



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



# **Automação da Detecção de Fraudes em Sistemas de Medição de Energia Elétrica utilizando Lógica *Fuzzy* em ambiente SCADA**

**Leonardo Telino de Meneses**

Orientador: Prof. Dr. André Laurindo Maitelli

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN (área de concentração: Controle e Automação) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Número de ordem PPgEE: M305  
Natal, RN, abril de 2011

Seção de Informação e Referência  
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Meneses, Leonardo Telino de.

Automação da detecção de fraudes em sistemas de medição de energia elétrica utilizando lógica *Fuzzy* em ambiente SCADA. – Natal, RN, 2011.

72 p. ; II.

Orientador: André Laurindo Maitelli.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

1. Automação – Dissertação. 2. Fraude – Dissertação. 3. Energia – Dissertação. 4. Lógica *fuzzy* – Dissertação. 5. SCADA - Dissertação. I. Maitelli, André Laurindo. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

# **Automação da Detecção de Fraudes em Sistemas de Medição de Energia Elétrica utilizando Lógica *Fuzzy* em ambiente SCADA**

**Leonardo Telino de Meneses**

Dissertação de Mestrado aprovada em 04 de abril de 2011 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

---

Professor Dr. André Laurindo Maitelli (orientador) .....DCA/UFRN

---

Professor Dr. Fábio Meneghetti Ugolino de Araújo .....DCA/UFRN

---

Professor Dr. José Bezerra de Menezes Filho .....COELT/IFPB

*À Vera Macau, pois sem  
ela nesta vida eu nada seria!*

---

# Agradecimentos

---

Ao professor Dr. André Laurindo Maitelli pelo considerável tempo investido em leitura de minutas, glosas às margens das minutas, redirecionamento, idéias, enfim pela orientação de alta qualidade.

Ao professor Dr. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo, pelos ensinamentos de lógica *fuzzy* quando do ministério da disciplina Controle Inteligente, pois foram destas aulas que me surgiu a idéia da aplicação à área em que trabalho como também pelas idéias apresentadas quando examinador na banca de qualificação.

Ao professor Dr. José Bezerra de Menezes Filho, pelas suas observações e idéias de modificação quando examinador na banca de qualificação, pois destas considerações surgiram importantes alterações no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas, também alunos do MINTER, Marcos Cavalcante Meira e Marcílio de Paiva Onofre Filho, pela luta incansável para que este MINTER convênio UFRN e IFPB acontecesse.

Aos professores Dr. Benedito Antônio Luciano e Dr. Benemar Alencar de Souza, da UFCG, pela confiança depositada em seu antigo aluno (27 anos depois!), e recomendação para nosso ingresso no programa de mestrado da UFRN.

Ao concluinte de engenharia de computação da UFRN, Danilo Oliveira de Carvalho pela contribuição desenvolvendo o algoritmo em C++.

---

# Resumo

---

Este trabalho apresenta uma proposta para automação da detecção de fraudes em sistemas de medição de energia elétrica utilizando lógica *fuzzy* em ambiente SCADA. A solução consiste na coleta de variáveis em pontos de medição de energia elétrica, tais como tensão, corrente, demanda, condições angulares de diagramas fasoriais de tensões e correntes, quedas de consumo e de demanda entre períodos de faturamento e a tratativa destes parâmetros via lógica *fuzzy* fazendo uso do conhecimento de especialistas na área. Os valores coletados via supervisório são tratados de forma *fuzzy*, em algoritmo de engenharia, e a saída do sistema informa ao usuário quais as possibilidades de fraude no sistema de medição da unidade consumidora cuja memória de massa das variáveis coletadas tenha sido pesquisada pelo algoritmo e assim estabelece graus de possibilidades para estas ocorrências. A importância da solução apresentada é função da necessidade de o setor elétrico reduzir o alto índice de perdas que já superou vinte por cento. Trata-se portanto de um sistema especialista para tomada de decisão buscando assertividade e disparo de ações de campo com direcionamento ao problema a ser encontrado, minimizando os impactos negativos de visitas improdutivas de inspeção em unidades consumidoras. O sistema foi testado –e validado– fazendo-se uso de banco de dados real de concessionária de distribuição de energia elétrica, cuja coleta foi realizada por sistema supervisório já existente e a tratativa dos dados foi implementada pela proposta *fuzzy* apresentada e pelo algoritmo neste trabalho desenvolvido.

**Palavras chave:** Automação. Fraude. Energia. Lógica *Fuzzy*. SCADA.

---

# Abstract

---

This work presents a proposal to make automatic the identification of energy thefts in the meter systems through Fuzzy Logic and supervisory like SCADA. The solution we find by to collect data from meters at customer units: voltage, current, power demand, angles conditions of phasors diagrams of voltages and currents, and taking these data by fuzzy logic with expert knowledge into a fuzzy system. The parameters collected are computed by fuzzy logic, in engineering algorithm, and the output shows to user if the customer researched may be consuming electrical energy without to pay for it, and these feedbacks have its own membership grades.

The value of this solution is a need for reduce the losses that already sets more than twenty per cent. In such a way that it is an expert system that looks for decision make with assertivity, and it looks forward to find which problems there are on site and then it wont happen problems of relationship among the utility and the customer unit. The database of an electrical company was utilized and the data from it were worked by the fuzzy proposal and algorithm developed and the result was confirmed.

**Key words:** Automatization. Theft. Energy. *Fuzzy* Logic. SCADA.

---

# Sumário

---

<b>Sumário</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Símbolos e Abreviaturas</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Sistemas de Medição monitorados por SCADA e Lógica <i>Fuzzy</i></b>	<b>9</b>
2.1 Alarmes .....	10
2.2 Diagramas fasoriais de tensões e correntes .....	11
2.2.1 Gráfico fasorial para medição a 3 elementos .....	12
2.2.2 Gráfico fasorial para medição a 2 elementos .....	13
2.3 Perfil de curvas de tensões e correntes .....	15
2.4 Perfil de curvas de carga .....	15
2.5 Lógica <i>fuzzy</i> .....	15
2.5.1 Funções de pertinência .....	16
2.5.2 O sistema de inferência .....	19
2.5.3 Método de inferência Mandani .....	23
2.5.4 Defuzzificação .....	25
2.6 Tomada de decisão por lógica <i>fuzzy</i> .....	28
<b>3 Identificação de Fraudes com Lógica <i>Fuzzy</i></b>	<b>31</b>
3.1 Variáveis de entrada e de saída .....	32
3.2 Regras estabelecidas .....	39
3.3 Validação das regras propostas usando MATLAB .....	41
3.4 Implementação do sistema de detecção de fraudes .....	41
3.4.1 Fundamentos do método .....	42
3.4.2 Estruturação do algoritmo .....	43
<b>4 Resultados</b>	<b>45</b>
4.1 Sinopse do programa em C++ .....	45
4.2 Resultados para casos específicos .....	46
4.2.1 Caso 1 – Fábrica de cimento .....	47

4.2.2	Caso 2 – Hotel .....	52
4.2.3	Caso 3 – Supermercado .....	54
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>57</b>
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>59</b>
<b>A</b>	<b>Exemplos com simulações em MATLAB</b>	<b>63</b>

---

# Lista de figuras

---

2.1	Gráfico fasorial de medição a 3 elementos .....	12
2.2	Gráfico fasorial de medição a 2 elementos .....	14
2.3	Variável <i>fuzzy estatura</i> e suas funções de pertinência.....	17
2.4	Função de pertinência trapezoidal .....	18
2.5	Sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	19
2.6	Fuzzificação do número discreto +20 .....	21
2.7	Sistema de inferência Mandani .....	24
3.1	<i>Módulo de <math>V_A</math></i> : baixa; aceitável .....	33
3.2	<i>Módulo de <math>V_B</math></i> : baixa; aceitável .....	33
3.3	<i>Módulo de <math>V_C</math></i> : baixa; aceitável .....	34
3.4	<i>Módulo de <math>I_A</math></i> : muito pequena; aceitável .....	34
3.5	<i>Módulo de <math>I_B</math></i> : muito pequena; aceitável .....	35
3.6	<i>Módulo de <math>I_C</math></i> : muito pequena; aceitável .....	35
3.7	<i>Ângulo de <math>I_A</math></i> : esperado capacitivo; indesejável; esperado indutivo .....	36
3.8	<i>Ângulo de <math>I_B</math></i> : indesejável_1; esperado indutivo; esperado capacitivo; indesejável_2 .....	36
3.9	<i>Ângulo de <math>I_C</math></i> : indesejável_1; esperado indutivo; esperado capacitivo; indesejável_2 .....	37
3.10	<i>Queda de kWh</i> : aceitável; inaceitável .....	37
3.11	<i>Queda de kW</i> : aceitável; inaceitável .....	38
3.12	<i>Diagnóstico</i> : NTF- não tem fraude; PPF- percentual de possibilidade de fraude; TF- tem fraude .....	38
3.13	Diagrama de blocos do processo de detecção de fraudes .....	44
4.1	Tela de entrada do aplicativo .....	46
4.2	Memória de massa da unidade consumidora Cimento .....	47

4.3	Ícone de seleção da unidade consumidora .....	48
4.4	Selecionando a unidade consumidora Cimento .....	48
4.5	Clicando no ícone “abrir” .....	49
4.6	Selecionando o mês de novembro .....	49
4.7	Selecionando a corrente em 5 ampéres .....	49
4.8	Clicando em “start” .....	50
4.9	Resultado 1 apresentado pelo software para o caso Cimento .....	50
4.10	Resultado 2 apresentado pelo software para o caso Cimento .....	51
4.11	Memória de massa da unidade consumidora Hotel .....	52
4.12	Resultado apresentado pelo software para o caso Hotel .....	53
4.13	Memória de massa da unidade consumidora Supermercado .....	54
4.14	Resultado apresentado pelo software para o caso Supermercado .....	55

---

# Lista de Tabelas

---

2.1	Pertinência de <i>altura</i> para quatro indivíduos .....	17
3.1	Variáveis, funções e suas pertinências .....	32
3.2	Regras estabelecidas para validação do método .....	40

---

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

---

COELT:	Coordenação de Eletrotécnica.
DCA:	Departamento de Computação e Automação.
EPB:	Energisa Paraíba Distribuidora de Energia Elétrica.
IFPB:	Instituto Federal de Educação Tecnológica da Paraíba.
MATLAB:	<i>Matrix Laboratory.</i>
MINTER:	Mestrado Interinstitucional.
P & D:	Pesquisa e Desenvolvimento.
SCADA:	Supervisory Control and Data Acquisition.
UFRN:	Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
UFCG:	Universidade Federal de Campina Grande.
PPgEE:	Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica.

---

# Capítulo 1

## Introdução

---

Controle e Automação são ações determinantes para o monitoramento e otimização de processos. As vantagens da automação são o aumento da eficiência dos processos, maior controle e segurança da operação e a redução dos custos na cadeia produtiva.

Sistemas de leitura e controle remoto de medição em consumidores, associados com adequadas análises do comportamento dos dados de medição supervisionados são a moderna solução encontrada por empresas distribuidoras de energia para uma garantia de que o produto entregue está sendo corretamente medido e que assim não esteja ocorrendo diferença entre a energia requerida e a energia faturada, que possa causar prejuízos à empresa distribuidora, com a ocorrência de perdas.

Os benefícios gerados pela implementação da automação de sistemas de medição de energia elétrica, são diversos, dentre eles:

1. Reduz os custos com homem hora (leiturista) para a distribuidora de energia, aumentando a eficiência operacional, e proporcionando informações sobre curvas de consumo e de demanda, para uma análise da aderência dos perfis de carga dos consumidores aos equipamentos instalados em seus parques fabris, aí considerando-se os fatores de carga típicos e os seus históricos, e por meio destas informações, identificar quais os prováveis fraudadores e as características da intervenção.
2. Identifica em tempo real falhas e defeitos em sistemas de medição, minimizando o tempo para a execução de manutenção corretiva.
3. Proporciona à distribuidora de energia ligar e desligar as unidades consumidoras à distância, sem riscos e sem desgastes, e com custos mínimos.
4. Beneficia os consumidores na medida em que estes podem conhecer a evolução de seu próprio consumo (e neste caso a distribuidora de energia pode comercializar serviços)

via por exemplo, internet, e assim adotar ações preventivas de eficiência energética e redução de custos com a fatura mensal.

5. Estabelece o marco inicial que proporcionará a implantação de um sistema de medição inteligente, que integrará uma rede inteligente, conhecida globalmente como *smart grid*.
6. Transforma a maneira como a energia é consumida, medida e faturada, agregando inteligência ao longo da rede.
7. Proporciona a implantação de uma infra estrutura de medição avançada, com gestão de demanda e otimização da rede.
8. Permite o controle de cargas em transformadores e a solução de balanço energético em tempo real, de forma que os esforços de recuperação de perdas sejam direcionados para áreas críticas.
9. Constitui eficiente ferramenta de combate às perdas técnicas e não técnicas.
10. Subsidiar os atos regulamentares, reduzir a assimetria de informações, melhorar os processos de fiscalização, e proporcionar aperfeiçoamento da estrutura tarifária.

Um dos maiores benefícios, contudo, é a redução das perdas de energia, que a nível da região Nordeste do Brasil, varia em uma faixa de 7% a 35%, valores do ano 2009.

Objetivando recuperar receita, coibir o furto de energia e mitigar anomalias nos sistemas de medição, algumas distribuidoras de energia elétrica no Brasil implantaram sistemas supervisórios SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*, que realizam a aquisição de parâmetros tais como diagramas fasoriais de tensões e correntes e seus respectivos módulos, queda de consumo e/ou de demanda de energia elétrica, perfis de curvas de carga de potências ativas e reativas, condição da porta da caixa de medidor de ter sido aberta ou permanecer fechada, inconsistência de data e hora do medidor, tensões precárias, troca não informada do medidor, alarme físico de sensor de presença, alarme físico de ausência de energia em qualquer fase, potências negativas, fatores de potência precários, inversão do circuito de corrente, inversão do circuito de tensão, desproporcionalidade entre correntes, dentre outros, cujas pertinências de valores podem indicar a ocorrência de manipulação nos sistemas de medição sob supervisão.

Estas distribuidoras utilizam os resultados obtidos por estes supervisórios para observação e estudo por seus engenheiros especialistas, e estes analisam as condições das

variáveis e interpretam os resultados conforme suas experiências e conhecimentos, concluindo pela existência ou não de anomalias nos sistemas observados. Tais profissionais disparam então ações de campo para que equipes de técnicos executem inspeções nos sistemas de medição supervisionados, serviços já direcionados para as possíveis ocorrências, sugerindo às equipes de campo qual o tipo de problema, se uma corrente invertida, se uma ou mais tensões suprimidas no medidor, se um desvio antes da medição, se uma ou mais correntes suprimidas no medidor, e outras sugestões. Estes procedimentos visam otimizar a assertividade em campo, evitando visitas de inspeção desnecessárias e equívocos de diagnóstico de campo, pois as equipes visitam a unidade consumidora conhecendo de antemão qual a anomalia que vão encontrar.

O problema central encontrado neste processo é a necessidade de profissionais da engenharia estarem em tempo integral sendo demandados a analisar grande volume de dados de milhares de unidades consumidoras, sendo impossível a análise do volume de informação de todos os sistemas de medição em tempo hábil – ciclo de faturamento mensal -, o que vem a causar prejuízo no processo de recuperação de receita uma vez que os resultados não são conseguidos em tempo hábil e até mesmo nem são conseguidos para uma grande parcela das unidades consumidoras. Torna-se imperativo automatizar esse processo, o que é a proposta desta pesquisa.

Sivanandam (2007) destaca que nossa percepção de mundo real é permeada por conceitos os quais não têm contornos nitidamente definidos- por exemplo, muito, alto, maior do que, jovem, etc. são verdades em determinados graus sendo falsos em outros determinados graus. Estes conceitos (fatos) podem ser chamados conceitos *fuzzy* ou nebulosos (vagos) – um cérebro humano trabalha com estes conceitos enquanto computadores não trabalham com estes conceitos e sim com valores predefinidos de 0 e 1. Linguagens naturais – que estão em um nível muito mais alto do que as linguagens de programação são *fuzzy*, enquanto linguagens de programação convencionais não são *fuzzy*.

A janela para o desenvolvimento de computadores *fuzzy* foi aberta em 1985 quando do projeto do primeiro chip lógico por Masaki Togai e Hiroyuki Watanabe nos Laboratórios Bell. “Nos próximos anos computadores *fuzzy* empregarão tanto hardware *fuzzy* como

software *fuzzy*, e serão estruturalmente mais próximos da concepção do cérebro humano do que os computadores atuais” (SIVANANDAM,2007,pág. 1).

A teoria dos conjuntos *fuzzy* tem sido utilizada com bons resultados para expressar conhecimento impreciso e solucionar problemas em áreas onde a modelagem tradicional é ineficiente, cara e de complexa aplicação. A possibilidade de descrição lingüística do modelo, em contrapartida à descrição por equações diferenciais, torna possível o aproveitamento do conhecimento dos especialistas ou operadores do processo, otimizando as soluções. A lógica *fuzzy* é uma técnica simples e de grande aplicação, particularmente a problemas de tomada de decisão e de controle de processos.

Decanini & Minussi (2008) apresentaram um procedimento para detecção e classificação de faltas de curto circuito em subestações de distribuição de energia elétrica em cujo desenvolvimento foram utilizados os conceitos de lógica *fuzzy*. Este sistema foi baseado nas informações de corrente elétrica de três fases, cujas entradas foram os dados de correntes elétricas trifásicas pré-processadas e a saída indicava o diagnóstico da falta, localização da falta e distorção da forma de onda, conseguindo, por meio do procedimento, extrair as características dos defeitos de curto circuito.

Bispo dos Santos (2007) propôs um Sistema de Apoio à Decisão composto por um módulo de Inteligência Computacional que utiliza regras *fuzzy* para efetuar o diagnóstico de transformadores de potência com dados de entrada via supervisor para acompanhamento da evolução da condição de gases dissolvidos, temperatura do óleo e do enrolamento, nível de óleo e sinais de relés de sobrecorrente e diferenciais, fornecendo ao usuário recomendações sobre ações de manutenção.

Samarashingue & Kulasiri (2007) desenvolveram uma técnica *fuzzy* para sistema de tomada de decisão dinâmica procedendo a uma aplicação prática ao problema de controle de tensão em cenários anormais em sistemas de potência, cujo sistema proposto incluiu três componentes: um monitor de tensão para monitorar perfis de tensões anormais baseado em um algoritmo de fluxo de potência, um avaliador, para avaliar a efetividade das ações de controle baseado em um algoritmo *fuzzy*, e um módulo de tomada de decisões para procurar o nível ótimo de tensão controlada baseado em um algoritmo de programação *fuzzy*.

Urzedo (2006) desenvolveu um controle *fuzzy* coletando dados de um sistema de automação predial através do monitoramento de variáveis temperatura em conjunto com estratégia de controle especialista objetivando uma economia considerável no consumo de energia elétrica em ambientes fechados com aparelhos de ar condicionado, sem prejuízo para o conforto térmico. O controle levou em consideração as diferenças de temperaturas externas dos aparelhos, inibindo o funcionamento se estes estivessem sob exposição direta do sol e priorizando aqueles com menor exposição solar.

Bolanos (2007) desenvolveu e simulou um controlador supervisor inteligente para sistemas de geração híbrida eólico-diesel-bateria de pequeno porte, utilizando técnicas de inteligência artificial, baseadas em redes neurais artificiais e lógica *neuro-fuzzy*, realizando previsões de velocidade do vento e demanda de curto prazo, permitindo a tomada de decisões otimizadas de despacho para o sistema híbrido de energia, proporcionando atendimento à carga, maximização na utilização da fonte renovável eólica e a redução da participação do gerador diesel e tomando procedimentos adequados para preservação da vida útil da bateria.

Lima & Amorim (2008) propuseram um modelo utilizando lógica *fuzzy* através da ferramenta FIS – *fuzzy inference system* do MATLAB, para auxiliar na tomada de decisão de autorização de decolagens de aeronaves de alguns modelos, em um cenário crítico onde existem aeronaves prestes a pousar na mesma pista, validando o modelo proposto através da implementação de um protótipo utilizando informações reais obtidas com pilotos e controladores de tráfego aéreo de Salvador.

Grant & Naesh (2005) apresentaram uma proposta para os procedimentos de anestesia serem controlados ou auxiliados por procedimentos de controle inteligente, proporcionando controle de pressão sanguínea, respiração, com conseqüentes ajustes automáticos em ventilação bronco pulmonar e administração de remédios, de forma que a taxa de droga administrada pode ser ajustada em termos de realimentação de um sensor que mede a relaxação muscular bem como algoritmos de computador sob lógica *fuzzy* imitarão o pensamento humano na tomada de decisão, e com maior velocidade.

Eksin et al (2006) desenvolveram um algoritmo em lógica *fuzzy* para tomada de decisão para modelar o comportamento humano quando lidando com o mercado de ações, usando os dados experimentais de um estudo de um modelo de administração de

ações e associando lógica *fuzzy* para emular o comportamento de três diferentes tipos de investidores no mercado de ações.

Bilobrovec (2006) apresentou um sistema especialista baseado em lógica *fuzzy* para controle automático, gerenciamento e manutenção da qualidade do processo de aeração de grãos em silos, fazendo uso de supervisório por sensores que coletam os níveis de umidade e temperatura em tempo real, os quais servem como variáveis de entrada do processo, cuja interação entre os valores capturados, operados pelas regras de inferência do sistema especialista, desencadeia as ações de controle e aeração.

