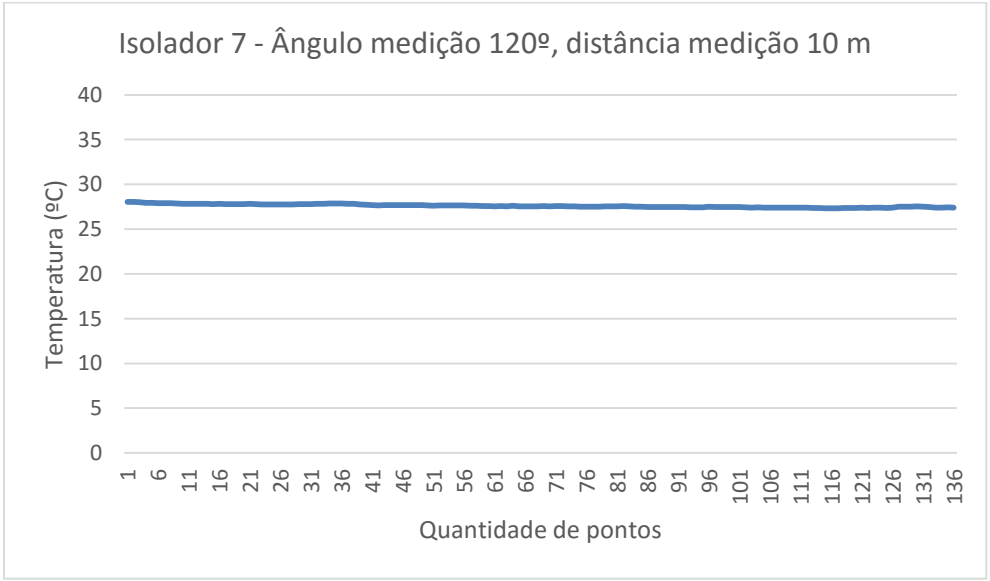
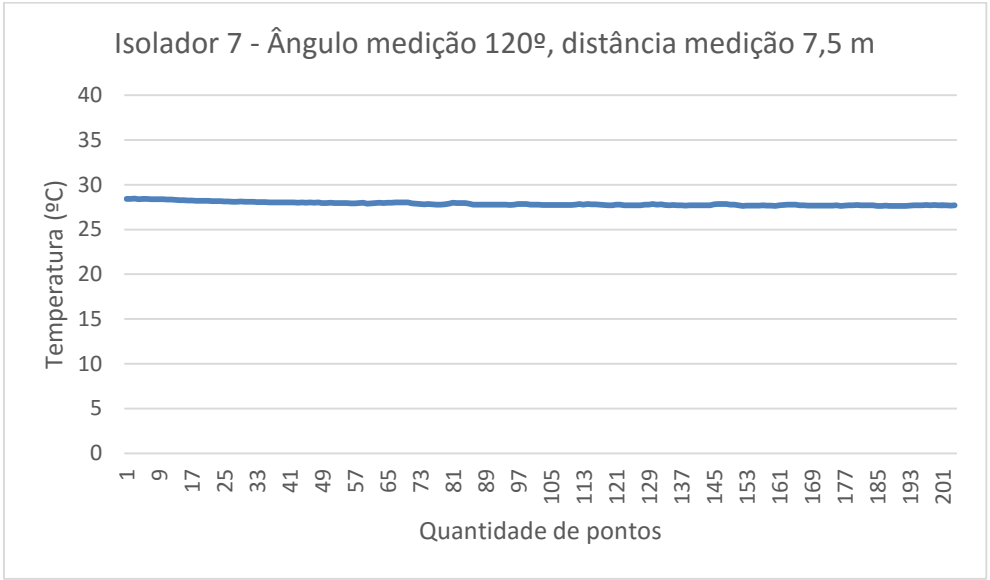
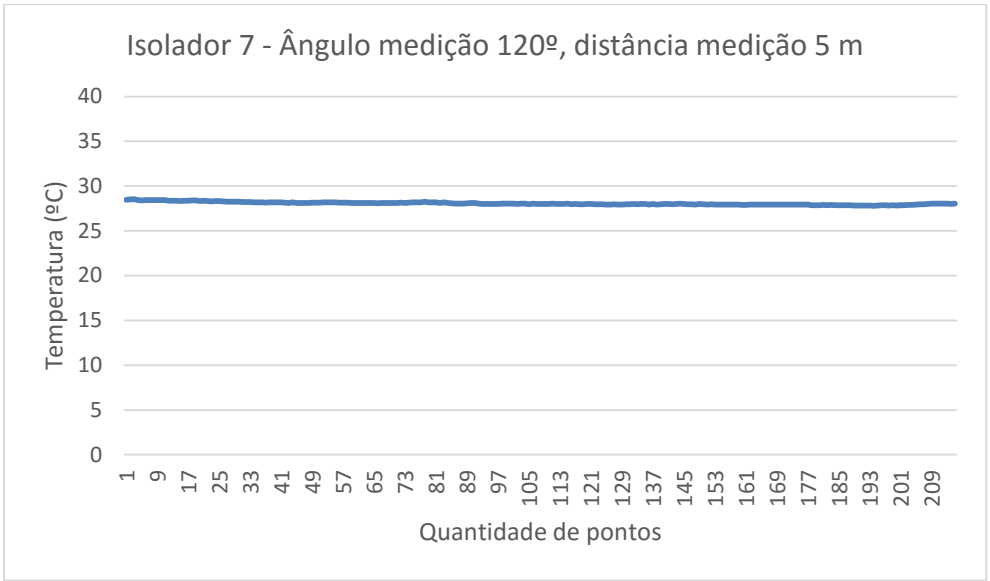


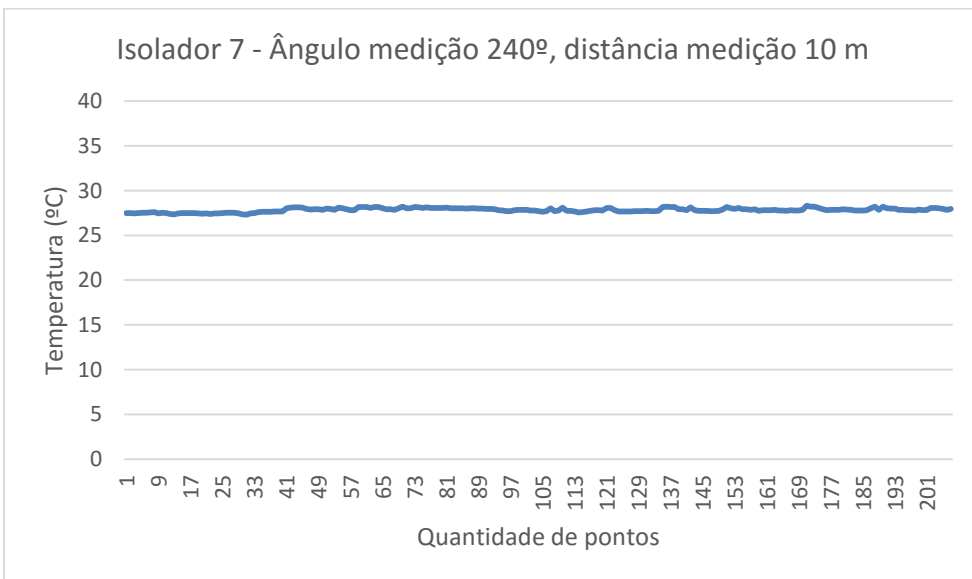
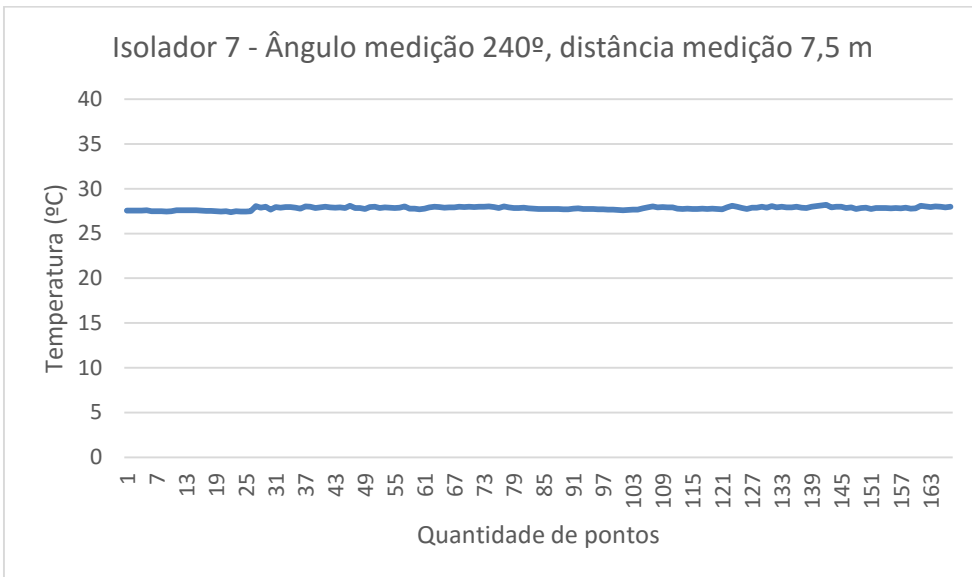
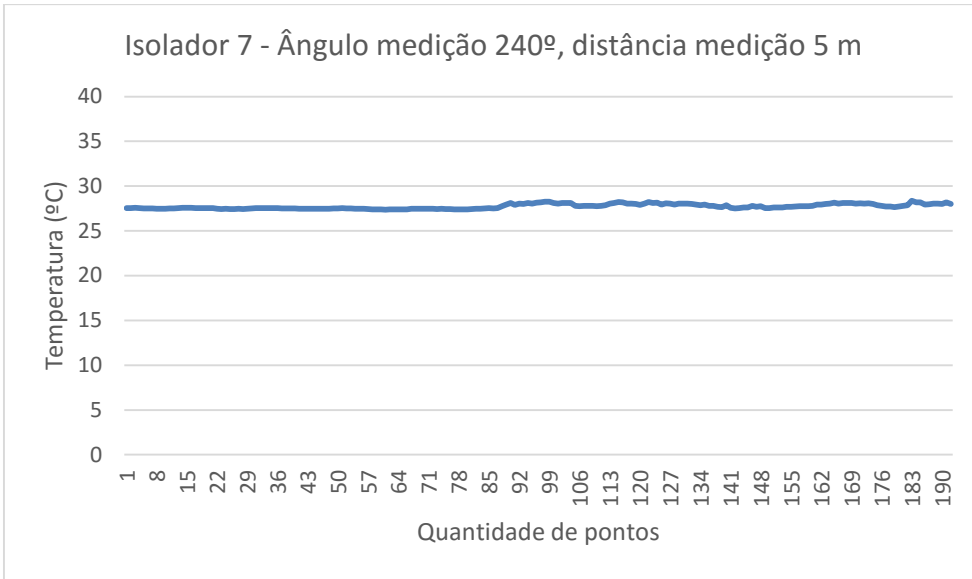


