

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Escola de Engenharia

Gabriel Cardoso Salgado

**ANÁLISE E PROJETO DE ALGORITMO DE DETECÇÃO ROBUSTA DE  
AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

Belo Horizonte  
2017



**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**ANÁLISE E PROJETO DE ALGORITMO DE DETECÇÃO  
ROBUSTA DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

Gabriel Cardoso Salgado

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de potência

Linha de pesquisa: Eletrônica de potência

Orientador: Prof. Igor Amariz Pires

Belo Horizonte - MG

Setembro de 2017

S164a

Salgado, Gabriel Cardoso.

Análise e projeto de algoritmo de detecção robusta de afundamento de tensão [manuscrito] Gabriel Cardoso Salgado. – 2017.  
xviii, 112 f., enc.: il.

Orientador: Igor Amariz Pires.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 109-112.

Bibliografia: f. 103-107.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Qualidade - Teses. 3. Energia elétrica - Falhas - Teses. I. Pires, Igor Amariz. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

**“ANÁLISE E PROJETO DE ALGORITMO DE DETECÇÃO ROBUSTA DE  
AFUNDAMENTOS DE TENSÃO”**

**Gabriel Cardoso Salgado**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

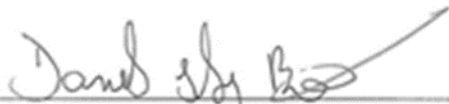
Aprovada em 15 de setembro de 2017.

Por:



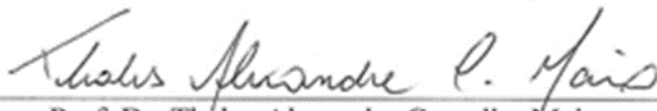
---

Prof. Dr. Igor Amariz Pires  
DELT (UFMG) – Orientador



---

Prof. Dr. Danilo Iglesias Brandão  
DEE (UFMG)



---

Prof. Dr. Thales Alexandre Carvalho Maia  
DEE (UFMG)

Belo Horizonte  
2017









## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que me guardou e me proveu tudo que eu precisei por toda a minha vida.

A minha família, que esteve sempre comigo e me apoiando.

Ao meu orientador, prof. Igor, que me ajudou muito no projeto.

À turma do laboratório TESLA, que me ajudou em parte prática do projeto.



Louvor, e glória, e sabedoria, e ação de graças, e honra, e poder, e força ao nosso Deus, para todo o sempre. Amém.  
Apocalipse, capítulo 7, versículo 12.



## RESUMO

A qualidade de energia tem se destacado nos últimos anos principalmente com o uso de cargas eletrônicas em atividades industriais. Por essa razão, diversos estudos são motivados a buscar soluções para problemas relacionados a qualidade de energia elétrica. O restaurador dinâmico de tensão é considerado uma solução em hardware eficiente e de baixo custo. Uma etapa de detecção do fenômeno de afundamento de tensão é requerida nessa solução, a fim de acionar uma injeção de tensão sobre um transformador-série para fazer a compensação contra o afundamento. Essa demanda levou diversos estudos a fazerem propostas de algoritmos de detecção desse distúrbio em um sinal de medição da tensão da rede. A característica requerida para um algoritmo de detecção de afundamento de tensão é a rapidez para a detecção de início e fim do distúrbio. É desejável que o algoritmo seja capaz de entregar informações de salto de fase e profundidade instantâneas do afundamento de tensão. Este trabalho faz uma comparação entre diversas técnicas tradicionais de detecção encontradas na literatura e propõe um algoritmo baseado em um comitê composto de algumas técnicas selecionadas. Esse comitê distribui pesos entre as técnicas segundo o estado de presença de afundamento de forma a explorar as vantagens de cada uma. As vantagens e desvantagens de cada técnica são expostas em simulação com dados reais de medição de tensão de rede com ocorrência de afundamento. O algoritmo proposto também passa pelas mesmas simulações e é provada a sua robustez a ruídos, harmônicos e transitórios rápidos. Para complementar a demonstração do desempenho do algoritmo proposto, é realizado um experimento com medição real e uma fonte de tensão com a ocorrência de afundamento programado. Tanto as técnicas tradicionais como o algoritmo proposto são provados pelo experimento e analisados pelos resultados.

Palavras-chave: Qualidade de energia elétrica. Restaurador dinâmico de tensão. Afundamentos de tensão. Detecção de afundamentos de tensão.

## ABSTRACT

Power quality has been an important topic in the last years with usage of electronic loads in industrial activities. For this reason, several studies are motivated to search a solution for power quality problems. The dynamic voltage restorer is pointed as an efficient and low cost hardware solution. In this solution, it is required to detect voltage sag in order to inject a voltage in series transformer to compensate the sag. It has motivated several studies that propose algorithms to detect this disturbance from source voltage measurement. The required feature for voltage sag detection algorithm is speed for detection of the start and end times of disturbance. It is desirable that the algorithm yields instantaneous phase jump and deep of voltage sag. This work compares several traditional detection techniques from literature and proposes a committee based algorithm composed of selected techniques. This committee distributes weight to techniques according to the state of voltage sag presence in order to explore advantages of each one. Advantages and disadvantages of each traditional technique are shown in simulation with real measurement data of sag in source voltage. The proposed algorithm also passes on simulations and it is proved its robustness to noise, harmonics and fast transitions. Finally, an experiment validated the proposed algorithm performance with real measurement from source voltage with programmed sag. Both the traditional techniques and the proposed technique are proved by experiment and evaluated by results.

Keywords: Power quality. Voltage dynamic restorer. Voltage sag. Voltage sag detection.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplo de afundamento de tensão. ....	3
Figura 2.2: Definições de problemas de qualidade de energia, incluindo afundamento de tensão, em termos de intensidade e duração. Fonte: [8]. ....	4
Figura 2.3: Curvas CBEMA e ITIC para representar o perfil de tolerância de um equipamento a variações na qualidade de energia elétrica na sua alimentação em termos de nível de tensão e duração.....	5
Figura 2.4: Ilustração de definições importantes sobre afundamento de tensão. ....	7
Figura 2.5: Tipos de afundamentos de tensão em suas representações por equações das tensões de fase, exemplo de fasores e exemplo no domínio do tempo. ....	8
Figura 2.6: Exemplo de afundamento de tensão e indicações de início e fim da detecção pelo método de monitoramento do valor no último pico. ....	16
Figura 2.7: Diagrama de uma PLL trifásica para rastreamento do ângulo-fase de um sistema trifásico e monitoramento da componente $v_{dt}$ . ....	19
Figura 2.8: Diagrama de uma PLL monofásica para rastreamento do ângulo-fase de uma fase de tensão e monitoramento da componente $v_{dt}$ usando transformada Park inversa. ....	20
Figura 2.9: Diagrama de uma PLL monofásica para rastreamento do ângulo-fase de uma fase de tensão e monitoramento da componente $v_{dt}$ usando o atraso puro de tempo em $vt$ . ....	20
Figura 2.10: Diagrama de uma PLL monofásica para rastreamento do ângulo-fase de uma fase de tensão e monitoramento da componente $v_{dt}$ usando a derivada de $vt$ . ....	21
Figura 2.11: Exemplo de afundamento de tensão e envelope em torno da referência senoidal para detecção pelo método de monitoramento do desvio de valor instantâneo.....	24
Figura 2.12: Diagrama de blocos de produção de sinal de comandos de chaveamentos para a ponte de IGBTs. Com essa forma de chavear, a tensão da carga $v_l$ é controlada para ficar tão próxima quanto possível da tensão de referência $v_r$ . ....	26
Figura 2.13: Diagrama de circuitos do restaurador dinâmico de tensão mostrando os sinais de controle obtidos pela técnica de controle de tensão com histerese sobre as chaves IGBTs da ponte trifásica para atuação em uma carga trifásica. ....	27
Figura 2.14: Diagrama de circuitos do restaurador dinâmico de tensão mostrando o sinal de controle obtido pela técnica de controle de tensão com histerese sobre as chaves IGBTs da ponte monofásica para atuação em uma carga monofásica. ....	28
Figura 3.1: Diagrama da malha de controle não linear da PLL para rastrear o ângulo-fase do sinal de entrada de tensão de rede senoidal. ....	31

Figura 3.2: Gráfico da função descritiva da função seno. O gráfico vem das referências [43] e [44] e mostra de forma genérica com um ganho da frequência para representar harmônica de ordem $m$ e amplitude $M$ . .....	34
Figura 3.3: Análise de ciclo limite em PLL com trajetórias dos elementos linear e não linear parametrizando a frequência e a amplitude de um sinal senoidal de saída do elemento linear que alimenta o elemento não linear. ....	35
Figura 3.4: Desempenho da PLL <sub>1</sub> , incluindo o erro entre o rastreamento – sinal de referência construído pela PLL – e o sinal a se rastrear o ângulo-fase e os instantes inicial e final de ambos os sinais, as componentes DQ e os ângulos-fase do rastreamento e do sinal rastreado. ....	38
Figura 3.5: Desempenho da PLL <sub>2</sub> , incluindo o erro entre o rastreamento – sinal de referência construído pela PLL – e o sinal a se rastrear o ângulo-fase e os instantes inicial e final de ambos os sinais, as componentes DQ e os ângulos-fase do rastreamento e do sinal rastreado. ....	40
Figura 3.6: Desempenho da PLL <sub>3</sub> , incluindo o erro entre o rastreamento – sinal de referência construído pela PLL – e o sinal a se rastrear o ângulo-fase e os instantes inicial e final de ambos os sinais, as componentes DQ e os ângulos-fase do rastreamento e do sinal rastreado. ....	41
Figura 3.7: Diagrama do bloco de controle de tensão com histerese. As entradas são a tensão de rede e o sinal de detecção de afundamento de tensão. As saídas são a tensão sobre a carga, a tensão de compensação sobre o transformador em série, o erro de tensão na carga e a tensão de referência obtida pela PLL. ....	42
Figura 3.8: Desempenho do controle de tensão com histerese com afundamento de tensão de dados simulados. Inclui a tensão de rede, tensão na carga com os limites superior e inferior da banda de histerese, tensão de compensação no transformador em série e o erro da tensão na carga em relação a tensão de referência. ....	43
Figura 3.9: Desempenho do controle de tensão com histerese com afundamento de tensão de dados reais. Inclui a tensão de rede, tensão na carga com os limites superior e inferior da banda de histerese, tensão de compensação no transformador em série e o erro da tensão na carga em relação a tensão de referência. ....	44
Figura 3.10: Desempenho do controle de tensão com histerese com afundamento de tensão de dados reais. Inclui a tensão de rede, tensão na carga com os limites superior e inferior da banda de histerese, tensão de compensação no transformador em série e o erro da tensão na carga em relação a tensão de referência. Nessa simulação, a tensão do barramento CC foi reduzida a $V_{cc} = 0,5pu$ . ....	46
Figura 3.11: Afundamento de tensão para as simulações de detecção com cada uma das técnicas apresentadas. ....	47



Figura 3.12: Grupos 1 a 14 de dados de medições reais de tensão de rede com ocorrências de afundamento de tensão. Os dados foram obtidos da referência [46]. Cada gráfico mostra as séries de dados temporais das três fases em uma duração de 0,1s e tempo de amostragem de 250 $\mu$ s. ....	48
Figura 3.13: Grupos 15 a 19 de dados de medições reais de tensão de rede com ocorrências de afundamento de tensão. Os dados foram obtidos da referência [46]. Cada gráfico mostra as séries de dados temporais das três fases em uma duração de 0,1s e tempo de amostragem de 250 $\mu$ s. ....	49
Figura 3.14: Implementação da técnica de monitoramento do valor no último pico em diagrama de blocos. ....	50
Figura 3.15: Implementação do bloco de detecção de pico no sinal de tensão. ....	50
Figura 3.16: Resultado da simulação da técnica de monitoramento do valor no último pico com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão. ....	51
Figura 3.17: Implementação da técnica de monitoramento do valor de pico em diagrama de blocos. ....	52
Figura 3.18: Obtenção da componente beta com atraso puro de tempo. ....	52
Figura 3.19: Obtenção da componente beta com a derivada da tensão e ajuste de escala. ....	52
Figura 3.20: Resultado da simulação da técnica de monitoramento do valor de pico, com obtenção da componente beta através de atraso puro de tempo, com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão. ....	53
Figura 3.21: Resultado da simulação da técnica de monitoramento do valor de pico, com obtenção da componente beta através de derivação e ajuste de escala, com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão. ....	53
Figura 3.22: Implementação da técnica de monitoramento do valor eficaz em diagrama de blocos. ....	54
Figura 3.23: Implementação do bloco de cálculo do valor eficaz de tensão. ....	54
Figura 3.24: Resultado da simulação da técnica de monitoramento do valor eficaz com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão. ....	55
Figura 3.25: Implementação da técnica de monitoramento do desvio do valor instantâneo em diagrama de blocos. ....	56
Figura 3.26: Resultado da simulação da técnica de monitoramento do desvio do valor instantâneo com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão. ....	56

Figura 3.27: Desvio do valor instantâneo de tensão de rede em relação a tensão de referência durante a simulação da técnica de monitoramento dessa variável com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão. ....	56
Figura 3.28: Resultado da simulação da técnica de análise da transformada de Fourier com janela com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão. ....	57
Figura 3.29: Resultados das simulações das técnicas de detecção de afundamento de tensão com os grupos 1 a 14 dos dados reais de medição com afundamento de tensão. ....	58
Figura 3.30: Resultados das simulações das técnicas de detecção de afundamento de tensão com os grupos 15 a 19 dos dados reais de medição com afundamento de tensão. ....	59
Figura 3.31: Resultados com os sinais de erro da tensão na carga nas simulações com atuação contra afundamento de tensão de cada técnica de detecção em conjunto com controle de tensão com histerese com dados reais. ....	62
Figura 3.32: Resultados com os sinais de erro da tensão na carga em maior resolução no momento de detecção de início nas simulações com atuação contra afundamento de tensão de cada técnica de detecção em conjunto com controle de tensão com histerese com dados reais. ....	62
Figura 3.33: Resultados com a tensão na carga restaurada nas simulações com atuação contra afundamento de tensão de cada técnica de detecção em conjunto com controle de tensão com histerese com dados reais. ....	63
Figura 3.34: Resultados gráficos de duração e profundidade do afundamento de tensão mitigado pela atuação de controle de tensão com histerese em conjunto com cada uma das técnicas de detecção do distúrbio e do afundamento de tensão não mitigado. ....	65
Figura 3.35: Implementação da técnica proposta de comitê de técnicas de detecção em diagrama de blocos. ....	69
Figura 3.36: Resultados das simulações das técnicas de detecção de afundamento de tensão e do comitê proposto com os grupos 1 a 14 dos dados reais de medição com afundamento de tensão. ....	70
Figura 3.37: Resultados das simulações das técnicas de detecção de afundamento de tensão e do comitê proposto com os grupos 15 a 19 dos dados reais de medição com afundamento de tensão. ....	71
Figura 4.1: Fluxograma dos programas de técnicas de detecção de afundamento de tensão mostrando detalhes de alerta para atrasos nos ciclos de execução. ....	78
Figura 4.2: Diagrama de circuitos do condicionamento de sinais de tensões monitoradas com protótipo de detector de afundamento de tensão em Arduino. ....	80

Figura 4.3: Montagem do circuito do condicionamento de sinais de tensões monitoradas com protótipo de detector de afundamento de tensão em Arduino. ....	81
Figura 4.4: Dispositivo – fonte de tensão programada – 345ASX da Pacific Power Source usado nos testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector. ....	83
Figura 4.5: Edição de formas de onda usadas nos testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector. ....	84
Figura 4.6: Edição de um regime transitório com sequência de saídas. ....	85
Figura 4.7: Primeiro regime transitório, usando a primeira forma de onda editada, usado para testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector. ...	86
Figura 4.8: Segundo regime transitório, usando a primeira forma de onda editada, usado para testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector. ...	86
Figura 4.9: Terceiro regime transitório, usando a primeira e a segunda formas de onda editadas, usado para testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector. ....	86
Figura 4.10: Quarto regime transitório, usando apenas forma de onda senoidal, usado para testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector. ....	87
Figura 4.11: Conjunto composto pelo circuito condicionador de sinais, Arduino Due, osciloscópio com as pontas de prova e computador com comunicação com Arduino e com o dispositivo 345ASX através do UPC Studio. ....	88
Figura 4.12: Execução de um programa com regime permanente e regime transitório com sequência de saídas. ....	89
Figura 4.13: Resultados experimentais com protótipo de detector de afundamento de tensão executando cada técnica em cada fase submetida ao primeiro regime transitório programado. ....	90
Figura 4.14: Resultados experimentais com protótipo de detector de afundamento de tensão executando cada técnica em cada fase submetida ao segundo regime transitório programado. ....	92
Figura 4.15: Resultados experimentais com protótipo de detector de afundamento de tensão executando cada técnica em cada fase submetida ao terceiro regime transitório programado.	94
Figura 4.16: Resultados experimentais com protótipo de detector de afundamento de tensão executando cada técnica em cada fase submetida ao quarto regime transitório programado. .	96



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparação dos valores e conceitos de duração de afundamento de tensão nas definições do PRODIST e da IEEE std 1159-2009.....	3
Tabela 2.2: Tipos de faltas que causam afundamento de tensão.....	8
Tabela 2.3: Tipos de afundamento de tensão sofrida por uma carga dado o tipo de falta ocorrido e o tipo de conexão da carga.....	9
Tabela 2.4: Tipos de afundamento de tensão observado no lado secundário de um transformador dado o tipo de conexão do transformador e o tipo de afundamento observado por uma carga no lado primário. ....	10
Tabela 3.1: Resultados com os valores de duração e profundidade do afundamento de tensão mitigado pela atuação de controle de tensão com histerese em conjunto com cada uma das técnicas de detecção do distúrbio e do afundamento de tensão não mitigado.....	64
Tabela 3.2: Resultados de atrasos de detecção de início e de fim do afundamento de tensão nos dados gerados para simulação de cada técnica.....	66
Tabela 3.3: Considerações levantadas com os resultados das simulações de detecção de afundamento de tensão com cada técnica com dados reais de medição de tensão de rede. ....	66
Tabela 3.4: Configurações dos pesos das técnicas tradicionais de detecção de afundamento de tensão no comitê proposto em função do estado de detecção no instante atual e há um quarto de ciclo. ....	68
Tabela 4.1: Especificações técnicas do Arduino Due. Fonte: [54].....	76



## SUMÁRIO

Capítulo 1 Introdução .....	1
Capítulo 2 Revisão de Afundamentos de Tensão .....	3
2.1 Impactos do Afundamento de Tensão .....	5
2.2 Classificação de Afundamentos de Tensão .....	6
2.3 Medidas de Prevenção e Mitigação .....	10
2.4 Técnicas de Detecção .....	14
2.4.1 Monitoramento do Valor no Último Pico .....	15
2.4.2 Monitoramento do Valor de Pico .....	17
2.4.3 Monitoramento do Valor Eficaz .....	22
2.4.4 Monitoramento do Desvio do Valor Instantâneo .....	23
2.4.5 Análise da Transformada de Fourier com Janela .....	24
2.4.6 Controle de Tensão com Histerese .....	25
Capítulo 3 Algoritmos e Simulações .....	29
3.1 Implementações de PLL .....	29
3.1.1 Malha de Controle Equivalente da PLL .....	30
3.1.2 Análise de Estabilidade da PLL .....	31
3.1.3 Ajuste do Controlador PI da PLL .....	37
3.1.4 Resultados das Implementações de PLL .....	37
3.2 Controle de Tensão com Histerese .....	42
3.3 Dados de Tensão para Simulações .....	47
3.4 Simulações de Detectores de Afundamento de Tensão com Dados Gerados .....	49
3.4.1 Monitoramento do Valor no Último Pico .....	49
3.4.2 Monitoramento do Valor de Pico .....	51
3.4.3 Monitoramento do Valor Eficaz .....	54
3.4.4 Monitoramento do Desvio do Valor Instantâneo .....	55
3.4.5 Análise da Transformada de Fourier com Janela .....	57

3.5 Simulações de Detectores de Afundamento de Tensão com Dados Reais.....	57
3.6 Simulações de Detectores de Afundamento de Tensão com Atuação e Dados Reais....	61
3.7 Comitê de Técnicas de Detecção de Afundamento de Tensão.....	65
Capítulo 4 Protótipo e Experimentos.....	73
4.1 Versões em Tempo Discreto das Técnicas de Detecção de Afundamento de Tensão ...	73
4.1.1 Análise da Estabilidade da PLL em Tempo Discreto.....	74
4.2 Implementação para Arduino .....	75
4.2.1 Ajuste do Período de Execução dos Algoritmos .....	77
4.2.2 Circuito e Condicionamento de Sinais .....	79
4.2.3 Testes Rápidos e Calibragem .....	81
4.3 Fonte de Tensão Programada .....	83
4.3.1 Programação de Afundamento de Tensão.....	84
4.3.2 Comunicação com a Fonte de Tensão Programada.....	87
4.4 Resultados Experimentais de Detecção de Afundamento de Tensão.....	88
4.4.1 Resultados para o Primeiro Transitório .....	89
4.4.2 Resultados para o Segundo Transitório .....	91
4.4.3 Resultados para o Terceiro Transitório .....	93
4.4.4 Resultados para o Quarto Transitório.....	95
Capítulo 5 Conclusões .....	99
Referências .....	103
Apêndice A Blocos Simulink Usados nas Modelagens e Simulações .....	109



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A qualidade de energia elétrica tem sido alvo de diversos estudos e abordagens desde os anos 1980 para resolução sistêmica de problemas que têm causado grandes prejuízos em indústrias. Equipamentos industriais mais recentes tendem a ser mais sensíveis a problemas na qualidade de energia. Uma carga, por exemplo, pode ser alimentada por uma ponte chaveada com atuação de controle de modulação de largura de pulso (pulse width modulation, PWM). Nesse caso, um problema de qualidade de energia deforma, aumenta ou diminui a forma de onda nominal, o que implica em mudança na potência entregue para a ponte ou erro nos chaveamentos. Como as diversas cargas estão conectadas em rede de alimentação, uma falha ocorrendo em um ponto pode causar falhas em quaisquer cargas próximas [1].

No Brasil, o regulamento para definições conceituais, normas para medições e procedimentos para atendimento ao consumidor são descritos no PRODIST [2]. O PRODIST tem seu conteúdo baseado no padrão europeu IEC. A norma internacional IEEE std 1159-2009 propõe práticas recomendadas para medições e definições conceituais de problemas de qualidade de energia [3]. Uma das definições que aparece tanto no PRODIST como em IEEE std 1159-2009 é o afundamento de tensão (ou voltage sag ou apenas sag).

O afundamento de tensão é um dos problemas de qualidade de energia mais comuns [4] e causa impactos de grande prejuízo na indústria [5]. Uma das formas mais populares de contornar esse problema é instalar um dispositivo de mitigação desse distúrbio como o restaurador dinâmico de tensão (dynamic voltage restorer, DVR) [6]. Esse dispositivo consiste em injetar tensão de compensação em série com a carga durante um afundamento de tensão. A atuação acontece apenas na presença do distúrbio, demandando então uma etapa de detecção. Essa detecção deve ser rápida e robusta.

Muitas técnicas já foram propostas para detecção de afundamentos de tensão e algumas para classificação de distúrbios na qualidade de energia elétrica em geral. O foco deste trabalho está na detecção. Várias técnicas tradicionais presentes na literatura são apresentadas e demonstradas por meio de simulações e resultados experimentais.

O presente trabalho tem objetivo de propor um algoritmo de detecção de afundamento de tensão com característica de tempo de resposta rápido e alta eficácia, como é desejável para um detector desse tipo de distúrbio. O algoritmo proposto é uma aplicação do modelo nebuloso de Takagi e Sugeno [7] em um comitê formado por algumas técnicas de detecção selecionadas.

A detecção acusada pelo algoritmo proposto se dá a partir das avaliações das detecções acusadas por cada técnica que compõem o comitê com as devidas ponderações de acordo com as adequabilidades de cada técnica. As ponderações foram ajustadas de acordo com as características observadas em cada técnica, tais como a velocidade de detecção e os riscos de detecção falsa. Tais ponderações ainda variam em função do estado de detecção de afundamento de tensão em instante atual e em um instante atrasado de um quarto de ciclo da tensão.

A principal aplicação para o algoritmo de detecção deste trabalho é executar em um hardware que acione um dispositivo de mitigação de afundamento de tensão. Outra aplicação possível, comum para algoritmos de detecção de afundamentos, é de trabalhos que têm por objetivo levantar informações estatísticas de ocorrências de problemas na qualidade de energia. Nesse caso, o algoritmo executa em um medidor que armazena dados de medição e registra a ocorrência do distúrbio.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica que aborda a qualidade de energia elétrica focando no problema específico de afundamentos de tensão. O problema é apresentado conceitualmente, em seus aspectos econômicos e possíveis medidas de prevenção ou mitigação. Também é apresentada uma revisão em diversas técnicas de detecção desse distúrbio.

No capítulo 3 é feita a demonstração de cada técnica de detecção de afundamento de tensão vista no capítulo 2 por meio de simulações com dados reais de medições de tensão de rede. As vantagens e desvantagens de cada técnica são expostas pelos resultados das simulações. O algoritmo proposto é apresentado e comparado com as técnicas tradicionais passando pelas mesmas simulações.

O capítulo 4 demonstra o desempenho das realizações práticas de cada técnica tradicional, bem como a do algoritmo proposto, para detecção de afundamentos de tensão em ensaios com medição em tempo real. Nessa etapa, cada técnica é posta à prova e avaliada, bem como o algoritmo proposto por este trabalho.

Este trabalho conclui com o capítulo 5 que expõe as conclusões dos resultados mostrados nos capítulos 3 e 4 e propostas para trabalhos futuros que venham utilizar o algoritmo proposto por este trabalho para detecção em conjunto com dispositivo atuador de compensação de afundamentos de tensão.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

O afundamento de tensão – também comumente referido como voltage sag ou apenas sag – é o fenômeno de decréscimo no valor eficaz – valor RMS – ou no valor de pico, da tensão de rede. A figura 2.1 mostra um exemplo de um afundamento de tensão.

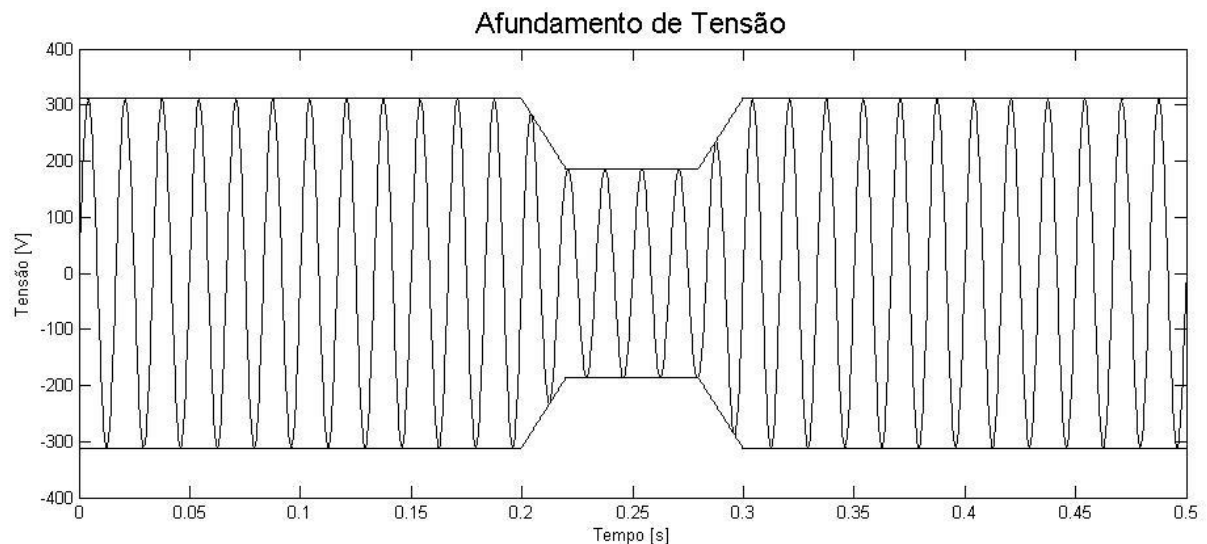


Figura 2.1: Exemplo de afundamento de tensão.

Em termos de definições mais rígidas, na definição do PRODIST, assim como na IEEE std 1159-2009, o afundamento de tensão é caracterizado pela queda do valor eficaz, em relação a tensão de referência, para  $0,1pu$  a  $0,9pu$ . Enquanto o PRODIST considera durações entre 1 ciclo e 3 segundos como momentâneas e entre 3 segundos e 3 minutos como temporárias, para a IEEE std 1159-2009 as durações momentâneas estão na faixa de 30 ciclos a 3 segundos e durações temporárias entre 3 segundos e 1 minuto. Na IEEE std 1159-2009 ainda tem durações chamadas instantâneas situadas entre 0,5 ciclo e 30 ciclos [2], [3]. A tabela 2.1 mostra uma comparação dos valores e conceitos de duração de afundamento de tensão nas duas definições: do PRODIST e da IEEE std 1159-2009.

Tabela 2.1: Comparação dos valores e conceitos de duração de afundamento de tensão nas definições do PRODIST e da IEEE std 1159-2009.

	PRODIST	IEEE std 1159-2009
Instantâneo	–	0,5 ciclo a 30 ciclos
Momentâneo	1 ciclo a 3 segundos	30 ciclos a 3 segundos
Temporário	3 segundos a 3 minutos	3 segundos a 1 minuto

A figura 2.2 mostra graficamente as definições de afundamentos de tensão de acordo com a IEEE, e também de outros problemas como elevações de tensão, sobre-tensão, sub-tensão, transitório, corte e interrupção.

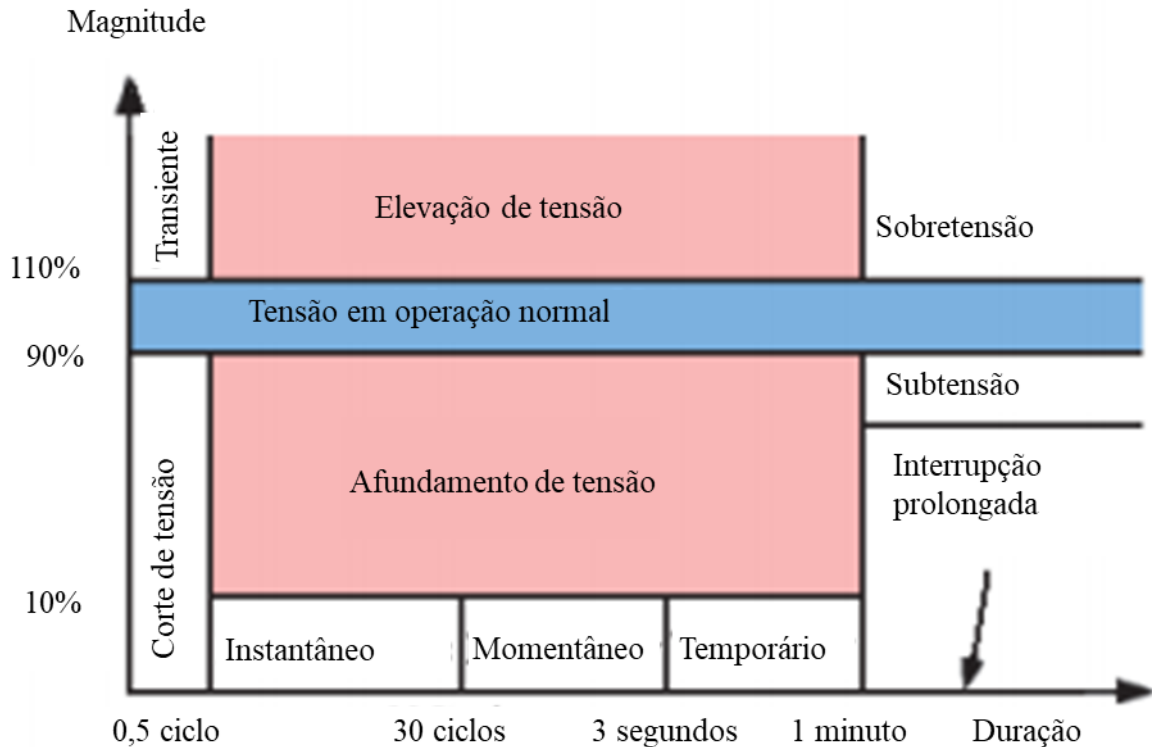


Figura 2.2: Definições de problemas de qualidade de energia, incluindo afundamento de tensão, em termos de intensidade e duração. Fonte: [8].

Existem maneiras gráficas de se representar um perfil de tolerância a variações do nível de tensão de um equipamento em termos de afundamento e elevação. As mais comuns são as curvas CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Association), desenvolvida pela instituição com esse mesmo nome, e ITIC (Information Technology Industry Council) desenvolvida depois e substituindo a curva CBEMA quanto a usos [1]. Ambas as curvas são postas em gráfico com os eixos representando o nível de tensão e a duração. A interpretação é que a região dentro do envelope das curvas é tolerável, abaixo é a região em que o equipamento tem dano devido a afundamento de tensão e acima é a região em que o equipamento sofre com a elevação de tensão. A figura 2.3 mostra um exemplo de cada uma das curvas, CBEMA e ITIC. Também pode-se acrescentar um eixo de frequência de ocorrências e representar um levantamento estatístico de ocorrências de afundamentos de tensão em histograma de três dimensões [1], [4].

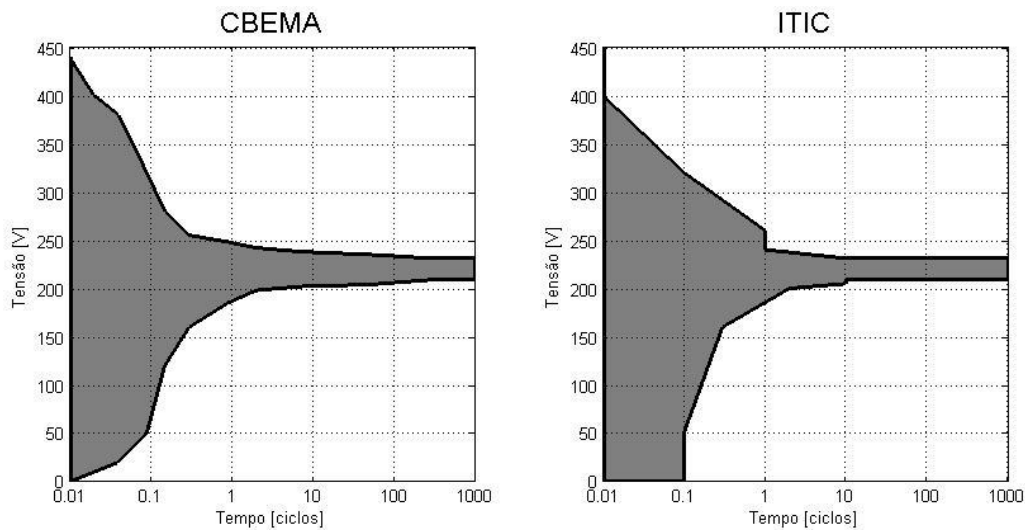


Figura 2.3: Curvas CBEMA e ITIC para representar o perfil de tolerância de um equipamento a variações na qualidade de energia elétrica na sua alimentação em termos de nível de tensão e duração.

## 2.1 Impactos do Afundamento de Tensão

Os fenômenos de afundamentos de tensão e interrupções são os problemas mais comuns de qualidade de energia que afetam consumidores industriais [4], [6], [9]. Em vários estudos, foi apontado que 92% dos distúrbios em sistemas de energia elétrica incluem afundamentos de tensão, transitórios e interrupções momentâneas [10], [11]. Entre as possíveis causas de afundamentos de tensão há eventos de chaveamentos de uma carga, bloqueio de um banco de capacitores, acionamento de grandes cargas como motores ou condições de falta ou curto-circuito em algum ponto próximo [1]. As consequências desses fenômenos são paradas em processos industriais ou danos em equipamentos.

Por causar grandes prejuízos em indústrias devido a paradas e danos, o afundamento de tensão é objeto de vários estudos a fim de se buscar soluções para esse problema. Os impactos desse fenômeno afetam diversos setores industriais como produção química e petroquímica, produção de fibra e indústrias de semicondutores [9]. Entre os equipamentos sensíveis a afundamentos de tensão, estão os controladores para suprimento de água em sistemas de refrigeração, testadores de Chip, dispositivos CC, Controladores Lógicos Programáveis (CLP) e máquinas ferramentas [4].

Uma análise econômica feita por Leitão e Reis mostrou um prejuízo de aproximadamente U\$1 milhão em 14 consumidores industriais ao longo de um ano apenas devido ao fenômeno de afundamento de tensão [5]. Em uma avaliação mais detalhada, Sullivan mostra que no cenário de afundamento de tensão, uma indústria tem prejuízo médio de U\$7694

por hora perdida de produção, incluindo perdas de produção, danos materiais na planta e em equipamentos, reinicialização do processo industrial e custos com mão-de-obra devido a ocorrência do fenômeno [12]. Algumas indústrias sofrem perdas maiores, chegando a ordem de um milhão de dólares por hora perdida de produção. No ano anterior, outra pesquisa com outras grandes empresas feita pelo mesmo autor mostrou um prejuízo médio de U\$9403,55/h em indústrias [13].

## **2.2 Classificação de Afundamentos de Tensão**

Algumas definições importantes sobre a natureza do afundamento de tensão, ilustradas na figura 2.4, são [14]:

- Salto de fase: diferença entre o ângulo-fase da tensão de uma fase afetada durante um evento e o ângulo-fase que a mesma teria sem a ocorrência do evento.
- Forma do afundamento de tensão: pode ser retangular ou não retangular. Afundamentos de tensão retangulares tem um início e um fim bem definido por uma mudança rápida do valor eficaz da tensão para um valor de profundidade do evento e de volta para o valor nominal. Já os afundamentos não retangulares se caracterizam por ter um tempo de recuperação em que o valor eficaz cresce de forma normalmente modelada como linear [15].
- Ponto-na-onda de início: ângulo-fase da tensão de uma fase afetada no instante de início do afundamento de tensão.
- Ponto-na-onda de fim: ângulo-fase da tensão de uma fase afetada no instante final do afundamento de tensão.

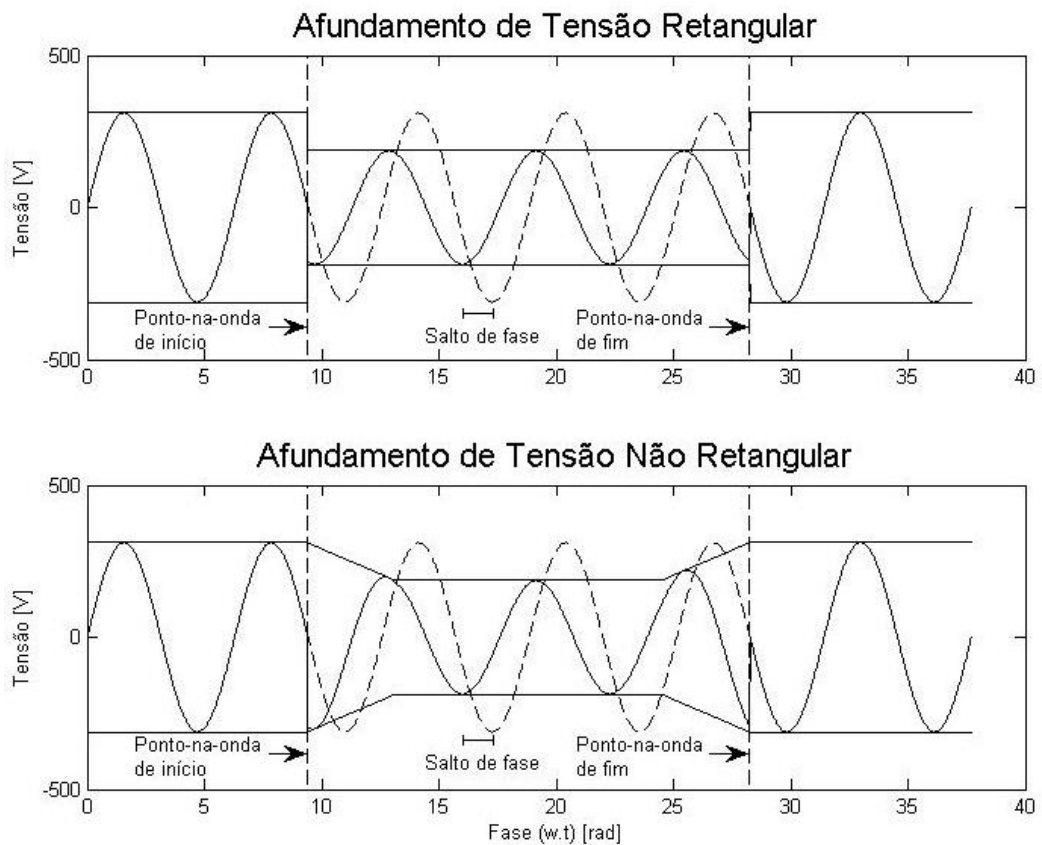


Figura 2.4: Ilustração de definições importantes sobre afundamento de tensão.