Diante do cenário da necessidade de identificação de fraudes de energia elétrica de forma assertiva, fazendo uso de informações de qualidade que possam conduzir a conclusões sobre as condições operacionais dos sistemas de medição, vimos propor com este trabalho um modelo para a tomada de decisão quanto aos graus de possibilidades de que esteja ocorrendo fraude. Nesse sentido apresentaremos conceitos de sistemas de medição necessários para o entendimento das regras que serão utilizadas nas rotinas de programação, faremos uma abordagem da fundamentação teórica da técnica *fuzzy* e utilizaremos o aplicativo MATLAB com sua ferramenta *fuzzy toll box* como ambiente de simulação para diagnosticar problemas em sistemas de medição. Na sequência desenvolveremos uma ferramenta em C++, conectando a rotina *fuzzy* ao banco de dados estruturado a partir das variáveis coletadas pelo supervisório, validando o modelo pela implementação do sistema *fuzzy* em linguagem C++, utilizando dados reais de sistema de medição de companhia distribuidora de energia elétrica. Comprovaremos, portanto, a validade do método proposto.

Essa dissertação compreende quatro capítulos e uma conclusão. O capítulo 1 trata da apresentação introdutória do problema e da solução que se procura, apresentando uma revisão bibliográfica sobre tópicos correlatos. O capítulo 2 discorrerá sobre a importância de sistemas SCADA na automatização de sistemas de medição e dos diagramas fasoriais de tensões e correntes para análise das condições de normalidade das medições de energia elétrica e ainda abordará aspectos teóricos da lógica *fuzzy* e sua correlação com sistemas de tomada de decisão. O capítulo 3 apresentará o método para identificação de fraudes em sistemas de medição de energia elétrica, estabelecendo variáveis de entrada e

de saída, definindo a base de regras e apresentando a proposta do algoritmo a ser implementado para a solução do problema. O capítulo 4 apresentará os resultados obtidos com o algoritmo desenvolvido aplicado ao banco de dados de uma concessionária distribuidora de energia elétrica. Seguem-se a conclusão, a bibliografia e o apêndice, no qual encontram-se casos com simulação da solução em MATLAB.



---

## Capítulo 2

# Sistemas de Medição monitorados por SCADA e Lógica *Fuzzy*

---

Supervisórios SCADA estão sendo implementados na automação e controle de processos industriais, e a indústria da energia elétrica tem iniciado a aplicação destes supervisórios para, via supervisão e controle, otimizar receitas. A gestão dos sistemas de medição vem sendo modernizada com a implantação de sistemas supervisórios.

Algumas empresas distribuidoras de energia elétrica vêm implantando soluções de automatização de medição, com o objetivo de otimizar recursos e tempo por todo o processo de medição, análise, ação e faturamento. Em face de informações adequadas, atualizadas em tempo real, tais sistemas proporcionam condições para identificar e solucionar possíveis falhas e mesmo fraudes relativas à medição diretamente de seus escritórios sede, tomando as devidas ações de campo em tempo hábil. Trata-se de sistemas supervisórios SCADA, cujo acesso aos pontos de medição instalados nas unidades consumidoras em vasta área geográfica se dá via internet, proporcionando alta versatilidade de acesso, de qualquer lugar em que se esteja.

São coletados neste processo dados de consumo de energia ativa, consumo de energia reativa, demanda de potência ativa, demanda de potência reativa, fator de potência, qualidade de energia e diversos outros parâmetros através dos quais são gerados relatórios de memória de massa de consumo de energia, de demanda, de fator de potência, de falta de tensão no medidor, de tensões e de correntes, como também relatórios de diagramas fasoriais instante a instante de tensões e correntes, constando módulo e ângulo de cada destes fasores, o que proporciona condições de análise do sistema de medição quanto às ligações, se estão ou não corretas, se existe tensão invertida, se existe corrente invertida, se existem módulos de corrente em desequilíbrio acentuado.

Estes supervisórios SCADA utilizados permitem a automatização dos sistemas de medição e proporcionam a análise e identificação de problemas via telemetria consistindo na recepção e tratamento de informações nos seguintes níveis:

1. alarmes (tipo de alarme);
2. diagramas fasoriais de tensões e correntes;
3. perfil de curvas de tensões e correntes;
4. perfil de curvas de carga;

## 2.1. Alarmes

Alarmes são ferramentas importantes para a constatação inicial da possível existência de problemas em sistemas de medição de energia elétrica. Uma vez disparado um alarme, o mesmo é enviado para a central de processamento de inteligência da concessionária, para serem analisados pela equipe de engenharia de análise. Os seguintes alarmes são enviados pelo supervisório, inclusive por email, diretamente aos engenheiros analistas:

- Alarme físico de abertura de porta;
- Alarme físico de sensor de presença;
- Alarme físico de ausência de energia em qualquer fase;
- Indisponibilidade do medidor;
- Inconsistência de data / hora do medidor;
- Troca não informada de medidor;
- Inconsistência de registrador do medidor;
- Temperatura acima do limite;
- Tensões precárias, abaixo do limite;
- Ausência de corrente em quaisquer das fases do medidor;
- Desproporcionalidade entre as correntes;
- Anomalias em ângulos de correntes;

- Anomalias em ângulos de tensões;
- Demanda reativa superior a demanda ativa;
- Potências Negativas;
- Inversão do circuito de corrente;
- Inversão do circuito de tensão;
- Distorções harmônicas elevadas;
- Fatores de Potência precários;
- Tensões precárias entre fases;
- Quedas significativas de consumo;
- Inconsistências de medição principal x retaguarda x totalizadora.

Os engenheiros analisam as informações e identificam questões de campo geradoras de condições, dentre as quais manipulações, fraudes e /ou defeitos nos sistemas de medição.

## **2.2. Diagramas Fasoriais de Tensões e Correntes**

Medição de energia elétrica consiste na composição dos fasores tensões e correntes, seus módulos e seus posicionamentos uns em relação aos outros. Existe uma lógica de posicionamento angular, capaz de identificar se a medição em análise tem problema ou não. No caso genérico, medição a 3 elementos, as tensões devem estar defasadas entre si de 120 graus, e as correntes das respectivas fases devem estar ou em fase com as tensões, ou defasadas das tensões, sejam atrasadas, sejam adiantadas, mas sempre dentro de um intervalo razoável; considera-se razoável, atrasos ou adiantamentos de até 60 graus, o que denota um fator de potência de 0,5. Fatores de potência inferiores a este valor, o que significa ângulo de defasagem superior a 60 graus, reclamam uma análise mais criteriosa na condição do sistema de medição, não se afirmando contudo que esteja com problema, apesar de já ser um forte indicativo.

Dois tipos principais de sistemas de medição são utilizados. O tipo medição a 3 elementos, onde são medidas as três tensões e as três correntes, e o tipo a 2 elementos, em que são medidas apenas duas tensões e duas correntes, e por similitude ao conhecido método dos dois wattímetros é computado o real valor dos parâmetros de energia.

### 2.2.1. Gráfico Fasorial para Medição a 3 elementos, sequência de fases ABC

A figura 2.1 representa o diagrama fasorial esperado para uma medição de boa qualidade, quando o sistema de medição é do tipo a 3 elementos.

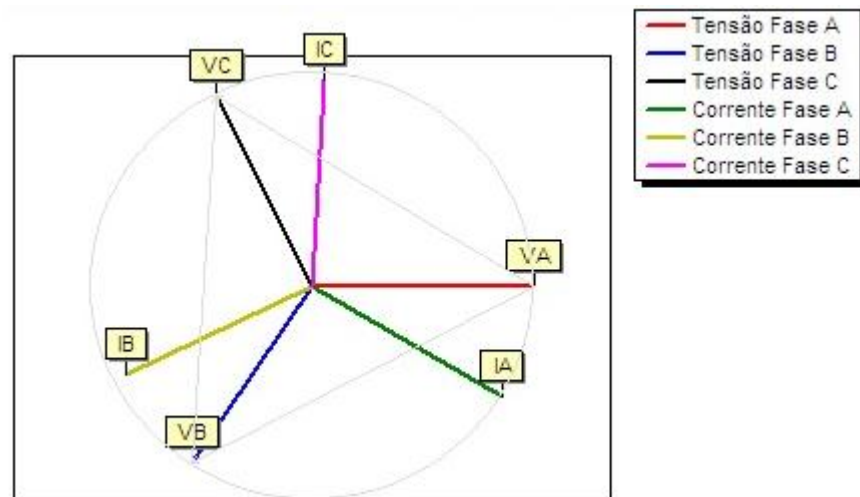


Figura 2.1: Gráfico fasorial de medição a 3 elementos

Neste caso, medição a 3 elementos, as correntes estão atrasadas de aproximadamente 30 graus de suas respectivas tensões de fase, o que denota uma carga indutiva (corrente atrasada da tensão). Na medida em que os fasores corrente tendem a alinhar-se com os fasores tensão, significa que a carga está-se tornando próxima de uma carga puramente resistiva. Na medida em que os fasores de corrente afastam-se dos de tensão, no sentido

horário, significa que a carga está-se tornando cada vez mais reativa indutiva. Caso após alinhar-se com os fasores tensão, as correntes venham a afastar-se de tais fasores tensão no sentido anti horário, então significa que a carga está-se tornando cada vez mais reativa capacitiva.

Existem limites aceitáveis para estes ângulos de defasagem que traduzem a qualidade do sistema de medição. Caso estas correntes venham a atrasar ou adiantar por mais do que 50 ou 60 graus, temos indicativo de que pode estar havendo problema. Como este limite de 50 ou 60 graus não é um limite fixo, ou seja, nesta faixa pode estar havendo problema, como também pode não estar havendo problema, temos um caso de possibilidades. Também a corrente não pode ter um defasamento de mais do que 90 graus da sua respectiva tensão, seja em atraso, seja em avanço, isto seria um imperativo de erro ou problema na medição.

### 2.2.2. Gráfico Fasorial para Medição a 2 elementos, sequência de fases ABC

A figura 2.2 representa o diagrama fasorial esperado para uma medição de boa qualidade, quando o sistema de medição é do tipo a 2 elementos. Este tipo de sistema de medição é utilizado quando o sistema é em delta, sem neutro, e a soma vetorial das correntes é igual a zero.

Neste caso, medição a dois elementos, as tensões que sensibilizam o medidor para compor a energia consumida são tensões de linha fase-fase, sendo uma das tensões entre as fases A e B,  $V_{AB}$  – na figura 2.2 denominada simplesmente de  $V_A$  – e a outra tensão entre as fases C e B,  $V_{CB}$  – na figura 2.2 denominada simplesmente de  $V_C$ . As tensões  $V_{AB}$  e  $V_{CB}$  aqui visualizadas podem ser facilmente comprovadas a partir do somatório na figura 2.1 de  $V_A + (-V_B)$  e do somatório de  $V_C + (-V_B)$  o que leva as duas tensões compostas a estarem 60 graus defasadas entre si. As correntes  $I_A$  e  $I_C$  continuam em suas localizações originais, atrasadas - se indutivas - de suas respectivas tensões fase neutro ou adiantadas - se capacitivas - de suas respectivas tensões fase neutro, e então

a composição fasorial das tensões situa-se no primeiro quadrante se a sequência de fases for ABC e situa-se no quarto quadrante se a sequência de fases for CBA.

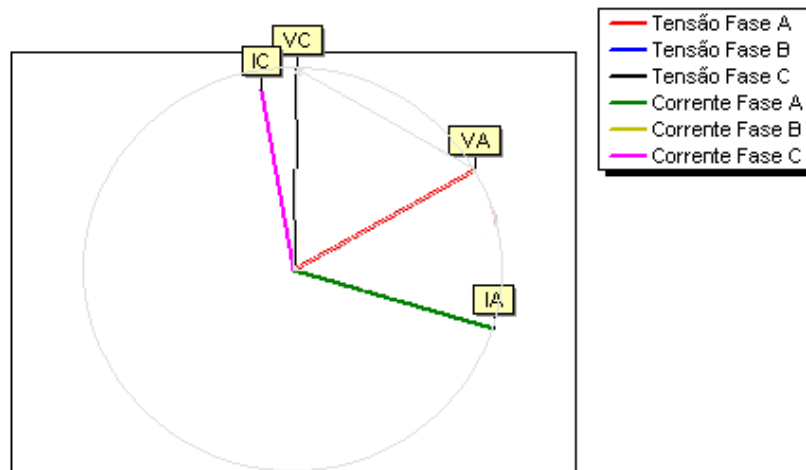


Figura 2.2: Gráfico fasorial de medição a 2 elementos

Sistemas de medição a dois elementos estão cada vez mais raros, pois as empresas de energia elétrica estão transformando gradativamente seus sistemas de medição em alta tensão, de dois para três elementos em função da vulnerabilidade deste tipo de sistema de medição à cargas monofásicas inseridas na fase central, e que desequilibram a composição vetorial das correntes.

Existem limites aceitáveis para estes ângulos de defasagem. Caso estas correntes venham a atrasar ou adiantar das suas respectivas tensões fase neutro por mais do que 50 ou 60 graus, temos indicativo de que pode estar havendo problema. Como este limite de 50 ou 60 graus não é um limite fixo, ou seja, nesta faixa pode estar havendo problema, como também pode não estar havendo problema, temos um caso de possibilidades. Também a corrente não pode ter um defasamento de mais do que 90 graus da sua respectiva tensão fase neutro, seja em atraso, seja em avanço, isto seria um imperativo de erro ou problema na medição. Para implementar esta análise é necessário traçarmos imaginariamente o lugar geométrico dos fasores de tensão fase neutro neste caso de medição a dois elementos.

### 2.3. Perfil de Curvas de Tensões e Correntes

Perfis de curvas de tensão e corrente - mostrando o comportamento e tendências das variáveis que compõem a energia consumida - também são fornecidos pelo supervisor para análise de tomada de decisão. Mudanças abruptas da curva de corrente são indicativo de que uma análise detalhada deve ser efetuada. Ausência de tensão ou de corrente em quaisquer das fases deve ser investigada.

### 2.4. Perfil de Curvas de Carga

A análise de curvas de demanda (kW) e ou energia (kWh) permite identificar via supervisor o início de problemas na medição, existência de problemas na medição ou mesmo a regularização de problemas na medição. Curvas de carga que modificam suas tendências históricas sem motivo explícito são indicativo de que deve-se aprofundar a investigação sobre as condições que podem ter provocado tal mudança, até mesmo o disparo de uma ação de inspeção em campo.

O sistema supervisor SCADA coleta e armazena os dados, porém a tratativa crítica dos mesmos deve ser implementada via construção de algoritmo e nossa proposta neste trabalho é a implantação de um software em linguagem C++, a partir de premissas estabelecidas no *fuzzy tool box* do MATLAB.

### 2.5. Lógica Fuzzy

A tratativa das variáveis de medição de energia elétrica coletadas dar-se-á através da lógica *fuzzy*. Esta lógica, em contraponto à lógica clássica na qual os elementos são classificados de forma bem definida, não estabelece correlações precisas entre as entradas

e as saídas das funções, e sim, pertinências que indicam as possibilidades dos dados de entrada pertencerem à uma ou outra função de determinada variável.

Conforme Shaw & Simões (1999) a lógica *fuzzy* contempla aspectos imprecisos do raciocínio utilizado pelos seres humanos, representando de uma forma inovadora o manuseio de informações imprecisas, de forma distinta da teoria das probabilidades, provendo um método de tradução de expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas— comuns na comunicação humana— em valores numéricos, possibilitando a inclusão da experiência de operadores humanos, os quais controlam processos e plantas industriais, em controladores computadorizados, bem como possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos.

Conjuntos *fuzzy* estabelecem o grau com que um elemento pertence a determinado conjunto, ainda que em diferentes graus de pertinência.

A lógica *fuzzy* possibilita transições graduais de valores de elementos que pertencem a conjuntos, através da associação dos graus de pertinência destes elementos com relação aos conjuntos analisados. A lógica *fuzzy* permite a dualidade, estabelecendo a possibilidade de que algo possa coexistir com o seu oposto. O senso de incerteza representado por essa lógica é resultante da imprecisão de significado de um conceito expresso em linguagem natural. Desta forma, nesse trabalho, conceitos de valores de módulos de tensão, de módulos de corrente, de ângulos entre fasores tensão e corrente, de queda de energia e queda de demanda serão expressos em funções de pertinência através de expressões linguísticas estabelecidas por especialistas no tema.

### 2.5.1. Funções de Pertinência

Em se tratando de conjuntos *fuzzy* temos:

$$\mu_A : X \quad [0,1] \quad \text{onde} \quad \mu_A(x) \text{ é a pertinência de } x \text{ em } A.$$

A figura 2.3 apresenta a variável *estatura*, a qual possui três funções de pertinência: “baixa”, “mediana” e “alta”. Um indivíduo é completamente baixo se a sua altura não ul-

trapassar 1,50m; entre 1,50m e 1,70m um indivíduo tem graus de “baixo” e graus de “mediano”.

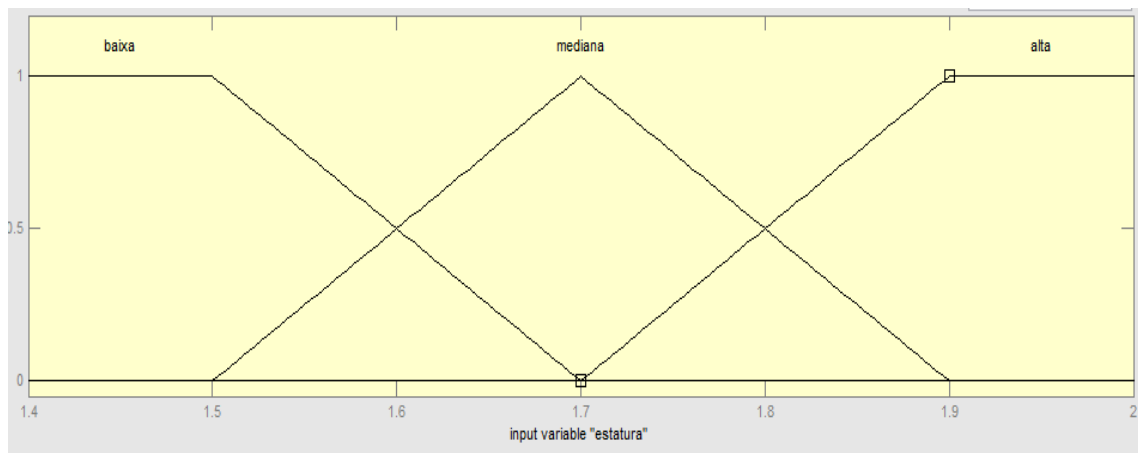


Figura 2.3: Variável *fuzzy estatura* e suas funções de pertinência.

A tabela 2.1 exemplifica, para quatro indivíduos com alturas de 1,45m, 1,60m, 1,70m e 1,95m quais os graus de pertinência de cada um deles como decorrência das funções de pertinência apresentadas na figura 2.3.

	Baixa	Mediana	Alta
1,45 metros	1	0	0
1,60 metros	0,5	0,5	0
1,70 metros	0	1	0
1,95 metros	0	0	1

Tabela 2.1 – Pertinência de altura para quatro indivíduos

O indivíduo de 1,45m é totalmente baixo. O indivíduo de 1,60m é baixo com uma pertinência de 0,5 e é mediano com uma pertinência de 0,5. O indivíduo de 1,70m é totalmente mediano. O indivíduo de 1,95m é totalmente alto.

Nesta pesquisa optamos pela representação trapezoidal para as funções de pertinência conforme a figura 2.4.

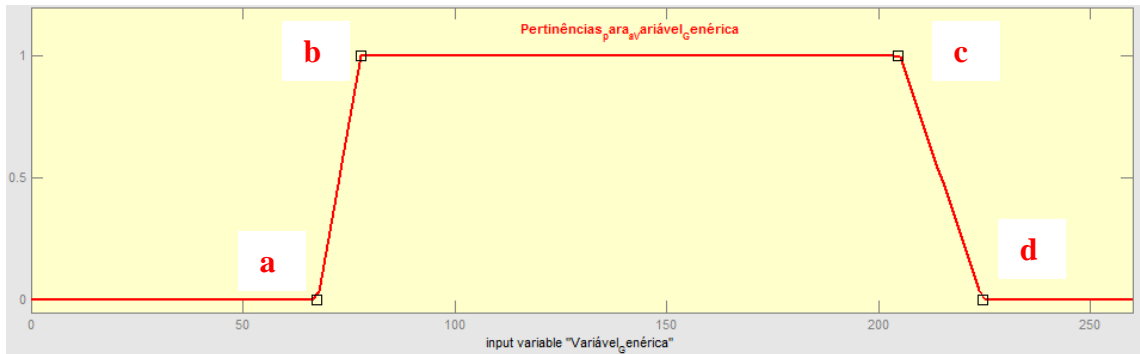


Figura 2.4: Função de Pertinência Trapezoidal.

As fórmulas para tradução da função de pertinência trapezoidal em linhas de algoritmo serão:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a) / (b - a) & a \leq x \leq b \\ 1 & b < x < c \\ (d - x) / (d - c) & c \leq x \leq d \end{cases} \quad (2.1)$$

As funções de pertinência representam o comportamento do elemento do conjunto em função da premissa de entrada no seu universo de discurso. Outras formas das funções de pertinência podem ser a triangular, a senoidal e ainda a gaussiana.

