



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA  
COMPUTAÇÃO

Lena Patricia Souza Rodrigues

**Lógica Fuzzy e Transformada Wavelet Aplicadas no  
Processo de Captura e Interpretação de Termogramas  
de Para-Raios**

DM/2013

Belém-Pará  
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA  
COMPUTAÇÃO

Lena Patricia Souza Rodrigues

**Lógica Fuzzy e Transformada Wavelet Aplicadas no  
Processo de Captura e Interpretação de Termogramas  
de Para-Raios**

**DM/ 2013**

Belém-Pará  
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA  
COMPUTAÇÃO

Lena Patricia Souza Rodrigues

**Lógica Fuzzy e Transformada Wavelet Aplicadas no  
Processo de Captura e Interpretação de Termogramas  
de Para-Raios**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas e Naturais pertencente à Universidade Federal do Pará (UFPA) para obtenção do Grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Morais da Silveira

Belém-Pará  
2013

---

LRodrigues, Lena Patrícia Souza

Lógica Fuzzy e Transformada Wavelet Aplicadas no Processo de Captura e interpretação de Termogramas de Para-raios/ Lena Patrícia Souza Rodrigues;

Orientador, Antonio Morais da Silveira.- 2013.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Belém, 2013.

1.Sistemas Fuzzy. 2.Transformada Wavelet. 3.Para-raios. 4.Termogramas. 5. Avaliação de Termogramas. Título.

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA**  
**COMPUTAÇÃO**

**LÓGICA FUZZY E TRANSFORMADA WAVELET APLICADAS NO**  
**PROCESSO DE CAPTURA E INTERPRETAÇÃO DE**  
**TERMOGRAMAS DE PARA-RAIOS**

**AUTOR:** LENA PATRICIA SOUZA RODRIGUES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

APROVADA EM 26 /04 / 2013

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Antonio Morais da Silveira  
(ORIENTADOR – PPGCC-UFPA)

---

Prof. Dra Terezinha Ferreira de Oliveira  
(CO-ORIENTADOR – PPGME-UFPA)

---

Prof. Dr. Jefferson Magalhães de Morais  
(MEMBRO-PPGCC-UFPA)

---

Prof. Dr. João Marcelo Brazão Protázio  
(MEMBRO-PPGME-UFPA)

VISTO:

---

Prof. Dr. Nelson Cruz Sampaio Neto (UFPA)  
**Coordenador do PPGCC – UFPA**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por todas as oportunidades.

Agradeço e dedico à minha família, em especial à minha vovozinha, Iracema, que viverá em meus pensamentos eternamente. À minha mãe Izabel, por tudo, infinita são as minhas palavras para agradecer-lhe todo seu amor.

Agradecimentos ao meu grande Amor Diovanni M. A., pelo carinho, apoio em todos os momentos.

Agradeço à toda minha família, por sempre estarem ao meu lado.

À UFPA, agradeço por essa oportunidade.

À Eletronorte, agradeço por todo apoio e atenção de seus funcionários em especial ao Julio Salheb e Fernando Wilson.

A todos os meus amigos, e ao grupo de pesquisa.

Agradeço, em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Morais da Silveira, à minha co-orientadora, Profª. Dra. Terezinha Ferreira de Oliveira e ao Prof. Dr. João Marcelo Brazão Protázio, pela imensa dedicação ao longo do trabalho.

**“AMEM UNS AOS OUTROS COMO EU AMO VOCÊS”**

**JOÃO – BÍBLICO**

# RESUMO

Para-raios são utilizados com o intuito de minimizar danos causados por descargas elétricas, protegendo um sistema elétrico de potência contra surtos de tensão que podem causar interrupção no fornecimento de energia elétrica. Neste trabalho é apresentado um método para avaliar o processo de captura e interpretação de termogramas de para-raios de subestações elétricas da Eletronorte/Eletrobrás, localizadas na região Amazônica, Pará, Brasil, a partir de dados capturados com técnicas de Termovisão. Foi desenvolvida uma solução com lógica *fuzzy* para a predição da diferença média de temperatura. A solução proposta comprovou que algumas variáveis de domínios imprecisos, tais como: Radiação Solar, Distância e Brisa, observadas durante o processo de captura das imagens de para-raios podem influenciar nos diagnósticos gerados. Num segundo momento foi utilizada a transformada wavelet, que decompõe uma imagem em bandas de diferentes frequências, permitindo a detecção de objetos por meio da característica de suas frequências e da discriminação de ruídos. A transformada wavelet possibilitou observar o comportamento da temperatura ao longo do corpo dos para-raios de acordo com o aumento da escala, a partir da avaliação de pontos quentes (PQ) e pontos não quentes (PNQ) em termogramas de para-raios, o que permitiu a expressão visual do comportamento da temperatura ao longo do corpo do equipamento. A integração das duas técnicas, aliada ao conhecimento dos especialistas, possibilitou a construção da solução proposta, que obteve resultados bem próximos da realidade, podendo ser utilizada como suporte durante a análise de termogramas de para-raios de subestações elétricas.

**Palavras-chaves:** Transformada Wavelet, Sistema Fuzzy, para-raios, Termovisão



# ABSTRACT

Lightning arrester are used in order to minimize damage caused by electrical discharges protecting a power system from power surges that can cause disruption in electricity supply. This paper presents a method to evaluate the process of capturing and interpreting thermograms lightning arrester of electrical substations Eletronorte / Eletrobrás, located in the Amazon region, Pará, Brazil from data captured with Thermal Imaging techniques. We developed a solution with fuzzy logic to predict the average temperature difference. The proposed solution proved that some variables of imprecise domains, such as time, position, distance and wind, observed during the process of capturing images of lightning arrester, can influence in diagnostics generated. In a second step we used the wavelet transform, which decomposes an image into different frequency bands, allowing detection of objects through their characteristic frequency discrimination and noise. The wavelet transform possible to observe the behavior of the temperature along the body of the lightning arrester according to the increased scale, based on the evaluation of hot spots (PQ) and no hot spots (PNQ) in thermograms of lightning arrester which allowed the visual expression of temperature behavior along the body of equipment. The integration of the two techniques, coupled with the knowledge of experts, enabled the construction of the proposed solution, which obtained results very close to reality and can be used as decision support systems for the analysis of thermograms of lightning arrester for electrical substations.

**KEYWORDS:** Wavelet Transform, Fuzzy System, lightning arrester, thermography

# SUMÁRIO

---

<b>CAPITULO 1 - Introdução.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1. Contextualização .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. Trabalhos relacionados .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3. Metodologia Proposta.....</b>	<b>17</b>
<b>1.4. Contribuições.....</b>	<b>18</b>
<b>1.5. Objetivos da Dissertação .....</b>	<b>19</b>
1.5.1. Objetivo Geral.....	19
1.5.2. Objetivos Específicos .....	19
<b>1.6. Estrutura do Trabalho .....</b>	<b>19</b>
<b>CAPITULO 2 - Fundamentação Teórica.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1. Introdução .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2. Lógica Fuzzy .....</b>	<b>20</b>
2.2.1. Teoria de Conjuntos Fuzzy .....	21
2.2.2. Variáveis Linguísticas.....	21
2.2.3. Operações com Conjuntos Fuzzy .....	21
2.2.4. Regras Fuzzy .....	21
2.2.5. Estrutura de um Sistema Fuzzy .....	21
a) Fuzzificador .....	21
b) Base de Regras Fuzzy .....	22
c) Máquina de Inferência Fuzzy.....	22
d) Defuzzificador .....	22
<b>2.3. Termovisão .....</b>	<b>23</b>
2.3.1. Para-raios .....	23
2.3.2. Termografia.....	23
2.3.3. Emissividade .....	24
2.3.4. Termovisores .....	24
2.3.5. A Formação da Imagem Digital Infravermelha .....	25
<b>2.4. Transformada Wavelet .....</b>	<b>27</b>
2.4.1. Transformada Wavelet de Daubechies .....	27

2.4.2. A Função Wavelet de Haar .....	28
2.4.3. Análise em Multiresolução .....	28
2.4.4. Aproximações e Detalhes .....	28
2.4.5. Caracterização de Imagens.....	28
<b>CAPITULO 3 - Sistema Fuzzy Aplicado Ao Processo de Captura de Termogramas de Para-Raios .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1. Introdução .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2. Área de Estudo .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3. Solução Utilizada pelo Laboratório de ENEE da Eletronorte/Eletronorte/Eletronorte/Eletronorte/Eletronorte.....</b>	<b>32</b>
<b>3.4. Solução Proposta .....</b>	<b>34</b>
3.4.1. Módulo Processo de Captura de Termogramas.....	35
3.4.2. Estrutura do sistema fuzzy proposto.....	36
3.4.3. Variáveis de entrada e de saída do sistema .....	37
3.4.4. Base de regras do sistema .....	40
3.4.5. Máquina de inferência utilizada .....	41
3.4.6. Defuzzificação da saída fuzzy.....	42
<b>3.5. Resultados obtidos pelo sistema fuzzy .....</b>	<b>43</b>
a) Simulação 1 – Análise da presença de Radiação Solar .....	44
b) Simulação 2 - Comparações entre o método do laboratório e o método proposto .....	45
<b>3.6. Algumas constatações.....</b>	<b>46</b>
3.6.1. Influência da variável “Radiação Solar” .....	46
3.6.2. Influência da variável “Brisa” .....	46
3.6.3. Influência da variável “Distância” .....	47
a) Considerações - influência da radiação solar, brisa e distância .....	48
<b>CAPITULO 4 - Transformada Wavelet Aplicada na Interpretação de Termogramas de Para-Raios .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1. Análise multi-resolução para gerar a Identificação de Ponto Quente e Não Quente para a interpretação de Termogramas de Para-Raios.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2. Identificação de Pontos Quentes .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3. Identificação do Ponto Não Quente .....</b>	<b>57</b>
<b>CAPITULO 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros .....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>65</b>

## ÍNDICE DE FÍGURAS

Figure 1 Metodologia proposta.....	18
Figure 2 Para-raios em linhas de transmissão (FONTE: Laboratório de ENEE da Eletronorte).....	23
Figure 3 Localização geográfica das subestações elétricas no estado do Pará.....	31
Figure 4 Ilustração da medição termográfica (FONTE: Laboratório de ENEE da Eletronorte).....	32
Figure 5 Proposta de solução utilizando lógica fuzzy .....	34
Figure 6 Estrutura do sistema fuzzy proposto .....	36
Figure 7 Variável de entrada “Temperatura Máxima” .....	38
Figure 8 Variável de entrada “Temperatura Media” .....	38
Figure 9 Variável de entrada “Radiação Solar” .....	39
Figure 10 Variável de entrada “Brisa” .....	39
Figure 11 Variável de entrada “Distância” .....	39
Figure 12 Nível de “Influência Temperatura” .....	40
Figure 13 Saída do módulo fuzzy com o resultado da defuzificação .....	43
Figure 14 Análise da Radiação Solar na Influência de Temperatura .....	48
Figure 15 Análise da Brisa na Influência de Temperatura.....	49
Figure 16 Análise da Distância na Influência de Temperatura .....	49
Figure 17 Imagem Original (parte superior), imagem filtrada através da decomposição multi-resolução (parte inferior) contendo as baixas frequências retiradas do sinal.....	52
Figure 18 Imagem original (esquerda) (FONTE: Laboratório de ENEE da Eletronorte) .....	53
Figure 19 Imagem original (FONTE, Laboratório de ENEE da Eletronorte).....	53
Figure 20 Imagem processada a partir da figura 19.....	54
Figure 21 Decomposição wavelet para a identificação de ponto quente .....	55
Figure 22 Identificação de ponto quente (análise da matriz de pixel) .....	56
Figure 23 Análise do termograma utilizando Termovisão (a) (FONTE: Laboratório de ENEE da Eletronorte) e análise do termograma utilizando Transformada Wavelet (b) .....	56
Figure 24 Decomposição wavelet.....	57
Figure 25 Identificação de ponto não quente ( Matriz de pixel) .....	58
Figure 26 Análise do Ponto não quente. ....	58

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de Diagnóstico de para-raios. ....	33
Tabela 2 Descrição das variáveis de entrada e saída do sistema fuzzy .....	35
Tabela 3 Conjuntos fuzzy para as variáveis de entrada e saída.....	37
Tabela 4 Algumas regras do sistema de inferência fuzzy .....	41
Tabela 5 Regra do modulo fuzzy com a análise da presença de Radiação Solar durante o processo de captura de termogramas .....	46
Tabela 6 Regra do modulo fuzzy com a análise da brisa .....	46
Tabela 7 Regra do modulo fuzzy com a análise da Distância .....	47



# CAPITULO 1 - Introdução

---

## 1.1. Contextualização

Estudos referentes ao estado de funcionamento de para-raios são de extrema importância para auxiliar na programação de ações preventivas e no monitoramento desses equipamentos.

Os para-raios são utilizados com o intuito de proteger um sistema elétrico de potência (SEP) contra possíveis surtos de tensão que podem, dentre outros problemas, causar interrupção no fornecimento de energia elétrica. Com o intuito de evitar problemas na operacionalidade dos SEP's, por exemplo, a explosão de equipamentos, que incidiriam em perdas materiais e humanas, tem se incentivado o desenvolvimento de trabalhos que possam contribuir de forma eficaz na programação de manutenções preditivas em para-raios.

A Termovisão é uma técnica de inspeção utilizada em operações de manutenção preventivas de para-raios (CHOU, 2009). Esta técnica se baseia na energia calorífica emitida pelo equipamento que está sendo inspecionado, apresentando-a na forma de imagem. A energia emitida pelo corpo é captada com o auxílio de um equipamento chamado termovisor. Esse equipamento capta a imagem térmica (termograma) através das ondas infravermelhas emitidas pelos para-raios. (MALDAGUE, 1990; ISHINO, 2002; FAN, 2005).

Em subestações elétricas, um dos elementos chaves a ser monitorado com o uso da termovisão é o surgimento de pontos quentes em contatos físicos com as estruturas que compõem o equipamento e que podem fornecer informações importantes (assinatura térmica) de uma condição de falha incipiente (CHOU, 2009).

O diagnóstico do status dos para-raios é, portanto, obtido a partir da análise de termogramas, coletados durante a operacionalidade dos equipamentos. Com base no conhecimento tácito dos especialistas, as imagens dos termogramas são analisadas e é emitido um parecer técnico que serve para nortear o planejamento das atividades de manutenções preventivas nesses equipamentos. Os resultados obtidos podem ser

comprometidos caso o processamento das informações não seja realizado considerando as variações ou influências que podem ocorrer durante este tipo de processamento.

Este trabalho foi desenvolvido no laboratório de Ensaios Elétricos Especiais (ENEE) do Centro de Tecnologia da Eletronorte S.A, onde foi observado que alguns parâmetros podem influenciar nos resultados de diagnósticos por meio de termogramas, podendo inclusive resultar em falsos diagnósticos (CHOU, 2009; NASCIMENTO, 2009), dentre estes: a presença de radiação solar durante a inspeção por Termovisão; a diferença entre as temperaturas máxima e média no corpo dos para-raios; a distância para obtenção do termograma (variando a distância varia também o ângulo de inclinação em que a Termovisão é realizada).

