

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**RENAN AUGUSTO TABORDA**

**SISTEMA AUTOMÁTICO DE INTERPRETAÇÃO DE OSCILAÇÕES EM  
SUBESTAÇÕES INDUSTRIAIS UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

**CAMPO MOURÃO**

**2021**

**RENAN AUGUSTO TABORDA**

**SISTEMA AUTOMÁTICO DE INTERPRETAÇÃO DE OSCILAÇÕES EM  
SUBESTAÇÕES INDUSTRIAIS UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

**Automatic system for interpreting oscillations in industrial substations using  
fuzzy logic**

Trabalho de dissertação apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Inovações Tecnológicas do Programa de Mestrado Profissional de Inovações Tecnológicas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Roberto Ribeiro Neli.

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Rodrigues da Cunha.

**CAMPO MOURÃO**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



RENAN AUGUSTO TABORDA

## **SISTEMA AUTOMÁTICO DE INTERPRETAÇÃO DE OSCILAÇÕES EM SUBESTAÇÕES INDUSTRIAIS UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Inovações Tecnológicas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Inovações Tecnológicas.

Data de aprovação: 14 de Setembro de 2021

Prof Roberto Ribeiro Neli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Leandro Castilho Brolin, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Leandro Tiago Manera, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Marcio Rodrigues Da Cunha, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Wyrlen Everson De Souza, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 20/09/2021.

Dedico este trabalho à minha família, que tanto me apoiou, ajudou e incentivou, pelo amor, carinho, paciência e companheirismo de sempre.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por estar sempre presente em minha vida e por me dar forças para não desistir ao longo desta caminhada.

À minha esposa, Héllen, pelo apoio em todos os momentos, sejam eles bons ou ruins, me incentivando e acreditando no meu potencial, obrigado por todo amor, cuidado e tudo que faz por mim.

Aos meus pais, Ananias e Devandira, que sempre me incentivaram e estiveram ao meu lado em todos os momentos me dando amor e carinho, meu muito obrigado.

Ao meu irmão, Roberto, pela amizade, paciência e toda a ajuda durante este percurso.

À todos os demais familiares que sempre me incentivaram e torceram por mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Roberto Ribeiro Neli, pelo apoio durante toda a pesquisa e as orientações repassadas.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Marcio Rodrigues da Cunha, por todo o apoio e conhecimentos compartilhados.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela oportunidade de estar realizando esta pesquisa.

Enfim, a todos os que contribuíram para a realização desta pesquisa, meu muito obrigado.

A tarefa não é tanto ver aquilo que  
ninguém viu, mas pensar o que ninguém  
ainda pensou sobre aquilo que todo  
mundo vê.

(SCHOPENHAUER, Arthur, 1851)

## RESUMO

Devido às constantes oscilações na qualidade de energia elétrica sofridas em uma subestação industrial, é importante considerar a implementação de um sistema automático para interpretar esses eventos, simplificando a configuração de todos os equipamentos presentes, possibilitando assim, uma maior conservação e bom funcionamento das máquinas diante das perturbações recorrentes na rede elétrica. Dessa forma, este estudo teve como objetivo desenvolver um sistema baseado em inteligência artificial (lógica *Fuzzy*), utilizando como base os parâmetros em qualidade de energia elétrica definidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e dados coletados em uma subestação industrial entre os anos de 2016 e 2019. Para tanto, utilizou-se a plataforma *Fuzzy Logic Design* e implementou-se dois programas, considerando os métodos de inferência Mamdani e Sugeno, a fim de apresentar duas formas de atingir o objetivo previamente determinado, alcançando um resultado satisfatório. Esta pesquisa é caracterizada como uma modernização de produto e também de processo, pois o inovador software será um novo item no campo industrial, fornecendo um novo método para análises de oscilações em energia elétrica.

Palavras-chave: oscilação de energia; lógica fuzzy; análise de oscilações.

## **ABSTRACT**

Resulting from the constant fluctuations in the quality of electrical energy suffered in an industrial substation, it is important to consider the implementation of an automatic system to interpret these events, simplifying the configuration of all the equipment present, thus enabling greater conservation and good operation of the machines before of recurrent disturbances in the electrical network. Hence, this study aimed to develop a system based on artificial intelligence (Fuzzy logic), using as a basis the parameters of quality of electrical energy defined by the National Electric Energy Agency - ANEEL and the data collected in an industrial substation among 2016 and 2019. For that, a Fuzzy Logic Design platform has been used and two programs have been implemented, considering the Mamdani and Sugeno inference methods, in order to present two ways to reach the previously determined objective, achieving a satisfactory outcome. This research is characterized as a product and process modernization, as the innovative software will be a new good in the industrial field, providing a new method for analysing oscillations in electrical energy.

Keywords: energy oscillation; fuzzy logic; oscillation analysis.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema elétrico industrial .....	14
Figura 2 – Oscilação de energia.....	17
Figura 3 – Oscilografia visualizada através do software Wavewin .....	19
Figura 4 - Sistema equilibrado (a) e Sistema desequilibrado (b).....	21
Figura 5 - Flutuação de tensão.....	22
Figura 6 - Exemplo de variação de tensão de curta duração .....	23
Figura 7 - Diagrama de blocos lógica Fuzzy .....	24
Figura 8 - Função de pertinência para variável Temperatura.....	25
Figura 9 – Metodologia utilizada.....	31
Figura 10 - Entradas e Saídas Fuzzy .....	35
Figura 11 - Variáveis de entrada e saída .....	36
Figura 12 - Função de pertinência para a variável de entrada “Tensao” .....	37
Figura 13 - Função de pertinência para a variável de entrada “Corrente” .....	37
Figura 14 - Função de pertinência para a variável de entrada “Frequencia” .....	37
Figura 15 - Função de pertinência da variável de saída “Tensao” .....	39
Figura 16 - Função de pertinência da variável de saída “Corrente” .....	39
Figura 17 - Função de pertinência da variável de saída “Frequencia” .....	39
Figura 18 - Função de pertinência da variável de saída “Oscilacao” .....	40
Figura 19 - Resposta Teste 01 Programa 01 .....	46
Figura 20 - Resposta teste 02 programa 01 .....	47
Figura 21- Resposta teste 03 programa 01 .....	48
Figura 22 - Resposta teste 04 programa 01 .....	49
Figura 23 - Resposta teste 05 programa 01 .....	49
Figura 24 - Resposta teste 06 programa 01 .....	50
Figura 25 - Resposta teste 07 programa 01 .....	51
Figura 26 - Resposta teste 08 programa 01 .....	51
Figura 27 - Resposta teste 01 programa 02.....	52
Figura 28 - Resposta teste 02 programa 02.....	53
Figura 29 - Resposta teste 03 programa 02.....	53
Figura 30 - Resposta teste 04 programa 02.....	54
Figura 31 - Resposta teste 05 programa 02.....	54
Figura 32 - Resposta teste 06 programa 02.....	55
Figura 33 - Resposta teste 07 programa 02.....	55
Figura 34 - Resposta teste 08 programa 02.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das Variações de Tensão.....	23
Tabela 2 - Oscilações em uma subestação industrial .....	32
Tabela 3 - Classificação das oscilações reais .....	32
Tabela 4 - Variáveis de entrada .....	36
Tabela 5 - Variáveis de saída.....	38
Tabela 6 - Parâmetros para Testes Programa 01 .....	43
Tabela 7 - Variáveis de saída programa 02 .....	44
Tabela 8 - Conjuntos Saídas Fuzzy .....	44
Tabela 9 - Parâmetros para Testes Programa 01 .....	45

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>15</b>
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Oscilações de energia</b>	<b>17</b>
2.1.1	Registradores digitais de perturbações	18
<b>2.2</b>	<b>Software Wavewin</b>	<b>18</b>
<b>2.3</b>	<b>Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST</b>	<b>19</b>
2.3.1	Desequilíbrio de tensão	20
2.3.2	Flutuação de tensão	21
2.3.3	Variação de frequência	22
2.3.4	Variação de tensão de curta duração	23
<b>2.4</b>	<b>Lógica fuzzy</b>	<b>24</b>
2.4.1	Conjuntos fuzzy	24
2.4.2	Variáveis linguísticas	25
2.4.3	Regras	26
2.4.4	Defuzzificação	26
<b>2.5</b>	<b>Trabalhos relacionados</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>INOVAÇÃO</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Tipo de inovação</b>	<b>29</b>
<b>3.2</b>	<b>Inovação de produto</b>	<b>29</b>
<b>3.3</b>	<b>Inovação em processo</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>Programa 1</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Planejamento dos testes do programa 1</b>	<b>43</b>
<b>4.3</b>	<b>Programa 2</b>	<b>43</b>
<b>4.4</b>	<b>Planejamento dos testes do programa 2</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>47</b>
<b>5.1</b>	<b>Programa 01</b>	<b>46</b>
<b>5.2</b>	<b>Programa 02</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>58</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>
-------------------------	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

Considerando as evoluções dos sistemas elétricos industriais, que trazem melhorias relacionadas com o rendimento, a controlabilidade e o custo dos processos industriais (MARTINS et al, 2003), é necessário dedicar estudos relacionados ao fornecimento de energia, pois tais sistemas estão cada vez mais dependentes da qualidade de energia, visto que não possuem a robustez necessária para não sofrerem com as perturbações nas redes elétricas.

Contudo, o investimento em tecnologias capazes de diminuir as influências negativas nesses processos também pode ser considerado uma melhoria de produção, porque trata o problema de baixa produtividade devido ao mau fornecimento de energia. Por exemplo, ao ocorrer uma variação abrupta na tensão, poderá haver desligamento em equipamentos, que causarão paradas de produção, prejuízos econômicos e perda da qualidade do produto.

Além das perdas com a produção, deve-se considerar o risco de danificar os equipamentos e investimentos na aquisição ou conserto dos equipamentos que foram avariados (ALVES, 2003).

Nesta situação, os profissionais que gerenciam e suportam os sistemas elétricos industriais levantam soluções para diminuir os danos causados, como o ajuste da sensibilidade dos equipamentos e/ou informar a concessionária dos eventos, quando forem corriqueiros, propondo melhorias na rede a fim de diminuir a ocorrência de tais sinistros.

Tais profissionais são de suma importância para a indústria, pois trabalham diretamente com qualidade de energia, a fim de detectar eventuais distúrbios o mais breve possível e diagnosticá-los. Eles devem possuir um vasto conhecimento em subestações industriais, visto que o diagnóstico é feito com base nas oscilografias geradas e percepção de anomalias na energia entregue pela concessionária.

A entrada de energia da indústria em questão é em média tensão, classe 34,5 kV, onde o valor medido da tensão de entrada é de 33 kV. Após a entrada, tem-se a medição da concessionária, logo em seguida a proteção e o seccionamento, depois os transformadores rebaixadores e somente nesse momento é distribuído para as cargas, sempre em baixa tensão, 380/220 V. Assim, um afundamento,

mesmo que pequeno na tensão de entrada, será refletido para todas as cargas, na mesma proporção.

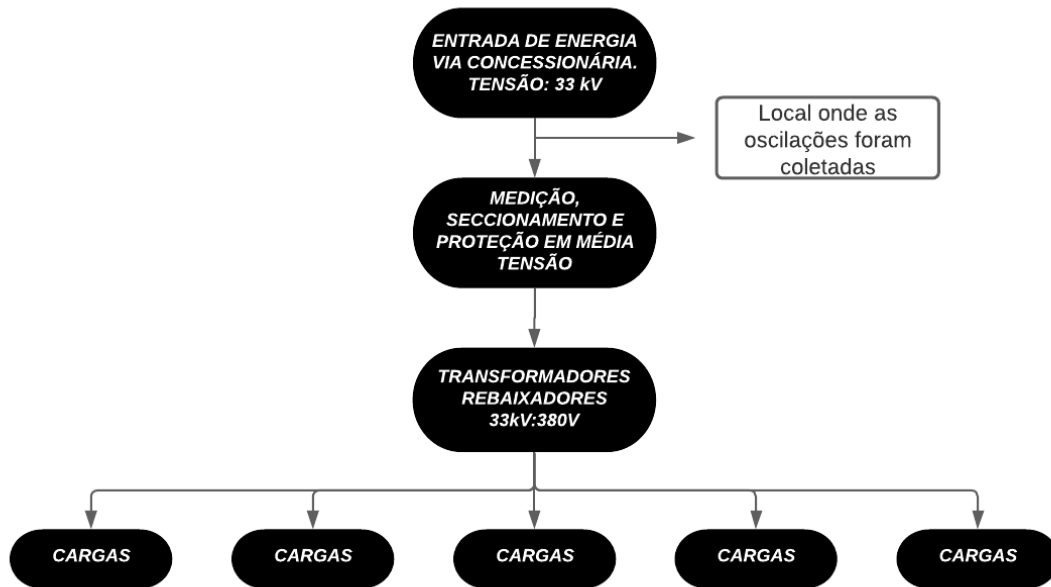
Tais eventos mencionados são coletados diretamente na cabine de medição e proteção da indústria, através do primeiro relé de proteção, que possui um oscilógrafo interno capaz de identificar e salvar os registros de oscilações. No entanto, somente é possível salvar 9 eventos, causando sobreposição e perda de dados, caso exceda os 9 registros.

Logo, esse sistema não é capaz de classificar os dados salvos, pois há registros falsos que podem ser gerados através da magnetização de um transformador ou no momento do paralelismo de um gerador com a rede, onde esses eventos não causam oscilações de nenhuma grandeza elétrica, como tensão, corrente ou frequência, assim são caracterizadas como falsas oscilações.

As perturbações reais são danosas ao sistema, pois nesse momento a tensão reduz abruptamente, causando desequilíbrio nas tensões, gerando correntes indesejadas no neutro e desligando máquinas importantes ao processo, fazendo com que as equipes de manutenção reiniciem todos os equipamentos, gerando perdas em tempo de produção, falhas em produtos e, até mesmo, queima de componentes.

A Figura 1 demonstra a subdivisão elétrica da indústria, desde a entrada de energia até os pontos de consumo (cargas), sendo assim é possível observar o local onde os dados foram coletados.

**Figura 1 – Esquema elétrico industrial**



Fonte: Autoria própria (2020).

Portanto, existem oscilações falsas e perturbações reais que devem ser gerenciadas de maneira adequada, para que as medidas de mitigação dos danos ao sistema elétrico industrial sejam tomadas da forma correta, pois o primeiro passo é a classificação de cada distúrbio.

Dessa forma, para não ficarem sem esse registro de todos os tipos de oscilações e a devida classificação, há equipes de engenharia que contam com um analista que coleta os eventos diretamente da proteção de média tensão, que possuem um sistema interno de detecção de falhas, de acordo com os parâmetros estipulados, porém, essa coleta fica limitada ao número de eventos que o equipamento armazena e se torna custosa em função do tempo gasto para essa atividade (ARNAUD et al, 2008).

Após a coleta dos dados, a primeira ação é identificar as falhas ocorridas, que é realizada através da análise das oscilografias geradas. Porém, a interpretação desses dados não é simples, sendo necessária a utilização de softwares capazes de selecionar somente as informações relevantes e caracterizar cada erro.

Embora o sistema de análise de oscilografias não atue diretamente na solução dos problemas de qualidade de energia, ele fornece o histórico dos defeitos encontrados e auxilia o analista a encontrar soluções para diminuir as influências no produto final. Com a análise automática o diagnóstico será preciso, não

necessitando da interpretação subjetiva dos analistas ao analisar as oscilografias, assim as propostas de melhorias serão adequadas ao problema encontrado.

Em uma indústria, que não possui um sistema de análise de perturbações, as origens das interrupções de energia não são conhecidas, dessa forma o problema não é diagnosticado, e não possibilita ações de melhoria de seus índices de qualidade de energia.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um sistema especialista utilizando lógica fuzzy, que seja capaz de classificar as oscilações de energia ocorridas em uma subestação industrial real, registradas através de oscilógrafos. Com esta proposta pretende-se alcançar uma análise assertiva quanto aos distúrbios encontrados na subestação industrial.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Para desenvolver este sistema inteligente, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o estado da arte sobre o tratamento e análise de oscilações de energia;
- Coletar dados de oscilações reais em uma subestação industrial;
- Definir os parâmetros de qualidade de energia, segundo ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica;
- Implementar o programa especialista em lógica fuzzy, para classificar as oscilações;
- Utilizar a plataforma Fuzzy Logic Design para validação do software.

## **1.2 Justificativa**

Um sistema de análise de oscilografias no ambiente industrial é utilizado com o intuito de identificar fenômenos transientes vindos da concessionária e,



também, transientes gerados internamente, através de curto circuito, partida de motores ou partida de geradores (MORETO, 2011).

Dessa forma, o presente projeto visa apresentar uma solução automática para análise de tais perturbações, trazendo assertividade nas informações e agilidade no diagnóstico de cada oscilação.