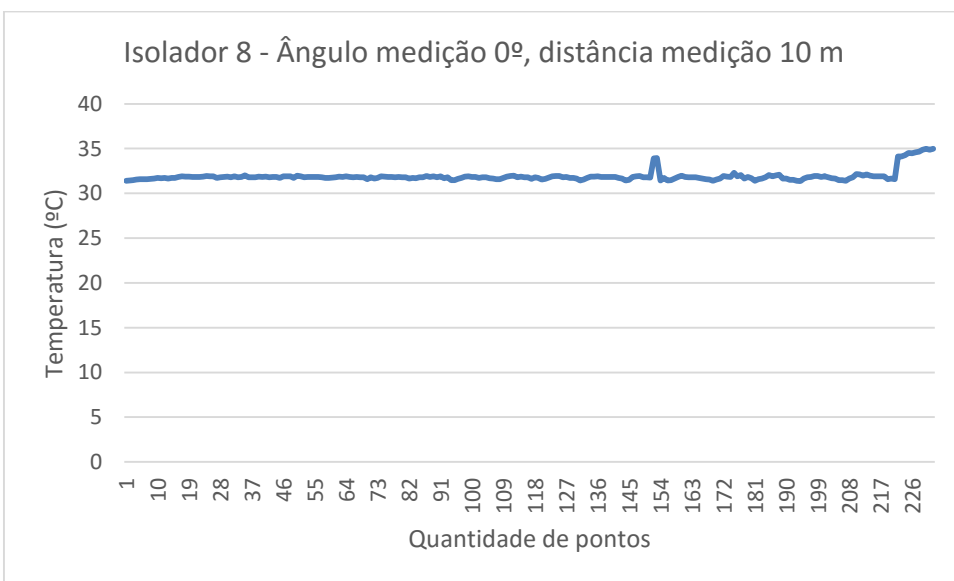
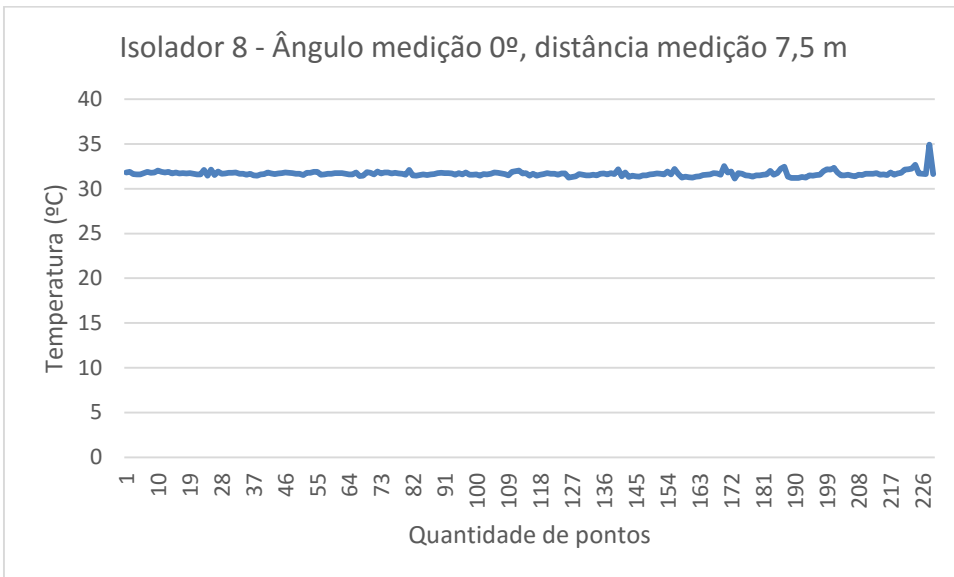
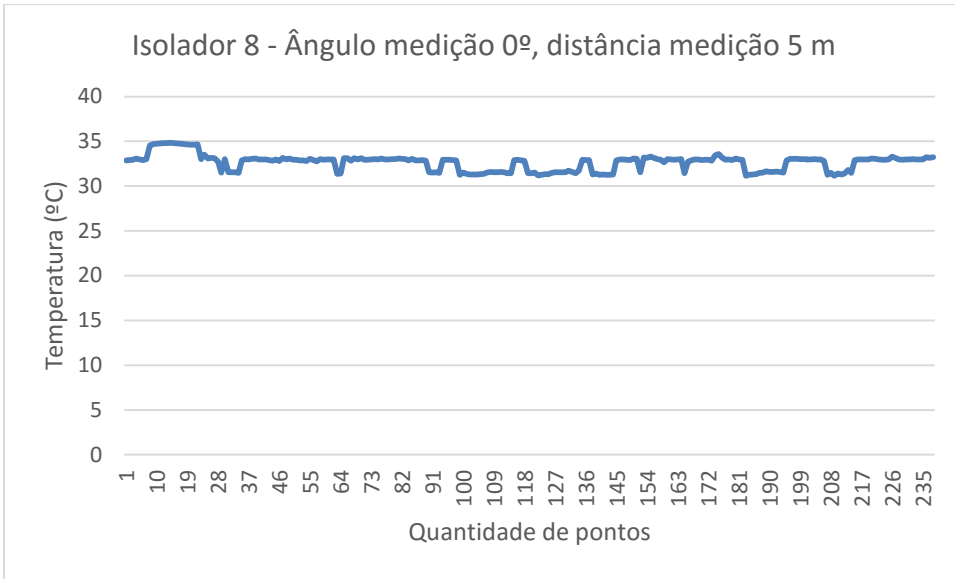


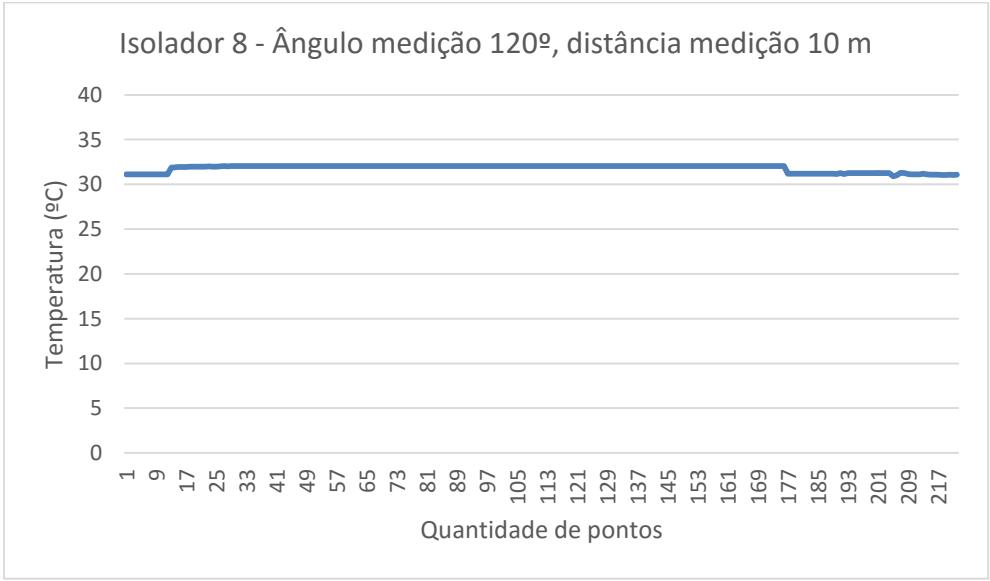
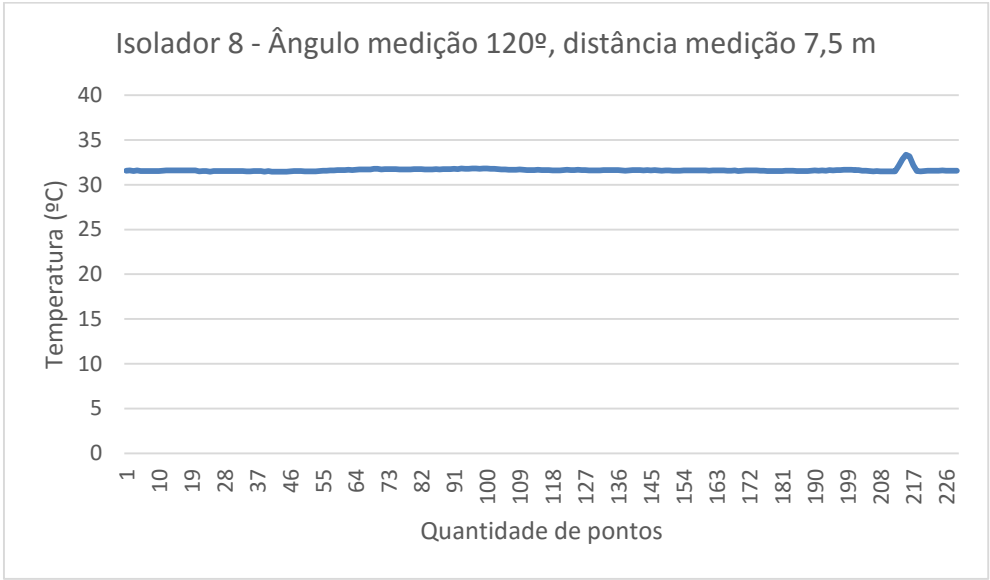
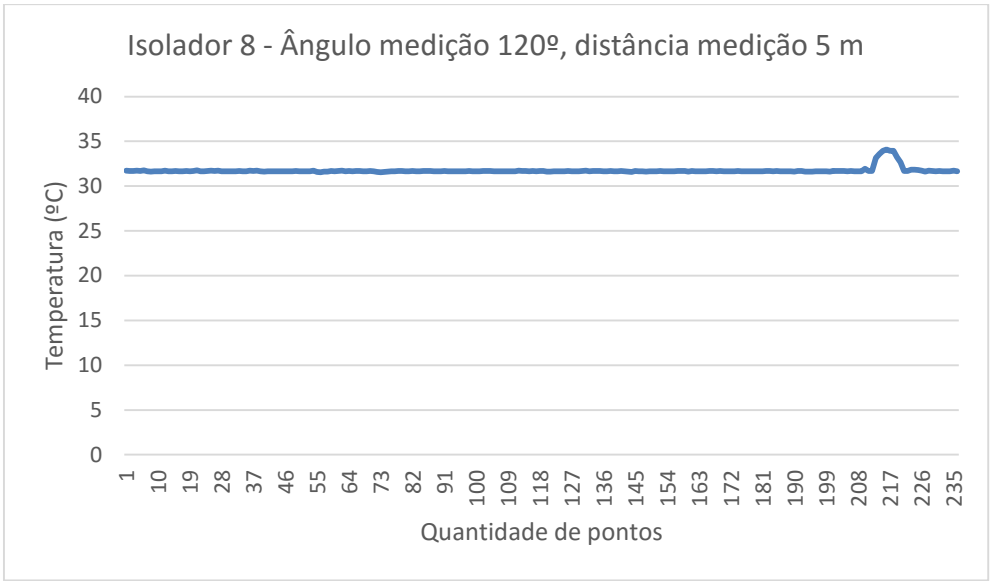