Funções de pertinência representam as variáveis de entrada ou de saída do sistema a ser tratado de forma *fuzzy*. Uma vez conhecidas as variáveis de entrada, são estabelecidas regras do tipo SE.....ENTÃO, e por meio de uma combinação de regras, conclusões são obtidas, e tais conclusões levam a tomada de decisões. Tais regras podem ser tratadas em ferramentas disponíveis no mercado para tratamento *fuzzy* e uma delas é o *fuzzy tool box* do MATLAB. Foi utilizada esta ferramenta como ambiente de simulação para a solução implementada nesta pesquisa, e na sequência foi desenvolvido um algoritmo em linguagem C++, utilizando-se um banco de dados real de uma distribuidora

de energia elétrica, com dados coletados de medidores de energia elétrica via SCADA. Nesta ferramenta, estabelecemos as funções de pertinência de entrada, as regras, e a ferramenta retorna a resposta em função dos valores de entrada aplicados. Trabalhamos então com possibilidades, buscando a maximização da assertividade na resposta ao problema que se é colocado.

A figura 2.5 apresenta um sistema de inferência *fuzzy*, com blocos de funcionalidade de Fuzzificação, de Regras/Inferência e de Defuzzificação.



Figura 2.5: Sistema de Inferência *Fuzzy*

### 2.5.2. O sistema de inferência

Compõe-se o sistema de inferência dos blocos “fuzzificador”, “regras”, “inferência” e “defuzzificador”. A fuzzificação consiste na consulta à função de pertinência para que

se possa identificar os graus de pertinência e assim quantidades *crisps* são convertidas em quantidades *fuzzy*.

Os dados de entrada medidos no processo, são associados às funções de pertinência relativas às suas respectivas variáveis. Conforme Shaw e Simões (1999) fuzzificação é um mapeamento do domínio de números reais (em geral discretos) para o domínio *fuzzy*. Significa então que há atribuição de valores lingüísticos, descrições vagas ou qualitativas, definindo as variáveis de entrada por funções de pertinência.

Se, por exemplo, tivermos um conjunto com sete funções de pertinência, em um universo de discurso de -100 a +100, com as funções NG(negativo grande), NM(negativo médio), NS(negativo pequeno), ZE(zero), PP(positivo pequeno), PM(positivo médio) e PG(positivo grande); Se tivermos uma entrada nesta variável lingüística de +20 e necessitarmos fuzzificar este valor +20, teremos o seguinte: a partir do valor de entrada na horizontal do plano cartesiano, traça-se uma linha vertical no ponto +20 e considerando-se que esta linha corta apenas as funções de pertinência ZE-zero e PP-positivo pequeno, sem cruzar nenhuma outra função, o equivalente *fuzzy* de +20 pertencerá:

À função de pertinência *fuzzy* ZE com grau 0,4;

À função de pertinência *fuzzy* PP com grau 0,6;

À todas as outras funções de pertinência com grau 0,0;

E assim o vetor *fuzzy* equivalente ao número discreto +20 será

$$(\mu_{NG}; \mu_{NM}; \mu_{NP}; \mu_{ZE}; \mu_{PP}; \mu_{PM}; \mu_{PG}),$$

$$(0; 0; 0; 0,4; 0,6; 0; 0),$$

O exemplo na figura 2.6 faz a conversão de um único valor discreto de uma variável em um conjunto *fuzzy* que consiste de um número de elementos igual à quantidade de funções de pertinência, e cada elemento deste conjunto *fuzzy* carrega a informação da pertinência de cada das funções existentes naquela variável considerada. A variável poderia ter sido por exemplo, pressão em um vaso. Dessa forma uma pressão de +20 bar

corresponderia em *fuzzy* à grandeza (0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0,4 ; 0,6 ; 0), ou seja, a pressão *fuzzy* seria 0,4 zero e ao mesmo tempo 0,6 positivo pequena.

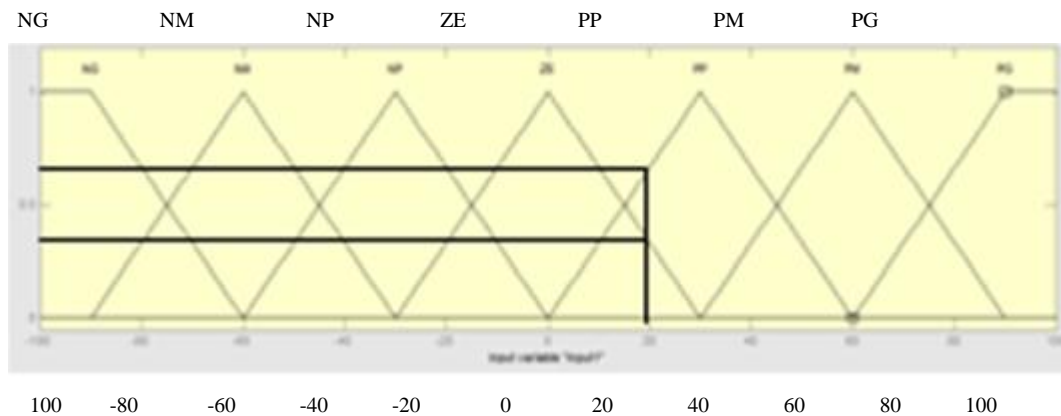


Figura 2.6: Fuzzificação do número discreto +20

O bloco “base de regras” consiste em regras do tipo SE...ENTÃO e são fornecidas por especialistas humanos, em forma de sentenças lingüísticas, em função da experiência dos mesmos com o processo.

As regras formam a base para a obtenção da saída *fuzzy*. Desta forma, a partir de entradas *crisps* são obtidas entradas *fuzzy*, e estas entradas *fuzzy* são combinadas por regras pré estabelecidas, geralmente estabelecimentos condicionais, mas que podem também ser estabelecimentos de identidade – que é encontrado restringindo-se o valor de uma variável a uma igualdade especificada. O sistema baseado em regras pode envolver mais do que uma regra. Cada uma delas produzirá um conseqüente, e então é necessário agregar todos os conseqüentes para que tenhamos uma saída *fuzzy* final. É possível o uso de várias variáveis para cada regra, tanto no antecedente quanto no conseqüente.

O segundo bloco contém um conjunto de regras definidas por especialistas humanos, as quais incorrem na determinação de como as regras são combinadas e ativadas, configurando-se na inferência. A inferência consiste em combinar as pertinências dos antecedentes e concluir pelos conseqüentes em seus resultados *fuzzy*. Sandi & Correa (1999) definem o procedimento de inferência em quatro etapas:

1. Verificação do grau de compatibilidade entre os fatos e as cláusulas nas premissas das regras (como exemplo de um fato teríamos o módulo de uma tensão elétrica e as cláusulas poderiam ser se a tensão é baixa, normal ou alta);
2. Determinação do grau de compatibilidade global da premissa de cada regra (como exemplo o grau de compatibilidade global da premissa de determinada regra seria “ângulo  $I_A$  ser indutivo com pertinência 0,4 ou o ângulo de  $I_A$  ser capacitivo com pertinência 0,5”);
3. Determinação do valor da conclusão, em função do grau de compatibilidade da regra com os dados e a ação de controle constante na conclusão (trata-se aqui de concluir pelo conseqüente de cada regra, exemplo se o ângulo de  $I_A$  é indesejável, por estar situado fora do quadrante que o classificaria como indutivo ou capacitivo, então estamos diante de um indicativo de fraude porque a corrente elétrica inverteu de sentido);
4. Agregação dos valores obtidos como conclusão nas várias regras, obtendo-se uma ação de controle global (trata-se aqui da formação da distribuição de saída, e a subsequente *defuzzificação*).

Destacam-se dois tipos de métodos de inferência, o Mandani e o Sugeno. A principal diferença entre eles encontra-se no conseqüente das regras. Mandani usa conjuntos *fuzzy* como saídas conseqüentes das regras. Sugeno emprega funções lineares das variáveis de entrada como conseqüentes das regras. Outra diferença é que enquanto no método Mandani há necessidade de defuzzificação, no método Sugeno o resultado é um número crisp oriundo de uma fórmula e portanto não há porque defuzzificar. Conforme Sivanandam (2007) o método Sugeno é computacionalmente mais eficiente, trabalha bem com técnicas lineares como por exemplo, controle PID, trabalha bem com otimização e é bem adequado para análise matemática. Já as vantagens do método Mandani é ser intuitivo, amplamente aceito, e é adequado para entrada de regras baseadas na experiência de especialistas humanos.

A proposta deste trabalho é fortemente dependente da experiência de especialistas humanos conhecedores de sistemas de medição de energia elétrica e seus comportamentos – premissas para existência de irregularidades em sistemas de medição e conclusão pela existência das irregularidades. Desta forma identificamos o método de inferência Mandani como o mais adequado para o escopo deste trabalho e dele trataremos a seguir.

### 2.5.3 Método de Inferência Mandani

A partir da representação gráfica apresentada em Sivanandam (2007) conforme a figura 2.7, será aqui explanado este método de inferência.

$x_0$  e  $y_0$  são as entradas *crisps* do sistema. Para chegar à saída das entradas citadas, seis passos são necessários:

1. Determinar o conjunto de regras *fuzzy*, no caso duas regras;
2. Fuzzificar os valores *crisps* de entrada, no caso dois valores, usando as funções de pertinência de entrada;
3. Combinar as entradas *fuzzificadas*, respeitando as regras *fuzzy*, *and* ou *or*, min ou max.
4. Encontrar o conseqüente de cada regra pela combinação dos valores das pertinências de entrada.
5. Combinar os conseqüentes para conseguir uma distribuição de saída.
6. *Defuzzificar* a distribuição de saída, no caso de necessitar de uma saída *crisp*.

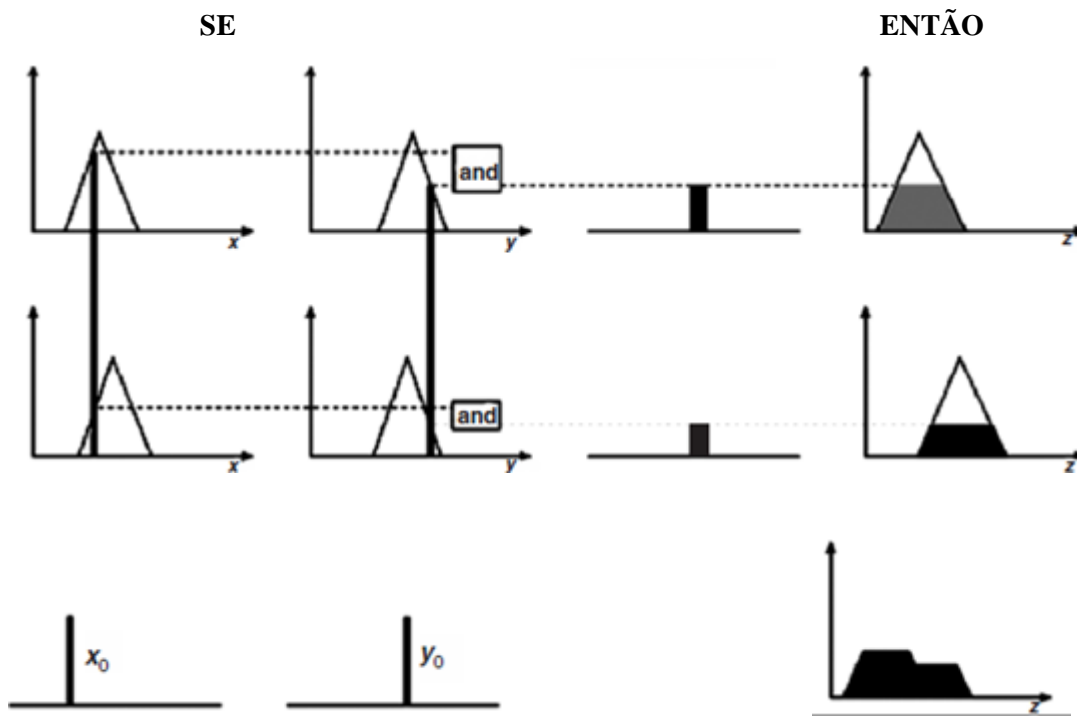


Figura 2.7: Sistema de Inferência Mandani (SIVANANDAM,2007,pág. 120)

No caso apresentado na Figura 2.7 existem duas entradas e duas regras, mas poderia ser um número maior de entradas e/ou de regras, bem como poderia ser um número maior de saídas.

Inicialmente são criadas as regras *fuzzy*, que constituem-se em um conjunto de afirmações condicionais lingüísticas, unindo os antecedentes pelo conectivo E (*and*) ou pelo conectivo OU (*or*), da seguinte forma:

SE ( entrada 1 é a função de pertinência 1 ) E/OU (entrada 2 é a função de pertinência 2)  
E/OU .....etc..... ENTÃO (a saída n é a saída da função de pertinência n)

Por exemplo:

SE *a comida em um restaurante é boa* E *o serviço de atendimento é bom*  
ENTÃO *a gorjeta a ser oferecida é generosa*

Na sequência a *fuzzificação* consiste em mapear as entradas, seja por medidas em campo, seja pelo sentimento do cliente no caso do restaurante, para valores entre 0 e 1, para tanto fazendo uso de um conjunto de funções de pertinência. No exemplo mostrado na figura 2.7, há duas entradas,  $x_0$  e  $y_0$ . Estas entradas são mapeadas em números *fuzzy* traçando-se uma linha vertical passando pelo valor de entrada *crisp*, até encontrar a curva de função de pertinência respectiva e então marcando-se o ponto de intersecção. Os valores das pertinências encontradas nas intersecções são combinados – para cada regra – utilizando-se os conectivos *AND* ou *OR*, e então mapeado no conseqüente, utilizando-se as considerações MÁX ou MIN. Observe a figura 2.7 cuja consideração para o conseqüente é MIN.

O próximo passo é a combinação das saídas – no caso do exemplo da figura 2.7, duas saídas, pois tínhamos duas regras – para a obtenção de uma distribuição de saída. Isto é usualmente feito pelo conectivo *OR*. O conectivo *OR* implica em escolher dos dois gráficos de saída – ou de mais gráficos se o número de regras for maior - sempre o valor máximo de quaisquer das funções, como se fora uma operação algébrica de união, e neste caso, é realmente uma operação algébrica com números *fuzzy*. É na realidade a operação união aplicada a conjuntos *fuzzy*.

#### 2.5.4 Defuzzificação

O terceiro bloco é responsável pela defuzzificação, para fornecer saídas precisas, dados não *fuzzy*, configurando-se em uma interpretação da informação *fuzzy*. Defuzzificar é o processo de conversão dos valores *fuzzy* em valores *crisps*. Isto é devido a que os resultados *fuzzy* obtidos não podem ser utilizados para o controle, tendo em vista que os valores de saída devem ser perfeitamente estabelecidos quando destinam-se a uma ação de controle. Porém, quando o valor de saída destina-se a uma tomada de decisão a partir de um diagnóstico, o que é o caso deste trabalho, pode-se encontrar o valor *crisp* e apresentar como resultado as possibilidades das funções de pertinência de saída.

Ibrahim (2004) observa que numerosos métodos de defuzzificação têm sido propostos na literatura, mas nenhum deles tem se mostrado mais vantajoso do que outro. Afirma ainda que a seleção do método a utilizar depende da experiência do projetista. A operação de defuzzificação é aplicada ao conjunto *fuzzy*  $F$  de saída para determinar a melhor saída crisp.

Para o propósito deste trabalho escolhemos o método do centro dos máximos porque além de continuidade, possui pouca complexidade computacional.

Destacamos alguns métodos como a seguir:

#### 2.5.4.1. Método do Centróide

Também conhecido como o método do centro de massa, ou o método do centro de gravidade. É provavelmente o método mais comumente usado. A saída defuzzificada  $x^*$  é definida por:

$$x^* = \frac{\int \mu_F(x) x dx}{\int \mu_F(x) dx} \quad (2.2)$$

onde

$\int$  denota o operador integral da álgebra.

$F$  denota o conjunto fuzzy considerado.

$\mu_F(x)$  é a função de pertinência combinada.

Este método determina o centro da área sob a função de pertinência combinada. Em função do operador de integração este método é computacionalmente complexo e assim resulta em ciclos de inferência bastante vagarosos.

### 2.5.4.2. Método do Centro da Maior Área

Este método é aplicável quando a saída consiste de no mínimo dois subconjuntos *fuzzy* convexos que não se sobrepõem. O resultado tende para o lado de uma das funções de pertinência.

### 2.5.4.3. Método do Centro dos Máximos

Cada função de pertinência é ponderada pelo seu máximo valor de pertinência. A saída é definida por:

$$x^* = \frac{\sum \mu_F(x_{im})x_i}{\sum \mu_F(x_{im})} \quad (2.3)$$

onde

$\Sigma$  é a soma algébrica

$x_{im}$  é o máximo da  $i$ -ésima função de pertinência.

Shaw e Simões (1999) destacam que neste método os picos das funções de pertinência representados no universo de discurso da variável de saída são usados, enquanto ignoram-se as áreas das funções de pertinência. Os valores não nulos do vetor de possibilidades são posicionados nos picos correspondentes. Assumindo que representam pesos, o valor de saída defuzzificado, discreto, é determinado achando-se o ponto de apoio onde os pesos ficam equilibrados. As áreas das funções de pertinência não desempenham nenhum papel e apenas os máximos são usados. A saída discreta é calculada como uma média ponderada dos máximos, cujos pesos são o resultado da inferência. E exemplifica com o vetor de possibilidades de saída fuzzy (NB, NM, ZE, PM, PB) sendo (0 ; 0 ; 0,2 ; 0,8 ; 0) e ocorrendo os picos das funções de pertinência nos

seguintes valores discretos -23(NB), -8(NM), 0(ZE), 8(PM), 23(PB) do universo de discurso de uma variável lingüística fuzzy *Potência do Motor*. O cálculo portanto ficaria:

Numerador:

$$0 \times 1 \times (-23) + 0 \times 1 \times (-8) + 0,2 \times 1 \times (0) + 0,8 \times 1 \times (8) + 0 \times 1 \times (23) = 6,4$$

Denominador:

$$0 + 0 + 0,2 + 0,8 + 0 = 1$$

Resultado Defuzzificado:  $6,4 / 1 = 6,4$  kW

## 2.6 Tomada de Decisão por Lógica *Fuzzy*

A lógica *fuzzy* tem sido aplicada em uma grande variedade de campos das ciências para resolver problemas de tomadas de decisão, quando os fatores imprecisão, nebulosidade e incerteza estão presentes. Controle de processos é um campo com larga aplicação. Mas nesse trabalho nosso foco é em tomada de decisões. Tomada de decisão é um processo mental que culmina por selecionar uma alternativa de ação dentre várias possíveis. Tomada de decisão lógica é uma importante parte de todas as profissões técnicas, aonde especialistas aplicam seus conhecimentos em determinada área para tomar decisões. A característica inerente a todos os problemas de tomadas de decisão são os aspectos de nebulosidade e incerteza. A lógica *fuzzy* tem encontrado amplo espaço para emular o comportamento humano na tomada de decisões. É quase impossível explicar como as pessoas pensam exatamente, até mesmo em situações particulares. A forma mais prática de se ter idéia de como as pessoas geralmente agem em situações particulares é observar o comportamento de uma quantidade de indivíduos, analisar e tirar conclusões. Antes do que modelar o comportamento humano é tarefa mais simples

imitar tal comportamento. A lógica *fuzzy* atende a esse propósito, e vem sendo usada para tal com amplo sucesso.

Conforme Sivanandam (2007) dentre todos os aspectos da vida, tomar decisão é um dos mais importantes, sendo mesmo a atividade mais fundamental do ser humano. Em qualquer processo de decisão nós consideramos a informação sobre o resultado e escolhemos entre duas ou mais alternativas para adotar uma ação. Se boas decisões são tomadas, então nós podemos conseguir bons resultados. Uma decisão é dita ser feita sob certeza quando o resultado para cada ação pode ser determinado precisamente, o que nem sempre é o caso, pois a maioria das decisões envolve riscos. A incerteza existente é o primeiro sinal da necessidade de utilizarmos a lógica *fuzzy*.

Tomadas de decisão por vezes têm de ser dinâmicas, como exemplo, controle de tráfego aéreo, operação de sistemas de potência. As distribuidoras de energia elétrica necessitam de tomada de decisão com dinamismo para manter os sistemas de medição de energia elétrica funcionando perfeitamente, sob pena de vultosos prejuízos. A identificação de fraudes, defeitos ou erros técnicos, necessita de uma solução que coletando dados de supervisão em tempo real, processe estes dados, fornecendo diagnósticos e proporcionando um planejamento para a realização de inspeções que conduzam aos melhores resultados. E a solução ótima foi encontrada na lógica *fuzzy*.



---

# Capítulo 3

## Identificação de Fraudes com Lógica *Fuzzy*

---

Neste trabalho utilizaremos lógica *fuzzy* como ferramenta para identificar se existe fraude no sistema de medição de energia elétrica e assim tomar decisões, a partir de avaliação de princípios físicos, combinando-os de forma adequada, via o *fuzzy toolbox* do MATLAB, como também por algoritmo em C++. As variáveis de entrada serão coletadas dos medidores eletrônicos instalados nas unidades consumidoras, e estas variáveis serão tratadas por eventos: módulos de tensões inferiores ou superiores a faixas estabelecidas, módulos de correntes inferiores ou superiores a faixas estabelecidas, inversão no sentido de determinado fasor corrente, ângulo entre fasores superior / inferior a determinado limite.