Algumas propostas de solução utilizando técnicas computacionais têm sido formuladas, procurando contribuir para uma melhor aproximação dos reais resultados. Essas propostas, além da análise técnica dos equipamentos envolvidos no processo, procuram contemplar também questões subjetivas, relacionadas com a experiência dos especialistas da área.

## **1.2. Trabalhos relacionados**

RESENDE (2001) apresentou uma abordagem que permite a detecção, localização no tempo e identificação de problemas de qualidade de energia elétrica. O método foi desenvolvido com a utilização da transformada discreta de Wavelet (DWT) com a decomposição do sinal de modo que qualquer variação é detectada na transformada. A curva de energia é analisada e se estabelece uma relação entre esta e a curva correspondente no estado fundamental. Como cada defeito apresentou variações únicas na forma de onda sinusoidal pura foi possível fazer uma classificação do tipo de defeito.

LAURENTYS (2004) desenvolveu um Sistema de Integração e Gerenciamento Avançado de para-raios, sistema computacional que integra as informações pertinentes às medições tornando-as disponíveis aos seus usuários. Este sistema faz uso das técnicas de termografia, corrente de fuga e radiointerferência para diagnosticar a condição operativa e utiliza para a geração de cada diagnóstico parcial um conjunto de sistemas de inferência Neurofuzzy adaptativo. Segundo o autor, este sistema aumenta significativamente a produtividade, a confiabilidade, a qualidade, disponibilizando as informações de medições com alta desempenho, flexibilidade, reusabilidade e escalabilidade.



MAHANTY (2007) desenvolveu um sistema utilizando lógica fuzzy. O sistema foi centrado de forma robusta para o diagnóstico de defeitos em sistemas de energia elétrica (baixa sensibilidade ao dinamismo).

NASCIMENTO (2009) apresentou o aperfeiçoamento da técnica da termovisão para diagnosticar a situação atual de para-raios, instalados nos sistemas de potência.

Esta dissertação contribui para a solução desse importante problema, propondo uma metodologia para o prognóstico de influências ocorridas durante o processo de captura de termogramas de para-raios, e na interpretação dos respectivos termogramas, podendo ser visualizada como um instrumento a mais para a orientação e entendimento deste processo.

### **1.3. Metodologia Proposta**

A metodologia proposta faz uso das seguintes técnicas: lógica fuzzy, transformada wavelet e imagens termográficas obtidas por meio de Termovisores (Figura 1). O sistema fuzzy foi utilizado para diagnosticar o grau de influências ocorridas durante o processo de captura de termogramas de para-raios para a predição da diferença média de temperatura. Essas influências se não forem observadas, podem comprometer sobremaneira a geração dos resultados do diagnóstico de para-raios, podendo inclusive resultar em falsos diagnósticos. A transformada wavelet foi utilizada para decompor a imagem em bandas de diferentes frequências, permitindo a detecção de objetos por meio da característica da frequência deles e a partir da discriminação de ruídos. Desse modo, o foco do trabalho foi na busca de possíveis melhorias no processo de captura dos termogramas, e no uso da transformada wavelet no diagnóstico de para-raios a partir da análise de termogramas.

Os dados usados no estudo de caso apresentado foram obtidos em subestações elétricas da Eletronorte/Eletronorte, localizadas na região Amazônica, Pará, Brasil.

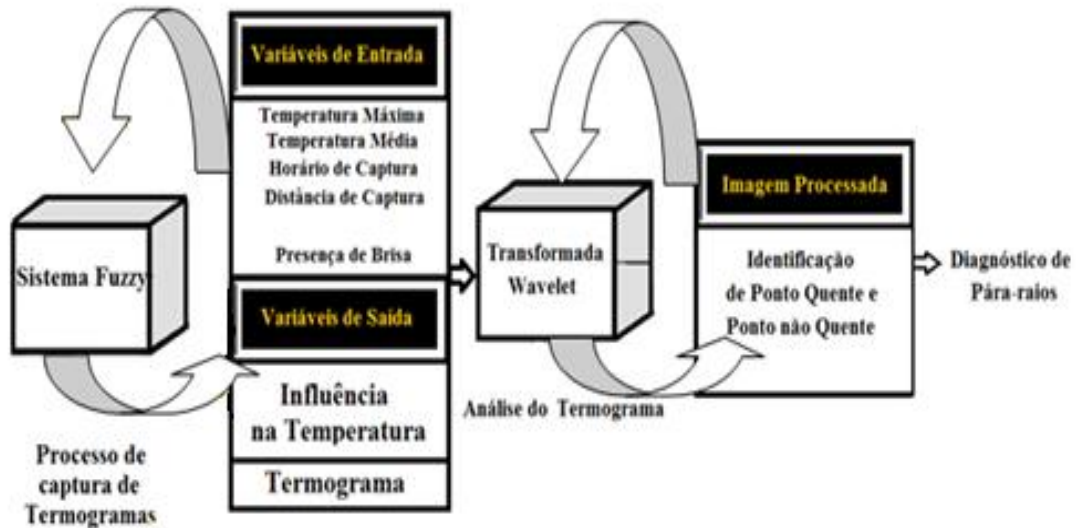


Figure 1 Metodologia proposta

## 1.4. Contribuições

Dentre as contribuições que a solução proposta apresenta, pode-se destacar: Geração de diagnóstico bem próximo da realidade sobre as condições da operacionalidade de para-raios em SEP's. Uso da abordagem fuzzy para tratar as incertezas inerentes ao processo de captura de termogramas de para-raios. Avaliação de termogramas por meio de transformada wavelet.

A solução proposta pretende também contribuir com o processo de automatização dos sistemas elétricos, visando a melhoria da qualidade no fornecimento de energia elétrica, com redução da quantidade e do tempo de interrupções; melhoria da qualidade de informação para a operação local; redução da incidência de ocorrências no sistema elétrico em razão de erros humanos de operação; padronização de relatórios.

## **1.5. Objetivos da Dissertação**

### 1.5.1. Objetivo Geral

Analisar o perfil térmico e o processo de captura de termogramas de para-raios do laboratório de ENEE da Eletronorte-Eletronorte Belém-Pará por meio da Lógica Fuzzy e da Transformada Wavelet.

### 1.5.2. Objetivos Específicos

- Pesquisar e identificar os principais dados/informações relacionadas ao processo captura e análise do perfil térmico de termogramas de para-raios, por parte do laboratório;
- Aplicar a solução em estudos de caso referentes aos processos de geração de diagnósticos de para-raios realizados pelos técnicos do laboratório;
- Avaliar a solução proposta por meio da comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os gerados pelo método utilizado atualmente pela empresa.

## **1.6. Estrutura do Trabalho**

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos com os assuntos assim distribuídos: Capítulo 1, Introdução apresenta o contexto do problema investigado, uma visão geral da dissertação e os objetivos da pesquisa. Capítulo 2 apresenta as técnicas utilizadas como referencial teórico, contendo uma introdução a Lógica Fuzzy, Transformada Wavelet e as variáveis consideradas no contexto dos para-raios. Capítulo 3 apresenta sistemas fuzzy aplicado ao processo de captura de termogramas de para-raios, as simulações de casos práticos utilizando o sistema fuzzy proposto. O Capítulo 4 apresenta a aplicação da Transformada Wavelet na análise de termogramas de para-raios. E o Capítulo 5 apresenta as conclusões e faz referência a possíveis trabalhos futuros.

# CAPITULO 2 - Fundamentação Teórica

---

## 2.1. Introdução

Para a consolidação do método e técnicas utilizadas neste trabalho foi realizado pesquisas, em fontes seguras, tais como revistas científicas, pesquisas de bases conceituais, com diversas vertentes, que serviram para a determinação do referencial teórico.

Foi verificado que estudos envolvendo técnicas da Inteligência computacional tais como: Logica Fuzzy, além da técnica Transformada Wavelet e Termovisão, aplicadas aos fatores que influenciam no processo de captura e avaliação de imagens térmicas de para-raios ainda são pouco exploradas. Por isso, propostas como a apresentada, inter-relacionando esses domínios do conhecimento são extremamente importantes no processo de captura e interpretação de imagens. Desse modo, este trabalho é inovador, uma vez que aborda no método proposto os fatores de campo que estão relacionados com as influências que podem ocorrer em relação à qualidade das imagens durante o processo de captura de imagens térmicas de para-raios. As técnicas da inteligência computacional investigadas mostraram-se alternativas viáveis para apoio ao processo de tomada de decisão em um ambiente de predição de temperatura de para-raios

## 2.2. Lógica Fuzzy

A Lógica Fuzzy (LF) é um modelo baseado na teoria dos Conjuntos Fuzzy. A LF traduz a linguagem humana, imprecisa e qualitativa, em valores que podem ser compreensíveis em máquinas de aplicações diversas (geralmente computadores), sendo, portanto uma lógica multivalente, onde as implicações lógicas estão ligadas a regras de raciocínio e possuem graus de verdade dentro do intervalo  $[0,1]$  (SHAW, 1999; MENDEL, 2009).

### 2.2.1. Teoria de Conjuntos Fuzzy

Zadeh propôs que um conjunto fuzzy  $A$  em um universo  $U$  é definido por uma função de pertinência  $\mu_A: X \rightarrow [0, 1]$ , que quantifica o elemento  $x$  para o conjunto fuzzy. Na lógica clássica (convencional ou booleana) um elemento pertence ou não pertence a um determinado conjunto. Na lógica fuzzy, um elemento pertence a um conjunto com certo grau de pertinência (AGUIAR, 1999).

### 2.2.2. Variáveis Linguísticas

Variável linguística é uma quintupla  $(x, T(x), U, G, M)$ ,  $x$  é o nome da variável;  $T(x)$  é o conjunto de termos de  $x$ , isto é, nomes de valores linguísticos de  $x$ ,  $U$  é o universo de discurso,  $G$  é a regra sintática, para gerar os nomes dos elementos de  $T(x)$ ;  $M$  é a regra semântica ou mapeamento para associar os elementos de  $T(x)$  aos subconjuntos fuzzy definidos em  $U$  (LEE, 1990; MENDEL 2009).

### 2.2.3. Operações com Conjuntos Fuzzy

As operações com conjuntos fuzzy ( $A$  e  $B$ ) são definidas por meio da operação de suas funções de pertinência ( $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ ). As operações básicas para conjuntos fuzzy são: igualdade, subconjunto, união, intersecção e complemento (COX, 1994; BOJADZIEV, 1996; WANG 1997; IBRAHIM 2003).

### 2.2.4. Regras Fuzzy

Em sistemas fuzzy, o conhecimento humano é representado por regras de produção fuzzy do tipo “SE-ENTÃO” conforme WANG (1997) e TOMSOVIC (2000).

### 2.2.5. Estrutura de um Sistema Fuzzy

Genericamente, um sistema fuzzy é composto de quatro componentes: fuzzificador, defuzzificador, máquina de inferência fuzzy e base de regras fuzzy (WANG, 1997).

#### a) Fuzzificador

Um fuzzificador é definido como um mapeamento de um ponto real  $x^*$  pertencente a  $U$  que está contido em  $R$  para um conjunto fuzzy  $A'$  em  $U$  (WANG, 1997). Existem vários critérios para o projeto de um fuzzificador:

O fuzzificador deve considerar o fato que a entrada é um ponto não-fuzzy  $x^*$ , isto é, o conjunto fuzzy  $A'$  deve ter alto valor de pertinência em  $x^*$ ;

Se a entrada é corrompida por ruído, então é desejável que o fuzzificador ajude a supri-lo;

O fuzzificador deve ajudar a simplificar os cálculos envolvidos na máquina de inferência fuzzy.

Dentre os diferentes tipos de fuzzyficadores, pode-se destacar: fuzzificador triangular, fuzzificador trapezoidal e fuzzyficadores gaussianos. Os fuzzyficadores fazem o mapeamento de um ponto real para um conjunto fuzzy  $A'$  em  $U$ .

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados fuzzificadores triangulares. Estes fuzzificadores simplificam os cálculos na máquina de inferência quando as funções de pertinência nas regras fuzzy IF-THEN são também triangulares.

#### b) Base de Regras Fuzzy

A base de regras consiste de um conjunto de regras do tipo “IF-THEN”. Esta é bastante intuitiva sob o ponto de vista humano.

Um conjunto de regras fuzzy “IF-THEN” é consistente se não existem regras com a mesma parte “IF” e diferentes parte “THEN” e é contínuo se não existem regras vizinhas cujos conjuntos fuzzys da parte “THEN” têm interseção vazia (WANG, 1997).

#### c) Máquina de Inferência Fuzzy

Os princípios da lógica fuzzy são utilizados para combinar as regras “IF-THEN” existentes na base em um mapeamento do conjunto fuzzy  $A'$  em  $U$  para o conjunto fuzzy  $B'$  em  $V$ .

#### d) Defuzzificador

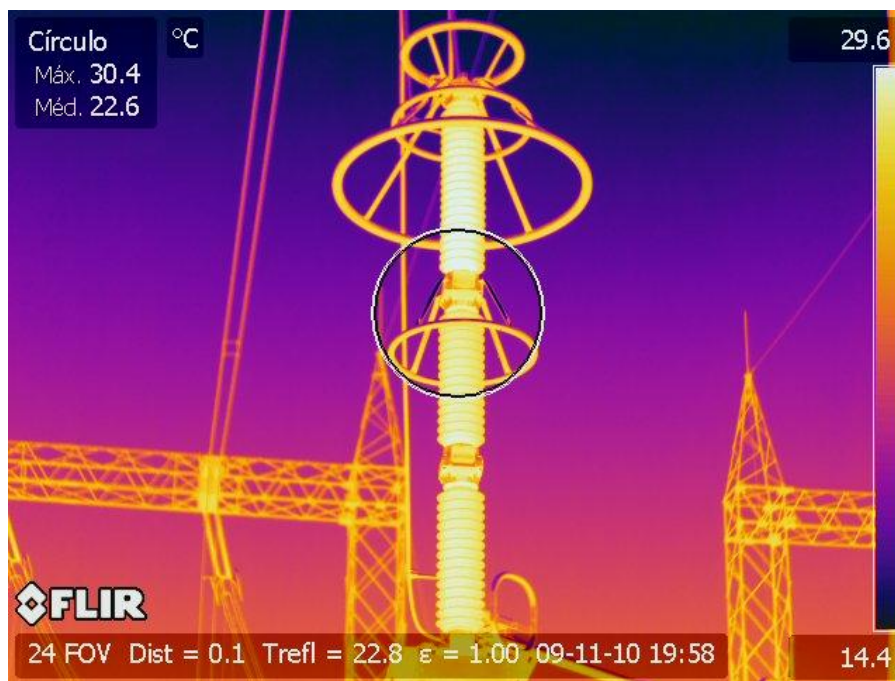
O defuzzificador é definido como um mapeamento de um conjunto fuzzy de saída da máquina de inferência em um valor real. É responsável por especificar um ponto na saída que melhor represente o conjunto fuzzy, ou seja, o resultado do sistema.

Existem vários tipos de defuzzificadores, conforme WANG (1997), dentre estes os mais utilizados são: centro de gravidade, centro ponderado e máximo valor. O defuzzificador centro de gravidade (ou centroide) foi o utilizado neste trabalho, pelo fato de estar disponível no Toolbox de Lógica Fuzzy do Matlab (MATWORKS, 2001).