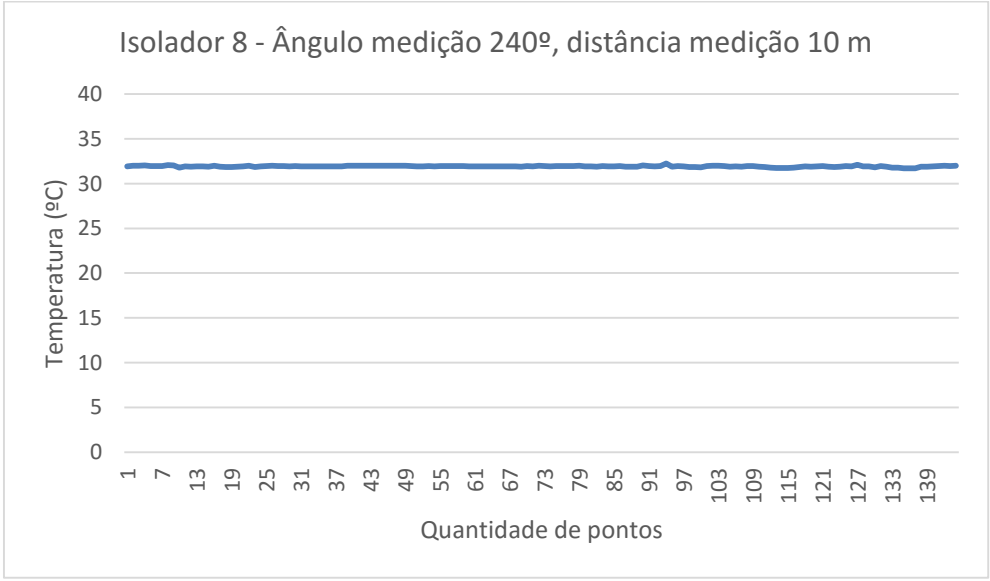
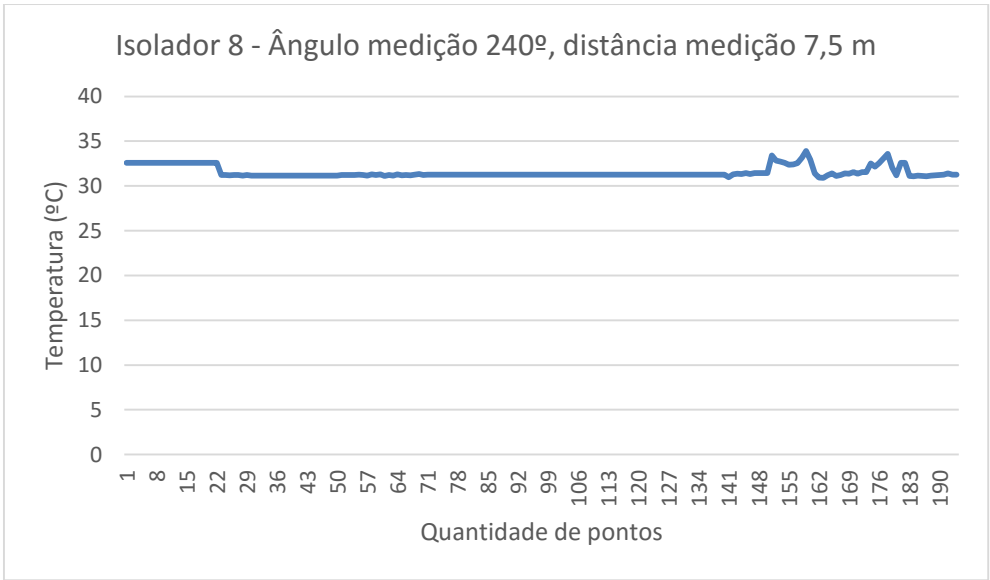
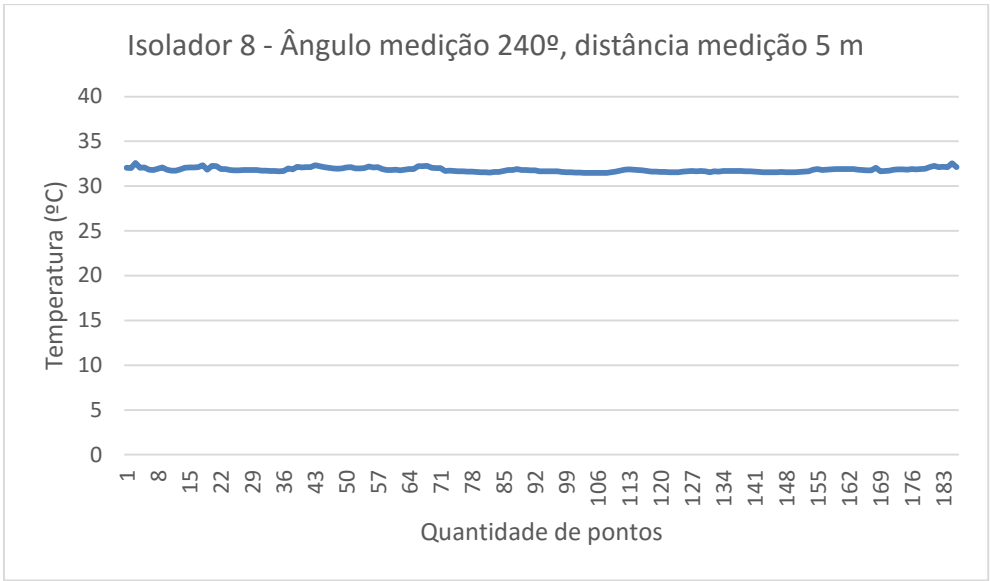


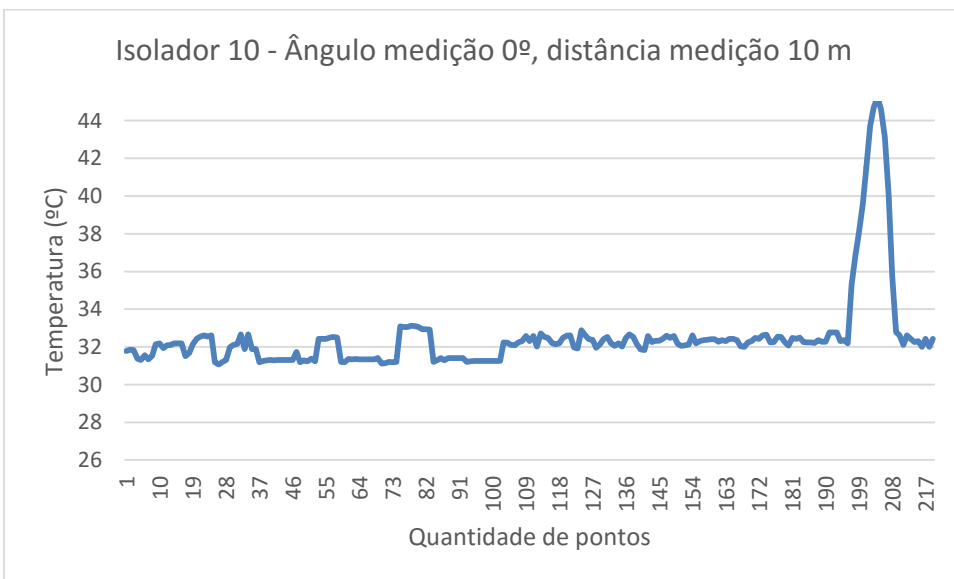
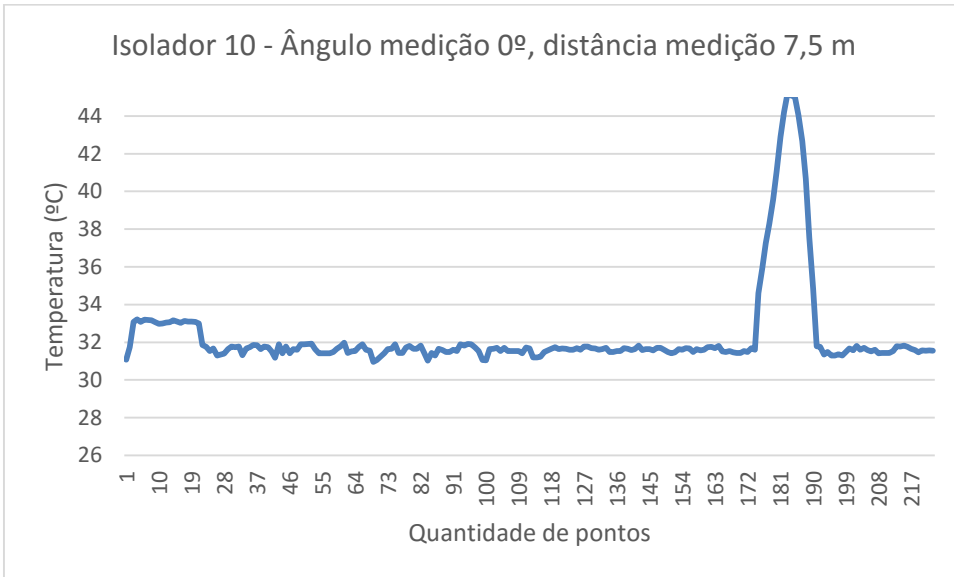
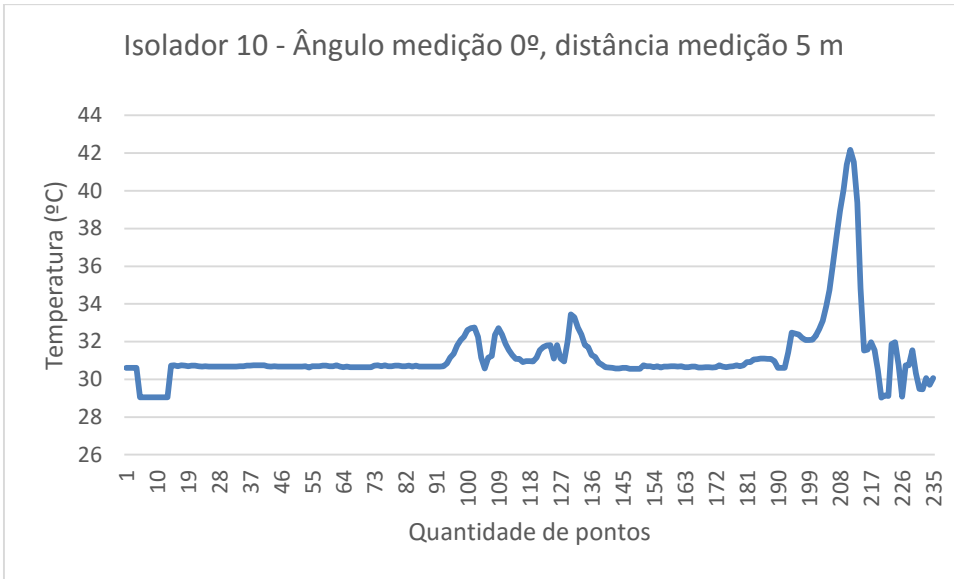