As informações de entrada são as variáveis medidas em cada sistema de medição de cada unidade consumidora dos grupos de faturamento de alta ou de baixa tensão. Estas variáveis serão qualificadas de forma nebulosa por funções de pertinência representativas das faixas possíveis / admissíveis dentro do universo de discurso das respectivas variáveis.

Inspeções em sistemas de medição de grandes consumidores historicamente vêm sendo efetuadas em 100% do universo, e isto causa desgaste de imagem e tem um alto custo com equipamentos e homens hora. Com a avaliação via inferência *fuzzy*, pode-se inspecionar apenas as unidades consumidoras indicadas como potencial de desvio.

Nossa proposta consiste em um sistema de análise de dados de medição de energia elétrica, coletados através de supervisor SCADA e tratamento de variáveis, realizando a importação de dados e fazendo-se uso de regras de validação com vistas a automação dos procedimentos de análise, até a concretização da recuperação de situações de perdas comerciais identificadas sistemicamente.

### 3.1. Variáveis de entrada e de saída.

Como caso prático para identificação de unidades consumidoras para as quais a distribuidora deve enviar equipe de fiscalização para combate à fraude em sistemas de medição, foram estabelecidas variáveis de entrada e variável de saída com suas respectivas funções de pertinência, com base na experiência de especialistas em medição de energia elétrica. A tabela 3.1 apresenta as variáveis, as funções de pertinência e os parâmetros definidos para cada função de pertinência trapezoidal [a b c d] de acordo com a figura 2.4.

Variável	Nome da função de pertinência	Parâmetros da função de pertinência
Módulo de $V_A$	Baixa	[-1 0 170 220]
	Aceitável	[170 220 260 261]
Módulo de $V_B$	Baixa	[-1 0 170 220]
	Aceitável	[170 220 260 261]
Módulo de $V_C$	Baixa	[-1 0 170 220]
	Aceitável	[170 220 260 261]
Módulo de $I_A$	Muito pequena	[-1 0 5 15]
	Aceitável	[5 15 100 101]
Módulo de $I_B$	Muito pequena	[-1 0 5 15]
	Aceitável	[5 15 100 101]
Módulo de $I_C$	Muito pequena	[-1 0 5 15]
	Aceitável	[5 15 100 101]
Ângulo de $I_A$	Esperado capacitivo	[-1 0 80 100]
	Indesejável	[80 100 260 280]
	Esperado indutivo	[260 280 360 361]
Ângulo de $I_B$	Indesejável 1	[-1 0 140 160]
	Esperado indutivo	[140 160 230 250]
	Esperado capacitivo	[230 250 320 340]
	Indesejável 2	[320 340 360 361]
Queda de kWh	Aceitável	[-1 0 50 70]
	Inaceitável	[50 70 100 101]
Queda de kW	Aceitável	[-1 0 50 70]
	Inaceitável	[50 70 100 101]
Diagnóstico	Não tem fraude	[-1 0 9 10]
	% de possibilidade de fraude	[9 10 89 90]
	Tem fraude	[89 90 100 101]

Tabela 3.1: Variáveis, funções e suas pertinências

As figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, e 3.11 representam graficamente as funções de pertinência das variáveis de entrada. A figura 3.12 representa graficamente as funções de pertinência da variável de saída.

Variável 1: Módulo de  $V_A$  (figura 3.1)

Funções de pertinência para a variável 1: Baixa; Aceitável (figura 3.1)

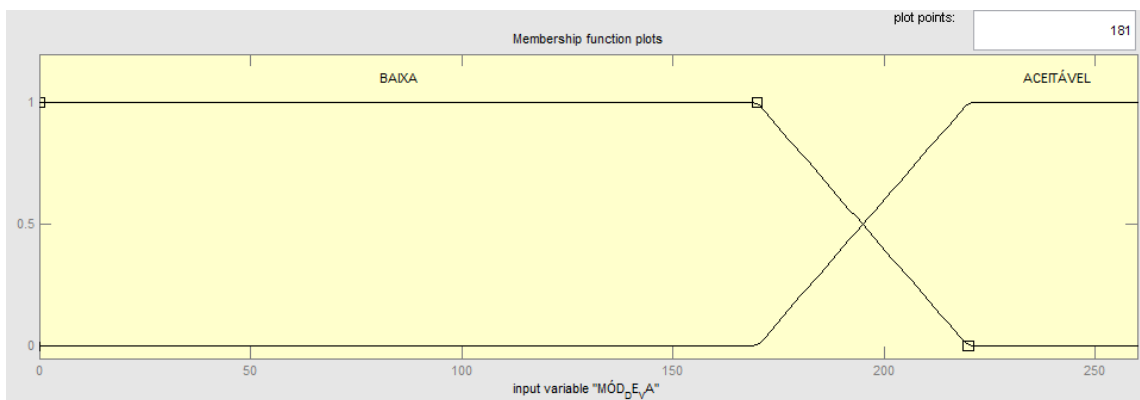


Figura 3.1: Módulo de  $V_A$ : Baixa; Aceitável

Variável 2: Módulo de  $V_B$  (figura 3.2)

Funções de pertinência para a variável 2: Baixa; Aceitável (figura 3.2)

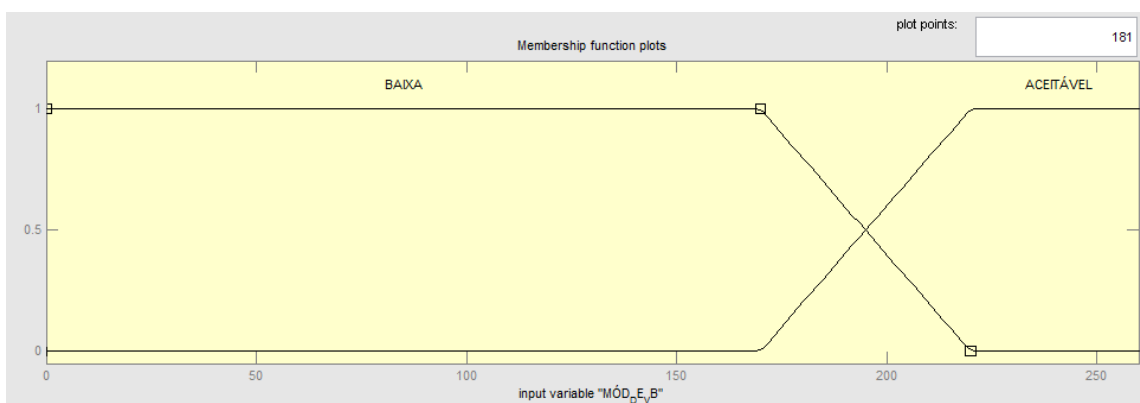


Figura 3.2: Módulo de  $V_B$ : Baixa; Aceitável

Variável 3: Módulo de  $V_C$  (figura 3.3)

Funções de pertinência para a variável 3: Baixa; Aceitável (figura 3.3)

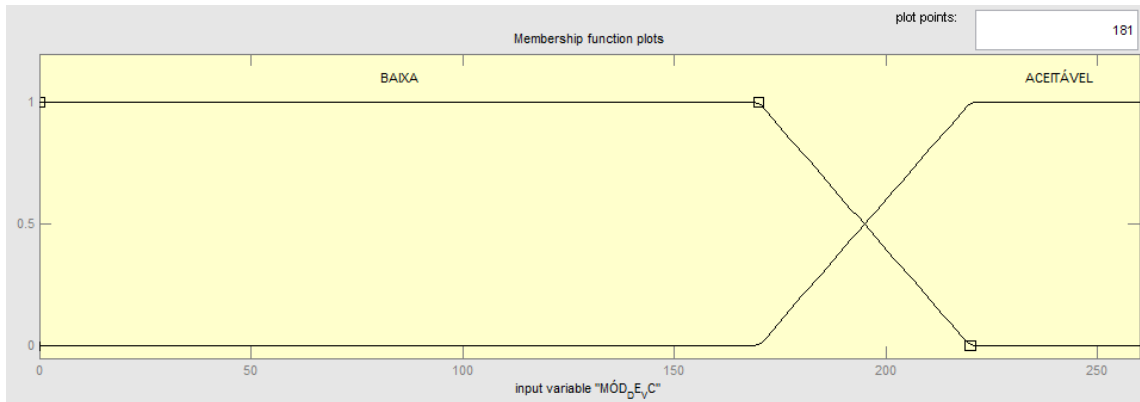


Figura 3.3: Módulo de  $V_C$ : Baixa; Aceitável

Variável 4: Módulo de  $I_A$  (figura 3.4)

Funções de pertinência para a variável 4: Muito Pequena; Aceitável (figura 3.4)

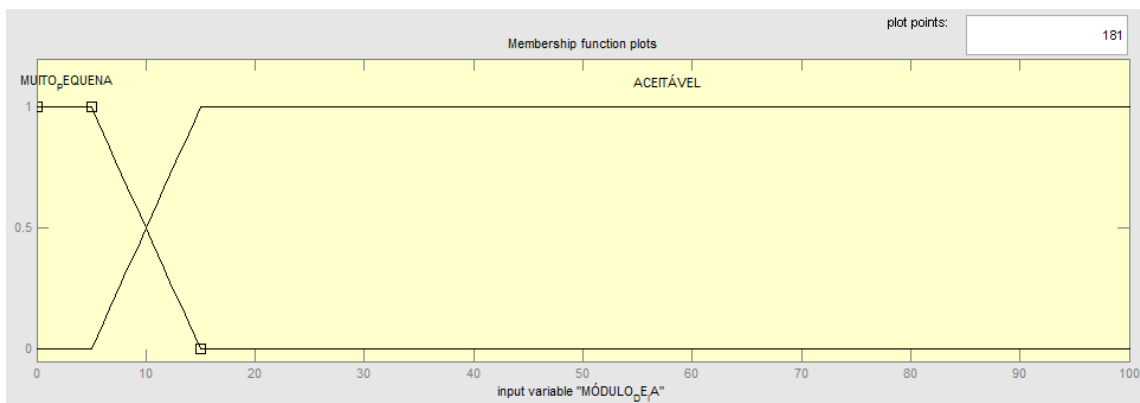


Figura 3.4: Módulo de  $I_A$ : Muito Pequena; Aceitável

Variável 5: Módulo de  $I_B$  (figura 3.5)

Funções de pertinência para a variável 5: Muito Pequena; Aceitável (figura 3.5)

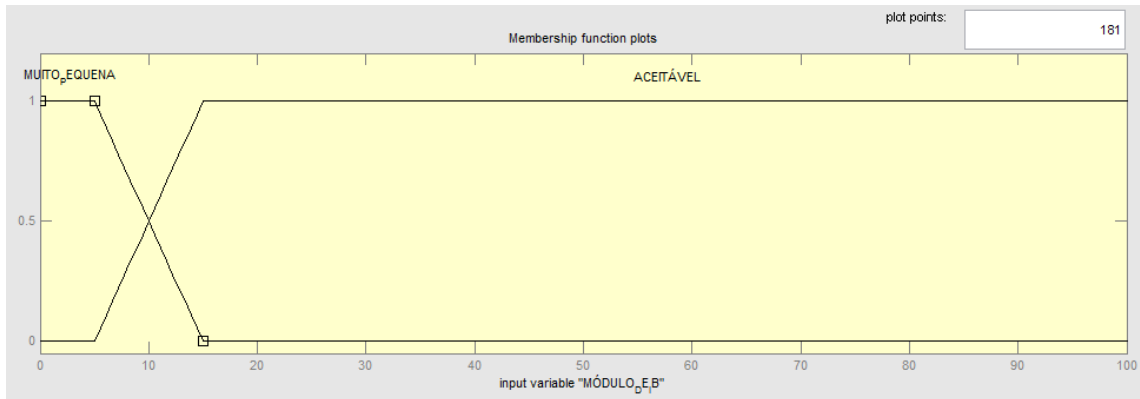


Figura 3.5: Módulo de  $I_B$ : Muito Pequena; Aceitável

Variável 6: Módulo de  $I_C$  (figura 3.6)

Funções de pertinência para a variável 6: Muito Pequena; Aceitável (figura 3.6)

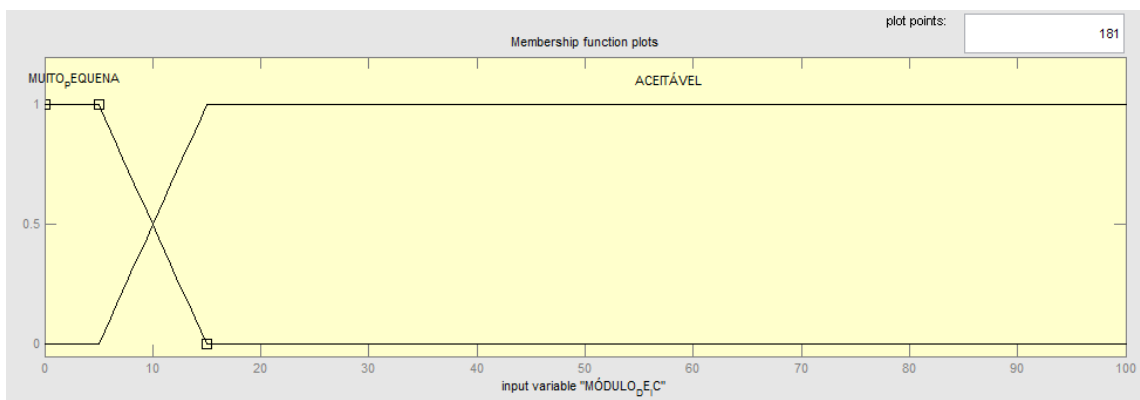


Figura 3.6: Módulo de  $I_C$ : Muito Pequena; Aceitável

Variável 7: Ângulo de  $I_A$  (figura 3.7)

Funções de pertinência para a variável 7: Esperado Capacitivo; Indesejável; Esperado Indutivo (figura 3.7)

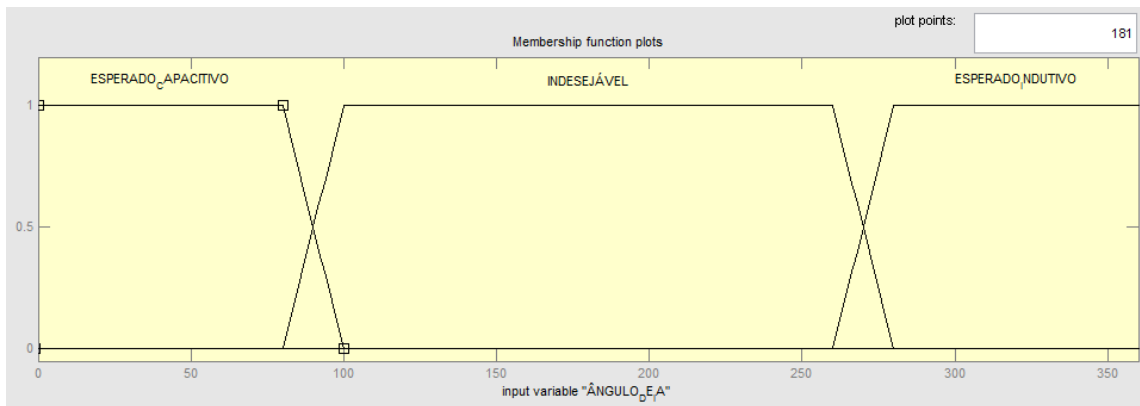


Figura 3.7: Ângulo de  $I_A$ : Esperado Capacitivo; Indesejável; Esperado Indutivo

Variável 8: Ângulo de  $I_B$  (figura 3.8)

Funções de pertinência para a variável 8: Indesejável\_1; Esperado Indutivo; Esperado Capacitivo; Indesejável\_2 (figura 3.8)

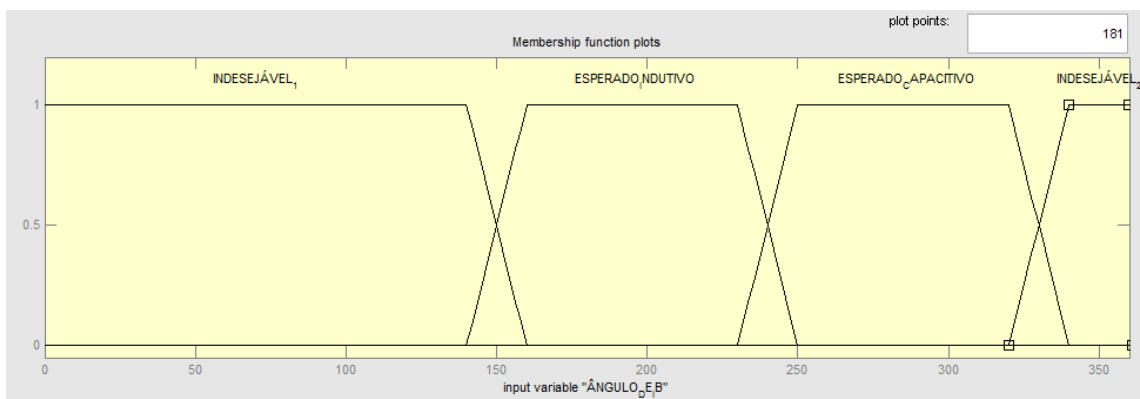


Figura 3.8: Ângulo de  $I_B$ : Indesejável\_1; Esperado Indutivo; Esperado Capacitivo; Indesejável\_2

Variável 9: Ângulo de  $I_C$  (figura 3.9)

Funções de pertinência para a variável 9: Indesejável\_1; Esperado Indutivo; Esperado Capacitivo; Indesejável\_2 (figura 3.9)

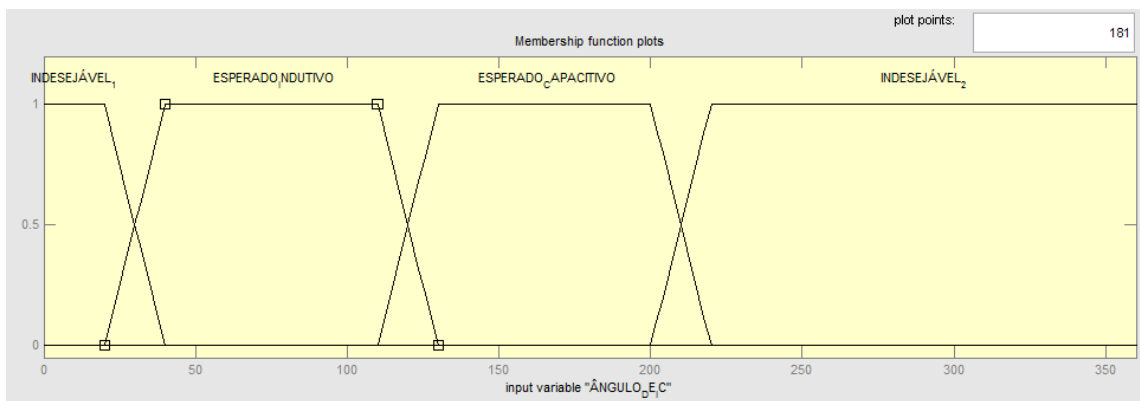


Figura 3.9: Ângulo de  $I_C$ : Indesejável\_1; Esperado Indutivo; Esperado Capacitivo; Indesejável\_2

Variável 10: Queda de kWh (figura 3.10)

Funções de pertinência para a variável 10: Aceitável; Inaceitável (figura 3.10)

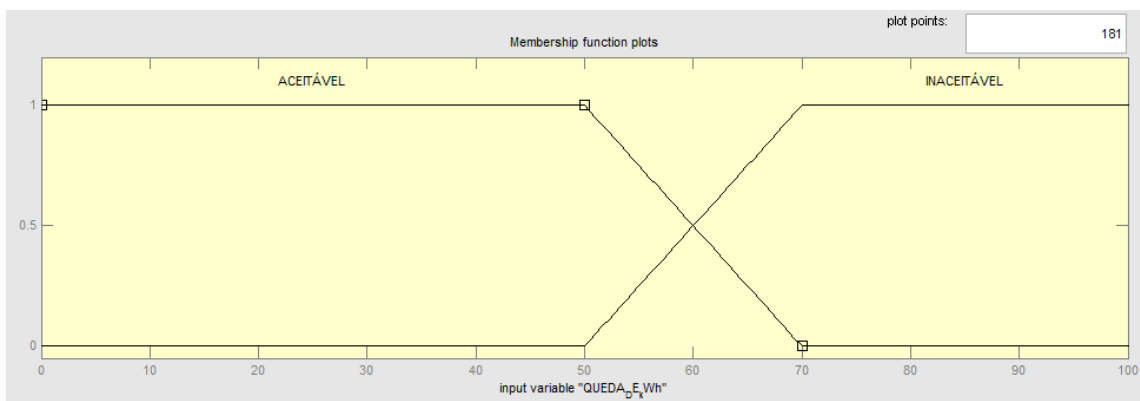


Figura 3.10: Queda de kWh: Aceitável; Inaceitável

Variável 11: Queda de kW (figura 3.11)

Funções de pertinência para a variável 11: Aceitável; Inaceitável (figura 3.11)