Os afundamentos de tensão são classificados em 7 tipos considerando o tipo de falta e configurações de conexão de transformadores e da carga de onde se é percebido o distúrbio. Esses tipos podem ser modelados por equações dos fasores das fases da tensão durante o afundamento de tensão com um parâmetro  $V$ , que se situa entre 0 e 1. Esse parâmetro vale 1 para estado normal da tensão e quando menor que 1, é tão menor quanto mais severo for o afundamento de tensão em termos de profundidade. A figura 2.5 mostra cada um dos 7 tipos, de A até G, nas suas representações de equações, exemplo de fasores e exemplo no domínio do tempo [16].

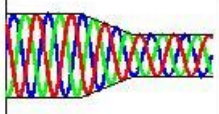
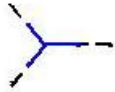
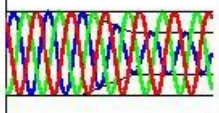
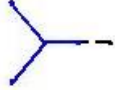
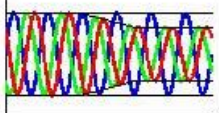
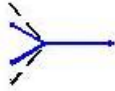
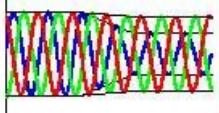
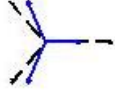
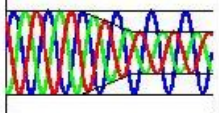
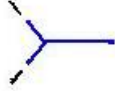
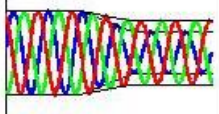
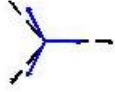
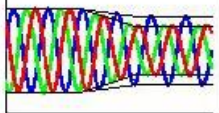
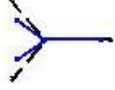
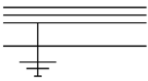
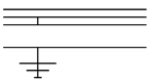


Tipo A			$V_A = V$ $V_B = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad V_C = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
Tipo B			$V_A = V$ $V_B = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad V_C = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
Tipo C			$V_A = 1$ $V_B = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad V_C = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
Tipo D			$V_A = V$ $V_B = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad V_C = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
Tipo E			$V_A = 1$ $V_B = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad V_C = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
Tipo F			$V_A = V$ $V_B = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}(2+V)}{6}V \quad V_C = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}(2+V)}{6}V$
Tipo G			$V_A = \frac{2+V}{3}$ $V_B = -\frac{2+V}{6}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad V_C = -\frac{2+V}{6}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$

Figura 2.5: Tipos de afundamentos de tensão em suas representações por equações das tensões de fase, exemplo de fasores e exemplo no domínio do tempo.

As faltas que causam cada tipo de afundamento são classificadas segundo o número de fases afetadas. Os tipos de falta são mostrados na tabela 2.2 [14]. O mais comum é o tipo SP.

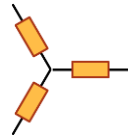

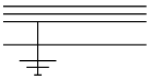
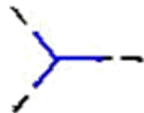
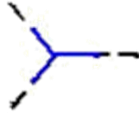
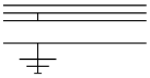
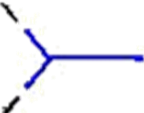
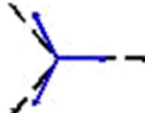

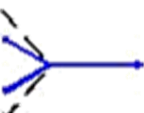
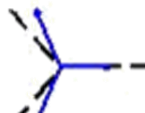

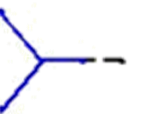
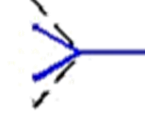
Tabela 2.2: Tipos de faltas que causam afundamento de tensão.

Tipo	Ilustração
Fase para terra (single-phase, SP)	
Fase para fase (phase-to-phase, PP)	
Duas fases para terra (two-phase-to-ground, PPG)	
Três fases (three-phase, 3P)	



A tabela 2.3 é um mapeamento que mostra qual é o tipo de afundamento de tensão que uma determinada carga vai sofrer dado o tipo de falta e o tipo de conexão da própria carga.

Tabela 2.3: Tipos de afundamento de tensão sofrida por uma carga dado o tipo de falta ocorrido e o tipo de conexão da carga.

		Carga conectada em estrela	Carga conectada em delta
Tipo de falta			
3P		Tipo A 	Tipo A 
PPG		Tipo E 	Tipo F 
PP		Tipo C 	Tipo D 
SP		Tipo B 	Tipo C 

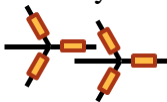







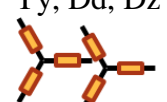







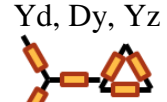







O caminho entre o ponto onde ocorreu uma falta e uma carga que vai sofrer o impacto do afundamento de tensão pode ter transformadores. As conexões desses transformadores podem alterar o tipo do afundamento percebido pela carga. As conexões dos transformadores são agrupadas em três tipos de acordo com o efeito sobre as componentes simétricas e deslocamento de fase [14], [16]:

- Tipo 1: não há mudança nas componentes simétricas. As conexões desse tipo são estrela aterrada-estrela aterrada (YNyn).
- Tipo 2: remove a sequência zero no secundário. As conexões desse tipo são estrela aterrada-estrela (YNy), estrela-estrela aterrada (Yyn), estrela-estrela (Yy), delta-delta (Dd) e delta-zigzag (Dz).

• Tipo 3: secundário tem deslocamento de fase, sendo que cada fase no secundário é a diferença entre duas fases do primário. As conexões desse tipo são delta-estrela (Dy), estrela-delta (Yd) e estrela-zigzag (Yz).

As alterações dos tipos de afundamento observados numa carga do lado secundário de um transformador dado o tipo de conexão do transformador e o tipo de afundamento que uma carga observa no lado primário são mapeadas conforme a tabela 2.4 [16].

Tabela 2.4: Tipos de afundamento de tensão observado no lado secundário de um transformador dado o tipo de conexão do transformador e o tipo de afundamento observado por uma carga no lado primário.

Conexão do transformador	Tipo de afundamento no lado primário do transformador						
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E	Tipo F	Tipo G
YNyn 	Tipo A 	Tipo B 	Tipo C 	Tipo D 	Tipo E 	Tipo F 	Tipo G 
Yy, Dd, Dz 	Tipo A 	Tipo D 	Tipo C 	Tipo D 	Tipo G 	Tipo F 	Tipo G 
Yd, Dy, Yz 	Tipo A 	Tipo C 	Tipo D 	Tipo C 	Tipo F 	Tipo G 	Tipo F 

### 2.3 Medidas de Prevenção e Mitigação

Para prevenir ou minimizar a ocorrência de afundamento de tensão, diversas medidas podem ser tomadas. Algumas dessas, sendo tomadas pela empresa fornecedora de energia elétrica, são [4], [6]:

- Ajuste de limiares adequados em sistemas de proteção;
- Para-raios para evitar descargas atmosféricas;
- Aterramento em torres de transmissão;
- Manutenção do isolamento entre os condutores de cada fase;
- Disjuntores e religadores mais rápidos;
- Adicionar linhas de reconexão;
- Projetar arranjos que favoreçam laços;

- Poda de árvores próximas a transmissão e aos condutores;
- Limpeza frequente dos condutores;
- Mecanismos de prevenção a danos provocados por animais.

Outras medidas atribuídas principalmente ao objetivo de reduzir o número de faltas incluídas no trabalho de Zhu et. al. são [9]:

- Planejamento ótimo da rede na zona industrial;
- Instalar produções de grande quantia de energia em locais mais próximos de grandes indústrias;
- Testes preventivos;
- Utilizar cabos subterrâneos ao invés de cabos aéreos;
- Melhoria em isolamento em cabos aéreos.

O mesmo trabalho ainda aponta medidas para redução do tempo para minimizar os efeitos de afundamento como:

- Mudança no padrão da alimentação;
- Proposta de alimentação híbrida CA e CC;
- Instalação de dispositivos para mitigação;
- Melhoria em desempenho contra interferência nos dispositivos elétricos.

Existe também uma medida que pode ser tomada pelo lado do usuário para solução de problemas específicos a determinadas cargas sensíveis, que têm necessidade de operar continuamente em produção industrial. Essa medida é a instalação de dispositivo condicionador de energia elétrica para mitigação de afundamentos.

Tais dispositivos podem ser classificados em termos de atuação CA em série e de atuação CC em paralelo; ou em termos de fornecimento de energia como fonte de tensão e fonte de corrente; ou com relação à presença ou ausência de uma forma de armazenamento de energia; ou no aspecto de proteção projetada para apenas um equipamento ou para uma rede. A atuação CC em paralelo tende a ser mais confiável que a atuação CA em série com a carga sensível. O uso de armazenamento de energia aumenta a capacidade de proteção, podendo inclusive

proteger contra interrupções, além de reduzir o impacto de alta corrente na rede provocada por falta [9].

Alguns exemplos de dispositivos condicionadores de energia são [4], [6]:

- Conjunto motor-gerador (motor-generator set, MG set);
- Alimentador de energia ininterrupta (uninterruptible power supplier, UPS);
- Transformador de tensão ferorrressonante constante (ferroresonant constant voltage transformer, CVT);
- Sintetizador magnético;
- Sistemas supercondutores de armazenamento de energia magnética (superconducting magnetic energy storage, SMES);
- Geração distribuída de energia (distributed generation, DG);
- Restaurador dinâmico de tensão (dynamic voltage restorer, DVR).

Middlekauff mostra um tipo de solução chamado dispositivo de compensação série (serie device, SD) [17]. A forma de atuação é injetando tensão em série de forma a compensar eventual afundamento de tensão. Sob essa mesma filosofia se encontram as soluções UPS e o DVR. Este último é apontado como uma solução de baixo custo e boa capacidade de mitigar os impactos de afundamentos de tensão [6], [18], [19].

A solução MG set é constituída por um motor, um corpo de inércia e um gerador. O corpo de inércia é o elemento armazenador de energia na forma mecânica. Essa solução tem a vantagem de isolar o equipamento sensível do sistema de alimentação, eficiência relativamente alta e baixo custo inicial.

As UPSs têm diversas configurações para se escolher. Se dividem em atuação online e standby. Podem utilizar baterias ou banco de capacitores para armazenar energia elétrica para prover ao equipamento sensível em situações de interrupção ou afundamento de tensão.

Um CVT é basicamente um transformador de relação 1:1 com excitação na região de saturação. Dessa forma a tensão de saída não é muito afetada pelas variações na tensão de entrada. Essa solução é apontada como mais adequada para cargas de potência baixa e constante que não tenham corrente de acionamento muito alta.

O sintetizador magnético é um dispositivo eletromagnético que provê uma forma de onda de tensão de alimentação regenerada independente da qualidade da tensão de alimentação. Pelo custo dessa solução, é recomendada para equipamentos de alta potência com ao menos vários kVA.

O SMES utiliza núcleos supercondutores para armazenar energia magnética que é provida para o equipamento sensível na situação de interrupção ou afundamento de tensão. Essa solução apresenta vantagens de ter muito pouco espaço necessário para o armazenamento de energia em comparação a baterias e ter um número reduzido de conexões elétricas em comparação a UPSs, tornando o dispositivo mais confiável e requerendo menos manutenção. Seu custo tende a ser competitivo com os custos de UPSs. Por outro lado, requer um custo adicional para manter um resfriamento adequado do sistema em temperaturas ligeiramente menores que 0°C.

A DG se refere a produção de energia elétrica próxima ao consumidor. Tal produção pode ser feita com fontes renováveis como painéis fotovoltaicos. A produção é definida como microgeração distribuída para potência de até 75kW e minigeração para potência de 75kW até 5MW, ou 3MW no caso de fonte hídrica. No Brasil, desde 2012, o consumidor pode gerar a sua própria energia elétrica e injetar energia excedente na rede de distribuição, dando direito a crédito para consumo nos próximos 60 meses. Os benefícios do uso de DG são a diversificação da matriz energética, redução de perdas por transmissão, produção mais sustentável de energia e expansão de geração de energia com menores impactos ambientais [20], [21].

O DVR é um dispositivo formado por um inversor trifásico que injeta tensão através de um transformador em série com a carga sensível [6]. Também existe versão monofásica do DVR injetando tensão de compensação sobre um capacitor em série com a carga [22] ou em paralelo [23]. Esse dispositivo é recomendado para equipamentos com potência na ordem de kVA a MVA [24]. Pode ter armazenamento interno de energia através de bateria ou banco de capacitores ou usar a própria tensão de alimentação, ainda que sob distúrbio, para prover compensação na tensão da carga [25]. Quanto a atuação, pode ser standby, isso é, atuando apenas quando um afundamento de tensão é detectado, ou online, onde alguma tensão de compensação é injetada o tempo todo. O primeiro tipo em termos de atuação requer medição e detecção de afundamento de tensão.

## 2.4 Técnicas de Detecção

A detecção de afundamento de tensão é uma etapa importante para o acionamento do processo de injeção de tensão para a compensação do distúrbio. É desejável que um sistema faça tal detecção tão rapidamente quanto possível [10]. Isso motivou diversos trabalhos que propõem algoritmos de detecção.

A detecção pode atuar nas três fases ou em cada fase individualmente. Em geral, um algoritmo de detecção de afundamento de tensão baseado em uma fase, monitorando cada uma das fases individualmente, é suficiente para um bom desempenho de detecção. Já um algoritmo baseado em três fases, tende a não ser suficiente para detecção eficiente por considerar apenas a componente de tensão de sequência positiva [26].

Uma abordagem mais ampla do que apenas a detecção do afundamento é a detecção de algum problema de qualidade de energia elétrica seguida da sua classificação. A etapa de classificação entrega informações do tipo de problema de qualidade de energia – afundamento ou elevação de tensão, interrupção, transitório impulsivo ou oscilatório, harmônicos e ruído – e contribui para um estudo estatístico de ocorrências de cada tipo de distúrbio [27], [28].

A técnica de aplicar análise Wavelet se popularizou recentemente para classificar o problema de qualidade de energia ocorrido baseado na assinatura do sinal de tensão sobre o domínio de deslocamento no tempo  $\tau$  e dilatação  $\mu$  de amplitude de uma dada função-mãe [29]. Uma escolha da forma de função-mãe adequada é uma função oscilatória com decaimento rápido para zero e componente CC igual a zero. Escolhida a função  $f(t)$ , os dois parâmetros  $\tau$  e  $\mu$  podem ser aplicados e variados sobre a função de forma a se obter  $f\left(\frac{t}{\mu} - \tau\right)$ . O próximo passo é aplicar a operação de decomposição de um sinal nas componentes em uma janela de dados e finalmente classificar a condição de acordo com a assinatura do sinal. A aplicação pode ser feita em dados históricos ao invés de aplicação em tempo real como na aplicação feita em [30].

Outras técnicas modernas como redes neurais artificiais (RNA) podem ser combinadas para classificar distúrbios de qualidade de energia elétrica [27], [28]. A técnica de RNA é bastante interessante de ser aplicada em identificar problema de qualidade de energia, porque é popular em aplicações de reconhecimento de padrões e classificar informações em categorias bem definidas. Oleskovicz, et. al. aplicou uma camada de entrada sobre amostras em torno do

início, uma camada intermediária e uma camada de saída, mapeando as informações do sinal em 5 categorias: afundamento, elevação, interrupção, ruído e transitório oscilatório [28].

O foco deste trabalho está na etapa de detecção em tempo real de afundamento de tensão para acionar a atuação de um processo de injeção de tensão de compensação automaticamente. Por isso, são cobertas técnicas de detecção, mas não de classificação. Na literatura, diversas técnicas são propostas para detecção de afundamento de tensão. As principais técnicas tradicionais são descritas em detalhes. Essas técnicas são:

- Monitoramento do valor do último pico: consiste em avaliar se há presença de afundamento durante as ocorrências de pico na tensão de rede;
- Monitoramento do valor de pico: estima o valor de pico usando componentes ortogonais e assim avalia se há presença de afundamento o tempo todo;
- Monitoramento do valor eficaz: estima o valor eficaz usando uma janela de dados da tensão de rede;
- Monitoramento do desvio do valor instantâneo: constrói um sinal senoidal de referência com mesma amplitude, frequência e em fase com a rede e avalia a presença de afundamento com o desvio entre a tensão de rede e a referência;
- Análise da transformada de Fourier com janela: aplica a transformada de Fourier em uma janela de dados e avalia a presença de afundamento a partir da magnitude da componente de frequência nominal da rede.

#### **2.4.1 Monitoramento do Valor no Último Pico**

Essa técnica consiste em comparar o valor da tensão com uma referência de valor de pico nos locais que a sua derivada vale zero. Para um sinal senoidal de tensão, a condição de derivada nula ocorre apenas nos picos. Então o afundamento é acusado quando a diferença entre o valor da tensão e a referência supera um limiar na condição de derivada da tensão nula. Esse limiar pode ser estabelecido como  $0,1pu$  para seguir a definição da PRODIST e da IEEE std 1159-2009 ou um valor um pouco maior para aumentar a robustez a ruído ou imprecisão da medição. O término do afundamento é encontrado quando essa diferença volta para um valor inferior ao limiar quando a condição de derivada nula é novamente encontrada [24]. A figura

2.6 mostra um exemplo de afundamento de tensão e indicação de onde o detector deve apontar o início e o fim do distúrbio.



Figura 2.6: Exemplo de afundamento de tensão e indicações de início e fim da detecção pelo método de monitoramento do valor no último pico.

A vantagem é a simplicidade de implementação, baixa complexidade e fácil interpretação do algoritmo. A interpretação da detecção desse algoritmo é que espera-se que o valor da tensão no pico esteja próximo de  $1,0pu$  quando não há afundamento de tensão ocorrendo.

As desvantagens estão em sensibilidade alta na presença de ruído na tensão e atraso de até meio ciclo para detectar um simples afundamento de tensão que não saia muito do formato senoidal. Se um afundamento, por exemplo, tem ponto-na-onda de início em um ângulo pouco após  $\pi/2$  e tem salto de fase nulo, somente quando o ângulo-fase chegar a  $3\pi/2$  será detectado, chegando ao atraso de detecção de quase meio ciclo, ou  $8,3ms$ . Outro aspecto negativo dessa técnica é o fato de não conseguir entregar as informações precisas de profundidade do afundamento e salto de fase. Como detector, entrega informações de instantes iniciais e finais, porém com atraso em função dos pontos-na-onda dos instantes iniciais e finais reais.

Para fins práticos, a condição de derivada nula não é necessariamente o valor zero exato, mas um intervalo, por exemplo,  $(-5\%, 5\%)$  na qual o valor da derivada é desprezível. Para contornar o problema de rápido cruzamento pelo zero, o algoritmo pode ser feito para detectar não somente a ocorrência de derivada contida em  $(-5\%, 5\%)$  como também variação de sinal da derivada.



## 2.4.2 Monitoramento do Valor de Pico

A tensão de alimentação é tida como senoidal com determinada amplitude  $V_p$ . O monitoramento do valor de pico consiste em determinar essa amplitude instantaneamente, ao contrário da técnica anterior que procura condição na derivada da tensão. Por causa dessa diferença, a técnica anterior é referenciada neste trabalho como monitoramento do valor no último pico, por considerar apenas o estado no último pico detectado para acusar presença ou ausência de afundamento. Já a presente técnica, monitora o valor de pico estimado ponto a ponto.

Uma ferramenta utilizada para se obter o valor de pico é a transformada DQ – representação em componentes direta e em quadratura – composta pelas transformadas de Clarke e Park. A transformada de Clarke obtém uma representação de três fases senoidais de uma grandeza em duas variáveis. Essa transformação é dada pela equação (2.1). A transformada de Park obtém uma representação das duas variáveis obtidas em Clarke em um referencial rotatório. Essa transformação é dada pela equação (2.2). As transformadas inversas são as equações (2.3) e (2.4) [6].

$$\vec{v}_{\alpha\beta}(t) = \begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) \\ v_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = K_{\alpha\beta} \vec{v}_{abc}(t) \quad (2.1)$$

$$\vec{v}_{qd}(t) = \begin{bmatrix} v_q(t) \\ v_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) \\ v_{\beta}(t) \end{bmatrix} = K_{qd} \vec{v}_{\alpha\beta}(t) \quad (2.2)$$

$$\vec{v}_{abc}(t) = \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) \\ v_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \text{pinv}(K_{\alpha\beta}) \vec{v}_{\alpha\beta}(t) \quad (2.3)$$

$$\vec{v}_{\alpha\beta}(t) = \begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) \\ v_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_q(t) \\ v_d(t) \end{bmatrix} = K_{qd}^{-1} \vec{v}_{qd}(t) \quad (2.4)$$

Outra forma de representação possível para as transformadas Clarke e Park são em números complexos. As transformadas equivalentes das equações (2.1), (2.2), (2.3) e (2.4) na forma complexa são dadas pelas equações (2.5), (2.6), (2.7) e (2.8) onde  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  [31].

$$\underline{v}_{\alpha\beta}(t) = v_{\alpha}(t) - jv_{\beta}(t) = \frac{2}{3}(v_a(t) + av_b(t) + a^2v_c(t)) \quad (2.5)$$

$$\underline{v}_{qd}(t) = v_q(t) - jv_d(t) = e^{-j\theta} \underline{v}_{\alpha\beta}(t) \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned}
v_a(t) &= \Re \left[ \underline{v_{\alpha\beta}}(t) \right] \\
v_b(t) &= \Re \left[ a^2 \underline{v_{\alpha\beta}}(t) \right] \\
v_c(t) &= \Re \left[ a \underline{v_{\alpha\beta}}(t) \right]
\end{aligned} \tag{2.7}$$

$$\underline{v_{\alpha\beta}}(t) = e^{j\theta} \underline{v_{qd}}(t) \tag{2.8}$$

O ângulo  $\theta$  usado em (2.2) e (2.6) é o ângulo-fase de um referencial arbitrário na qual as representações  $\vec{v}_{dq}(t)$  e  $\underline{v_{qd}}(t)$  são obtidas. Esse ângulo-fase é dado pela equação (2.9).

$$\theta = \int \omega dt \tag{2.9}$$

E  $\omega$  é a frequência do referencial arbitrário em questão. Os referenciais mais usados são estático com  $\omega = 0$ ; rotacional com  $\omega = \omega_r$  acompanhando a velocidade de um motor; e síncrono, ou elétrico, com  $\omega = \omega_s = \omega_e$ , acompanhando a frequência de alimentação CA [32].

A PLL (phase locked loop) é uma ferramenta que rastreia o ângulo-fase de um sistema trifásico ou de uma fase. Algumas das possíveis implementações que utiliza a transformada DQ consiste em uma malha de controle que mantém o ângulo-fase em tal valor de forma que uma das componentes se mantenha constante, por exemplo  $v_d(t) = 0$ . A figura 2.7 mostra um diagrama de uma PLL que entrega informação de ângulo-fase a partir das tensões das três fases.

Os diagramas de blocos apresentados neste trabalho foram feitos no Simulink e o **Apêndice A** apresenta brevemente os blocos que aparecem nos diagramas a fim de que o leitor não familiarizado com a ferramenta Simulink entenda e interprete mais facilmente as figuras de diagramas de blocos.

Na aplicação de PLL trifásica, pode-se monitorar a componente  $v_q(t)$ , mantendo  $v_d(t) = 0$ , comparar com uma referência e se a diferença ultrapassar um limiar, detecta-se afundamento de tensão [24]. Na figura 2.7, as entradas  $va$ ,  $vb$  e  $vc$  são as tensões de cada fase da rede, a constante  $wff$  é o valor da frequência nominal da rede usado como condição inicial no controle a fim de melhorar o desempenho e dinâmica inicial em rastrear um ângulo que está variando a uma velocidade da conhecida frequência nominal. As saídas  $vd$  e  $vq$  são as componentes direta e em quadratura estimadas pela PLL e as saídas  $w$  e  $theta$  são a frequência e fase estimadas pela PLL.

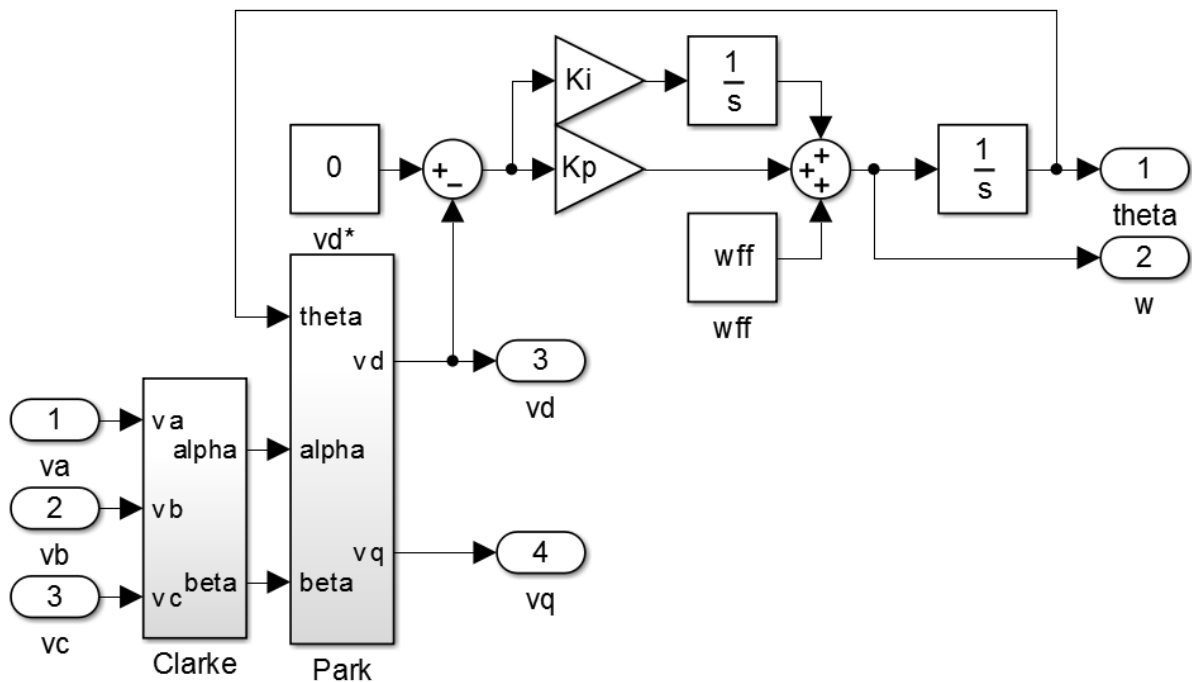


Figura 2.7: Diagrama de uma PLL trifásica para rastreamento do ângulo-fase de um sistema trifásico e monitoramento da componente  $v_d(t)$ .

Em situações em que ocorre um afundamento de tensão com salto de fase, o controle da PLL tende a rastrear o ângulo-fase. Ao rastrear com salto de fase, a componente  $v_d(t)$  vai ter valor não nulo durante um tempo transitório. Por esse motivo, o valor de pico é monitorado como na equação (2.10) ao invés de ser considerado como sendo igual a componente  $v_q(t)$  [24].

$$V_p = \sqrt{v_d(t)^2 + v_q(t)^2} \quad (2.10)$$

No caso de aplicar a análise DQ em cada fase individualmente, usa-se uma PLL monofásica. A PLL monofásica pode ser construída com a componente  $v_\beta(t)$  sendo obtida a partir da transformada Park inversa das componentes DQ calculadas no instante anterior. Nesse caso, a estabilidade da malha no sistema se encarrega de levar o estado  $v_\beta(t)$  ao seu valor real. Essa PLL é ilustrada na figura 2.8 [33].

Para a forma de detecção monofásica, a vantagem é informar prontamente o salto de fase. Por outro lado, não informa precisamente a profundidade do afundamento de tensão. Então pode ser aplicado como parte de uma solução, fazendo o papel de informar o salto de fase enquanto outro método obtém a informação de profundidade do afundamento [24].

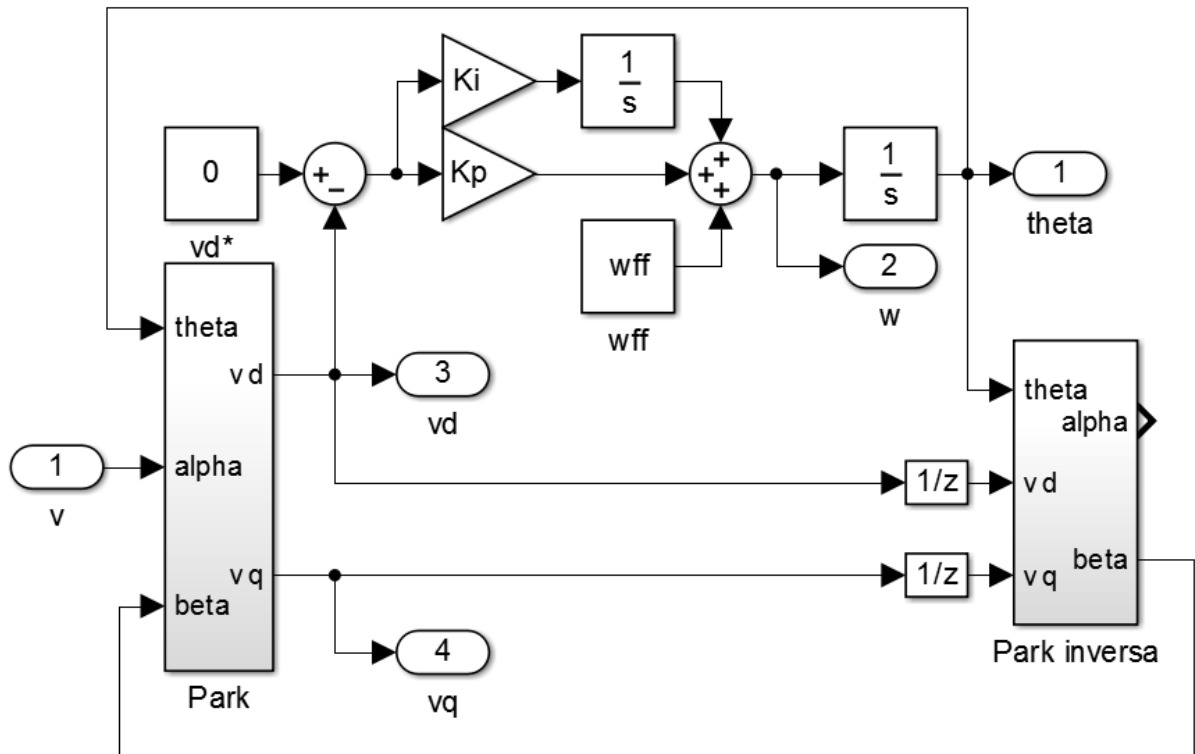


Figura 2.8: Diagrama de uma PLL monofásica para rastreamento do ângulo-fase de uma fase de tensão e monitoramento da componente  $v_a(t)$  usando transformada Park inversa.

Outra forma de determinar a amplitude  $V_p$ , em cada fase individualmente, é obter duas funções ortogonais a partir do próprio sinal de tensão. Uma dada tensão de alimentação  $v(t)$  é da forma de uma senoidal de período  $T$  em regime sem distúrbios. Ao se deslocar o ângulo em  $90^\circ$  com um deslocamento de tempo, obtém-se uma senoidal ortogonal  $v\left(t - \frac{1}{4}T\right)$ . A implementação da PLL usando essa forma de se obter essa função ortogonal é ilustrada na figura 2.9 e a maneira de se calcular o valor de pico é como apresentado na equação (2.11) [34].

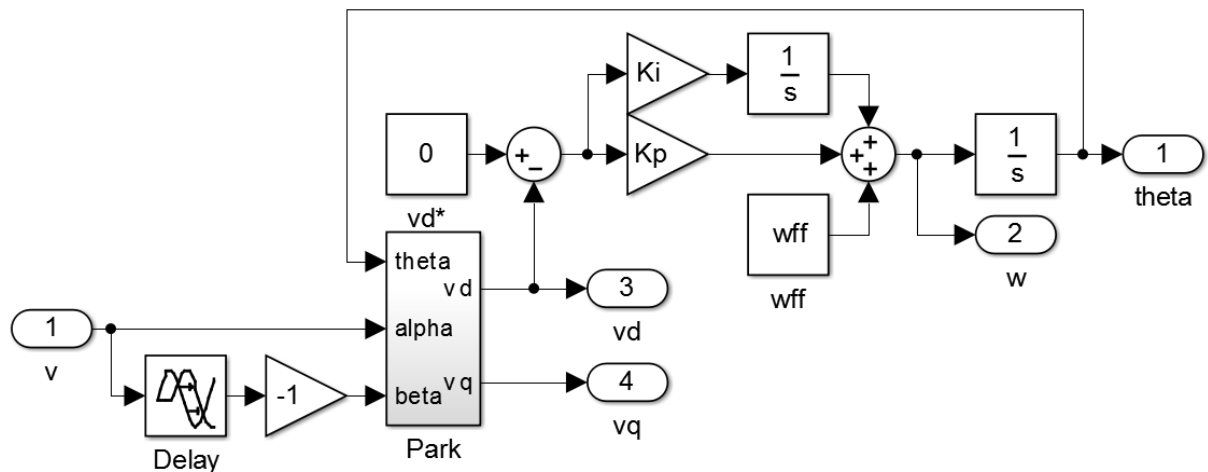


Figura 2.9: Diagrama de uma PLL monofásica para rastreamento do ângulo-fase de uma fase de tensão e monitoramento da componente  $v_a(t)$  usando o atraso puro de tempo em  $v(t)$ .

$$V_p(t) = \sqrt{v(t)^2 + v\left(t - \frac{1}{4}T\right)^2} \quad (2.11)$$

Para notar que o membro direito da equação (2.11) reflete o valor de pico segue-se a demonstração:

$$\begin{aligned} v(t) &= V_p \text{sen}(\omega t + \phi) \\ v\left(t - \frac{1}{4}T\right) &= V_p \text{sen}\left(\omega t + \phi - \frac{1}{4}\omega T\right) = V_p \text{sen}\left(\omega t + \phi - \frac{\pi}{2}\right) = -V_p \text{cos}(\omega t + \phi) \\ \sqrt{v(t)^2 + v\left(t - \frac{1}{4}T\right)^2} &= \sqrt{\left(V_p \text{sen}(\omega t + \phi)\right)^2 + \left(-V_p \text{cos}(\omega t + \phi)\right)^2} = V_p \end{aligned}$$

Outra forma de se obter uma senoidal ortogonal para se obter o par de funções ortogonais é extrair a derivada do sinal de tensão e aplicar um ganho para ajustar a escala pela frequência. A versão da PLL monofásica que calcula a função ortogonal com a derivada da tensão de fase é mostrada na figura 2.10. Essa forma calcula o valor de pico como apresentado na equação (2.12) [10].

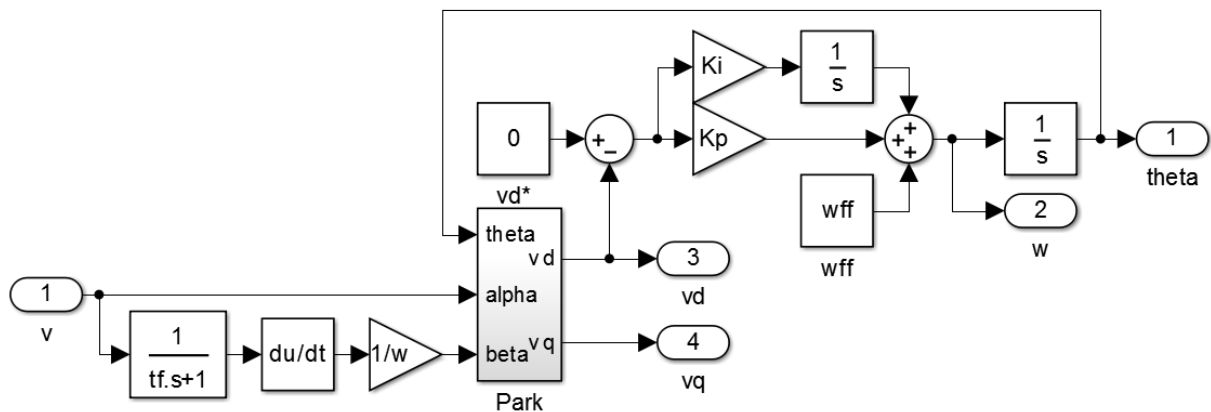


Figura 2.10: Diagrama de uma PLL monofásica para rastreamento do ângulo-fase de uma fase de tensão e monitoramento da componente  $v_d(t)$  usando a derivada de  $v(t)$ .

$$V_p(t) = \sqrt{v(t)^2 + \left(\frac{1}{\omega} \frac{d}{dt} v(t)\right)^2} \quad (2.12)$$

A demonstração dessa forma é tal como segue:

$$\begin{aligned} v(t) &= V_p \text{sen}(\omega t + \phi) \\ \frac{1}{\omega} \frac{d}{dt} v(t) &= \frac{1}{\omega} \omega V_p \text{cos}(\omega t + \phi) = V_p \text{cos}(\omega t + \phi) \\ \sqrt{v(t)^2 + \left(\frac{1}{\omega} \frac{d}{dt} v(t)\right)^2} &= \sqrt{\left(V_p \text{sen}(\omega t + \phi)\right)^2 + \left(V_p \text{cos}(\omega t + \phi)\right)^2} = V_p \end{aligned}$$

A aplicação de qualquer uma de ambas as formas de se obter uma função ortogonal para detecção de afundamento de tensão é referida como detector ortogonal [10]. Por qualquer uma das formas de se obter o valor de pico, a técnica compara tal valor com uma referência e acusa afundamento de tensão se a diferença superar um limiar. O fim do afundamento se dá quando a diferença volta para inferior ao limiar.

### 2.4.3 Monitoramento do Valor Eficaz

A tensão de alimentação é novamente considerada uma função senoidal com um valor eficaz  $V_{rms}$ . A detecção de afundamento é acusada quando a diferença entre uma referência de valor eficaz nominal e o valor eficaz calculado da tensão de rede é maior que um limiar. A interpretação da técnica fica claramente igual a definição de afundamento de tensão segundo o PRODIST e IEEE std 1159-2009 quando o limiar de tolerância é de  $0,1pu$ . O valor eficaz da tensão na fase é definido como na equação (2.13), ou como na equação (2.14) para a versão em tempo discreto.

$$V_{rms}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t - \tau)^2 d\tau} \quad (2.13)$$

$$V_{rms}[k] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[k - n]^2} \quad (2.14)$$

Uma dificuldade de se calcular o valor eficaz como na sua definição em (2.14) a cada amostra de tensão de rede é aplicar uma soma em um grande volume de dados. Uma maneira de se reduzir o custo computacional, e também o tempo de resposta da detecção, é considerar meio ciclo para o cálculo do valor eficaz [16]. Além disso, considerando que meio ciclo tem  $N$  amostras, uma forma mais prática de se implementar foi demonstrada em [34] e expressa em (2.15) e (2.16), dispensando a necessidade de somar todos os valores de um ciclo inteiro. Como o número de amostras  $N$ , associado a um conhecimento de quantas amostras formam meio ciclo da tensão de rede, é uma constante, essa técnica assume que a frequência da rede é constante.

$$V_{rms}[k] = \sqrt{\frac{1}{N} S[k]} \quad (2.15)$$

$$S[k] = S[k - 1] + v[k]^2 - v[k - N]^2 \quad (2.16)$$

Em que  $N$  é o número de amostras em meio ciclo. A demonstração para essa forma de se calcular o valor eficaz é dada por:

$$\begin{aligned}
 v[k] &= \frac{V_{rms}}{\sqrt{2}} \text{sen} \left( \frac{2\pi}{2N} k + \phi \right) \\
 S[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} v[k-n]^2 \\
 V_{rms}[k] &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[k-n]^2} = \sqrt{\frac{1}{N} S[k]} \\
 S[k-1] &= \sum_{n=0}^{N-1} v[k-n-1]^2 \\
 S[k] - S[k-1] &= \sum_{n=0}^{N-1} v[k-n]^2 - \sum_{n=0}^{N-1} v[k-n-1]^2 = v[k]^2 - v[k-N]^2 \\
 S[k] &= S[k-1] + v[k]^2 - v[k-N]^2
 \end{aligned}$$

Essa técnica tem implementação simples e baixa complexidade computacional com a forma prática demonstrada de se obter o valor eficaz. Por outro lado, não entrega informação de salto de fase e há perda na precisão das informações de instantes inicial e final do afundamento por efeito de se considerar média em uma janela [34].