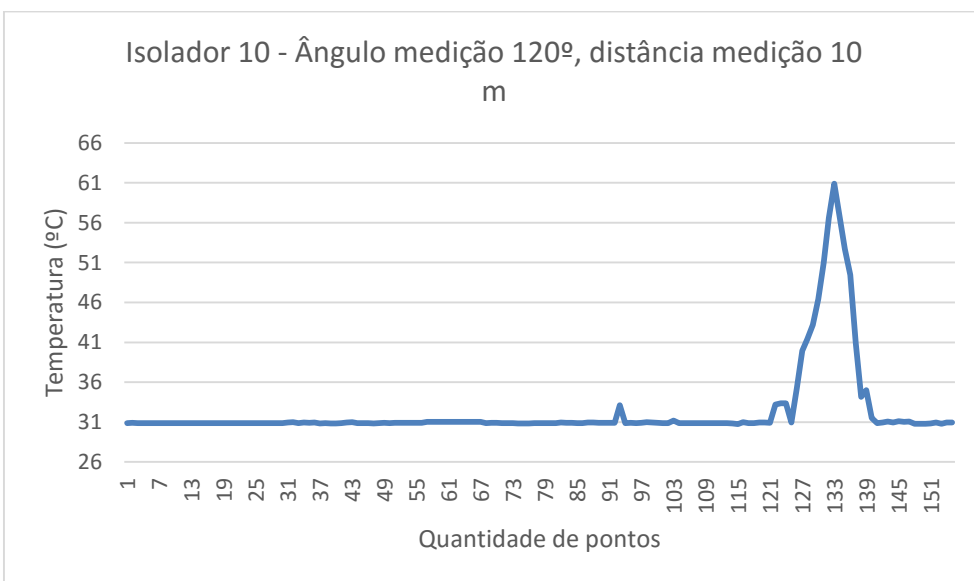
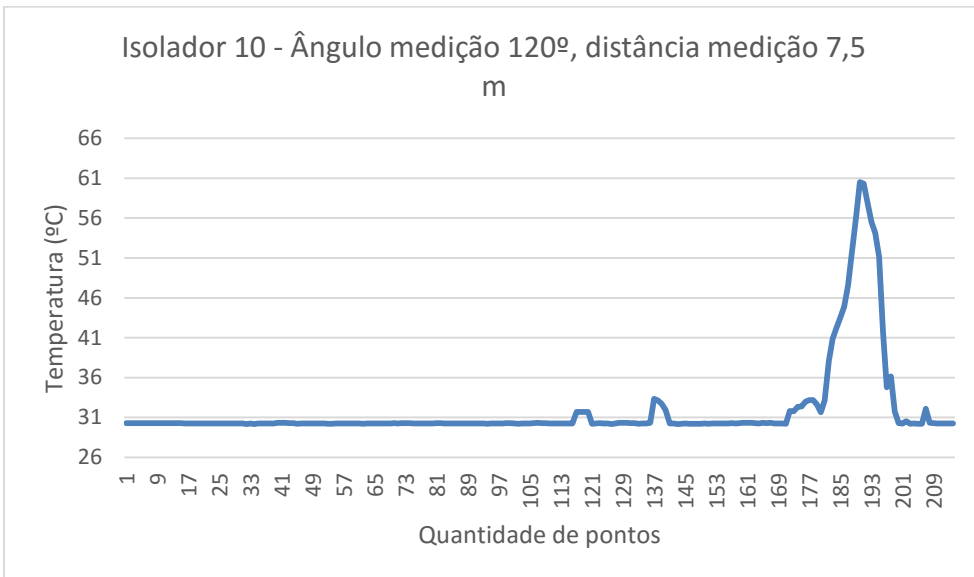
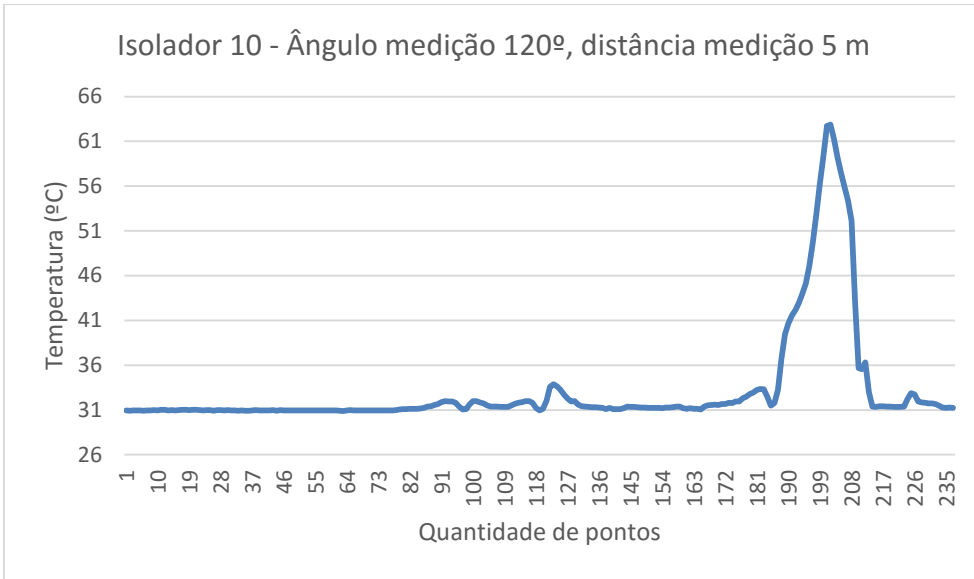


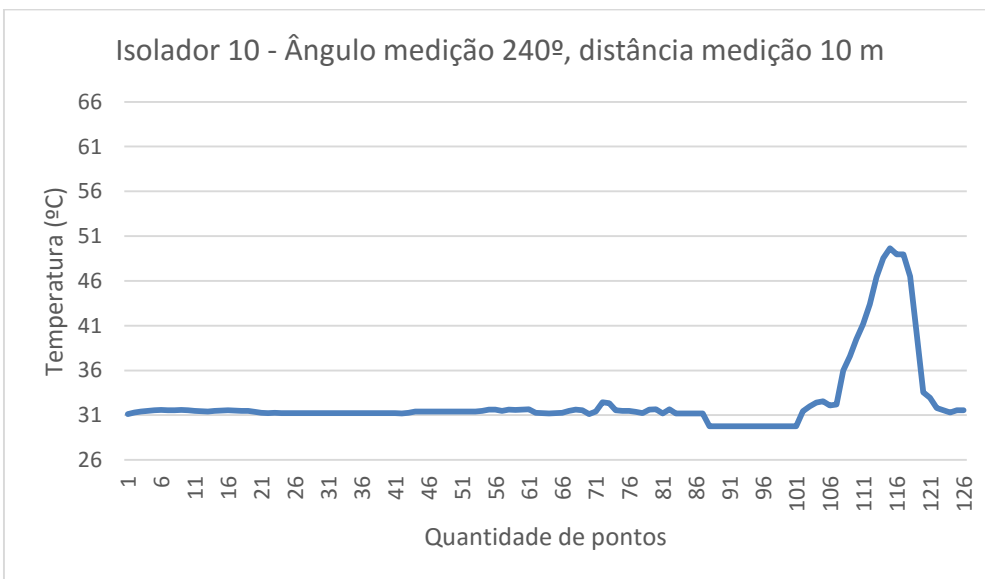
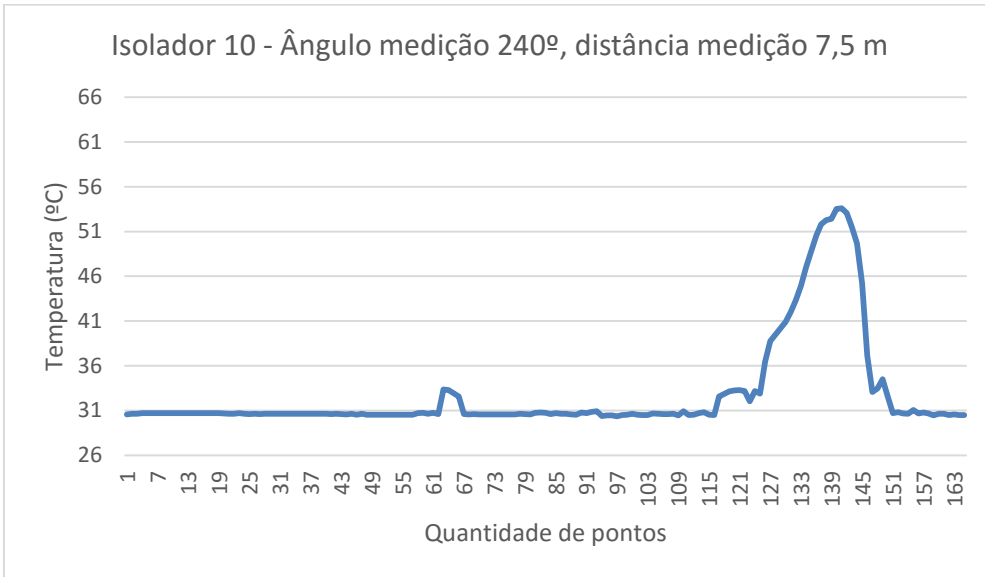
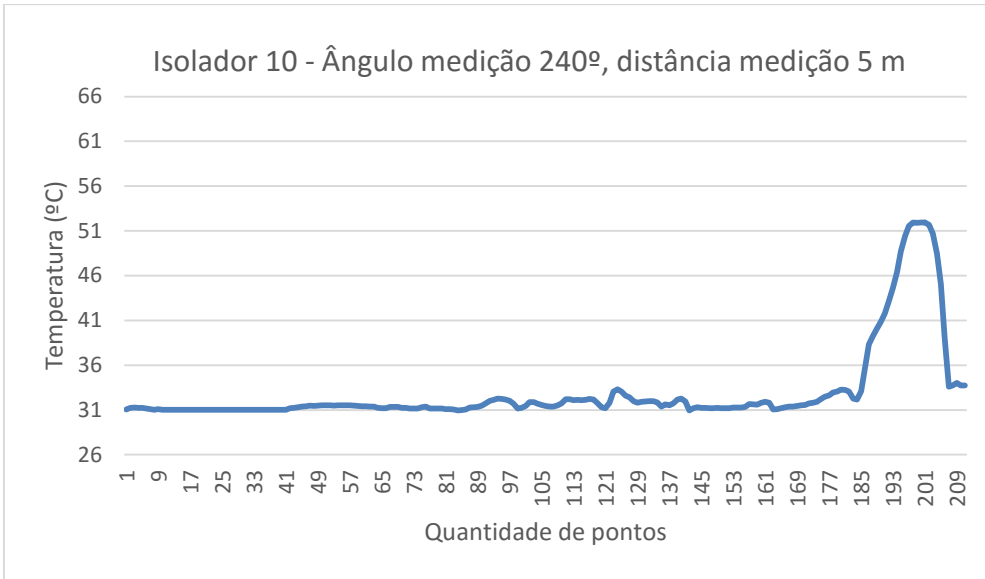