A lógica fuzzy se mostra adequada para tal problemática, pois se assemelha ao pensamento humano, dessa forma será capaz de classificar os dados corretamente, a partir das regras impostas.

Com as ocorrências classificadas, as equipes de engenharia poderão trabalhar para a melhoria de sistemas de energia, propondo ajustes na sensibilidade das máquinas, utilização de rede estabilizada e, também, auxiliando na decisão de compra de novos equipamentos, avaliando sua robustez aos problemas recorrentes na indústria.

Dessa forma, o estudo mostra-se importante quando se trata de melhoria de produção industrial, pois os equipamentos estão cada vez mais sensíveis as oscilações, não garantindo a qualidade do produto e diminuindo a produção, quando ocorrem tais perturbações.

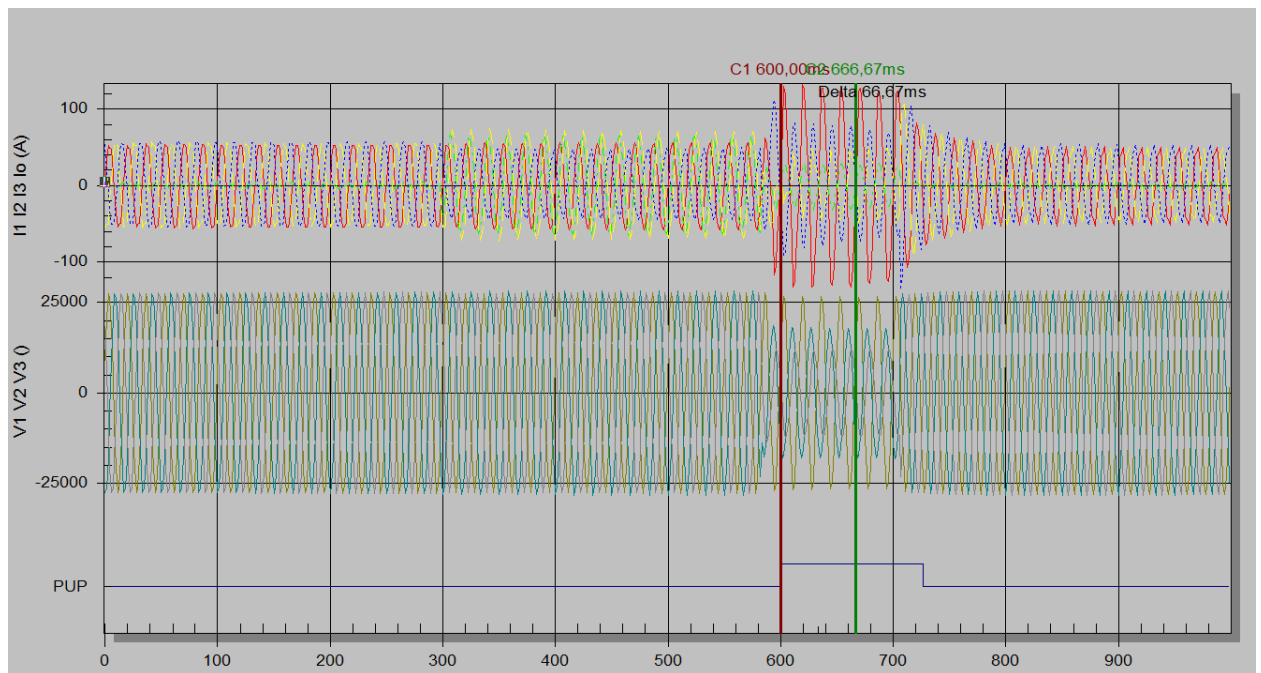
## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção será realizada a contextualização sobre oscilações de energia e seus impactos na indústria, autores que já abordaram as perturbações de energia e os parâmetros exigidos pela ANEEL sobre qualidade de energia.

### 2.1 Oscilações De Energia

Oscilografias são medições de grandezas elétricas nas redes, onde é possível verificar seu desempenho através de gráficos. O estudo das oscilografias é de grande importância em um ambiente industrial, pois através desses dados é possível verificar a qualidade da energia entregue pela concessionária, como também, verificar falhas internas. A Figura 2 mostra um exemplo de oscilação de energia, classificada como subtensão.

Figura 2 – Oscilação de energia



Fonte: Autoria própria (2020).

Identifica-se que aproximadamente no tempo de **580 ms** a tensão sofre uma redução abrupta, desequilibrando o sistema e elevando a corrente de neutro. Apesar da duração do evento ser curta, já é o suficiente para desligar equipamentos importantes.

Segundo MIRANDA (2005), as oscilografias se dividem em dois tipos, sendo:

- Curta duração: Utilizada para analisar transitórios eletromagnéticos no sistema, com tempo de alguns ciclos da onda fundamental a alguns segundos.
- Longa Duração: Através dela verifica-se o comportamento de grandezas de grande porte, que são provocadas por grandes variações no sistema e com tempo longo, cerca de minutos.

Após a detecção dos erros, é possível investir em sistemas para melhorar a utilização da energia, evitando interrupções e grandes falhas no sistema como um todo.

### 2.1.1 Registradores Digitais de Perturbações

Registradores digitais de perturbações, também conhecidos como oscilógrafos, são equipamentos destinados a registrar as perturbações sofridas por um sistema elétrico. As perturbações mais comuns são: sobretensão, subtensão, sobrecorrente, sobrefrequência e subfrequência.

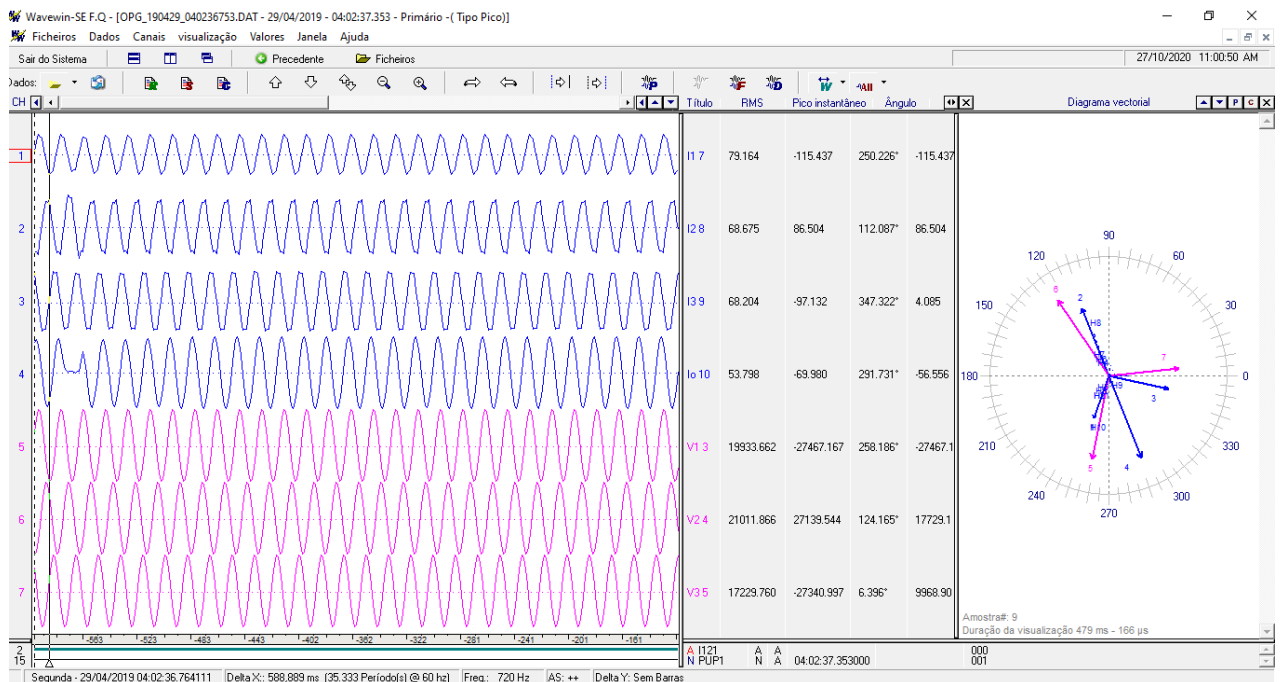
Esses equipamentos possuem unidades digitais e analógicas, para aquisição e processamento das informações (MAMEDE FILHO, 2010).

## 2.2 Software Wavewin

Como mencionado, a cada oscilação detectada, através do oscilógrafo presente no relé Sepam, do fabricante Schneider Electric, é gerado um arquivo chamado COMTRADE, com extensão *.dat*. Dessa forma, é necessário um software específico para a visualização e tratamento de tal arquivo. Assim, o software Wavewin foi analisado e escolhido para o desenvolvimento deste trabalho, pois é capaz de mostrar o comportamento da tensão, corrente e frequência no tempo.

A Figura 3 mostra um exemplo de arquivo COMTRADE, visualizado através do software mencionado.

**Figura 3 – Oscilografia visualizada através do software Wavewin**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Além da visualização, o Wavewin possui um papel fundamental para o desenvolvimento do projeto, pois foi possível exportar todos os valores de tensão, corrente, frequência e tempo para uma planilha, dessa forma possibilitou o tratamento dos dados via lógica Fuzzy.

### **2.3 Procedimentos De Distribuição De Energia Elétrica No Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**

A partir de 2009, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, elaborou um conjunto de documentos, que normatizam e padronizam o funcionamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Essas normas são divididas em 11 módulos, onde o módulo 8 diz respeito à qualidade de energia, o qual traz os padrões de tensão, frequência, fator de potência, instrumentação e metodologia de medição, taxa de distorção harmônica, e padrões de qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias. Tal módulo está em sua décima segunda revisão publicada em 01/01/2021.

Diante dos temas abordados pelo módulo 8, o presente trabalho estudará a respeito de desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e variação de tensão de curta duração.

### 2.3.1 Desequilíbrio de Tensão

Um sistema elétrico trifásico é caracterizado por tensões de mesmo módulo e defasadas em  $120^\circ$  entre si (FERREIRA FILHO, A. L. 2008)

$$\underline{V}_A = V_A \angle 0^\circ \quad (2.1)$$

$$\underline{V}_B = V_B \angle -120^\circ \quad (2.2)$$

$$\underline{V}_C = V_C \angle 120^\circ \quad (2.3)$$

onde:

$\underline{V}_A, \underline{V}_B$  e  $\underline{V}_C$  são fasores de tensão das fases *A, B, e C*, respectivamente; e  $V_A, V_B$  e  $V_C$  são os valores eficazes das tensões das fases *A, B e C*, respectivamente.

Assim é caracterizado como desequilíbrio de tensão quando os módulos são diferentes ou os ângulos estão com uma defasagem diferente de  $120^\circ$  (ONS, 2002).

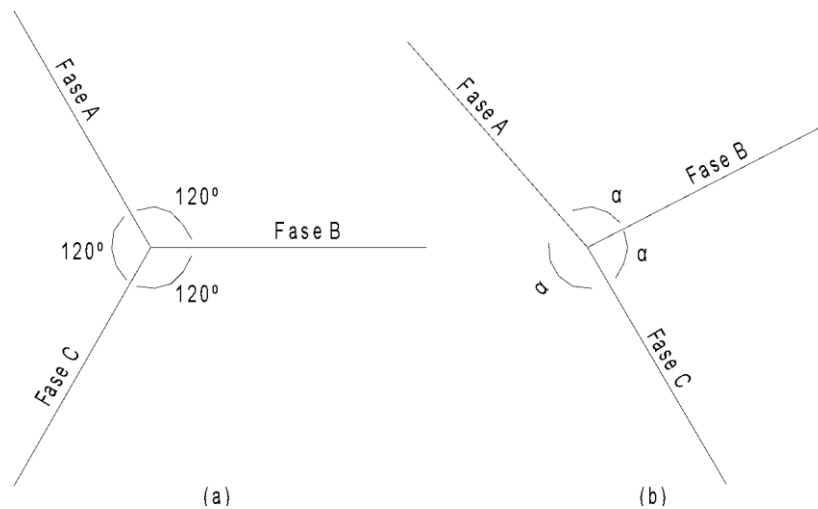
O desequilíbrio de tensão é medido utilizando componentes simétricas, onde é medido a proporção das componentes negativa ou zero pela componente de sequência positiva. Comumente utiliza-se a componente negativa de acordo com a seguinte equação:

$$K = \frac{V_-}{V_+} \quad (2.4)$$

onde,  $V_-$  é a componente de sequência negativa e  $V_+$  é a componente de sequência positiva. Tal proporção não poderá ser maior que 2% (DUGAN, 2004) (ONS).

A Figura 4 apresenta um sistema equilibrado com as defasagens corretas entre as fases e um sistema desequilibrado.

**Figura 4 - Sistema equilibrado (a) e Sistema desequilibrado (b)**



**Fonte: Autoria própria (2020).**

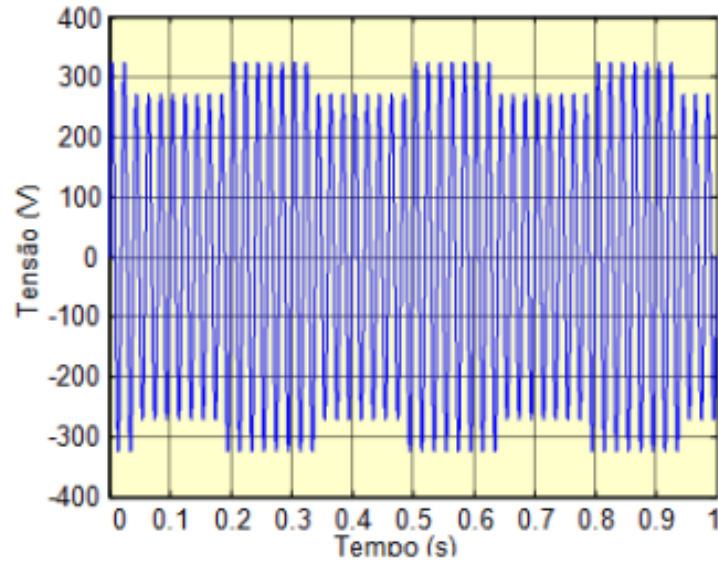
Segundo TEODORO (2005) uma das principais causas dos desequilíbrios de tensão estão nos sistemas de distribuição devido à má distribuição das cargas entre as fases, onde variam constantemente com a entrada ou retirada de cargas, outra ação que também contribui para que o desequilíbrio de tensão se agrave é uso de transformadores monofásicos, assim fazem com que as correntes em cada fase sejam diferentes.

Agora, tratando as consequências do desequilíbrio de tensão, em sistemas trifásicos tem-se a degradação da potência útil entregue, motores, por serem sensíveis a tensões de sequência negativa, tendem a ser os mais afetados (BARBOSA, 2007).

### 2.3.2 Flutuação de Tensão

O termo flutuação de tensão é utilizado para caracterizar a variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor da tensão eficaz ou de pico da tensão entregue ao consumidor (ANEEL). A Figura 5 apresenta um exemplo de flutuação de tensão.

**Figura 5 - Flutuação de tensão**



**Fonte: Tavares (2015).**

Segundo ONS (2002), a flutuação de tensão nos barramentos da rede básica é gerada pela operação de cargas não lineares de grandes consumidores ou agentes de distribuição, que provocam uma série de distúrbios ao se propagarem pela rede.

O maior efeito perceptível causado pela flutuação de tensão é a cintilação da iluminação, onde percebe-se uma leve variação no fluxo luminoso das lâmpadas. No entanto tal percepção somente é percebida em casos de flutuação de tensão severa.

### 2.3.3 Variação de Frequência

Segundo o Operador Nacional do Setor Elétrico, em condições normais de operação a frequência em regime permanente deve estar entre **59,9 Hz** e **60,1 Hz**, onde o valor nominal deve ser **60Hz**.

A frequência está diretamente relacionada a velocidade de rotação dos geradores, que fornecem energia elétrica ao sistema elétrico. A saída dos parâmetros se dá, na maioria das vezes, por problemas na geração ou perda repentina de potência, como a entrada ou saída de uma grande carga ou o desligamento de uma fonte de geração (BARBOSA, 2007).

### 2.3.4 Variação de Tensão de Curta Duração

Segundo o Operador Nacional do Setor Elétrico, a Variação de Tensão de Curta Duração – VTCD, é caracterizada pelo afundamento do valor eficaz da tensão em um curto espaço de tempo. A Tabela 01 mostra a classificação da variação de tensão.