#### 2.4.4 Monitoramento do Desvio do Valor Instantâneo

Essa técnica é aplicada a cada fase individualmente. O desvio do valor instantâneo é a diferença entre o valor da tensão de rede e uma referência variável que tem forma senoidal, com amplitude, fase e frequência que a tensão teria em condições sem distúrbio. A maneira de se obter essa referência é aplicando uma PLL monofásica na tensão de rede para rastrear o ângulo-fase [34]. É desejável que o tempo de resposta da PLL seja grande – PLL lenta – para o rastreamento rejeitar a perturbação do próprio distúrbio que ocorrer na tensão [26].

Sendo a tensão de rede  $v(t)$  e a referência obtida por uma PLL aplicada a tensão de rede  $v_{ref}(t)$ , o desvio do valor instantâneo é dado em (2.17).

$$v_m(t) = v_{ref}(t) - v(t) \quad (2.17)$$

Assumindo que ambas as tensões  $v_{ref}(t)$  e  $v(t)$  são senoidais com amplitudes  $V_{ref}$  e  $V$  e fases  $\phi_{ref}$  e  $\phi$ , o desvio assume a forma dada por:

$$\begin{aligned}
 v_m(t) &= V_{ref} \text{sen}(\omega t + \phi_{ref}) - V \text{sen}(\omega t + \phi) = V_m \text{sen}(\omega t + \phi_m) \\
 V_m &= \sqrt{V_{ref}^2 + V^2 - 2V_{ref}V \cos(\phi_{ref} - \phi)}
 \end{aligned}$$

$$\phi_m = \tan^{-1} \left( \frac{V_{ref} \sin(\phi_{ref}) - V \sin(\phi)}{V_{ref} \cos(\phi_{ref}) - V \cos(\phi)} \right)$$

As vantagens dessa técnica são a alta precisão em informações de instantes inicial e final do afundamento de tensão e capacidade de entregar informações instantâneas de profundidade e salto de fase do distúrbio [34].

A principal desvantagem dessa técnica é que para um afundamento de tensão senoidal, o desvio sendo também senoidal cruza pelo zero repetidamente durante o distúrbio. Isso contribui para que o detector fique vulnerável a falsa detecção de fim de distúrbio. Uma segunda desvantagem é a dinâmica da PLL, que pode levar um certo tempo até o controle entrar em regime permanente e a PLL formar uma referência senoidal de mesma frequência e em fase com a tensão de rede. Outro ponto fraco dessa técnica é a fragilidade a falsas detecções quando ocorrem fenômenos como ruído, distorção harmônica ou transitórios. Na ocorrência de algum desses fenômenos, o desvio pode superar o limiar que separa a situação de detecção de presença ou de ausência de afundamento, causando uma falsa detecção.

A figura 2.11 mostra um exemplo de afundamento de tensão com um envelope em torno da referência senoidal. Os limites superior e inferior do envelope marcam um limiar a partir do qual se o desvio instantâneo ultrapassar, é detectado afundamento.

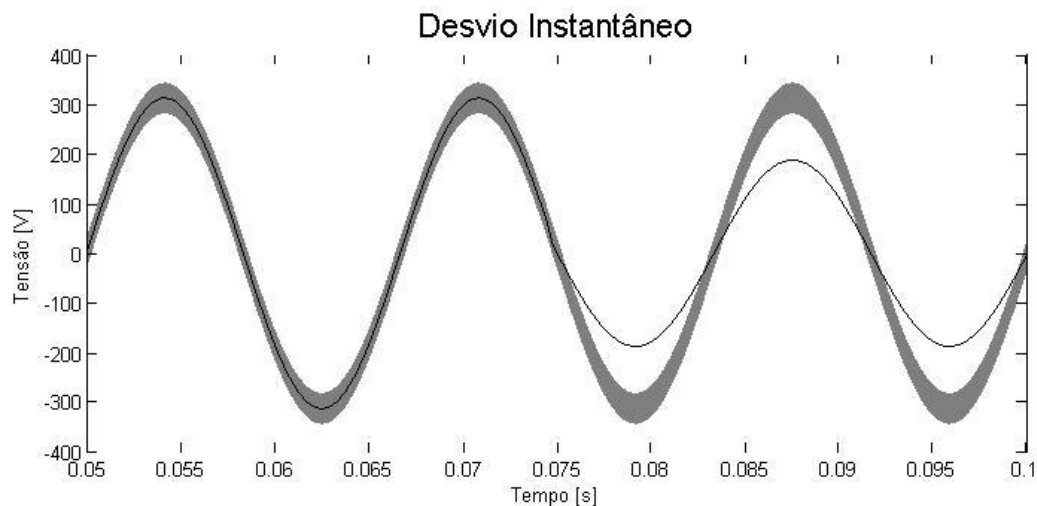


Figura 2.11: Exemplo de afundamento de tensão e envelope em torno da referência senoidal para detecção pelo método de monitoramento do desvio de valor instantâneo.

#### 2.4.5 Análise da Transformada de Fourier com Janela

Essa técnica é aplicada a cada fase. A ferramenta de transformada de Fourier com janela (windowed fast fourier transform, WFFT) é aplicada em uma janela deslizante para se obter informações de magnitude e fase de cada componente de frequência [24].



Para detecção de afundamento de tensão, a magnitude da componente fundamental, com frequência nominal da rede, é avaliada e comparada com uma referência. A fase dessa componente também pode ser útil para informar o salto de fase instantâneo durante um distúrbio [16]. A equação (2.18) mostra o cálculo da componente fundamental da tensão de uma fase como um número complexo. A magnitude desse valor é a amplitude da tensão e a sua fase é o salto de fase da tensão na janela analisada.

$$V_{fund}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t v(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau \quad (2.18)$$

Em aplicações práticas, usa-se a versão em tempo discreto, expresso na equação (2.19), com uma janela de  $N$  dados com valores  $v[k - n]$ ,  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ .

$$V_{fund}[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[k - n] e^{-j\frac{2\pi n}{N}} \quad (2.19)$$

A vantagem é a riqueza de informações de magnitude e fase de cada um dos componentes harmônicos, além da fundamental, da rede de alimentação. Dependendo da aplicação, tais informações extras podem ser usadas. Um exemplo de uso dessas informações é para uma etapa de classificação do distúrbio, podendo-se ampliar o estudo para incluir outros fenômenos de qualidade de energia conhecidos tais como elevações de tensão, interrupções, transitórios impulsivos ou oscilatórios, distorções harmônicas e ruído [28].

Uma ferramenta alternativa a WFFT que tem sido usado para prover informações para a etapa de classificação é a transformada Wavelet (Wavelet transform, WT) [24], [28], [30].

#### 2.4.6 Controle de Tensão com Histerese

Essa técnica é composta por detecção a todo instante e atuação com um dispositivo condicionador como um DVR. Para ilustrar a técnica, será assumido que a atuação é feita com um DVR com armazenamento de energia em um barramento CC com tensão  $V_{cc}$  em capacitores, conversão CC-CA em uma ponte de IGBTs e injeção de tensão em transformadores em série com a carga.

Nessa técnica, a tensão na carga é comparada com uma tensão de referência, obtendo-se um erro. A tensão de compensação é provida do barramento CC. Para cada fase, quando o erro alcança um limiar positivo – a tensão de alimentação está com valor instantâneo acima da referência senoidal – a ponte de IGBTs é chaveada para injetar tensão negativa  $-V_{cc}$  no

transformador em série com a carga. Quando o erro alcança um limiar negativo – dessa vez o valor instantâneo está abaixo da referência senoidal – a configuração de chaveamento na ponte é tal que injete tensão positiva  $+V_{cc}$  em série com a carga. Assim, o sistema de compensação está injetando tensão positiva ou negativa a ser somada com a tensão de rede o tempo todo [34]. Como a atuação tende a corrigir a tensão em ambas as situações – tensão na rede acima e abaixo da referência – o problema de elevação de tensão também é combatido por essa técnica [8].

Para reduzir o número de chaveamentos na situação em que a tensão na carga se mantém próxima da referência, um efeito de histerese é posto de forma a prover uma tolerância na descida enquanto uma tensão positiva ainda é injetada até alcançar o limiar de tolerância abaixo da referência. Também na subida, enquanto uma tensão negativa ainda é injetada, até alcançar o limiar de tolerância acima da referência. Essa tolerância é chamada de banda de histerese [8]. A figura 2.12 mostra um diagrama de blocos que obtém como saída um sinal de comandos de chaveamentos para cada fase da ponte de IGBTs a fim de injetar tensão positiva ou negativa em série com a carga [34].

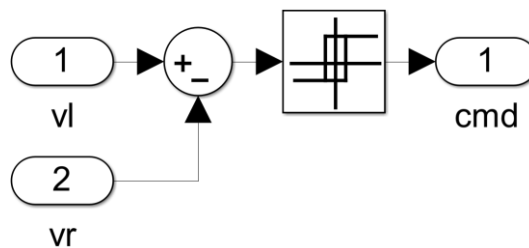


Figura 2.12: Diagrama de blocos de produção de sinal de comandos de chaveamentos para a ponte de IGBTs. Com essa forma de chavear, a tensão da carga  $v_l$  é controlada para ficar tão próxima quanto possível da tensão de referência  $v_r$ .

Essa técnica pode ser usada em alimentação trifásica com um sinal de saída e seu complemento sendo usados para comandar cada fase da ponte de IGBTs [35], [36]. Nessa caso, cada fase da ponte é comandada por um sinal e seu complemento em dois conjuntos compostos, cada um, por uma chave IGBT e um diodo em anti-paralelo. A figura 2.13 mostra um diagrama de circuitos com os sinais comandando cada IGBT na ponte trifásica para atuar em série com a carga.

A atuação do controle de tensão com histerese também pode ser usada em conjunto com outra técnica de detecção de afundamento de tensão. Um exemplo é apresentado por Marafão et. al., que usou o controle de tensão com histerese para atuação em conjunto com a técnica de detecção baseada em monitoramento do valor de pico usando atraso de tempo, mostrando os resultados em simulações [37].

O controle de tensão com histerese também pode ser aplicado em uma fase com uma ponte de IGBTs monofásica. Nesse caso a ponte contém 4 conjuntos com um IGBT e um diodo em anti-paralelo [8]. A figura 2.14 mostra um diagrama de circuitos com o sinal de controle de tensão com histerese e seu complemento atuando sobre as chaves IGBTs de uma ponte monofásica.

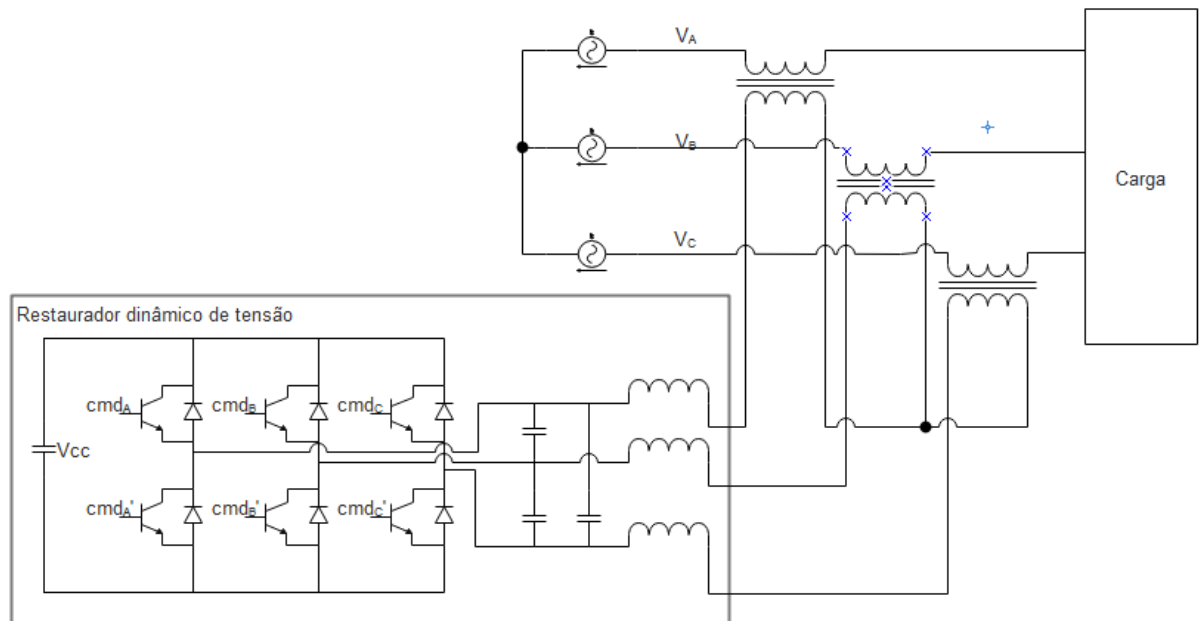


Figura 2.13: Diagrama de circuitos do restaurador dinâmico de tensão mostrando os sinais de controle obtidos pela técnica de controle de tensão com histerese sobre as chaves IGBTs da ponte trifásica para atuação em uma carga trifásica.

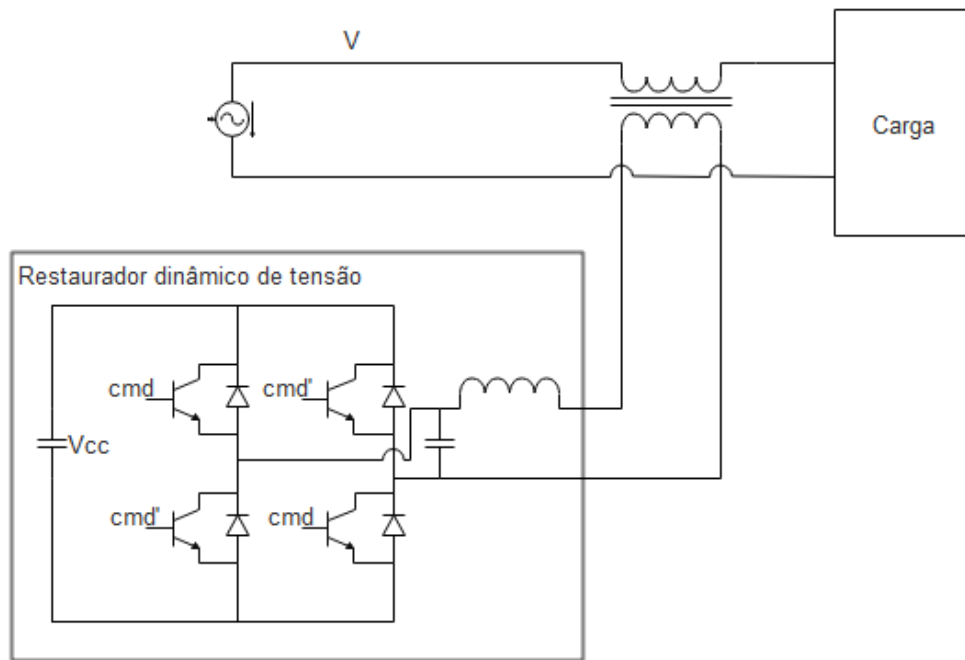


Figura 2.14: Diagrama de circuitos do restaurador dinâmico de tensão mostrando o sinal de controle obtido pela técnica de controle de tensão com histerese sobre as chaves IGBTs da ponte monofásica para atuação em uma carga monofásica.

Para a aplicação dessa técnica sobre uma carga monofásica, foi demonstrada uma forma de se obter um terceiro estado em que é aplicada tensão nula sobre o transformador em série com a carga na referência [8]. Esse estado é desejável na situação em que a carga não está sofrendo algum problema de qualidade de energia que desvie a sua tensão da tensão de referência.

## CAPÍTULO 3

### ALGORITMOS E SIMULAÇÕES

As técnicas de detecção de afundamento de tensão apresentadas no **Capítulo 2** foram implementadas em ambiente de simulação incluindo códigos Matlab<sup>®</sup> e diagramas de blocos em Simulink<sup>®</sup>. As implementações visam gerar simulações, fazer validação e avaliação do desempenho de cada técnica sob diversos conjuntos de dados – gerados e reais de medição – de afundamentos de tensão a fim de se levantar comparações.

Na transição de estado de presença ou ausência de afundamento de tensão, apontado por detecção, foi incluída uma regra de transição de detecção após a ultrapassagem de um limiar de número de amostras no novo estado [38]. Quanto maior o número de amostras na regra, mais lenta tende a ser a detecção. Por outro lado, um número muito pequeno deixa a detecção mais vulnerável a falsos positivos. Um ajuste de compromisso por tentativas com dados reais de medição apontou que usar 16 pontos como o limiar para essa regra é suficiente para minimizar as detecções falsas.

O monitoramento do valor de pico utiliza valores extraídos diretamente de uma PLL e as técnicas de monitoramento do desvio do valor instantâneo e controle de tensão com histerese utilizam tais valores para prover uma função senoidal de referência. Por esse motivo, antes de apresentar as implementações de cada técnica, são demonstradas as implementações de PLL monofásicas pelas abordagens mencionadas no **Capítulo 2**.

#### 3.1 Implementações de PLL

A PLL é uma ferramenta de uso popular para rastreamento de ângulo-fase para sistemas que necessitam sincronizar com a rede de alimentação. Para as diversas aplicações, existem projetos de PLL rápida e PLL lenta – tempo de resposta lento para variações de ângulo-fase – e de PLL trifásica e PLL monofásica [39], [40]. No caso de detecção de afundamentos de tensão, é usada uma PLL lenta para construir sinal de referência. A importância de se ter uma PLL lenta para construção de sinal de referência é garantir uma maior robustez ao salto de fase presente em um distúrbio a ser detectado. Dessa forma é desejável que a PLL seja tão lenta quanto possível. Para este trabalho, em que são apresentados resultados em janelas de 100 milissegundos, um tempo de acomodação de 10 segundos é suficientemente lento. Em aplicação real, sugere-se aumentar tanto quanto maiores forem as durações esperadas de afundamento, por exemplo 6 horas para afundamento temporário de 3 minutos.

### 3.1.1 Malha de Controle Equivalente da PLL

Para as aplicações nas técnicas de detecção de afundamentos em cada fase, é usada PLL lenta e monofásica. As três formas de implementação de PLL feitas para simulação e avaliação são as ilustradas nas figuras 2.8, 2.9 e 2.10. Essas formas têm em comum a transformada Park e o controle do ângulo-fase fixando as componentes  $v_d(t)$  e  $v_q(t)$  em  $0,0pu$  e  $1,0pu$ .

O ajuste do controlador requer uma representação do sistema em malha fechada de forma a encontrar as condições que satisfaçam requisitos como sobre-elevação e tempo de acomodação. Como se averigua na malha de controle nas figuras 2.8, 2.9 e 2.10, sabe-se prontamente que:

$$\omega(t) = \omega_{ff} + K_p(0 - v_d(t)) + K_i \int (0 - v_d(t))dt = \omega_{ff} - K_p v_d(t) - K_i \int v_d(t)dt \quad (3.1)$$

A componente  $v_d(s)$  pode ser escrita, conforme transformada Park, como:

$$v_d(t) = v_\alpha(t)\text{sen}(\theta(t)) + v_\beta(t)\text{cos}(\theta(t)) \quad (3.2)$$

Considerando que o sinal de entrada  $v(t)$  é uma tensão senoidal, pode ser escrita como:

$$v(t) = \text{cos}(\omega^*t + \theta_0^*) = \text{cos}(\theta^*(t)) \quad (3.3)$$

Onde  $\omega^*$  e  $\theta^*(t)$  são a frequência e fase de referência, que são a frequência e fase da tensão de rede. Uma representação trifásica para a entrada monofásica  $v(t)$  é obtida emulando três fases equilibradas com amplitude de  $v(t)$  e defasadas de  $\frac{2\pi}{3}$ .

$$\begin{aligned} v_a(t) &= v(t) = \text{cos}(\theta^*(t)) \\ v_b(t) &= v\left(t - \frac{2\pi}{3}\right) = \text{cos}\left(\theta^*(t) - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_c(t) &= v\left(t + \frac{2\pi}{3}\right) = \text{cos}\left(\theta^*(t) + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Aplicando a transformada Clarke, usando (2.1) ou (2.5), as componentes  $v_\alpha(t)$  e  $v_\beta(t)$  são:

$$v_\alpha(t) = \text{cos}(\theta^*(t)) \quad (3.5)$$

$$v_\beta(t) = -\text{sen}(\theta^*(t)) \quad (3.6)$$

Substituindo-se (3.5) e (3.6) em (3.2), obtém-se:

$$v_d(t) = \text{cos}(\theta^*(t))\text{sen}(\theta(t)) - \text{sen}(\theta^*(t))\text{cos}(\theta(t)) = \text{sen}(\theta(t) - \theta^*(t)) \quad (3.7)$$

Reunindo as equações (2.9), (3.1) e (3.7), chega-se a uma relação não linear entre o ângulo-fase de referência  $\theta^*(t)$  como entrada que deve ser rastreada e o ângulo-fase  $\theta(t)$  do referencial da PLL como saída:

$$\theta(t) = \int \left( \omega_{ff} - K_p \text{sen}(\theta(t) - \theta^*(t)) - K_i \int \text{sen}(\theta(t) - \theta^*(t)) dt \right) dt = \int \left( \omega_{ff} + K_p \text{sen}(\theta^*(t) - \theta(t)) + K_i \int \text{sen}(\theta^*(t) - \theta(t)) dt \right) dt \quad (3.8)$$

Esse sistema é representado pelo diagrama de blocos da figura 3.1, onde se visualiza uma malha de controle com um elemento não linear. A entrada  $\theta_{ref}$  e  $\theta$  são  $\theta^*(t)$  e  $\theta(t)$  respectivamente.

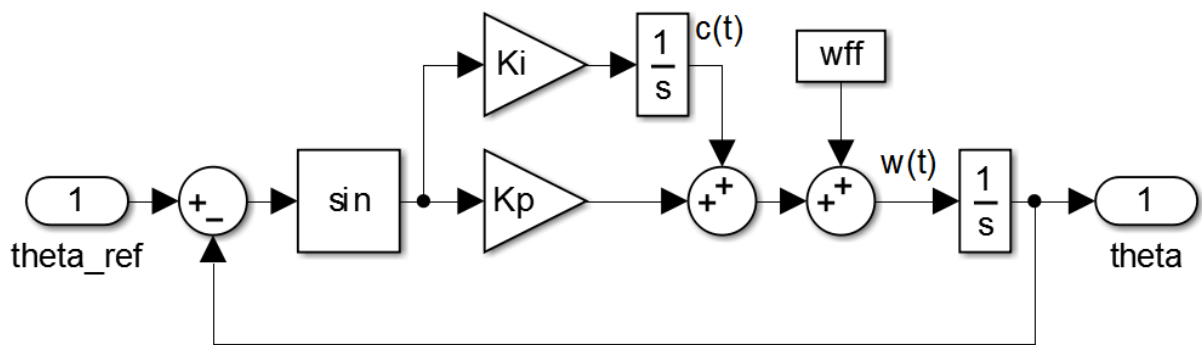


Figura 3.1: Diagrama da malha de controle não linear da PLL para rastrear o ângulo-fase do sinal de entrada de tensão de rede senoidal.

### 3.1.2 Análise de Estabilidade da PLL

Para uma análise de estabilidade não linear, o ângulo de referência  $\theta^*(t)$  e o valor de frequência inicial  $\omega_{ff}$  são fixados em zero. Nesse cenário, o sistema pode ser escrito na forma de espaço de estados como:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}(t) &= -K_p \text{sen}(\theta(t)) + c(t) \\ \dot{c}(t) &= -K_i \text{sen}(\theta(t)) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{c}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_p \text{sen}(\theta(t)) + c(t) \\ -K_i \text{sen}(\theta(t)) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Os valores dos estados  $\theta(t)$  e  $c(t)$  que produzem derivadas nulas nos estados são múltiplos de  $\pi$  para  $\theta(t)$  e  $c(t) = 0$ . Essa situação produz saída nula no bloco seno e ambos os sinais de controle, proporcional e integral, são nulos. Assim a PLL não acelera nem desacelera. Portanto os pontos de equilíbrio, também chamados pontos singulares [41], [42], são dados por:

$$X_{eq} = X_{eq,est} \cup X_{eq,inst} = \{(2n\pi, 0), n \in \mathbb{Z}\} \cup \{(2n+1)\pi, 0), n \in \mathbb{Z}\} \quad (3.10)$$

A equação (3.10) mostra explicitamente os conjuntos com os pontos de equilíbrio estáveis e instáveis. Os pontos de equilíbrio de um sistema de segunda ordem são classificados em:

- Foco estável: trajetória dos estados converge para o ponto de equilíbrio e há oscilações nos estados;
- Foco instável: trajetória dos estados contém oscilações em torno do ponto de equilíbrio com a amplitude crescendo indefinidamente;
- Nó estável: trajetória converge assintoticamente para o ponto de equilíbrio;
- Nó instável: trajetória diverge do ponto de equilíbrio assintoticamente;
- Centro: trajetória periódica em torno do ponto de equilíbrio independentemente do estado inicial;
- Ponto de sela: há regiões dentro da qual as trajetórias convergem e outras em que a trajetória diverge do ponto de equilíbrio.

Se o parâmetro de controle  $K_p$  é positivo, um estado com ângulo  $0 < \theta(t) < \pi$  leva a parcela proporcional de controle a ser negativa, contribuindo para uma aproximação da condição  $\theta(t) = 0$ . No outro lado, com  $-\pi < \theta < 0$ , a parcela proporcional de controle será positiva e também contribui para  $\theta(t)$  se aproximar de zero. Porém se  $K_p$  for negativo, o raciocínio de ambos os intervalos revelam uma aproximação em  $\pm\pi$  e não em zero. Tal raciocínio pode ser feito de maneira análoga em outros intervalos da forma  $(2n\pi, (2n + 1)\pi)$  e pode ser notado que  $\theta(t)$  tenderá a múltiplo de  $2\pi$  se  $K_p > 0$  ou a múltiplo ímpar de  $\pi$  se  $K_p < 0$ . Logo a PLL terá um comportamento de rastrear o ângulo-fase de referência se  $K_p > 0$ , enquanto terá tendência a rastrear o ângulo-fase de referência defasado de meio ciclo se  $K_p < 0$ . E se  $K_p = 0$  a parcela proporcional não contribuirá para uma aproximação nem de um lado nem do outro.

Para verificar se os pontos de equilíbrio da PLL têm ciclo limite estável – o que é indesejável para a aplicação de rastreamento de ângulo-fase – é feita uma análise de trajetória de resposta a senoidais dos elementos linear e não linear. Se existir ciclo limite, ao injetar uma entrada senoidal na função seno,  $-\theta(t) = A_\theta \text{sen}(\omega_\theta t)$ , a sua saída será uma função periódica  $u(t) = \text{sen}(A_\theta \text{sen}(\omega_\theta t))$ . Essa é também entrada para o sistema linear composto do controlador PI seguido de um integrador. O sistema linear atenua componentes de frequência



maior que  $\omega_\theta$  produzindo novamente o sinal  $\theta(t) = -A_\theta \text{sen}(\omega_\theta t)$ . Essa condição é verificada quando a amplitude  $A_\theta$  e a frequência  $\omega_\theta$  do sinal satisfazem:

$$1 + N(A_\theta, \omega_\theta)G(j\omega_\theta) = 0 \Leftrightarrow G(j\omega_\theta) = -\frac{1}{N(A_\theta, \omega_\theta)} \quad (3.11)$$

Onde  $G(j\omega_\theta)$  é um número complexo que representa a resposta em frequência do elemento linear, incluindo ganho e deslocamento de fase; e  $N(A_\theta, \omega_\theta)$  é também um número complexo que representa o ganho e deslocamento de fase da fundamental da saída em relação a entrada senoidal no elemento não linear. Para o caso não linear, a relação entre a fundamental da saída e a entrada senoidal é dada pela função descritiva. Para a função seno, a função descritiva é dada por [43], [44]:

$$N(A_\theta, \omega_\theta) = 2 \frac{J_1(A_\theta)}{A_\theta} \quad (3.12)$$

Que é um número real, já que a função seno é ímpar. A função  $J_1(A)$  é a função de Bessel de primeira ordem. A figura 3.2 mostra o perfil da função descritiva da função seno. Esse gráfico mostra uma forma genérica em que a amplitude vale  $M$  e a função seno é aplicada em uma harmônica de ordem  $m$ . No caso presente,  $M = m = 1$ .

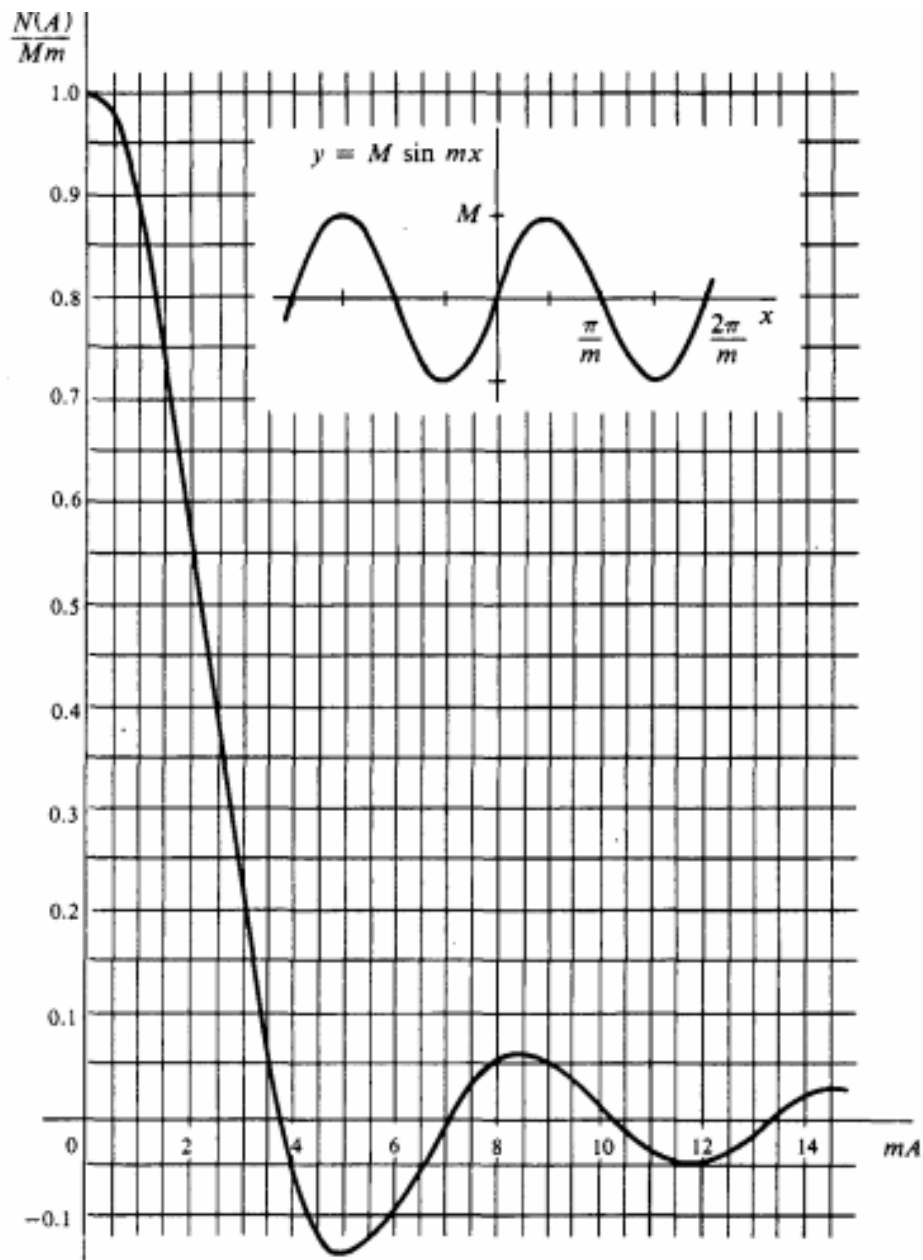


Figura 3.2: Gráfico da função descritiva da função seno. O gráfico vem das referências [43] e [44] e mostra de forma genérica com um ganho da frequência para representar harmônica de ordem  $m$  e amplitude  $M$ .

A figura 3.3 mostra as trajetórias de  $G(j\omega_\theta)$  e  $N(A_\theta, \omega_\theta) = N(A_\theta)$ . Para  $G(j\omega_\theta)$  a frequência  $\omega_\theta$  foi parametrizada e a trajetória equivale a de Nyquist. Para  $N(A_\theta)$  a variável parametrizada é  $A_\theta$ .

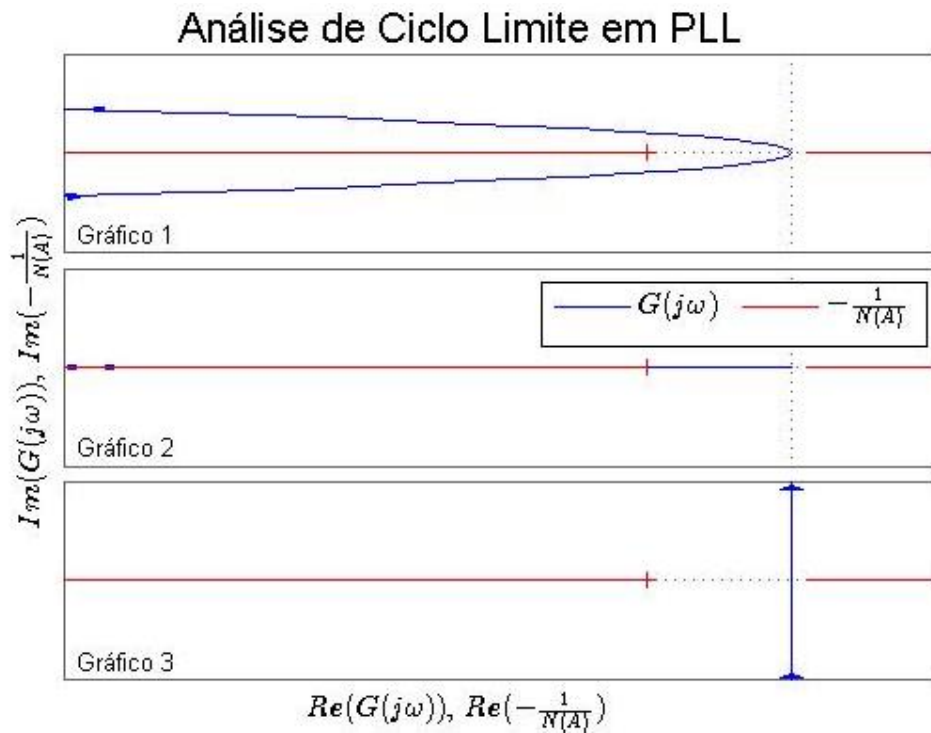


Figura 3.3: Análise de ciclo limite em PLL com trajetórias dos elementos linear e não linear parametrizando a frequência e a amplitude de um sinal senoidal de saída do elemento linear que alimenta o elemento não linear.

O gráfico 1 da figura 3.3 mostra a situação em que  $K_p, K_i > 0$ , onde claramente não há intercessão, o que indica que não há ocorrência de ciclo limite. A forma das trajetórias nesse gráfico se mantém da mesma forma se variar os parâmetros  $K_p$  e  $K_i$  mantendo  $K_p, K_i > 0$ . Para  $K_p < 0$  a parte imaginária da trajetória de  $G(j\omega_\theta)$  troca de sinal em relação a condição  $K_p > 0$ . E para  $K_i < 0$ , troca-se o sinal da parte real da trajetória de  $G(j\omega_\theta)$ . Em cada configuração, a trajetória  $G(j\omega_\theta)$  intercepta o eixo real apenas na origem com  $\omega_\theta \rightarrow \pm\infty$ . Isso mostra que não há ciclo limite independentemente dos valores de  $K_p$  e  $K_i$  na condição de ambos parâmetros não nulos. Se  $K_p = 0$ , a trajetória de  $G(j\omega_\theta)$  se torna como no gráfico 2 da figura 3.3, interceptando a trajetória de  $N(A_\theta)$  e então passando a ter ciclos limites. Nessa situação, os pontos de equilíbrios se tornam centros. Se  $K_i = 0$ , o elemento linear se torna apenas um integrador com um ganho e a trajetória de  $G(j\omega_\theta)$  passa a ser da forma do gráfico 3 da figura 3.3 e também é uma situação sem ciclo limite.

Com as análises feitas, a parcela proporcional contribui para aproximação dos pontos de equilíbrio com  $\theta(t)$  múltiplo de  $2\pi$  se  $K_p > 0$ . Quanto a estabilidade levando em consideração a contribuição da parcela integral, pode ser feita a partir de uma função semidefinida positiva, normalmente representando a energia ou distância dos estados ao ponto de equilíbrio, e verificando que sua derivada é semidefinida negativa. Tal função deve valer

zero quando os estados estão em um ponto de equilíbrio estável. Essa é a função de Lyapunov. Ao fazer  $K_p = 0$  e calcular  $\ddot{\theta}(t)$  a partir de (3.9), obtém-se:

$$\ddot{\theta}(t) + K_i \text{sen}(\theta(t)) = 0 \quad (3.13)$$

Que é análogo a um pêndulo sem perdas de atrito dinâmico [42]. A função de Lyapunov e sua derivada do tempo para esse sistema são dadas por:

$$V(t) = K_i \int_0^{\theta(t)} \text{sen}(\phi) d\phi + \frac{1}{2} \dot{\theta}(t)^2 = K_i (1 - \cos(\theta(t))) + \frac{1}{2} \dot{\theta}(t)^2 \quad (3.14)$$

$$\dot{V}(t) = K_i \dot{\theta}(t) \text{sen}(\theta(t)) + \dot{\theta}(t) \ddot{\theta}(t) = K_i \dot{\theta}(t) \text{sen}(\theta(t)) - K_i \dot{\theta}(t) \text{sen}(\theta(t)) = 0 \quad (3.15)$$

Claramente  $V(t)$  é semidefinida positiva para  $K_i > 0$  e  $\dot{V}(t)$  é semidefinida negativa. Mas como  $\dot{V}(t) = 0, \forall K_i$ , a PLL com apenas parcela integral é marginalmente estável e, conforme já observado, há ciclo limite e os pontos de equilíbrio se tornam centros. A parcela proporcional é análoga às perdas no pêndulo, extraindo energia de forma que o estado  $\theta(t)$  tenda a múltiplo de  $2\pi$  com  $K_p > 0$ .

Em regime permanente da PLL, o ângulo  $\theta(t)$  está bastante próximo do ângulo-fase  $\theta^*(t)$  do sinal real  $v(t)$  a se rastrear a fase. Considerando essa hipótese, é válida a aproximação  $\text{sen}(\theta(t) - \theta^*(t)) \rightarrow \theta(t) - \theta^*(t)$ , linearizando a função seno em torno do ponto de equilíbrio com  $\theta(t) = 0$ , e chega-se em:

$$v_a(t) = \theta(t) - \theta^*(t) \quad (3.16)$$

E agora reunindo as equações (2.9), (3.1) e (3.16) e aplicando a transformada de Laplace:

$$\theta(s) = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \theta^*(s) + \frac{s}{s^2 + K_p s + K_i} \omega_{ff} \quad (3.17)$$

De onde a primeira parcela contém uma função de transferência válida para pequenas variações no ângulo-fase  $\theta^*(t)$ . Essa é a função de transferência da malha fechada linearizada do controle de rastreamento do ângulo-fase [40].

$$H(s) = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \quad (3.18)$$

Em uma análise de estabilidade de sistema linear, pode ser verificado pelo critério de Routh [41] que os parâmetros devem satisfazer  $K_p, K_i > 0$  para a malha de controle linearizada ser estável. Na verdade, a versão linearizada considera apenas o ponto  $(\theta(t), c(t)) = (0,0)$

como ponto de equilíbrio estável e não mais os outros pontos em  $(\theta(t), c(t)) = (2n\pi, 0)$ , ou mesmo  $(\theta(t), c(t)) = ((2n + 1)\pi, 0)$  quando  $K_p < 0$ . Por esse motivo, o critério de estabilidade linear na versão linearizada da malha de controle ficou mais restritiva que nas análises não lineares.