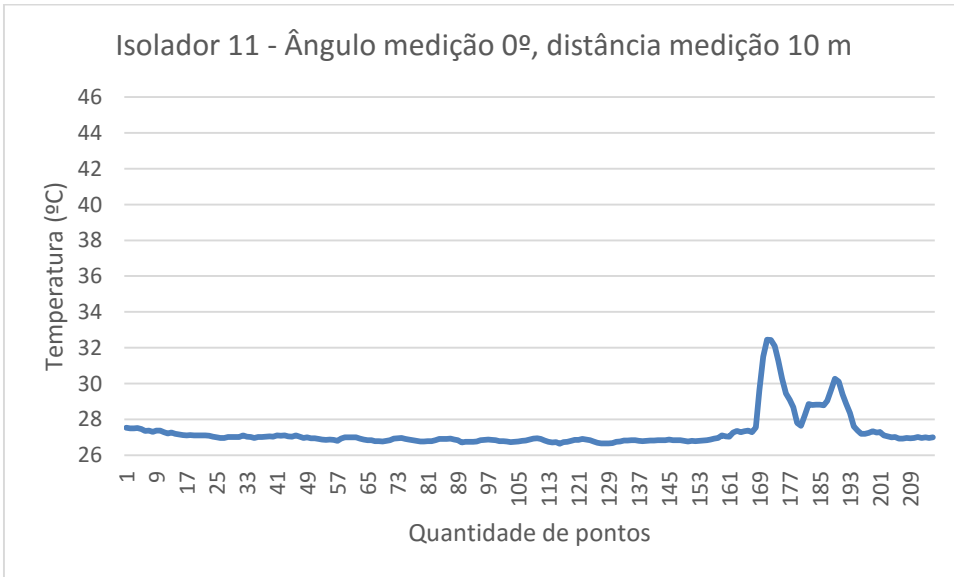
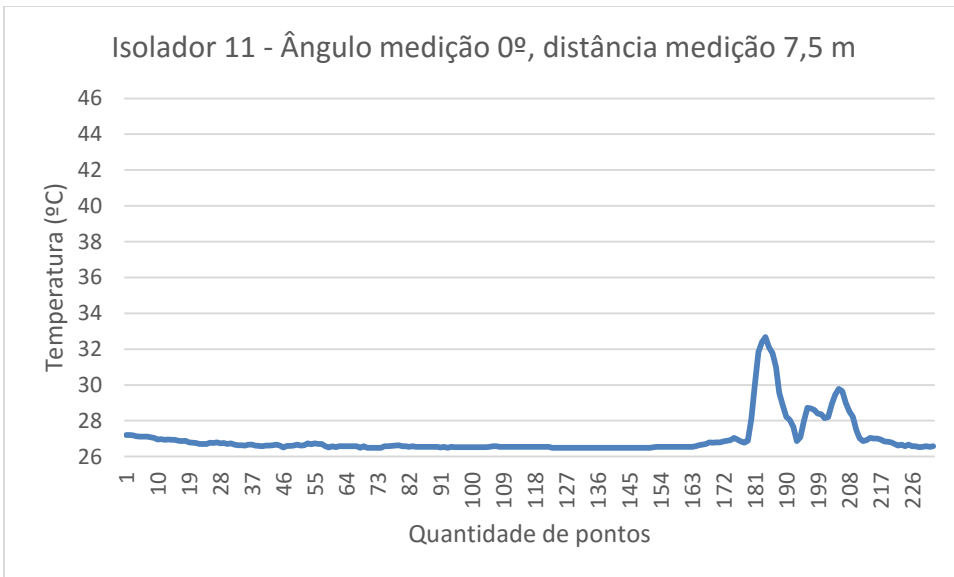
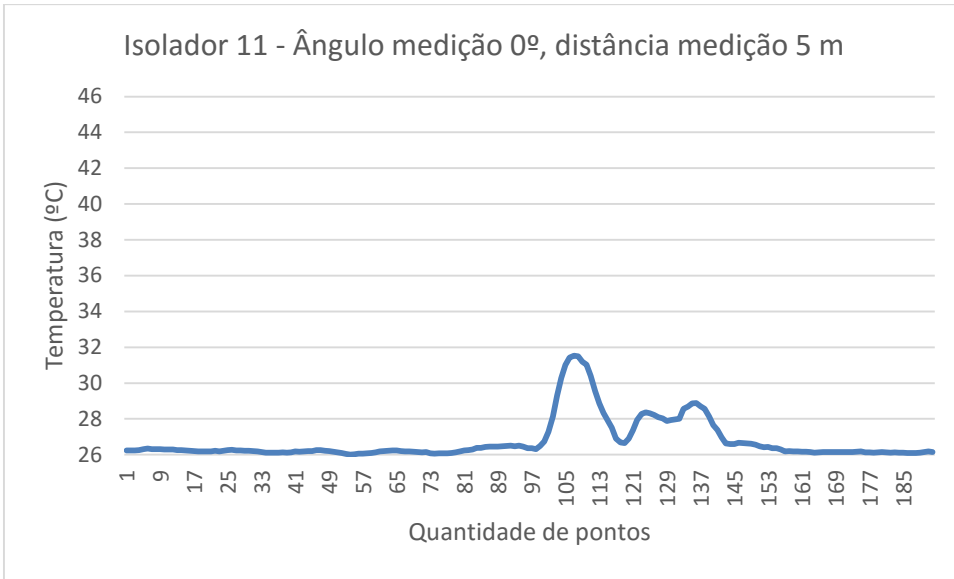


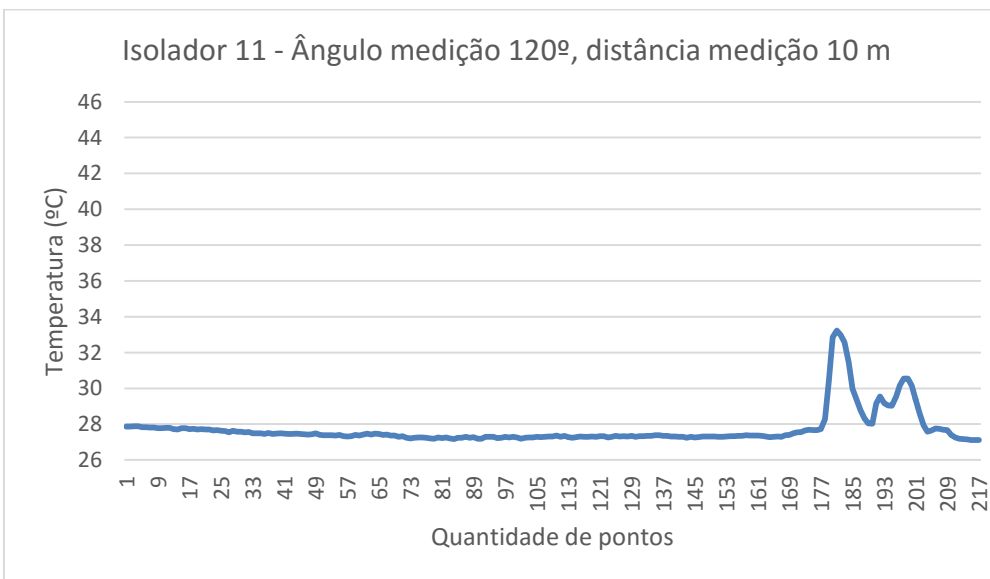
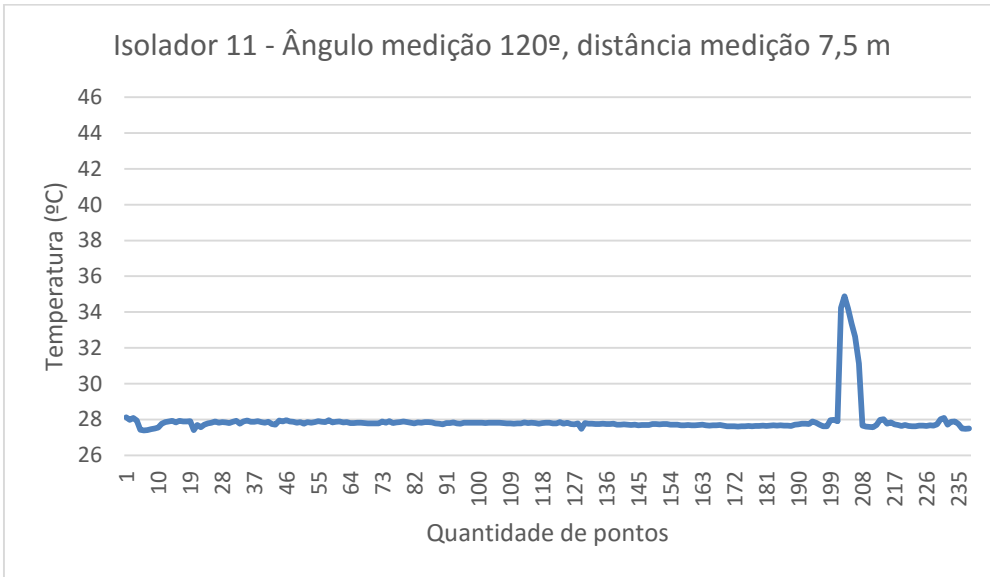
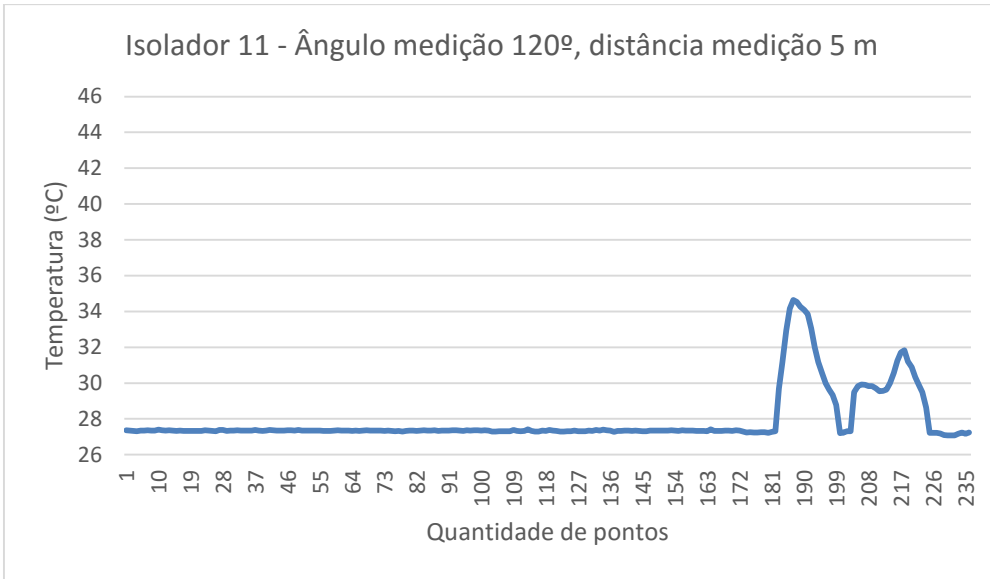