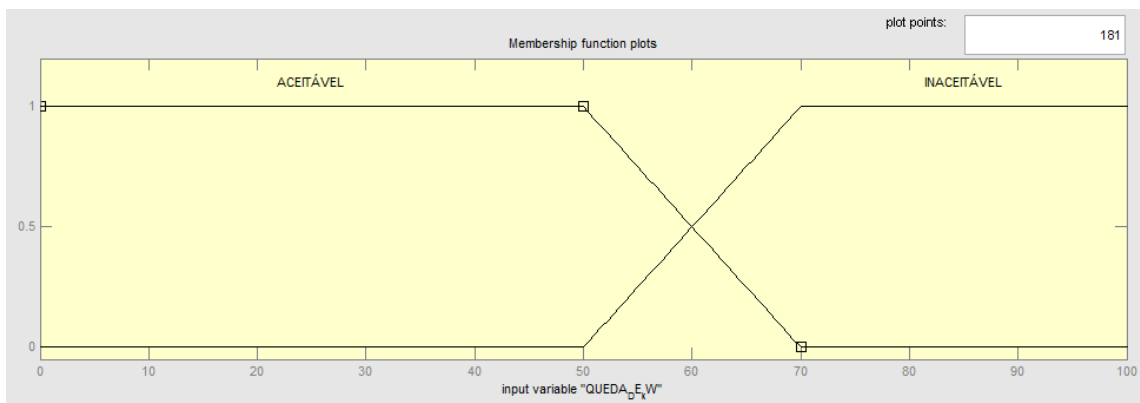


Figura 3.11: *Queda de kW*: Aceitável; Inaceitável

Variável 12: Diagnóstico (figura 3.12)

Funções de pertinência para a variável 12: NTF- Não tem Fraude; PPF- Percentual de Possibilidade de Fraude; TF- Tem Fraude (figura 3.12)

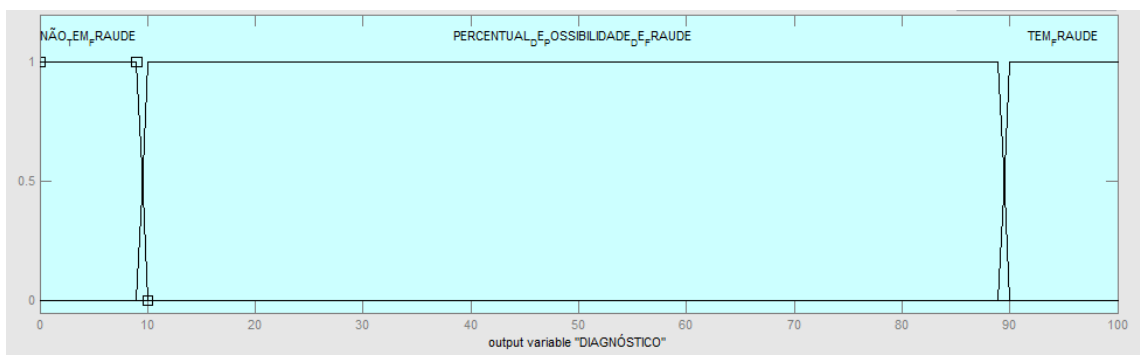


Figura 3.12: *Diagnóstico*: NTF- Não tem Fraude; PPF- Percentual de Possibilidade de Fraude; TF- Tem Fraude

A variável de saída *Diagnóstico* é o indicativo da possibilidade de existência ou não de fraude em sistemas de medição de energia elétrica. Foram utilizadas funções de pertinência trapezoidais para as variáveis de entrada e de saída. Os valores que foram estabelecidos são nossa sugestão como especialista em medição de energia elétrica, mas outras faixas de valores podem ser estabelecidas em função da necessidade de outros usuários - também especialistas em medição de energia elétrica.

### 3.2. Regras estabelecidas.

Nove regras foram criadas para a simulação em MATLAB, como também a nível de produção em C++, regras que são disparadas a partir do alarme de abertura da porta da caixa de medição. A variável *condição de abertura da porta* é uma variável *crisp*. As demais variáveis são *fuzzy*. Foram relacionadas as condições de comportamento de módulos de tensões, de módulos de correntes, do posicionamento fasorial entre elas, dentro da lógica de possibilidades angulares que se espera para cargas indutivas ou capacitivas. A variação considerável do consumo de energia ou de demanda de potência ativa entre meses consecutivos foram também considerados no estabelecimento das regras. Destaque-se que estas regras podem ser modificadas de acordo com o conhecimento e sensibilidade do especialista que esteja tratando com o problema.

A tabela 3.2 relaciona as nove regras testadas com o algoritmo desenvolvido. As variáveis e suas funções de pertinência são correlacionadas por conectivos pré estabelecidos e a variável conseqüente *diagnóstico* é determinada para cada situação estabelecida.

VARIÁVEL	FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	REGRAS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		CONECTIVO		E	E	OU	OU	OU	OU	OU	E
VA	BAIXA										X
	ACEITÁVEL	X	X							X	
VB	BAIXA										X
	ACEITÁVEL	X	X							X	
VC	BAIXA										X
	ACEITÁVEL	X	X							X	
IA	MUITO PEQUENA			X							
	ACEITÁVEL	X	X								X
IB	MUITO PEQUENA			X							
	ACEITÁVEL	X	X								X
IC	MUITO PEQUENA			X							
	ACEITÁVEL	X	X								X
^IA	ESPERADO CAPACITIVO		X								
	INDESEJÁVEL				X	X	X	X			
	ESPERADO INDUTIVO	X								X	X
^IB	INDESEJÁVEL 1				X	X					
	ESPERADO INDUTIVO	X								X	X
	ESPERADO CAPACITIVO		X								
	INDESEJÁVEL 2						X	X			
^IC	INDESEJÁVEL 1				X		X				
	ESPERADO INDUTIVO	X								X	X
	ESPERADO CAPACITIVO		X								
	INDESEJÁVEL 2					X		X			
QUEDA DE kWh	ACEITÁVEL	X	X								
	INACEITÁVEL									X	X
QUEDA DE kW	ACEITÁVEL	X	X								
	INACEITÁVEL									X	X
DIAGNÓSTICO	NÃO TEM FRAUDE	X	X								
	% POSSIBILIDADE FRAUDE									X	
	TEM FRAUDE			X	X	X	X	X	X		X

Tabela 3.2: Regras estabelecidas para validação do método

### 3.3. Validação das regras propostas usando MATLAB

Para validar as regras propostas, foi realizada simulação no MATLAB para dezenas de situações de campo, e aqui destacamos cinco delas, apresentadas no apêndice A. Estas situações testaram a qualidade dos sistemas de medição a partir de valores coletados em intervalos de amostragem de 15 minutos. A primeira situação, A1 não contém nenhuma anormalidade no sistema de medição. Anomalias ocorreram para as situações A2, A3, A4 e A5. A situação A2 tem a corrente da fase C em uma zona nebulosa com uma pertinência de ser muito pequena e também com uma pertinência de ser aceitável. A situação A3 tem o vetor corrente da fase A invertido. A situação A4 tem quedas de energia e de demanda entre dois meses consecutivos maiores que os valores esperados. A situação A5 tem valores de tensões e de quedas de energia e demanda que situam-se em zona nebulosas sendo que as tensões das três fases têm pertinências de serem baixas como também têm pertinências de serem aceitáveis e as quedas de energia e de demanda têm pertinências de serem aceitáveis e também têm pertinências de serem inaceitáveis. As variáveis de entrada e as interpretações das situações encontram-se em destaque no Apêndice A.

### 3.4. Implementação do sistema de detecção de fraudes

O sistema de detecção de fraudes foi implementado com lógica *fuzzy* porque a análise das condições de um sistema de medição não conclui com total certeza sobre se a ocorrência é fraude ou é defeito no sistema. As conclusões são apontamentos com graus de possibilidades. A qualidade das regras estabelecidas tem muita importância para a assertividade do método.

### 3.4.1. Fundamentos do Método

O desenvolvimento do algoritmo para tratativas de lógica *fuzzy* deve ser considerado em função da complexidade computacional, tendo em vista que a carga computacional e a memória requerida nas operações devem ser analisadas para que a escolha do método seja a mais adequada. Fator importante a considerar é o número de entradas e o número de saídas, bem como se as funções de pertinência variam ao longo do tempo, e ainda a forma das funções de pertinência serem lineares ou não. Desta forma, a questão é se a abordagem do problema deve ser orientada em função do tempo computacional de processamento ou se deve ser orientada em função da capacidade de armazenamento em memória.

A abordagem orientada à memória envolve intensivas operações de acesso à memória e pouco esforço computacional, assim proporcionando rápido acesso aos valores de pertinência. Com este método, a forma das funções de pertinência não tem influência, pode-se escolher qualquer uma. Contudo, aplica-se apenas a sistemas com limitado número de entradas e saídas, isto porque a tabela ficaria demasiadamente grande pois ela cresce exponencialmente com o número de entradas e saídas. Além disso as funções de pertinência têm de ser estáticas no tempo. A abordagem orientada a esforço computacional utiliza menos espaço de memória no processamento computacional. Neste caso, deve-se usar função de pertinência triangular ou trapezoidal, porque os cálculos estarão sendo feitos em tempo real, e funções não lineares demandariam alto tempo de processamento. Além disso as funções de pertinência não precisam ser estáticas no tempo. Suporta, ainda, grande número de entradas e saídas, pois independe de tabela.

Isto posto, nosso foco aqui é a solução de software a ser implementada. Trata-se portanto de um compromisso entre a carga de memória a ser utilizada e a carga computacional a ser processada. As duas técnicas de implementação são portanto a técnica em tempo real, cujos cálculos das variáveis são feitas a cada momento, e a técnica de abordagem por consulta à tabelas, cujos cálculos das variáveis são feitos previamente e armazenados em tabelas. Conforme Bai et al(2003) se o número de entradas e saídas é limitado e todas as funções de pertinência não mudam ao longo do tempo, a abordagem orientada à memória –por tabela– é atrativa. Caso contrário, deve-se

escolher a abordagem orientada à carga computacional. No nosso caso, podemos ter um alto número de entradas – sugerimos nove regras, mas poderiam ser bem mais – desenvolveremos o programa em C++, fazendo uso das formulações a seguir descritas, com os cálculos sendo efetuados durante o processamento do algoritmo.

Para validação prática do método, utilizaremos amostras do banco de dados da EPB – Energisa Paraíba Distribuidora de Energia Elétrica. O algoritmo de simulação no MATLAB, desenvolvido no capítulo anterior, foi reestruturado em nova linguagem – C++, para proporcionar consulta a banco de dados com varredura a intervalos regulares.

### 3.4.2. Estruturação do algoritmo

Quando disparado pela abertura da porta, o algoritmo deve:

1. Ler no banco de dados os valores das variáveis;
2. Calcular as pertinências para cada bloco de dados coletado a cada intervalo;
3. Agregar os resultados dos consequentes de cada regra atendida via função OR – soma lógica;
4. Calcular a saída procedendo à defuzzificação do valor *fuzzy* encontrado.

A detecção de fraudes em sistemas de medição de energia elétrica é então, sob a ótica do método aqui exposto, resultado da utilização de lógica *fuzzy* através da escolha adequada de variáveis coletadas por supervisor SCADA, das funções de pertinência e seus parâmetros, seguindo regras definidas por especialistas. O fluxo desse processo encontra-se no diagrama de blocos constante na figura 3.13.

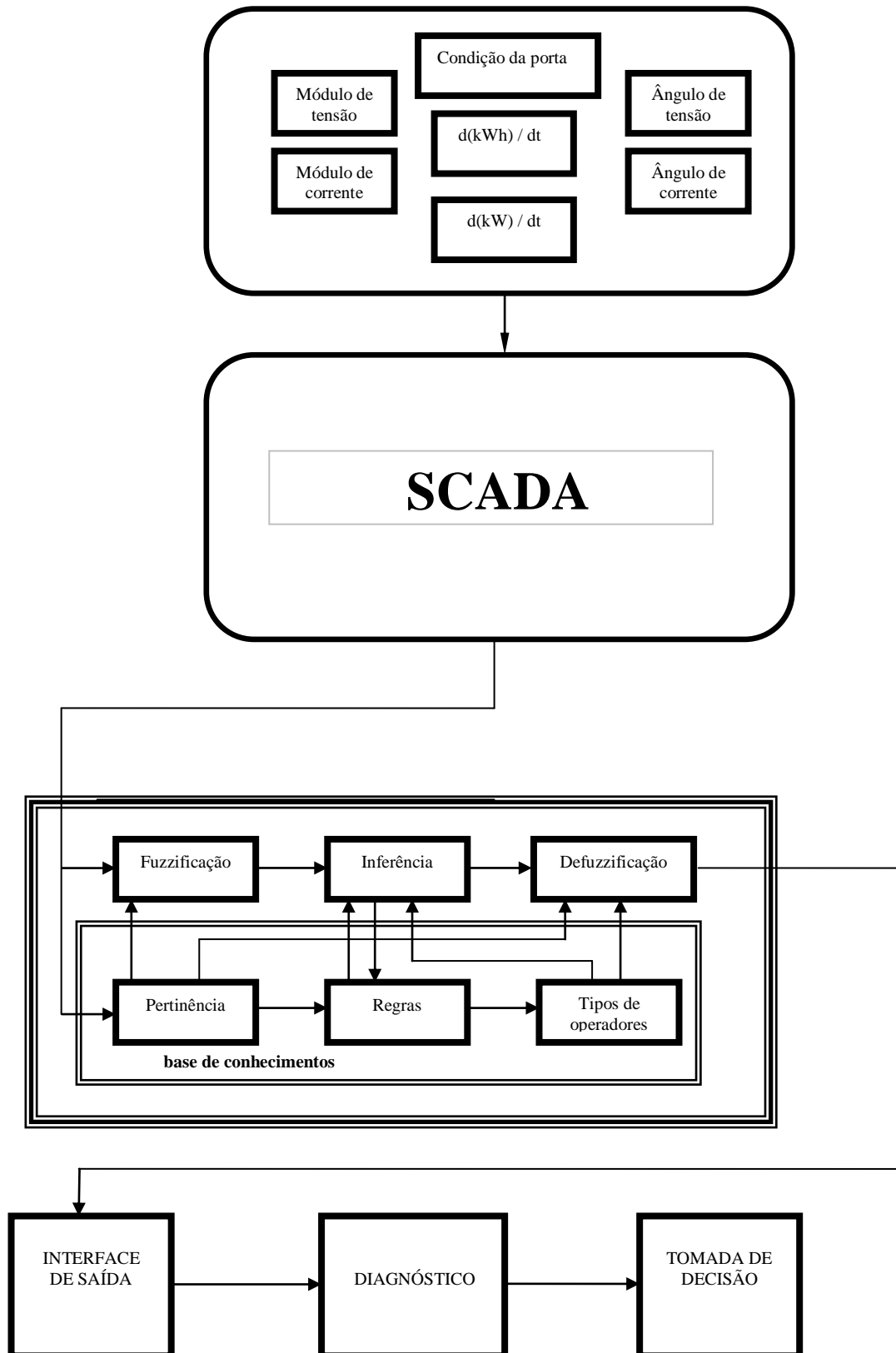


Figura 3.13: Diagrama de blocos do processo de recuperação de perdas

---

# Capítulo 4

## Resultados

---

A implementação do sistema de detecção de fraudes em unidades consumidoras de energia elétrica foi procedida através do desenvolvimento de um software orientado pelas premissas de formulação de variáveis, dos universos de discurso, das funções de pertinências, da base de regras e da estruturação do algoritmo constantes no capítulo 3.

O presente capítulo apresenta uma sinopse do programa desenvolvido como também resultados obtidos para casos concretos processados pelo software.

### 4.1. Sinopse do Programa em C++

O algoritmo foi estruturado de forma modularizada sendo a lógica fuzzy uma subrotina dentro do programa principal.

O programa funciona conforme a seguir:

- 1) Calcula a demanda e o consumo do mês antecedente;
- 2) Calcula a demanda e o consumo do mês atual;
- 3) Calcula a queda percentual de demanda e a queda percentual de consumo com base nos passos 1 e 2;
- 4) Para cada linha de intervalo de amostragem de 1 hora ou de 15 minutos:
  - 4.1) Extrai os valores do banco de dados (tensões, correntes, ângulos, condição da porta, queda de kWh e queda de kW em relação ao mês anterior);
  - 4.2) Calcula a porcentagem da corrente nominal de cada linha;
  - 4.3) Processa a lógica fuzzy com estes valores, desde que a variável não fuzzy *condição de abertura da porta* indique porta aberta;

4.4) Exibe na tela a data, hora e informa se há fraude, se não há fraude, ou o percentual de possibilidade de que esteja ocorrendo fraude.

A tela de entrada do aplicativo solicita ao usuário as configurações: nome da unidade consumidora, mês a analisar e a corrente nominal do sistema de medição. Uma vez procedida a seleção destas variáveis, selecionando portanto uma determinada memória de massa, o aplicativo disponibiliza o ícone START. Ao clicar neste ícone – vide figura 4.1 – o software é acionado e em questão de milisegundos apresenta os resultados / diagnósticos para cada intervalo de amostragem da memória de massa escolhida.

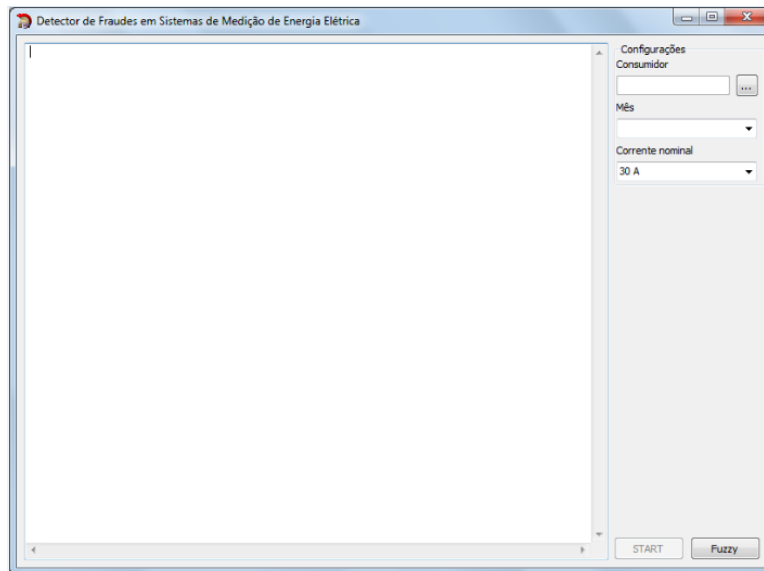


Figura 4.1: Tela de entrada do aplicativo

## 4.2. Resultados para Casos Específicos.

Apresentaremos a seguir estudos de casos com os resultados obtidos pelo aplicativo “Sistema de Detecção de Fraudes” desenvolvido.

4.2.1. Caso 1: CIMENTO\_Memória de Massa Modificada\_1\_nov\_2010

**Situação:** Unidade consumidora com medição indireta, medidor de 5 ampéres nominais. Observa-se na figura 4.2 que no dia 20/11/2010 a porta da caixa de medição abriu (os indicativos 0,95 ou 1 significam que a porta abriu) e o ângulo da corrente da fase B inverteu 180°.