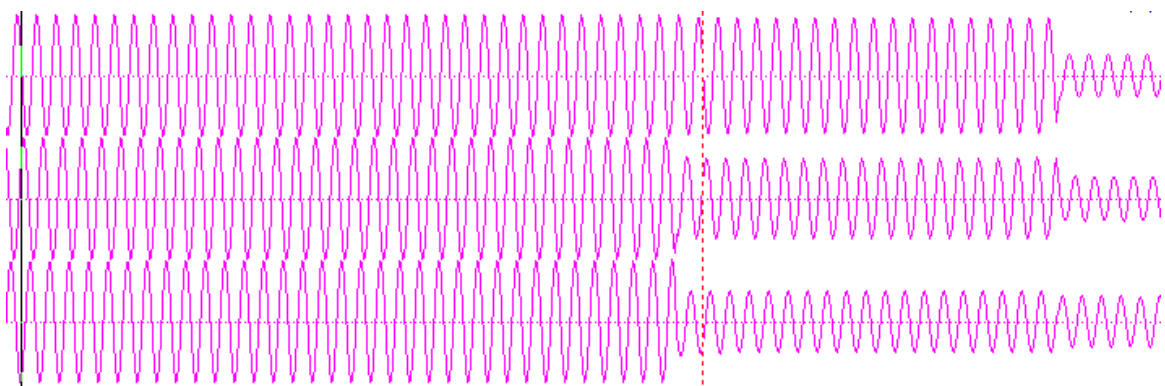
**Tabela 1 - Classificação das Variações de Tensão**

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: ANEEL (2021).

As VTCDs são críticas para equipamentos sensíveis, que ao detectar o afundamento da tensão desligam repentinamente, prejudicando sistemas de produção. A Figura 6 apresenta um exemplo de VTCD.

**Figura 6 - Exemplo de variação de tensão de curta duração**



Fonte: Autoria própria (2020).



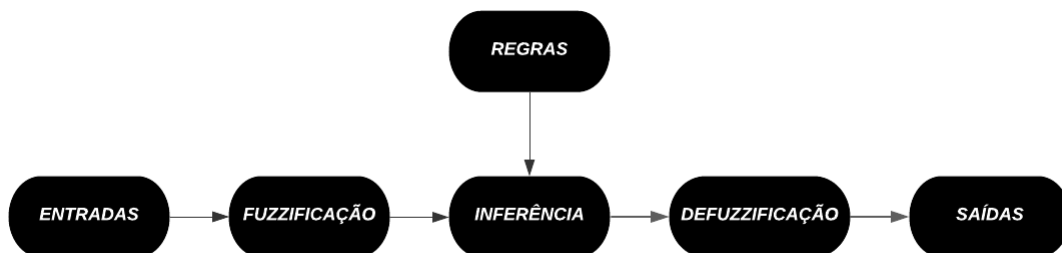
## 2.4 Lógica Fuzzy

Uma lógica muito utilizada, atualmente, para projeto de controladores é a Lógica Fuzzy, disseminada na década de 80, que é um tanto diferente da lógica clássica, pois as proposições podem assumir valores intermediários entre falso e verdadeiro, ou zero e um (SIMÕES, 2007). Segundo Gupta *et al* (2003) a lógica fuzzy se assemelha ao pensamento humano, sendo capaz de tomar decisões.

Muito aplicada em sistemas que apresentam um grande grau de incerteza, onde as mesmas não podem ser ignoradas, não sendo possível obter um modelo matemático linear, dessa forma a Lógica Fuzzy é a melhor escolha, pois combina a imprecisão associada aos eventos naturais e o poder computacional das máquinas, produzindo, assim, um sistema de respostas inteligentes. (COX, 1995; JANÉ, 2004).

A Figura 7 apresenta um diagrama de blocos de como a lógica Fuzzy se comporta.

Figura 7 - Diagrama de blocos lógica Fuzzy



Fonte: Autoria própria (2020).

### 2.4.1 Conjuntos Fuzzy

Na teoria clássica, considerando um conjunto denominado  $A$ , pertencente ao universo  $X$ , os elementos do universo pertencerão ou não ao conjunto, onde poderão ser representados pela função de característica (GONÇALVES, 2007)

$$f(x) = \{1 \text{ Se e somente se } x \in A \quad 0 \text{ Se e somente se } x \notin A \}$$

Já para os conjuntos fuzzy, essa função poderá assumir infinitos valores no intervalo  $[0,1]$ , onde o conjunto fuzzy  $A$  pertencente ao universo  $X$  é representado por uma função de pertinência  $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ , onde  $\mu_A(x)$  indica o quanto  $x$  é compatível com o conjunto  $A$  (GONÇALVES, 2007).

As funções de pertinência podem assumir diversas formas, como triangular, trapezoidal, gaussiana, entre outras, dependendo da aplicação.

#### 2.4.2 Variáveis Linguísticas

Variáveis linguísticas são representadas por termos linguísticos, para mostrar o conceito de uma variável de um dado problema. Diferentemente das variáveis numéricas, elas admitem somente os valores em que foram definidas (MARRO, 2016). Por exemplo:

Corrente é adequada

A variável corrente recebe o valor adequada, que é um dos conjuntos definidos por essa variável.

Para exemplificar melhor o que são conjuntos fuzzy, função de pertinência e variáveis linguísticas, considere a Figura 8, onde representa a função de pertinência para a variável temperatura, sendo os termos  $T(\text{temperatura}) = \{\text{frio}, \text{amena}, \text{quente}\}$ , em que correspondem aos conjuntos A, B e C, respectivamente.



Fonte: Autoria própria (2021).

A variável temperatura, quando assume valores até  $18^{\circ}\text{C}$  tem grau de pertinência **1** para o conjunto **A**, dessa forma é considerado frio, porém o grau de pertinência diminui conforme a temperatura aumenta.

Considera-se temperatura amena, quando ela está entre  $23^{\circ}\text{C}$  e  $26^{\circ}\text{C}$ , pois assume grau de pertinência **1** nesse intervalo. Da mesma forma, temperaturas acima de  $33^{\circ}\text{C}$  são consideradas quentes, pois o grau de pertinência é **1** para esse conjunto.

Esse processo de determinação do grau de pertinência em que cada entrada pertence ao conjunto mencionado é denominado fuzzificação, onde a partir dele é possível iniciar a programação fuzzy.

### 2.4.3 Regras

Após as variáveis de entradas e saídas fuzzificadas, é preciso criar um conjunto de regras, para a determinação da solução do problema em questão, em que gera um conjunto de *Se ... então*, em que relaciona as entradas e saídas.

Nessa etapa é onde se imprime a inteligência do controlador (LIMA, 2016).

### 2.4.4 Defuzzificação

Segundo ROSS 1995, a defuzzificação é denominada a técnica de transformar uma saída fuzzy em um único número. Para isso existem diversas técnicas, como centroide, maior pertinência e a média de pertinência máxima.

## 2.5 Trabalhos Relacionados

Diversos trabalhos já abordaram o problema de oscilações em subestações industriais, como por exemplo Moreto (2011), que desenvolveu um sistema de análise automática de perturbações em unidade de geração utilizando redes neurais artificiais e Bittencourt (2011), que desenvolveu o sistema de pré-análise de oscilografias em unidade de geração utilizando lógica fuzzy.

Ambos os autores aplicaram seus sistemas em unidades de geração ao invés de subestações industriais e utilizaram registradores digitais de perturbação, que são equipamentos que possuem unidades para aquisição e processamento de informações da rede elétrica, específicos para essas análises (MAMEDE FILHO, 2010). Contudo, esta mudança trará um maior custo em equipamentos, para a implantação do sistema.

Philip e Jain (2018) propuseram um estudo de detecção de oscilações de energia usando técnica de variância rotacional, que traz bons resultados em análises de ruídos do sistema, porém é necessária uma precisão muito elevada dos sinais coletados, fazendo com que os equipamentos de medição tenham um elevado custo.

Xia et al. (2018) utiliza inteligência artificial, neste caso redes neurais artificiais, para detectar ressonância subsíncrona em unidades de geração, onde aponta ser uma preocupação para proteção de geradores. Apesar de não estar direcionado para detecção das mesmas variáveis do sistema mostrado nesse trabalho, é importante analisar Xia et al. (2018) em função da programação utilizada, que também se assemelha ao pensamento humano e trouxe ótimas respostas ao problema levantado.

Uma outra abordagem é a mostrada por Han et al. (2010), que utilizam a transformada de Hilbert-Huang para detectar e analisar oscilações eletromecânicas em sistemas de potência. A vantagem é que utilizando este modelo matemático é possível estimar além de sinais lineares, sinais não lineares, que é o caso das oscilações de energia, porém há uma complexidade computacional embarcada, dificultando sua elaboração.

Outra forma de avaliar oscilações de energia é a proposta por Kamwa et al. (2011), que monitoram oscilações de energia em tempo real utilizando operador de energia Teager-Kaiser.

Assim, observando as diferentes formas para se analisar as oscilações de energia, há uma grande preocupação dos pesquisadores, o que enriquece a investigação trazendo literaturas complementares, possibilitando comparações quanto à complexidade de implantação, robustez e nível de incerteza do sistema completo.

Dessa forma a lógica fuzzy se mostra um controle adequado para a tomada de decisão do tipo de oscilação registrada pelo oscilógrafo, por isso foi escolhida como solução ótima para este trabalho.

### **3 INOVAÇÃO**

Esta seção tem o intuito de situar o projeto dentro do contexto de inovação. Para tanto, tem-se a necessidade de evidenciar os conceitos de inovação e a classificação do projeto quanto ao seu tipo de inovação.

#### **3.1 Tipo de Inovação**

Como já evidenciado, a qualidade da energia é de fundamental importância para uma planta industrial e, por conta desta preocupação, existem muitos pesquisadores que abordam esta questão, contribuindo para o surgimento de numerosos meios de detecção e análise, e trazendo inovações e melhorias associadas ao sistema.

Visando analisar a inovação do sistema apresentado, é importante recorrer ao Manual de Oslo, manual que apresenta os conceitos e metodologias sobre inovações, onde traz:

Uma inovação é a implementação de um produto (bem ou serviço) novo ou significativamente melhorado, ou um processo, ou um novo método de marketing, ou um novo método organizacional nas práticas de negócios, na organização do local de trabalho ou nas relações externas (MANUAL DE OCDE, 2005).

Assim, entende-se inovação como a criação de algo novo ou melhoramento de algo existente, a fim de obter ganhos na organização. Entretanto, esta criação de algo novo ou melhoramento pode acontecer como uma inovação de produto, inovação de processo, marketing, processo e até mesmo um serviço organizacional.

O sistema é considerado um melhoramento dos sistemas atuais aplicado em indústrias que já possuem uma forma de monitoramento de energia e é considerado totalmente novo para empresas que não tratam tais perturbações.

#### **3.2 Inovação de Produto**

Com base nessas considerações, o projeto se enquadra em inovação de produto quando visto pelo panorama do produto que será criado, pois trata de um produto/sistema que será capaz de caracterizar as oscilações de energia em uma indústria de forma automática e precisa, além de possuir maior agilidade na

obtenção dos dados, menor custo e maior precisão, quando comparado com o método manual, utilizando atualmente na indústria.

Tratando mais a fundo o funcionamento do sistema, o ato inovador em produto está primeiramente na programação do sistema, que utilizará inteligência artificial para interpretar os dados que serão coletados e apresentar os relatórios aos responsáveis pela qualidade de energia da empresa.

### **3.3 Inovação em Processo**

Após a aplicação do projeto em uma indústria, espera-se alcançar um melhoramento de processo na medida em que esta análise e diagnóstico das falhas do sistema elétrico de potência será feito de modo otimizado e inovador dentro da organização.

Logo, o trabalho desenvolvido trará melhorias de produção, possibilitando um relatório preciso das perturbações da rede de energia. Com os dados em mãos, será possível propor soluções para a concessionária ou desenvolver projetos internos para mitigar os danos à produção.

## 4 METODOLOGIA

A pesquisa é caracterizada como uma pesquisa aplicada, pois tem como característica principal a aplicação prática direcionada a resolver ou diagnosticar um problema específico (PRODANOV; FREITAS, 2013; FLEURY; WERLANG, 2017).

Neste contexto, para resolver o problema de classificação de oscilações em unidade industrial de média tensão, foram executadas as etapas ilustradas na Figura 9.



Fonte: Autoria própria (2021).

A primeira etapa executada foi o levantamento bibliográfico, que segundo Lakatos e Marconi (2003) coloca o pesquisador em contato direto com tudo que foi escrito, dito ou filmado sobre o assunto e enriquece o trabalho, trazendo novas possibilidades para solucionar os problemas levantados.

Juntamente com a pesquisa bibliográfica, o levantamento da base de dados em campo também foi uma etapa importante para o projeto, pois com todos os dados das oscilações foi possível classificar os eventos ocorridos na indústria e obter um histórico de dados para criação das bases de regras do sistema especialista.

O levantamento dos dados de oscilações foi realizado em uma subestação industrial atendida na classe de tensão 34,5 kV, coletando todas as falhas de energia entre o ano de 2016 a 2019. Dentre elas, tem-se perturbações caracterizadas como variação de tensão de curta duração, falta de energia e oscilografias que foram geradas pelo sistema erroneamente, ou seja, falsos positivos.



Ao todo obteve-se 846 oscilações, dentre elas 554 são caracterizadas como variação de tensão de curta duração, 21 faltas de energia, 93 oscilações evitadas, onde a oscilação ocorreu, porém a empresa estava alimentada via gerador e os equipamentos não desligaram, e 178 oscilações falsas, conforme Tabela 2.

**Tabela 2 - Oscilações em uma subestação industrial**

Oscilações	Quantidade
Varição de tensão de curta duração	554
Falta de energia	21
Oscilações evitadas	93
Oscilações falsas	178
Total	846

Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 3 apresenta a caracterização de cada uma das 575 oscilações verdadeiras, que abrange as variações de tensão de curta duração e falta de energia.

**Tabela 3 - Classificação das oscilações reais**

Oscilações	Quantidade
Subtensão	571
Sobretensão	2
Subfrequência	2
Sobrefrequência	0
Total	575

Fonte: Autoria própria (2021).

A leitura dos dados é feita com o software Wavewin<sup>®</sup> distribuído pela fabricante de relés de proteção Schneider Electric, onde nele é possível observar com clareza o comportamento da tensão e corrente no momento da perturbação na rede.

Os dados lidos pelo software podem ser convertidos em formato .csv, para possibilitar a construção de uma tabela com dados reais e analisar o comportamento das ondas. Podem ser utilizados tanto os valores instantâneos, quanto os valores RMS das tensões e correntes. Neste trabalho, foram utilizados os valores RMS.

Para a programação do software baseado em lógica *fuzzy*, foi utilizado a ferramenta de modelagem *Fuzzy Logic Desing*, desenvolvido pela companhia MathWorks®.

Dessa forma é possível desenvolver o programa e testá-lo, a fim de caracterizar as oscilações como:

- Oscilação verdadeira;
- Oscilação Falsa;
- Oscilação Evitada;
- Sobretensão;
- Tensão Adequada;
- Sobretensão;
- Subcorrente;
- Corrente Adequada;
- Sobre Corrente;
- Subfrequência;
- Frequência Adequada;
- Sobrefrequência.

Para chegar ao objetivo apresentado, um padrão foi utilizado, o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, pois nele estão todos os requisitos de qualidade, segundo a ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Nele é possível identificar se os valores lidos pelo oscilógrafo estão dentro dos limites aceitáveis, onde esses valores contribuem para a construção dos limites dos conjuntos *fuzzy*.

Para análise será utilizado como entrada os valores das tensões RMS das fases A, B e C, denominadas  $V_A, V_B$  e  $V_C$ , respectivamente, correntes RMS das fases A, B, C e neutro, denominadas  $I_A, I_B, I_C$  e  $I_N$  e instante em que cada valor foi lido, denominado  $T$ .

Com as variáveis linguísticas nomeadas, tem-se os limites estipulados pela ANEEL:

$$Tensão = \left\{ \begin{array}{l} \textit{baixa} \\ \textit{adequada} \\ \textit{alta} \end{array} \quad \begin{array}{l} V < 0,93 * V_{fundamental} \\ 0,93 * V_{fundamental} \leq V \leq 1,05 * V_{fundamental} \\ V > 1,05 * V_{fundamental} \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

$$Corrente = \left\{ \begin{array}{ll} \textit{baixa} & I < 0,50 * I_{fundamental} \\ \textit{adequada} & 0,50 * I_{fundamental} \leq I \leq 1,1 * I_{fundamental} \\ \textit{alta} & I > 1,1 * I_{fundamental} \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

$$Frequência = \left\{ \begin{array}{ll} \textit{baixa} & F < 59,9 \text{ Hz} \\ \textit{adequada} & 59,9 \leq F \leq 60,1 \\ \textit{alta} & F > 60,1 \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

onde  $V_{fundamental}$  é a tensão RMS em regime permanente, em que para a subestação do presente trabalho, é  $19,2 \text{ kV}$ , visto que a tensão fornecida pela concessionária é de  $33 \text{ kV}$ . A corrente  $I_{fundamental}$  é a corrente típica da indústria, onde foi considerada  $100 \text{ A}$ .