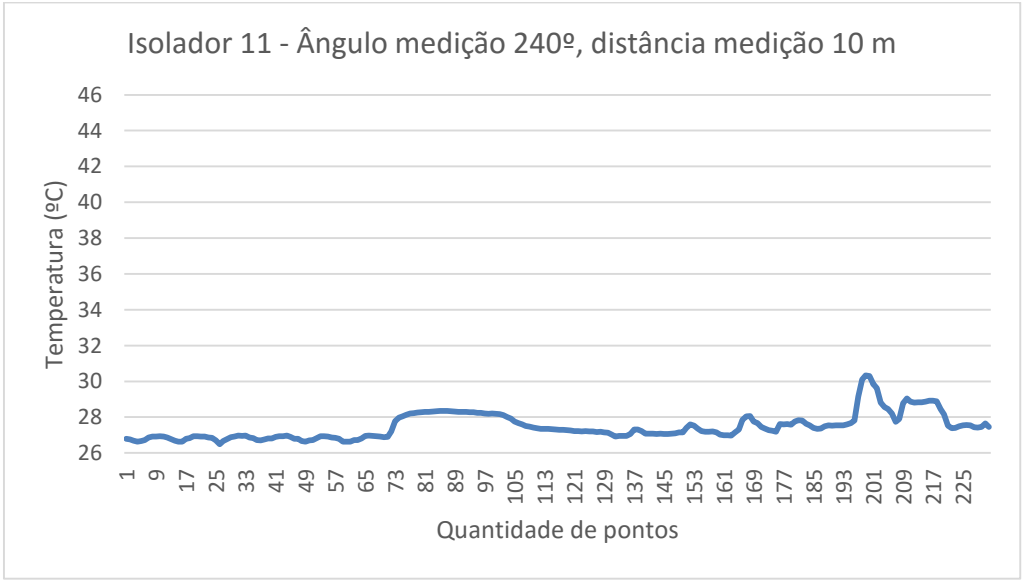
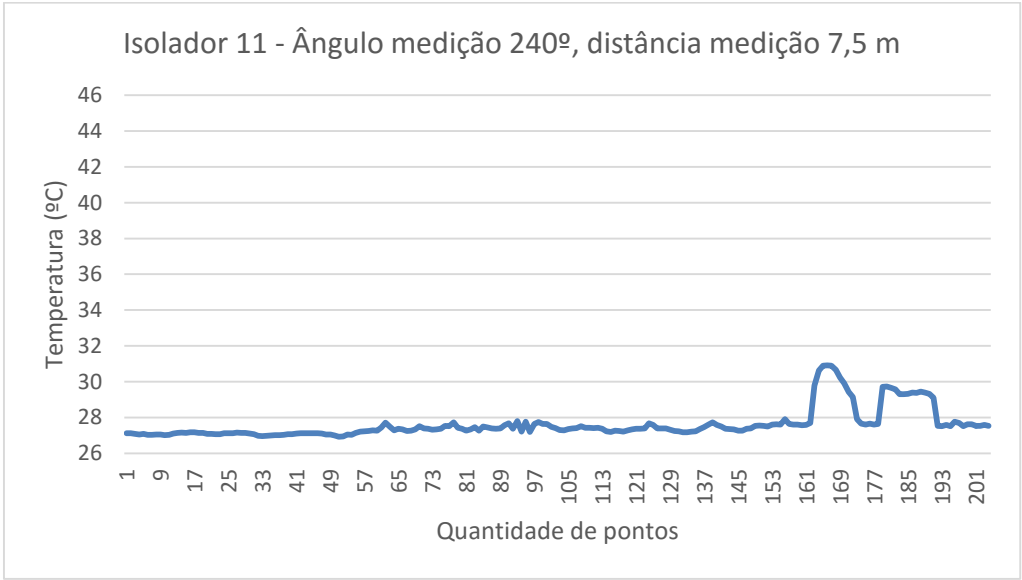
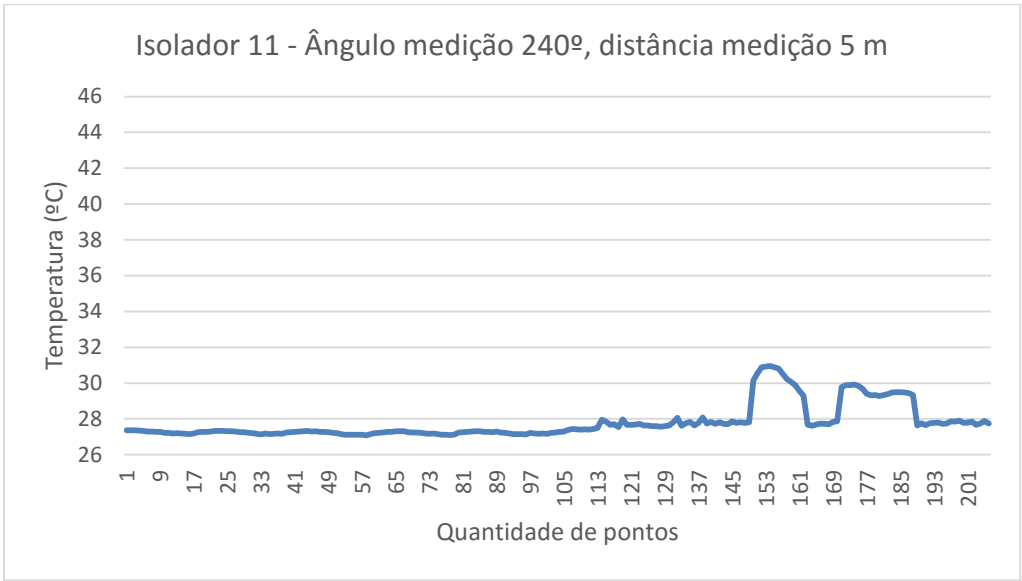