## 2.3. Termovisão

### 2.3.1. Para-raios

Os para-raios são utilizados com o intuito de proteger um SEP contra surtos de tensão que podem causar interrupção no fornecimento de energia elétrica (Figura 2).



**Figure 2 Para-raios em linhas de transmissão (FONTE: Laboratório de ENEE da Eletronorte)**

Os para-raios sofrem interferências de natureza elétrica e térmica, como a poluição, de modo que a combinação de poluição e umidade pode acarretar o aumento da corrente de fuga, podendo resultar em explosão ou queima. Assim, estudos referentes ao estado de funcionamento de para-raios são de extrema importância para auxiliar na programação de ações preventivas de manutenção e no monitoramento desses equipamentos.

### 2.3.2. Termografia

A termografia é um método de inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos a partir de imagens com a distribuição de calor (termogramas) (NASCIMENTO, 2009). Regiões com temperaturas elevadas em equipamentos eletromecânicos podem ser detectadas com esta técnica de inspeção e dependendo do seu valor uma falha pode ser rapidamente apontada.

A Termovisão é uma técnica termográfica de inspeção utilizada em operações de manutenções preventivas de para-raios (CHOU, 2009). Esta técnica se baseia na energia calorífica emitida pelo equipamento que está sendo inspecionado, apresentando-a em forma de imagem. A energia emitida pelo corpo é captada com o auxílio de um equipamento chamado termovisor. Esse equipamento capta uma imagem térmica (thermogram) através das ondas infravermelhas emitidas pelos para-raios. (MALDAGUE 1990; ISHINO 2002; FAN 2005).

### 2.3.3. Emissividade

A emissividade consiste na habilidade de um corpo radiar energia. É uma característica da superfície, que depende não apenas do tipo de material, mas da condição da superfície e do comprimento de onda em que a radiação é emitida, que depende da temperatura do corpo.

### 2.3.4. Termovisores

São os aparelhos que formam os termogramas. Os termogramas representam as temperaturas dos corpos na forma de cores, e como a imagem obtida com o termógrafo é provida de uma escala que correlaciona cor e temperatura, é possível a obtenção de resultados esclarecedores quanto a problemas ligados direta ou indiretamente à temperatura. Com estas imagens, também é possível obter-se a temperatura em um ponto ou área do objeto analisado (NASCIMENTO, 2009).

Em temperaturas normais a maioria dos corpos é percebida pela visão humana por causa da luz que retém e não pela luz emitida. Por isso, mais de 90% da irradiação térmica não é percebida pela visão humana (ALVARES, 2008). O princípio básico é filtrar e medir com um detector de sinal a radiação provinda de um objeto e enviar o sinal medido para um processador. A radiação é coletada por um arranjo óptico e dirigida a um detector térmico, que converte a radiação incidente em um sinal de natureza elétrica. A lente é usada para focalizar a imagem.

O dispositivo para ajuste da emissividade serve para adequar melhor as medidas às condições ambientais. A análise da imagem infravermelha exige um entendimento do nível de temperatura, que representa uma medida da resposta do detector de infravermelho, potência radiante infravermelho que é absorvida e integrada por todos os ângulos (NASCIMENTO, 2009).



Esta resposta é não linear e depende dos comprimentos de onda passados pelos filtros da câmera e também da temperatura ambiente. A potência radiante que recai sobre o elemento detector é uma função complexa da radiância da superfície do objeto e do ângulo sólido que depende do sistema ótico da câmera. Como o nível de temperatura é obtido mais por uma integração do que por média, os arranjos de elementos sensores que incorporam um tempo de integração ajustável que permite também ajustar a faixa de temperatura (ou seja, estabelecendo-se o tempo de captura ajusta-se a faixa de temperatura). O ajuste é efetuado eletronicamente na câmera, embora também possa ser efetuado com o uso de filtros. Quando a câmera e o sistema ótico estiverem calibrados para uma faixa específica de temperatura, os valores são então mapeados a temperaturas de tal modo que os níveis de temperatura podem ser interpretados linearmente em termo da temperatura da fonte, com o nível zero correspondendo a menor temperatura da faixa e o nível superior ao topo da faixa (ALVARES, 2008).

#### 2.3.5. A Formação da Imagem Digital Infravermelha

Uma imagem digital monocromática pode ser considerada como uma matriz  $m \times n$ . Os elementos da matriz são chamados pixels representando a abreviação de “picture elements” (JAIN, 1989; MILLER, 1994). Uma imagem térmica é produzida através da radiação térmica de uma cena, compondo um mapa em duas dimensões da irradiação observada, representando as variações de temperatura, emissividade e reflexividade da cena.

No conhecimento a priori para a segmentação de imagens térmicas, o objeto de interesse está sempre com uma temperatura acima ou abaixo da ambiente. As regiões de interesse são, então, caracterizadas por transientes como picos e bordas, que se destacam do fundo, localizado nas regiões de temperatura ambiente (MILLER, 1994).

Uma imagem pode ser considerada como uma função de duas variáveis  $f(x,y)$ , onde os argumentos representam a posição espacial do valor e o valor da função corresponde a sua amplitude. A digitalização em coordenadas espaciais é denominada amostragem da imagem e é determinada pela dimensão do arranjo e da resolução espacial. Quanto maior for a dimensão, maior será a imagem, quanto maior for a resolução maior serão os detalhes discerníveis na imagem.

A imagem digital é uma aproximação da imagem contínua, quanto maior for o número de pixel utilizado para se representar uma mesma imagem maior será a sua resolução. Quanto maior é o grau de amostragem e de quantização, melhor a

aproximação da imagem original. A limitação encontra-se nos detalhes construtivos da câmera, na memória requerida e no processamento digital.

A amplitude define um nível de temperatura. A imagem digital é usualmente obtida através de processos de digitalização onde valores reais são transformados em valores inteiros. A digitalização em termos de amplitude é denominada quantização.

## 2.4. Transformada Wavelet

O uso da Transformada Wavelet (TW) se intensificou para o tratamento de imagens a partir de 1980 quando vários estudos foram desenvolvidos nas mais diversas áreas do conhecimento humano (PORTILA, 2000; PROTÁZIO, 2001; AMOLINS, 2007; AKHBARDEH, 2007; MALLAT, 2009).

A TW é uma ferramenta que permite decompor um sinal em diferentes componentes de frequências, permitindo assim, estudar cada componente separadamente em sua escala correspondente (BOURBAKIS, 2007; DETTORI, 2007). Esta foi desenvolvida como uma alternativa à transformada de Fourier em tempo curto (STFT) para solucionar o problema da resolução.

Atualmente um dos softwares que suporta análise wavelet é o MatLab®, particularmente porque dispõe de uma interface gráfica robusta. Este toolbox é altamente baseado em interfaces gráficas, que auxiliam o trabalho de criação e edição de imagens, mas também pode ser utilizado através de linhas de comando. A principal função deste toolbox é um editor gráfico para criação, treinamento de dados (ASHI, 1999; SANTOS, 2004; MISITI, 2007).

### 2.4.1. Transformada Wavelet de Daubechies

Um tipo de base para Wavelets, muito utilizada em processamento de imagens para extração de atributos de textura, foi proposta por Ingrid Daubechies (DAUBECHIES 1992). A família de Wavelets propostas por Daubechies, permite a análise de um sinal discreto.

A Wavelet de Daubechies de ordem 1 é o mesmo que a Wavelet de Haar. Para cada ordem das Wavelets de Daubechies existe uma função escala, também chamada Wavelet pai, que torna possível a análise de sinais descontínuos.

As wavelets Daubechies (DAUBECHIES, 1992) apresentam-se como as que melhor caracterizam os detalhes da imagem através das wavelets mãe que ficam nas sub-bandas de baixa resolução (os coeficientes de wavelets) enquanto que as wavelets pai caracterizam a tendência do sinal (WANG, 2001). Estas propriedades podem ser aproveitadas para caracterizar uma imagem e gerar o espaço de características aplicando descritores estatísticos sobre esses novos espaços.

#### 2.4.2. A Função Wavelet de Haar

A transformada de Haar foi introduzida em 1910, por Alfred Haar (HAAR 1910; MULCAHY; 1997), e é o mais antigo dos métodos de transformada wavelet. Esta transformada usa pulsos quadrados para aproximar a função original. Transformadas wavelet utilizando funções de Haar, como funções bases, são as mais simples para programar e são computacionalmente as menos exigentes.

#### 2.4.3. Análise em Multiresolução

Análise multiresolução é uma ferramenta matemática que faz com que a TW seja um instrumento potente. Esta análise permite que uma imagem seja decomposta em vários níveis de resolução (MALLAT 1989; BHATTACHARYA 2007).

Neste trabalho foi utilizada a análise por multiresolução desenvolvida por (MALLAT;2009). Esta análise permite uma interpretação baseada em filtros em quadratura como operadores que vão realizar a transformada wavelet.

A Transformada Wavelet é uma transformação integral cujo kernel é uma classe de funções especiais chamadas wavelets (MALLAT, 2009). A principal vantagem do método em comparação a outros métodos espectrais é a sua capacidade de localização no espaço e na frequência, o que permite analisar sinais não estacionários em suas diversas escalas (DAUBECHIES, 1990; CHEN, 2000; PROTAZIO, 2008).

#### 2.4.4. Aproximações e Detalhes

Em análises wavelet, fala-se frequentemente em aproximações e detalhes. O conteúdo de baixa frequência para muitos sinais é a parte mais importante. É este que fornece sua identidade. As aproximações são as altas escalas, isto é, componentes de baixa frequência do sinal. Os detalhes são as baixas escalas, isto é, componentes de alta frequência. Na primeira escala o sinal, passa através de dois filtros complementares e emerge como dois sinais. Este processo introduz uma distorção nas componentes do sinal conhecida por aliasing, fenômeno onde componentes harmônicas de ordem distintas exibem frequências iguais (MALLAT, 2009).

#### 2.4.5. Caracterização de Imagens

Geralmente, para representar uma imagem, muitos dos sistemas de recuperação de imagens utilizam cor, textura e forma, e a recuperação está baseada na similaridade

das características derivadas delas. Embora a cor seja um atributo confiável na recuperação de imagens, situações onde as informações de cores não as discriminam bem, requerem o uso de atributos de textura e/ou forma para recuperação de imagens. Além disso, os sistemas baseados em um único atributo da imagem podem não alcançar níveis de recuperação adequados, motivo pelo qual os sistemas procuram utilizar múltiplos atributos das imagens para a sua indexação e recuperação.

---

---

# **CAPITULO 3 - Sistema Fuzzy Aplicado Ao Processo de Captura de Termogramas de Para-Raios**

---

## **3.1. Introdução**

Segundo (Nascimento, 2009), a geração de diagnóstico de imagens térmicas (termogramas) de para-raios por Termovisão pode apresentar falsos diagnósticos. Desse modo, durante a geração desses diagnósticos deve-se levar em consideração a experiência dos especialistas, para estimar o grau de influência de variáveis intangíveis na geração dos resultados.

Atualmente, as avaliações de termogramas de para-raios realizadas no laboratório de Ensaio Elétricos Especiais (ENEE) da Eletronorte/Eletrobrás são utilizadas para a geração de diagnóstico desses equipamentos. Muitas vezes o resultado gerado pode ser influenciado por variáveis intangíveis presentes durante o processo de captura desses termogramas. Estas influências podem refletir em uma interpretação contrária ao real estado de funcionamento de um para-raios.

Portanto, um dos objetivos deste trabalho é avaliar variáveis que podem influenciar o processo de captura de termogramas de para-raios realizado pelos especialistas do Laboratório de ENEE da Eletronorte/Eletrobrás, utilizando os recursos da lógica fuzzy, para inferir o grau de influência sofrido na temperatura desses equipamentos em decorrência dessas variáveis.

### 3.2. Área de Estudo

No estudo foram utilizados termogramas capturados em doze subestações elétricas localizadas na região amazônica, estado do Pará, Brasil (Figura 3).

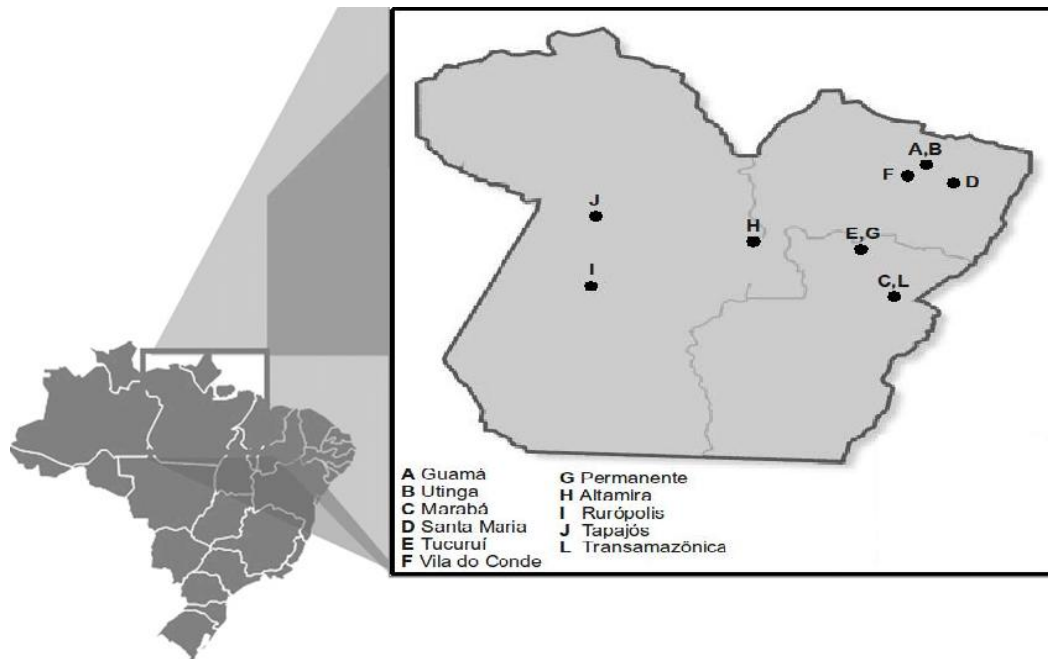


Figure 3 Localização geográfica das subestações elétricas no estado do Pará

O Estado do Pará apresenta dimensão geográfica continental, com uma variação climática bastante diversificada. Este espaço, localizado na região amazônica apresenta características ambientais peculiares, tais como índices de temperatura, umidade relativa, índice de insolação, considerados altos, quando comparado com outras regiões brasileiras. Estas peculiaridades podem influenciar nos processos executados neste ambiente, como no caso do monitoramento de para-raios, em subestações elétricas.

### 3.3. Solução Utilizada pelo Laboratório de ENEE da Eletronorte/Eletróbrás

O método de Termovisão utilizado para a geração de diagnóstico no laboratório de ENEE da Eletronorte/Eletróbrás foi realizado a partir do monitoramento de para-raios e validado por meio do critério da corrente de fuga, dos ensaios elétricos de para-raios retirados de campo e, pela inspeção visual destes equipamentos.

A medição termográfica consiste na medição da temperatura superficial ao longo do corpo do para-raios (porcelana ou polimérico) com ênfase nos valores de temperatura (Nascimento 2009) (Figura 4).