Dessa forma, os valores reais que se utilizou como base para os conjuntos fuzzy são:

$$Tensão = \left\{ \begin{array}{ll} \textit{baixa} & V < 17,85 \\ \textit{adequada} & 17,85 \leq V \leq 20,16 \\ \textit{alta} & V > 20,16 \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

$$Corrente = \left\{ \begin{array}{ll} \textit{baixa} & I < 50 \\ \textit{adequada} & 50 \leq I \leq 110 \\ \textit{alta} & I > 110 \end{array} \right\} \quad (4.5)$$

$$Frequência = \left\{ \begin{array}{ll} \textit{baixa} & F < 59,9 \\ \textit{adequada} & 59,9 \leq F \leq 60,1 \\ \textit{alta} & F > 60,1 \end{array} \right\} \quad (4.6)$$

Foram utilizados dois métodos de inferência, o método Mamdani e o método Sugeno, para complementação dos resultados.

O método Mamdani utiliza tanto para as entradas, quanto para as saídas variáveis linguísticas representados por meio de conjuntos fuzzy, já Sugeno propôs um método mais simplificado, em que as entradas são variáveis linguísticas fuzzy e a saída uma função linear (ANDRADE, 2008). Ambos métodos podem ser modelados a partir da ferramenta Fuzzy Logic Design.

As variáveis de saída serão:

Oscilação;

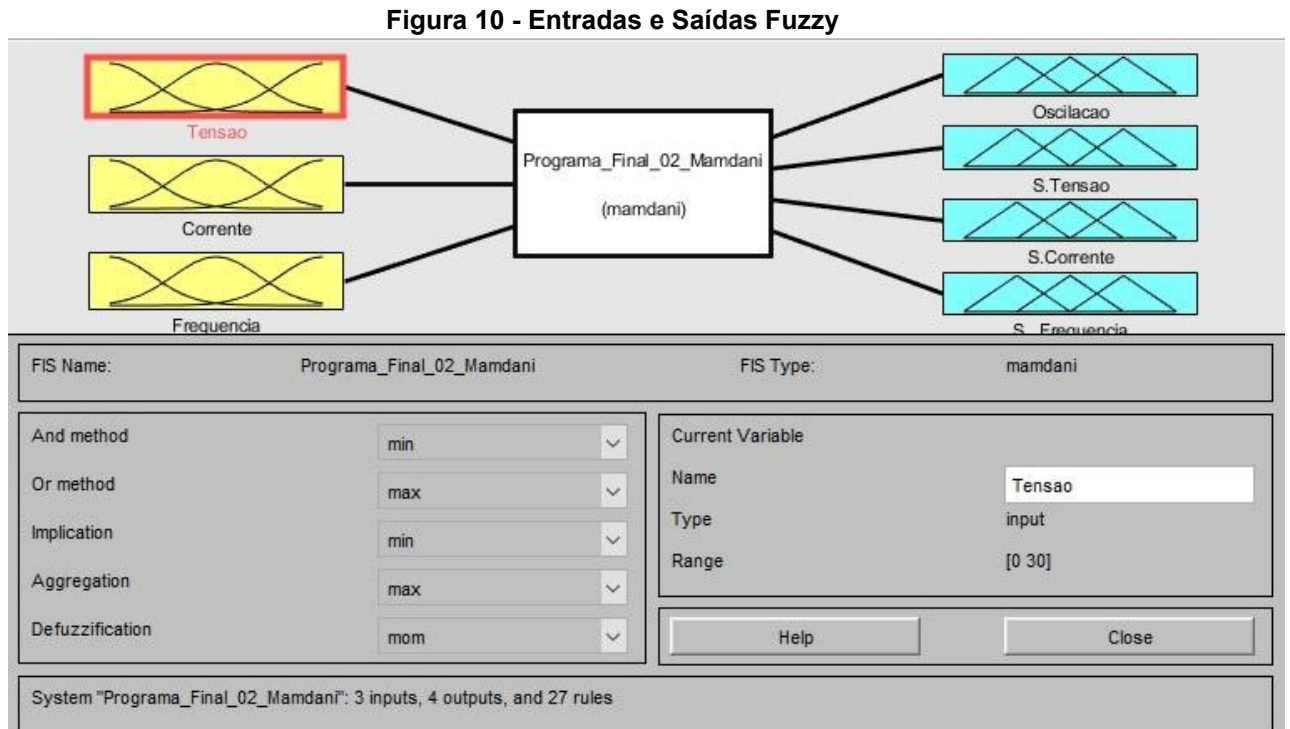
Saída Tensão;

Saída Corrente;

Saída Frequência,

Onde permitirá a caracterização conforme descrito anteriormente.

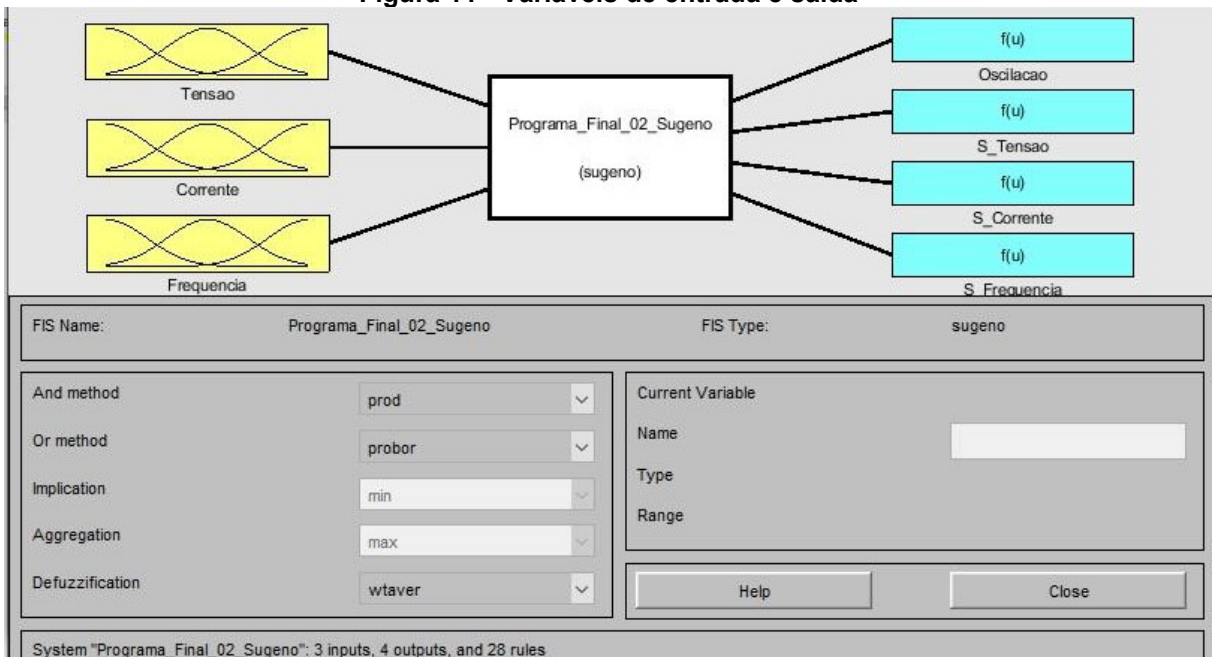
Para o primeiro programa, onde utilizou-se o método inferência Mamdani, o método de defuzzificação foi a média máxima (mom). Assim, as entradas e saídas estão apresentadas na Figura 10.



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Para o segundo programa, onde o método de inferência foi Sugeno, a figura 11 apresentam as variáveis de entrada e saída, em que as saídas são representadas por funções lineares.

**Figura 11 - Variáveis de entrada e saída**



Fonte: Autoria própria (2021).

#### 4.1 Programa 1

Para a implementação da primeira proposta, tomou-se como base as funções reais 4.4, 4.5 e 4.6, dessa forma a Tabela 4 apresenta as variáveis fuzzy, universo e conjunto fuzzy de cada variável linguística de entrada.

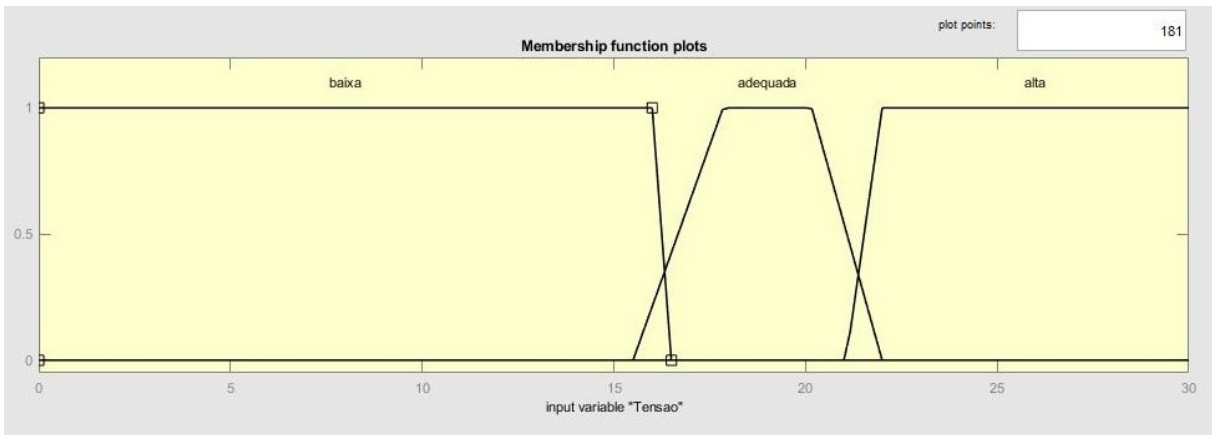
**Tabela 4 - Variáveis de entrada**

Variável Linguística	Variável Fuzzy	Universo	Conjuntos Fuzzy
Tensão	baixa, adequada, alta	[0 30]	[(0 16,5), (15,5 24,52), (21,06 30)]
Corrente	baixa, adequada, alta	[0 120]	[(0 60), (40 110), (100 120)]
Frequência	baixa, adequada, alta	[59 62]	[(59 59,9), (59,8 60,2), (60,1 62)]

Fonte: Autoria própria (2021).

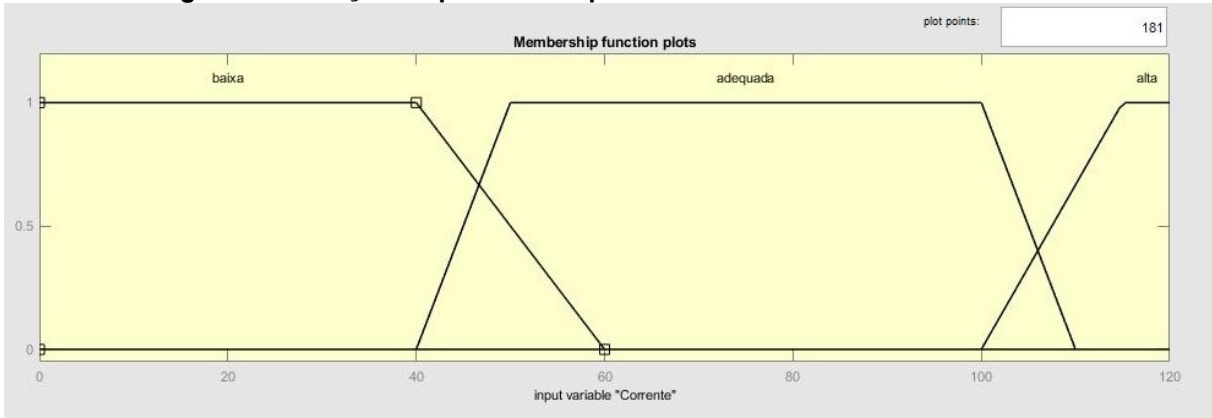
A representação de cada variável, com suas funções de pertinência são apresentadas nas Figuras 12, 13 e 14:

**Figura 12 - Função de pertinência para a variável de entrada “Tensao”**



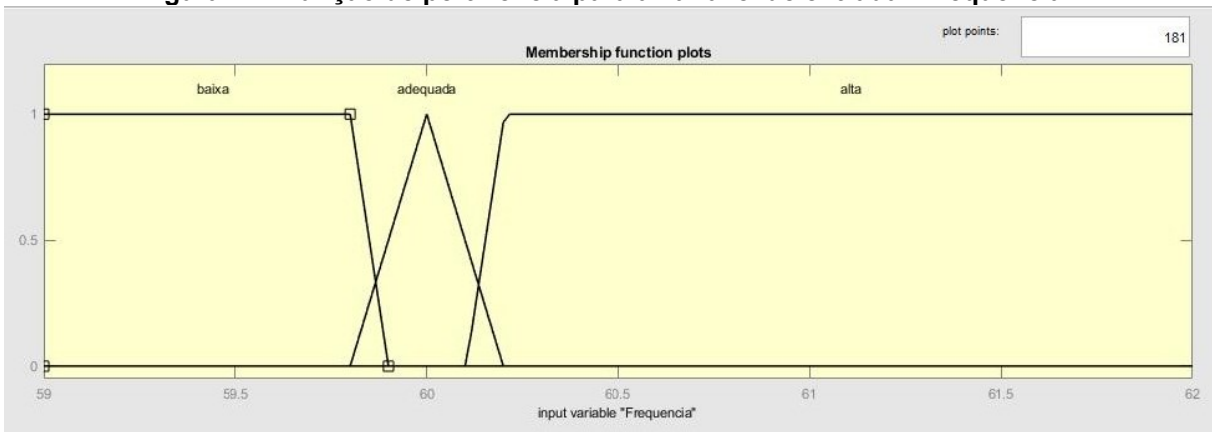
Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 13 - Função de pertinência para a variável de entrada “Corrente”**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 14 - Função de pertinência para a variável de entrada “Frequencia”**



Fonte: Autoria própria (2021).

Para a construção das funções de pertinência das variáveis de saída utilizou-se como base no histórico de oscilações as premissas:

- Eventos ocorridos entre os dias 10/03/2016 e 31/08/2019, totalizando 1269 dias de leitura, ou seja, 30456 horas;
- Cada oscilação corresponde a uma hora de produção parada, pois é o tempo necessário para reestabelecer o sistema de climatização da indústria e retomada de produção;
- Com base na Tabela 3, pode-se concluir que a indústria obteve 571 horas perdidas por subtensão, 2 horas perdidas por sobretensão e 29.883 horas de tensão adequada.
- Para a função de pertinência da saída em que verifica se ocorreu oscilação ou não, foi utilizado o mostrado na Tabela 2, em que 178 (21,04%) são eventos falsos, 575 (67,96%) são oscilações verdadeiras e 93 (11%) são oscilações evitadas.