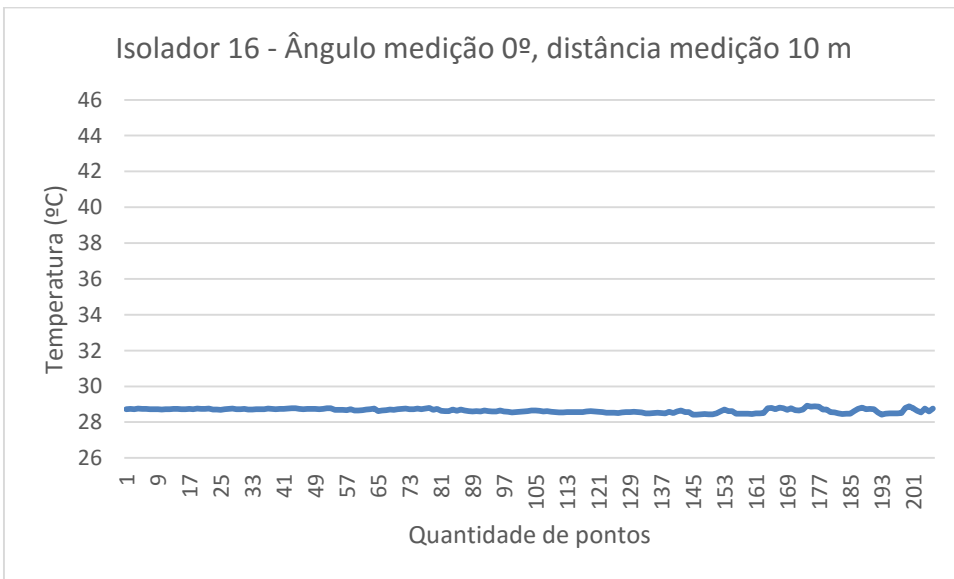
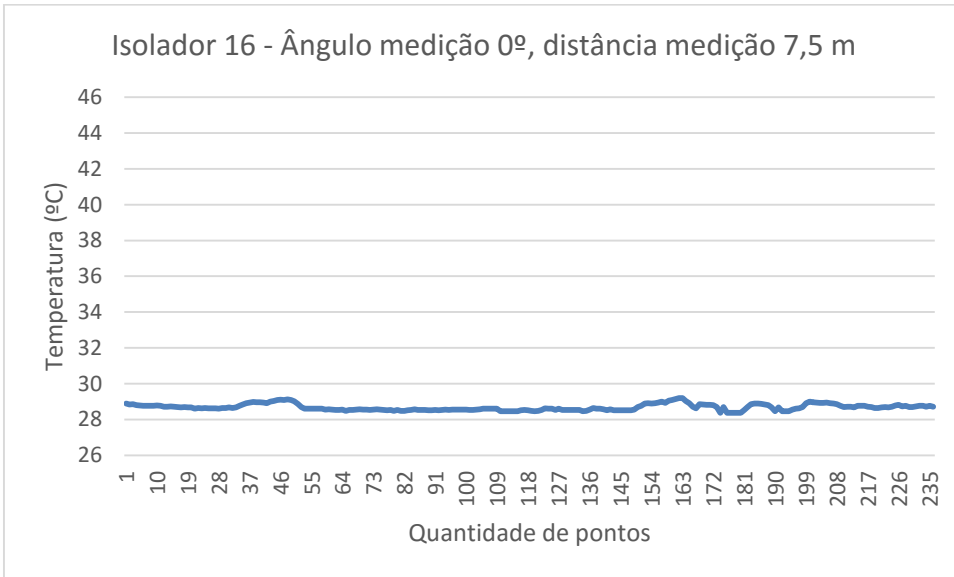
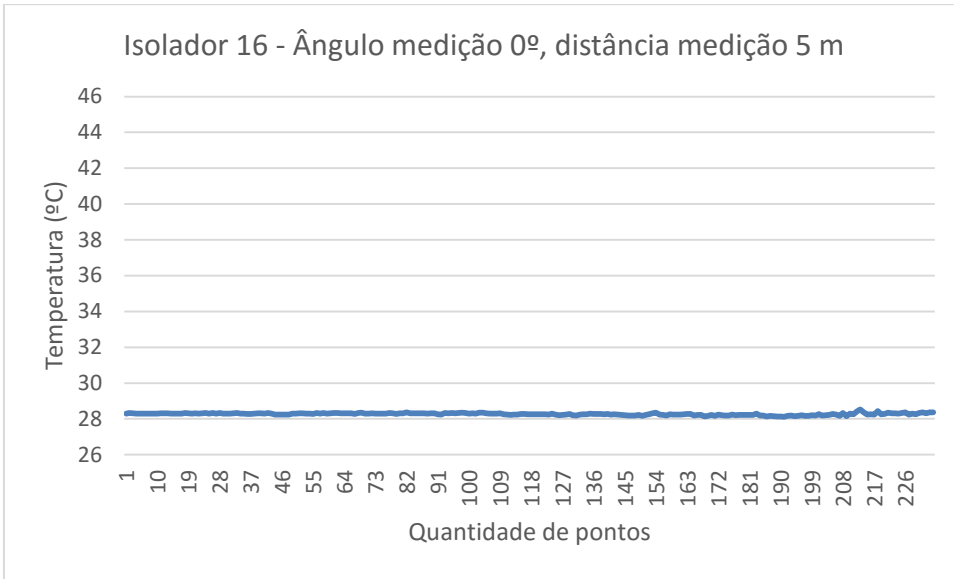


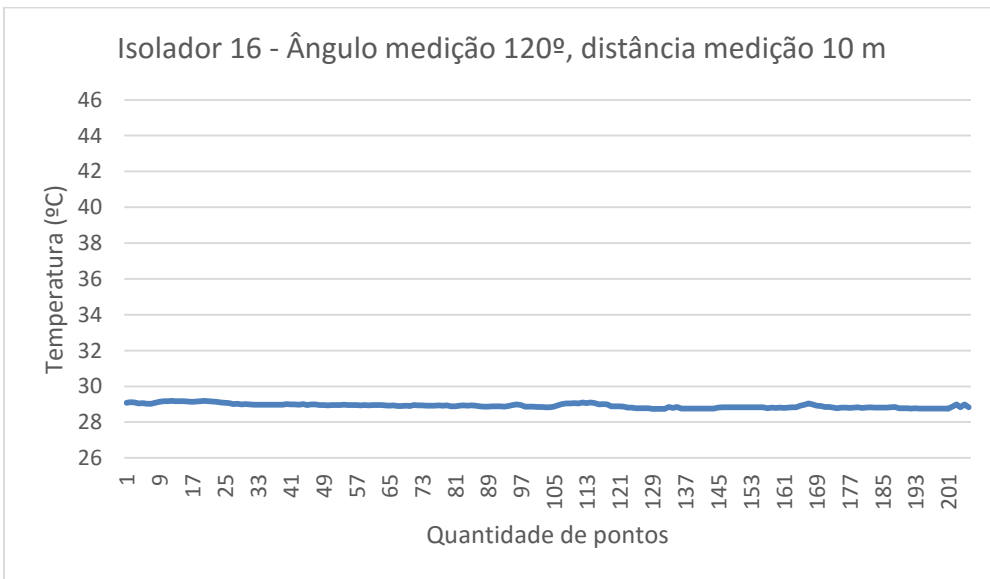
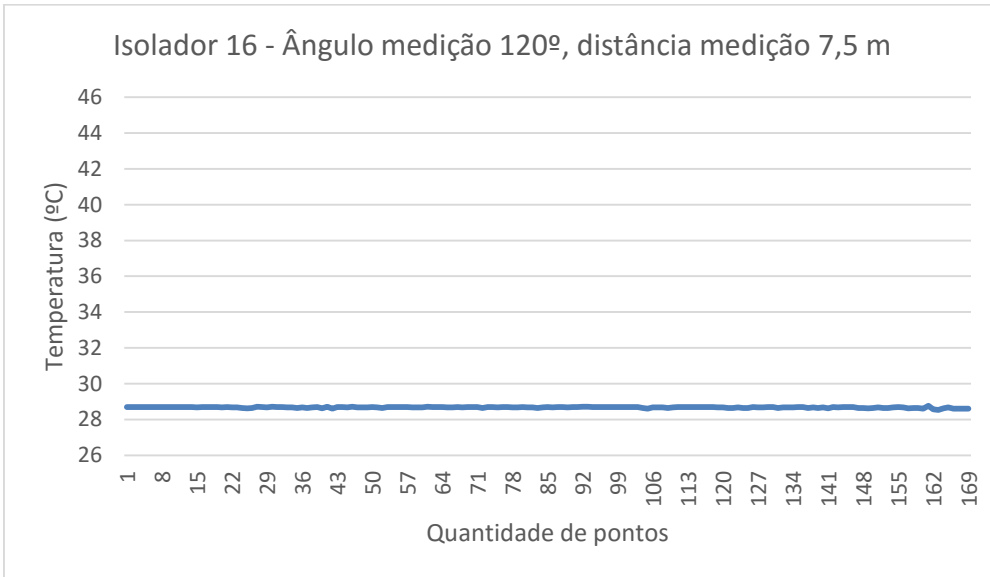
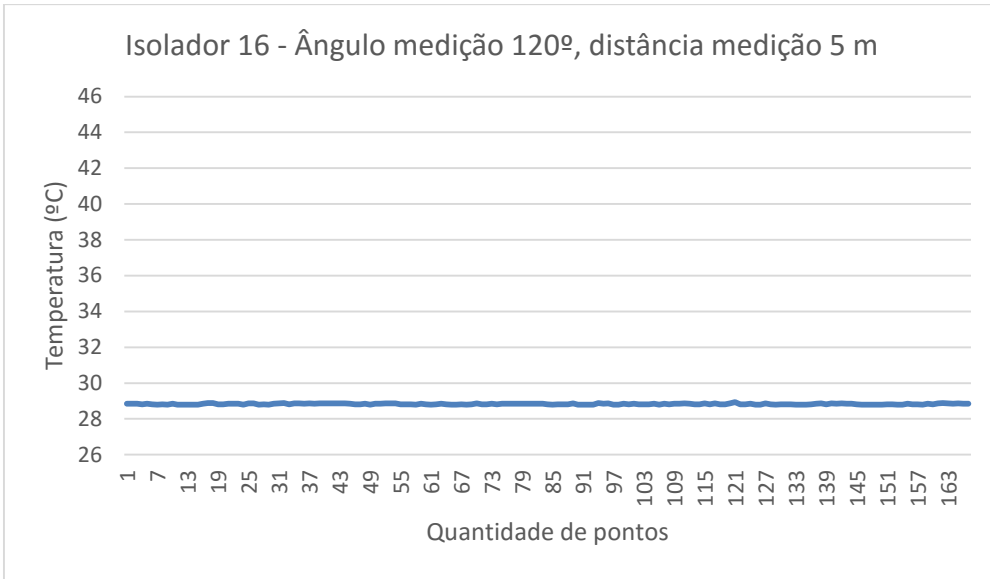