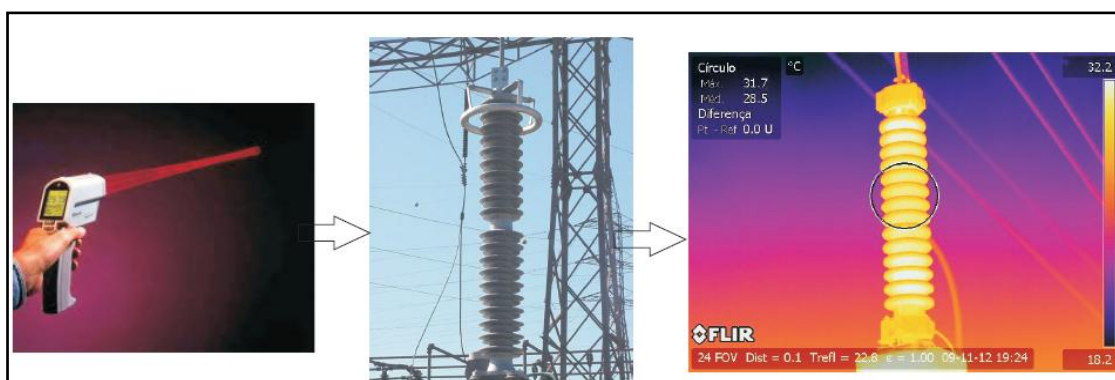


Figure 4 Ilustração da medição termográfica (FONTE: Laboratório de ENEE da Eletronorte)

Já o método da corrente de fuga consiste na medição da corrente que flui através do para-raios energizado pela tensão fase-terra nominal do sistema. Esse método utiliza o valor medido (VM) e a diferença média de temperatura ( $\Delta\theta$ ). Os especialistas do laboratório consideram que o valor medido é uma variável aleatória normal com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ . E que a diferença média de temperatura corresponde à diferença entre a temperatura máxima e a temperatura média do corpo do para-raios, obtidas durante a análise dos termogramas destes equipamentos.

A Tabela 1 apresenta a formação do diagnóstico utilizado pelo laboratório de acordo com a família do para-raios, aqui denominadas por A, B, C, D e E, ou para qualquer família como foi utilizado neste trabalho.



Tabela 1 - Exemplos de Diagnóstico de para-raios.

Diagnóstico de para-raios por família (°C)						
Família	VM	(σ)	Melhor Condição	Condição Normal	Condição Suspeita	Condição Defeituosa
			VM - σ	VM - σ	VM + σ	VM + 2σ
A	0.77	0.10	0.67 > Δθ	0.67 < Δθ < 0.86	0.86 < Δθ < 0.96	Δθ > 0.96
B	0.99	0.40	0.59 > Δθ	0.59 < Δθ < 1.39	1.39 < Δθ < 1.79	Δθ > 1.79
C	1.48	0.64	0.84 > Δθ	0.84 < Δθ < 2.13	2.13 < Δθ < 2.77	Δθ > 2.77
D	4.87	1.51	3.36 > Δθ	3.36 < Δθ < 6.38	6.38 < Δθ < 7.89	Δθ > 7.89
E	0.94	0.58	0.36 > Δθ	0.36 < Δθ < 1.52	1.52 < Δθ < 2.10	Δθ > 2.10

Diagnóstico de para-raios para qualquer família (°C)			
Qualquer Família	Normal	Condição Suspeita	Condição Defeituosa
		Δθ < 3.5	3.5 < Δθ < 4.5

### 3.4. Solução Proposta

É crescente a necessidade de sistemas que incorporem características inteligentes, principalmente nas aplicações que envolvem situações críticas para a tomada de decisão.

Durante o monitoramento de para-raios devem-se observar as influências que podem ocorrer durante este processo. Por muitas vezes, os resultados gerados são contrários ao real estado de funcionamento destes equipamentos. Neste sentido, é necessário analisar as influências que podem ocorrer durante o processo de captura dos termogramas.

A utilização de métodos computacionais agregados à experiência de especialistas pode minimizar estas influências. Diante deste fato, apresenta-se uma proposta de solução utilizando lógica fuzzy na parte referente ao processo de captura de termogramas de para-raios. A Figura 5 apresenta em destaque a solução utilizando lógica fuzzy.

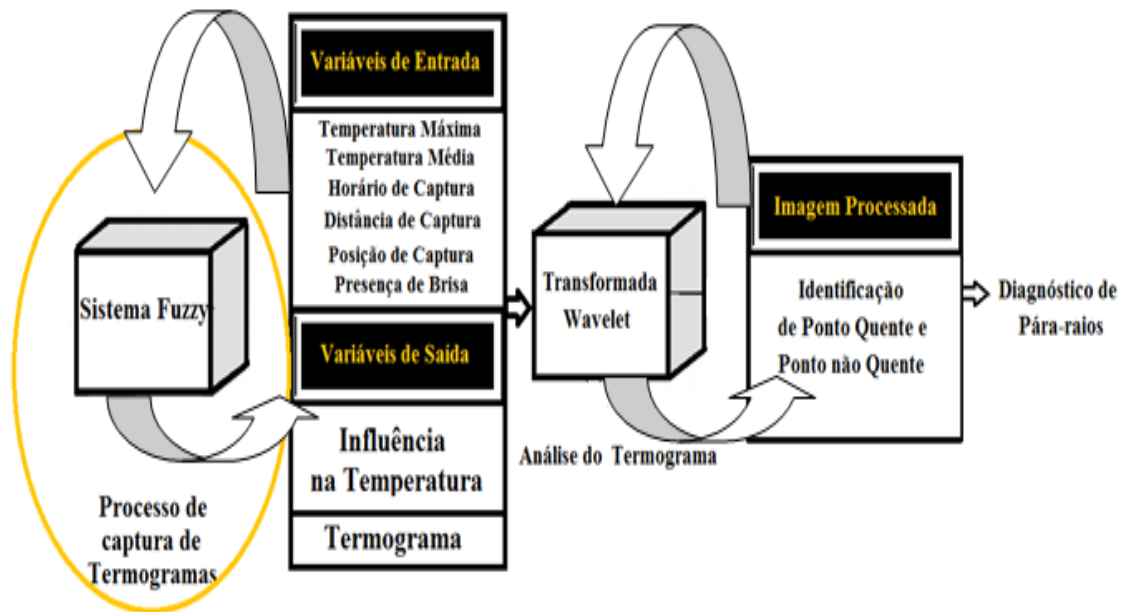


Figure 5 Proposta de solução utilizando lógica fuzzy

### 3.4.1. Módulo Processo de Captura de Termogramas

O módulo do Processo de Captura de Termogramas foi desenvolvido utilizando-se lógica fuzzy. Surgiu a partir da necessidade de monitoramento das variáveis imprecisas que influenciam o processo de captura de termogramas de para-raios da Eletronorte/Eletronorte. Assim, a partir do conhecimento dos especialistas da Eletronorte, construiu-se uma solução fuzzy, para auxiliar no processo de captura dos termogramas, inferindo o nível de influência na diferença média de temperatura (InfluênciaTemperatura), a partir das variáveis descritas na Tabela 2.

**Tabela 2 Descrição das variáveis de entrada e saída do sistema fuzzy**

<b>Variáveis de Entrada do modulo Fuzzy</b>	
<b>Temperatura Máxima (TMáxima)</b>	Representa a máxima temperatura superficial da porcelana do para-raios medida no termograma
<b>Temperatura Média (TMedia)</b>	Representa a temperatura média superficial da porcelana do para-raios medida no termograma
<b>Radiação Solar</b>	Representa o nível de radiação solar registrado no momento de captura do termograma
<b>Distância</b>	Representa a distância entre o termovisor e o para-raios registrado no local de captura do termograma
<b>Brisa</b>	Representa a ocorrência de brisas durante o processo de captura do termograma
<b>Variável de saída do modulo Fuzzy</b>	
<b>InfluênciaTemperatura</b>	Representa o cálculo do nível de influências na diferença média de temperatura (de um termograma)

### 3.4.2. Estrutura do sistema fuzzy proposto

O sistema fuzzy foi implementado e simulado por meio do programa comercial Matlab® no “toolbox” “Fuzzy Logic Toolbox”. A opção por esta ferramenta computacional ocorreu devido a sua ampla utilização e aceitação por pesquisadores em diversas instituições de ensino.

A Figura 6 apresenta a estrutura geral do sistema fuzzy proposto.

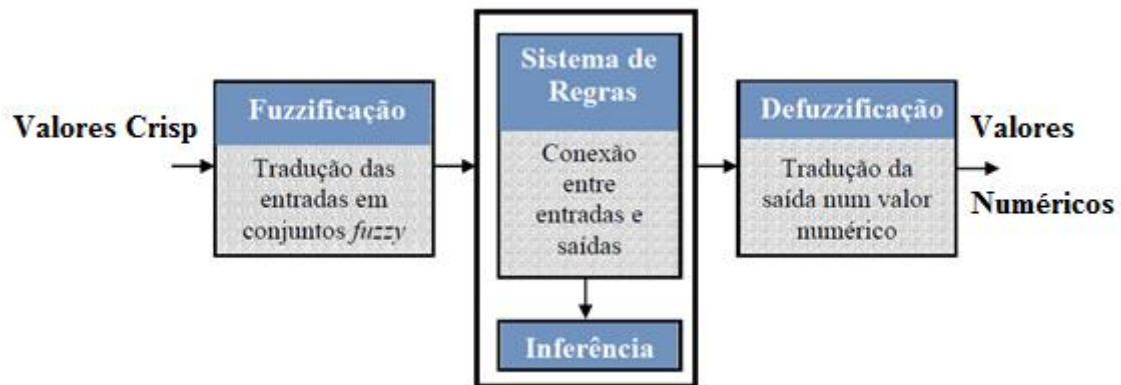


Figure 6 Estrutura do sistema fuzzy proposto

### 3.4.3. Variáveis de entrada e de saída do sistema

A Tabela 3 relaciona as variáveis de entrada e de saída empregadas, com seus respectivos universos de discurso, e os correspondentes conjuntos fuzzy.

**Tabela 3 Conjuntos fuzzy para as variáveis de entrada e saída**

<b>VARIAVEIS DE ENTRADA E RESPECTIVOS CONJUNTOS FUZZY</b>	
<b>Temperatura Máxima (TMaxima)</b>	<b>Temperatura Media (TMedia)</b>
Baixa [ 25; 30] Media [25; 35] Alta [30; 40] MuitoAlta [ 35; 40]	Baixa [ 20; 25] Media [20; 30] Alta [25; 35] MuitoAlta [ 30; 35]
<b>Radiação Solar</b>	<b>Brisa</b>
Baixa [0; 0.5] Media [0; 1] Alta [0.5; 1]	Baixa [0; 0.5] Media [0; 1] Alta [0.5; 1]
<b>Distância</b>	
Boa [3; 4.5] Media [3; 6] Ruim [4.5; 6]	
<b>VARIÁVEL DE SAÍDA E RESPECTIVOS CONJUNTOS FUZZY</b>	
<b>InfluênciaTemperatura</b>	Baixa [0; 0.3333] Media [0; 0.6667] Alta [0.3333; 1] MuitoAlta [0.6667; 1]

Os domínios das variáveis foram identificados a partir da base de dados disponibilizada pela Eletronorte e, mapeados com funções de pertinência triangular, conforme estabelecido nas Figuras 7, 8, 9, 10, 11, 12, com base no conhecimento dos especialistas da Eletronorte.

Variável **Temperatura Máxima** foi mapeada por meio de quatro conjuntos fuzzy: Baixa, Media, Alta e MuitoAlta, distribuídos no universo de discurso da variável, na escala de [25 a 40], conforme a Figura 7.

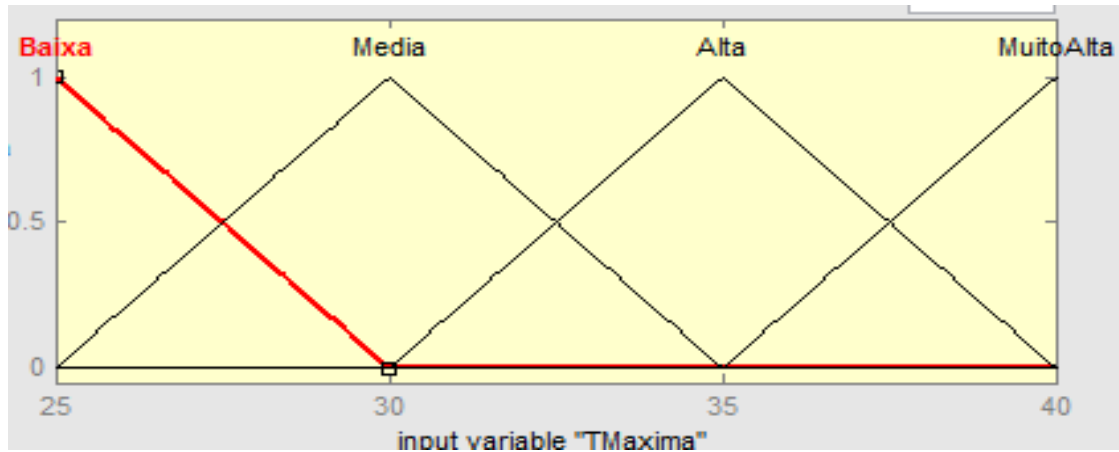


Figure 7 Variável de entrada “Temperatura Máxima”

Variável **Temperatura Media** foi mapeada por meio de quatro conjuntos fuzzy: Baixa, Media, Alta e MuitoAlta, distribuídos no universo de discurso da variável, na escala de [20 a 35], conforme a Figura 8.

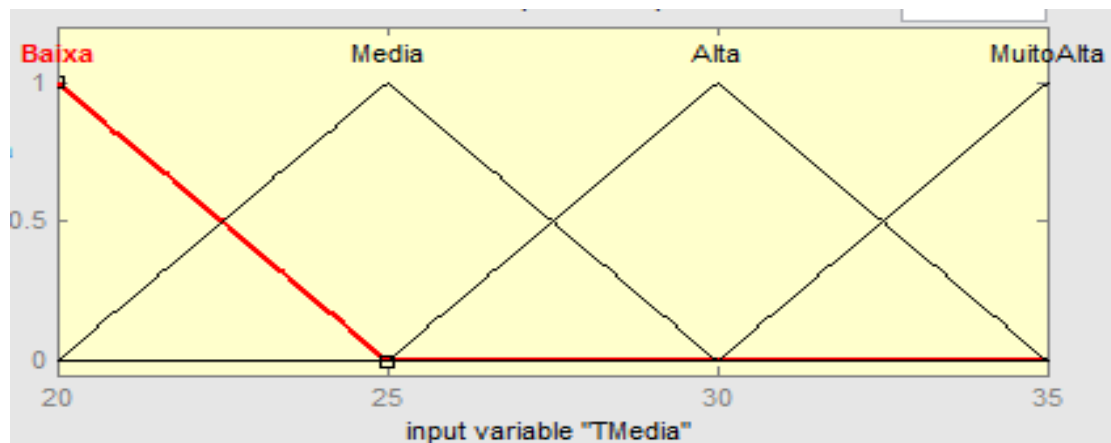


Figure 8 Variável de entrada “Temperatura Media”

Variável **Radiação Solar** foi mapeada por meio de três conjuntos fuzzy: Baixa, Media e Alta, distribuídos no universo de discurso da variável, na escala de [0 a 1], conforme a Figura 9.