### 3.1.3 Ajuste do Controlador PI da PLL

Em função da forma canônica da função de transferência de um sistema de segunda ordem – com frequência de corte  $\omega_n$  e fator de amortecimento  $\zeta$  – os parâmetros de controle são escritos como [39], [40]:

$$\begin{aligned} K_p &= 2\zeta\omega_n \\ K_i &= \omega_n^2 \end{aligned} \quad (3.19)$$

E os requisitos impostos para garantir uma PLL lenta, estável e com certa limitação em sobre elevação são representados como (sobre elevação e tempo de acomodação) [41], [45]:

$$\begin{aligned} M[\%] &= 100e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \\ T_s &= \frac{4}{\zeta\omega_n} \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \zeta &= \sqrt{\frac{x^2}{x^2 + 1}}, x = -\frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{M[\%]}{100}\right) \\ \omega_n &= \frac{4}{T_s\zeta} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Para um tempo de acomodação de 10 segundos, que equivale a 600 ciclos – suficiente para se considerar como PLL lenta para os dados usados nas simulações – e tolerância de até 1% de sobre elevação, os parâmetros do controlador foram ajustados em:

$$\begin{aligned} K_p &= 0,8 \\ K_i &= 0,2345 \end{aligned}$$

Com esses valores,  $\omega_n = 0,4842$  e  $\zeta = 0,8261$ . Os polos são os complexos conjugados  $0,4 \pm j0,2729$ . Por causa da malha de controle ser subamortecida, os pontos de equilíbrio estáveis da PLL são focos estáveis e os pontos de equilíbrio instáveis são focos instáveis.

### 3.1.4 Resultados das Implementações de PLL

As três formas de implementação de PLL das figuras 2.8, 2.9 e 2.10 foram construídas em simulações com os dados valores dos parâmetros do controlador e a partir de agora são

referidas como PLL<sub>1</sub> (com Park inversa), PLL<sub>2</sub> (com atraso de tempo) e PLL<sub>3</sub> (com derivação e ajuste de escala).

A figura 3.4 mostra o desempenho da PLL<sub>1</sub> sob uma tensão senoidal com frequência de 60Hz e ângulo-fase inicial deslocado de  $0,4\pi$  em relação ao ângulo-fase inicial da PLL. Essa condição inicial desfavorável é importante na simulação para mostrar a capacidade do controle em convergir para o ângulo-fase do sinal – e o sinal de desvio da componente  $v_d(t)$  convergir para zero –, provando a característica de estabilidade.

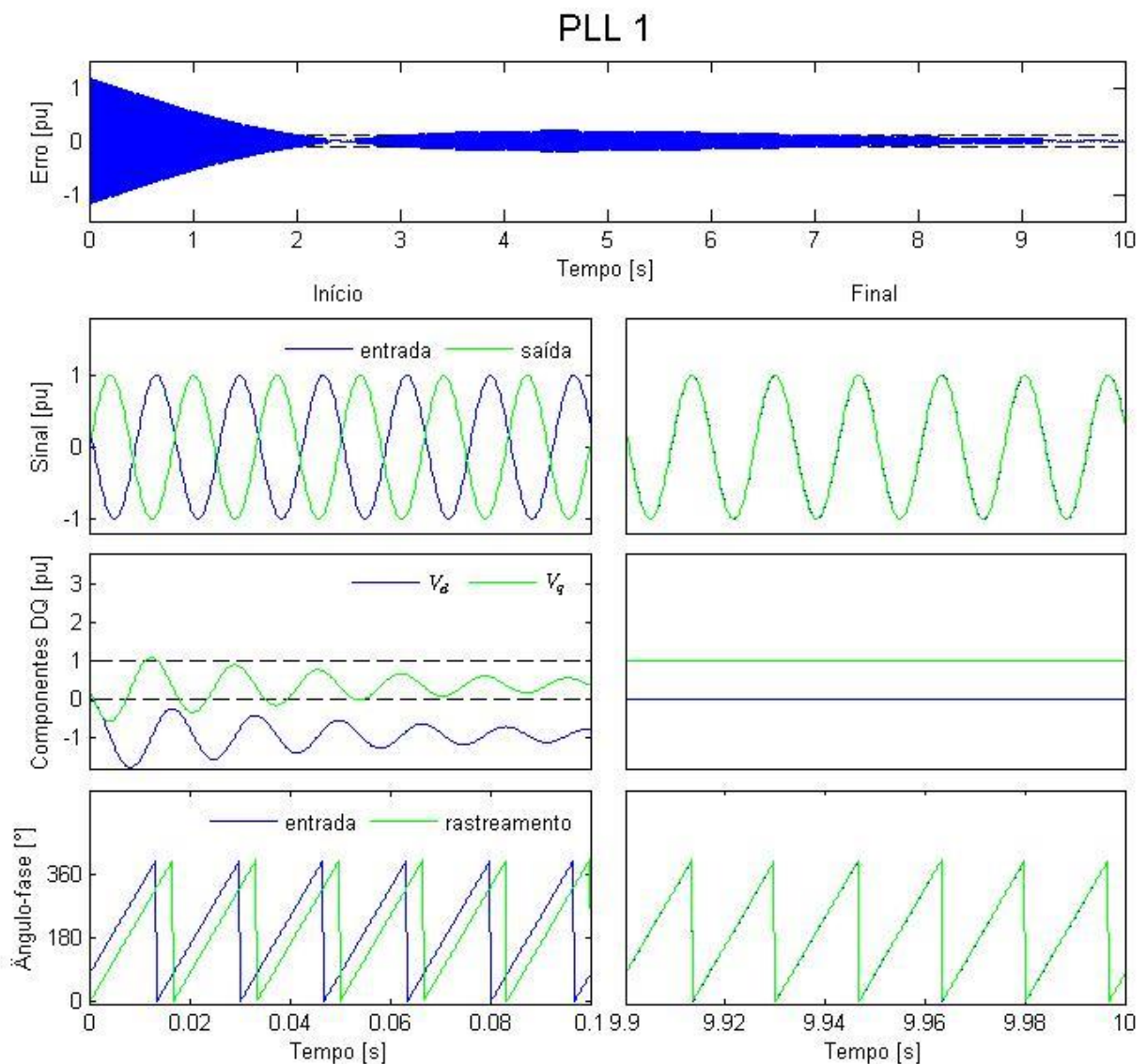


Figura 3.4: Desempenho da PLL<sub>1</sub>, incluindo o erro entre o rastreamento – sinal de referência construído pela PLL – e o sinal a se rastrear o ângulo-fase e os instantes inicial e final de ambos os sinais, as componentes DQ e os ângulos-fase do rastreamento e do sinal rastreado.

O erro mostrado é a diferença instantânea entre o sinal de referência construído com o ângulo-fase da PLL – cosseno do ângulo-fase – e o sinal de entrada. Esses dois sinais também

são mostrados em instantes iniciais e finais da simulação que tem duração de 10 segundos. O erro convergindo para próximo de zero é refletido pelo sinal de referência se aproximando do sinal de entrada em termos de ângulo-fase. No último 0,1 segundo, o erro quadrático médio foi calculado em **0,0098pu**. Após o instante **7,2425s**, o erro se limita permanentemente no intervalo  $(-0,1, 0,1)pu$ .

As componentes DQ também indicam essa convergência com a componente  $v_d(t)$  tendendo a zero e a componente  $v_q(t)$  tendendo a um. E para deixar evidente o rastreamento de fase, os ângulos-fase de cada sinal – de entrada e a referência construída pela PLL – são mostrados e nos instantes finais ambos os sinais estão praticamente em fase o tempo todo.

Foi feita uma simulação com a PLL<sub>2</sub> nas mesmas condições de sinal de entrada, incluindo o deslocamento de ângulo-fase inicial em relação ao ângulo-fase inicial da PLL. Os mesmos gráficos de sinais são mostrados na figura 3.5 para ilustrar o desempenho sob os mesmos critérios.

O erro convergiu mais rapidamente para próximo de zero. Após o instante **6,7840s** já não saiu mais do intervalo  $(-0,1, 0,1)pu$ . Para um critério de desempenho de controle, o fato de convergir mais rapidamente é um resultado positivo, mas uma aplicação de PLL lenta como a de detecção de afundamentos de tensão prefere a característica evidenciada na PLL anterior neste aspecto. Por outro lado, no regime permanente o erro entre o sinal de referência construído pela PLL<sub>2</sub> e o sinal de entrada é nitidamente menor. No último 0,1 segundo, o erro quadrático médio foi de **0,0031pu**.

A visualização dos instantes finais dos sinais de entrada e de referência da PLL, componentes DQ e ângulos-fase de entrada e da PLL mostram um bom desempenho em termos de aproximar o sinal de saída da PLL do sinal de entrada. As componentes DQ estão tendem a ficar bem fixadas em  $(v_q(t), v_d(t)) = (1,0)$  e o ângulo-fase de saída rastreia precisamente o ângulo-fase instantâneo do sinal de entrada.

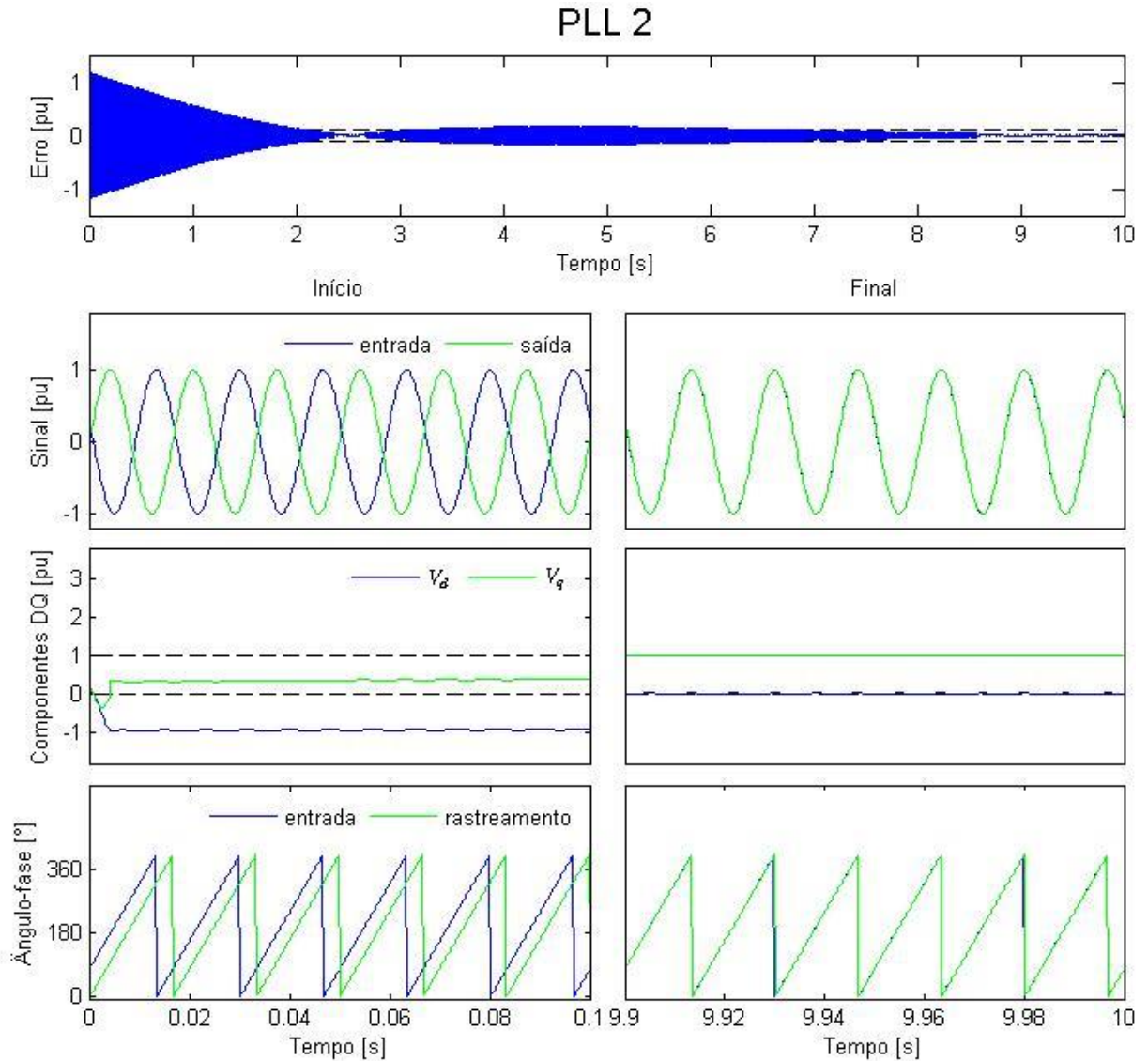


Figura 3.5: Desempenho da PLL<sub>2</sub>, incluindo o erro entre o rastreamento – sinal de referência construído pela PLL – e o sinal a se rastrear o ângulo-fase e os instantes inicial e final de ambos os sinais, as componentes DQ e os ângulos-fase do rastreamento e do sinal rastreado.

Sob as mesmas condições de simulação e critérios de avaliação, a PLL<sub>3</sub> também foi simulada e seu desempenho é ilustrado na figura 3.6.

Assim como a PLL<sub>2</sub>, o erro na PLL<sub>3</sub> convergiu mais rapidamente que o da PLL<sub>1</sub>, passando a se limitar permanentemente no intervalo  $(-0,1, 0,1)pu$  após o instante **2,2095s**. Sob esse aspecto, a PLL<sub>1</sub> continua sendo a preferida para a aplicação de PLL lenta. Quanto ao erro em regime permanente, a PLL<sub>3</sub> teve o pior resultado comparado com as outras duas formas de PLL, o que é nítido pela variação mais expressa do erro em regime permanente. O erro quadrático médio no último 0,1 segundo ficou em **0,0568pu**, o maior dentre as três simulações.



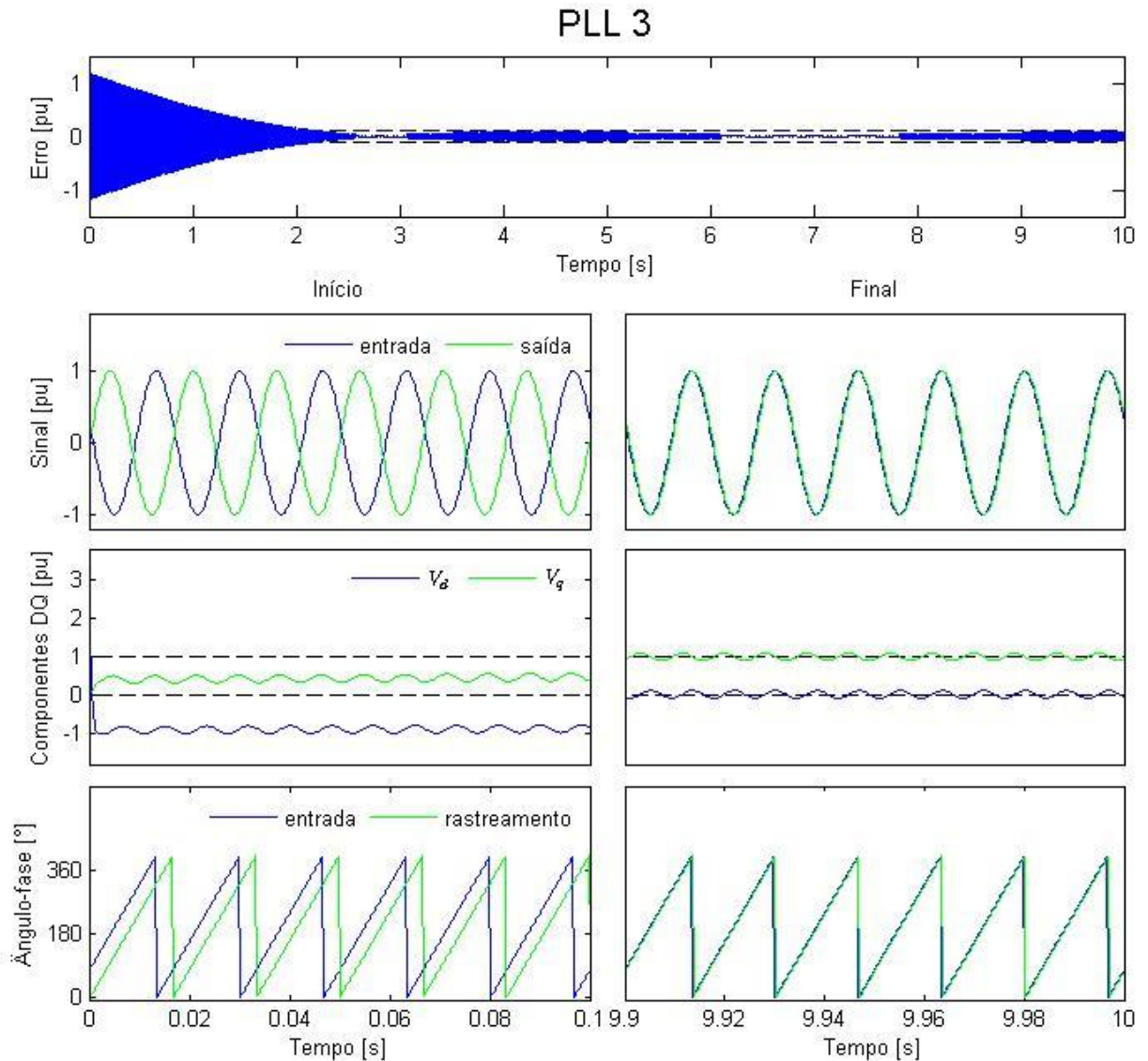


Figura 3.6: Desempenho da PLL<sub>3</sub>, incluindo o erro entre o rastreamento – sinal de referência construído pela PLL – e o sinal a se rastrear o ângulo-fase e os instantes inicial e final de ambos os sinais, as componentes DQ e os ângulos-fase do rastreamento e do sinal rastreado.

Por ter um elemento de derivação de sinal para a obtenção da componente  $v_\beta(t)$ , usada em conjunto com o sinal de entrada e o ângulo-fase da PLL para construir as componentes DQ, nota-se que mesmo em regime permanente, ambas as componentes  $v_q(t)$  e  $v_d(t)$  permanecem oscilando em torno de  $1,0pu$  e  $0,0pu$ . Mesmo com filtro passa baixas, a derivação ainda é sensível a variações, o que resulta em uma PLL com maior sensibilidade a perturbações e também a erros de aproximação da derivada em representação discreta no tempo.

Considerando que a PLL<sub>2</sub> teve o melhor desempenho em representar a tensão de rede em condições sem afundamento, ou seja, a referência mais fiel ao que se deseja obter para a aplicação da PLL, essa implementação é a forma mais atrativa para ser usada na técnica de

monitoramento do desvio do valor instantâneo e no controle de tensão com histerese como atuador. Por esse motivo é a que foi escolhida para ser usada nas simulações das técnicas de detecção de afundamento de tensão com PLL e nas simulações com atuação via controle de tensão com histerese.

### 3.2 Controle de Tensão com Histerese

A técnica de controle de tensão com histerese foi implementada para ser usada em simulações com atuação de compensação a afundamento de tensão. Antes de simular esse tipo de atuação em conjunto com uma técnica de detecção, foi simulada a atuação online – atuação o tempo todo – para demonstrar o seu desempenho. A figura 3.7 mostra o diagrama do bloco de controle de tensão com histerese.

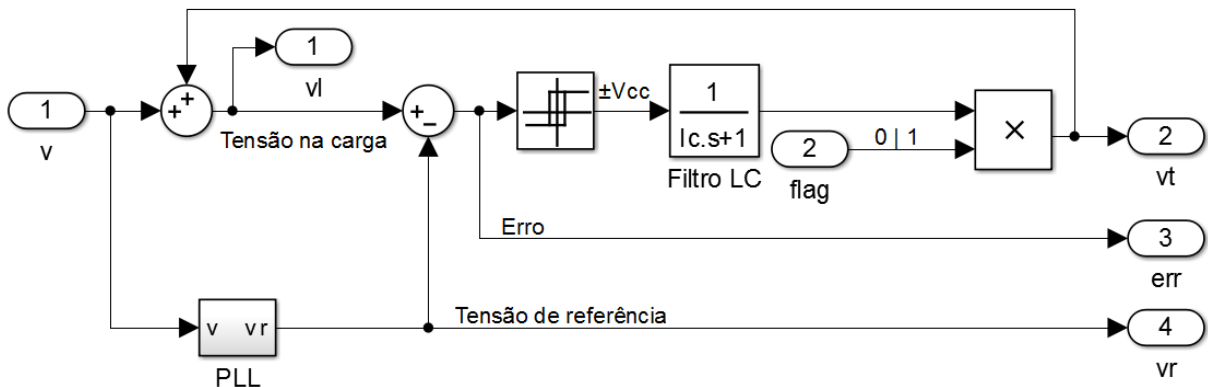


Figura 3.7: Diagrama do bloco de controle de tensão com histerese. As entradas são a tensão de rede e o sinal de detecção de afundamento de tensão. As saídas são a tensão sobre a carga, a tensão de compensação sobre o transformador em série, o erro de tensão na carga e a tensão de referência obtida pela PLL.

A PLL é utilizada para produzir a tensão de referência  $v_r(t)$  que é comparada com a tensão na carga  $v_l(t)$ . A diferença produz um sinal de controle e seu complemento para atuar nas chaves de cada fase na ponte de IGBTs. Essa atuação na ponte foi modelada com uma histerese que entrega uma tensão  $+V_{cc}$  quando a tensão na carga estiver abaixo da referência e  $-V_{cc}$  quando a tensão na carga é superior a de referência com. A banda de histerese foi posta em 0,1 para subida e para descida. Para as simulações foi posto  $V_{cc} = 1pu$ . Na prática, o valor de  $V_{cc}$  é obtido com um dimensionamento do barramento CC para projeto de um DVR. O filtro LC é modelado como passa baixas com constante de tempo em  $lc = 1ms$ . Por fim, a tensão  $v_t(t)$  sobre o transformador – tensão de compensação injetada pelo controle de tensão com histerese – é obtida pela tensão filtrada se o sinal de detecção de afundamento estiver ativada. Do contrário o sistema de atuação está desligado. Na demonstração do controle de tensão com histerese, esse sinal é fixado em 1, a fim de forçar a atuação o tempo todo.

Os resultados são mostrados na figura 3.8. O primeiro gráfico mostra a tensão de rede com afundamento entre os instantes 0,08s e 0,12s. Os demais gráficos mostram a tensão na carga, tensão de compensação e o erro de tensão na carga durante os instantes pré-falta e com distúrbio. Destaca-se a banda de histerese em torno da tensão de referência nos gráficos de tensão na carga e em torno de zero nos gráficos do erro de tensão na carga. Com a atuação o tempo todo, a tensão na carga oscila em torno da referência limitando-se a banda de histerese. A diferença visível entre os instantes mostrados está na tensão de compensação, atuando para que a tensão na carga se mantenha sempre dentro da banda de histerese seguindo a referência senoidal.

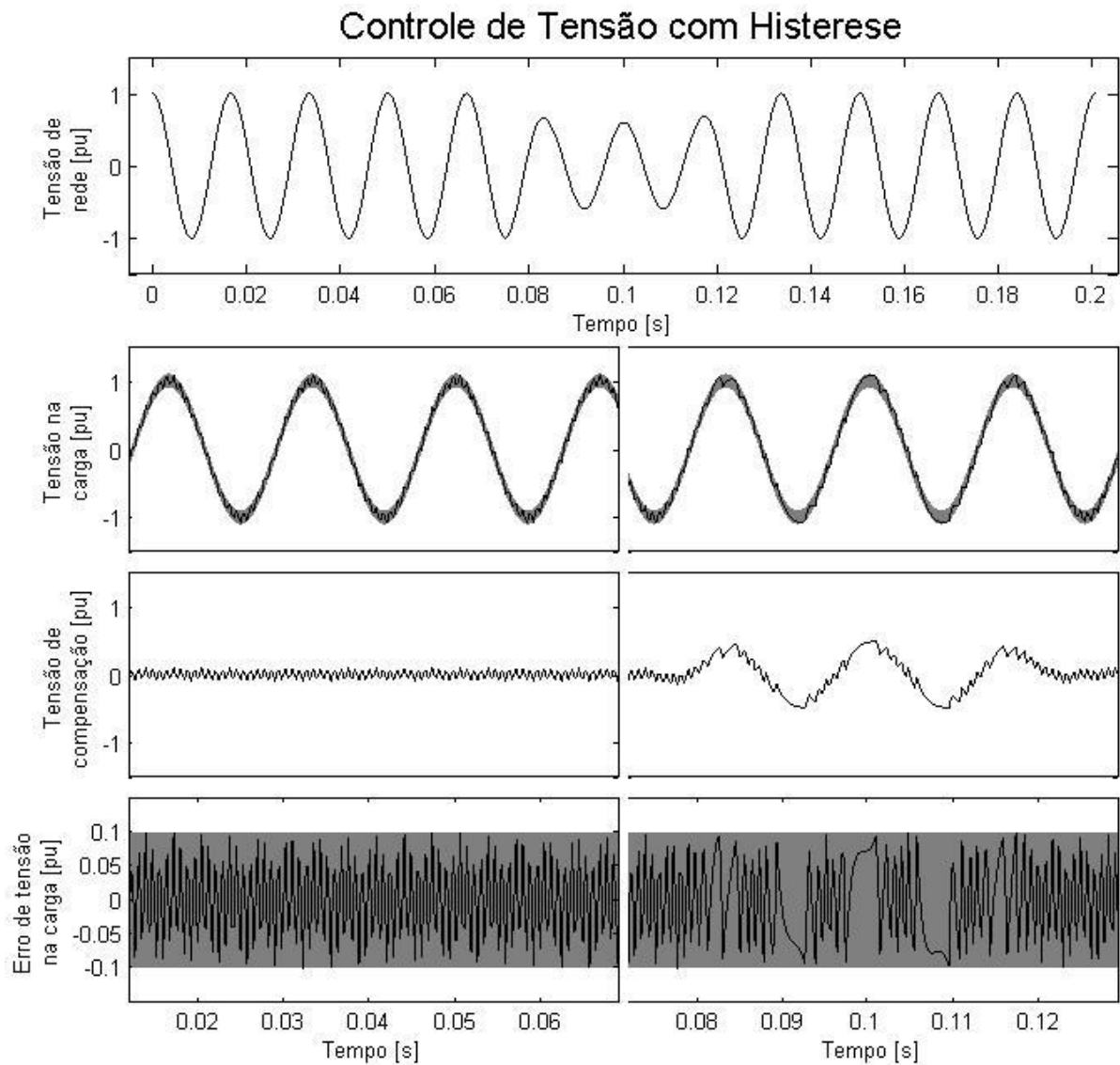


Figura 3.8: Desempenho do controle de tensão com histerese com afundamento de tensão de dados simulados. Inclui a tensão de rede, tensão na carga com os limites superior e inferior da banda de histerese, tensão de compensação no transformador em série e o erro da tensão na carga em relação a tensão de referência.

Para uma avaliação mais rigorosa, foi utilizado dados de uma das medições de uma fase de tensão de rede com um afundamento de tensão em uma base de dados disponível na referência [46]. A tensão de rede nesses dados juntamente com os resultados da simulação é mostrada na figura 3.9. O afundamento começa no instante 0,02161s e termina no instante 0,0362s.

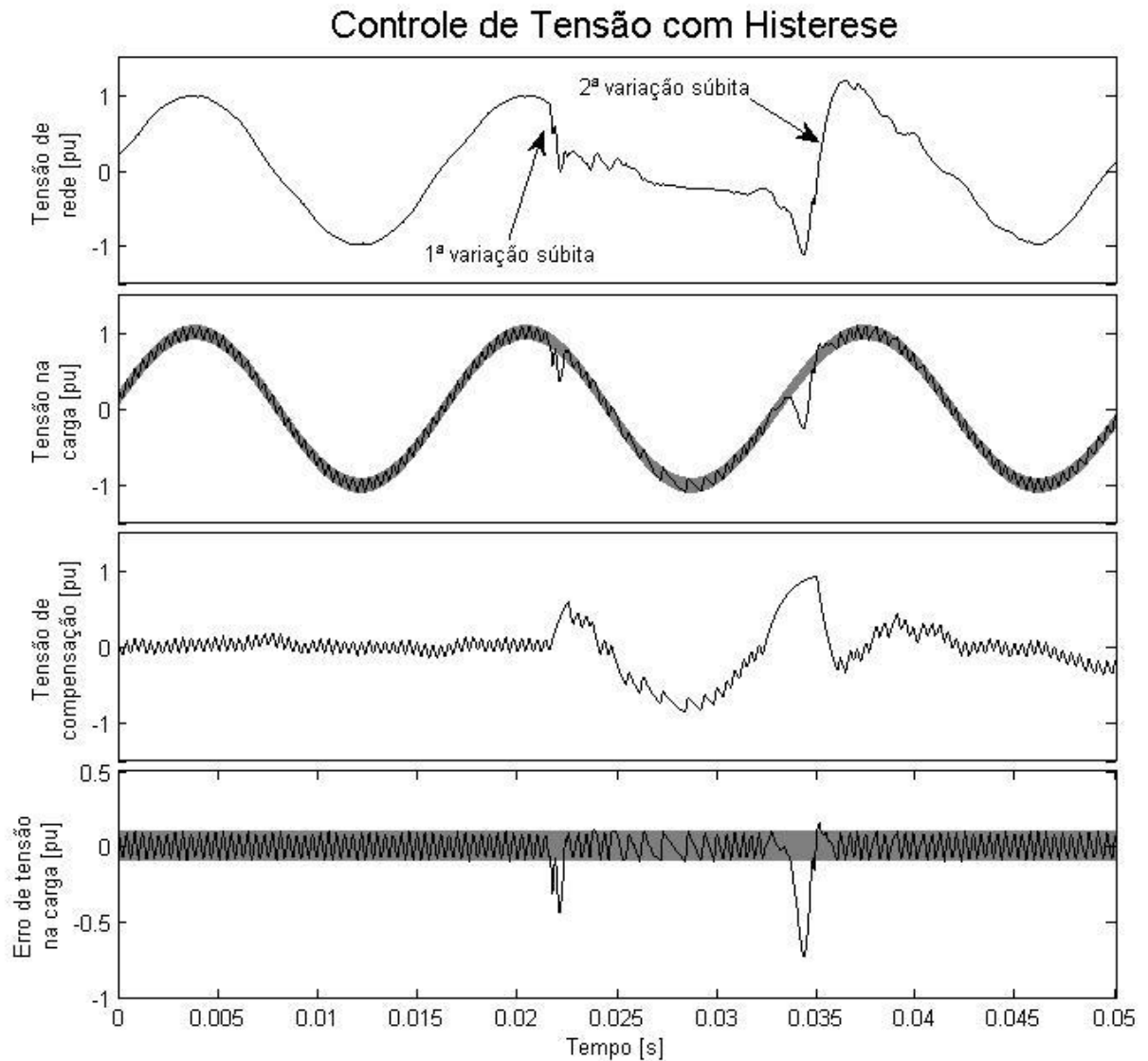


Figura 3.9: Desempenho do controle de tensão com histerese com afundamento de tensão de dados reais. Inclui a tensão de rede, tensão na carga com os limites superior e inferior da banda de histerese, tensão de compensação no transformador em série e o erro da tensão na carga em relação a tensão de referência.

As duas variações súbitas que ocorreram na tensão de rede são distúrbios que colocam a robustez do controle de tensão a prova. Com a atuação do controle de tensão com histerese, a tensão na carga permaneceu fora da banda de histerese por  $650\mu\text{s}$  na primeira dessas variações, e por  $1,04\text{ms}$  na segunda. Essas situações evidenciam a característica de tempo de resposta do sistema de mitigação de afundamento de tensão às variações bruscas da alimentação na carga.

O excesso de profundidade do afundamento de tensão também impõe uma situação adversa, fazendo com que o erro da tensão na carga chegue a um pico considerável e a tensão de compensação tenda a se saturar em  $V_{cc}$ . Na segunda variação súbita da simulação com dados reais, o erro da tensão na carga chegou a  $v_l(t) - v_r(t) = -0,7195pu$  e a tensão de compensação, a  $v_t(t) = 0,8937V_{cc} = 0,8937pu$ .

É desejável que a resposta seja tão rápida quanto possível para evitar ou ao menos minimizar o tempo em que a tensão da carga permanece fora da banda de histerese. Na situação em que a tensão de carga sai da banda de histerese devido a uma variação demasiadamente brusca como na figura 3.9, o erro máximo da tensão na carga deve ser minimizado. Ambos os critérios têm dependência dos parâmetros do DVR como  $V_{cc}$  e os parâmetros do filtro LC.

Para ilustrar um exemplo do efeito da dependência do desempenho do controle de histerese do parâmetro  $V_{cc}$ , foi simulado um cenário em que ao invés de  $V_{cc} = 1pu$ , for usado um valor menor  $V_{cc} = 0,5pu$ . O tempo de recuperação da segunda variação súbita – que passa a ser um terceiro momento de condição adversa – sobe para  $3,39ms$ , o erro da tensão na carga chega a  $v_l(t) - v_r(t) = -1,095pu$  e a tensão de compensação chega a  $v_t(t) = 0,9426V_{cc} = 0,4713pu$ . Em um momento adverso anterior, que surgiu com a mudança para  $V_{cc} = 0,5pu$ , a tensão de compensação chega a  $v_t(t) = -0,998V_{cc} = -0,499pu$  e o tempo de recuperação é de  $5,6ms$ , aproximadamente um terço de ciclo. Essa condição adversa é mostrada na figura 3.10.

Essa nova condição mostra o impacto das variações súbitas na tensão, provocadas por afundamento de tensão. Esse impacto fica tão mais nítido quanto se variar um parâmetro do sistema de mitigação de afundamento no sentido de afrouxar a sua robustez, como por exemplo reduzir a tensão no barramento CC. Essas observações são úteis para uma etapa de dimensionamento em um projeto de atuação de compensação de afundamento de tensão usando, por exemplo, um DVR.

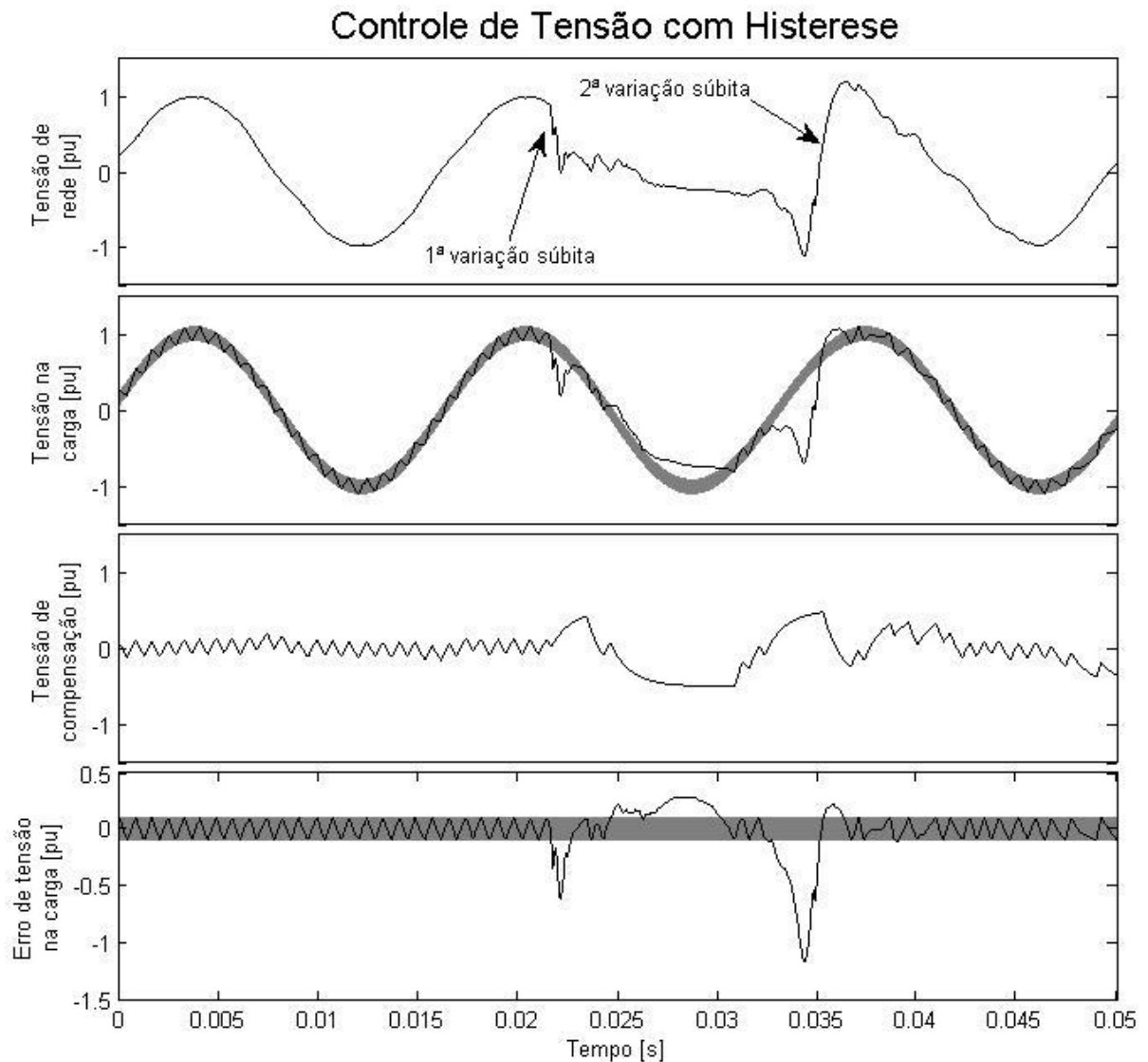


Figura 3.10: Desempenho do controle de tensão com histerese com afundamento de tensão de dados reais. Inclui a tensão de rede, tensão na carga com os limites superior e inferior da banda de histerese, tensão de compensação no transformador em série e o erro da tensão na carga em relação a tensão de referência. Nessa simulação, a tensão do barramento CC foi reduzida a  $V_{cc} = 0,5pu$ .

A técnica de controle de tensão com histerese, como ferramenta de atuação, se mostrou robusto nas três simulações feitas, no sentido em que a tensão na carga tendeu sempre a seguir a tensão de referência, dentro da banda de histerese, em um tempo de recuperação aceitável,  $5,6ms$  na pior das situações observadas. Simulações dessa técnica de atuação em conjunto com técnicas de detecção podem ser usadas para avaliar o conjunto composto pela detecção e atuação.

### 3.3 Dados de Tensão para Simulações

As técnicas apresentadas são demonstradas primeiramente com a aplicação de dados gerados de uma fase de tensão senoidal com um afundamento. A tensão foi construída com uma amplitude variável no tempo com uma forma trapezoidal para emular o afundamento. A partir do instante  $81ms$  a amplitude começa a decair até o instante  $91ms$ . Depois começa a subir desde o instante  $121ms$  até o instante  $131ms$ . Considerando a definição do PRODIST – a tensão está entre  $0,1pu$  e  $0,9pu$  em um afundamento de tensão [2] – o intervalo contendo o afundamento de tensão é de  $83,5ms$  até  $128,5ms$ . A figura 3.11 mostra esses dados gerados e usados para a primeira provação das implementações das técnicas de detecção de afundamento de tensão. Destaca-se no gráfico o momento com afundamento de tensão.