Dessa forma para a construção das funções de pertinência das saídas, tomou-se como base a Tabela 5:

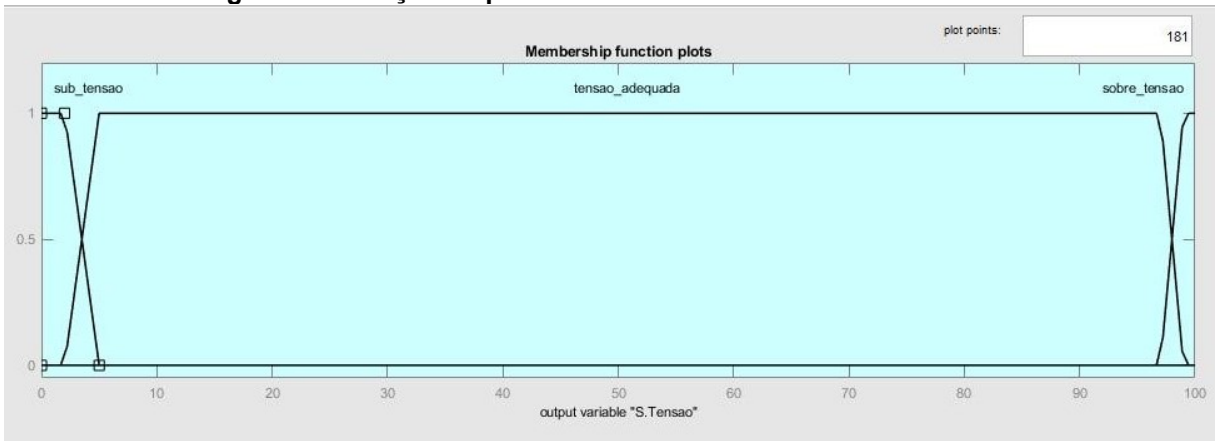
**Tabela 5 - Variáveis de saída**

Saída	Variável Fuzzy	Universo	Conjuntos Fuzzy
Oscilação	falsa, oscilou, evitada	[0 100]	[(0 0,2), (0,1 0,89), (0,8 1)]
S.Tensão	subtensao, tensao_adequada, sobretensão	[0 100]	[(0 1,87), (1,5 99,99), (99,97 100)]
S.Corrente	subcorrente, corrente_adequada, sobrecorrente	[0 100]	[(0 60), (60 110), (100 120)]
S.Frequência	subfrequencia, adequada, sobrefrequência	[0 100]	[(59 59,9), (59,9 60,1), (60,1 70)]

**Fonte: Autoria própria (2021).**

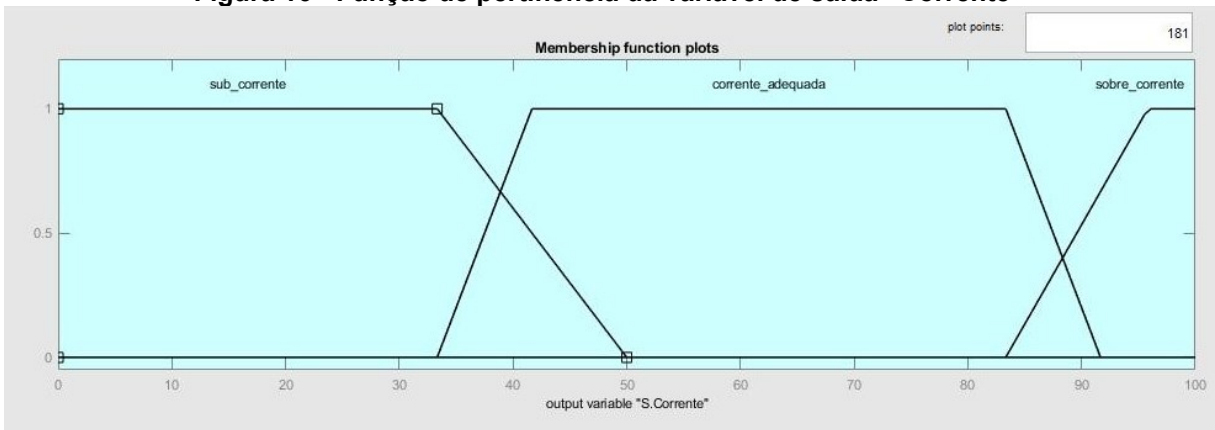
As funções de pertinência para as saídas de tensão, corrente, frequência e oscilação são apresentadas nas Figuras 15, 16, 17 e 18, respectivamente:

**Figura 15 - Função de pertinência da variável de saída “Tensao”**



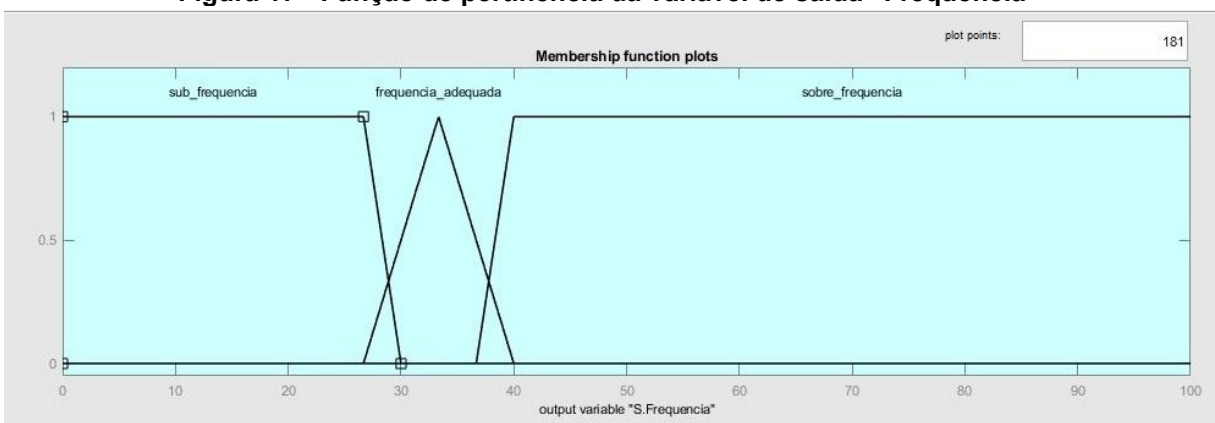
Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 16 - Função de pertinência da variável de saída “Corrente”**



Fonte: Autoria própria (2021).

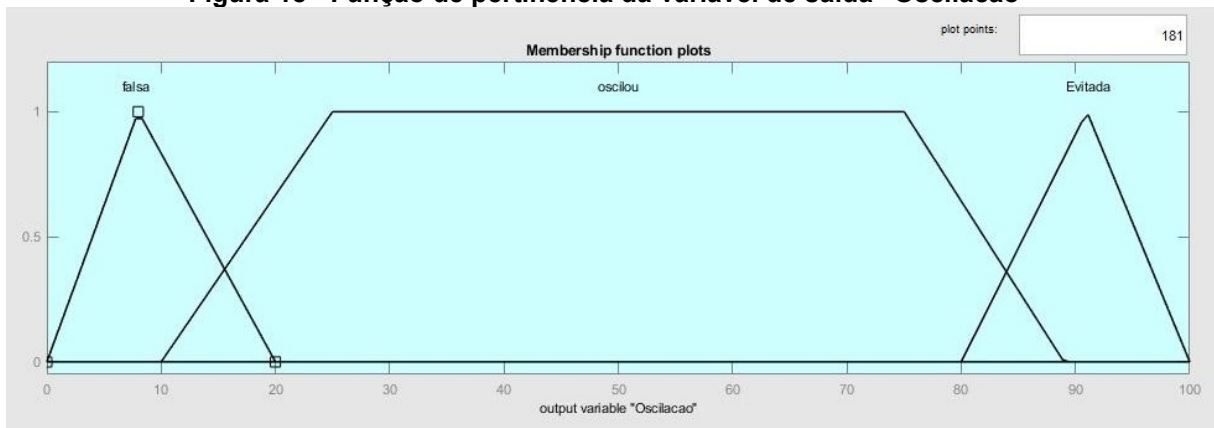
**Figura 17 - Função de pertinência da variável de saída “Frequencia”**



Fonte: Autoria própria (2021).



**Figura 18 - Função de pertinência da variável de saída “Oscilacao”**



Fonte: Autoria própria (2021).

Por fim, utilizou-se um conjunto de 27 regras, onde estão descritas a seguir:

- **Se** tensao(baixa) & corrente(baixa) & frequencia(baixa) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(subtensao) & S.Corrente(subcorrente) & S.Frequencia(subfrequencia)
- **Se** tensao(baixa) & corrente(baixa) & frequencia(adequada) **Então** Oscilacao(evitada) & S.Tensao(subtensao) & S.Corrente(subcorrente) & S.Frequencia(adequada)
- **Se** tensao(baixa) & corrente(baixa) & frequencia(alta) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(subtensao) & S.Corrente(subcorrente) & S.Frequencia(sobrefrequencia)
- **Se** tensao(baixa) & corrente(adequada) & frequencia(baixa) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(subtensao) & S.Corrente(adequada) & S.Frequencia(subfrequencia)
- **Se** tensao(baixa) & corrente(adequada) & frequencia(adequada) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(subtensao) & S.Corrente(adequada) & S.Frequencia(adequada)
- **Se** tensao(baixa) & corrente(adequada) & frequencia(alta) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(subtensao) & S.Corrente(adequada) & S.Frequencia(sobrefrequencia)
- **Se** tensao(baixa) & corrente(alta) & frequencia(baixa) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(subtensao) & S.Corrente(sobrecorrente) & S.Frequencia(subfrequencia)

- **Se** tensao(baixa) & corrente(alta) & frequencia(adequada) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(subtensao) & S.Corrente(sobrecorrente) & S.Frequencia(adequada)
- **Se** tensao(baixa) & corrente(alta) & frequencia(alta) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(subtensao) & S.Corrente(sobrecorrente) & S.Frequencia(sobrefrequencia)
- **Se** tensao(adequada) & corrente(baixa) & frequencia(baixa) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(adequada) & S.Corrente(subcorrente) & S.Frequencia(subfrequencia)
- **Se** tensao(adequada) & corrente(baixa) & frequencia(adequada) **Então** Oscilacao(falsa) & S.Tensao(adequada) & S.Corrente(subcorrente) & S.Frequencia(adequada)
- **Se** tensao(adequada) & corrente(baixa) & frequencia(alta) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(adequada) & S.Corrente(subcorrente) & S.Frequencia(sobrefrequencia)
- **Se** tensao(adequada) & corrente(adequada) & frequencia(baixa) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(adequada) & S.Corrente(adequada) & S.Frequencia(subfrequencia)
- **Se** tensao(adequada) & corrente(adequada) & frequencia(adequada) **Então** Oscilacao(falsa) & S.Tensao(adequada) & S.Corrente(adequada) & S.Frequencia(adequada)
- **Se** tensao(adequada) & corrente(adequada) & frequencia(alta) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(adequada) & S.Corrente(adequada) & S.Frequencia(sobrefrequencia)
- **Se** tensao(adequada) & corrente(alta) & frequencia(baixa) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(adequada) & S.Corrente(sobrecorrente) & S.Frequencia(subfrequencia)
- **Se** tensao(adequada) & corrente(alta) & frequencia(adequada) **Então** Oscilacao(falsa) & S.Tensao(adequada) & S.Corrente(sobrecorrente) & S.Frequencia(adequada)
- **Se** tensao(adequada) & corrente(alta) & frequencia(alta) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(adequada) & S.Corrente(sobrecorrente) & S.Frequencia(sobrefrequencia)

- **Se** tensao(alta) & corrente(baixa) & frequencia(baixa) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(sobretensao) & S.Corrente(subcorrente) & S.Frequencia(subfrequencia)
- **Se** tensao(alta) & corrente(baixa) & frequencia(adequada) **Então** Oscilacao(evitada) & S.Tensao(sobretensao) & S.Corrente(subcorrente) & S.Frequencia(adequada)
- **Se** tensao(alta) & corrente(baixa) & frequencia(alta) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(sobretensao) & S.Corrente(subcorrente) & S.Frequencia(sobrefrequencia)
- **Se** tensao(alta) & corrente(adequada) & frequencia(baixa) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(sobretensao) & S.Corrente(adequada)& S.Frequencia(subfrequencia)
- **Se** tensao(alta) & corrente(adequada) & frequencia(adequada) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(sobretensao) & S.Corrente(adequada)& S.Frequencia(adequada)
- **Se** tensao(alta) & corrente(adequada) & frequencia(alta) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(sobretensao) & S.Corrente(adequada) & S.Frequencia(sobrefrequencia)
- **Se** tensao(alta) & corrente(alta) & frequencia(baixa) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(sobretensao) & S.Corrente(sobrecorrente) & S.Frequencia(subfrequencia)
- **Se** tensao(alta) & corrente(alta) & frequencia(adequada) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(sobretensao) & S.Corrente(sobrecorrente) & S.Frequencia(adequada)
- **Se** tensao(alta) & corrente(alta) & frequencia(alta) **Então** Oscilacao(oscilou) & S.Tensao(sobretensao) & S.Corrente(sobrecorrente) & S.Frequencia(sobrefrequencia)

Dessa forma foi possível executar o programa e iniciar o planejamento dos testes.

## 4.2 Planejamento dos testes do Programa 1

Após a determinação das funções de pertinência para as entradas e saídas e definidas as regras, utilizou-se a Tabela 6 como parâmetro de testes.

**Tabela 6 - Parâmetros para Testes Programa 01**

Número do Teste	Entrada Tensão (kV)	Entrada Corrente (A)	Entrada Frequência (Hz)	Saída Esperada Oscilação	Saída Esperada Tensão	Saída Esperada Corrente	Saída Esperada Frequência
01	18	100	60	Falsa	Adequada	Adequada	Adequada
02	10	100	60	Oscilou	Subtensão	Adequada	Adequada
03	10	30	60	Evitada	Subtensão	Subcorrente	Adequada
04	18	100	61	Oscilou	Adequada	Adequada	Sobrefrequencia
05	18	100	59	Oscilou	Adequada	Adequada	Subfrequência
06	22	100	60	Oscilou	Sobretensão	Adequada	Adequada
07	22	30	60	Evitada	Sobretensão	Subcorrente	Adequada
08	18	115	60	Falsa	Adequada	Sobrecorrente	Adequada

Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 6 apresenta as saídas esperadas para cada conjunto de entradas, assim será possível a verificação da convergência do programa. As saídas esperadas foram nomeadas conforme experiência em análises de oscilografias.

## 4.3 Programa 2

Para a implementação do segundo programa, as funções de pertinência para as variáveis linguísticas de entrada serão as mesmas apresentadas anteriormente na Tabela 4.

Como na segunda proposta se baseará no método de inferência Sugeno, as funções de pertinência das saídas serão conforme a Tabela 7.

**Tabela 7 - Variáveis de saída programa 02**

Saída	Variável Fuzzy	Universo	Conjuntos Fuzzy
Oscilação	evitada, oscilou, falsa	[0 30]	[(10), (20), (30)]
S_Tensão	subtensao, tensao_adequada, sobretensao	[0 10]	[(0), (5), (10)]
S_Corrente	subcorrente, corrente_adequada, sobrecorrente	[0 10]	[(0), (5), (10)]
S_Frequência	subfrequencia, adequada, sobrefrequência	[0 10]	[(0), (5), (10)]

Fonte: Autoria própria (2021).

O método de inferência considerado foi Takagi-Sugeno e método de defuzzificação foi a wtaver. A Tabela 8 apresenta as funções de saída para este programa.

**Tabela 8 - Conjuntos Saídas Fuzzy**

Saída	Variável Fuzzy	Constante Fuzzy
Oscilação	evitada	$f(u) = 10$
	oscilou	$f(u) = 20$
	falsa	$f(u) = 30$
S_Tensão	subtensao	$f(u) = 0$
	tensao_adequada	$f(u) = 5$
	sobretensao	$f(u) = 10$
S_Corrente	subcorrente	$f(u) = 0$
	corrente_adequada	$f(u) = 5$
	sobrecorrente	$f(u) = 10$
S_Frequência	subfrequencia	$f(u) = 0$
	adequada	$f(u) = 5$
	sobrefrequência	$f(u) = 10$

Fonte: Autoria própria (2021).

Como pôde observar, as saídas no método de inferência Sugeno são funções lineares, assim nesse caso utilizou-se constantes, a fim de se obter um

número inteiro nas respostas, o que poderá facilitar a interface com outras linguagens de programação, para elaboração de um futuro supervisor, por exemplo.

As regras serão as mesmas apresentadas para o programa 01, pois o intuito é observar a convergência do programa mediante a mudança do método de inferência.

#### 4.4 Planejamento dos testes do Programa 2

Da mesma forma que o anterior, para os testes utilizou-se parâmetros pré estabelecidos, onde apresenta-se as saídas esperadas, conforme a construção das funções de saída. A Tabela 9 apresentam os parâmetros.

**Tabela 9 - Parâmetros para Testes Programa 02**

Número do Teste	Entrada Tensão (kV)	Entrada Corrente (A)	Entrada Frequência (Hz)	Saída Esperada Oscilação	Saída Esperada Tensão	Saída Esperada Corrente	Saída Esperada Frequência
01	18	100	60	30	5	5	5
02	10	100	60	20	0	5	5
03	10	30	60	30	0	0	5
04	18	100	61	20	5	5	10
05	18	100	59	20	5	5	0
06	22	100	60	20	10	5	5
07	22	30	60	30	10	0	5
08	18	115	60	30	5	10	5

Fonte: Autoria própria (2021).

Da mesma forma que os testes do programa 01, a tabela de parâmetros é utilizada para verificar a convergência do programa com o esperado.

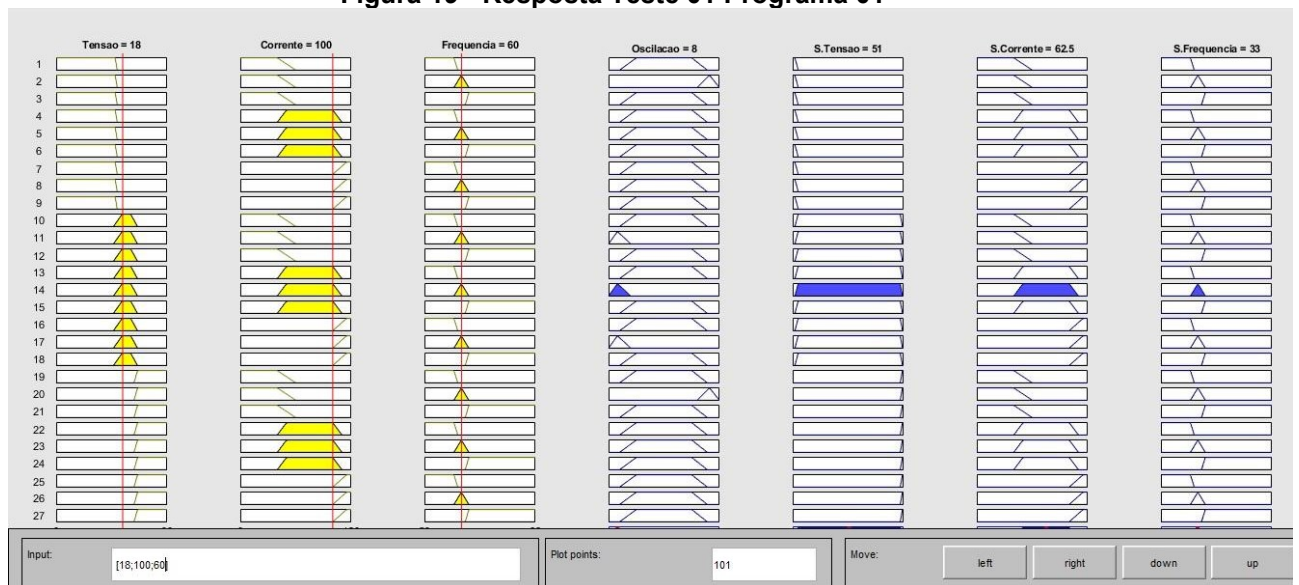
## 5 RESULTADOS

Capítulo destinado a apresentar os resultados obtidos com a pesquisa e proposta de continuidade do projeto.