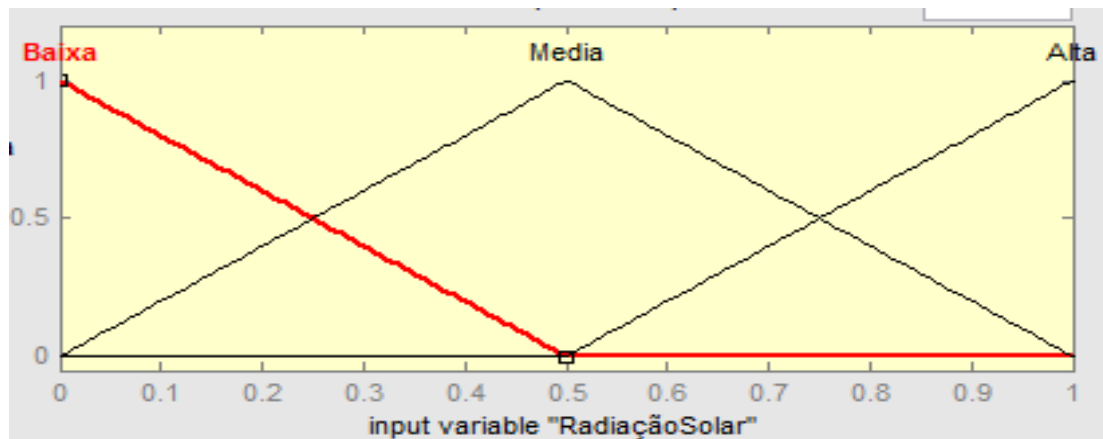


Figure 9 Variável de entrada “Radiação Solar”

Variável **Brisa** foi mapeada por meio de três conjuntos fuzzy: Baixa, Media e Alta, distribuídos no universo de discurso da variável, na escala de [0 a 1], conforme a Figura 10.

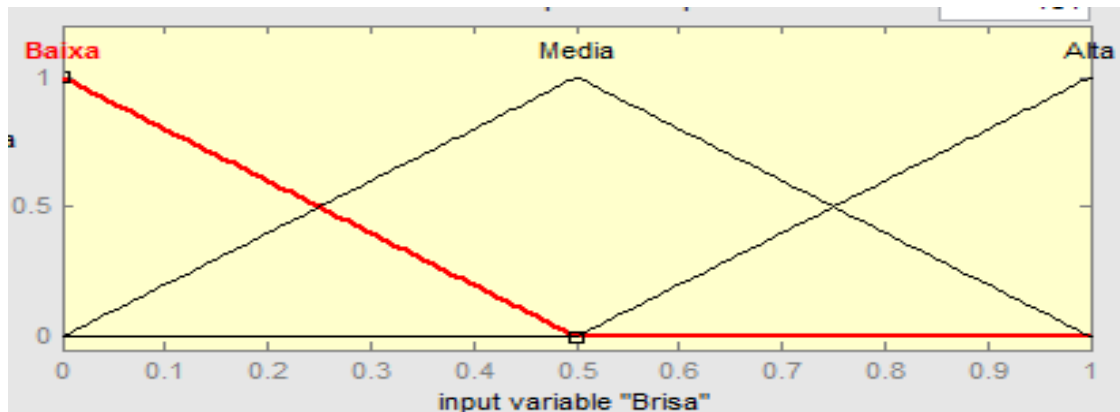


Figure 10 Variável de entrada “Brisa”

Variável **Distância** foi mapeada por meio de três conjuntos fuzzy: Boa, Media e Ruim, distribuídos no universo de discurso da variável, na escala de [3 a 6], conforme a Figura 11.

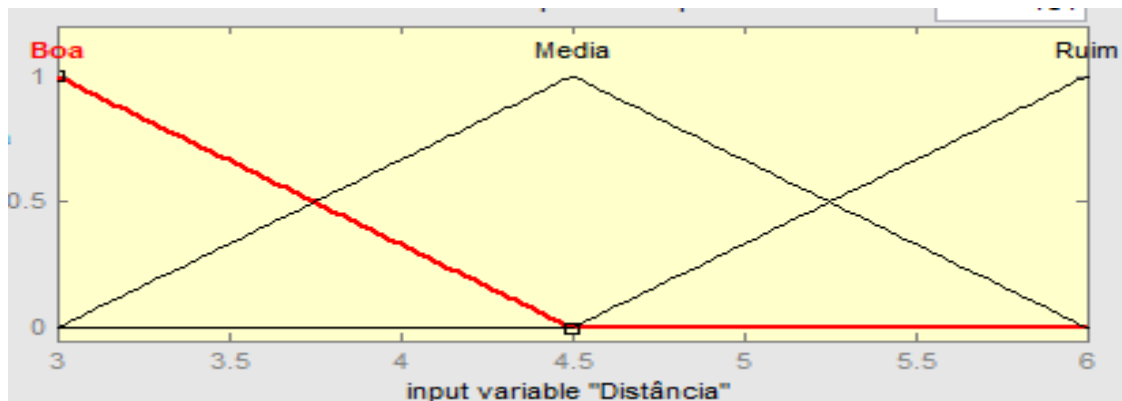


Figure 11 Variável de entrada “Distância”

A variável de saída do sistema, *InfluênciaTemperatura* estabelece o nível de influencia na diferença media de temperatura e, foi mapeada por meio de 4 conjuntos fuzzy: Baixa, Media, Alta e MuitoAlta, distribuídos no universo de discurso da variável, na escala de [0, 1], de acordo com a Figura 12.

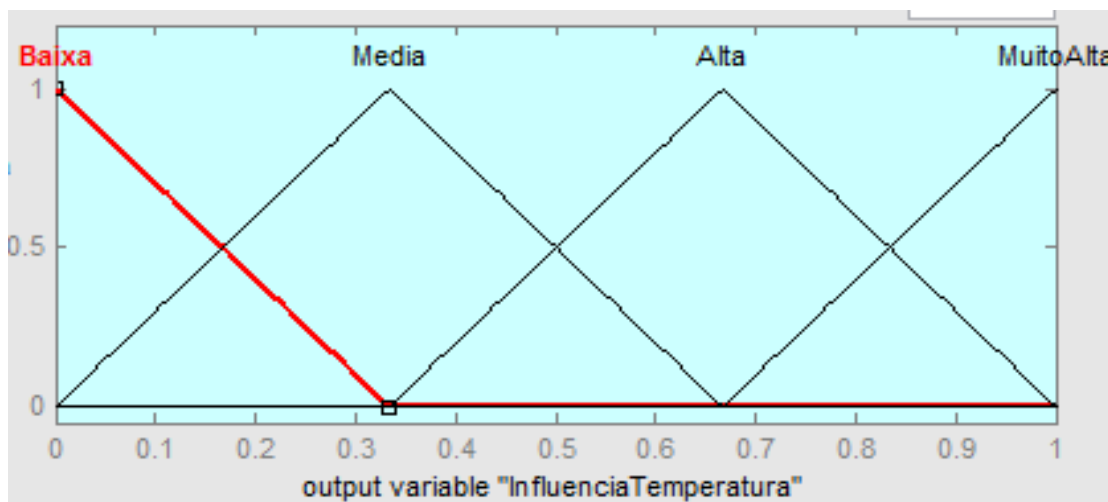


Figure 12 Nível de “Influência Temperatura”

Os valores fuzzy para essas variáveis e os conjuntos fuzzy correspondentes foram definidos com base nas recomendações técnicas padrões definidas pelos especialistas da Eletronorte. O processo de modelagem foi empírico, pois se constituiu em um processo de tentativas anteriores até se chegar no nível de aproximação desejado.

#### 3.4.4. Base de regras do sistema

A base de Regras sistema, foi construída a partir da análise dos termogramas, do conhecimento dos especialistas do laboratório de ENEE da Eletronorte/Eletróbrás e de simulações da proposta, aperfeiçoando a base de regras, no sentido de buscar resultados próximos da realidade. A Tabela 4 apresenta algumas das regras fuzzy consideradas.



**Tabela 4 Algumas regras do sistema de inferência fuzzy**

<b>Algumas Regras do modulo de inferência fuzzy</b>	
<b>Se</b>	<b>Então</b>
(TMaxima é Baixa) e (TMedia é Baixa) e (RadiaçãoSolar é Alta) e (Brisa é Baixa) e (Distância é Boa)	(InfluenciaTemperatura é MuitoAlta)
(TMaxima é Baixa) e (TMedia é Baixa) e (RadiaçãoSolar é Baixa) e (Brisa é Alta) e (Distância é Boa)	(InfluênciaTemperatura é Alta)
(TMaxima é Baixa) e (TMedia é Baixa) e (RadiaçãoSolar é Baixa) e (Brisa é Baixa) e (Distância é Ruim)	(InfluênciaTemperatura é Media)
(TMaxima é Baixa) e (TMedia é Baixa) e (RadiaçãoSolar é Baixa) e (Brisa é Baixa) e (Distância é Baixa)	(InfluênciaTemperatura é Baixa)
(TMaxima é Baixa) e (TMedia é Baixa) e (RadiaçãoSolar é Media) e (Brisa é Media) e (Distância é Media)	(InfluênciaTemperatura é Media)
(TMaxima é MuitoAlta) e (TMedia é Baixa) e (RadiaçãoSolar é Alta) e (Brisa é Baixa) e (Distância é Baixa)	(InfluênciaTemperatura é MuitoAlta)

#### 3.4.5. Máquina de inferência utilizada

A máquina de inferência utilizada foi o método da implicação de Mandani (T-norm). Dentre os motivos que podem ser utilizados para justificar a escolha, pode-se destacar o fato de ser a mais amplamente utilizada em sistemas e controle fuzzy e, o fato de atender aos objetivos da solução proposta.

#### 3.4.6. Defuzzificação da saída fuzzy

Utilizou-se o defuzzificador centroide como método para a *defuzzificação*. O método do centróide foi proposto por Sokal & Michener (1958) e teve como origem, a caracterização da matriz de dados como pontos do espaço Mahalanobis ( $I_p$ ). Cada agrupamento é considerado um simples ponto, representado pelo seu centro de massa, chamado centróide. O Centróide é um dos métodos mais utilizados na *defuzzificação*. Este método encontra o centro geométrico dos valores de saída fuzzy e em geral apresenta resultados bem próximos da realidade.

### 3.5. Resultados obtidos pelo sistema fuzzy

Os resultados obtidos por meio do sistema fuzzy proposto foram considerados satisfatórios para o ambiente de captura de termogramas. A Figura 13 exemplifica uma saída de uma simulação do sistema, em que foi observado o comportamento das variáveis utilizadas no módulo fuzzy, confirmando as influências sofridas na temperatura.

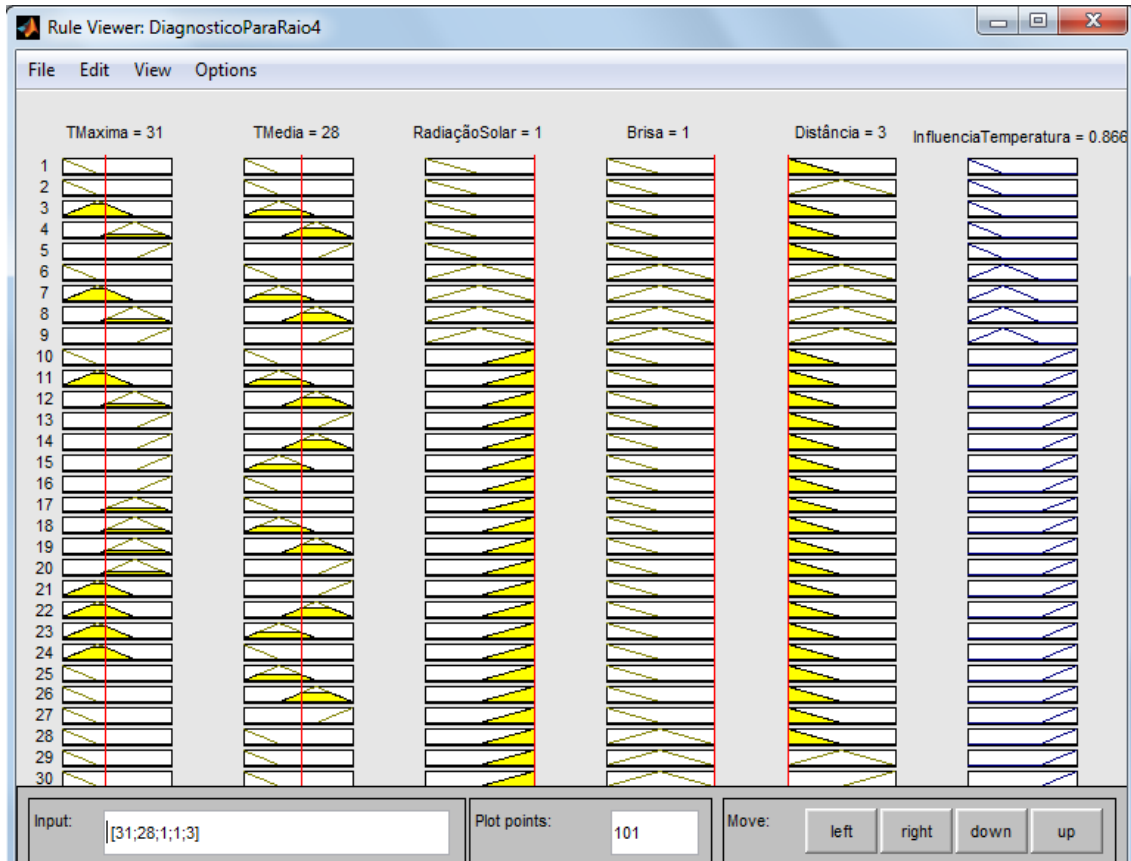


Figure 13 Saída do módulo fuzzy com o resultado da defuzzificação

Pela situação simulada, pode-se perceber que o sistema encontrou 0,866 como valor de saída para a variável InfluênciaTemperatura. Este valor apresenta um alto grau de influência na geração de diagnósticos. Foi comprovado que duas variáveis (RadiaçãoSolar = 1 e Brisa = 1) influenciaram fortemente nos resultados utilizados para a geração de diagnóstico de para-raios.

Em outra simulação quando se atribuiu valores baixos para as variáveis (RadiaçãoSolar = 0 e Brisa = 0), o nível de influência é baixo (InfluênciaTemperatura = 0,134).

A validação do sistema proposto foi realizada por meio da simulação de diferentes ensaios, formulados a partir das experiências dos especialistas, tendo o sistema atingido os objetivos propostos. O sistema fez previsões do nível de influência sofrida na diferença média de temperatura dos para-raios (InfluênciaTemperatura) com precisão dentro do esperado pelos técnicos.