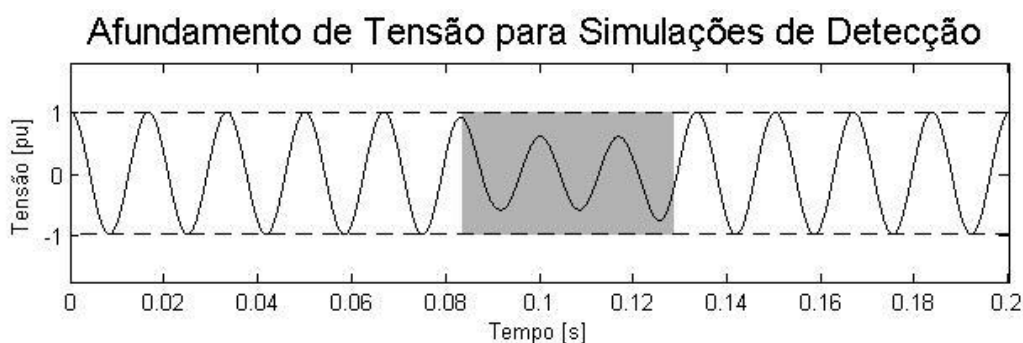


Figura 3.11: Afundamento de tensão para as simulações de detecção com cada uma das técnicas apresentadas.

Após as simulações com dados gerados, as técnicas são demonstradas com a aplicação de dados reais de medição para as colocar a prova quanto a velocidade de detecção, precisão e robustez contra detecções falsas. Os dados usados vêm da referência [46], um grupo de força tarefa que tem como objetivo propor um padrão IEEE 1159.2 para caracterização de eventos de qualidade de energia a partir de conjuntos de dados. O grupo que administra essa força tarefa também trabalha nas propostas de padrões IEEE 1159.1 para padronizar um guia de requisitos para aquisição de dados e 1159.3 para padronizar o formato para a transferência de dados de qualidade de energia entre equipamentos e computadores. As três propostas estão em fase de desenvolvimento [47]. A página eletrônica do projeto IEEE 1159.2 dispõe dados de medição nos formatos original monitor e Excel para fins de estudos, caracterização e discussões de propostas. Esses dados são mostrados nas figuras 3.12 e 3.13, em 19 grupos, cada qual referenciado neste trabalho como grupo 1 a 19 e com três séries temporais das três tensões das fases da rede. Cada grupo de dados está contido em um intervalo de  $0,1s$ , é amostrado em  $250\mu s$  e contempla medições de tensão com ocorrência de afundamento de tensão.

Como pode ser notado visualmente nos gráficos, dentre os afundamentos que ocorrem nos grupos de dados, há 16 ocorrências de afundamento do tipo B, que é monofásico e o mais comum. Também foram notados afundamentos dos tipos A, C, D e E entre os grupos de dados.

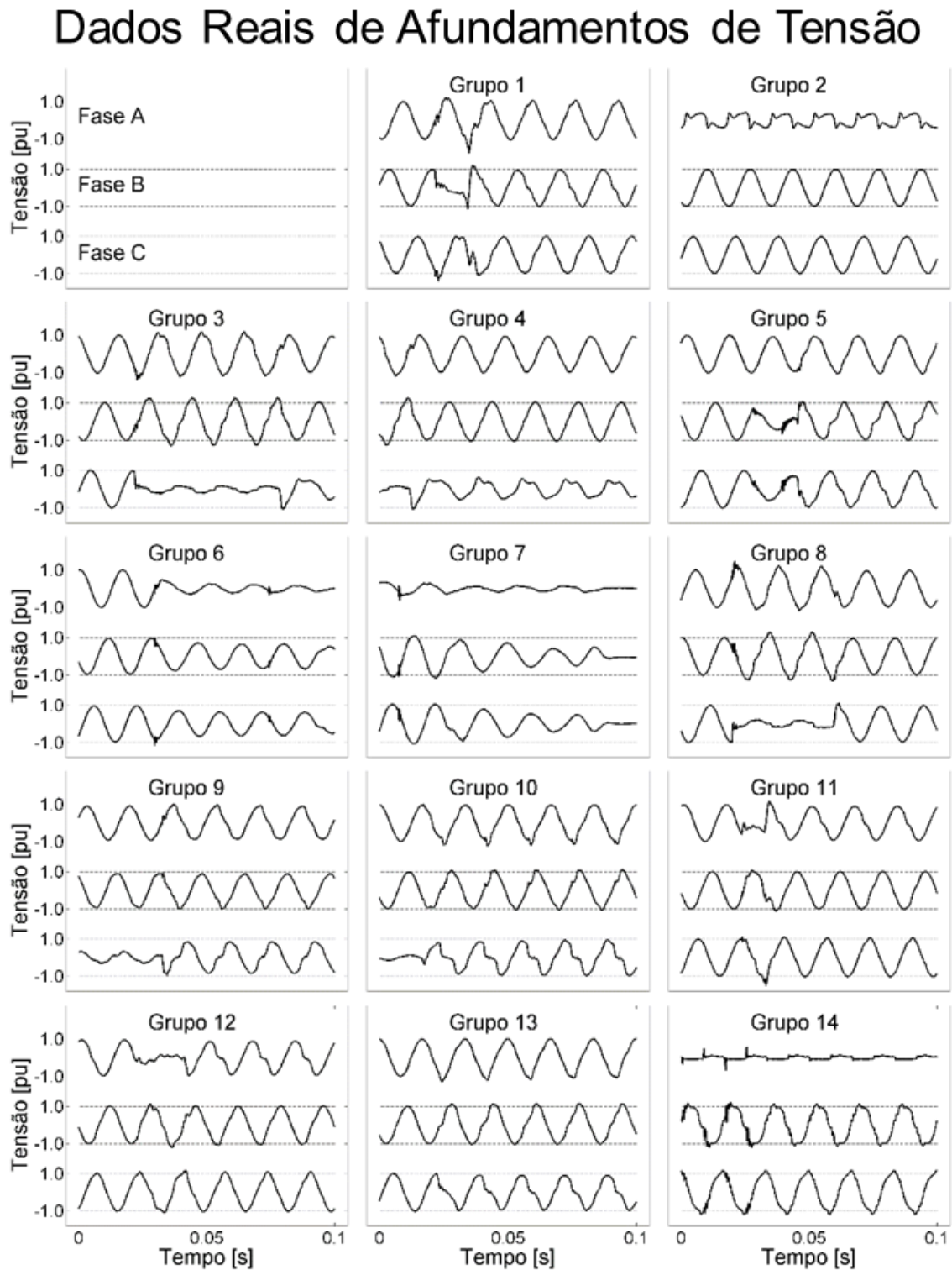


Figura 3.12: Grupos 1 a 14 de dados de medições reais de tensão de rede com ocorrências de afundamento de tensão. Os dados foram obtidos da referência [46]. Cada gráfico mostra as séries de dados temporais das três fases em uma duração de 0,1s e tempo de amostragem de 250 $\mu$ s.



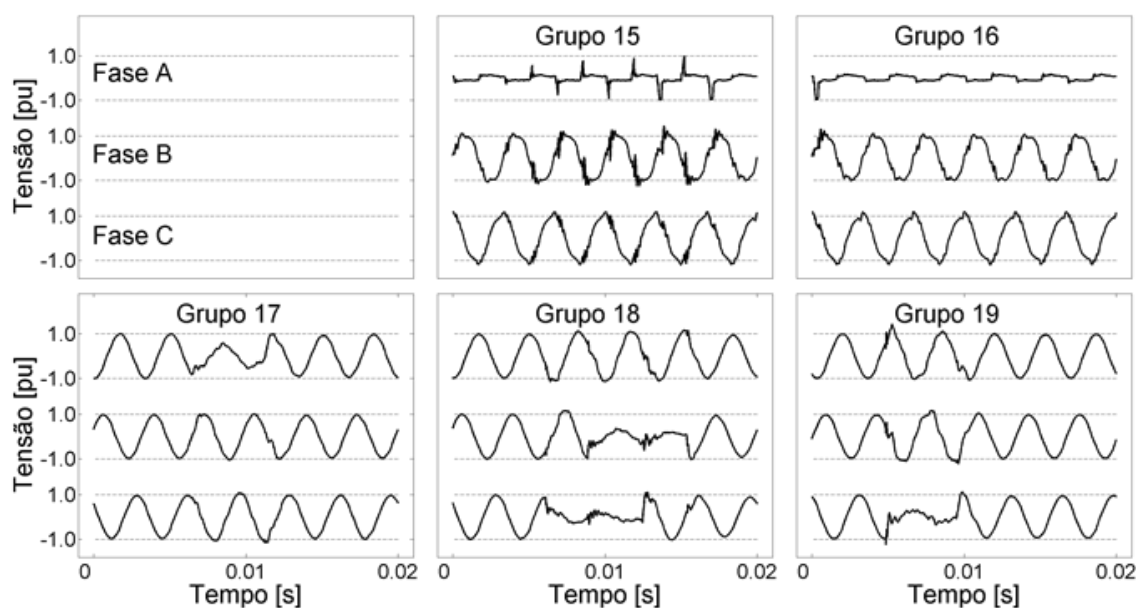


Figura 3.13: Grupos 15 a 19 de dados de medições reais de tensão de rede com ocorrências de afundamento de tensão. Os dados foram obtidos da referência [46]. Cada gráfico mostra as séries de dados temporais das três fases em uma duração de 0,1s e tempo de amostragem de 250 $\mu$ s.

### 3.4 Simulações de Detectores de Afundamento de Tensão com Dados Gerados

As simulações dos detectores de afundamento de tensão – implementações das técnicas apresentadas no **Capítulo 2** – foram feitas em códigos Matlab<sup>®</sup> e diagramas de blocos em Simulink<sup>®</sup>. Cada uma das técnicas e seus resultados são apresentados nesta seção. Os resultados de simulações com dados gerados são apresentados em conjunto com a apresentação da implementação da respectiva técnica. Já os resultados com dados de medições reais são apresentados na seção **3.5**, mostrando os resultados de todas as técnicas de detecção em cada um dos grupos de dados de medições.

#### 3.4.1 Monitoramento do Valor no Último Pico

A técnica de monitoramento do valor no último pico foi implementada conforme mostrado na figura 3.14. O bloco que detecta pico conforme descrito na seção **2.4.1** aparece na figura 3.14 e seu conteúdo é mostrado na figura 3.15.

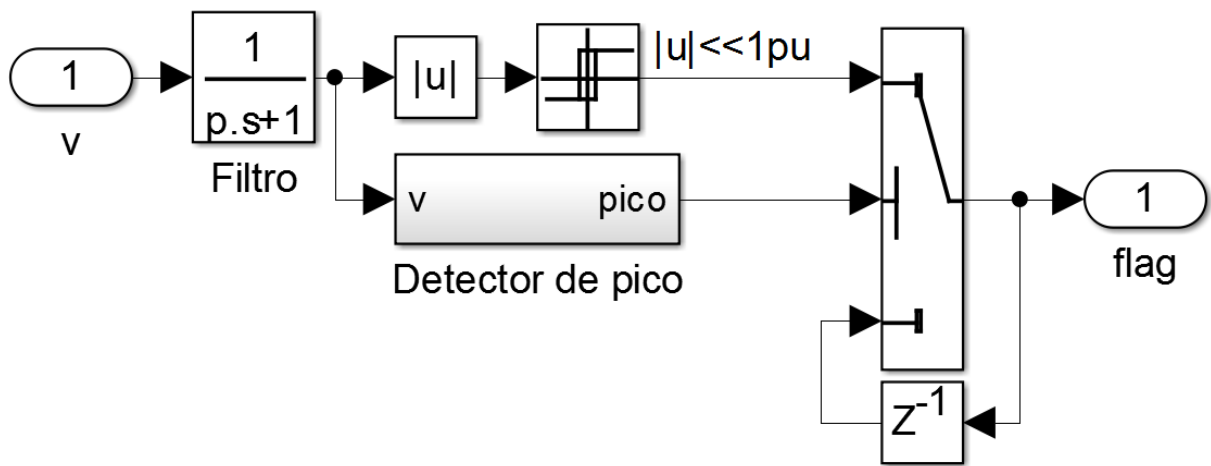


Figura 3.14: Implementação da técnica de monitoramento do valor no último pico em diagrama de blocos.

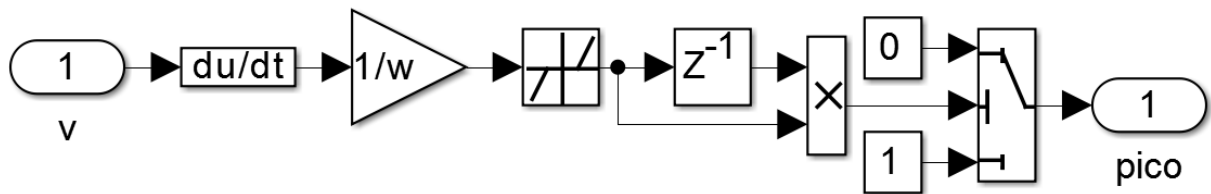


Figura 3.15: Implementação do bloco de detecção de pico no sinal de tensão.

A explicação do algoritmo no nível de detecção de afundamento de tensão é avaliar se a tensão está passando por um pico. Se não estiver, o estado de detecção permanece. Porém se a tensão estiver passando por um pico, a detecção se dá pela condição da tensão estar distante de  $1,0pu$ . O critério para considerar que a tensão está suficientemente distante de  $1,0pu$  para considerar que há afundamento de tensão é dado pelo bloco de histerese com limites em  $0,7pu$  e  $0,8pu$  aplicado sobre o valor absoluto da tensão.

A detecção de pico, por sua vez, avalia a derivada da tensão em duas hipóteses: “a derivada da tensão é desprezível ao ponto de poder ser considerada nula e, portanto, há pico”; “a derivada da tensão trocou rapidamente de sinal, o que indica que a tensão passou por um pico”. A primeira hipótese é considerada satisfeita se a derivada em P.U. da tensão for menor que um limiar escolhido em  $0,2pu$ . Esse limiar está representado pelo elemento de zona morta no diagrama da figura 3.15. A segunda hipótese é satisfeita apenas comparando os sinais das amostras atual e anterior da tensão. A confirmação de qualquer uma das duas hipóteses leva o algoritmo a considerar que há pico e assim o detector de afundamento de tensão vai alterar o estado de detecção conforme a avaliação do valor da tensão no mesmo instante.

A implementação da técnica incluiu a inserção de um filtro passa baixas para avaliar a tensão. O motivo de acrescentar esse filtro é devido a alta sensibilidade de detecção de pico

com a derivada da tensão com ruído. Por isso, o filtro tem um papel de suavizar a tensão de forma a evitar falsas detecções de pico por causa da troca de sinal da derivada devido à presença de ruído na tensão. Para que a frequência nominal da tensão de rede não seja significativamente atenuada e nem sofra deslocamento de fase significativo no filtro, foi escolhida uma constante de tempo para que o polo do filtro seja 10 vezes maior que 60Hz.

Aplicando dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão, a simulação com essa técnica de detecção levou ao resultado mostrado na figura 3.16.

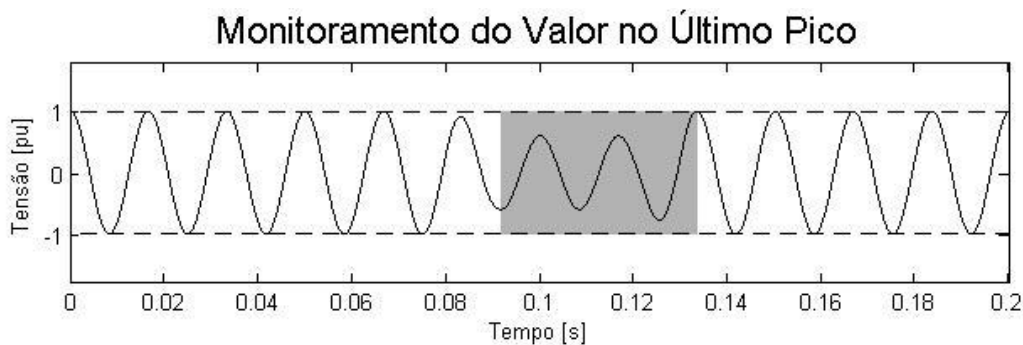


Figura 3.16: Resultado da simulação da técnica de monitoramento do valor no último pico com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão.

O distúrbio foi detectado com sucesso. A fim de quantificar a precisão da detecção, foi observado o atraso de detecção de início e fim do afundamento. Para o afundamento mostrado na figura 3.16, o detector teve atrasos de **8,00ms** para acusar o início do distúrbio e **4,87ms** para acusar o final. O atraso para detectar o início está elevado, ainda que não tenha a aplicação da regra de 16 pontos. Isso evidencia o ponto fraco dessa técnica mencionado na seção 2.4.1. O motivo de não aplicar a regra de 16 pontos é que a detecção de pico ocorre como um evento de apenas uma amostragem de duração quando o pico é detectado por troca de sinal da derivada, ou apenas poucos pontos quando tal detecção foi feita pela derivada estar próxima de zero.

### 3.4.2 Monitoramento do Valor de Pico

A técnica de monitoramento do valor de pico foi testada com as duas implementações apresentadas na seção 2.4.2, que diferem entre si apenas na forma de se obter a função ortogonal à tensão medida – componente beta – para transformada Park. A figura 3.17 mostra a estrutura comum entre ambas as implementações dessa técnica. O bloco de obtenção da componente beta difere entre as duas implementações e seu conteúdo é mostrado na figura 3.18 para a implementação baseada em atraso puro de tempo e na figura 3.19 para a implementação baseada em derivada com ajuste de escala.

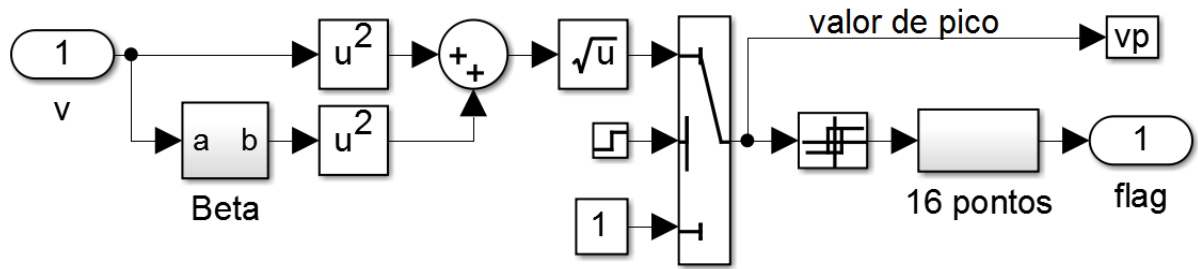


Figura 3.17: Implementação da técnica de monitoramento do valor de pico em diagrama de blocos.



Figura 3.18: Obtenção da componente beta com atraso puro de tempo.

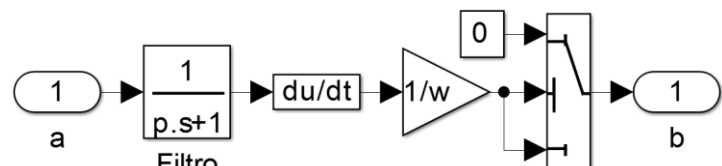


Figura 3.19: Obtenção da componente beta com a derivada da tensão e ajuste de escala.

Uma primeira etapa na figura 3.17 é claramente a equação (2.10), no próprio referencial estático. Em seguida há um critério de inicialização da técnica por depender de valores passados. Para a implementação com atraso puro de tempo, é necessário que durante o primeiro quarto de ciclo, que vale  $\frac{1}{4} \frac{1}{60Hz} = 4,1667ms$ , o valor de pico seja considerado unitário. Após esse tempo, o algoritmo começa a considerar de fato o valor de pico calculado de acordo com a equação (2.10).

O próximo passo é a comparação do valor de pico com um limiar. Isso foi feito usando uma histerese com limites em  $0,8pu$  e  $0,9pu$  na implementação com atraso de tempo e em  $0,7pu$  e  $0,8pu$  na implementação com derivação e ajuste de escala. Por fim é aplicada a regra de 16 pontos. Então o estado de detecção altera apenas após 16 amostragens em que a saída da histerese se mantém diferente do estado atual de detecção.

A obtenção da componente beta, na implementação baseada em atraso puro de tempo, é através de um atraso de um quarto de ciclo, conforme a equação (2.11). Na implementação com derivada e ajuste de escala, há um filtro passa baixas, pelo mesmo motivo que na técnica de monitoramento do valor no último pico, derivação e ajuste de escala dividindo pela frequência nominal da tensão de rede em rad/s. Mesmo com os cálculos matematicamente corretos e com base interpretável pela equação (2.12), é necessário colocar um critério de rejeitar a componente beta caso tenha valor maior que  $1,0pu$ . Isso evita que o valor de pico calculado exceda muito o valor de  $1,0pu$  e penaliza o valor da componente beta quando a tensão

de rede estiver variando excessivamente rápido de forma a favorecer detecção de afundamento nessa situação.

Para testar as implementações, foi aplicada uma tensão senoidal com afundamento de tensão. A figura 3.20 mostra o resultado para a implementação com atraso puro de tempo e na figura 3.21, o resultado para a implementação com derivação e ajuste de escala. Ambas as implementações identificaram o distúrbio com sucesso.

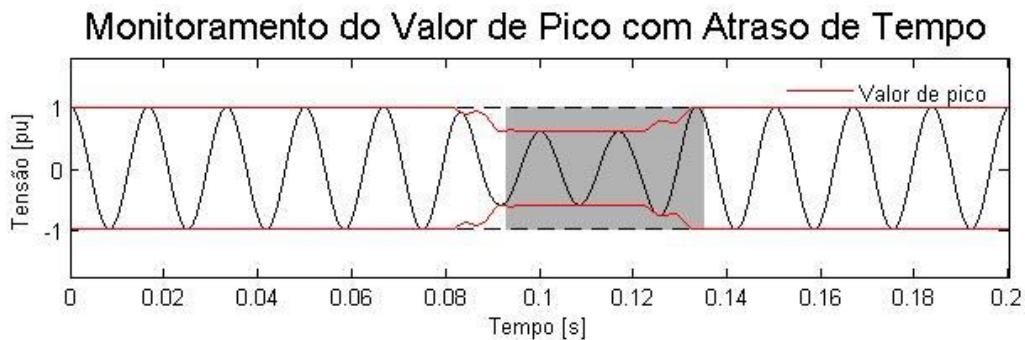


Figura 3.20: Resultado da simulação da técnica de monitoramento do valor de pico, com obtenção da componente beta através de atraso puro de tempo, com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão.

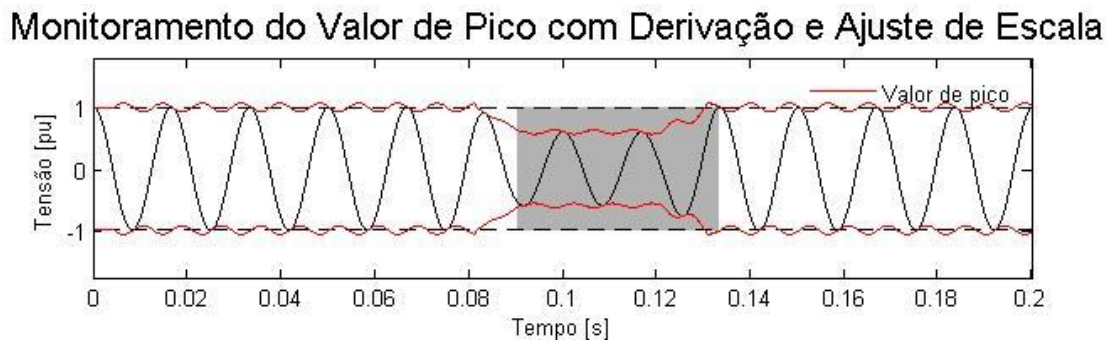


Figura 3.21: Resultado da simulação da técnica de monitoramento do valor de pico, com obtenção da componente beta através de derivação e ajuste de escala, com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão.

A implementação com atraso puro de tempo teve atrasos de **9,25ms** e **6,21ms** nas detecções de instantes iniciais e finais do afundamento de tensão. Para a implementação com derivação e ajuste de escala, esses valores são **6,50ms** e **4,45ms**.

Pode ser notado nos gráficos das figuras 3.20 e 3.21 o valor de pico instantâneo calculado pela técnica de monitoramento do valor de pico. Em ambas as implementações as curvas de valor de pico instantâneo encapsulam a tensão de rede e intercepta os picos da tensão senoidal. Assim uma vantagem dessa técnica sobre a de monitoramento do valor no último pico é o fato de calcular o valor de pico a todo instante e não somente na ocorrência de pico.

Os valores maiores de atrasos nessa técnica são consequência de usar a regra de 16 pontos. Na frequência de amostragem usada, essa regra é responsável por atrasar a detecção em  $4ms$ , mas deve ser lembrado que a adoção de tal regra se deve a questão de robustez a detecção falsa de afundamento de tensão devido ao ruído de medição ou transitório.

### 3.4.3 Monitoramento do Valor Eficaz

A técnica de monitoramento do valor eficaz da tensão de rede, em conformidade com o que foi descrito na seção 2.4.3, foi implementada no digrama de blocos mostrado na figura 3.22. O bloco que calcula o valor eficaz é a implementação das equações (2.15) e (2.16) e seu conteúdo é mostrado na figura 3.23.

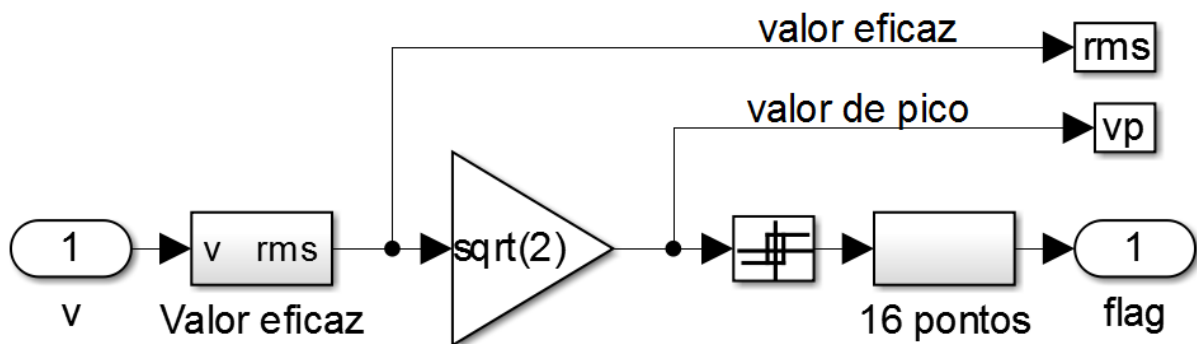


Figura 3.22: Implementação da técnica de monitoramento do valor eficaz em diagrama de blocos.

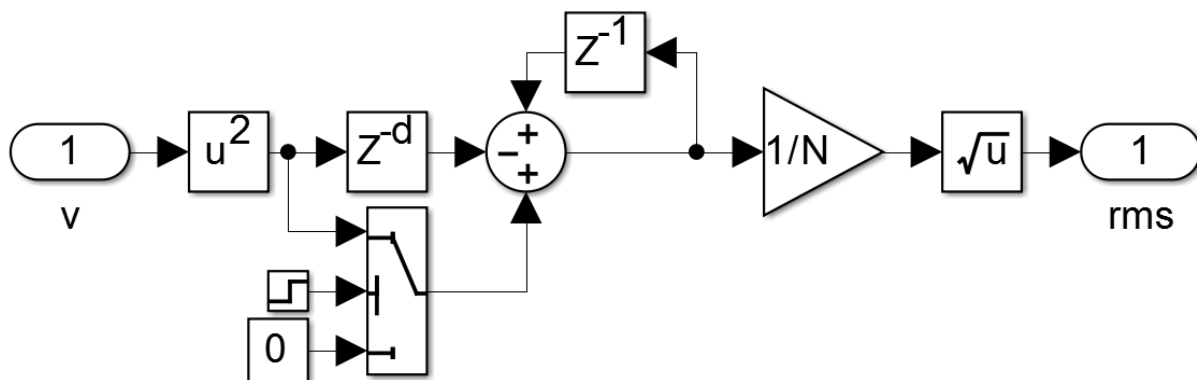


Figura 3.23: Implementação do bloco de cálculo do valor eficaz de tensão.

Ao nível de detecção de afundamento de tensão, o algoritmo calcula o valor eficaz da tensão de rede e compara com um limiar. Para o critério de limiar, o valor de pico é obtido multiplicando o valor eficaz por  $\sqrt{2}$  e em seguida é feita a comparação com uma histerese com limites em  $0,8pu$  e  $0,9pu$ . Após o critério de limiar, é aplicada a regra de 16 pontos, a mesma aplicada na técnica de monitoramento do valor de pico, para garantir maior robustez contra falsas detecções devido a ruído de medição ou presença de transitórios na tensão de rede.

O cálculo do valor eficaz é calculado de acordo com as equações (2.15) e (2.16). Um detalhe prático é substituir  $v[k]^2$  por zero na equação (2.16) durante o primeiro meio ciclo para que a diferença  $v[k]^2 - v[k - N]^2$  permaneça em zero e a variável  $S[k]$  se mantenha constante e o valor eficaz permaneça no valor nominal durante o primeiro meio ciclo. Isso evita que  $S[k]$  vá crescendo como uma integral discreta de  $v[k]^2$  enquanto não há valor no atraso  $z^{-N}$ .

O resultado da simulação dessa técnica com a aplicação de uma tensão senoidal gerada com afundamento de tensão é mostrado na figura 3.24. Ao invés de mostrar o valor eficaz, a figura mostra o valor de pico calculado a partir do valor eficaz para que o critério de identificação de presença de afundamento de tensão fique mais nítido.

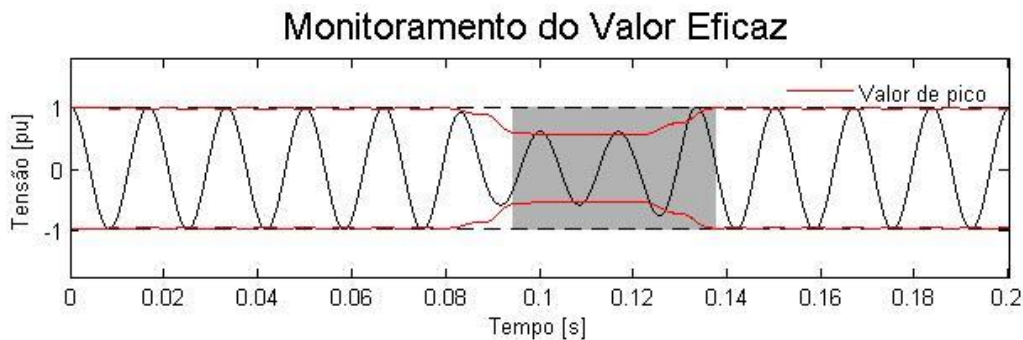


Figura 3.24: Resultado da simulação da técnica de monitoramento do valor eficaz com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão.

Essa técnica também detectou o distúrbio com sucesso, porém com atrasos notáveis tanto na detecção de início como na detecção do fim do afundamento de tensão. O atraso para a detecção do início foi de **10,50ms** e para o fim foi de **9,00ms**. Esses valores são muito elevados em relação aos das técnicas anteriores. O motivo desses atrasos elevados é que a técnica considera uma janela de duração de meio ciclo –  $8,33ms$  – para o cálculo do valor eficaz. Esse tamanho relativamente grande compromete o tempo de resposta do detector.

### 3.4.4 Monitoramento do Desvio do Valor Instantâneo

A técnica de monitoramento do desvio do valor instantâneo foi implementada em diagrama de blocos de acordo com o que foi descrito na seção 2.4.4. A figura 3.25 mostra o diagrama de blocos feito para essa técnica.

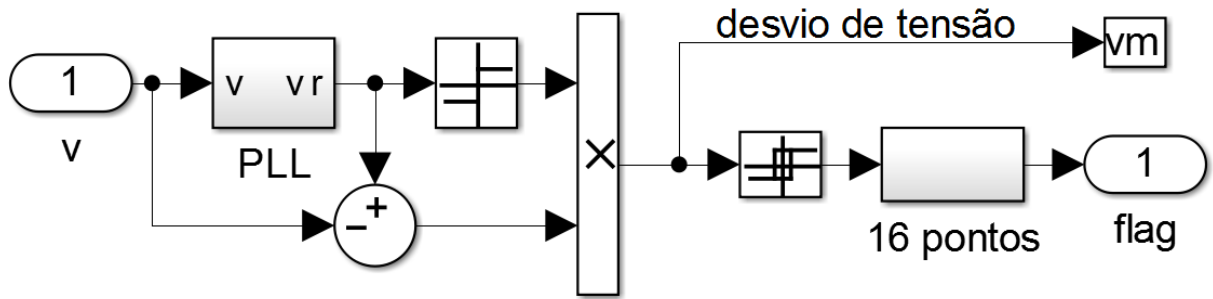


Figura 3.25: Implementação da técnica de monitoramento do desvio do valor instantâneo em diagrama de blocos.

Uma PLL lenta é usada para produzir uma tensão de referência que praticamente se mantém senoidal com amplitude e frequência nominais da rede e sem salto de fase por ter um tempo de resposta elevado em comparação a duração típica de um afundamento de tensão a ser detectado. Comparando a tensão da rede com essa tensão de referência e considerando o sinal positivo ou negativo da tensão de referência, obtém-se o desvio do valor instantâneo, que se for significativo – comparando com um limiar de 0,1 e aplicando a regra de 16 pontos – um afundamento de tensão está acontecendo e a detecção é feita.

A simulação dessa técnica, com tensão senoidal gerada com afundamento, levou ao resultado da figura 3.26. A figura 3.27 mostra o desvio do valor instantâneo na simulação.

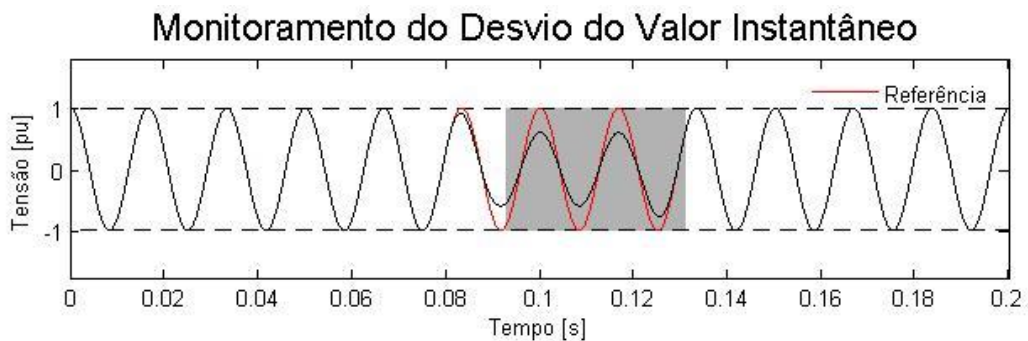


Figura 3.26: Resultado da simulação da técnica de monitoramento do desvio do valor instantâneo com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão.



Figura 3.27: Desvio do valor instantâneo de tensão de rede em relação a tensão de referência durante a simulação da técnica de monitoramento dessa variável com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão.



O distúrbio foi detectado com sucesso. O atraso para a detecção do início foi de **8,50ms** e para o fim foi de **2,46ms**. O atraso para início foi relativamente elevado devido a aplicação da regra de 16 pontos. Já a detecção do fim foi mais rápida. Como pode ser vista na figura 3.27, o desvio do valor instantâneo fica menor que o limiar mesmo durante o afundamento de tensão, por causa da aproximação entre a tensão com distúrbio e a tensão de referência nos instantes de cruzamento com o zero. Isso contribuiu para o algoritmo antecipar a detecção do fim do distúrbio. A detecção do fim começou com cruzamento pelo zero ainda durante o distúrbio.

### 3.4.5 Análise da Transformada de Fourier com Janela

A última das técnicas de detecção de afundamento de tensão implementada foi a análise da transformada de Fourier com janela monitorando a componente de 60Hz. Essa técnica foi descrita na seção 2.4.5. A ideia básica é iterar uma janela deslizante de tamanho igual a um ciclo da tensão rede e aplicar a WFFT para obter a magnitude da componente de 60Hz. Isso foi implementado em script Matlab que usa a equação (2.19) e acusa afundamento de tensão se a magnitude calculada for menor que um limiar posto em  $0,8pu$ .

O resultado da simulação é mostrado na figura 3.28, que também mostra a magnitude da componente de 60Hz estimada pela WFFT. Essa técnica teve o maior atraso para a detecção do início do afundamento sendo de **13,75ms**. O atraso para detectar o fim do distúrbio foi de **4,00ms**. Como se nota pela figura 3.28, a curva da magnitude estimada da componente de frequência de 60Hz têm certa inércia em mudar pelo fato de se considerar uma janela de dados.

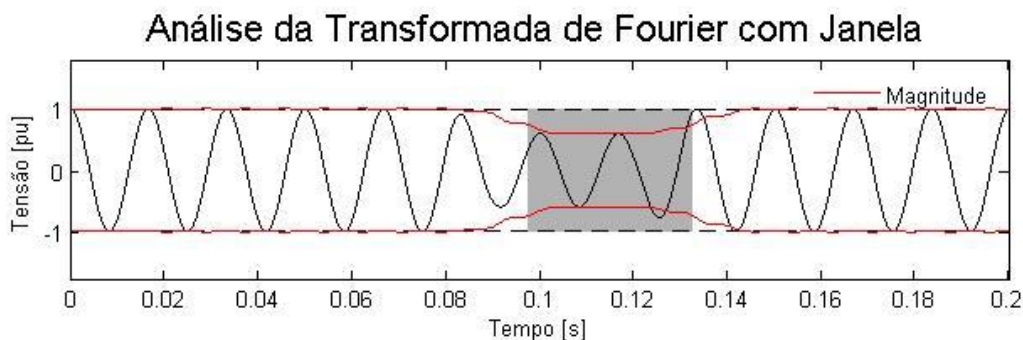


Figura 3.28: Resultado da simulação da técnica de análise da transformada de Fourier com janela com dados gerados de tensão senoidal com afundamento de tensão.

### 3.5 Simulações de Detectores de Afundamento de Tensão com Dados Reais

Os dados reais, mostrados nas figuras 3.12 e 3.13, foram aplicados às técnicas mostradas na seção 3.4. As figuras 3.29 e 3.30 mostram os resultados em todos os grupos de dados.