CIMENTO (01/11/2010 00:00:00 até 30/11/2010 23:59:59) CORRENTE NOMINAL= 5 AMPÉRES																
Data	Dia	Tensão (V)			Corrente (A)			Ângulo da corrente			Potência (W)			Demanda trifásica(kW)	Condição da porta	
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C			
19/11/2010 21:30	Sexta	116	116	116	1,04	1,07	1	351	228	108	0	120	112	1083	0,5	
19/11/2010 21:45	Sexta	116	116	117	1,01	1,04	1	351	230	110	115	117	114	1615	0,5	
19/11/2010 22:00	Sexta	117	117	117	0,99	1,02	0,98	351	228	109	0	116	111	1059	0,5	
19/11/2010 22:15	Sexta	117	117	117	1	1,03	0,99	351	228	110	115	117	113	1610	0,5	
19/11/2010 22:30	Sexta	117	117	117	1,04	1,07	1,01	348	225	105	117	120	113	1633	0,5	
19/11/2010 22:45	Sexta	117	117	117	1,02	1,05	0,99	350	226	107	116	119	112	1619	0,5	
19/11/2010 23:00	Sexta	116	116	116	1,75	1,8	1,73	343	220	100	193	196	188	2693	0,5	
19/11/2010 23:15	Sexta	115	115	116	1,74	1,8	1,72	343	220	101	190	194	187	2665	0,5	
19/11/2010 23:30	Sexta	116	116	117	1,72	1,77	1,69	343	222	101	189	192	186	2646	0,5	
19/11/2010 23:45	Sexta	115	115	115	1,73	1,79	1,72	343	222	101	189	0	185	1745	0,5	
20/11/2010 00:00	Sábado	115	115	116	1,74	1,78	1,71	343	60	102	189	192	186	2646	1	
20/11/2010 00:15	Sábado	115	115	116	1,71	1,77	1,7	343	60	101	187	191	0	1764	1	
20/11/2010 00:30	Sábado	115	115	116	1,82	1,88	1,82	341	60	99	196	203	0	1862	1	
20/11/2010 00:45	Sábado	115	115	116	1,82	1,89	1,83	341	60	99	197	202	197	2781	1	
20/11/2010 01:00	Sábado	115	115	116	1,84	1,9	1,84	341	60	98	198	203	198	2795	1	
20/11/2010 01:15	Sábado	116	116	116	1,82	1,88	1,82	340	60	99	196	203	196	2777	1	
20/11/2010 01:30	Sábado	115	116	116	1,84	1,9	1,84	340	60	99	198	204	198	2800	1	
20/11/2010 01:45	Sábado	116	116	116	1,82	1,89	1,83	340	60	99	198	203	197	2791	1	
20/11/2010 02:00	Sábado	116	116	116	1,86	1,93	1,87	340	60	98	203	207	201	2851	1	
20/11/2010 14:45	Sábado	113	113	114	4,17	4,32	4,22	336	60	95	428	444	432	6085	1	
20/11/2010 15:00	Sábado	113	113	114	4,18	4,32	4,23	336	60	95	429	444	433	6095	1	
20/11/2010 15:15	Sábado	114	114	115	4,15	4,3	4,2	337	60	95	430	445	434	6109	1	
20/11/2010 15:45	Sábado	113	113	114	4,17	4,34	4,23	336	60	95	428	445	434	6099	1	
20/11/2010 16:00	Sábado	113	113	114	4,11	4,26	4,15	337	60	96	422	438	430	6020	1	
20/11/2010 16:15	Sábado	114	114	115	4,03	4,16	4,05	337	60	96	422	431	423	5955	1	
20/11/2010 16:30	Sábado	113	113	114	4,11	4,25	4,14	337	60	96	422	436	429	6006	1	
20/11/2010 16:47	Sábado	114	114	115	4,07	4,2	4,1	337	60	96	426	435	428	6015	1	
20/11/2010 17:00	Sábado	114	114	115	4,02	4,16	4,05	337	60	95	421	431	424	5955	1	
20/11/2010 17:15	Sábado	113	113	114	4,11	4,25	4,14	337	60	96	427	437	429	6034	1	
20/11/2010 17:30	Sábado	113	113	114	4,18	4,32	4,2	337	60	96	429	443	436	6104	1	
20/11/2010 17:45	Sábado	112	113	114	4,07	4,23	4,1	338	60	96	419	434	425	5964	1	
20/11/2010 18:00	Sábado	115	115	116	4,05	4,21	4,08	337	60	96	424	440	430	6039	1	
20/11/2010 18:15	Sábado	115	115	116	4,11	4,26	4,14	337	60	96	430	445	0	4083	1	
20/11/2010 18:30	Sábado	116	116	117	3,39	3,52	3,41	338	60	97	361	375	362	5124	1	
20/11/2010 18:45	Sábado	116	116	117	3,37	3,49	3,39	338	60	97	359	372	360	5091	1	
20/11/2010 19:00	Sábado	116	116	117	3,38	3,5	3,4	338	60	96	360	369	362	5091	1	
20/11/2010 19:15	Sábado	116	117	117	3,26	3,38	3,28	338	60	97	347	363	349	4942	1	
20/11/2010 19:30	Sábado	115	115	116	3,92	4,07	3,96	337	60	96	414	425	418	5866	1	
20/11/2010 19:45	Sábado	115	115	116	3,96	4,09	4	337	60	96	414	428	421	5894	1	
20/11/2010 20:00	Sábado	115	115	116	3,99	4,14	4,03	337	60	96	417	432	425	5945	1	
20/11/2010 20:15	Sábado	114	115	116	4,07	4,22	4,12	337	60	96	427	0	434	4018	1	
20/11/2010 20:30	Sábado	115	115	116	3,99	4,14	4,03	337	60	96	422	432	425	5969	1	
20/11/2010 20:45	Sábado	114	114	115	4,09	4,24	4,14	337	60	96	424	440	428	6029	1	
20/11/2010 21:00	Sábado	115	115	116	4,07	4,22	4,11	337	60	96	426	441	434	6071	1	
20/11/2010 21:15	Sábado	115	115	116	4,01	4,15	4,04	337	60	96	424	0	426	3967	1	
20/11/2010 21:30	Sábado	115	115	116	4,02	4,16	4,05	337	60	96	420	435	428	5987	1	
20/11/2010 21:45	Sábado	115	116	117	4,07	4,21	4,11	337	60	95	0	444	432	4088	1	
20/11/2010 22:00	Sábado	115	115	116	4,05	4,19	4,08	337	60	96	423	438	0	4018	1	
20/11/2010 22:15	Sábado	115	115	116	4,05	4,19	4,08	337	60	96	428	438	430	6048	1	
20/11/2010 22:30	Sábado	115	115	116	4,05	4,19	4,09	337	60	96	428	438	431	6053	1	
20/11/2010 22:45	Sábado	115	116	117	3,96	4,1	4	337	60	96	419	432	425	5955	1	
20/11/2010 23:00	Sábado	114	114	115	3,89	4,02	3,91	338	60	97	407	421	409	5773	1	
20/11/2010 23:15	Sábado	113	114	114	4,03	4,16	4,04	338	60	96	418	431	419	5917	1	
20/11/2010 23:30	Sábado	112	112	113	4,13	4,27	4,16	337	60	96	425	0	428	3981	1	
20/11/2010 23:45	Sábado	112	112	113	4,11	4,24	4,13	337	60	96	423	432	424	5969	1	
21/11/2010 00:00	Domingo	113	113	114	4,09	4,23	4,12	337	216	96	425	435	427	6006	0,5	
21/11/2010 00:15	Domingo	113	113	114	4,07	4,21	4,11	337	216	96	423	433	426	5983	0,5	
21/11/2010 00:30	Domingo	114	114	115	4,05	4,19	4,08	337	215	96	424	434	426	5992	0,5	

Figura 4.2: Memória de massa (com destaque para o dia 20/11/2010) da unidade consumidora CIMENTO.

O aplicativo foi utilizado, conforme os passos a seguir, que podem ser acompanhados na sequência das figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, as quais exemplificam o processamento, operando o aplicativo para a memória de massa do mês de novembro/2010.

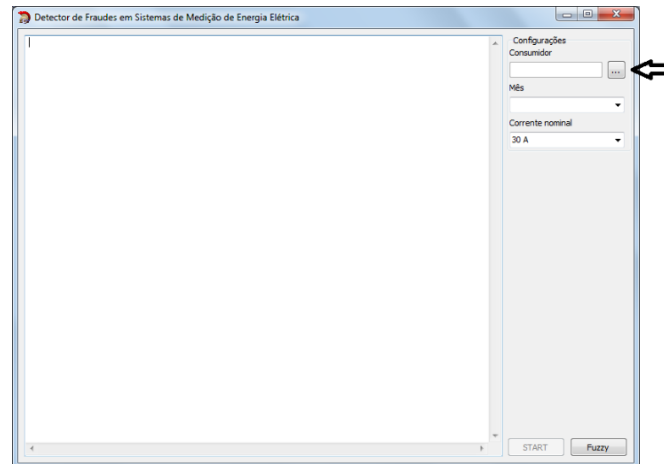


Figura 4.3: Ícone de seleção da unidade consumidora

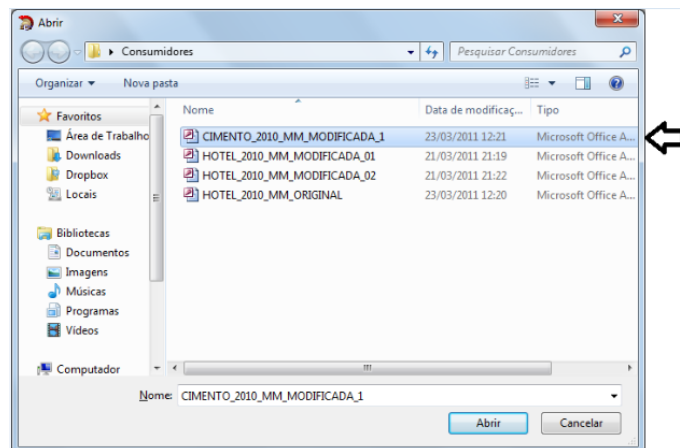


Figura 4.4: Selecionando a unidade consumidora CIMENTO

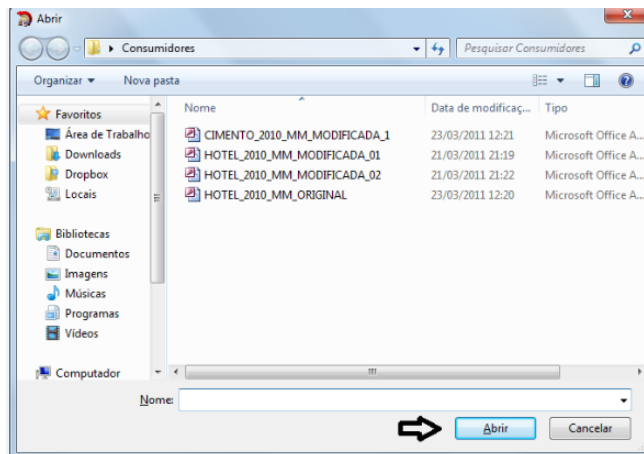


Figura 4.5: Clicando no ícone “Abrir”

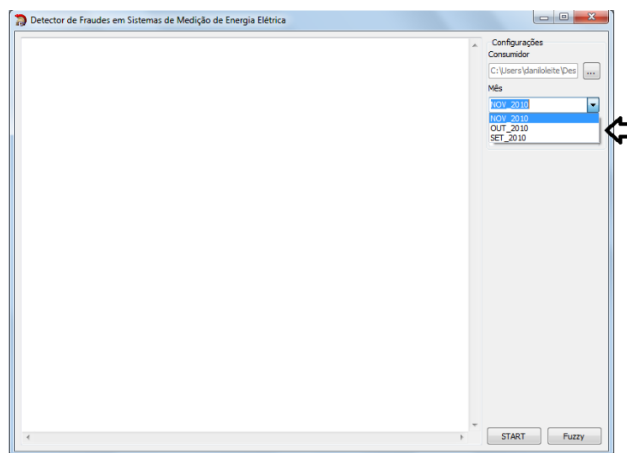


Figura 4.6: Selecionando o mês de novembro

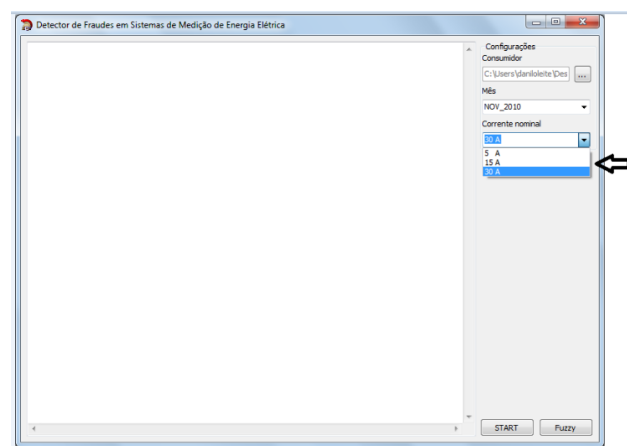


Figura 4.7: Selecionando a corrente em 5 ampéres

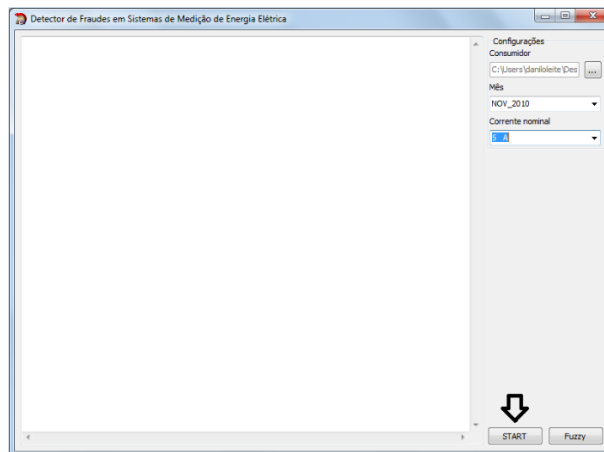


Figura 4.8: Clicando em “Start”

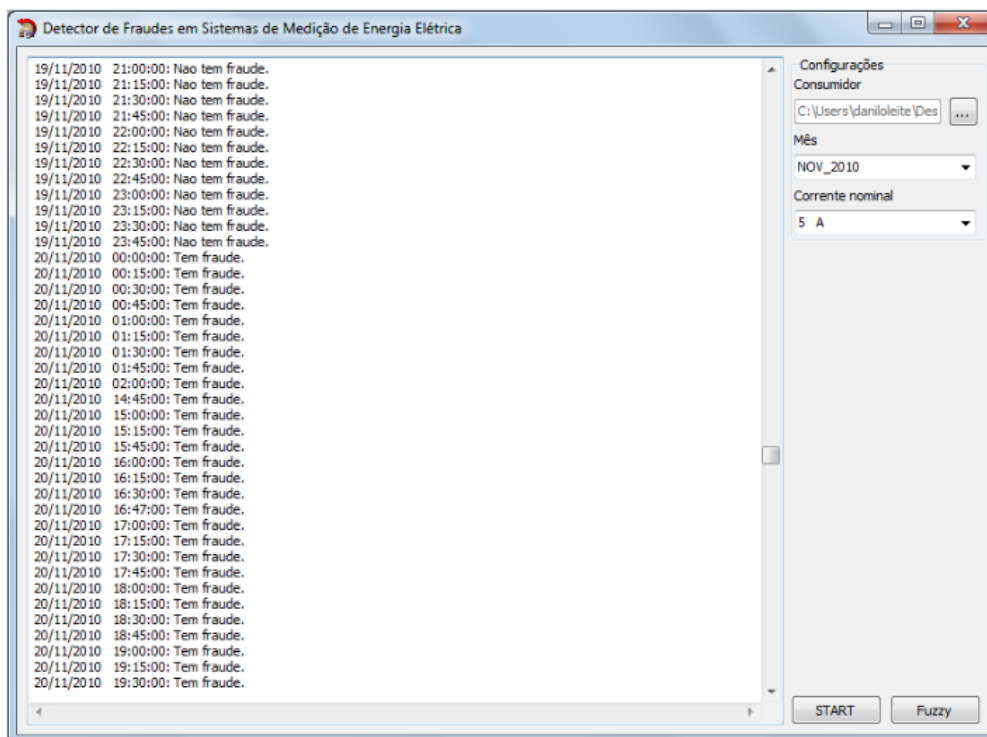


Figura 4.9: Resultado apresentado pelo software confirma a anomalia ocorrida no dia 20/11/2010, em seus primeiros intervalos de amostragem.

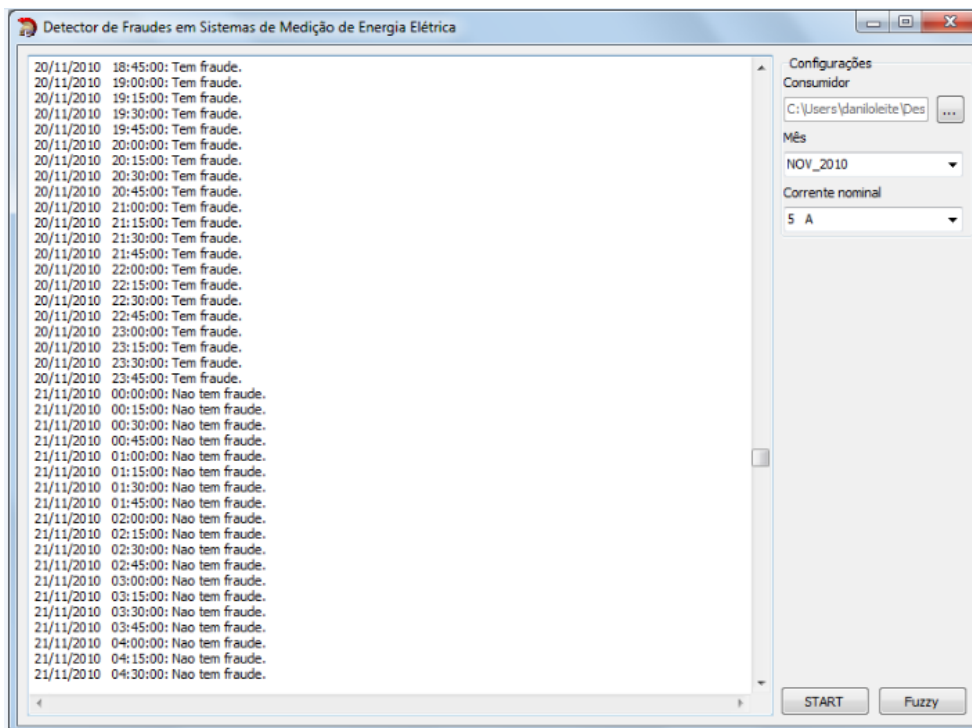


Figura 4.10: Resultado apresentado pelo software confirma a anomalia ocorrida no dia 20/11/2010, em seus últimos intervalos de integralização.

**Análise do resultado do caso 1:** Examinando a memória de massa da figura 4.2 observa-se que o ângulo da corrente da fase B, até o intervalo 19/11/2010 23:15 h situava-se em torno de  $220^\circ$ , portanto dentro da faixa definida como “Esperado Indutivo”, conforme a tabela 3.1 e a figura 3.8 ( $140^\circ$  a  $250^\circ$ ); A partir do intervalo 20/11/2010 00:00 h o ângulo da corrente da fase B torna-se  $60^\circ$  - concomitante com a abertura da porta da caixa de medição – situando-se dentro da faixa definida como “Indesejável\_1” conforme a tabela 3.1 ( $0$  a  $160^\circ$ ). É indesejável porque inverteu  $180^\circ$ , sugerindo que a fiação foi manipulada, com inversão de sentido do fasor corrente, o que provoca registro de energia a menor do que a realmente consumida. O resultado do aplicativo, figuras 4.9 e 4.10, confirma esta análise, indicando durante todo o dia 20/11/2010 a mensagem “Tem fraude”.

## 4.2.2. Caso 2: HOTEL\_Memória de Massa Modificada\_2\_nov\_2010

**Situação:** Unidade consumidora com medição direta, medidor de 30 ampéres nominais. Observa-se na figura 4.11 os últimos intervalos de integralização do mês de novembro/2010, e tal qual ocorreu durante todo o referido mês, a corrente da fase C caiu abruptamente para 1 ampére, com destaque para o fato de que a porta não abriu (o indicativo 0,5 significa que a porta não abriu).

HOTEL (01/11/2010 00:00:00 até 30/11/2010 23:59:59) CORRENTE NOMINAL = 30 AMPÉRES															
Data	Dia	Tensão (V)			Corrente (A)			Ângulo da corrente (graus)			Potência (W)			Demanda trifásica(kW)	Condição da porta
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C		
30/11/2010 17:00	Terça	224	219	218	31,14	25,53	1	341	219	101	6.356,00	5.278,00	4.583,00	16,217	0,5
30/11/2010 17:15	Terça	224	220	219	26,56	20,03	1	339	222	102	5.418,00	4.198,00	4.196,00	13,812	0,5
30/11/2010 17:30	Terça	224	218	217	19,28	28,04	1	336	224	102	3.810,00	5.832,00	6.463,00	16,105	0,5
30/11/2010 17:45	Terça	224	218	216	25,2	37,8	1	341	221	104	5.131,00	7.991,00	6.909,00	20,031	0,5
30/11/2010 18:00	Terça	224	219	218	26,94	33,17	1	336	217	104	5.364,00	6.992,00	5.930,00	18,286	0,5
30/11/2010 18:15	Terça	224	220	219	30,35	42,16	1	335	220	106	5.958,00	9.006,00	5.529,00	20,493	0,5
30/11/2010 18:30	Terça	224	222	221	22,41	29,79	1	335	224	106	4.464,00	6.422,00	6.104,00	16,99	0,5
30/11/2010 18:45	Terça	224	222	221	30,8	41,91	1	341	226	104	6.425,00	9.022,00	5.668,00	21,115	0,5
30/11/2010 19:00	Terça	224	220	220	33,74	51,92	1	339	224	106	6.883,00	11.193,00	7.234,00	25,31	0,5
30/11/2010 19:15	Terça	224	220	220	31,98	56,85	1	339	224	109	6.578,00	12.266,00	8.034,00	26,878	0,5
30/11/2010 19:30	Terça	224	222	222	31,33	51,28	1	339	224	109	6.491,00	11.229,00	5.080,00	22,8	0,5
30/11/2010 19:45	Terça	224	222	222	31,25	51,88	1	339	226	109	6.444,00	11.317,00	4.800,00	22,561	0,5
30/11/2010 20:00	Terça	224	222	222	41,1	52,21	1	339	222	104	8.486,00	11.202,00	6.608,00	26,296	0,5
30/11/2010 20:15	Terça	224	222	222	31,26	62,71	1	337	222	103	6.381,00	13.419,00	9.274,00	29,074	0,5
30/11/2010 20:30	Terça	224	221	221	43,44	54,24	1	341	224	106	9.074,00	11.669,00	8.827,00	29,57	0,5
30/11/2010 20:45	Terça	224	220	219	39,76	55,44	1	349	224	106	8.556,00	11.935,00	10.398,00	30,889	0,5
30/11/2010 21:00	Terça	224	219	219	41,57	62,36	1	344	221	104	8.764,00	13.235,00	8.676,00	30,675	0,5
30/11/2010 21:15	Terça	224	219	219	46,87	52,26	1	341	224	106	9.702,00	11.153,00	10.022,00	30,877	0,5
30/11/2010 21:30	Terça	224	221	220	41,28	49,03	1	346	229	109	8.836,00	10.648,00	13.646,00	33,13	0,5
30/11/2010 21:45	Terça	224	222	221	53,31	67,73	1	346	232	106	11.488,00	14.699,00	15.344,00	41,531	0,5
30/11/2010 22:00	Terça	224	223	223	47,25	70,8	1	346	229	109	10.250,00	15.489,00	13.754,00	39,493	0,5
30/11/2010 22:15	Terça	224	224	224	40,17	64,05	1	346	226	109	8.689,00	14.107,00	10.820,00	33,616	0,5
30/11/2010 22:30	Terça	224	223	223	39,05	65,36	1	344	226	109	8.430,00	14.340,00	11.048,00	33,818	0,5
30/11/2010 22:45	Terça	224	221	221	51,62	73,62	1	346	229	109	11.107,00	16.011,00	14.381,00	41,499	0,5
30/11/2010 23:00	Terça	224	221	220	49,78	60,56	1	344	229	109	10.611,00	13.186,00	14.275,00	38,072	0,5
30/11/2010 23:15	Terça	224	222	221	49,15	64,62	1	346	229	109	10.551,00	14.134,00	13.950,00	38,635	0,5
30/11/2010 23:30	Terça	224	220	220	63,36	83,42	1	349	229	109	13.627,00	18.050,00	14.356,00	46,033	0,5
30/11/2010 23:45	Terça	224	222	221	70,44	71,19	1	349	229	109	15.268,00	15.558,00	13.374,00	44,2	0,5

Figura 4.11: Memória de massa (últimos intervalos de integralização do mês de novembro/2010) da unidade consumidora HOTEL.