#### a) Simulação 1 – Análise da presença de Radiação Solar

Nesta simulação foi analisada, em especial, a presença de Radiação Solar durante o processo de captura de termogramas de para-raios. Para a situação simulada, o sistema fuzzy encontrou o valor 0,879 que corresponde a uma situação de InfluênciaTemperatura Alta/MuitoAlta, ou seja, o para-raios encontra-se em condição SUSPEITA ou DEFEITUOSA. Nestes casos, é necessária a realização de outros serviços técnicos, como a abertura deste equipamento, para verificar o real valor interno da temperatura.

## b) Simulação 2 - Comparações entre o método do laboratório e o método proposto

Outras análises desta natureza foram realizadas para as variáveis: Distância e Brisa. Observou-se que a variável Radiação Solar influenciou de forma decisiva durante a análise dos resultados obtidos, pois, se fosse considerado apenas as análises quantitativas o diagnóstico seria inadequado. Por exemplo, se  $T_{\text{maxima}}=31$  e  $T_{\text{média}}=28$ , utilizando somente a Termovisão, pelo diagnóstico para qualquer família, com a diferença média de temperatura ( $\Delta\theta = T_{\text{maxima}} - T_{\text{media}}$ ), é igual a  $\Delta\theta = 3$ , para este valor o para-raios seria considerado em Condição Normal.

Com o sistema fuzzy proposto, considerando os mesmos valores para as temperaturas máxima e médias e Distância com valor 3, sem considerar a influência das variáveis (Radiação Solar e Brisa) neste experimento, o diagnóstico seria Influência Temperatura: Baixa/Media.

Considerando os mesmos valores para as temperatura e distância e a influência das variáveis intangíveis, Radiação Solar e Brisa, ambas iguais a 1, pode-se observar o diagnóstico seria Influência Temperatura: Alta/MuitoAlta, conforme os especialistas da Eletronorte foi obtido um diagnóstico mais próximo da realidade, constatando assim que essas incertezas influenciaram sobremaneira na qualidade das interpretações dos termogramas gerados.

### 3.6. Algumas constatações

Quando ocorre uma variação alta de temperatura no corpo de um para-raios a possibilidade deste apresentar defeito é “*Alta/MuitoAlta*”. Assim como a variação de temperatura pode determinar o estado de funcionamento de um para-raios, esta variação também pode ser influenciada por algumas variáveis de campo.

#### 3.6.1. Influência da variável “Radiação Solar”

Quando um para-raios está sobre a presença de muita radiação solar (*Radiação Solar é Alta*), conforme Tabela 5, os resultados gerados durante a análise de termogramas, obtidos a partir do cálculo da diferença media de temperatura (TMaxima – Tmedia) pode ser fortemente influenciado, podendo apresentar falsos diagnósticos, pois o *InfluênciaTemperatura é MuitoAlta* (Tabela 5).

**Tabela 5** Regra do modulo fuzzy com a análise da presença de Radiação Solar durante o processo de captura de termogramas

---

Regras do Sistema de inferência fuzzy ( análise da presença de <i>Radiação Solar</i> )	
Se	Então
(TMaxima é Baixa) e (TMedia é Baixa) e ( <b>RadiaçãoSolar é Alta</b> ) e (Brisa é Baixa) e (Distância é Boa)	(InfluenciaTemperatura é MuitoAlta)

---

Observa-se neste caso que apenas a influência da Radiação Solar reflete em uma influência muito alta na Temperatura (*InfluênciaTemperatura é MuitoAlta*).

#### 3.6.2. Influência da variável “Brisa”

Foi comprovado também que a diferença de temperatura variou quando o para-raios sofreu a influência de brisas, quando isso ocorre a *InfluênciaTemperatura is Alta* (Tabela 6).

**Tabela 6** Regra do modulo fuzzy com a análise da brisa

Regras do Sistema de inferência fuzzy (análise da presença de <i>Brisa</i> )	
Se	Então
(TMaxima é Baixa) e (TMedia é Baixa) e (RadiaçãoSolar é Baixa) e ( <b>Brisa é Alta</b> ) e (Distância é Boa)	(InfluênciaTemperatura é Alta)

A partir da análise desta regra (Tabela 6) observou-se que quando a presença de *Brisa é Alta*, independentemente de outras variáveis (*Radiação Solar e distância*) o nível de influência na diferença média de temperatura é alta (*InfluênciaTemperatura é Alta*).

### 3.6.3. Influência da variável “Distância”

Considerando a variável *Distância*, foi constatado que esta influenciou pouco nos resultados gerados, comportando-se em uma escala inferior, comparado às variáveis *Radiação Solar e Brisa*. Quando a *Distância* é “*Ruim*”, ou seja, inadequada para a captura de termogramas de para-raios, este se encontrava sobre influência, *InfluênciaTemperatura* é “*Media*”, Tabela 7.

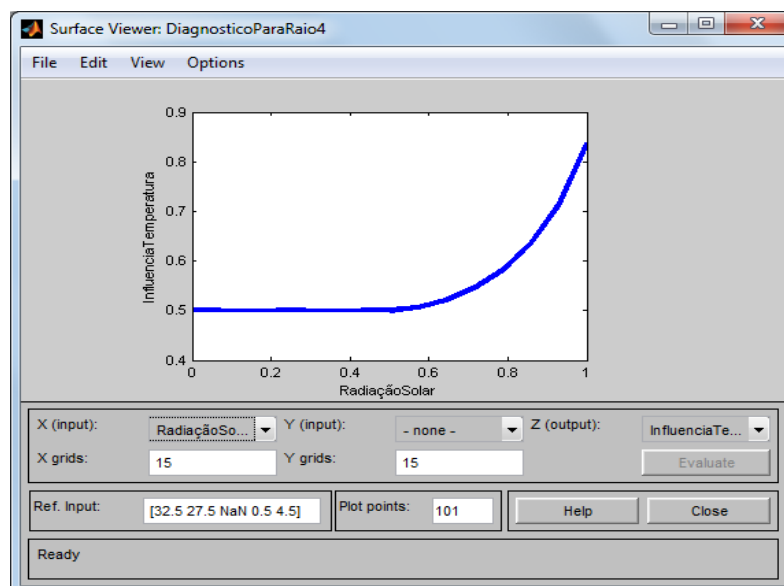
Tabela 7 Regra do modulo fuzzy com a análise da Distância

Regras do Sistema de inferência fuzzy ( análise da Distância )	
Se	Então
(TMaxima é Baixa) e (TMedia é Baixa) e (RadiaçãoSolar é Baixa) e (Brisa é Baixa) e ( <b>Distância é Ruim</b> )	(InfluênciaTemperatura é Media)

a) Considerações - influência da radiação solar, brisa e distância

Quando ocorre uma variação alta de temperatura no corpo de um para-raios a possibilidade deste apresentar defeito é “Alta/MuitoAlta”. Assim como a variação de temperatura pode determinar o estado de funcionamento de um para-raios, esta variação também pode ser influenciada por algumas variáveis de campo.

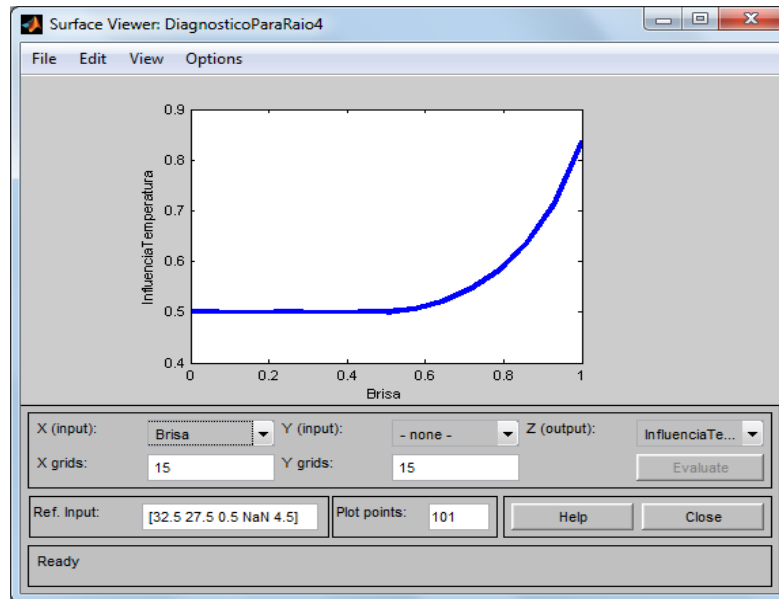
Quando um para-raios está sobre a presença de muita radiação solar (Radiação Solar é Alta), os resultados gerados durante a análise de termogramas, obtidos a partir do cálculo da diferença media de temperatura ( $T_{Maxima} - T_{media}$ ) pode ser fortemente influenciado, podendo apresentar falsos diagnósticos. Observa-se na Figura 14 que a influência da Radiação Solar reflete em uma influência muito alta na Temperatura (InfluênciaTemperatura é MuitoAlta).



**Figure 14 Análise da Radiação Solar na Influência de Temperatura**

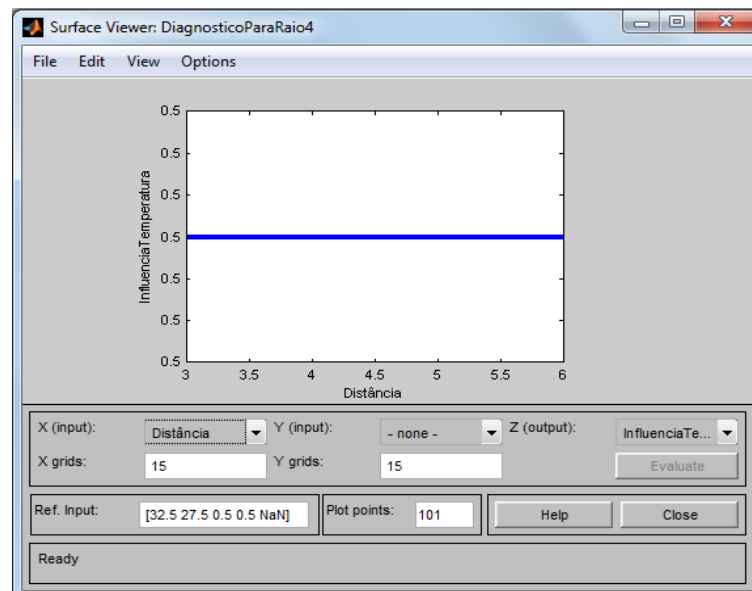
Foi comprovado também que a diferença de temperatura variou quando o para-raios sofre a influência de brisas, quando isso ocorre a InfluênciaTemperatura is Alta. Foi observado também que a variável Brisa é independente das variáveis: Radiação Solar e Distância. A Brisa (presença de Brisa) foi a segunda variável que mais influenciou durante o processo de captura de termogramas de para-raios. A Figura 15 exhibe essa influência.





**Figure 15 Análise da Brisa na Influência de Temperatura**

Considerando a variável Distância, foi constatado que esta não influencia significativamente nas análises finais (Figura 16). Por exemplo, quando a Distância é “Ruim”, ou seja, inadequada para a captura de termogramas de para-raios, este se encontrava sobre influência, InfluênciaTemperatura é “Media”.



**Figure 16 Análise da Distância na Influência de Temperatura**

A presença dessas influências durante o processo de captura de para-raios pode apresentar a geração de termogramas com valores de temperatura contrários ao real

valor. Este fato pode refletir na geração de falsos diagnósticos de para-raios. O termograma deve ser capturado com o mínimo de radiação solar, sendo que os engenheiros indicam que este processo seja realizado durante a noite, preferencialmente entre as 19 e 20 horas. Sendo que mesmo realizando a captura de termogramas de para-raios neste horário, ainda assim, pode ocorrer à presença de leves brisas, por isso foi constatado que as variáveis “Radiação Solar” e “Brisa” são independentes.

# **CAPITULO 4 - Transformada Wavelet Aplicada na Interpretação de Termogramas de Para-Raios**

---

## **4.1. Análise multi-resolução para gerar a Identificação de Ponto Quente e Não Quente para a interpretação de Termogramas de Para-Raios**

Conforme já citado, a Transformada Wavelet (TW) é uma ferramenta que permite decompor um sinal em diferentes componentes de frequências, permitindo assim, estudar cada componente separadamente em sua escala correspondente (BOURBAKIS,2007; DETTOR,I 2007).

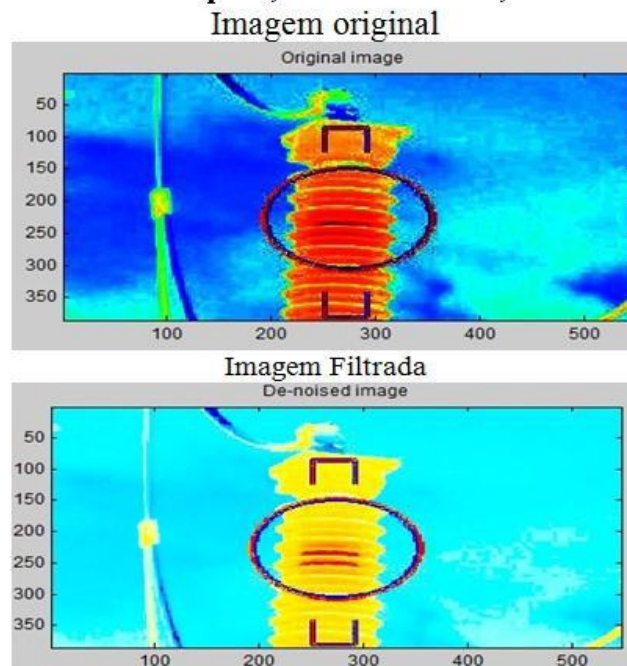
Nos ensaios realizados com wavelet, utilizou-se o software Matlab e seu respectivo toolbox Wavelet

A análise proposta consistiu na decomposição dos termogramas de pára-raios (Imagem) para analisar o perfil térmico desses, realizando a filtragem (transferência de escala). Neste procedimento, a escala natural da formação também foi preservada. Durante a análise do perfil térmico foi identificado e localizado fenômenos estacionários que ocorreram em um sinal.

Foram gerados novos espaços que são utilizados para realizar uma análise estatística para extração de características. e avaliar a luminosidade da imagem (média), a suavidade da imagem (entropia) e a uniformidade (energia), entre outras. Durante este estudo obteve-se as imagens em diferentes resoluções, onde as informações sobre as frequências e a orientação dos tons presentes na imagem foram interpretadas separadamente.

O processo de decomposição multi-resolução consistiu em separar o sinal original em duas partes: uma contendo as características de grande escala e uma contendo as características de pequena escala do sinal, que são chamadas de aproximação ( $A_1$ ) e detalhe ( $D_1$ ). A Figura 17 apresenta as características obtidas pela aplicação desta decomposição multi-resolução (TW).