## Simulação de Detecção de Afundamentos de Tensão com Dados Reais

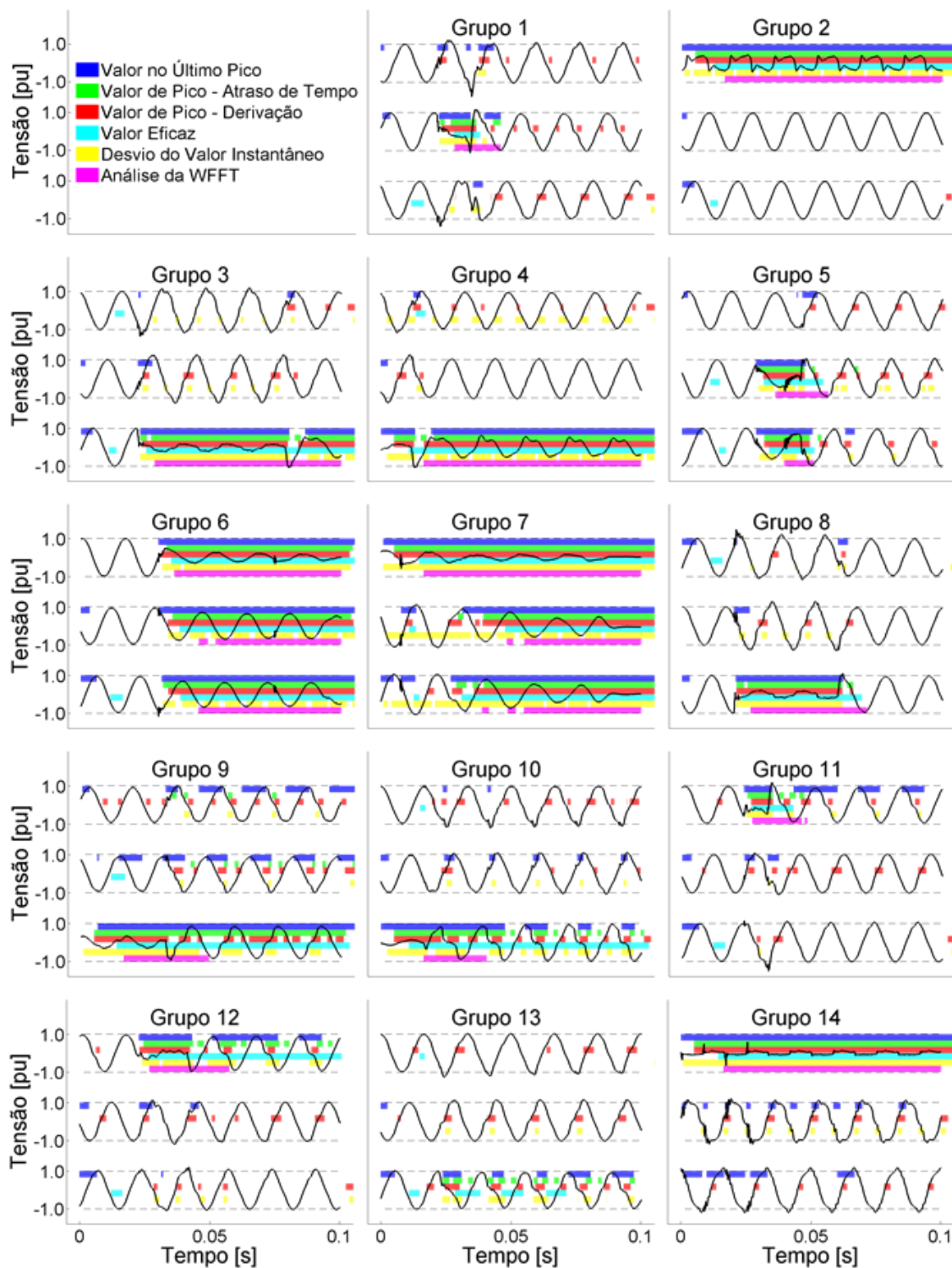


Figura 3.29: Resultados das simulações das técnicas de detecção de afundamento de tensão com os grupos 1 a 14 dos dados reais de medição com afundamento de tensão.

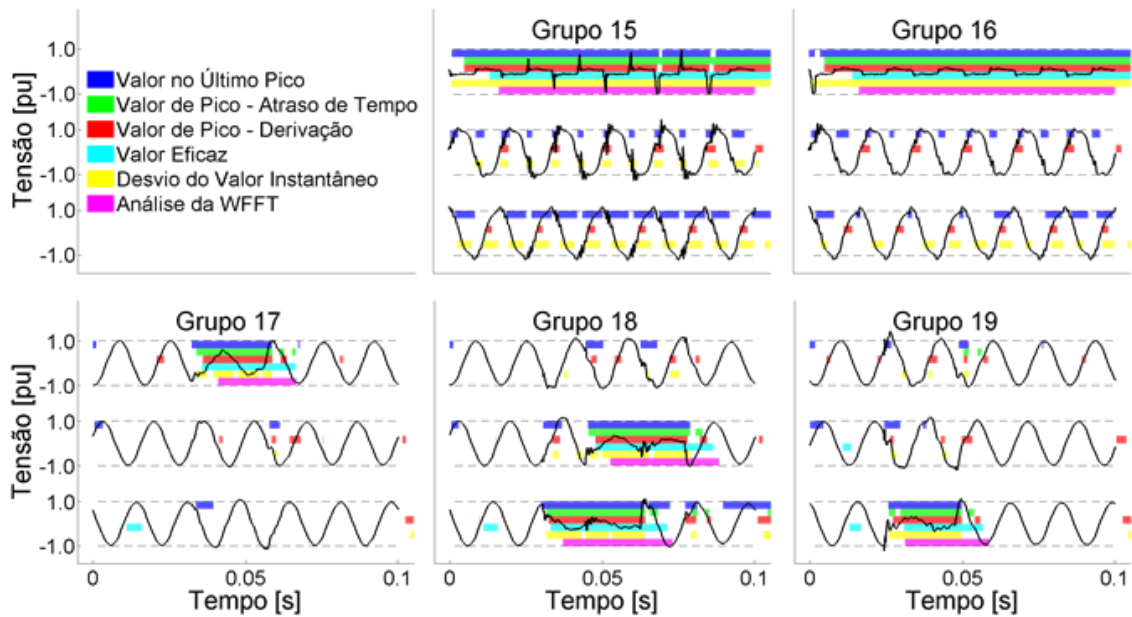


Figura 3.30: Resultados das simulações das técnicas de detecção de afundamento de tensão com os grupos 15 a 19 dos dados reais de medição com afundamento de tensão.

Uma das observações que pode ser notada nessas simulações é que as técnicas de monitoramento do valor eficaz e de análise da transformada de Fourier com janela são as duas com maior atraso na detecção. Isso é nítido nos conjuntos de dados 1, 2, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 14, 15, 16 e 19. O motivo disso é que essas técnicas usam uma análise em função de uma janela de dados e não apenas da última ou até última com penúltima amostra como é o caso das outras técnicas. Assim a característica de afundamento de tensão só é reconhecida por essas técnicas quando uma parte considerável da janela tem essa característica.

Outra observação é uma certa dificuldade de a técnica de monitoramento do desvio do valor instantâneo manter a acusação de afundamento durante todo o intervalo de tempo do distúrbio. Em instantes em que a referência da PLL cruza pelo zero, o desvio entre essa referência e o valor instantâneo da tensão com distúrbio se aproxima de zero, o que é semelhante, do ponto de vista do algoritmo, a um fim do distúrbio. Esse problema é evidente nos conjuntos de dados 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 17 e 18. A regra de 16 pontos ameniza essa fragilidade, porém não a elimina totalmente. Por outro lado, se aumentar o número de amostras na aplicação dessa regra, o atraso do algoritmo em detectar o início ou o fim do afundamento se torna crítico.

Também se nota que a técnica de monitoramento do valor de pico com atraso puro de tempo tem sua debilidade em instantes de aproximadamente um quarto de ciclo após o término

de um afundamento de tensão. Nesses instantes tal detector acusa distúrbio ainda que já não o mais haja, conforme se vê nos conjuntos de dados 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 17, 18 e 19. A componente beta, obtida pela tensão atrasada de um quarto de ciclo, é a tensão de rede em afundamento de tensão nesses instantes. Consequentemente, ainda que a componente alfa – tensão de rede atual – esteja em condições normais de fase e amplitude, o valor de pico calculado pela equação (2.11) é afetado pelo afundamento que já terminou. Uma situação análoga, com relação ao início de um afundamento, ocorreu nos conjuntos de dados 1, 3, 7, 8 e 19. Essa técnica detectou um falso fim do distúrbio apesar de esse não ter terminado. Para essas situações, a tensão de rede, com distúrbio, estava próxima de zero e seu valor atrasado de um quarto de ciclo, antes do início do afundamento, estava próximo de  $1pu$ .

Uma quarta observação é que as técnicas de monitoramento do valor do último pico, monitoramento do valor de pico com derivação e monitoramento do desvio do valor instantâneo têm muita sensibilidade a harmônicas, flutuações de tensão, transitórios e ruído. Isso pode ser notado pelos diversos falsos positivos dessas técnicas onde ocorre um rápido transitório, ruído ou forma distorcida da onda em qualquer dos conjuntos de dados. Esses fenômenos causam derivada próxima de zero ou troca de sinal da derivada, o que explica os falsos positivos da primeira e segunda dessas técnicas nessas situações. Quanto a terceira, são devidos ao afastamento do valor instantâneo da referência.

Quanto às considerações positivas, a primeira é que a técnica de monitoramento do valor de pico com atraso puro de tempo foi bastante eficiente em detectar os inícios dos afundamentos de tensão nos conjuntos de dados 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 13, 17, 18 e 19. Situações que dão a impressão de que outras técnicas, como a de monitoramento do valor no último pico, foram exageradamente mais rápidas e precisas em detectar o início são os instantes iniciais em conjuntos de dados 2, 4, 7, 9, 10, 14, 15 e 16 que já começam com distúrbio em ao menos uma das fases. As técnicas de monitoramento do valor no último pico, do valor de pico com derivação e do desvio do valor instantâneo também tiveram bom desempenho em rapidez nas detecções de início quando de fato houve distúrbio, porém essas tiveram muitos falsos positivos, ao contrário daquela.

A técnica do monitoramento do valor no último pico, por sua vez, se mostrou muito eficiente em detectar o fim dos afundamentos de tensão, nas suas detecções verdadeiras, ou seja, sem contar os falsos positivos. Os conjuntos de dados que melhor ilustram isso são 1, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 13, 17, 18 e 19. Essa característica pode ser justificada pelo fato de que

difícilmente a tensão em distúrbio vai para valores próximos de  $1,0pu$ , principalmente na situação de derivada próxima de zero ou troca de sinal da derivada. Então a detecção de fim de afundamento por essa técnica é mais certa no sentido de que não há mais afundamento. As técnicas de monitoramento do valor de pico, em ambas implementações, e de desvio do valor instantâneo também tiveram desempenho satisfatório em relação à detecção do fim de afundamento de tensão.

Quanto às técnicas de monitoramento do valor eficaz e análise de transformada de Fourier com janela, detectaram os distúrbios com sucesso, apesar do excessivo atraso em detectar o início e o fim. A segunda dessas técnicas não teve nenhum falso positivo.

### **3.6 Simulações de Detectores de Afundamento de Tensão com Atuação e Dados Reais**

Além de simular apenas a detecção, foram feitas simulações de detecção de afundamento de tensão em conjunto com a atuação baseada em controle de tensão com histerese. Um exemplo de trabalho com simulação com uma técnica de detecção – no exemplo foi usado o monitoramento do valor de pico com atraso puro de tempo – em conjunto com controle de tensão com histerese é a referência [37]. Nessa seção são feitas simulações com cada uma das técnicas de detecção apresentadas.

Foi escolhido mostrar os resultados da fase A do oitavo grupo de dados para melhor ilustrar os desempenhos de cada técnica de detecção em conjunto com a atuação. A parte de atuação é a mesma feita na seção 3.2, sendo que ao invés de fixar o sinal de detecção em 1, o sinal é dado pelo respectivo detector de afundamento de tensão. Os resultados são mostrados nas figuras 3.31, 3.32 e 3.33. A figura 3.31 mostra a tensão de rede nos gráficos da primeira linha e o erro entre a tensão de referência e a tensão na carga para cada técnica nas demais linhas. A figura 3.32 mostra os mesmos erros em uma maior resolução no momento da detecção de início para cada técnica. A figura 3.33 mostra a tensão na carga restaurada por efeito da atuação para cada técnica. Em ambas as três figuras, as regiões em que o sinal de detecção de afundamento está ativado são destacadas.

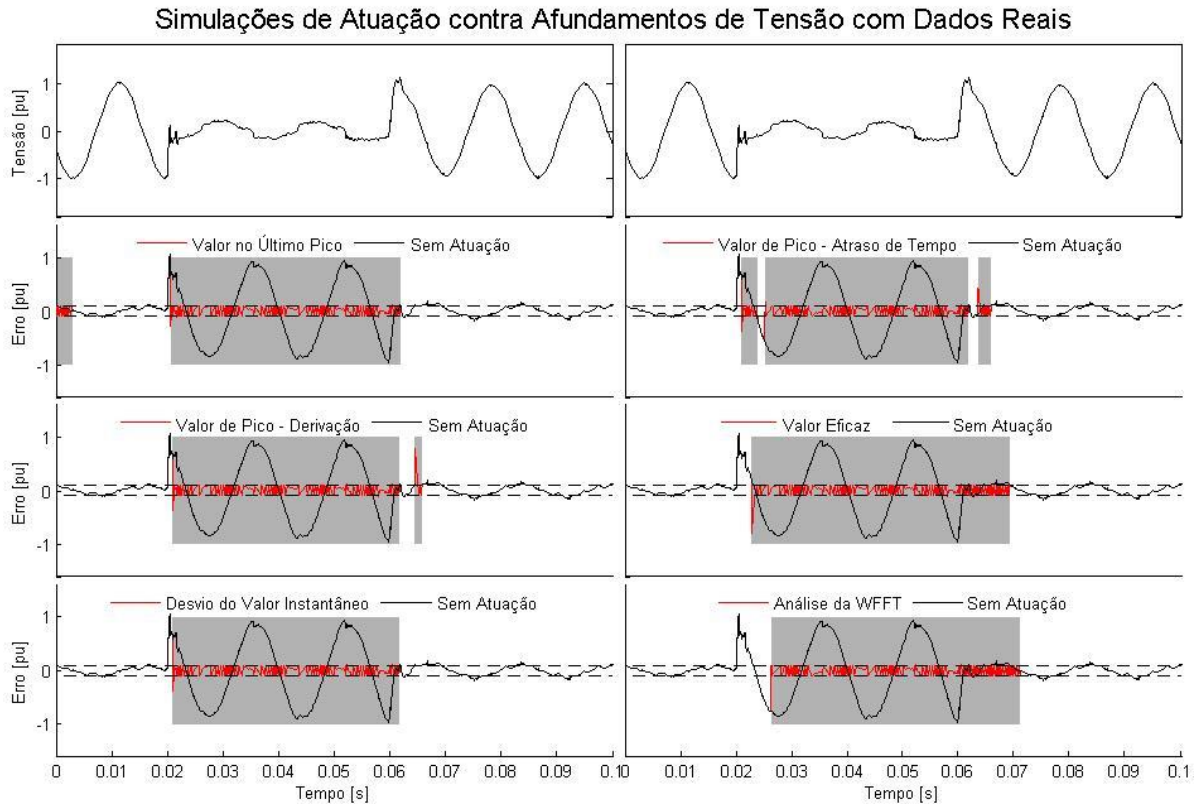


Figura 3.31: Resultados com os sinais de erro da tensão na carga nas simulações com atuação contra afundamento de tensão de cada técnica de detecção em conjunto com controle de tensão com histerese com dados reais.

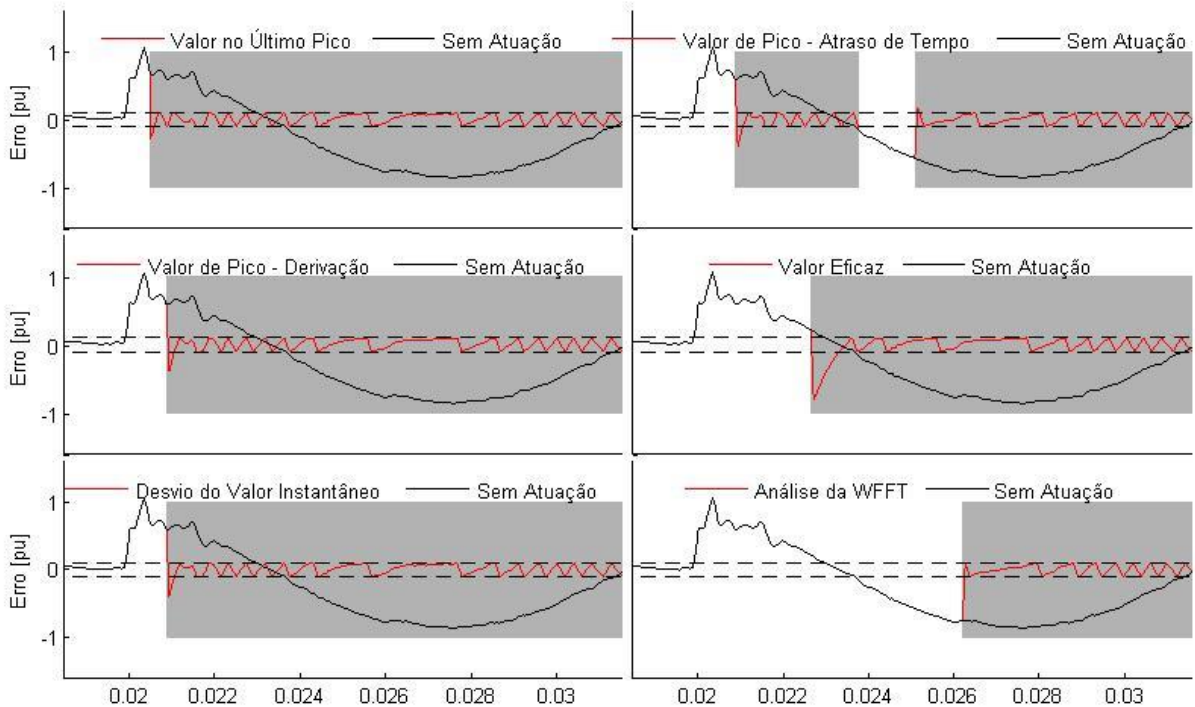


Figura 3.32: Resultados com os sinais de erro da tensão na carga em maior resolução no momento de detecção de início nas simulações com atuação contra afundamento de tensão de cada técnica de detecção em conjunto com controle de tensão com histerese com dados reais.

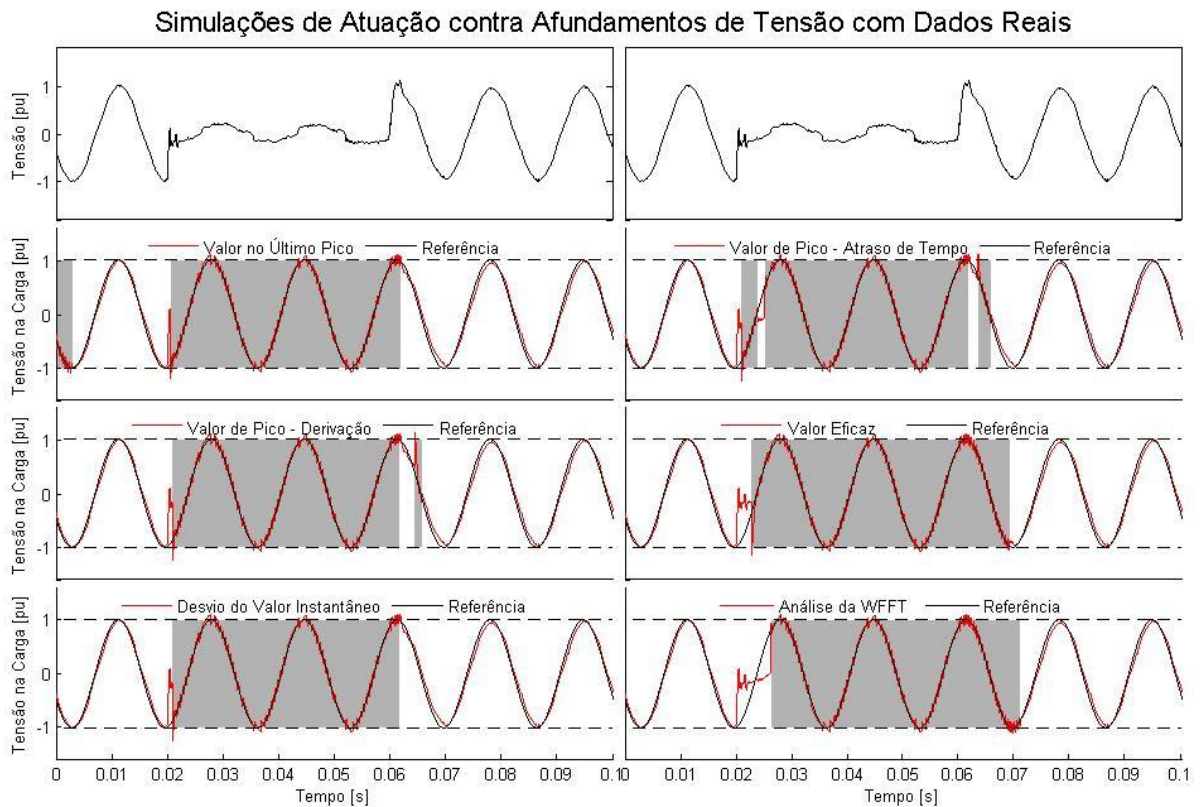


Figura 3.33: Resultados com a tensão na carga restaurada nas simulações com atuação contra afundamento de tensão de cada técnica de detecção em conjunto com controle de tensão com histerese com dados reais.

Esses resultados mostram o efeito da atuação em conjunto com a detecção quando ocorre um afundamento de tensão para cada técnica. Nas figuras 3.31 e 3.32, a curva vermelha é o erro entre a tensão na carga e a referência com o efeito da detecção e atuação, enquanto a curva preta é o erro entre a tensão de rede e a referência, que seria o erro entre a tensão na carga e a referência sem a atuação. Em regiões não destacadas – detector não acusando afundamento – as duas curvas estão sobrepostas, o que significa que não há atuação e a tensão na carga é igual a tensão de rede. Quanto mais afastada a curva vermelha estiver de zero, pior é a qualidade de detecção que não acusou o distúrbio em tempo hábil para a atuação mitigá-lo.

Na figura 3.33, a curva vermelha é a tensão na carga com o efeito da detecção e atuação e a curva preta é a tensão de referência dada pela PLL do controle de tensão com histerese. A situação desejável é que a curva vermelha permaneça tão próxima quanto possível da curva preta. A situação oposta é o afastamento em direção ao zero, que é a evidência de que a carga está sofrendo afundamento de tensão. A detecção e atuação devem minimizar essa última situação tanto em termo de profundidade como em termo de duração. Quando o afundamento é detectado – o que nos gráficos é observado como regiões destacadas – a curva da tensão na carga tende a voltar a permanecer próxima da curva da referência graças à atuação.

Em ambas as três figuras, é notável que as técnicas de monitoramento do valor eficaz e análise da transformada de Fourier com janela são as que ficaram em situação mais crítica no aspecto de duração do afundamento na carga. Para quantificar essas observações, a tabela 3.1 mostra a duração e profundidade do afundamento de tensão para o cenário sem atuação, na primeira linha, e com atuação em conjunto com cada uma das técnicas nas demais linhas. A duração foi calculada como a diferença entre o instante que o afundamento começou e o instante em que o erro entre tensão de carga e tensão de referência tornou a ficar dentro do limiar  $0,1pu$  permanentemente. A profundidade foi calculada como a diferença entre o valor de pico nominal – que é  $1,0pu$  – e o valor de pico instantâneo da tensão na carga. Essas informações podem ser mapeadas em um gráfico de duração de distúrbio e sua profundidade, na qual se representa curvas ITIC para dispositivos [1]. Essa representação está explícita na figura 3.34. Quanto mais próximo da origem menos severo é o distúrbio e assim menor é a chance de a carga sensível sofrer danos graças à atuação do controle de tensão com histerese em conjunto com a detecção de afundamento.

Tabela 3.1: Resultados com os valores de duração e profundidade do afundamento de tensão mitigado pela atuação de controle de tensão com histerese em conjunto com cada uma das técnicas de detecção do distúrbio e do afundamento de tensão não mitigado.

Sem Atuação ou Atuação com Técnica de Detecção	Duração	Profundidade
Sem Atuação	40,6ms	0,7504pu
Monitoramento do Valor no Último Pico	0,7ms	0,4349pu
Monitoramento do Valor de Pico com Atraso de Tempo	1,1ms	0,5816pu
Monitoramento do Valor de Pico com Derivação	1,1ms	0,5933pu
Monitoramento do Valor Eficaz	3,3ms	0,5904pu
Monitoramento do Desvio do Valor Instantâneo	1,1ms	0,5826pu
Análise da Transformada de Fourier com Janela	6,3ms	0,7584pu

Analisando o primeiro gráfico, claramente a atuação em conjunto com cada uma de todas as técnicas reduz o tempo de duração do distúrbio consideravelmente. As técnicas que tiveram melhor desempenho nesse aspecto – com seus pontos correspondentes mais à esquerda – são as mesmas que mostraram desempenho satisfatório no tempo de resposta para detecção de afundamento. As técnicas de monitoramento do valor eficaz e análise da transformada de Fourier com janela tiveram as correspondentes durações do afundamento mitigado bastante mais elevados em relação às demais, como pode ser visto mais claramente no segundo gráfico.



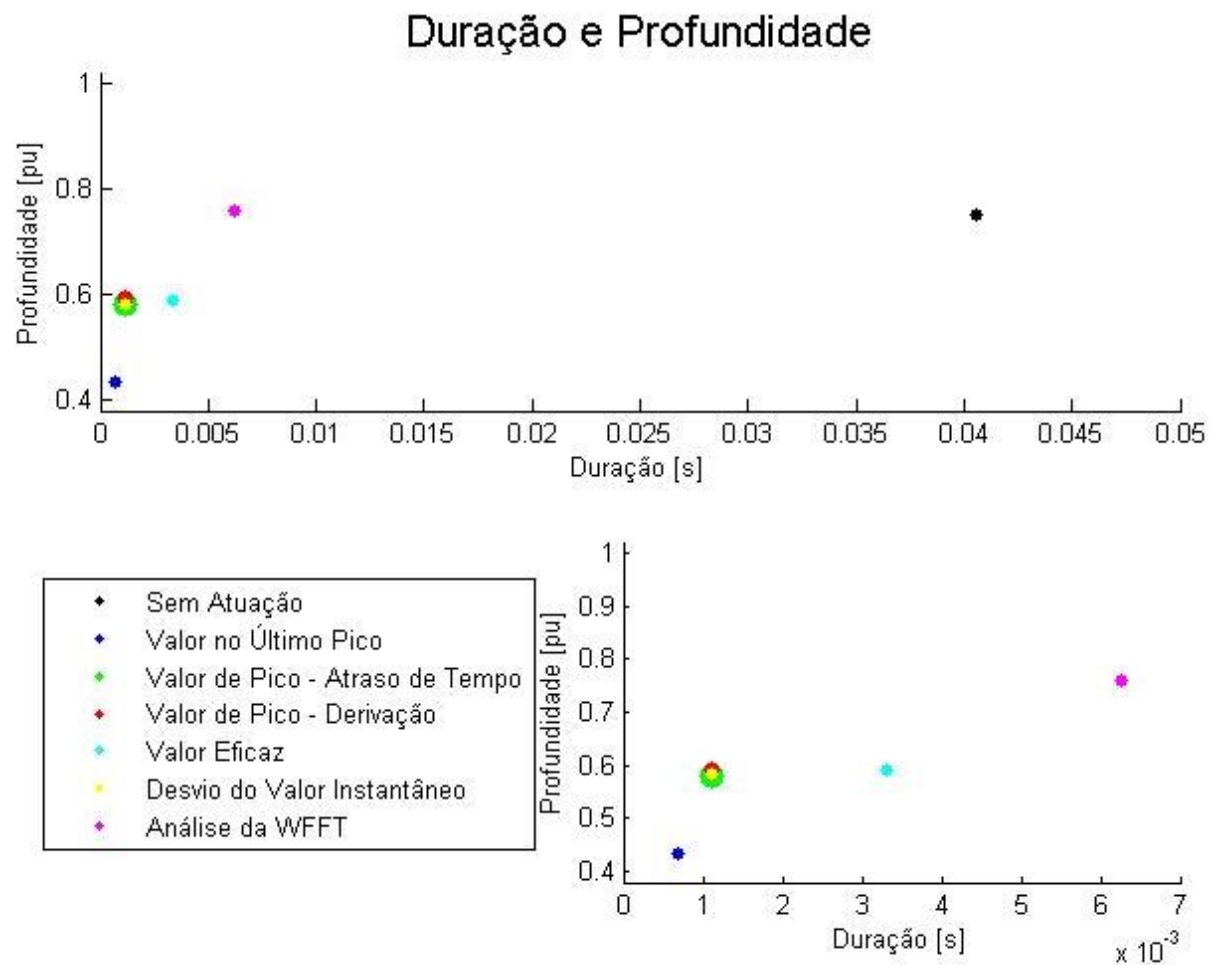


Figura 3.34: Resultados gráficos de duração e profundidade do afundamento de tensão mitigado pela atuação de controle de tensão com histerese em conjunto com cada uma das técnicas de detecção do distúrbio e do afundamento de tensão não mitigado.

### 3.7 Comitê de Técnicas de Detecção de Afundamento de Tensão

Para uma melhor visualização dinâmica dos resultados obtidos nas simulações e fácil comparação, a tabela 3.2 mostra os resultados em termos dos atrasos de detecção nas simulações de cada técnica com dados gerados. Esses resultados são os mesmos que foram descritos ao longo da seção 3.4.

Os resultados das simulações com dados reais de medição são mostrados na tabela 3.3 na forma de considerações práticas levantadas a partir dos gráficos das figuras 3.29 e 3.30, incluindo ambas, observações positivas e negativas em relação a cada uma das técnicas tradicionais. Essas considerações foram descritas na seção 3.5.

Tabela 3.2: Resultados de atrasos de detecção de início e de fim do afundamento de tensão nos dados gerados para simulação de cada técnica.

Técnica de Detecção	Início	Fim
Monitoramento do Valor no Último Pico	8,00ms	4,87ms
Monitoramento do Valor de Pico com Atraso de Tempo	9,25ms	6,21ms
Monitoramento do Valor de Pico com Derivação	6,50ms	4,45ms
Monitoramento do Valor Eficaz	10,50ms	9,00ms
Monitoramento do Desvio do Valor Instantâneo	8,50ms	2,46ms
Análise da Transformada de Fourier com Janela	13,75ms	4,00ms

Tabela 3.3: Considerações levantadas com os resultados das simulações de detecção de afundamento de tensão com cada técnica com dados reais de medição de tensão de rede.

Técnica de Detecção	Considerações positivas	Considerações negativas
Monitoramento do Valor no Último Pico	Desempenho satisfatório para detecção de início quando houve. Eficiente para detecção de fim.	Muitos falsos positivos de detecção de início quando há harmônicas, flutuações, transitório ou ruído.
Monitoramento do Valor de Pico com Atraso de Tempo	Eficiente para detecção de início. Desempenho satisfatório para detecção de fim quando houve.	Falsos positivos um quarto de ciclo após fim de distúrbio. Falsos negativos um quarto de ciclo após início de distúrbio.
Monitoramento do Valor de Pico com Derivação	Desempenho satisfatório para detecção de início e de fim quando houveram.	Muitos falsos positivos de detecção de início quando há harmônicas, flutuações, transitório ou ruído.
Monitoramento do Valor Eficaz	Detectou os afundamentos de tensão.	Falsos positivos de detecção de início. Atraso excessivo para detecção de início ou de fim.
Monitoramento do Desvio do Valor Instantâneo	Desempenho satisfatório para detecção de início e de fim quando houveram.	Muitos falsos positivos de detecção de início quando há harmônicas, flutuações, transitório ou ruído. Muitos falsos negativos de detecção de fim quando a tensão e referência estavam próximos de zero.
Análise da Transformada de Fourier com Janela	Detectou os afundamentos de tensão.	Atraso excessivo para detecção de início ou de fim.

Com base nas considerações levantadas a partir das simulações com dados reais, foi proposto uma técnica de comitê que considera as detecções das seguintes técnicas tradicionais: monitoramento do valor no último pico, monitoramento do valor de pico com atraso de tempo, monitoramento do valor de pico com derivação e monitoramento do desvio do valor instantâneo. As técnicas de monitoramento do valor eficaz e de análise da transformada de Fourier com janela não entraram no comitê proposto, porque seus tempos de resposta ao distúrbio na tensão são demasiadamente elevados tanto para a detecção do início como para a detecção do fim.

Ao dar foco nas técnicas escolhidas para compor o comitê proposto, é possível perceber diferentes níveis de adequabilidade dessas técnicas em função do estado da tensão de rede em termos de presença ou ausência de afundamento de tensão e presença ou ausência do distúrbio em um momento anterior correspondente a um quarto de ciclo. Por exemplo, o monitoramento do valor no último pico é o mais indicado para detectar um fim de afundamento de tensão. Isso faz essa técnica ter o nível mais alto de adequabilidade em instantes que a tensão de rede estiver em afundamento, pois o próximo evento a ser detectado nessa situação é o fim do distúrbio.

Observações análogas levam a concluir que a técnica de monitoramento do valor de pico com atraso puro de tempo é o mais adequado para detectar um início de afundamento de tensão. Por outro lado, essa mesma técnica tem sua adequabilidade reduzida durante um afundamento de tensão até um quarto de ciclo após o seu término. E a técnica de monitoramento do desvio do valor instantâneo tem sua adequabilidade reduzida na presença de afundamento de tensão, porque tende a detectar falso fim do distúrbio, levando a atuação a parar, o que é pior que detectar falso início e causar atuação desnecessária. Essas observações são traduzidas matematicamente como uma média ponderada  $x(t)$  no comitê das detecções de cada técnica  $y_k(t)$  com pesos  $\omega_k(y)$  em função do estado de detecção  $y(t)$ . As variáveis  $y_k(t)$  e  $\omega_k(y)$  têm a seguinte correspondência com cada técnica:

- Monitoramento do valor no último pico:  $k = 1$ ;
- Monitoramento do valor de pico com atraso puro de tempo:  $k = 2$ ;
- Monitoramento do valor de pico com derivação e ajuste de escala:  $k = 3$ ;
- Monitoramento do desvio do valor instantâneo:  $k = 4$ .

Os valores dos pesos dado o estado de detecção atual e há um quarto de ciclo são mostradas na tabela 3.4. As equações (3.22) a (3.27) mostram as relações matemáticas do comitê para obter a média ponderada  $x(t)$ , os pesos  $\omega_k(y)$  e o sinal de detecção final  $y(t)$ .

Tabela 3.4: Configurações dos pesos das técnicas tradicionais de detecção de afundamento de tensão no comitê proposto em função do estado de detecção no instante atual e há um quarto de ciclo.

	$y(t) = 0$	$y(t) = 1$
$y\left(t - \frac{1}{4}T\right) = 0$	$\omega_1 = 0,5$ $\omega_2 = 2,5$ $\omega_3 = 1$ $\omega_4 = 1$	$\omega_1 = 2$ $\omega_2 = 1$ $\omega_3 = 1$ $\omega_4 = 0,5$
$y\left(t - \frac{1}{4}T\right) = 1$	$\omega_1 = 0$ $\omega_2 = 1$ $\omega_3 = 1$ $\omega_4 = 1$	$\omega_1 = 2$ $\omega_2 = 1$ $\omega_3 = 1$ $\omega_4 = 0,5$

$$x(t) = \frac{\sum_{k=1}^4 \omega_k(y)y_k(t)}{\sum_{k=1}^4 \omega_k(y)} = \frac{\omega_1(y)y_1(t) + \omega_2(y)y_2(t) + \omega_3(y)y_3(t) + \omega_4(y)y_4(t)}{\omega_1(y) + \omega_2(y) + \omega_3(y) + \omega_4(y)} \quad (3.22)$$

$$\omega_1(y) = \begin{cases} 0,5, & y(t) = 0 \\ 2, & y(t) = 1 \end{cases} = 0,5 + 1,5y(t) \quad (3.23)$$

$$\omega_2(y) = \begin{cases} 2,5, & y\left(t - \frac{1}{4}T\right) = y(t) = 0 \\ 1, & y\left(t - \frac{1}{4}T\right) = 1 \text{ ou } y(t) = 1 \end{cases} = 1 + 1,5(1 - y(t))\left(1 - y\left(t - \frac{1}{4}T\right)\right) \quad (3.24)$$

$$\omega_3(y) = 1 \quad (3.25)$$

$$\omega_4(y) = \begin{cases} 1, & y(t) = 0 \\ 0,5, & y(t) = 1 \end{cases} = 1 - 0,5y(t) \quad (3.26)$$

$$y(t) = \begin{cases} 0, & x(t) \leq 0,5 \\ 1, & x(t) > 0,5 \end{cases} \quad (3.27)$$

O modelo do comitê é aplicação da ferramenta matemática proposta por Takagi e Sugeno em 1985 [7] em que a saída considera várias implicações e é a média ponderada de cada consequência pelos valores das implicações. No comitê proposto, cada técnica de detecção tem uma implicação que leva a uma consequência que contribui para a saída. Cada uma das implicações é do tipo “a presente técnica é a mais adequada”. Por exemplo, a implicação para se usar a técnica de monitoramento do valor no último pico é que essa técnica é a mais adequada dado o estado da tensão de rede. Essas implicações são quantificadas pelas equações (3.23), (3.24), (3.25) e (3.26). As consequências de cada implicação é a saída  $y_k(t)$  da técnica correspondente. E a saída do comitê é dada pela equação (3.22), que é do tipo da equação (7)

do trabalho de Takagi e Sugeno [7]. A saída final da detecção de afundamento de tensão pelo comitê é a equação (3.27), que acusa a presença do distúrbio se a saída da equação (3.22) for maior ou igual a um limiar de 0,5, correspondente a metade do valor máximo dessa variável.

O comitê de técnicas descrito matematicamente é representado em diagrama de blocos na figura 3.35. Cada  $y_k(t)$  é calculado pela aplicação da respectiva técnica de detecção e cada  $\omega_k(y)$  é calculado em função do estado  $y(t)$  de detecção conforme as equações (3.23) a (3.26). Em seguida são aplicadas as equações (3.22) e (3.27) para obtenção da saída  $x(t)$  da média ponderada e saída final  $y(t)$  da detecção de afundamento.

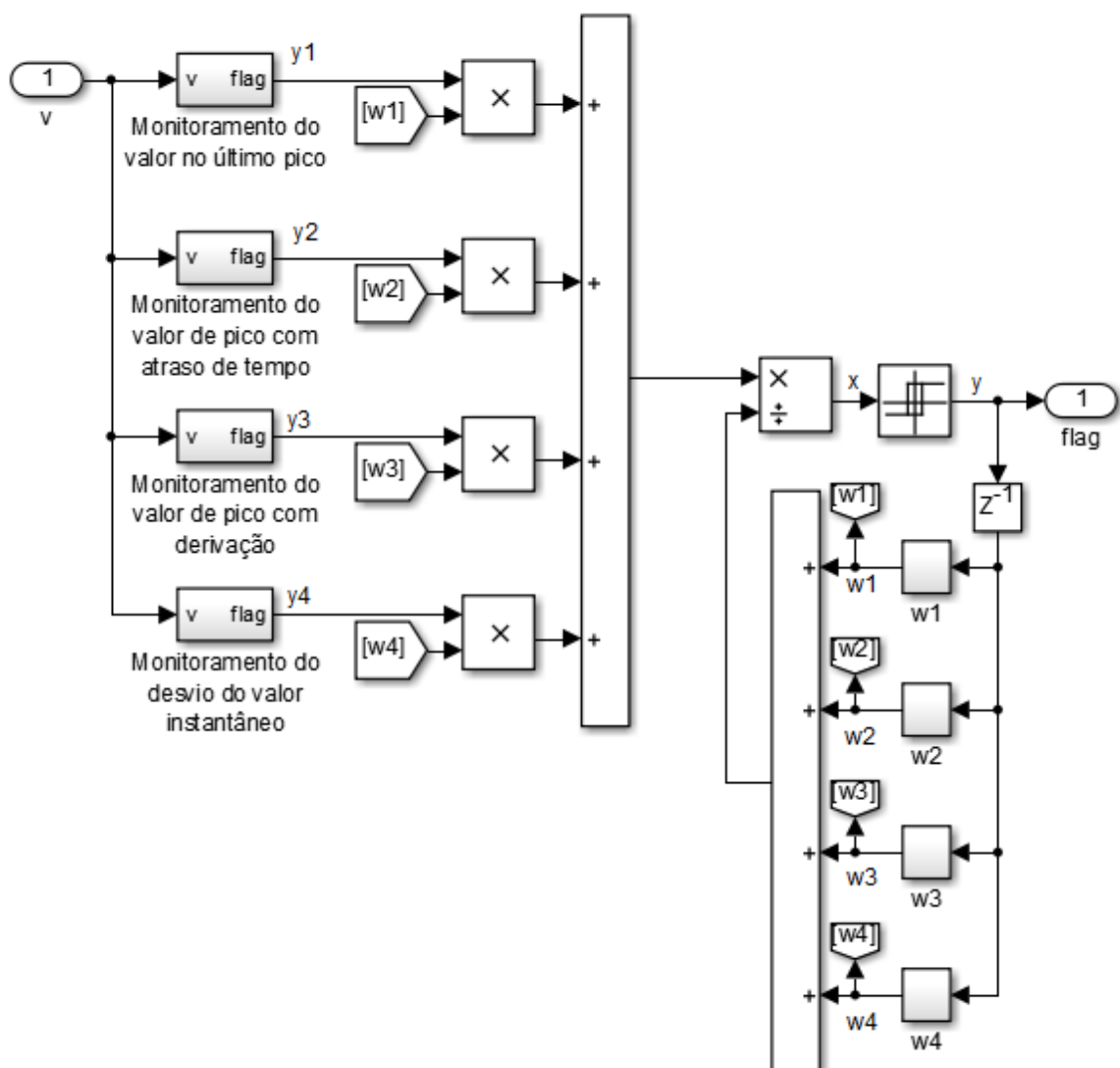


Figura 3.35: Implementação da técnica proposta de comitê de técnicas de detecção em diagrama de blocos.