### 5.1 Programa 01

Com base na Tabela 6, as Figuras 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 e 26 mostram as respostas do sistema especialista, seguindo a ordem apresentada anteriormente.

**Figura 19 - Resposta Teste 01 Programa 01**



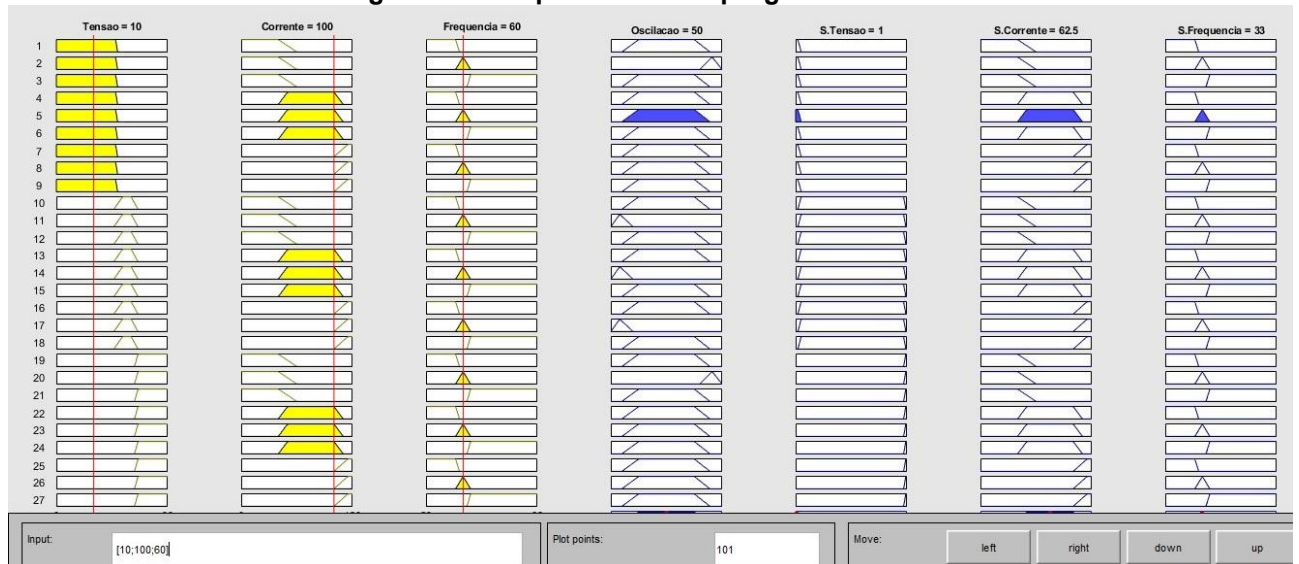
**Fonte: Autoria própria (2021).**

Para o teste 01, observa-se na Figura 19 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é falsa, tensão adequada, corrente adequada e frequência adequada.

Esse tipo de oscilografia ocorre quando há alguma alteração no sistema, comumente a entrada do gerador em rampa, onde o relé identifica como oscilação, porém não ocorreu. É importante identificar esses pontos, pois o espaço de memória ocupado no equipamento precisa ser liberado, a fim de salvar outras perturbações que serão verdadeiras.

Também, é importante observar que com o sistema especialista caracterizando esses eventos, o analista da indústria não perderá tempo em avaliar dados desnecessários.

**Figura 20 - Resposta teste 02 programa 01**



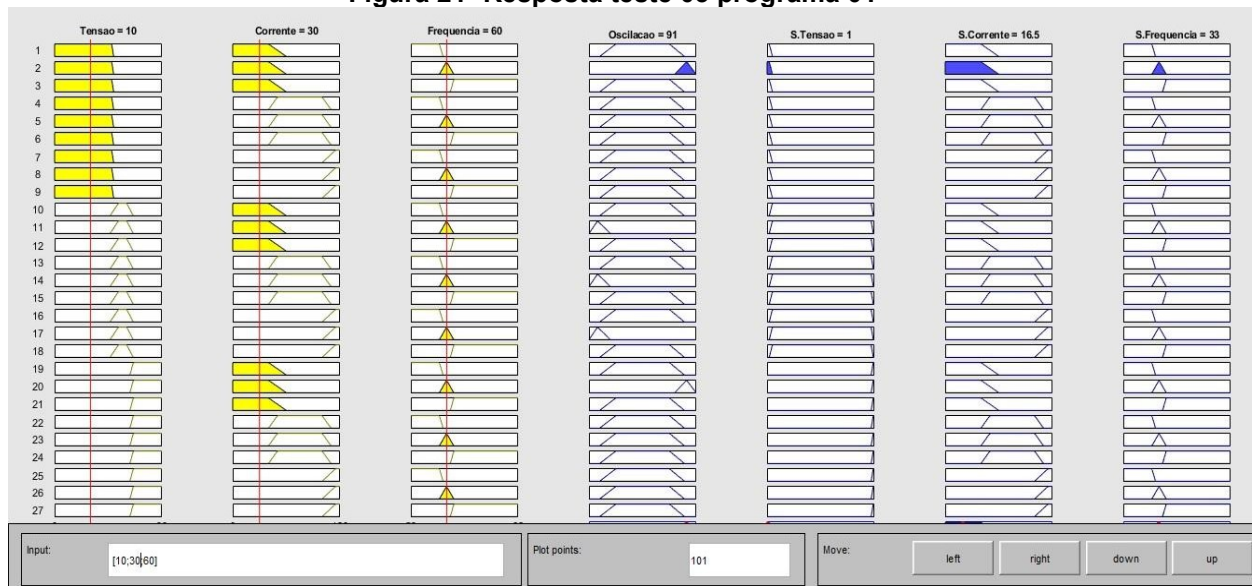
**Fonte: Autoria própria (2021).**

Para o teste 02, observa-se na Figura 20 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é verdadeira, subtensão, corrente adequada e frequência adequada.

Essa oscilação corresponde há eventos vindos da concessionária de energia, onde é importante registrar, a fim de cobrar melhorias no sistema elétrico.



**Figura 21- Resposta teste 03 programa 01**



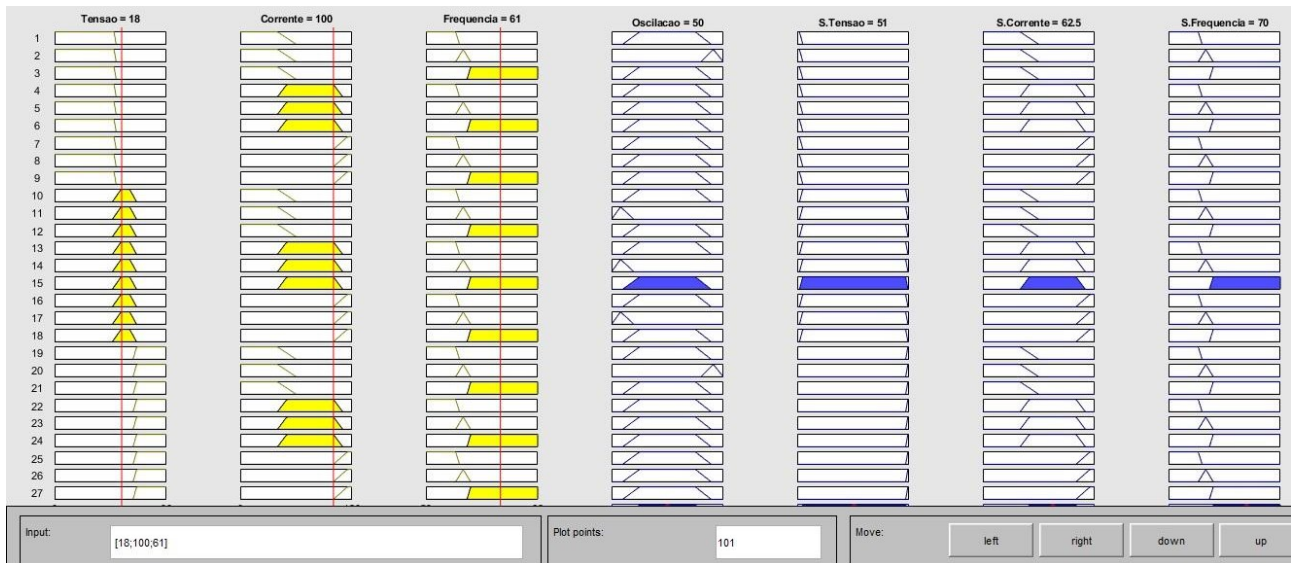
**Fonte: Autoria própria (2021).**

Para o teste 03, observa-se na Figura 21 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é evitada, subtensão, subcorrente e frequência adequada.

Chama-se oscilação evitada quando há previsão de perturbação e antes dela acontecer, a equipe de engenharia decide energizar a indústria através de geradores a diesel. Dessa forma, os sistemas operacionais não são afetados pela subtensão.

Esse evento é importante ser mapeado, pois quando decide-se operar com os geradores, o custo de energia é maior, porém comprova-se a não interrupção da indústria, fazendo com que a produção não seja afetada.

**Figura 22 - Resposta teste 04 programa 01**

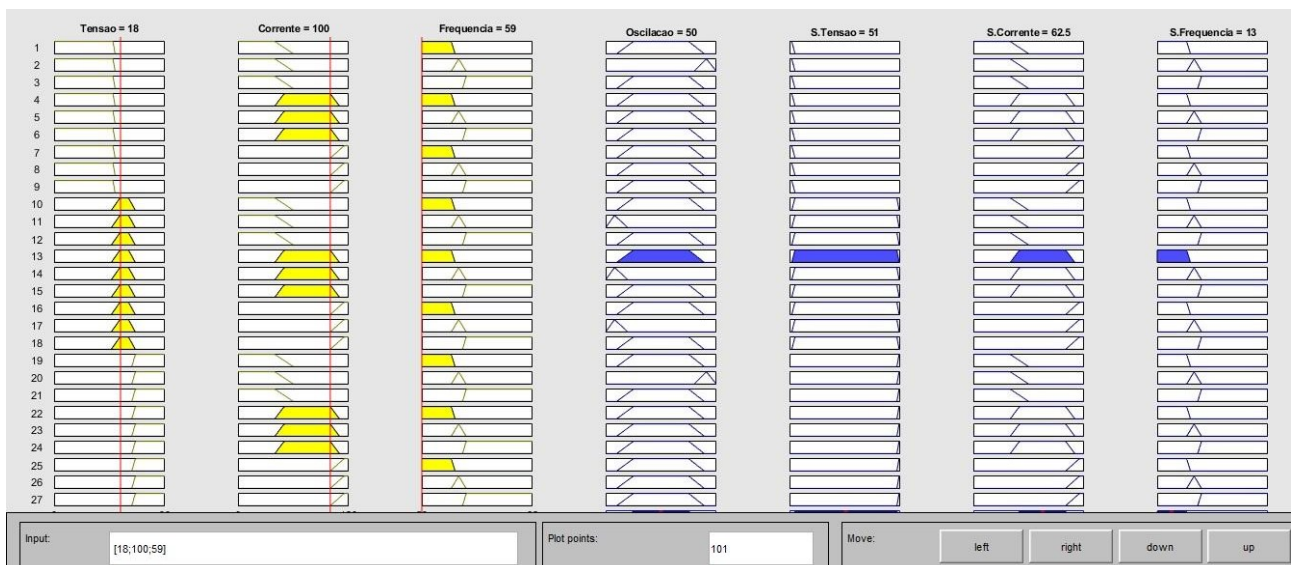


**Fonte: Autoria própria (2021).**

Para o teste 04, observa-se na Figura 22 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é verdadeira, tensão adequada, corrente adequada e sobrefrequência.

Apesar da frequência ter oscilado pouco, em proporção, ela é muito prejudicial ao sistema, pois o relé a detecta e entra em falha, desligando todo o sistema elétrico da indústria e reestabelecendo após o reconhecimento do erro.

**Figura 23 - Resposta teste 05 programa 01**

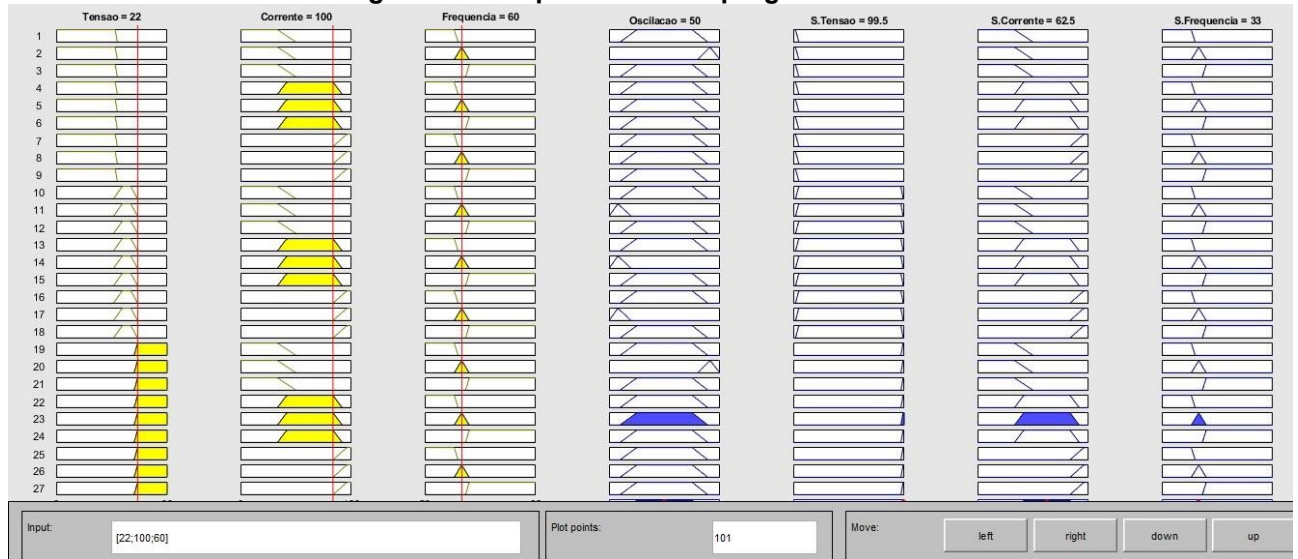


**Fonte: Autoria própria (2021).**

Para o teste 05, observa-se na Figura 23 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é verdadeira, tensão adequada, corrente adequada e subfrequência.

Da mesma forma que a sobrefrequência, os prejuízos à instalação são grandes.