## Decomposição Multiresolução

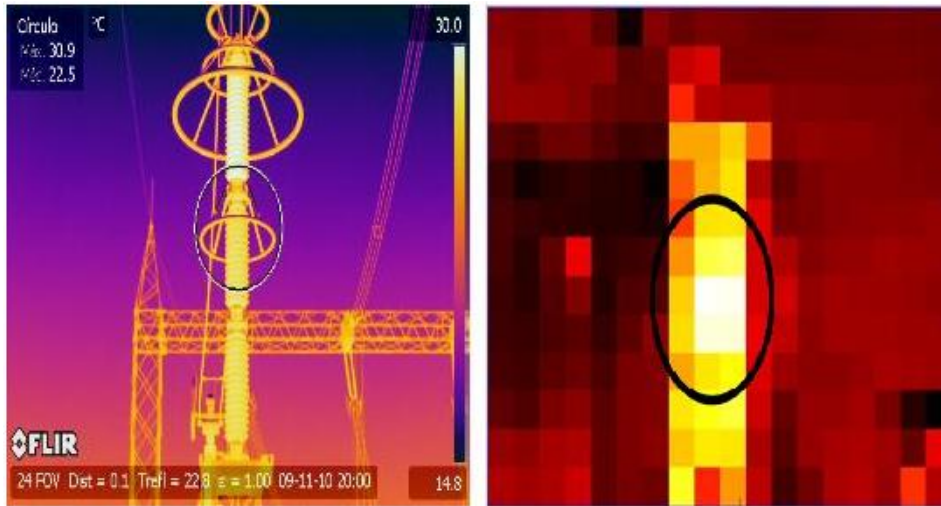


**Figure 17 Imagem Original (parte superior), imagem filtrada através da decomposição multi-resolução (parte inferior) contendo as baixas frequências retiradas do sinal.**

A Figura 17 mostra que a imagem original (Figura 17) apresenta uma grande quantidade de ruído, que é responsável pelo aspecto difuso, obtido no processo de captura, justificando a decomposição multi-resolução no tratamento e supressão de ruído. Obtêm-se assim uma imagem atenuada em níveis (tirando-se os detalhes para cada um deles), quando se retira as altas frequências e são mantidas as baixas frequências. O processo de filtragem foi feito retirando-se continuamente os processos de alta frequência.

### 4.2. Identificação de Pontos Quentes

Para a análise de Ponto Quente em termogramas de para-raios, foi utilizada uma decomposição utilizando a transformada wavelet. A Figura 18 apresenta um resultado desta decomposição. Neste caso foi utilizada a decomposição multi-resolução para 4 (quatro níveis), a partir da família wavelet Db4 (DAUBECHIES 1990, PROTAZIO 2008).

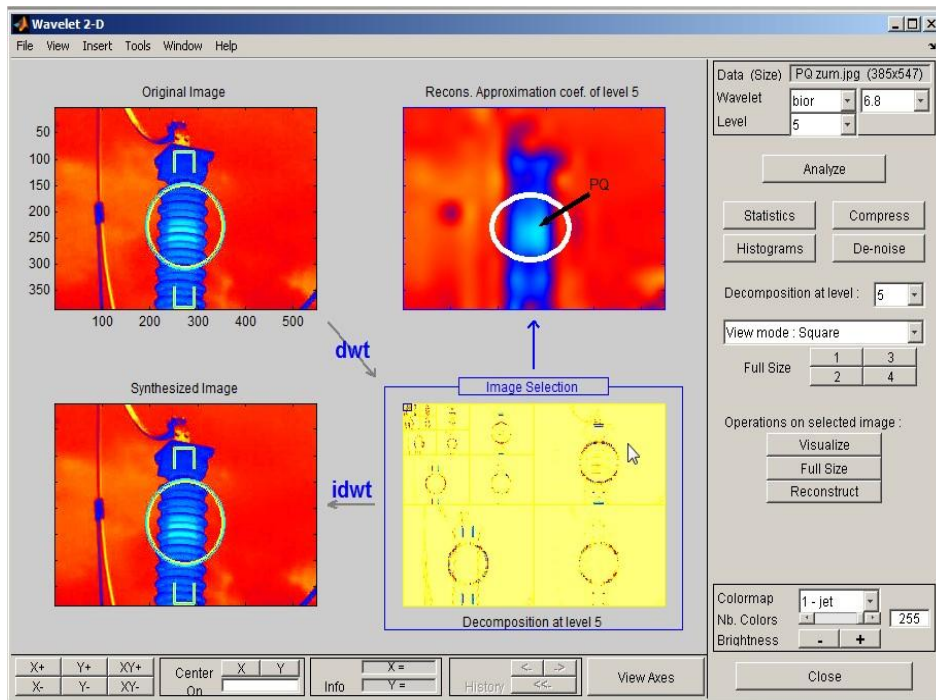


**Figure 18 Imagem original (esquerda) (FONTE: Laboratório de ENEE da Eletronorte)**

A família de wavelet Daubechies, em cada uma das seqüências da decomposição, gerou uma aproximação e um detalhe, que correspondem respectivamente às baixas e altas frequências. A decomposição realizada permitiu diferenciar arestas e texturas e a discriminação de ruídos com o aumento da escala, à medida que o nível da transformada aumentou menos ruídos apareceram. Esta identificação foi possível a partir do aumento de escala da imagem (Figura 19).

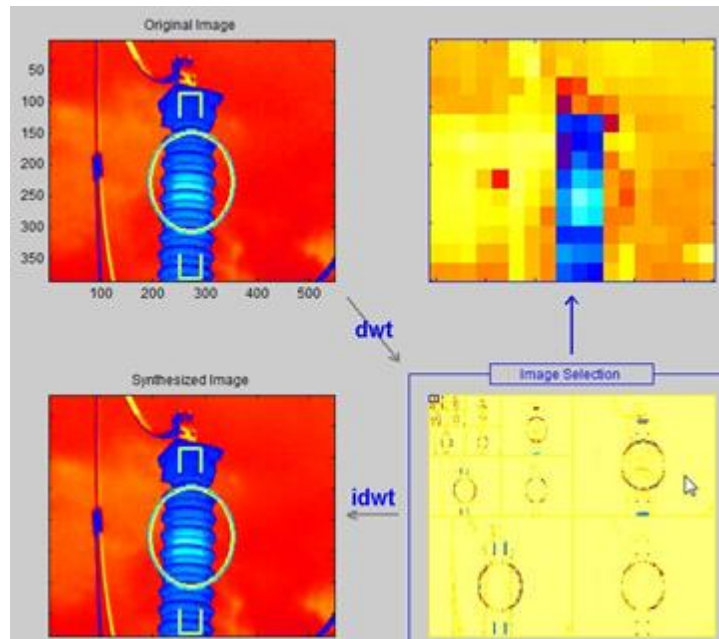


**Figure 19 Imagem original (FONTE, Laboratório de ENEE da Eletronorte)**



**Figure 20** Imagem processada a partir da figura 19

O aumento de resolução permitiu a observação dos detalhes (Figura 20). Foram realizados testes visando à extração de características baseadas na distribuição da cor utilizando filtros de Daubechies, bem como um extrator de característica de textura baseada em filtros de Gabor, a partir da aplicação de descritores estatísticos sobre os espaços wavelet. Também foi simulado um banco de imagens, o que possibilitou a análise do comportamento real das consultas por similaridade. Nesta análise retiraram-se da imagem apenas as pequenas escalas e ficou-se com as grandes escalas, que é similar a metodologia adotada por Mundim (1999).



**Figure 21** Decomposição wavelet para a identificação de ponto quente

Nota-se que na aproximação de nível 5 (Figura 21) a imagem ficou excessivamente grosseira e sem mais melhoras expressivas, demonstrando que a análise poderia ter sido encerrada no nível 4. Outro aspecto importante é a diminuição da dimensão da imagem original a cada etapa da análise multi-resolução. Inicialmente se tinha uma imagem original possuindo dimensão de 256 x 256 pixels. Depois de obtida a aproximação  $A_1$  notou-se que esta nova imagem tem agora a dimensão de 128 x 128 pixels, e assim por diante ( a aproximação  $A_2$  possui dimensão de 64 x 64 pixels, a aproximação  $A_3$  possui dimensão 32 x 32 pixels e finalmente a aproximação  $A_4$  possui dimensão 16 x 16 pixels). Nota-se, para este tipo de wavelet, que este processo de retirar detalhe de uma imagem automaticamente realiza o *upscaling* desta, ficando somente as escalas que são relevantes para o problema (PROTAZIO, 2001).

A partir da decomposição realizada, utilizando análise multi-resolução foi gerada a expressão visual do estado de funcionamento do para-raios com a identificação de ponto quente (*Hot Point*) (Figura 22 e 23).

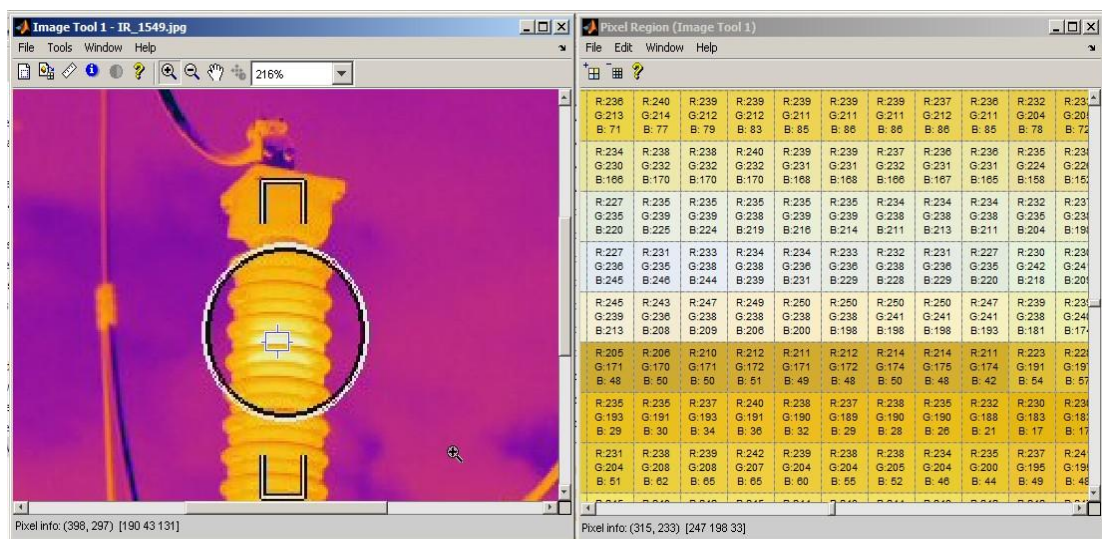


Figure 22 Identificação de ponto quente (análise da matriz de pixel)

A partir dessa identificação foi verificado que o núcleo da imagem, área selecionada com um círculo (Figura 22), apresentou basicamente distribuição de pixels não uniforme.

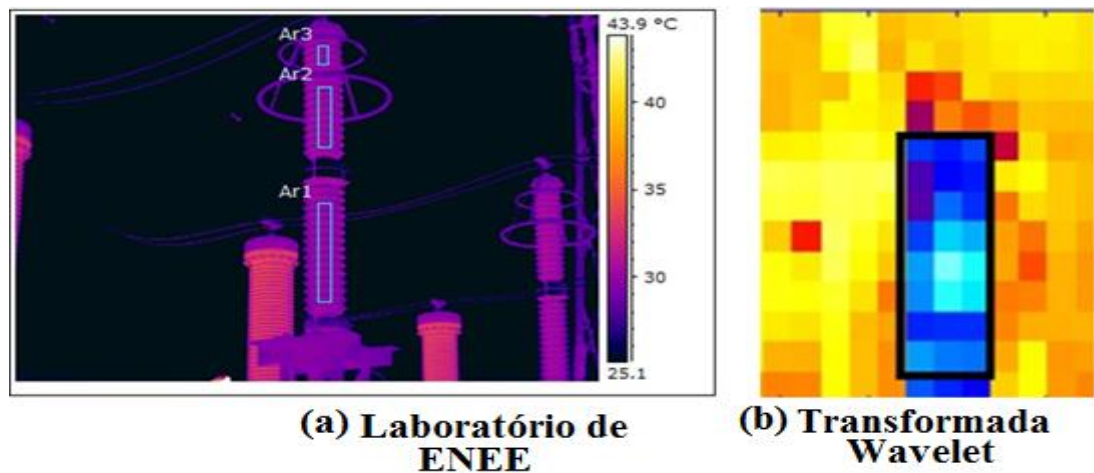


Figure 23 Análise do termograma utilizando Termovisão (a) (FONTE: Laboratório de ENEE da Eletronorte) e análise do termograma utilizando Transformada Wavelet (b)

Os resultados utilizando a transformada wavelet (Figura 23b) foram confrontados com os resultados do laboratório durante os testes realizados (Figura 23a). E foi verificado que o método utilizado neste trabalho foi eficaz, auxiliando no processo de tomada de decisão durante a geração de diagnósticos. Foi observado também que a variação de pixels esta diretamente relacionada com a variação de temperatura. Segundo Nascimento (2009) quando ocorre variação de temperatura constantemente no corpo de



um para-raios, este equipamento certamente encontra-se em condição suspeita necessitando, portanto, de inspeção. Salienta-se que é necessário considerar, anteriormente a esta análise, as influências que podem ocorrer durante o processo de captura dos termogramas.

### 4.3. Identificação do Ponto Não Quente

Para a análise de Ponto Não Quente em termogramas de para-raios foi utilizada uma decomposição utilizando a transformada wavelet (Figura 24).

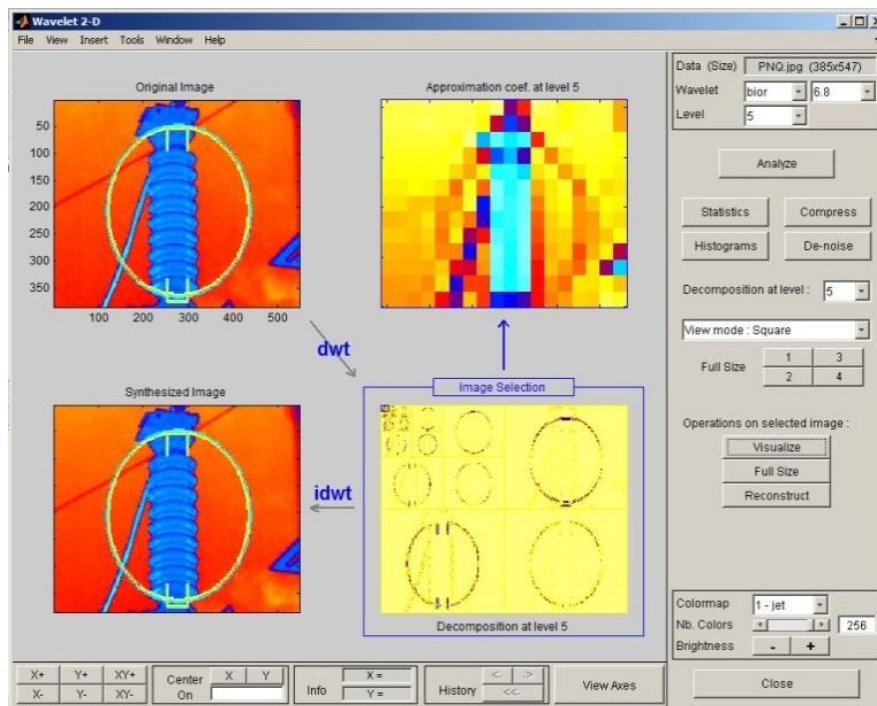
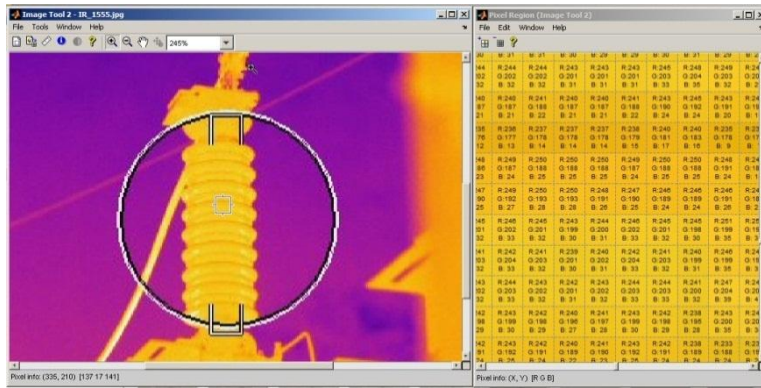


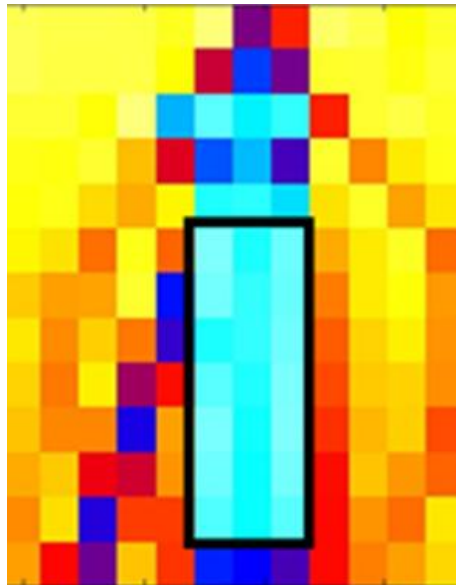
Figure 24 Decomposição wavelet

A identificação do ponto não quente apresentou basicamente distribuição de pixels uniforme no núcleo da imagem, área selecionada com um círculo (Figura 24), levando em consideração a uniformidade das cores e dos valores dos pixels.