O comitê foi simulado juntamente com cada técnica que o compõem individualmente aplicando os dados reais de medição usados na seção 3.5. Os resultados são mostrados nas figuras 3.36 e 3.37.

## Simulação de Detecção de Afundamentos de Tensão com Dados Reais

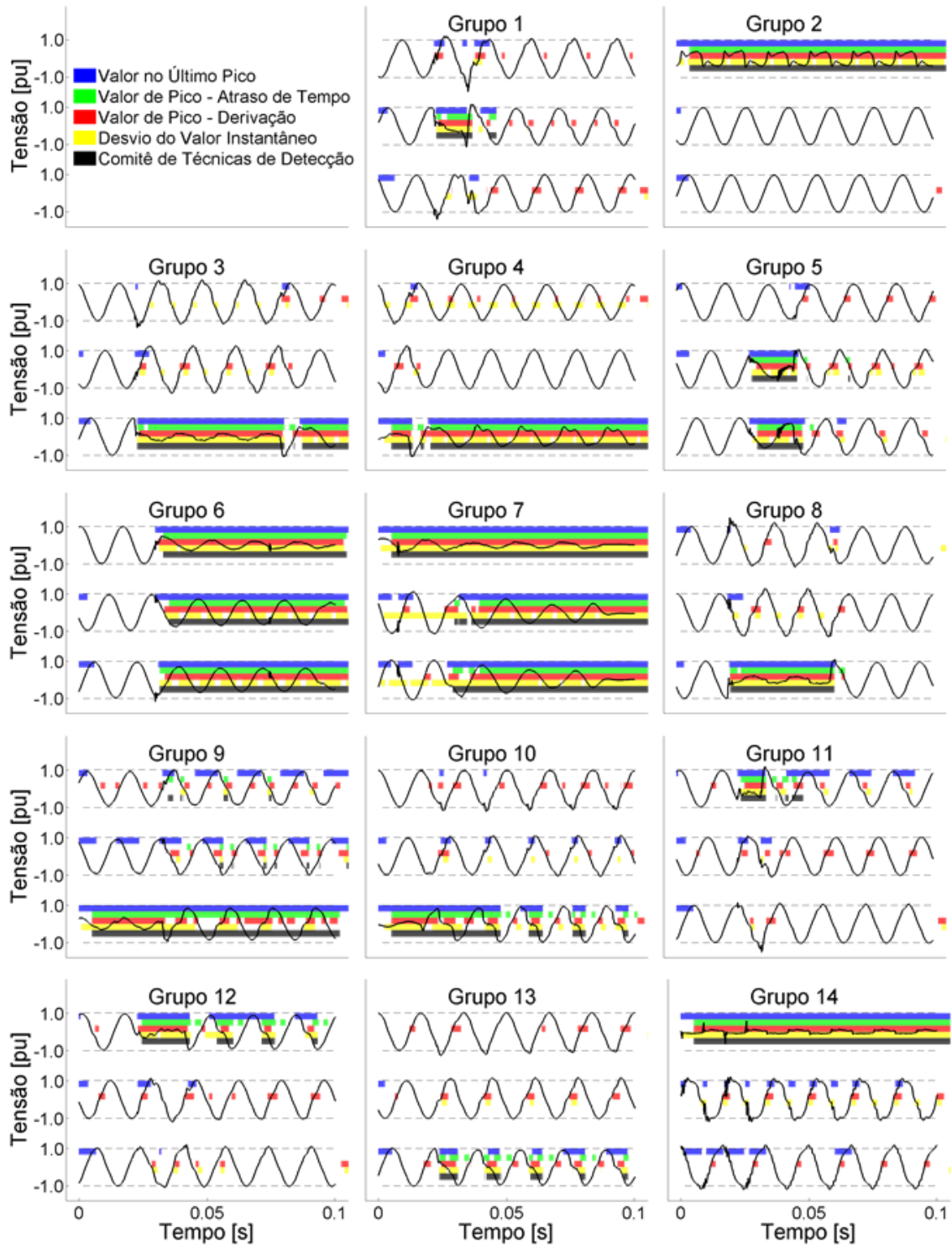


Figura 3.36: Resultados das simulações das técnicas de detecção de afundamento de tensão e do comitê proposto com os grupos 1 a 14 dos dados reais de medição com afundamento de tensão.

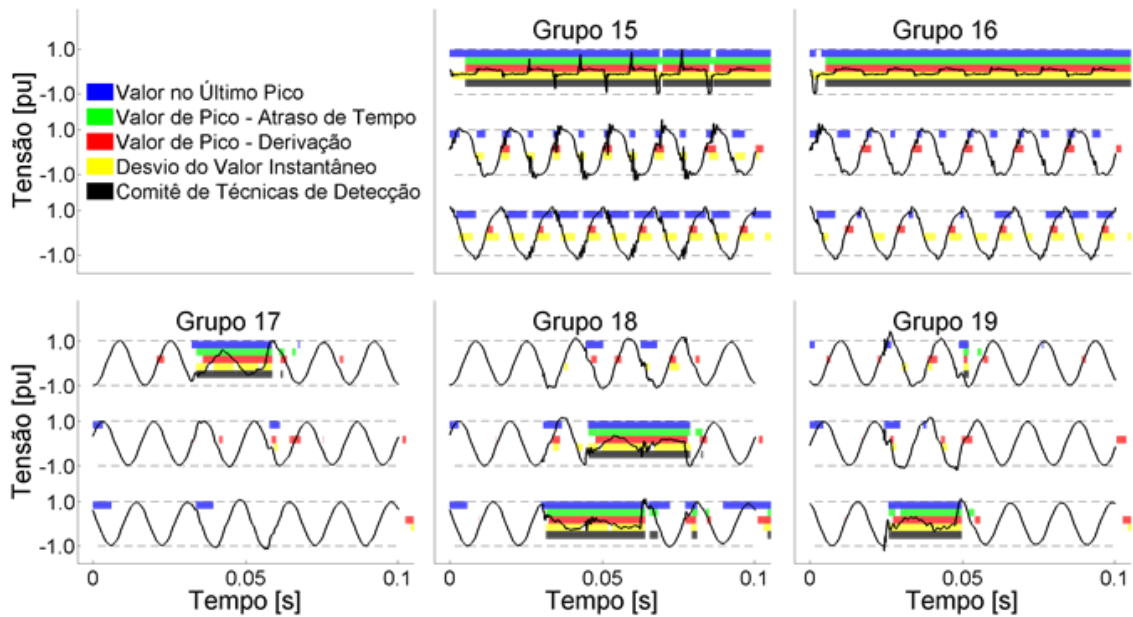


Figura 3.37: Resultados das simulações das técnicas de detecção de afundamento de tensão e do comitê proposto com os grupos 15 a 19 dos dados reais de medição com afundamento de tensão.

Algumas considerações semelhantes à algumas da seção 3.5 podem ser levantadas com os últimos resultados. O comitê tem claramente uma robustez suficiente para não ficar acusando afundamentos em intervalos curtos de tempo na presença de harmônicos, flutuações, ruídos ou transitórios como acontece com as demais técnicas com exceção do monitoramento do valor de pico com atraso de tempo. Além disso, seu desempenho em relação a velocidade de detecção de início ou fim de afundamento é eficiente. Essas considerações mostram que a técnica proposta de comitê equilibra um compromisso de segurança contra detecções falsas e rapidez em detectar afundamentos. Outro ponto é que detecções falsas de fim de afundamento também são raras para o comitê, ao contrário da técnica de monitoramento do desvio do valor instantâneo.

Ainda existem poucas situações que o comitê foi levado a cometer falsos inícios ou falsos fins de afundamentos. Essas situações foram reduzidas com a configuração das funções  $\omega_k(y)$ . A configuração utilizada claramente não é única, mas é baseada nas considerações levantadas pelas simulações das técnicas de detecção com dados reais. Ajustando os valores nas funções  $\omega_k(y)$  minuciosamente com simulações como a que resultou na figura 3.36, se chegou aos valores apresentados nas equações (3.23), (3.24), (3.25) e (3.26), de forma a observar a maior redução de falsas detecções e escolher a configuração com esse critério.

Neste capítulo foram demonstradas as técnicas mais comuns na literatura de detecção de afundamento de tensão. Essas técnicas foram implementadas, simuladas e comparadas nos seus desempenhos. Em seguida uma nova técnica de comitê foi proposta baseada nas considerações a respeito dos desempenhos das técnicas. O comitê proposto foi simulado e provado com dados reais de medição. Para colocar o comitê proposto a prova em ambiente realista, o capítulo seguinte relata experimentos com fonte de tensão de alimentação programada e tensões medidas. Os experimentos vão colocar cada técnica tradicional e o comitê proposto a prova com afundamentos de tensão real.



## CAPÍTULO 4

### PROTÓTIPO E EXPERIMENTOS

A técnica de detecção de afundamento proposta por este trabalho, que é um comitê de detectores descrito na seção 3.7, e cada uma das quatro técnicas que compõem o comitê foram implementadas em C++ para Arduino Due. Foi feito um protótipo em hardware para medição de tensão trifásica para o processamento no Arduino e as saídas de detecção para cada fase foram postas em três saídas digitais do Arduino.

Para execução dos testes, alguns sinais transitórios de tensão trifásica com afundamento de tensão foram programados para uma fonte de tensão. A programação das tensões foi feita em módulo gerenciador de controlador programável universal (universal programmable controller manager, UPC manager) da fabricante Pacific Power Source [48], [49]. Após a programação, a configuração com o regime permanente e transitórios foi escrito no módulo UPC (fonte de tensão controlada). A comunicação foi feita pelo módulo VISA (virtual instrument software architecture) usado como protocolo padrão para a comunicação entre o computador (personal computer, PC) e o instrumento [50].

#### 4.1 Versões em Tempo Discreto das Técnicas de Detecção de Afundamento de Tensão

O primeiro passo para realização prática das técnicas de detecção de afundamento de tensão é a concepção desses algoritmos em tempo discreto. Nas técnicas de monitoramento do valor no último pico e monitoramento do valor de pico com atraso de tempo, há filtro passa baixas e derivada de sinal. Para o filtro passa baixas, foi usada a transformada bilinear, também chamada trapezoidal ou aproximação de Tustin [51]. Essa transformada é obtida usando a relação na equação (4.1) [51], [52]. Aplicando essa relação na versão de tempo contínuo do filtro, a sua versão discreta no tempo é obtida conforme a equação (4.2). A equação (4.3) mostra a implementação desse filtro no domínio do tempo discreto.

$$s = \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \Leftrightarrow z = \frac{\frac{2}{T} + s}{\frac{2}{T} - s} \quad (4.1)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \Leftrightarrow H[z] = K \frac{1 + z^{-1}}{1 - pz^{-1}}, K = \frac{1}{2\frac{\tau}{T} + 1}, p = \frac{2\frac{\tau}{T} - 1}{2\frac{\tau}{T} + 1} \quad (4.2)$$

$$v_f[k] = pv_f[k - 1] + K(v[k] + v[k - 1]) \quad (4.3)$$

A derivada de sinal foi estimada pela aproximação implícita de Euler, que é definida conforme a equação (4.4) [45], [51]. A equação (4.5) mostra a estimativa da derivada de sinal no domínio do tempo discreto.

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T} \Leftrightarrow z = \frac{1}{1 + sT} \quad (4.4)$$

$$\dot{v}[k] = \frac{v[k] - v[k - 1]}{T} \quad (4.5)$$

A técnica de monitoramento do desvio do valor instantâneo contém uma PLL (phase locked loop), que por sua vez contém integradores. Esses integradores foram implementados em tempo discreto com a transformada bilinear, conforme a equação (4.6). A equação (4.7) mostra o cálculo da integral de um sinal usando essa abordagem. Essa equação é aplicada para calcular a integral do erro de  $v_d[k]$  e a integral da saída do controlador  $\omega[k]$  fornecendo o ângulo-fase de saída da PLL. O restante do sistema em tempo contínuo é composto de operações matemáticas estáticas, que são implementadas de forma idêntica na versão em tempo discreto da PLL.

$$H(s) = \frac{1}{s} \Leftrightarrow H[z] = \frac{T}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (4.6)$$

$$i_x[k] = i_x[k - 1] + \frac{T}{2}(x[k] + x[k - 1]) \quad (4.7)$$

Assim, os cálculos a serem implementados no Arduino serão os mesmos que os apresentados nas simulações de cada técnica no **Capítulo 3** substituindo-se apenas o filtro passa baixas, estimação de derivada de sinal e integradores pelas versões discretas no tempo.

#### 4.1.1 Análise da Estabilidade da PLL em Tempo Discreto

Devido à substituição de partes dos cálculos pelas versões discretas no tempo, a estabilidade da PLL é provada novamente, dessa vez em tempo discreto. Essa verificação foi feita apenas na versão da PLL já linearizada, que além de supor que o erro de rastreamento de fase é pequeno e tomando  $\text{sen}(\theta[k] - \theta^*[k]) \rightarrow \theta[k] - \theta^*[k]$  como hipótese válida, é mais restritivo nos parâmetro do controlador por não enxergar os pontos de equilíbrio estáveis além de  $\theta[k] = 0$ . Então a análise é feita sobre a função de transferência de domínio z, obtida pela transformada bilinear da função de transferência da equação (3.18). A versão em tempo discreto da função de transferência é dada pela equação (4.8), com equação característica (4.9).

$$H[z] = \frac{\left(K_i + K_p \frac{2}{T}\right) + 2K_i z^{-1} + \left(K_i - K_p \frac{2}{T}\right) z^{-2}}{\left(K_i + K_p \frac{2}{T} + \left(\frac{2}{T}\right)^2\right) + 2\left(K_i - \left(\frac{2}{T}\right)^2\right) z^{-1} + \left(K_i - K_p \frac{2}{T} + \left(\frac{2}{T}\right)^2\right) z^{-2}} \quad (4.8)$$

$$Q[z] = \left(K_i + K_p \frac{2}{T} + \left(\frac{2}{T}\right)^2\right) + 2\left(K_i - \left(\frac{2}{T}\right)^2\right) z^{-1} + \left(K_i - K_p \frac{2}{T} + \left(\frac{2}{T}\right)^2\right) z^{-2} \quad (4.9)$$

Para verificar se o sistema é estável em tempo discreto, é necessário assegurar que os polos em  $z$  estejam contidos no círculo de raio unitário. O critério de Jury é uma ferramenta prática para estabelecer as restrições suficientes e necessárias para essa checagem [51], [52]. Aplicando esse critério chega-se às restrições da equação (4.10).

$$\begin{aligned} Q[1] > 0 &\Rightarrow K_i > 0 \\ (-1)^2 Q[-1] > 0 &\Rightarrow T > 0 \\ \left|K_i - K_p \frac{2}{T} + \left(\frac{2}{T}\right)^2\right| < K_i + K_p \frac{2}{T} + \left(\frac{2}{T}\right)^2 &\Rightarrow K_p > 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

A segunda restrição é satisfeita independente da escolha dos parâmetros de controle e por natureza do tempo de amostragem, que é positivo. As primeira e terceira restrições são satisfeitas imediatamente quando o critério de Routh na versão em tempo contínuo é satisfeita, que é  $K_p, K_i > 0$ . Então adotando a transformada bilinear como método de discretizar a PLL no tempo e implementar essa ferramenta em software, as condições para a estabilidade não ficaram mais restritivas que no tempo contínuo.

Pelo fato das condições de estabilidade da PLL permanecerem na implementação com transformada bilinear, os parâmetros do controle PI adotados para inferir os resultados experimentais das técnicas que usam PLL – monitoramento do desvio do valor instantâneo e comitê de técnicas – são os mesmos que usados nas simulações. Dessa forma, os resultados de tais técnicas não devem ser afetados por ajustes adicionais no controle.

## 4.2 Implementação para Arduino

O Arduino é uma plataforma aberta para eletrônica em hardware e em software. Foi criado na cidade Ivrea, na Itália, em 2005 pelo professor Massimo Banzi no Ivrea Interaction Design Institute. O objetivo era auxiliar os alunos a adquirirem placas a baixo custo em seus projetos. A criação de Banzi alcançou amplo sucesso e atualmente é usado em milhares de projetos no mundo [53], [54].

O software Arduino IDE é de código aberto, intuitivo, funcional, multi-plataforma e contém todas as funcionalidades necessárias para se programar em C++ sob o ambiente Wiring

para criar um sketch (programa) a se executar no controlador de uma placa Arduino [54]. O ambiente Wiring é baseado em C++ e contém funções, operadores e constantes nativos para facilitar a escrita de um programa que comunique com uma interface de entradas e saídas analógicas e digitais em uma plataforma de microcontrolador como Arduino [55].

O Arduino tem diversas versões de placas como Uno e Leonardo para nível inicial, Mega 2560, Mega ADK e Due para mais funcionalidades e desempenho e Yún e Ethernet para aplicações com Internet das Coisas (Internet of Things, IoT). A versão de placa escolhida para o protótipo deste trabalho foi Arduino Due de acordo com necessidades enfrentadas durante os testes e validação, especificamente relativas ao tempo de execução de ciclos, o que é detalhado na seção 4.2.1. As especificações do Arduino Due são mostradas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Especificações técnicas do Arduino Due. Fonte: [54].

Microcontrolador	AT91SAM3X8E
Tensão de operação	3,3V
Tensão de entrada recomendada	7 a 12V
Limites de tensão de entrada	6 a 16V
Número de pinos digitais I/O	54, dos quais 12 podem ser usados em PWM
Número de pinos de entrada analógica	12
Número de pinos de saída analógica	2
Limite de corrente CC para todos os pinos	130mA
Corrente CC para o pino de 3,3V	800mA
Corrente CC para o pino de 5V	800mA
Memória flash	512KB disponíveis para aplicações
Memória SRAM	96KB em bancos de 64KB e 32KB
Velocidade do relógio	84MHz
Comprimento	101,52mm
Largura	53,3mm
Peso	36g

As vantagens de se usar o Arduino para construir o protótipo de detector de tensão neste trabalho são [54]:

- **Baixo custo:** a aquisição de uma placa Arduino tem um preço muito baixo em relação às placas de microcontroladores comerciais e o software Arduino IDE é grátis.
- **Simplicidade:** a programação e carregamento de um programa no controlador da placa Arduino é relativamente simples, fácil de aprender e necessita apenas do Arduino IDE, cabo USB e a respectiva placa Arduino.
- **Software e hardware abertos e extensíveis:** os programas de cada uma das técnicas de detecção podem ser reutilizados em projetos futuros usando o software Arduino IDE e diferentes versões e versões adaptadas da placa Arduino.

Cada uma das técnicas de detecção de afundamento de tensão foi escrita em um programa para ser executado no controlador da placa Arduino. Para cada um dos programas, foram utilizadas três entradas analógicas para a leitura das tensões de cada uma de três fases monitoradas. As saídas, para cada programa, são compostas por quatro saídas digitais, das quais três são os sinais de detecção de afundamento de tensão para cada uma das três fases e uma serve para sinalizar uma condição de alerta do programa. Tal condição é detalhada seção **4.2.1**.

#### **4.2.1 Ajuste do Período de Execução dos Algoritmos**

Um programa com uma dada técnica de detecção de afundamento de tensão executando no controlador da placa Arduino deve ser executado ciclicamente com período entre execuções equivalentes ao período de amostragem. Assim é desejável aplicar um período de execução – que é igual ao período de amostragem – muito pequeno, suficiente para uma boa qualidade de reconstrução do sinal de tensão e também para a detecção de um afundamento ser rápida e precisa e evitar atraso por amostragem. Por outro lado, o tempo de execução deve ser o suficientemente grande para ter abrangência necessária para conter a execução do algoritmo da respectiva técnica de detecção em cada uma das três fases e não acumular atraso no cálculo das saídas para cada período de execução. A frequência de amostragem foi determinada através do número  $N$  de amostras por ciclo de tensão de 60Hz, que reflete prontamente uma medida de qualidade da reconstrução do sinal. Esse número – uma forma de expressar frequência de amostragem relativa à frequência nominal da rede – é dado por:

$$N = \frac{f_s}{f} = \frac{1}{T_s f} \Leftrightarrow T_s = \frac{1}{Nf} \quad (4.11)$$

Em que  $f$  é a frequência nominal da rede e vale 60Hz e  $T_s$  e  $f_s$  são período e frequência de amostragem. Lembrando que o período de amostragem nas simulações com dados reais na seção 3.5 é de  $250\mu s$ , o número de amostras por ciclo de tensão nesse cenário é aproximadamente 67. Para obter um sinal em uma saída que informe se há atraso nos ciclos de execução, as rotinas das funções  $setup()$  e  $loop()$  em cada programa incluem os mecanismos mostrados na figura 4.1.

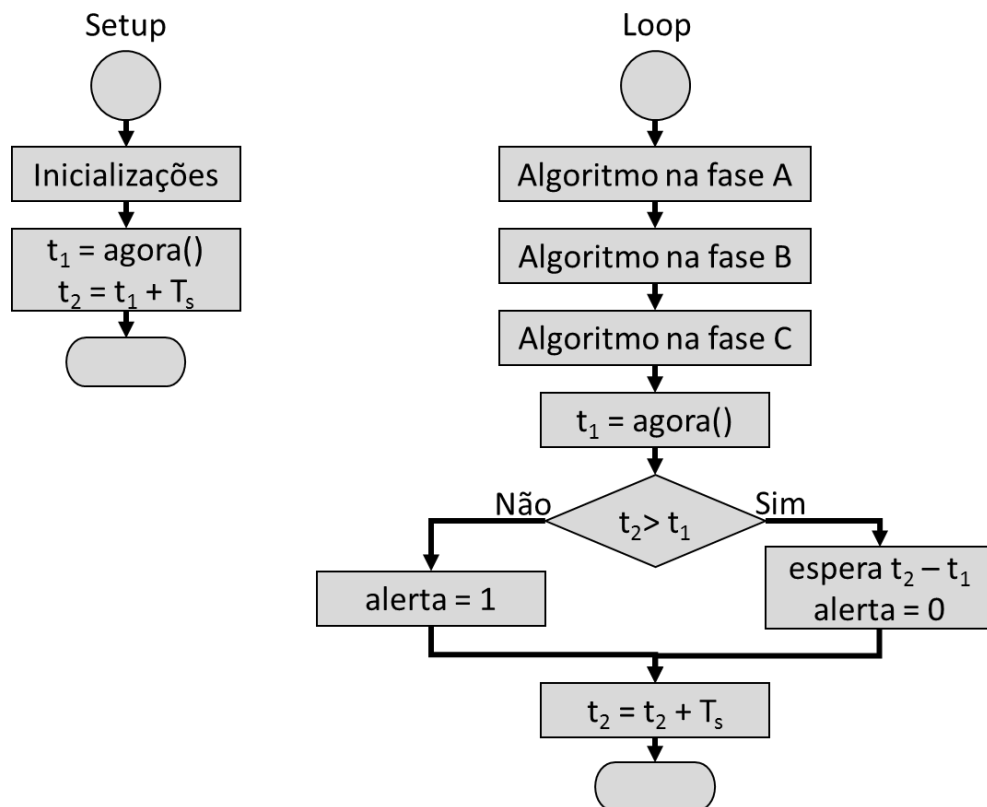


Figura 4.1: Fluxograma dos programas de técnicas de detecção de afundamento de tensão mostrando detalhes de alerta para atrasos nos ciclos de execução.

A variável *alerta* nesse fluxograma representa a quarta saída digital, descrita como a saída que serve para sinalizar uma condição de alerta. Essa saída alimenta um diodo emissor de luz (light emitting diode, LED) vermelho.

Para a execução de um detector de afundamento em tempo real, executando no controlador da placa Arduino, o número  $N$  foi ajustado para um compromisso entre a qualidade de reconstrução do sinal juntamente com prevenção de atraso de detecção por tempo de amostragem e a abrangência da execução do algoritmo para as três fases. O número ótimo foi obtido experimentalmente, executando cada uma das técnicas no Arduino, variando  $N$  e

observando o maior valor desse parâmetro que não acumula atrasos em cada ciclo de execução, o que reflete em não acender o LED vermelho. Esse valor obtido foi  $N = 32$ , que equivale a frequência de amostragem em 1920Hz e período de amostragem de aproximadamente 521 $\mu$ s.

O fato de se obter um valor de  $N$  significativamente menor que na situação das simulações demanda um ajuste na regra de 16 pontos para não comprometer o tempo de resposta das técnicas que fazem uso dessa regra. Esse ajuste é diminuir o número de pontos de forma a se visualizar certa robustez no sentido de não detectar afundamento na ocorrência de rápidos transitórios em compromisso com um bom desempenho de tempo de resposta de detecção de afundamento. Após observações experimentais em procedimentos como os descritos na seção 4.3, o número de amostras na regra de transição foi reduzido para 4 e assim o tempo de transição de um estado de detecção a outro diminuiu aproximadamente pela metade em relação ao que se tinha na situação das simulações.

#### 4.2.2 Circuito e Condicionamento de Sinais

As três entradas analógicas usadas na placa Arduino devem receber informação de tensão instantânea das três fases a serem monitoradas. A fonte de tensão usada para os testes experimentais foi configurada para fornecer tensão trifásica CA com valor 120V eficaz de fase. É necessário abaixar o nível de tensão de forma proporcional e fazer um deslocamento do valor para que o intervalo de valor instantâneo de tensão entre  $\pm 170V$  caiba dentro dos limites de especificação para entrada analógica do Arduino Due que é de 0V a 3,3V em relação ao nível terra. A figura 4.2 mostra o diagrama de circuito e a figura 4.3 mostra o circuito montado com a placa Arduino e também com as pontas de prova de medição de entrada e saída do Arduino.

Um exemplo de medição de tensão instantânea para avaliação de qualidade de energia elétrica é apresentado em [56], que também mede corrente e parâmetros elétricos. No exemplo, usa-se o Arduino Mega 2560, cuja especificação de tensão em entradas analógicas é de 5V, ao invés de 3,3V como Due. O condicionamento de sinal de tensão é mostrado em uma fase com um transformador para ajuste da escala de tensão e um divisor de tensão alimentado em 5V para ajuste de zero na medição. Dessa forma a entrada analógica no Arduino vale 2,5V quando a tensão no secundário do transformador vale 0V.

No caso da montagem feita conforme a figura 4.2, as três fases são aplicadas em três transformadores monofásicos ligados em estrela com neutro em ambos, primário e secundário, o que equivale a um transformador trifásico YNyn. A relação de espiras é de 220 pra 3,

convertendo  $120V$  eficaz em  $1,64V$  eficaz, que equivale a  $2,31V$  de pico. Essa tensão ainda passa por outro divisor de tensão para terminar de ajustar a escala para se obter  $1,54V$  de pico que é a tensão CA em cada um dos resistores de  $2k\Omega$ . Depois é aplicado o divisor de tensão alimentado por  $3,3V$  para colocar a medição de  $0V$  em  $1,65V$  na entrada analógica do Arduino. Assim a tensão variando entre  $\pm 170V$  no primário implica em uma tensão variando entre  $\pm 1,54V$  nos resistores de  $2k\Omega$  e uma tensão entre  $1,65V \pm 1,54V = (0,11V; 3,19V)$  que está contido entre  $0V$  e  $3,3V$ , respeitando a especificação de entrada do Arduino Due. Também é importante notar que o intervalo nominal tem abrangência de quase todo o intervalo da especificação, o que é conveniente para se ter maior resolução e uma sobra de segurança contra situações em que a tensão ultrapassa pouco o valor nominal de pico de  $170V$ .

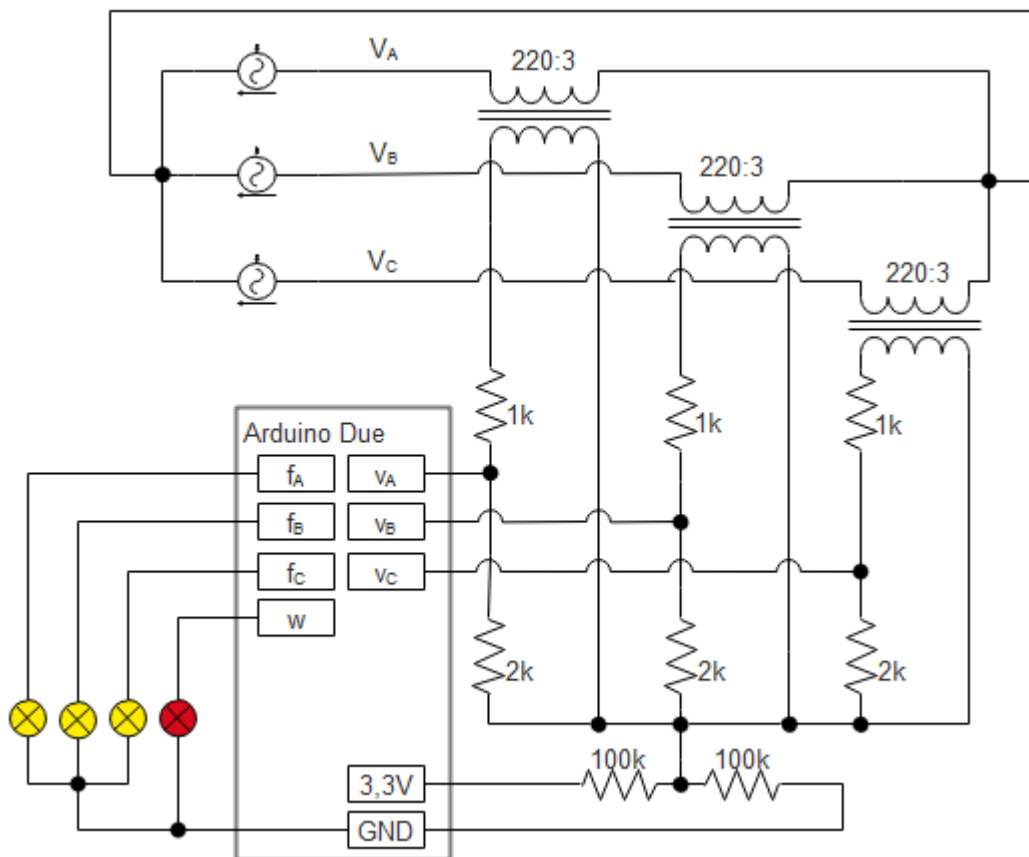


Figura 4.2: Diagrama de circuitos do condicionamento de sinais de tensões monitoradas com protótipo de detector de afundamento de tensão em Arduino.



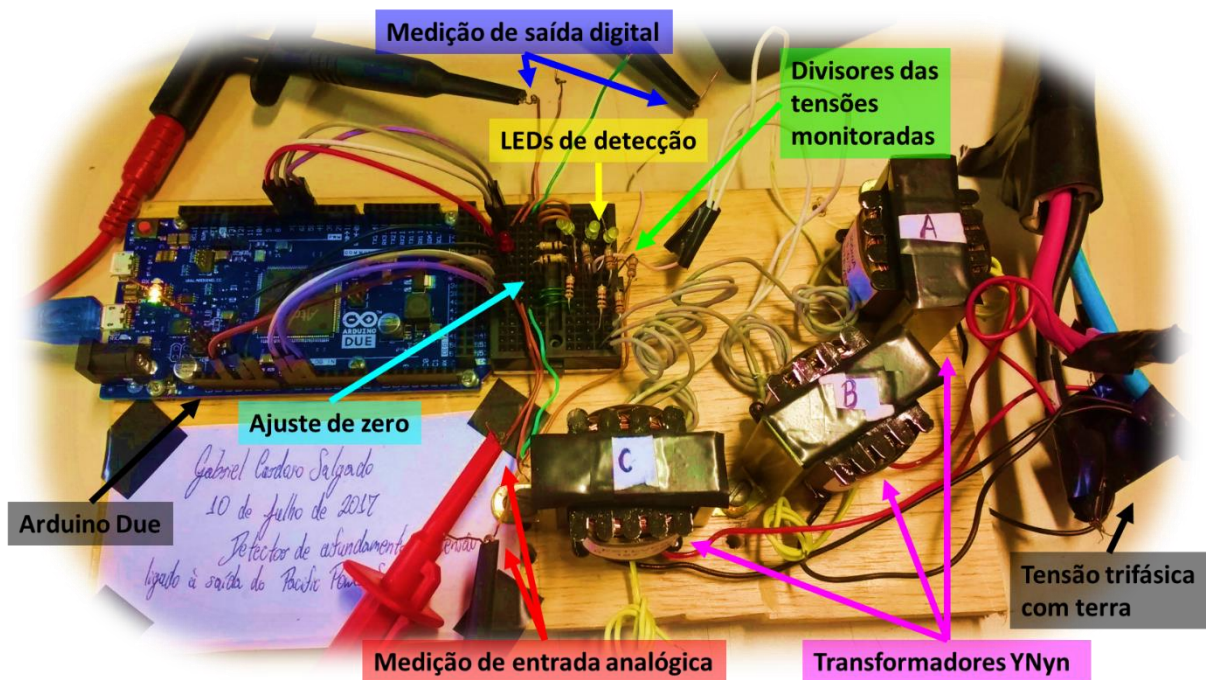


Figura 4.3: Montagem do circuito do condicionamento de sinais de tensões monitoradas com protótipo de detector de afundamento de tensão em Arduino.

### 4.2.3 Testes Rápidos e Calibragem

Com o circuito montado, é possível realizar alguns testes rápidos ainda antes de usar a fonte de tensão programada. Foram feitos testes usando um varivolt e um transformador com chave. O teste com varivolt foi aplicado em uma das fases e foi verificada a detecção observando-se que o LED correspondente à fase acendia quando se varia a tensão de entrada para um valor baixo. Ao voltar a tensão para valor nominal, o LED apagava. O teste com transformador com chave consiste em alimentar uma das fases com tensão nominal no primário. Uma dada posição da chave fornece uma saída no secundário que o detector interpreta como situação normal e a LED correspondente à fase permanece apagada. Ao mudar a posição da chave, a tensão no secundário cai pela metade e era detectado afundamento de tensão, fazendo o LED da fase em teste acender. Ambos os testes foram aplicados para cada uma das técnicas e essas foram validadas no regime permanente. Para avaliar o regime transitório, observando-se o tempo de resposta de detecção, é necessário o teste com a fonte de tensão programada, descrita na seção 4.3.

O circuito da figura 4.2, apesar de estar teoricamente correto para condicionar uma tensão primária de 120V eficaz dentro de 0,11V a 3,19V, pode sofrer variações nos parâmetros de hardware devido às características não ideais dos componentes, como por exemplo a real relação dos transformadores, a saturação magnética nos transformadores e os reais valores das

resistências. Além disso, a representação interna do valor lido na entrada analógica do Arduino converte o valor analógico entre  $0V$  e  $3,3V$  em um inteiro entre 0 e 1023 por meio da conversão de um conversor analógico-digital (analog-to-digital converter, ADC). Por esses motivos, um programa para testes rápidos, com estrutura semelhante à dos demais programas, foi feito para captar os valores das medições de uma fase e apresentar via comunicação serial. A calibragem é feita com os seguintes passos:

1. Aplicar tensão CA nominal;
2. Executar o programa feito para fazer a calibragem no Arduino Due;
3. Após algum tempo, o programa envia um conjunto de dados de medição através da comunicação serial. Esses dados são os valores inteiros convertidos do valor analógico na entrada do Arduino e são referenciados nesse procedimento como o sinal  $v_{AD}[k]$ ;
4. Tirar a média do sinal de medição. O resultado é chamado BIAS e corresponde ao valor esperado da variável  $v_{AD}[k]$  quando a tensão do primário vale  $0V$ , ou  $0pu$ ;
5. Aplicar em  $v_{AD}[k]$  as operações de subtrair por BIAS, elevar ao quadrado, tirar a média, e extrair a raiz quadrada. Com isso obtém-se o valor eficaz nominal no primário. Multiplicando-se pela raiz quadrada de 2, obtém-se o valor de pico nominal no primário. Finalmente, ao extrair a inversa, o resultado é chamado SCALE e é o fator que deve multiplicar  $v_{AD}[k] - BIAS$  para se obter a tensão no primário em P.U.;
6. Repetir os passos 1 a 5 para as demais fases.

Para uma melhor visualização matemática, os passos 4 e 5 são representados pelas equações (4.12) e (4.13). O valor da tensão em P.U. é calculado pela equação (4.14).

$$BIAS = E[v_{AD}[k] | v_{pu}[k] = 0] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v_{AD}[k] \quad (4.12)$$

$$SCALE = \frac{1}{V_p} = \frac{1}{\sqrt{2}V_{ef}}, V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (v_{AD}[k] - BIAS)^2} \quad (4.13)$$

$$v_{pu}[k] = SCALE(v_{AD}[k] - BIAS) \quad (4.14)$$

Os passos para se obter os valores de BIAS e SCALE foram aplicados em cada uma das três fases e os valores obtidos foram usados em cada um dos programas das técnicas de detecção para ajustar a tensão na escala em P.U. e assim aplicar a respectiva técnica em  $v_{pu}[k]$ .

### 4.3 Fonte de Tensão Programada

A fonte de tensão programada, usada nos testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real, é um dispositivo UPC da fabricante Pacific Power Source (PPS) disponível no laboratório TESLA Engenharia de Potência (na escola de Engenharia) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). O dispositivo específico da linha de produtos oferecido pela PPS é a série ASX, que é ideal para aplicações que controle a potência de saída, baseado na tensão de entrada e de saída, fator de potência do sistema alimentado e temperatura [48]. Porém a aplicação presente, que requer uma construção fiel de forma de onda de tensão na saída, é perfeitamente satisfeita com esse dispositivo.

A família de dispositivos da série ASX dispõe de fontes de tensão CA, com operação com potência entre  $1,5kVA$  e  $12kVA$ , e versões para alimentação em uma fase e/ou três fases e para programação manual e/ou remota. O modelo específico utilizado nos testes experimentais é o 345ASX, cujas especificações são potência nominal de  $4,5kVA$ , saída disponível para uma ou três fases, tensão de saída máxima de  $135V$  eficaz de fase-neutro – ou  $270V$  eficaz para saída de uma fase – e corrente nominal de  $16A$  eficaz por fase –  $48A$  eficaz para saída de uma fase [48]. A figura 4.4 mostra o dispositivo 345ASX, que foi utilizado nos testes de detecção de afundamento, montado sobre o chassi no laboratório TESLA.



Figura 4.4: Dispositivo – fonte de tensão programada – 345ASX da Pacific Power Source usado nos testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector.

### 4.3.1 Programação de Afundamento de Tensão

Para programação da tensão, tanto em regime permanente como em regime transitório com afundamento de tensão, foi usado o software UPC Studio, também da PPS. Esse software tem capacidade de ler e escrever configurações em uma fonte de tensão programada da PPS, que tenha interface para programação remota, além de envio de comandos. Isso permite escrever programas na fonte e controlar enviando comando para executar um transitório [48].

As principais funcionalidades do UPC Studio são [48]:

- Simular geração de tensão com forma de onda especificada com conexão em uma fonte de tensão programada virtual;
- Criar e executar regimes transitórios com uma sequência de saídas, podendo inserir diferentes formas de onda, variar amplitude, frequência, inserir harmônicas e editar uma forma de onda livremente;
- Criar uma configuração com programas e formas de onda criadas em ambiente virtual para usar em uma fonte de tensão programada real;
- Operações de interface como visualizar, imprimir ou gravar dados de medição.

A construção dos testes começa com a edição de formas de onda para inserir um afundamento bastante distorcido e ruidoso, além de uma forma de onda apenas ruidosa após afundamento para colocar as técnicas a prova. As duas formas de onda na ferramenta de edição de forma de onda do UPC Studio são mostradas na figura 4.5. A primeira forma de onda está à esquerda e a segunda, à direita.