O aplicativo foi utilizado para a memória de massa do mês de novembro/2010, produzindo o diagnóstico em destaque na figura 4.12.

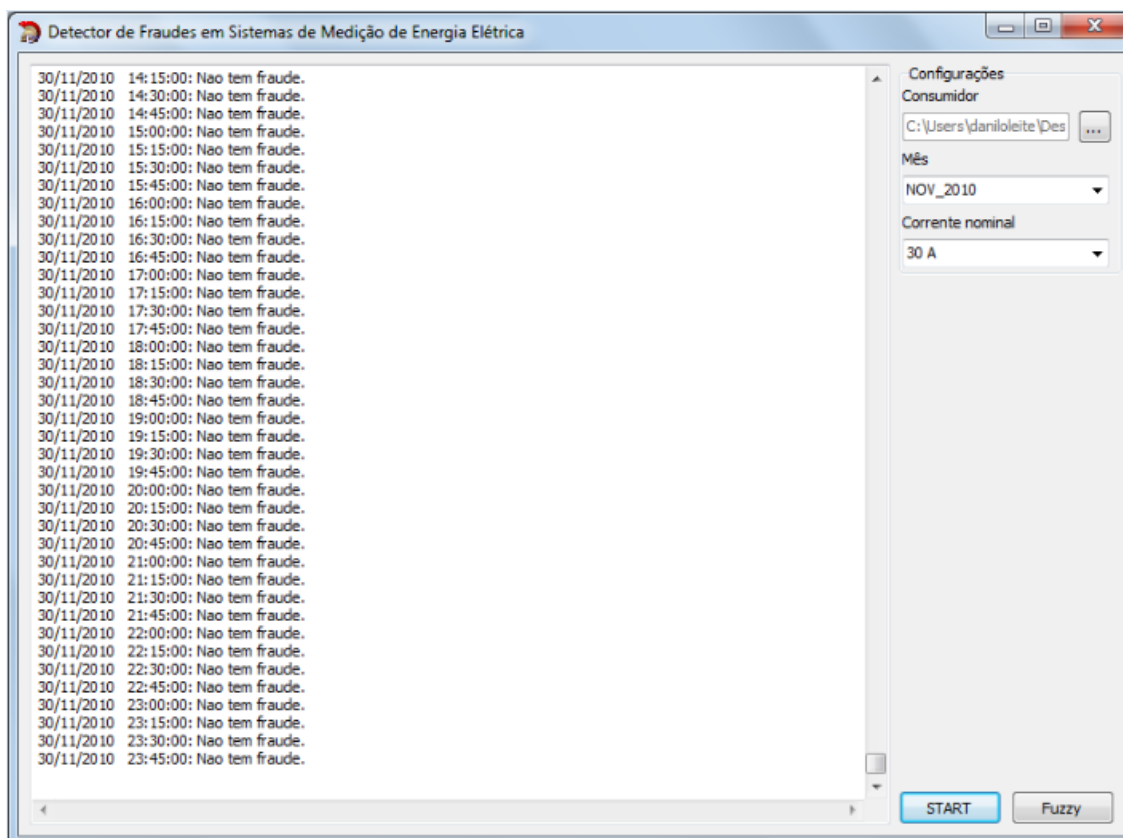


Figura 4.12: Resultado apresentado pelo software para o mês de novembro.

**Análise do resultado do caso 2:** Examinando a memória de massa da figura 4.11 observa-se que o módulo da corrente da fase C, durante todos os intervalos de integralização manteve-se menor do que 5% do valor nominal de 30 ampéres, tornando-se muito pequena, configurando-se uma pertinência 1 para a função “Muito pequena” na variável *Módulo de  $I_C$*  de que trata a tabela 3.1. Porém a porta não abriu (o indicativo 0,5 significa que *a porta não abriu*), e é condição necessária para que a lógica fuzzy seja acionada que a porta tenha sido aberta, o que não ocorreu. Portanto, diante das regras estabelecidas o algoritmo retorna a mensagem “Não tem fraude”. No entanto, o software

retornaria a mensagem que estaria ocorrendo fraude caso o evento indicado tivesse ocorrido concomitantemente com a abertura da porta da caixa de medição.

#### 4.2.3. Caso 3: SUPERMERCADO\_Memória de Massa \_nov\_2010

**Situação:** Unidade consumidora com medição direta, medidor de 30 ampéres nominais. Observa-se na figura 4.13 os últimos intervalos de integralização do mês de novembro/2010, e que no intervalo entre 17:00h e 20:30h a demanda de potência caiu a zero.

SUPERMERCADO (01/11/2010 00:00:00 até 30/11/2010 23:59:59) CORRENTE NOMINAL= 30 AMPERES																
Data	Dia	Tensão (V)			Corrente (A)			Ângulo da corrente (graus)			Potência (W)			Demanda trifásica(kW)	Condição da porta	
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C			
30/11/2010 15:15	Terça	221	219	219	37,94	42,39	34,91	326	206	81	6877	7335	6117	6,8	0,5	
30/11/2010 15:30	Terça	221	219	219	38,09	44,01	35,08	326	203	80	6903	7518	6147	6,9	0,5	
30/11/2010 15:45	Terça	222	220	220	38,39	42,95	35,28	326	202	79	6990	7465	6131	6,9	0,5	
30/11/2010 16:00	Terça	220	218	218	41,5	47,45	38,19	325	204	80	7395	8068	6577	7,3	0,5	
30/11/2010 16:15	Terça	219	218	218	40,73	47,19	37,61	324	203	77	7136	8025	6396	7,2	0,5	
30/11/2010 16:30	Terça	220	218	218	41,31	46,21	38,23	325	203	83	7361	7859	6585	7,3	0,5	
30/11/2010 16:45	Terça	221	220	219	38,25	38,53	35,43	326	205	82	6933	6866	6285	6,7	0,5	
30/11/2010 17:00	Terça	225	224	222	7,72	7,72	7,76	271	154	32	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 17:15	Terça	225	223	222	7,73	7,72	7,76	271	153	33	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 17:30	Terça	223	222	221	7,7	7,67	7,72	271	151	32	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 17:45	Terça	218	217	216	7,52	7,48	7,54	271	154	31	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 18:00	Terça	221	220	219	7,61	7,58	7,64	271	157	34	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 18:15	Terça	221	220	219	7,6	7,58	7,64	271	157	35	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 18:30	Terça	222	221	220	7,68	7,63	7,69	271	155	33	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 18:45	Terça	223	222	221	7,69	7,67	7,73	271	155	32	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 19:00	Terça	224	222	221	7,73	7,66	7,73	271	334	31	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 19:15	Terça	224	222	222	7,74	7,67	7,74	271	153	30	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 19:30	Terça	224	222	222	7,73	7,68	7,75	271	152	36	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 19:45	Terça	225	223	222	7,76	7,69	7,76	271	151	33	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 20:00	Terça	222	221	220	7,66	7,62	7,67	271	154	34	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 20:15	Terça	222	220	219	7,64	7,61	7,66	271	155	32	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 20:30	Terça	221	220	219	7,64	7,6	7,64	271	153	33	0	0	0	0,0	1	
30/11/2010 20:45	Terça	217	216	216	39,37	46,26	36,36	327	212	82	7092	7995	6440	7,2	0,5	
30/11/2010 21:00	Terça	218	217	216	38,46	45,23	35,5	326	206	79	6875	7753	6212	6,9	0,5	
30/11/2010 21:15	Terça	218	216	216	37,77	44,38	34,82	326	206	84	6753	7574	6093	6,8	0,5	
30/11/2010 21:30	Terça	218	217	217	37,63	44,32	34,88	325	203	81	6645	7502	6055	6,7	0,5	
30/11/2010 21:45	Terça	220	219	218	31,65	37,5	36,26	323	210	79	5501	6487	6798	6,3	0,5	
30/11/2010 22:00	Terça	220	219	218	31,97	39,18	36,35	323	208	80	5556	6693	6737	6,3	0,5	
30/11/2010 22:15	Terça	220	219	219	37,66	44,62	35,11	326	202	79	6794	7623	6152	6,9	0,5	

Figura 4.13: Memória de massa (últimos intervalos de integralização do mês de novembro/2010) da unidade consumidora SUPERMERCADO.

O aplicativo foi utilizado para a memória de massa do mês de novembro/2010, produzindo o diagnóstico em destaque na figura 4.14.

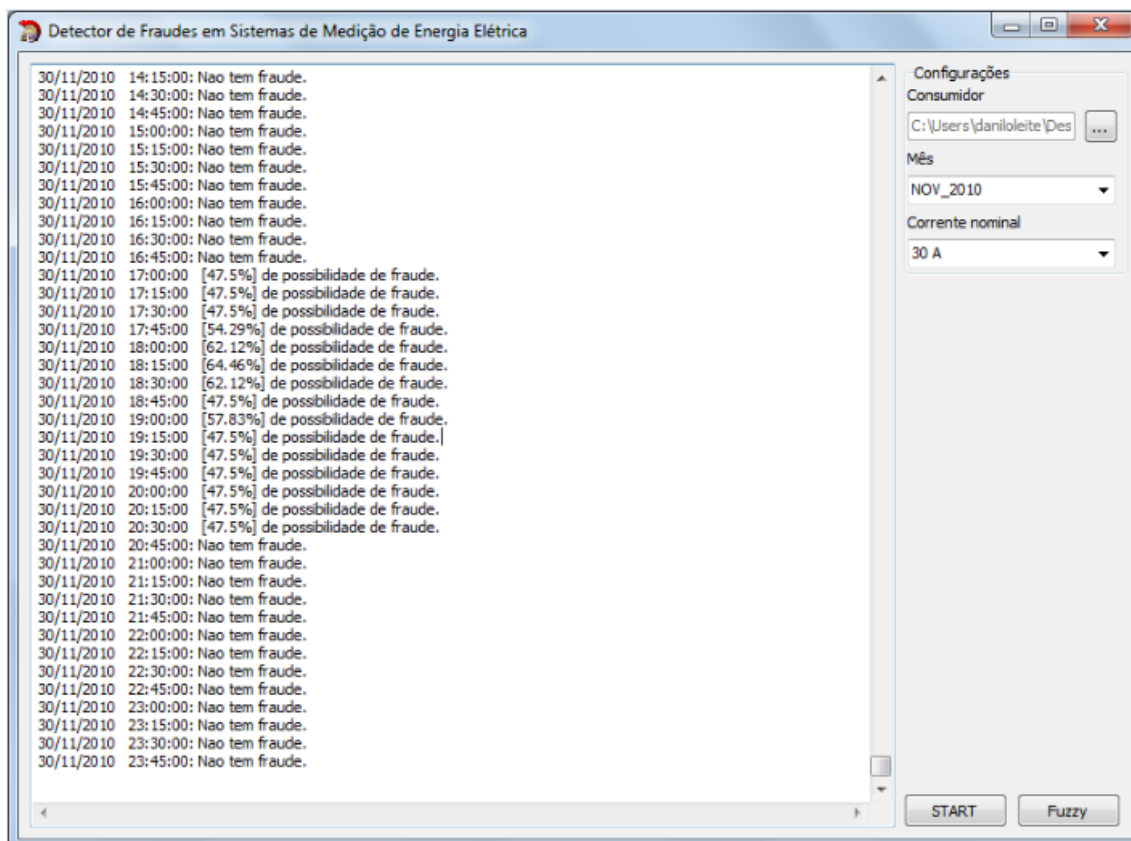


Figura 4.14. Resultado apresentado pelo software para o mês de novembro

**Análise do resultado do caso 3:** Examinando a memória de massa da figura 4.13 observa-se nos últimos intervalos de integralização do mês de novembro/2010, notadamente no intervalo entre 17:00h e 20:30h que a demanda de potência caiu a zero. Configura-se uma queda de kW inaceitável, e a regra 8 da tabela 3.2 foi atendida; Também os ângulos de  $I_A$ , de  $I_B$  e de  $I_C$  posicionaram-se em zonas de transição entre as funções “Indesejável” e “Esperado Indutivo”, portanto com pertinências diferenciadas para a função “Esperado Indutivo”. O algoritmo fazendo uso da lógica *fuzzy* retornou mensagens por intervalos de amostragem, estabelecendo “percentuais de possibilidade de fraude”.

Os três estudos de casos apresentados e analisados neste capítulo comprovam a validade do método e a eficácia do algoritmo desenvolvido a partir de conceitos *fuzzy*. Os casos foram escolhidos em função da diversidade dos mesmos, de forma que o primeiro caso possui uma anomalia no sentido do vetor corrente elétrica, o segundo caso possui uma anomalia na intensidade da corrente elétrica de uma das fases, e o terceiro caso possui uma anomalia na variação abrupta da curva de demanda de energia elétrica.

---

# Capítulo 5

## Conclusões

---

A necessidade de suprir as deficiências de informação associadas às atividades de controle de perdas não-técnicas, originadas em fraudes e deficiências técnicas de sistemas de medição de energia elétrica, reclama um novo processo de gestão, um processo de Garantia de Receitas. Esse processo tem por função gerar informações que permitam determinar, para o conjunto de unidades consumidoras abrangidas, as seguintes questões:

- O perfil atual da evolução dos consumidores;
- A manutenção do estado de normalidade nos perfis identificados como conformes, mediante supervisão contínua;
- A automatização desta supervisão, para que as deficiências sejam solucionadas dentro do ciclo de faturamento, minimizando o tempo de atendimento e otimizando a assertividade.

A partir da determinação rápida da existência de perdas não técnicas, a companhia pode atuar em regime de pronta resposta à situação, desta maneira evitando que a condição de perda permaneça estabelecida a ponto de infligir uma perda comercial efetiva (em função de permanecer por um ou mais ciclos de faturamento). A solução passa pela implantação de um sistema de tomada de decisão por lógica *fuzzy* via rotinas de programação conectadas ao banco de dados de um sistema supervisorio SCADA. Foi utilizado o aplicativo MATLAB e implementada uma rotina em C++, sendo validada pelos resultados demonstrados.

Como proposta para trabalhos futuros sugerimos a evolução do desenvolvimento do algoritmo com a possibilidade de os usuários customizarem as variáveis lingüísticas de entrada, as funções de pertinência, os limites do universo de discurso, os pontos notáveis

das funções de pertinência escolhidas, as regras de inferência, e assim qualquer distribuidora de energia elétrica possa modificar as premissas de acordo com as suas necessidades. A partir desta pesquisa, programadas de P&D podem ser implementados, para validação do potencial do produto no mercado.

---

# Referências Bibliográficas

---

Alves, José Luiz Loureiro (2005), *Instrumentação, Controle e Automação de Processos*, 1ª edição, LTC Editora, Rio de Janeiro, RJ.

Bai, Y., Zhuang, H. & Wang, D, eds., (2006), *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*, 1ª edição, Springer Editions, London, UK.

Bailey, David & WRIGHT, Edwin (2003), *Practical SCADA for Industry*, 1ª edição, Elsevier Newnes, Mumbai, IN.

Bilobrovec, Marcelo (2005), Sistema especialista em lógica fuzzy para o controle, gerenciamento e manutenção da qualidade em processo de aeração de grãos, Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia de Produção, UTFPR, Ponta Grossa, PR.

Bispo dos Santos, Leonardo T. (2009), Sistema de apoio à decisão para o diagnóstico de faltas em transformadores de potência, Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, PUC, Rio Janeiro, RJ.

Bolanos, Júlio R. M. (2007), Controlador supervisor inteligente para sistemas híbridos eólico-diesel-bateria de pequeno porte, Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, USP, São Paulo, SP.

Ceyhun, Eksin., Mújde, Güzelkaya., Engin, Yesil & Ibrahim, Eksin (2008), 'Fuzzy logic approach to mimic decision making behavior of humans in stock management game', *Proceedings of the 26th International Conference of the Systems Dynamics Society, Athens, Greece*.

- Decanini, José Guilherme M. S. & Minussi Carlos R. (2007), 'Aplicação da lógica nebulosa para detecção e classificação de faltas de curto-circuito em subestação de distribuição de energia elétrica', *XXX CNMAC Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, Florianópolis, SC, vol. 1, pp. 1-7.
- Grant, Paul & Naesh, Ole (2005), 'Fuzzy logic and decision-making in anaesthetics', *Journal of the Royal Society of Medicine* **98**(1), 7-9.
- Ibrahim, Ahmad I. (2004), *Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications*, 1ª edição, Elsevier Newnes, Burlington, USA.
- Jantzen, Jan (2007), *Foundations of Fuzzy Control*, 1ª edição, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Lima, Márcio P. & Amorim, Cláudio A. (2010), 'Proposta de um modelo fuzzy para apoio à tomada de decisão no controle de tráfego aéreo do aeroporto internacional de Salvador', *Revista Eletrônica de Iniciação Científica*, Ano VII, 2007, número I.  
\*<http://www.bibliotecadigital.sbc.org.br/>
- Moraes, Cícero C. de & Castrucci, Plínio de L. (2007), *Engenharia de Automação Industrial*, 2ª edição, LTC Editora, Rio de Janeiro, RJ.
- Passino, Kevin M. & Yurkovich, Stephen (1998), *Fuzzy Control*, 1ª edição, Addison Wesley, Menlo Park, USA.
- PPgEE da UFRN (2006), Sobre a preparação de propostas de tema, dissertações e teses no programa de pós-graduação em engenharia elétrica da UFRN.  
\*<http://www.ppgee.ufrn.br/>
- Reznik, Leonid (1997), *Fuzzy Controllers*, 1ª edição, Newnes Editions, Oxford, UK.

Rosário, João M. (2005), *Princípios de Mecatrônica*, 1ª edição, Pearson Prentice Hall, São Paulo, SP.

Samarasinghe, S., Lin, M. & Kulasiri, D. (2005), A fuzzy smart based dynamic decision making system: a voltage control case study.

\*<http://www.mssanz.org.au/>

Sandi, Sandra & Correa, Cláudio (1999), 'Lógica Nebulosa', *V Escola de Redes Neurais*, pp. C073-c099, ITA, São José dos Campos, SP.

Shaw, Ian S. & Simões, Marcelo G. (1999), *Controle e Modelagem Fuzzy*, 1ª edição, Editora Edgard Blücher, São Paulo, SP.

Siddiqui, A. S. & Ahmad, Aziz (2010), 'Use of SCADA systems in power system automation', *International Journal of Engineering Studies*, vol. 2, n. 2, pp. 213-222.

Sivanandam, S. N., Sumathi, S. & Deepa, S. N.(2007), *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*, 1ª edição, Springer Editions, Berlim, Germany.

Urzedá, Calyton César de (2006), Software SCADA como plataforma para a racionalização inteligente de energia elétrica em automação predial, Dissertação de mestrado, Faculdade Tecnologia em Engenharia Elétrica, UNB, Brasília, DF.



---

# Apêndice

---

## A Exemplos com simulações em MATLAB

### Situação A1

#### Variáveis de entrada no intervalo de amostragem da situação A1

$$V_A = 220 \text{ V} \quad V_B = 220 \text{ V} \quad V_C = 220 \text{ V}$$

$$I_A = 80\% \text{ de } I_A \text{ nominal} \quad I_B = 80\% \text{ de } I_B \text{ nominal} \quad I_C = 80\% \text{ de } I_C \text{ nominal}$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_A} = 300^\circ$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_B} = 200^\circ$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_C} = 100^\circ$$

$$\text{Queda de kWh} = 30\%$$

$$\text{Queda de kW} = 30\%$$

#### Interpretação da situação A1

As três tensões estão dentro da faixa de valores de tensões plenamente aceitáveis:  $\geq 220\text{V}$ . As três correntes estão dentro da faixa de valores de correntes plenamente aceitáveis:  $\geq 15\%$  de seus valores nominais. O ângulo do fasor  $I_A$  está na faixa entre  $260^\circ$  e  $360^\circ$ , portanto esperado indutivo. O ângulo do fasor  $I_B$  está na faixa entre  $140^\circ$  e  $250^\circ$ , portanto esperado indutivo já que a tensão da fase B encontra-se posicionada a  $240^\circ$ . O ângulo do fasor  $I_C$  está na faixa entre  $20^\circ$  e  $130^\circ$ , portanto esperado indutivo. A queda de kWh está inferior à  $50\%$ , portanto plenamente aceitável. A queda de kW está inferior à  $50\%$ , portanto plenamente aceitável.