**Figure 25 Identificação de ponto não quente ( Matriz de pixel)**

Posteriormente foi realizado o processamento da imagem que permitiu a análise do núcleo do para-raios (Figura 25). A área analisada foi utilizada para a geração de diagnóstico.



**Figure 26 Análise do Ponto não quente.**

Por exemplo, a Figura 26 mostra que o núcleo da imagem, área selecionada em preto, apresentou basicamente distribuição de pixels uniforme. Neste caso, o para-raios se encontra em estado Normal, ou seja, em ótimo estado operacional.

# CAPITULO 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros

---

O problema consistiu em avaliar e acompanhar todo o processo, considerando todas as influências ocorridas durante o processo de captura de termogramas para a geração do diagnóstico do para-raios, com o objetivo de gerar o estado real de funcionamento deste equipamento. O sistema fuzzy possibilitou aos especialistas recomendações sistematizadas referentes ao nível de influências que podem ocorrer durante o processo de captura de termogramas.

O especialista analisou os resultados obtidos e comparou-os com os resultados de varias campanhas e/ou de uma mesma família de para-raios. Desta forma, foi possível monitorar as influências que ocorrem durante o processo de captura de termogramas através dos resultados gerados pelo sistema fuzzy. Dentre as variáveis analisadas pelo sistema fuzzy, foi observado que a variável *Radiação Solar* é a que mais influenciou nos resultados obtidos.

O sistema fuzzy foi útil no sentido de disponibilizar um método computacional que pode ser utilizado para o acompanhamento ou tratamento de cada variável. Os resultados obtidos se aproximaram sobremaneira dos resultados reais nos referidos ambientes operacionais.

Pode-se concluir que a proposta de avaliação do processo de captura de termogramas de para-raios por meio do sistema fuzzy, com a predição de variáveis que influenciaram na temperatura desses equipamentos, foi muito útil para compor a geração de diagnóstico. A proposta pode receber ainda novas implementações ou adaptações, utilizando outros critérios testados juntamente com os especialistas visando melhores resultados.

A transformada wavelet possibilitou observar o comportamento da temperatura ao longo do corpo dos para-raios de acordo com o aumento da escala, a partir da avaliação de pontos quentes (PQ) e pontos não quentes (PNQ) em termogramas, o que permitiu a expressão visual do comportamento da temperatura ao longo do corpo do equipamento. A filtragem obtida neste trabalho apresentou média estável da imagem original e uma redução da variância, através da análise multi-resolução, o que é

comprovadamente comum em métodos desta natureza. A análise multi-resolução conservou melhor a variabilidade do conjunto de dados original (imagem original). A transformada wavelet permitiu uma localização tanto no domínio do tempo, com suas translações, quanto no domínio da frequência com a dilatação e expansão desta.

Foi constatada que a Transformada Wavelet além de ser uma técnica já amplamente utilizada, com sucesso, em aplicações de diferentes áreas do conhecimento pode ser utilizada no processo de monitoramento do estado de funcionamento de para-raios podendo contribuir para a eficácia desse processo. Dessa forma, o método proposto contribuiu para a melhoria da qualidade da imagem para interpretação visual humana de termogramas.

Observou-se que a compreensão do comportamento de temperatura no corpo dos pára-raios, em vista da complexidade envolvida, ainda constitui-se em um processo delicado, porém possível. Considerando-se os resultados aqui obtidos e discutidos, sugerem-se:

- A inclusão de um sistema Neuro-Fuzzy bem como melhorias na base de regras, através do aumento do conjunto de funções fuzzy, visando aumentar a qualidade das soluções (detecção e classificação de influências);
- a aplicação desta metodologia em outras subestações de distribuição de energia elétrica e,
- a realização de testes comparando os resultados obtidos com outros métodos integrados à Transformada Wavelet, tais como redes neurais artificiais.

# REFERÊNCIAS

AGUIAR, H. (1999). *Lógica Difusa Aspectos práticos e aplicações*. Ed. Interciência, 1999.

AKHBARDEH, A; JUNNILA, S; KOIVULUOMA, M. KOIVISTOINEN, T.; TURJANMAA, V. KÖÖBI, T. and VARRI, A. (2007). “Towards a heart disease diagnosing system based on force sensitive chair's measurement, biorthogonal wavelets and neural networks”, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 20, no. 4, pp. 493-502, Jun. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2006.07.005>.

ALVARES, R. C. (2008) *Diagnóstico de falhas em pára-raios utilizando termograma*. 119. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) | Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

AMOLINS, K.; ZHANG, Y.; DARE, P. – (2007). Wavelet based image fusion techniques — An introduction, review and comparison - *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. (62): 249–263.

ASHI, R. Y. AMERI, A. (1999) *Introduction to graphical user interface (GUI) MATLAB 6.5*. (s.l.): UAE University – College of Engineering Electrical Engineering Department IEE. 35 p. Disponível em: <<http://ewh.ieee.org/r8/uae/GUI.pdf>>.

BHATTACHARYA, C. MAHAPATRA, P. R. (2007) “A Discrete Wavelet Transform Approach to Multiresolution Complex SAR Image Generation,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, (9): 416-420.

BOJADZIEV, G. & BOJADZIEV, M. (1996). *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Applications*. World Scientific Publishing.

BOURBAKIS, N. YUAN, P. and S. MAKROGIANNIS (2007) “Object recognition using wavelets, L-G graphs and synthesis of regions”, *Pattern Recogn.* 40 (7): 2077-2096. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2006.08.001>.

CHEN, Z. (2000) *Computational Intelligence for Decision Support*. New York: CRC Press LLC.

CHOU, Y. C.; YAO. L. (2009) Automatic diagnostic system of electrical equipment using infrared thermography. In: International Conference Of Soft Computing And Pattern Recognition. 2009. Malaca. Proceedings. Piscataway: IEEE. 155-160.

COX, E. (1994). The Fuzzy Systems Handbook: the practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems. Academic Press Professional Inc.

DAUBECHIES, I. (1990) The wavelet transform, time frequency localization and signal analysis. IEEE Transactions on Information Theory, New York. (36):961-1005.

DAUBECHIES, I. (1992). Ten Lectures on Wavelets, vol. 61, CBMSNSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, Rutgers University and AT&T Bell Laboratories.

DETTORI, L. and L. SEMLER, (2007) “A comparison of wavelet, ridgelet, and curvelet-based texture classification algorithms in computed tomography”, Comput. Biol. Med. 37(4) 486-498. Apr.Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compbimed.2006.08.002>.

FAN, C.; SUN, F.; YANG, L. (2005). A general quantitative identification algorithm of subsurface defect for infrared thermography. In: International conference on infrared and millimeter waves, 30. International conference on terahertz electronics, 13, Williamsburg. Proceedings. Piscataway: IEEE, (2) 341-342.

HAAR, A. (1910). “Zur Theorie der Orthogonalen Funktionensysteme”, Math. Annal., (69) 331-371.

IBRAHIM, A. M. (2003). Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications. USA: Elsevier.

ISHINO, R. (2002). Detection of a faulty power distribution apparatus by using thermal images. In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Nova York. Proceedings. Nova York: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 1332-1337.

JAIN, ANIL K. (1989). “Fundamentals of Digital Image Processing”, Prentice-Hall.

KEZUNOVIC, M. “Intelligent Applications in Substations: Disturbance Analysis”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 1, pp. 719-723, June 2004.

LAURENTYS, C. A. (2004) Diagnóstico Inteligente de Falhas em Pára-Raios. Dissertação de mestrado. Belo Horizonte – MG.

LEE, S. M; ARUMUGA S. P.; MOHAMED, M. S. (2008) "Image De-noising using Discrete Wavelet transform," IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. 8 (1).

MAHANTY, R. N. and Dutta Gupta, P.B. "A fuzzy logic based fault classification approach using current samples only", Electric Power Systems Research, Vol. 77, Issues 6-7, pp. 501 – 507, April 2007.

MALDAGUE, X.; KRAPEZ. J. C.; (1990). POUSSART. D. Thermographic nondestructive evaluation (NDE): an algorithm for automatic defect extraction in infrared images. IEEE Transactions on Systems. Man and Cybernetics. Quebec. 20(3):722-725.

MALLAT, S. (2009). "A Wavelet Tour of Signal Processing". Elsevier Science.

MATWORKS. *Fuzzy Toolbox User's Guide: for use with MATLAB*. Natick, MA: The MathWorks. 2001.

MENDEL, J. M. (2009) Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. Proceedings of the IEEE, New York. 83 (3):345-377.

MISITI, M. MISITI, Y. OPPENHEIM, G. POGGI, J. (2007) Matlab: wavelet toolbox user's guide. Natick: Math Works.

MILLER, J. L. (1994). "Principles of Infrared Technology", Chapman and Hall.

MUNDIM, E.C., REMACRE, A.Z., JOHANN, P. (1999). Seismic data factorial kriging analysis: a geostatistical filtering applied to reservoir characterization, Society Exploration Geophysicists - The Leading Edge. 18 (7): 787.

MULCAHY, C. (1997) "Image Compression Using the Haar Wavelet Transform", Spelman College Science and Mathematics Journal, 1 (1): 22-31.

NASCIMENTO, J.A.S. FRANÇA, G.S. PEREIRA, O.P. OLIVEIRA M.J.S and CARVALHO, I.L. (2009) Aperfeiçoamento de metodologia para medir a temperatura de pára raios de 69kv a 500kv por termovisão nas subestações da eletronorte. XX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, Pernambuco.

NOAH, C. BENSON. VALERIE. DAGGETT (2012). Análise de wavelets proposta de proteína. *International Journal of Wavelets Multi-resolução e Processamento de Informações*. 10 (04).

PORTILA, J. ;SOMONCELLI, E. P. (2000) Image denoising via adjustment of wavelet coefficient magnitude correlation. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE INT'L CONF ON IMAGE PROCESSING, 3, 2000, Vancouver. Proceedings. Vancouver: IEEE, 2000. 277-280.

PROTÁZIO, J.M.B. Análise wavelet aplicada a sinais geofísicos. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

PROTAZIO, J.M.B. (2008) "Spatial Pattern Analysis Applied to Plant Ecology". VDM Verlag.

RESENDE, J. W. & PENNA, C. (2001) Identificação de Distúrbios da Qualidade da Energia Através da Transformada Wavelet. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA (4. : Ago. 2001 : Porto Alegre, RS). Anais. Rio Grande do Sul, 2001. p.51-56.

SANTOS, E. M. S. ALBUQUERQUE, M. P. MELLO, A. R. G. CANER, E. S. (2004) Introdução a interface gráfica no MATLAB. Rio de Janeiro: LPDSI-CBPF.

SHAW, I. S., SIMÕES, M. G. (1999). "Controle e Modelagem Fuzzy", Edgard Blücher, São Paulo.

TOMSOVIC, K. & LAMBERT, T. G. (2000) "Fuzzy Systems Applications to Power Systems, "IEEE Power Engineering Society Tutorial: Fuzzy Logic and Evolutionary Programming Techniques in Power Systems", Summer Meeting 2000, Seattle, July.

WANG, L.X. (1997). A course in Fuzzy Systems and Control. New Jersey: Prentice-Hall Internacional.

ZHENG Wei Shen, JITAO WU. (2012). Construção de alto momentos desaparecimento fase linear de 3 bandas Wavelets com base na estrutura LATTICE. *International Journal of Wavelets Multiresolução e Processamento de Informações* (10).



1.

## APÊNDICE A

### Publicação Relacionada à Dissertação

**TÍTULO:** Sistema Fuzzy e Transformada Wavelet aplicado ao processo de captura de imagens térmicas de pára-raios

**AUTORES:** Lena Patricia Souza Rodrigues, Terezinha Ferreira Oliveira, Hieda Adriana Nascimento Silva, Julio Antônio Salheb Nascimento, Marcelo Protazio and Antonio Morais Da Silveira

**Abstract.** This article presents a method of integrating a fuzzy system with the transform Wavelet applied to the process of capturing thermal images lightning arrester using thermography in twelve electrical substations Eletronorte / Eletrobrás located in the Amazon region, Pará, Brazil. The integration performed, coupled with the knowledge of experts enabled the construction of the proposed settlement.

**Keywords:** Fuzzy System, Wavelet Transform, Thermography

# **Sistema Fuzzy e Transformada Wavelet Aplicado ao Processo de Captura de Imagens Térmicas de Para-raios**

Lena Patrícia Souza Rodrigues, Terezinha Ferreira de Oliveira, João Marcelo Brazão Protázio, Hieda Adriana Nascimento Silva, Antônio Morais da Silveira

Instituto de Ciências exatas e naturais – Universidade Federal do Pará – UFPA  
CEP : 66075-650 – Belém – PA – Brasil

lpsrd13@gmail.com, tfo@ufpa.br, mprotazio@ufpa.br, hieda@ufpa.br, morais@ufpa.br

Julio Antônio Salheb Nascimento

Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A - Centro de Tecnologia  
Rod. Arthur Bernardes s/n Telégrafo – Miramar - CEP 66115-000 Belém/PA

juliosalheb@eln.gov.br

**Abstract.** This article presents a method of integrating a fuzzy system with the transform Wavelet applied to the process of capturing thermal images lightning arrester using thermography in twelve electrical substations Eletronorte / Eletrobrás located in the Amazon region, Pará, Brazil. The integration performed, coupled with the knowledge of experts enabled the construction of the proposed settlement.

**Keywords:** Fuzzy System, Wavelet Transform, Thermography