**Figura 24 - Resposta teste 06 programa 01**

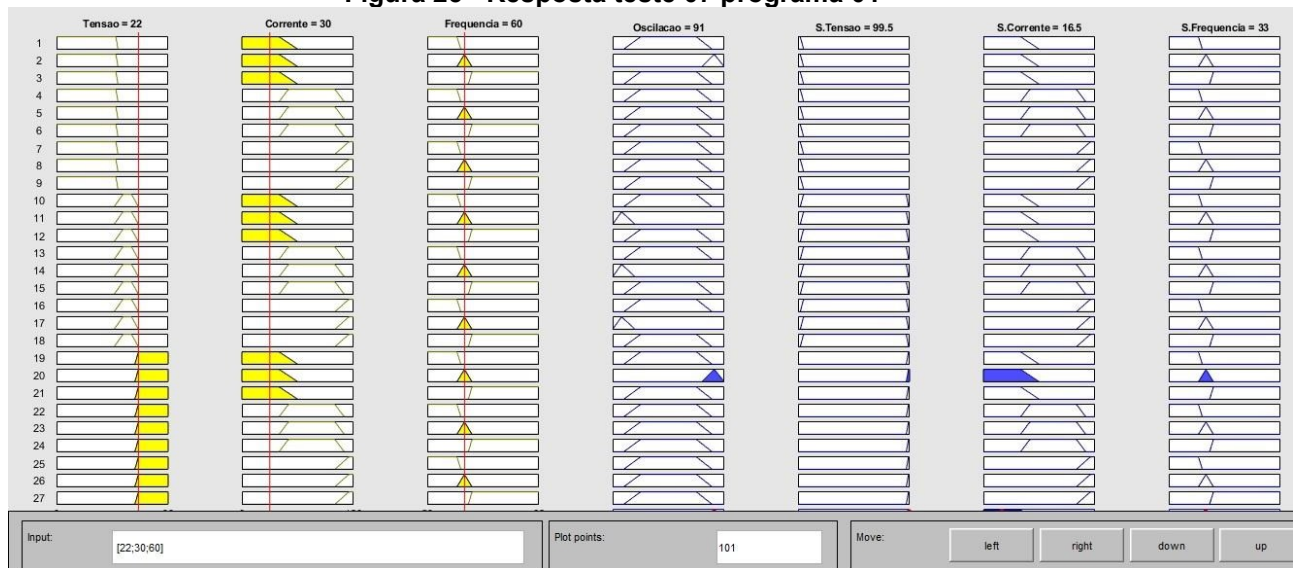


**Fonte: Autoria própria (2021).**

Para o teste 06, observa-se na Figura 24 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é verdadeira, sobrefrequência, corrente adequada e frequência adequada.

Sobretensão é preocupante para os sistemas elétricos, pois poderá ocorrer queima de equipamentos sensíveis, dessa forma a sua detecção é fundamental, visto que é vinda da concessionária, dessa forma pode-se cobrá-los para melhorar a qualidade de energia entregue.

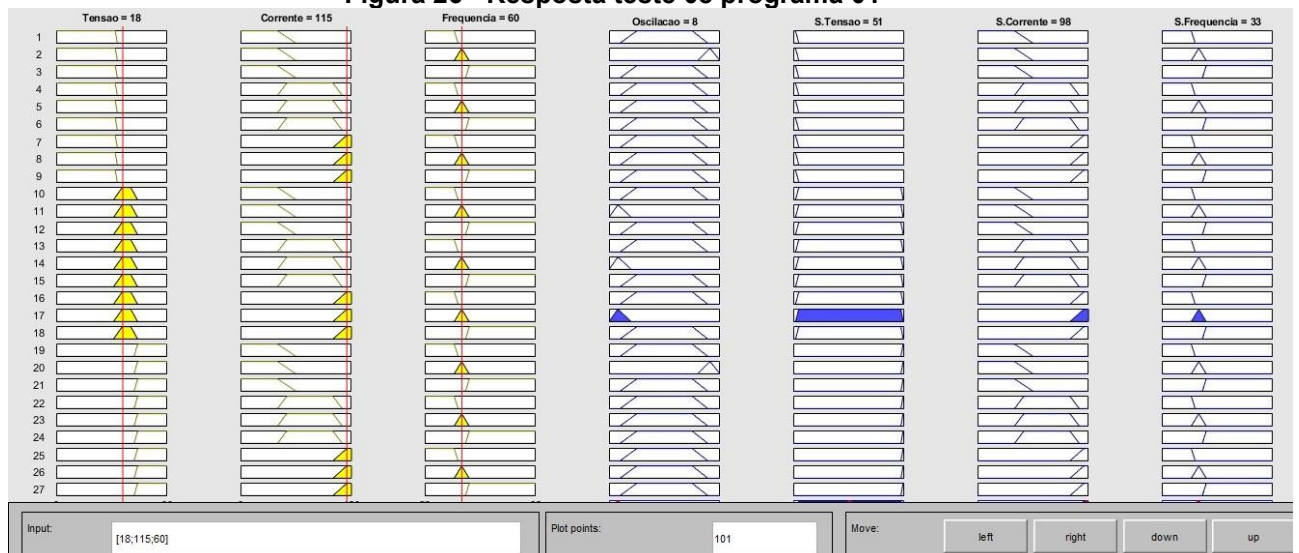
**Figura 25 - Resposta teste 07 programa 01**



Fonte: Autoria própria (2021).

Para o teste 07, observa-se na Figura 25 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é evitada, sobretensão, subcorrente e frequência adequada.

**Figura 26 - Resposta teste 08 programa 01**



Fonte: Autoria própria (2021).

Por fim, para o teste 08, observa-se na Figura 26 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é falsa, tensão adequada, sobrecorrente e frequência adequada.

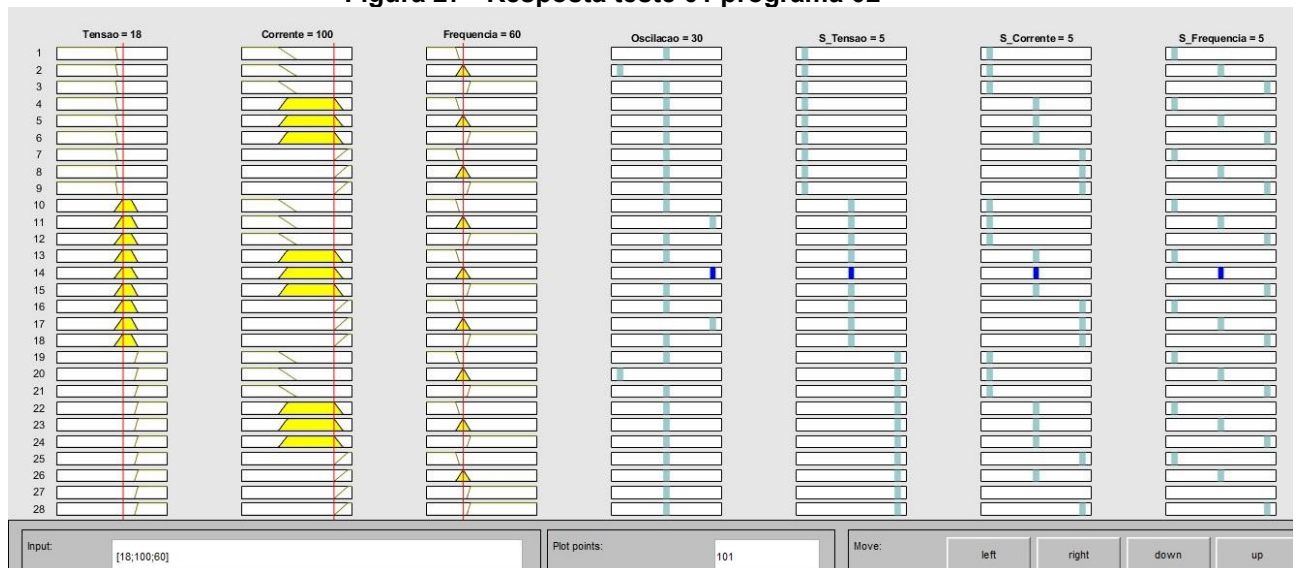
Nesses casos, não ocorre oscilação, pois houve somente sobrecorrente, em que será necessário análises de cargas, a fim de verificar se a corrente lida está de acordo com a instalação e propor reforço de cabos, se necessário, e nova parametrização do relé.

Conforme apresentado, o primeiro programa atendeu à expectativa, sendo ótimo para a análise do problema mostrado.

## 5.2 Programa 02

Sendo assim, as Figuras 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 e 34 são apresentadas a seguir e representaram as respostas.

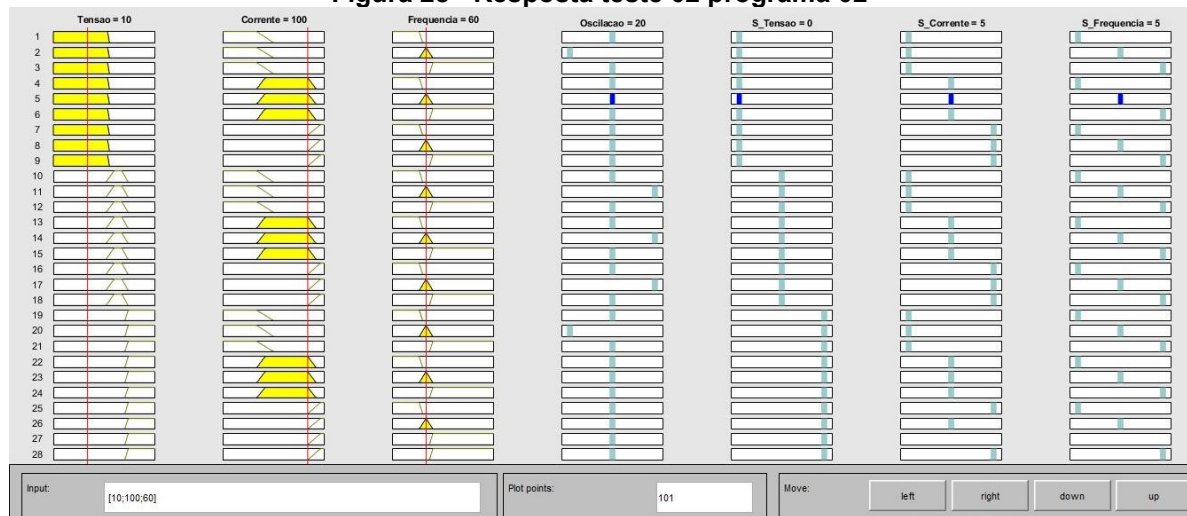
**Figura 27 - Resposta teste 01 programa 02**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Para o teste 01, observa-se na Figura 27 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é falsa, pois o oscilógrafo registrou uma oscilação, em que a tensão está adequada, corrente adequada e frequência adequada, ou seja, não houve perturbação no sistema. Esse registro consome memória do registrador, porém é desnecessária. Por isso, chama-se oscilação falsa.

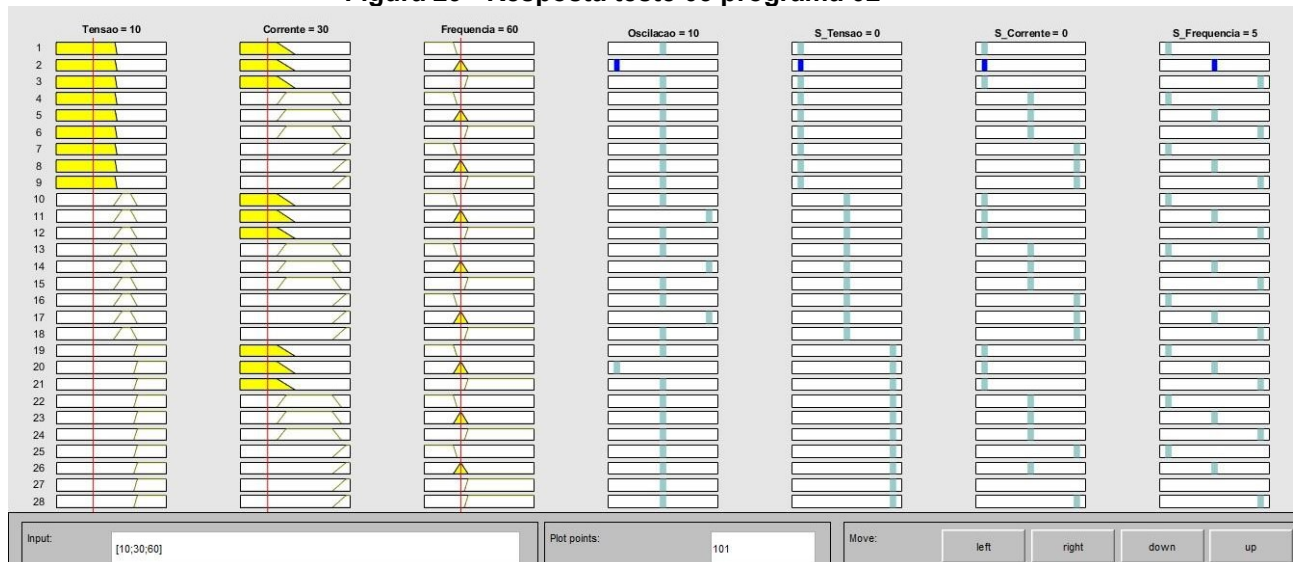
**Figura 28 - Resposta teste 02 programa 02**



Fonte: Autoria própria (2021).

Para o teste 02, observa-se na Figura 28 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é verdadeira, subtensão, corrente adequada e frequência adequada.

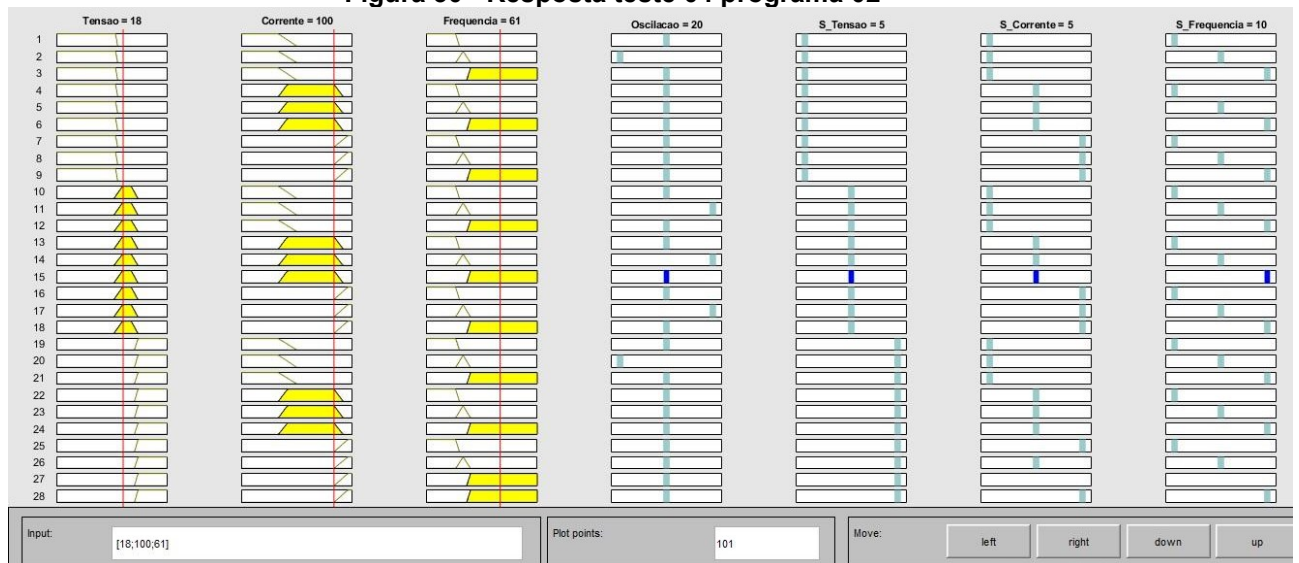
**Figura 29 - Resposta teste 03 programa 02**



Fonte: Autoria própria (2021).

Para o teste 03, observa-se na Figura 29 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é evitada, subtensão, subcorrente e frequência adequada.

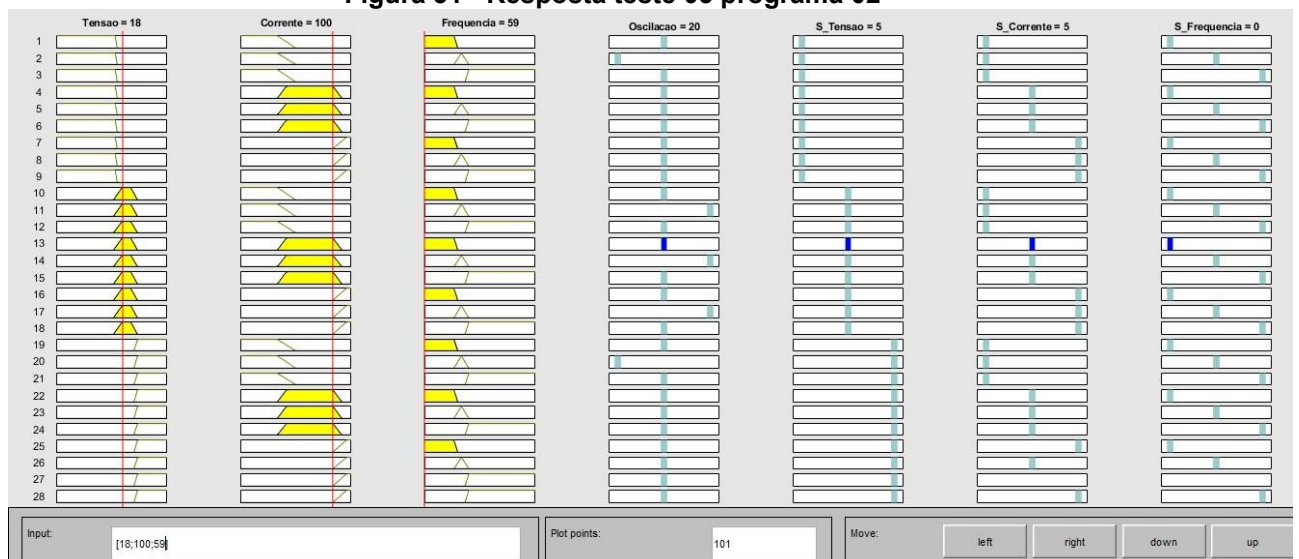
**Figura 30 - Resposta teste 04 programa 02**



Fonte: Autoria própria (2021).