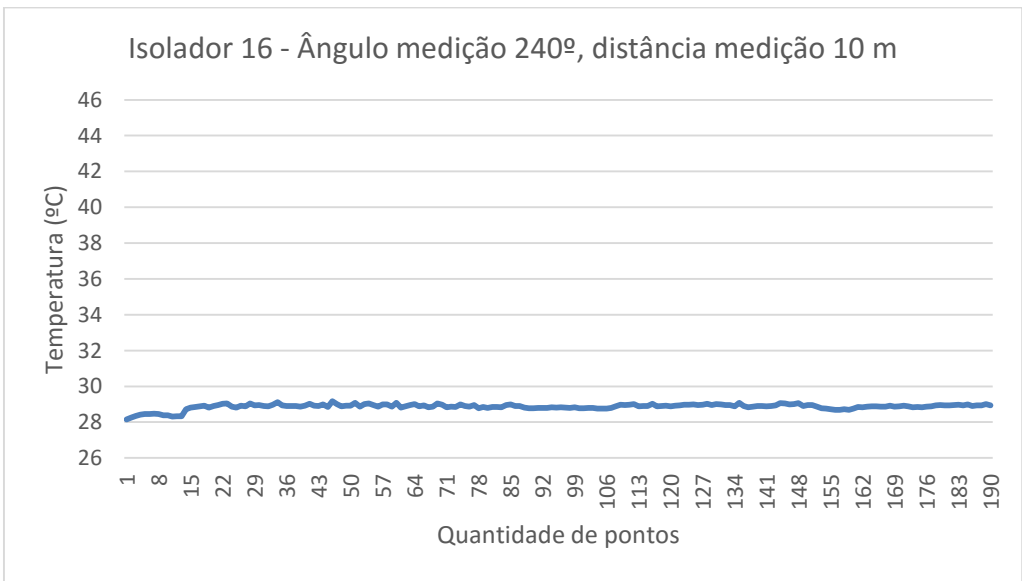
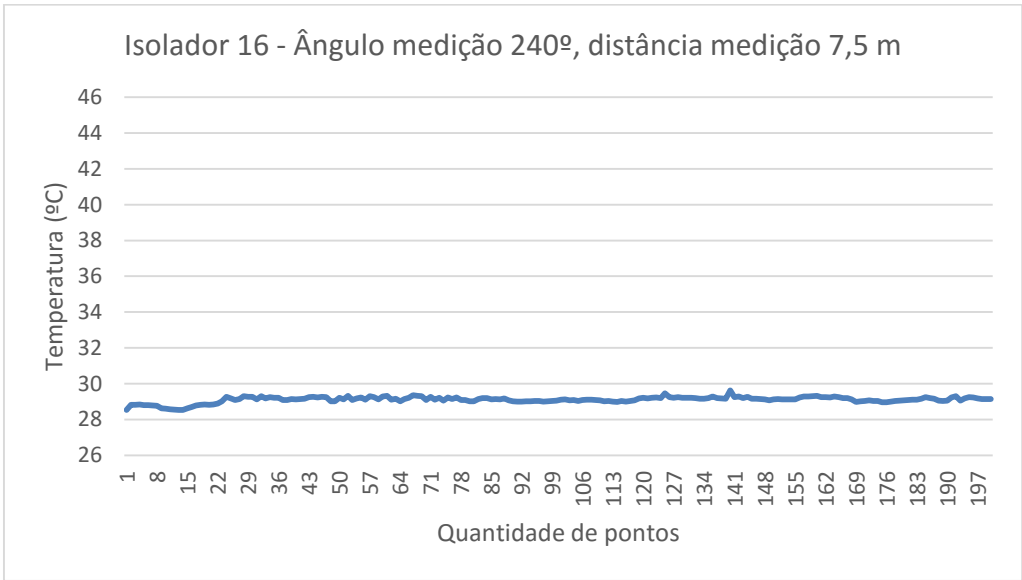
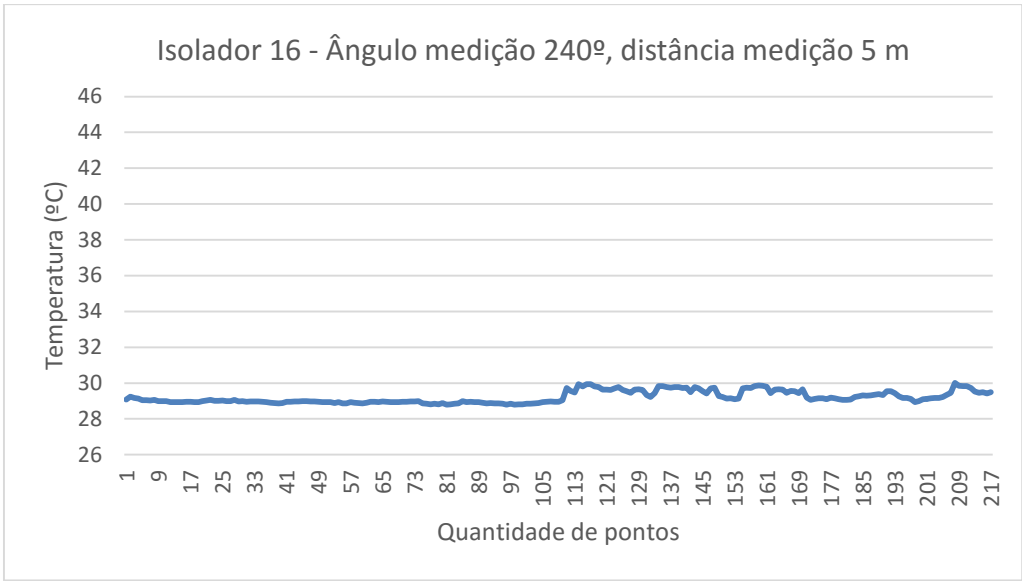






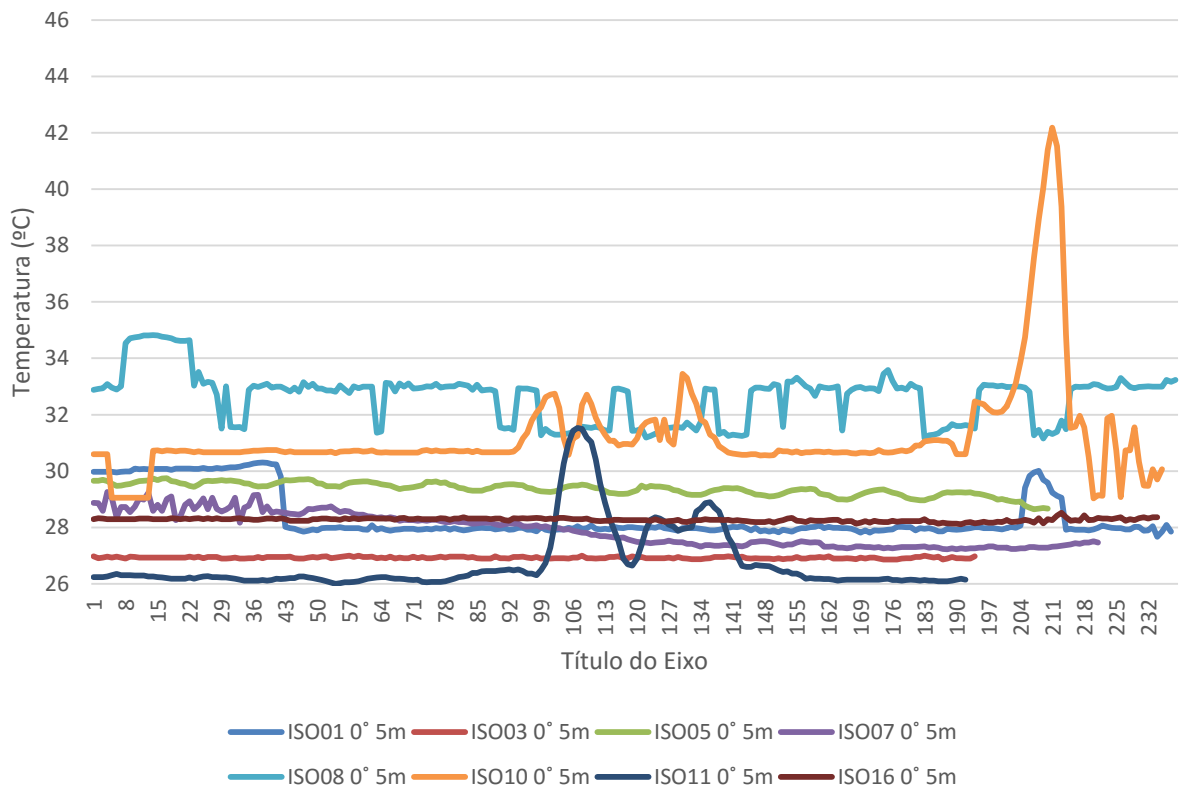




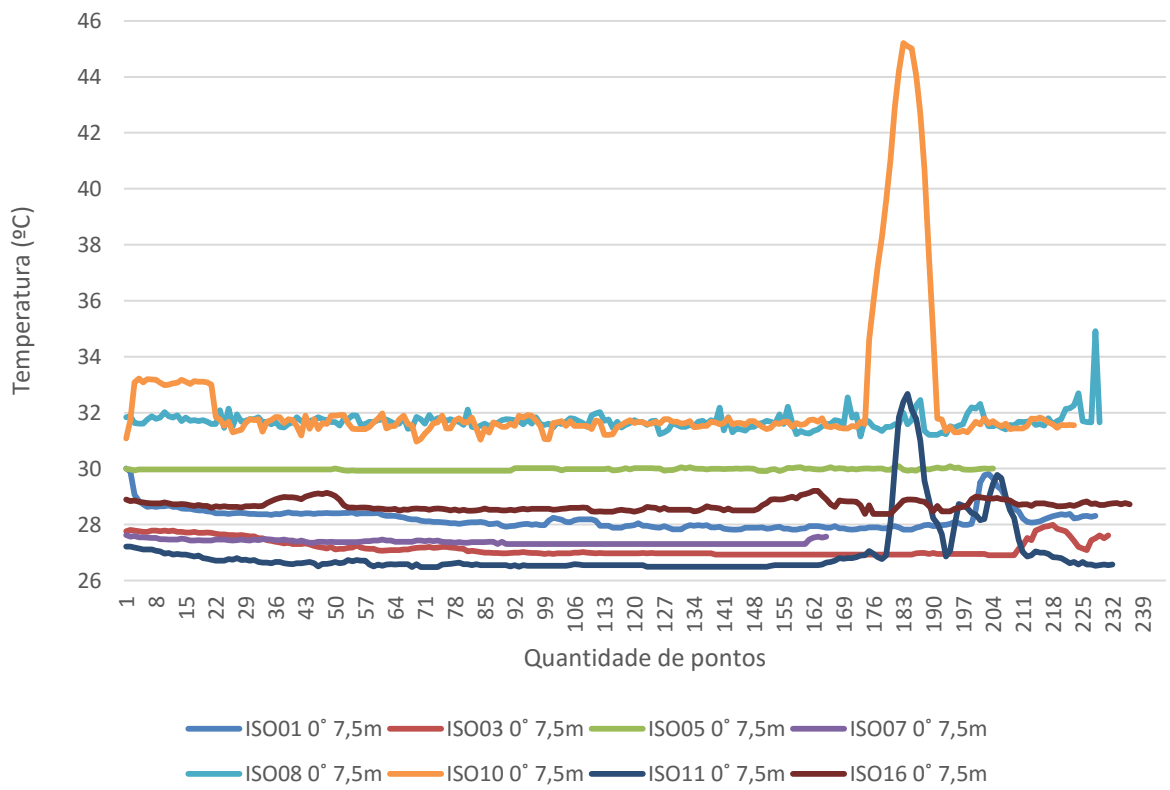




Temperatura todos os isoladores medidos a distância de 5 m



Temperatura todos os isoladores medidos a distância de 7,5 m



### Temperatura todos os isoladores medidos a distância de 10 m