Resultado da interpretação: Não tem fraude

A simulação no MATLAB apresentou como resultado (figura A1) Diagnóstico= 4,5:  
Não tem fraude

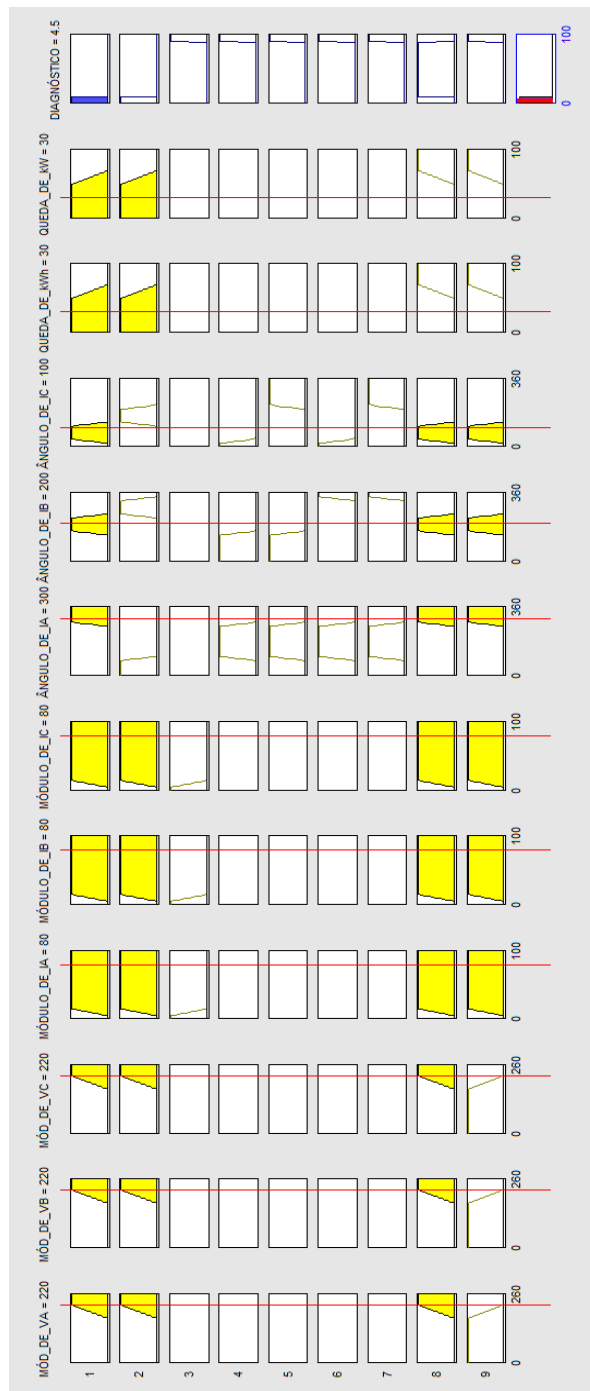


Figura A1. Diagnóstico para a situação 1

**Situação A2****Variáveis de entrada no intervalo de amostragem da situação A2**

$$V_A = 220 \text{ V} \quad V_B = 220 \text{ V} \quad V_C = 220 \text{ V}$$

$$I_A = 80\% \text{ de } I_A \text{ nominal} \quad I_B = 80\% \text{ de } I_B \text{ nominal} \quad I_C = 10\% \text{ de } I_C \text{ nominal}$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_A} = 300^\circ$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_B} = 200^\circ$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_C} = 100^\circ$$

$$\text{Queda de kWh} = 30\%$$

$$\text{Queda de kW} = 30\%$$

**Análise da situação A2**

As três tensões estão dentro da faixa de valores de tensões plenamente aceitáveis:  $\geq 220\text{V}$ . As correntes  $I_A$  e  $I_B$  estão dentro da faixa de valores de correntes plenamente aceitáveis:  $\geq 15\%$  de seus valores nominais. A corrente na fase  $I_C$  está dentro de uma faixa nebulosa, entre 5% e 15% do seu valor nominal; tem portanto um conteúdo qualitativo de ser muito pequena como também tem um conteúdo qualitativo de ser aceitável. O ângulo do fasor  $I_A$  está na faixa entre  $260^\circ$  e  $360^\circ$ , portanto esperado indutivo. O ângulo do fasor  $I_B$  está na faixa entre  $140$  e  $250^\circ$ , portanto esperado indutivo. O ângulo do fasor  $I_C$  está na faixa entre  $20^\circ$  e  $130^\circ$ , portanto esperado indutivo. A queda de kWh está inferior a 50%, portanto plenamente aceitável. A queda de kW está inferior a 50%, portanto plenamente aceitável.

Resultado da análise: Haverá uma possibilidade de fraude e o percentual desta possibilidade será estabelecido pelo algoritmo.

A simulação no MATLAB apresentou como resultado (figura A2.) Diagnóstico=  
51,9%: Percentual de possibilidade de fraude

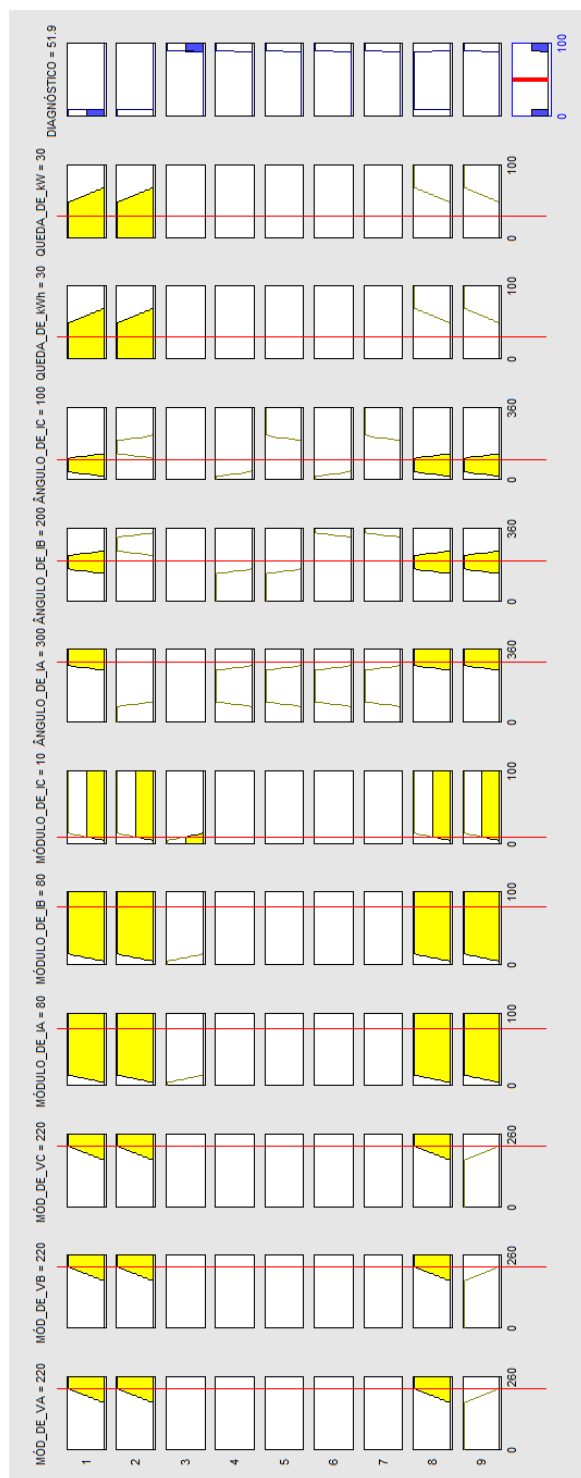


Figura A2. Diagnóstico para a situação 2

**Situação A3****Variáveis de entrada no intervalo de amostragem da situação A3**

$$V_A = 220 \text{ V} \quad V_B = 220 \text{ V} \quad V_C = 220 \text{ V}$$

$$I_A = 80\% \text{ de } I_A \text{ nominal} \quad I_B = 80\% \text{ de } I_B \text{ nominal} \quad I_C = 80\% \text{ de } I_C \text{ nominal}$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_A} = 180^\circ$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_B} = 200^\circ$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_C} = 100^\circ$$

$$\text{Queda de kWh} = 30\%$$

$$\text{Queda de kW} = 30\%$$

**Análise da situação A3**

As três tensões estão dentro da faixa de valores de tensões plenamente aceitáveis:  $\geq 220 \text{ V}$ . As três correntes estão dentro da faixa de correntes plenamente aceitáveis:  $\geq 15\%$  de seus valores nominais. O ângulo do fasor  $I_A$  está na faixa entre  $80^\circ$  e  $280^\circ$ , portanto é indesejável. O ângulo do fasor  $I_B$  está entre  $140^\circ$  e  $250^\circ$ , portanto esperado indutivo. O ângulo do fasor  $I_C$  está entre  $20^\circ$  e  $130^\circ$ , portanto esperado indutivo. A queda de kWh está inferior à  $50\%$ , portanto plenamente aceitável. A queda de kW está inferior à  $50\%$ , portanto plenamente aceitável.

Resultado da análise: TEM FRAUDE porque a corrente  $I_A$  está invertida.

A simulação no MATLAB apresentou como resultado (figura A3) Diagnóstico= 95:

Tem fraude

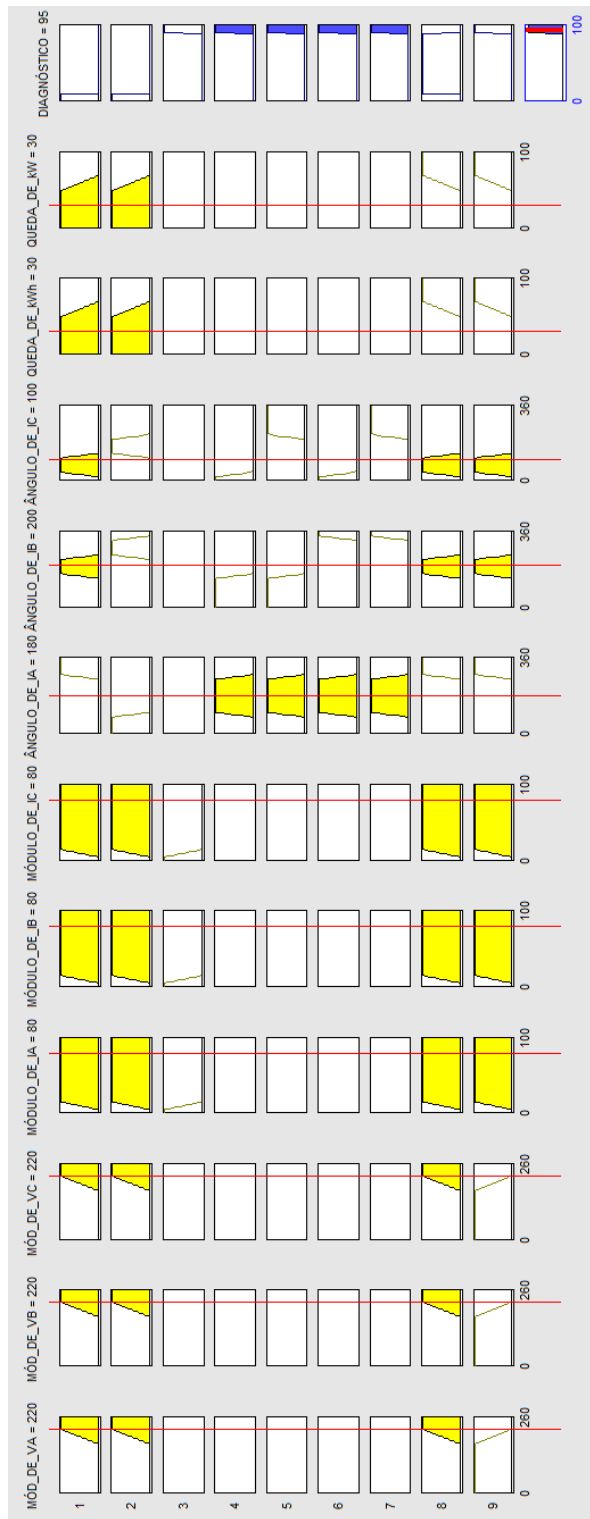


Figura A3. Diagnóstico para a situação 3

**Situação A4****Variáveis de entrada no intervalo de amostragem da situação A4**

$$V_A = 220 \text{ V} \quad V_B = 220 \text{ V} \quad V_C = 220 \text{ V}$$

$$I_A = 80\% \text{ de } I_A \text{ nominal} \quad I_B = 80\% \text{ de } I_B \text{ nominal} \quad I_C = 80\% \text{ de } I_C \text{ nominal}$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_A} = 300^\circ$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_B} = 200^\circ$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_C} = 100^\circ$$

$$\text{Queda de kWh} = 90\%$$

$$\text{Queda de kW} = 90\%$$

**Análise da situação A4**

As três tensões estão dentro da faixa de valores de tensões aceitáveis:  $\geq 220\text{V}$ . As três correntes estão dentro da faixa de valores de correntes plenamente aceitáveis:  $\geq 15\%$  de seus valores nominais. O ângulo do fasor  $I_A$  está entre  $260^\circ$  e  $360^\circ$ , portanto esperado indutivo. O ângulo do fasor  $I_B$  está entre  $140^\circ$  e  $250^\circ$ , portanto esperado indutivo. O ângulo do fasor  $I_C$  está entre  $20^\circ$  e  $130^\circ$ , portanto esperado indutivo. A queda de kWh está superior à  $70\%$ , portanto plenamente inaceitável. A queda de kW está superior à  $70\%$ , portanto plenamente inaceitável.

Resultado da análise: Há um percentual de possibilidade de fraude.

A simulação no MATLAB apresentou como resultado (figura A4) Diagnóstico=  
49,5%: Percentual de possibilidade de fraude

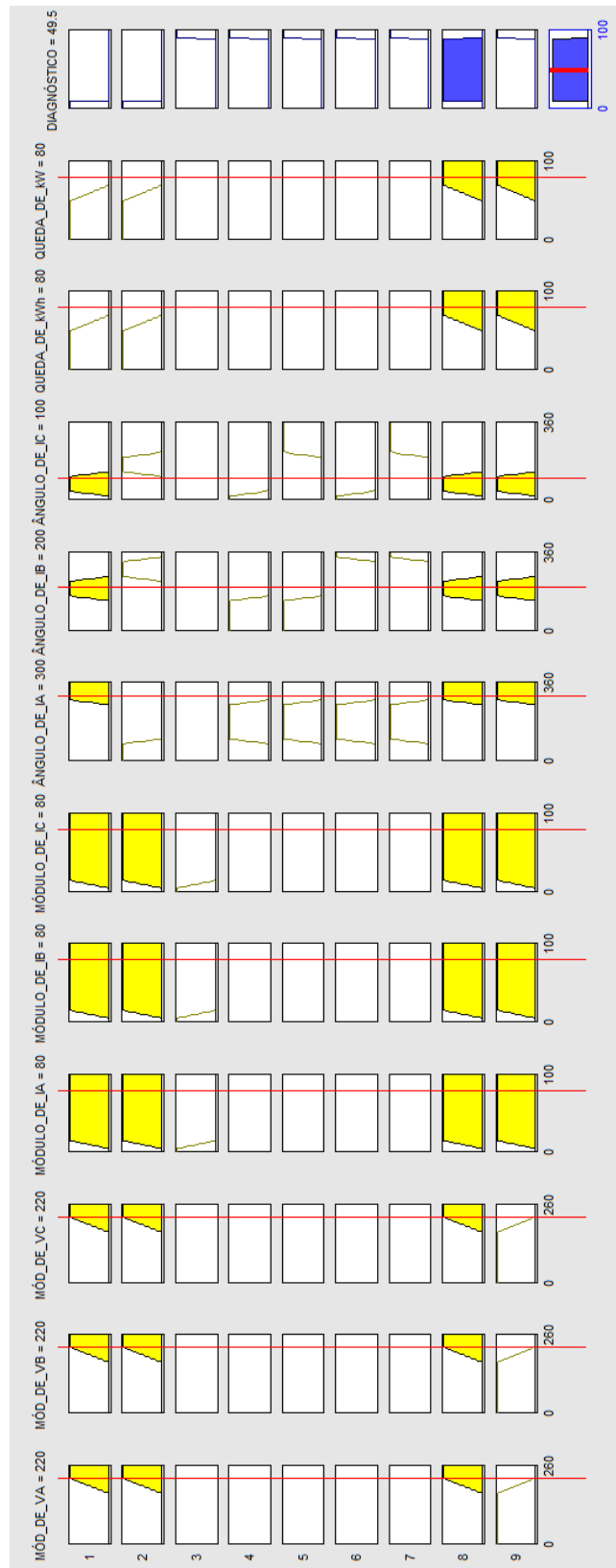


Figura A4. Diagnóstico para a situação 4

**Situação A5****Variáveis de entrada no intervalo de amostragem da situação A5**

$$V_A = 185 \text{ V} \quad V_B = 185 \text{ V} \quad V_C = 185 \text{ V}$$

$$I_A = 80\% \text{ de } I_A \text{ nominal} \quad I_B = 80\% \text{ de } I_B \text{ nominal} \quad I_C = 80\% \text{ de } I_C \text{ nominal}$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_A} = 300^\circ$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_B} = 200^\circ$$

$$\hat{\text{Ângulo do fasor } I_C} = 100^\circ$$

$$\text{Queda de kWh} = 60\%$$

$$\text{Queda de kW} = 60\%$$

**Análise da situação A5**

As três tensões estão em uma zona nebulosa:  $170\text{V} \leq V_A, V_B, V_C \leq 220\text{V}$ . As três correntes estão dentro da faixa de valores de correntes plenamente aceitáveis:  $\geq 15\%$  de seus valores nominais. O ângulo do fasor  $I_A$  está entre  $260^\circ$  e  $360^\circ$ , portanto esperado indutivo. O ângulo do fasor  $I_B$  está entre  $140^\circ$  e  $250^\circ$ , portanto esperado indutivo. O ângulo do fasor  $I_C$  está entre  $20^\circ$  e  $130^\circ$ , portanto esperado indutivo. A queda de kWh está em uma zona nebulosa:  $50\% \leq \text{Queda de kWh} \leq 70\%$  tendo conteúdo de aceitável e conteúdo de inaceitável. A queda de kW está em uma zona nebulosa  $50\% \leq \text{Queda de kW} \leq 70\%$  tendo conteúdo de aceitável e conteúdo de inaceitável.

Resultado da análise: Percentual de possibilidade de fraude.

A simulação no MATLAB apresentou como resultado (figura A5) Diagnóstico = 53%:  
Percentual de possibilidade de fraude

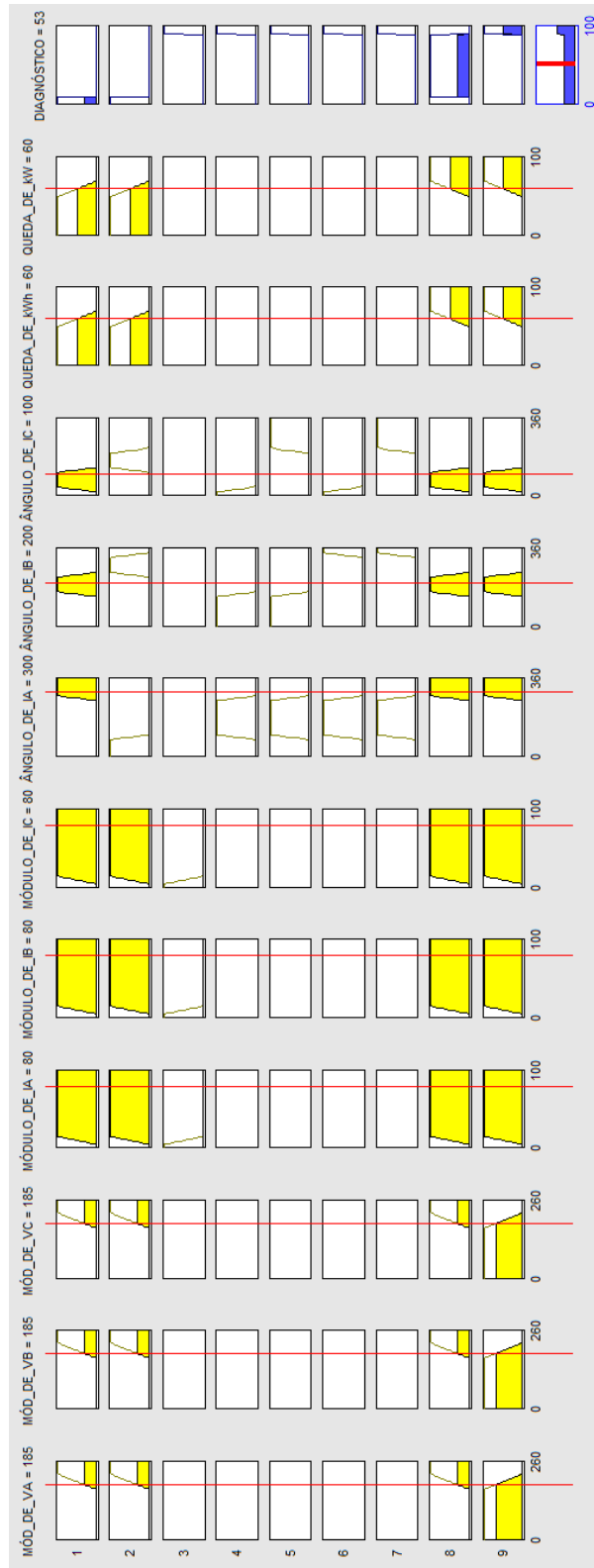


Figura A5. Diagnóstico para a situação 5