Para o teste 04, observa-se na Figura 30 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é verdadeira, tensão adequada, corrente adequada e sobrefrequência.

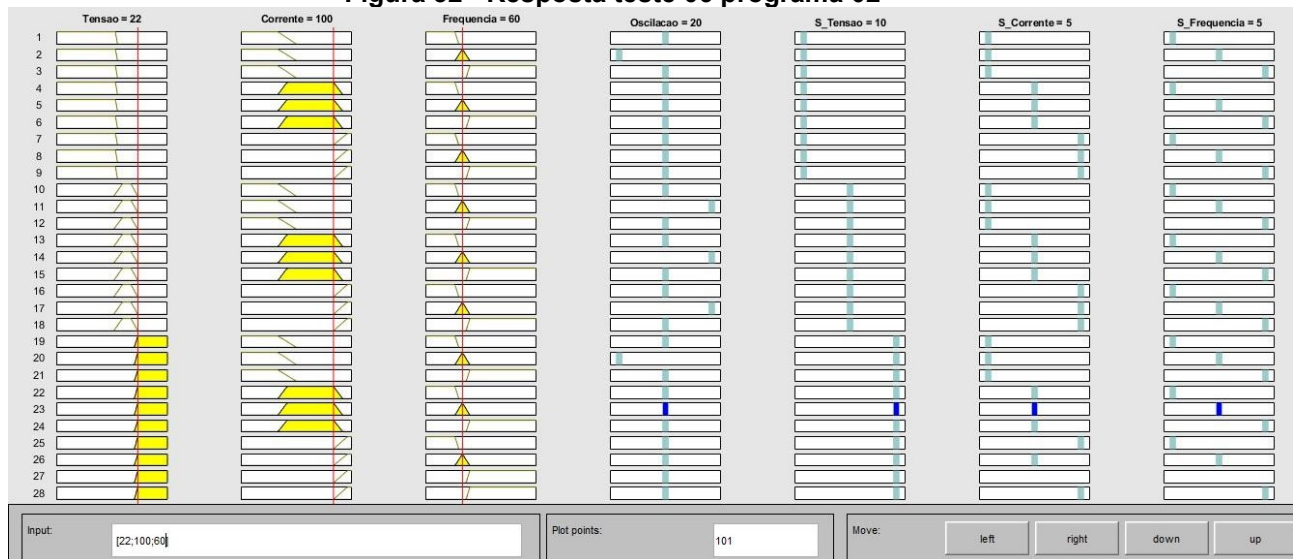
**Figura 31 - Resposta teste 05 programa 02**



Fonte: Autoria própria (2021).

Para o teste 05, observa-se na Figura 31 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é verdadeira, tensão adequada, corrente adequada e subfrequência.

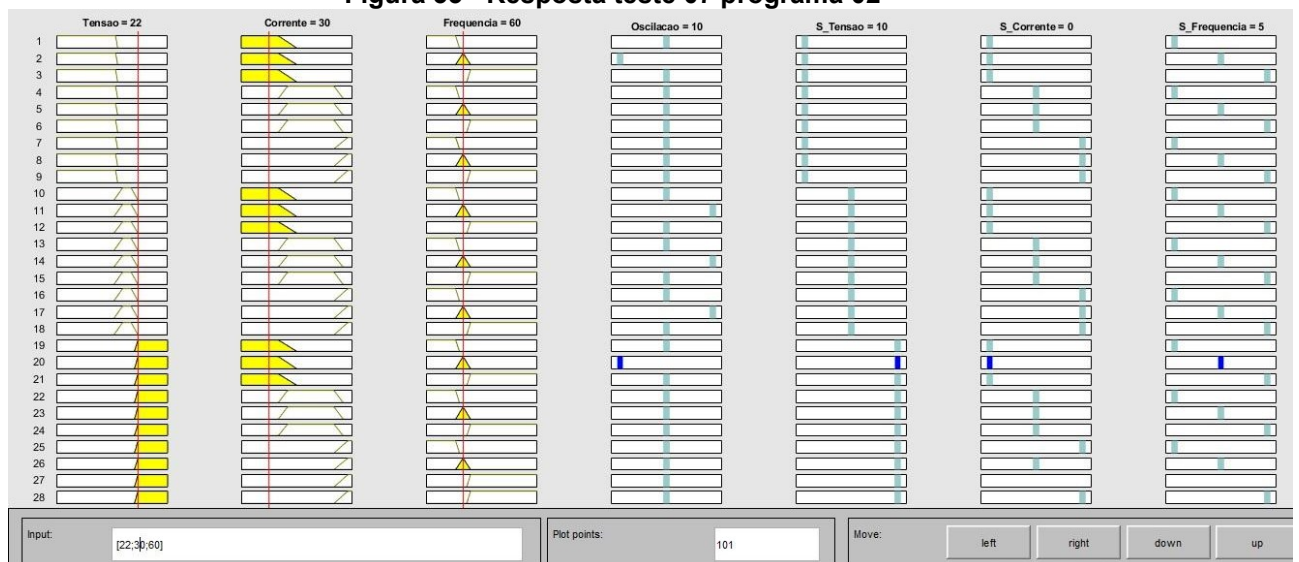
**Figura 32 - Resposta teste 06 programa 02**



Fonte: Autoria própria (2021).

Para o teste 06, observa-se na Figura 32 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é verdadeira, sobretensão, corrente adequada e frequência adequada.

**Figura 33 - Resposta teste 07 programa 02**

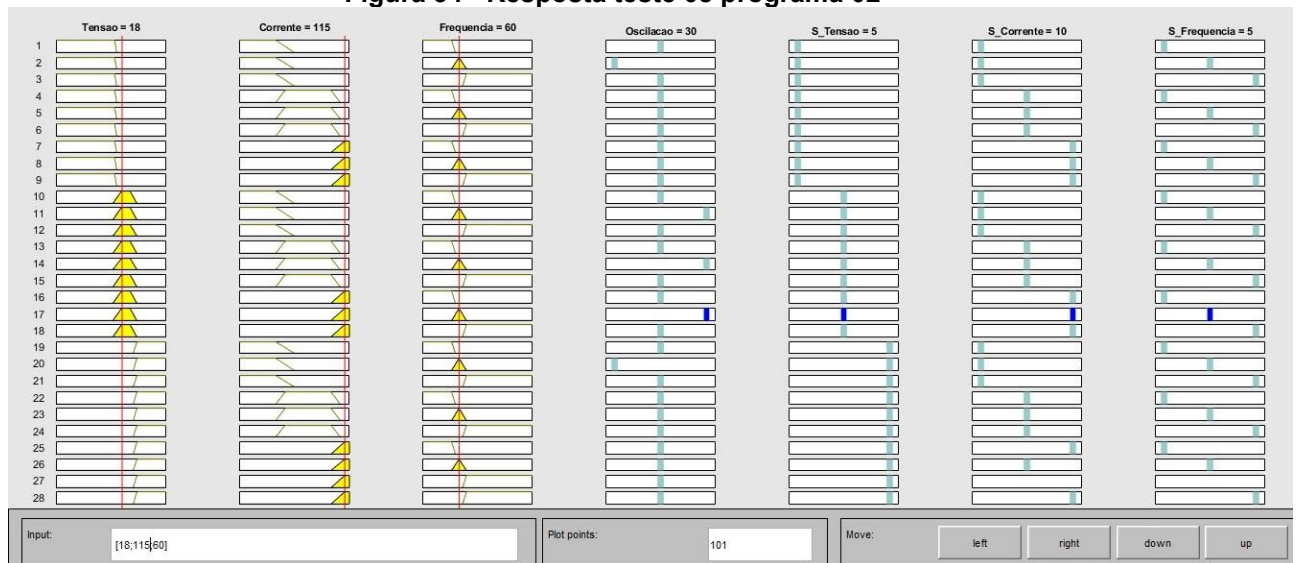


Fonte: Autoria própria (2021).

Para o teste 07, observa-se na Figura 33 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é evitada, sobretensão, subcorrente e frequência adequada.



**Figura 34 - Resposta teste 08 programa 02**



Fonte: Autoria própria (2021).

Para o teste 08, observa-se na Figura 34 que a resposta está de acordo com o esperado, onde a oscilação é falsa, tensão adequada, sobrecorrente e frequência adequada.

### 5.3 Discussão

Com base no que foi apresentado, observa-se que a lógica fuzzy se mostra como uma opção eficaz para caracterização de oscilações de energia, capaz de tomar decisões de acordo com padrões pré-estabelecidos.

As duas opções de programação foram satisfatórias, visto que as respostas convergiram ao esperado, porém ao analisar os resultados, verifica-se que o método de inferência Sugeno possui respostas mais objetivas, pois são constantes, dessa forma para a utilização com outras interfaces, por exemplo supervisorio, a implementação será mais fácil.

Considerando o histórico de oscilações mostrado na Tabela 3, a grande maioria dos problemas são provenientes de afundamentos de tensão, dessa forma para minimizar as perdas de produção, a sugestão de melhoria foi a mudança do alimentador geral da indústria, proveniente da subestação da concessionária, onde sugeriu-se a interligação em uma linha com menor interrupções. Como os afundamentos são bruscos, superiores a 10% da tensão nominal e muito recorrentes, somente o ajuste em equipamentos não resolveria o problema. Essa

conclusão só foi possível após a análise de todas as oscilações no período estudado.

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Com base no que foi apresentado, observa-se que a lógica fuzzy se apresenta como uma opção eficaz para essa aplicação, pois se assemelha ao raciocínio humano para tomar decisões de acordo com padrões pré-estabelecidos. Outros fatores importantes é o baixo custo dos processadores utilizados, onde dispensa o emprego de analisadores de energia de alto valor e a assertividade na tomada de decisão, quando comparados a sistemas que não utilizam inteligência artificial.

Os programas desenvolvidos apresentaram respostas satisfatórias na classificação das oscilações, quanto a observação se a mesma ocorreu e classificando que tipo de distúrbio foi identificado.

A pesquisa iniciou a resolução de um importante tema relacionado a melhoria de produção, onde foi possível caracterizar tais perturbações e o projeto está sendo continuado através da equipe de engenharia interna da indústria, por meio da elaboração da interface entre o relé e o programa proposto, a fim de monitorar de forma on-line todas as perturbações, registrá-las com um grau de confiabilidade alto e dar suporte à propostas de melhorias à concessionária

Estima-se que a indústria em questão deixou de faturar cerca de R\$ 3.000.000,00 nos anos considerados na pesquisa, pois a cada oscilação deixa-se de produzir uma hora, onde cada hora parada gira em torno de R\$ 5.200,00 de custos fixos.

A continuidade da pesquisa é de grande valor comercial, visto que com as análises corretas dos distúrbios presentes e aplicando os ajustes nos equipamentos, a produção será mais contínua e haverá melhora dos seus índices.

## REFERÊNCIAS

- ABDULWAHID, A. H.; WANG, S. A novel method of protection to prevent reverse power flow based on neuro-fuzzy networks for smart grid. **Sustainability**, v.10, 2018.
- ALVES, M. F.; COSTA, J. G.; FONSECA, V. R. C. Impacto econômico do afundamento de tensão na indústria: uma metodologia aplicada a grandes redes elétricas. **V SBQEE Seminário brasileiro sobre qualidade da energia elétrica**, 2003.
- Andrade, M., & Prudêncio Jaques, M. A. (2008). **Estudo comparativo de controladores de Mamdani e Sugeno para controle de tráfego em interseções isoladas**. TRANSPORTES, v. 16, n. 2. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v16i2.24>. Acesso em: 10 jul. 2019.
- ARNAUD, A.; CUNHA, R.; VASCONCELOS, G.; ADEONATO, P.; GENU, J.; REGUEIRA, B. **Abordagem Inteligente para Tratamento de Alarmes e Diagnóstico de Falhas em Sistemas Elétricos**, M.FAP. 2008. Disponível em: <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081113164828-31.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2018.
- BALDUCCI, P. J.; ROOP, J. M.; SCHIENBEIN, I. A.; DESTREESE, J. G.; WEIMAR, M. R. Electrical Power Interruption Cost Estimates for Individual Industries, Sectors, and U.S. Economy. **Pacific Northwest National Laboratory Richland**, 2002.
- BARBOSA, D. **Estimação da frequência em sistemas elétricos de potência através de filtragem adaptativa**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, São Paulo, 2007.
- BITTENCOURT, C. G. **Aplicação da lógica fuzzy em um sistema de pré-análise de oscilografias em unidades de geração**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco. Disponível em: [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4074/1/PB\\_COELT\\_2011\\_2\\_01.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4074/1/PB_COELT_2011_2_01.pdf). Acesso em: 20 fev. 2019.
- CARMONA, J. D.; GÓMEZ, J. C. Evaluation of Power Interruption Costs for Industrial and Commercial Sectors in Argentina. **VII Simposio Internacional sobre Calidad de la Energia Eléctrica**. 2013.
- COX, Earl. **Fuzzy logic for business and industry**. Massachusetts: Charles River Media Inc, 1995.
- DAWSON, P.; KOORTS, R. Flotation Control Incorporating Fuzzy Logic and Image Analysis. **19th World Congress**, África do Sul, 2014.
- DUGAN, R. C.; et al. **Electrical Power Systems Quality**, 2 ed. McGraw-Hill Education. 2004.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

DEMO, P. **Introdução à metodologia da ciência**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1985.

FERREIRA FILHO, ANÉSIO DE LELES. **Análise de comportamento do fator de desequilíbrio frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão**. Distrito Federal 2008.

FLEURY, M. T. L.; WERLANG, S. **Pesquisa aplicada – reflexões sobre conceitos e abordagens metodológicas**. Fundação Getúlio Vargas, 2017.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GONÇALVES, André Paim. **Aplicação de Lógica Fuzzy em Guerra Eletrônica**. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2007

GUPTA, M. M.; JIN, L.; HOMMA, N. **Static and dynamic neural networks – From fundamentals to advanced theory**. 1. ed. Hoboken: New JerSei, 2003.

HAN, S.; XU, Z.; SUN, B.; HE, L. Dynamic characteristic analysis of power system interarea oscillations using HHT. **Electrical power and energy systems - Elsevier**. v. 32, p. 1085-1090, 2010.

JANÉ, D. A. Uma introdução ao estudo de lógica fuzzy. **Hórus – Revista de Humanidades e Ciências Sociais Aplicadas**. n.02, 2004.

KAMWA, I.; PRADHAN, A. K.; JOÓS, G. Robust Detection and Analysis of Power System Oscillations Using the Teager-KaiSer Energy Operator. **IEEE transactions on power systems**, v. 26, n. 1, p. 323-333, 2011.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MARTINS, J. S.; COUTO, C.; AFONSO, J. L. Qualidade de energia eléctrica. **3º Congresso Luso-Moçambicano de engenharia – CLME – Engenharia e Inovação para o Desenvolvimento**, 2003.

MEHL, E. L. **Qualidade da energia elétrica**. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MIRANDA, A. L. L. **Projetos de filtros digitais para análise de sinais do sistema elétrico**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2005.

MORETO, M. **Análise automática de registros digitais de perturbações em unidades geradoras**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2011.

NEGRI, J. A.; SALERNO, M.; CASTRO, A. B. **Inovações, padrões tecnológicos e desempenho das firmas industriais brasileiras**. Brasília: Ipea, 2005.

OCDE. **Manual de Oslo: diretrizes para a coleta e interpretação de dados sobre inovação tecnológica**. Publicado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), 3ª edição, 2006.

PHILIP, J.; JAIN, T. Analysis of low frequency oscillations in power system using EMO ESPRIT. **Electrical power and energy systems - Elsevier**. v.95, p. 499-506, 2018.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2.ed. Novo Hamburgo:Feevale, 2013.

ROSS, Timothy J. **Fuzzy logic with engineering applications**. New York: McGraw-Hill, 1995.

SIMOES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2007.

TCHEOU, M. P. **Análise e representação de sinais de oscilografia usando decomposições adaptativas redundantes**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www02.smt.ufrj.br/~eduardo/teses/michel-tcheou.pdf>. Acesso em: 20 de set. 2020.

TEODORO, R. G. **Metodologia para compensação de desequilíbrio em redes elétricas**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Ilha Solteira, 2005.

XIA, Y.; JOHNSON, B. K.; JIANG, Y.; FISCHER, N.; XIA, H. A new method based on artificial neural network, Wavelet Transform and Short Time Fourier Transform for Subsynchronous Resonance detection. **Electrical power and energy systems - Elsevier**. v.103, p. 377-383, 2018.