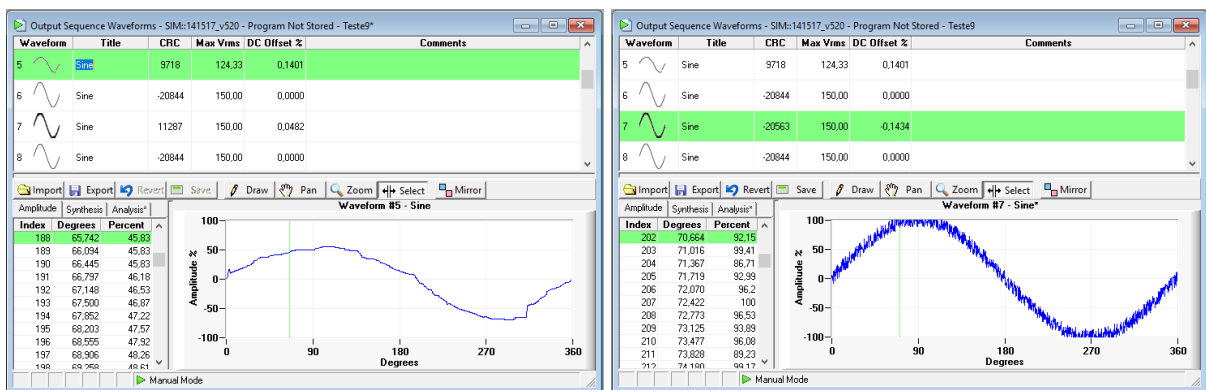


Figura 4.5: Edição de formas de onda usadas nos testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector.

Após a edição das formas de onda, quatro regimes transitórios foram programados, sendo que o primeiro transitório usa a primeira forma de onda e tem afundamento brusco no início e fim; o segundo transitório também usa a primeira forma de onda, mas tem afundamento suave no início e fim; o terceiro transitório usa ambas as formas de onda e o quarto transitório não usa nenhuma das formas de onda editada, se restringindo apenas à forma senoidal. A edição de um dos quatro transitórios é mostrada na figura 4.6. É possível visualizar as tensões durante o regime transitório em gráfico ainda na ferramenta de edição de regimes transitórios. As figuras 4.7 4.8, 4.9 e 4.10 mostram o primeiro, segundo, terceiro e quarto regimes transitórios.

As formas de onda e regimes transitórios são gravadas em programas que são contidos em uma configuração. O próximo passo é a escrita na fonte de tensão programada 345ASX.

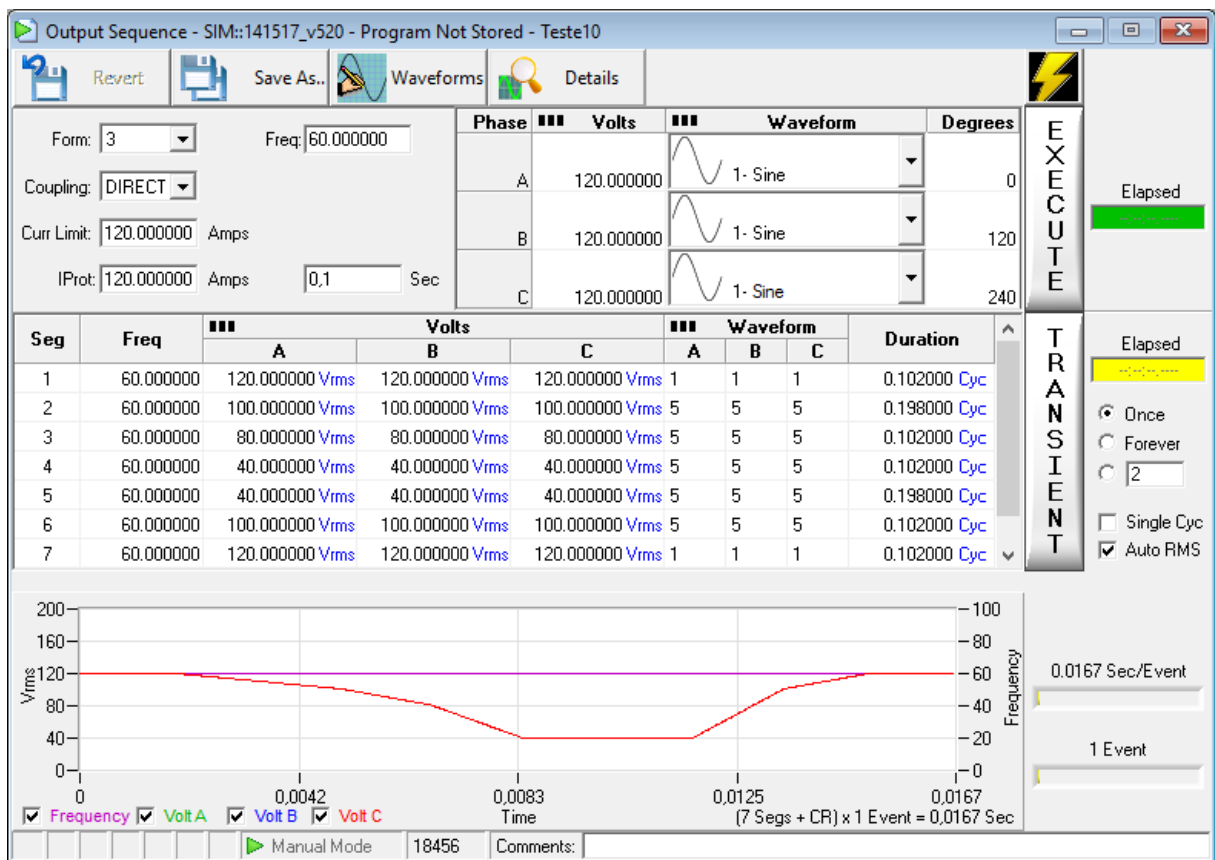


Figura 4.6: Edição de um regime transitório com sequência de saídas.

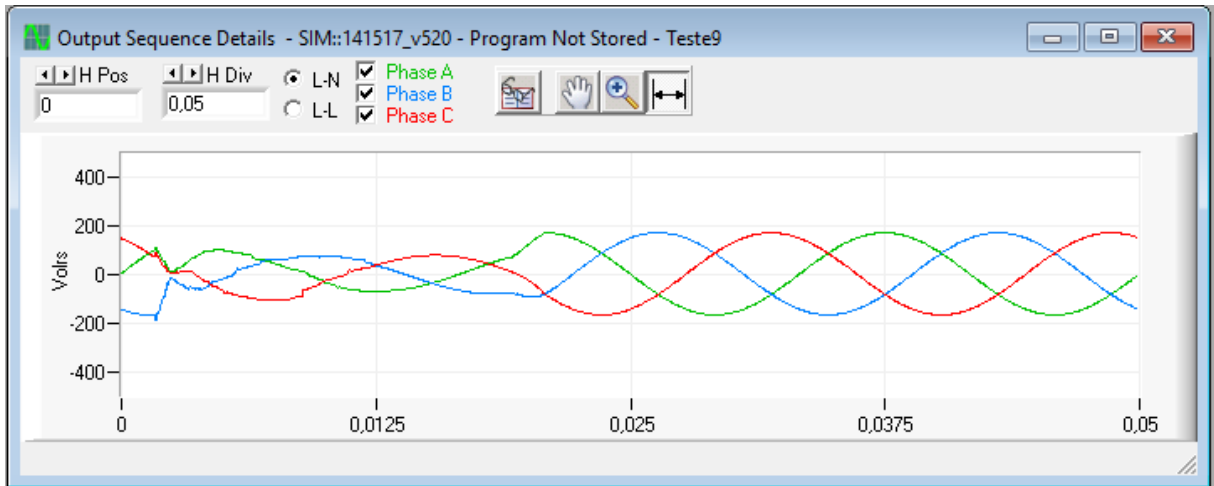


Figura 4.7: Primeiro regime transitório, usando a primeira forma de onda editada, usado para testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector.

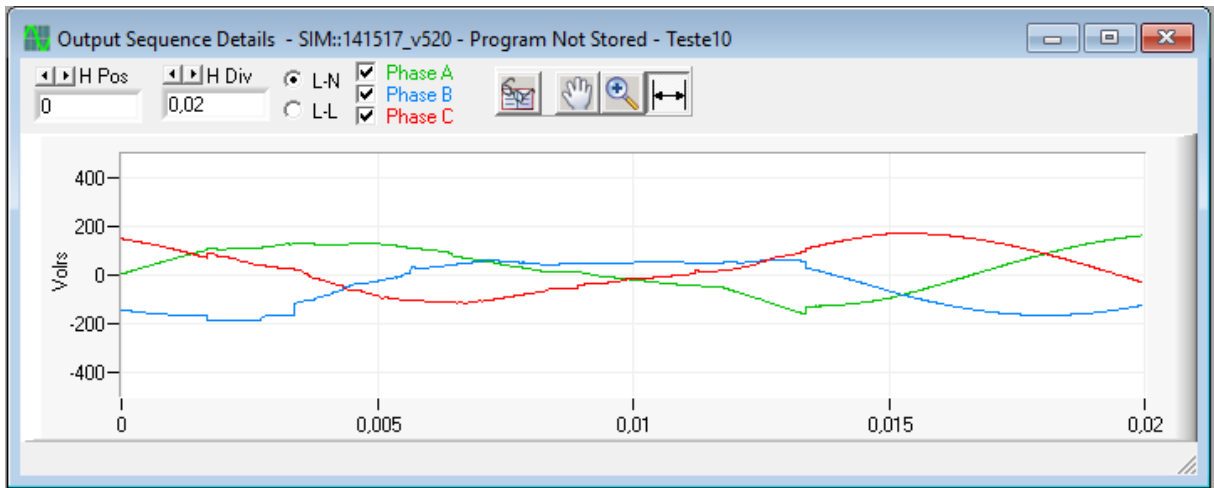


Figura 4.8: Segundo regime transitório, usando a primeira forma de onda editada, usado para testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector.

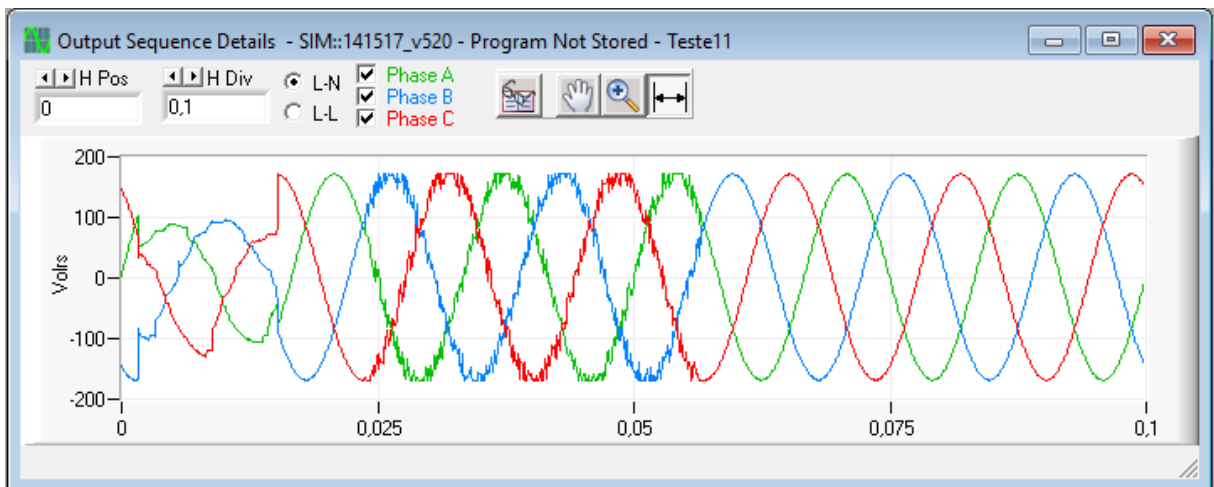


Figura 4.9: Terceiro regime transitório, usando a primeira e a segunda formas de onda editadas, usado para testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector.

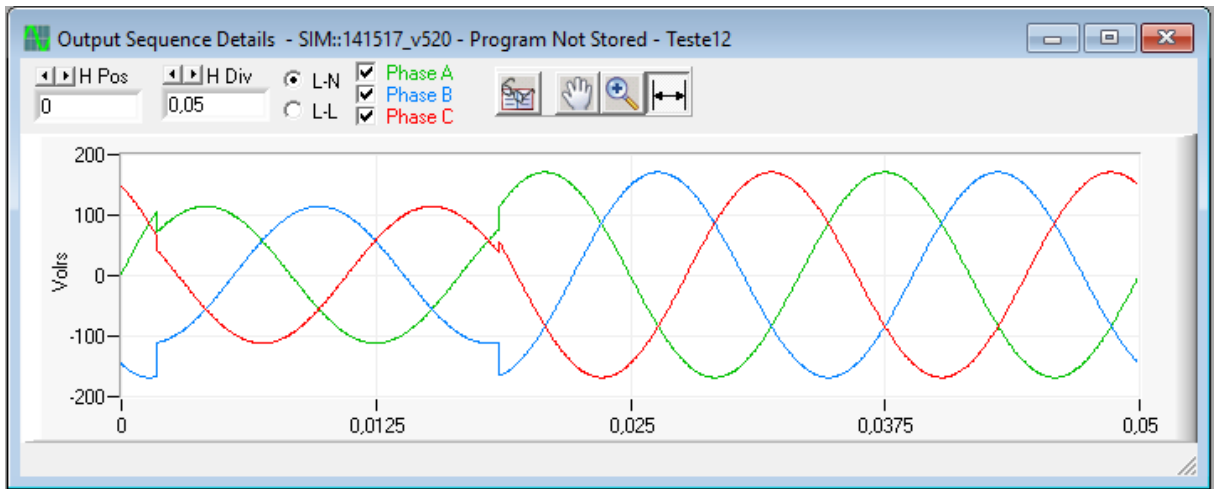


Figura 4.10: Quarto regime transitório, usando apenas forma de onda senoidal, usado para testes de detecção de afundamento de tensão em ambiente real com protótipo de detector.

#### 4.3.2 Comunicação com a Fonte de Tensão Programada

Um dos requisitos do software UPC Studio para fazer conexão e comunicação com um dispositivo UPC é a instalação de uma biblioteca de ligação dinâmica (dynamic link library, DLL) com funcionalidades implementadas no protocolo padrão VISA. Esse padrão, definido e mantido pela IVI Foundation (interchangeable virtual instruments foundation), é padrão para comunicação entre PC e dispositivos [50], [57]. A conexão física pode ser feita sobre GPIB, VXI, PXI, Serial RS-232, Ethernet ou USB [58], sendo que o UPC Studio especificamente implementa a comunicação usando o VISA sobre GPIB ou Serial RS-232 [48], [49].

Foi instalada a implementação do padrão VISA pela National Instruments (NI), que é chamada NI-VISA [58]. A conexão física foi feita usando um cabo Serial RS-232 com porta DB25 na saída do 345ASX, mapeando 8 pinos usados no cabo e na porta DB9 para comunicação com o PC. Os detalhes desse mapeamento foram seguidos baseados no manual da PPS para os dispositivos UPC [49].

Uma vez feita a camada física de comunicação e instalada a implementação VISA, foi feita a conexão entre o UPC Studio no PC e o dispositivo 345ASX. Feita a conexão, o próximo passo é a escrita da configuração que contém os programas com os regimes transitórios e formas de onda. Finalmente são enviados comandos para o controle remoto do dispositivo para executar o regime permanente e envio de comandos para executar o regime transitório desejado no momento desejado.

Para fazer as medições da entrada analógica no Arduino Due e da respectiva saída digital referente à detecção, até então usada para acender LED nos testes rápidos de regime permanente, foi usado um osciloscópio da fabricante Agilent Technologies. Nos testes de regime transitório usando a fonte de tensão programada, foram medidas a entrada e a respectiva saída de cada uma das fases por vez, por causa da limitação do número de canais no osciloscópio. Dessa forma foram usados dois dos quatro canais disponíveis.

#### 4.4 Resultados Experimentais de Detecção de Afundamento de Tensão

A figura 4.11 mostra o conjunto, usado para executar os testes, composto pelo circuito, Arduino, osciloscópio com as medições e um computador comunicando com o Arduino e com o dispositivo 345ASX através do UPC Studio. O Arduino processa cada uma das técnicas de detecção por vez e as medições por osciloscópio são aplicadas em cada fase por vez. O osciloscópio foi configurado para congelar o gráfico de medições quando o sinal de detecção passa por um pulso.

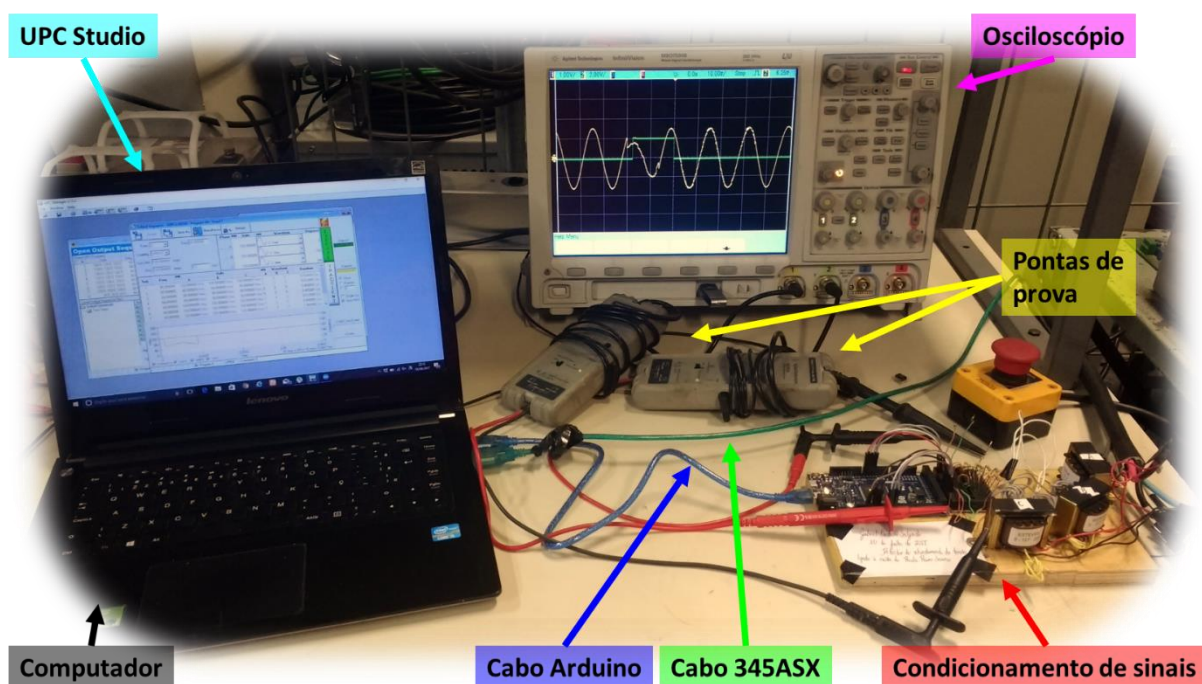


Figura 4.11: Conjunto composto pelo circuito condicionador de sinais, Arduino Due, osciloscópio com as pontas de prova e computador com comunicação com Arduino e com o dispositivo 345ASX através do UPC Studio.

A tela com a funcionalidade de enviar comando de executar um transitório é mostrada na figura 4.12 com o programa do quarto transitório. Dessa forma, a cada vez que se emite o comando, há o afundamento de tensão do respectivo transitório na tensão monitorada.



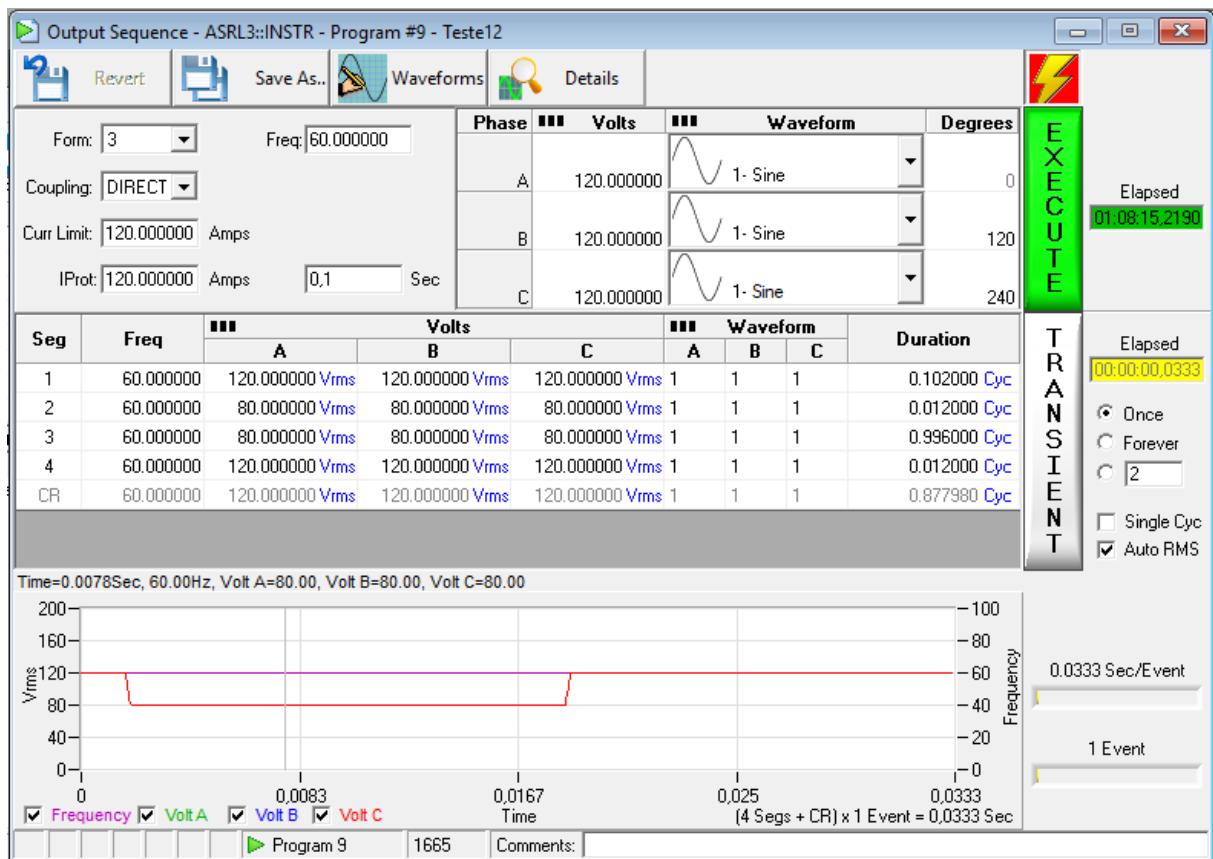


Figura 4.12: Execução de um programa com regime permanente e regime transitório com sequência de saídas.

#### 4.4.1 Resultados para o Primeiro Transitório

A figura 4.13 mostra os resultados da aplicação individual de cada técnica tradicional que compõe o comitê proposto e a aplicação do próprio comitê. Os resultados são mostrados em capturas de tela obtidas no osciloscópio organizados pela aplicação de cada técnica em cada linha e nas fases A, B e C nas três colunas. Os símbolos colocados no canto direito inferior em cada captura de tela classificam de maneira simples e intuitiva o resultado mostrado na respectiva captura de tela. Os resultados para os demais transitórios são mostrados nesse mesmo padrão de figura.

Cada técnica detectou rapidamente o início e o fim do afundamento na fase A, com atrasos apenas devido a regra dos 4 pontos para as que usam tal regra. No entanto, o monitoramento do desvio do valor instantâneo teve falsa detecção de fim próximo do final do distúrbio devido a aproximação da tensão em distúrbio da referência próximo ao cruzamento pelo zero, problema que já foi evidenciado nas simulações. As transições para ausência e de volta para presença de afundamento durante o falso negativo ocorreu um pouco após o cruzamento pelo zero devido a regra dos 4 pontos.

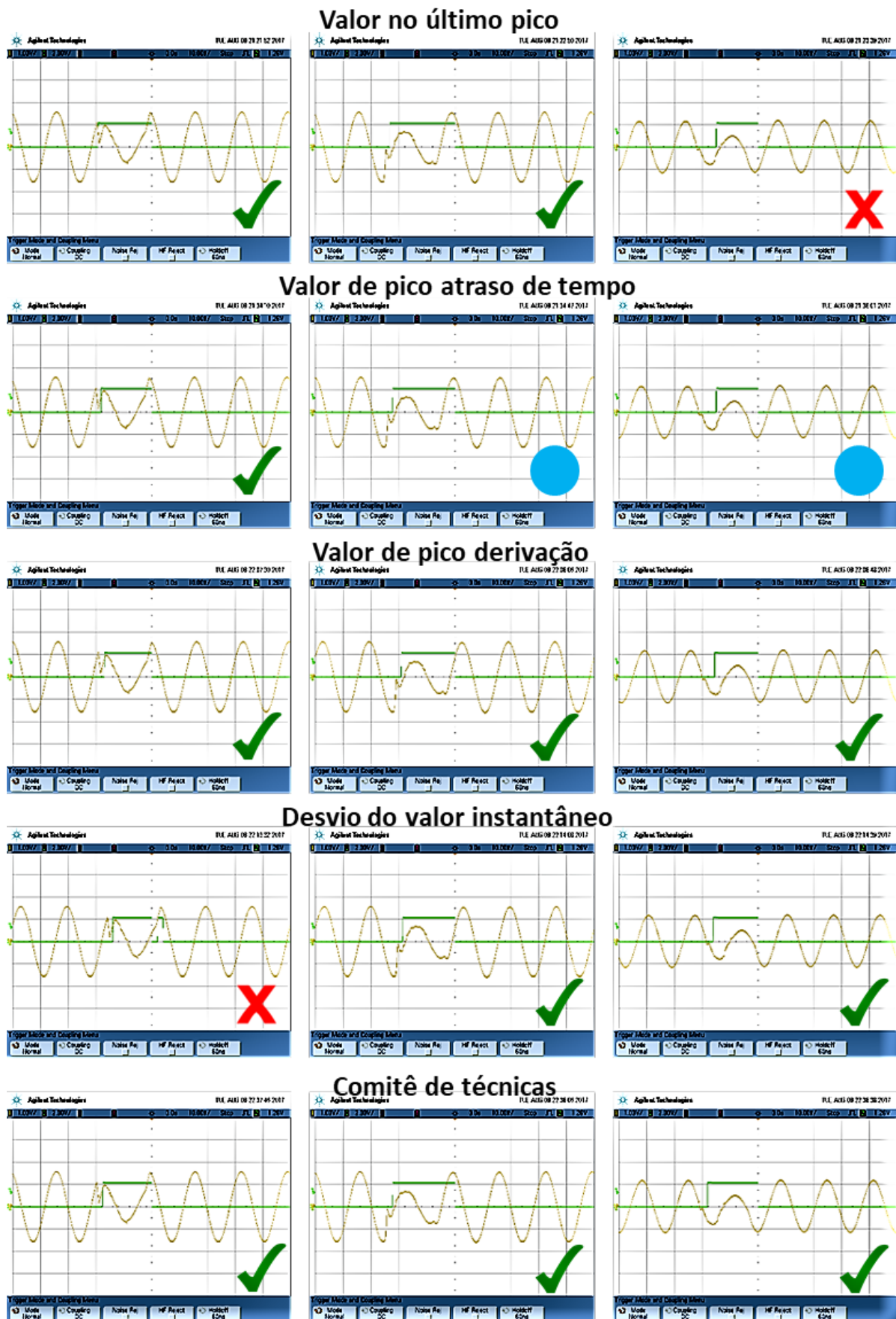


Figura 4.13: Resultados experimentais com protótipo de detector de afundamento de tensão executando cada técnica em cada fase submetida ao primeiro regime transitório programado.

A fase B também teve o início e fim de afundamento detectado com sucesso por cada técnica, sendo que no caso do monitoramento do valor de pico com atraso de tempo, houve um atraso de aproximadamente um quarto de ciclo para a detecção de fim. Essa observação se repete para a fase C. Esse atraso foi devido a componente ortogonal ainda estar em distúrbio, situação em que tal técnica é vulnerável a atraso ou detecção falsa de novo início.

Um ponto fraco do monitoramento do valor no último pico observado é o excessivo atraso na detecção de início do afundamento na fase C. Esse problema aconteceu porque essa técnica muda o estado de detecção apenas nos picos ou ocorrências de derivada praticamente nula no afundamento.

Para o primeiro transitório, as técnicas de monitoramento do valor de pico com derivação e ajuste de escala e comitê de técnicas tradicionais são as que tiveram desempenho ótimo em termos de detecção rápida e robustez contra detecções falsas em ambas as três fases.

#### **4.4.2 Resultados para o Segundo Transitório**

O segundo transitório tem transições suaves da condição normal para afundamento e de volta para condição normal, o que impõe as técnicas à prova em termo de velocidade de detecção de início e de fim. Os resultados são mostrados na figura 4.14, no mesmo padrão mostrado para o primeiro transitório.

O monitoramento do valor no último pico sofreu atraso para detectar o fim do afundamento em ambas as três fases devido ao mesmo problema observado na fase C do primeiro transitório. A transição do estado de detecção muda apenas no pico mais próximo após o fim do afundamento.

O monitoramento do valor de pico com atraso de tempo sofreu detecção falsa de fim e de início um quarto de ciclo após um início e fim de afundamento nas fases A e B respectivamente. Esse problema também foi evidenciado nas simulações e se repete na situação de medições reais. Durante um quarto de ciclo após o início de um afundamento, a componente ortogonal ainda está na condição normal, favorecendo falsa detecção de fim. De forma análoga, durante um quarto de ciclo após o fim de um afundamento, a componente ortogonal ainda está em distúrbio, contribuindo para detecção falsa de início de um novo afundamento. Esse problema também levou um atraso significativo na detecção do início do afundamento nas fases B e C.

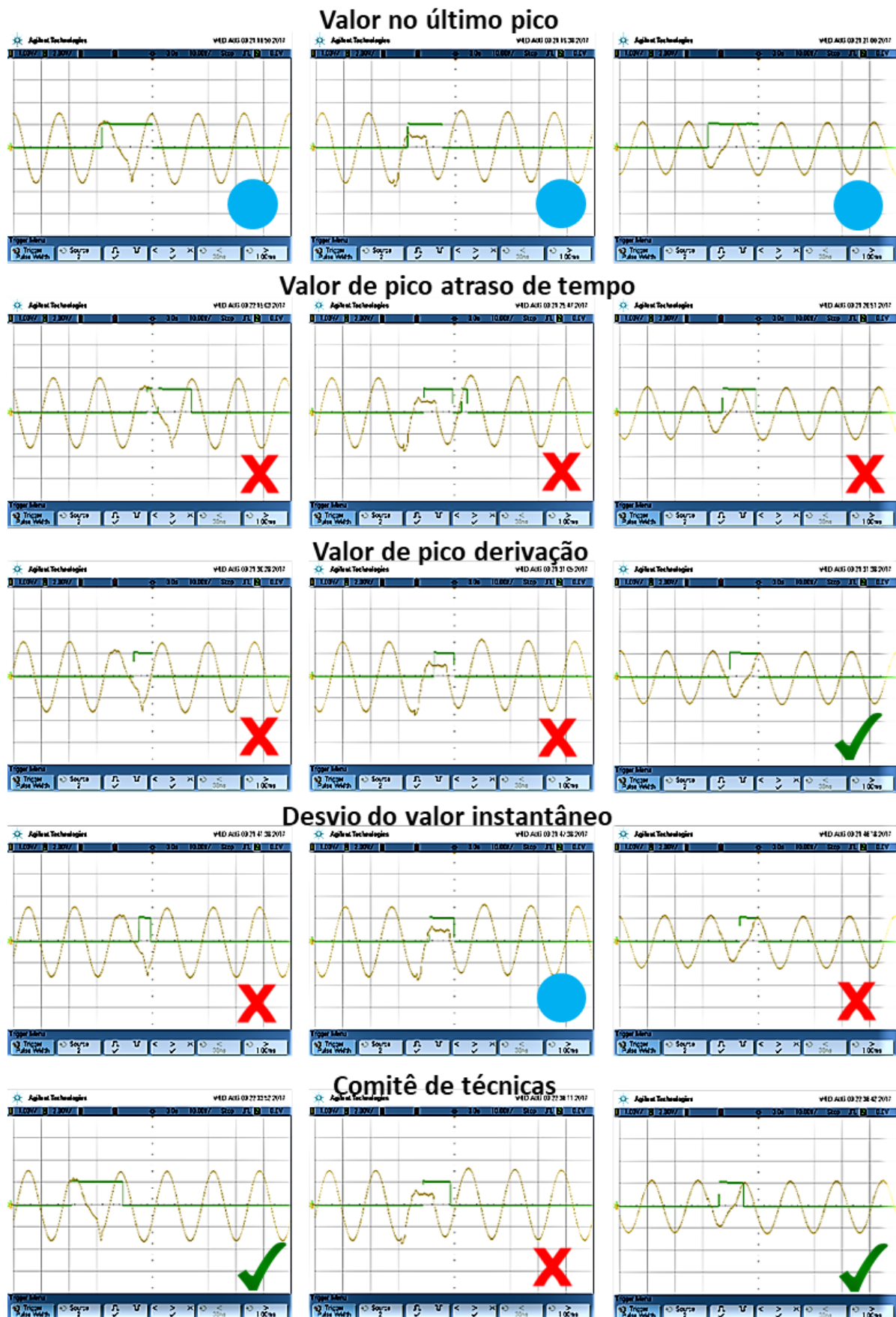


Figura 4.14: Resultados experimentais com protótipo de detector de afundamento de tensão executando cada técnica em cada fase submetida ao segundo regime transitório programado.

O monitoramento do valor de pico com derivação e ajuste de escala sofreu um problema em identificar afundamento no início devido a derivada variando muito, o que levou o valor de pico calculado a transitar entre valores baixos – o que contribui para detecção de afundamento – e valores mais altos – de forma a manter o valor de pico próximo de  $1,0pu$ . Essa situação de variações, combinada com a regra de 4 pontos, levou a atrasos significativos de detecção de início nas fases A e B. Na fase C, o desempenho foi ótimo, com atrasos devido a regra dos 4 pontos para detecção de início e de fim.

O monitoramento do desvio do valor instantâneo sofreu atraso na detecção de inícios e antecipação na detecção de fim nas fases A e C. O motivo é que os eventos de início e fim do distúrbio foram sutis demais e a técnica só acusa afundamento quando a tensão monitorada se desvia excessivamente da referência.

O comitê de técnicas apresentou bons resultados nas fases A e C, mas houve atraso significativo na fase B por prejuízo da técnica de monitoramento do valor de pico com atraso de tempo ter sofrido atraso nessa situação. Apesar dessa técnica, com maior peso na condição de ausência do distúrbio, ser a mais adequada para detecção de início de afundamento, sempre há possíveis formas de afundamento em que seu ponto fraco prevalece, ainda que não tão comum de se manifestar no cenário em que foi posto como mais adequado, como foi observado nas simulações.

A técnica que detectou o afundamento na fase B desse transitório mais rapidamente foi a baseada em desvio do valor instantâneo, que não tinha peso suficiente para levar o comitê a acusar a presença do distúrbio devido ao alto risco de que tal técnica caia em falso positivo devido a ruído, transitório ou harmônicos. Por esse motivo, esse resultado de atraso significativo representa a prevalência da característica de robustez contra falsa detecção sobre a característica de detecção rápida.

#### **4.4.3 Resultados para o Terceiro Transitório**

O terceiro transitório mostra uma situação com transições bruscas da condição normal para afundamento e em seguida para uma condição de tensão senoidal sem afundamento, porém bastante ruidosa. Os resultados para cada técnica e cada fase são mostrados na figura 4.15.

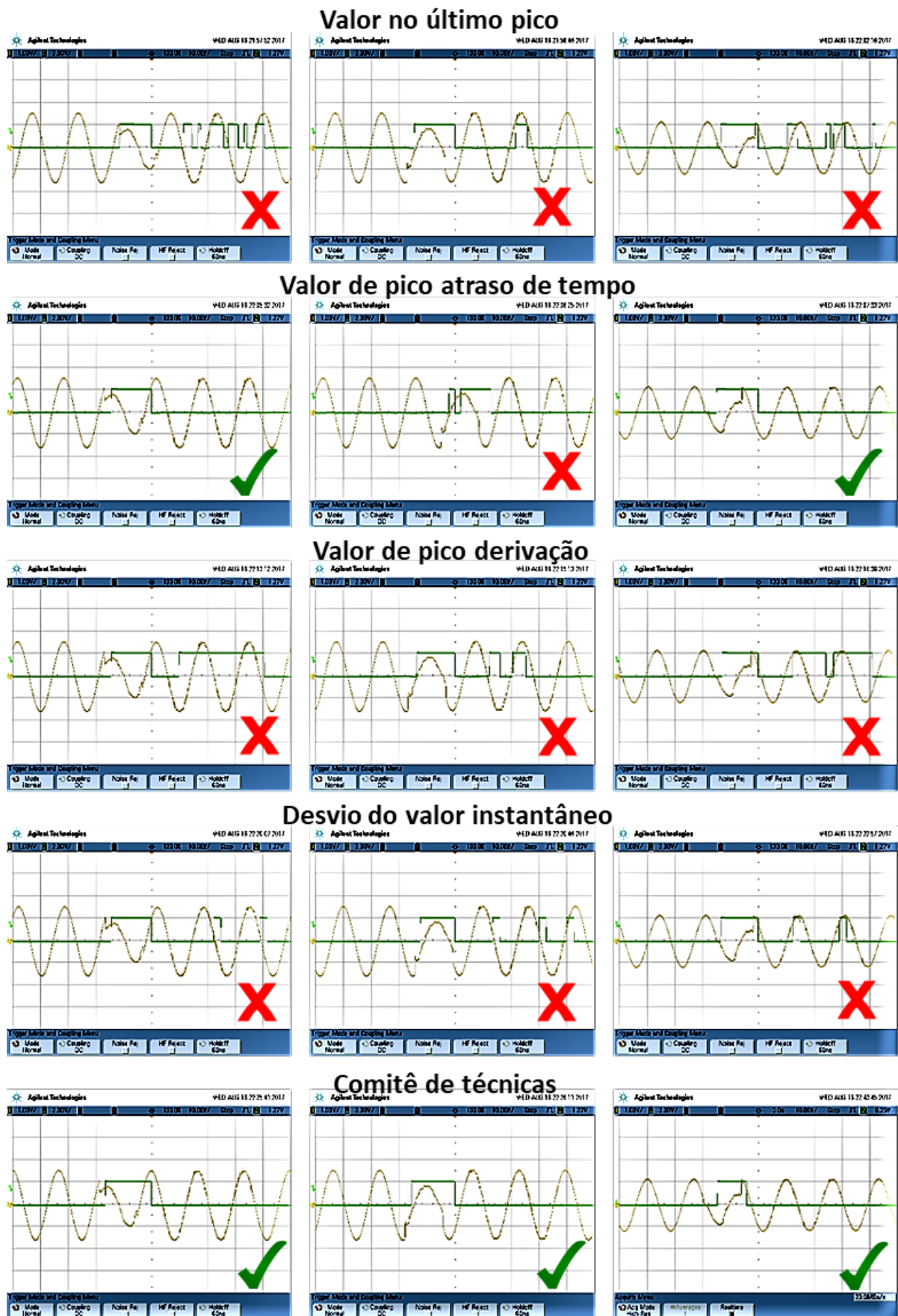


Figura 4.15: Resultados experimentais com protótipo de detector de afundamento de tensão executando cada técnica em cada fase submetida ao terceiro regime transitório programado.

O afundamento de tensão foi detectado com sucesso e rapidamente por todas as técnicas. Porém os resultados também apontam que as técnicas baseadas no valor do último pico, do valor de pico estimado com derivação e ajuste de escala e desvio do valor instantâneo são as três que têm maior vulnerabilidade a falsas detecções de afundamento na condição de ruído sem afundamento. Para a primeira e a segunda dessas, o motivo é o prejuízo da estimativa da derivada da tensão devido a presença de ruído. Esse fato tanto levou a condição de derivada praticamente nula ou troca de sinal de derivada mesmo em instantes que não se tem o pico do sinal senoidal fundamental, como também a subestimação do valor de pico. A medida que ameniza esses efeitos é o uso de filtro passa baixas, que por um lado, não foi suficiente para evitar as detecções falsas, por outro, se diminuir demais a frequência de corte, a componente de 60Hz sofre significativamente atenuação e deslocamento de fase. Quanto a terceira dessas técnicas, o motivo é que o ruído teve amplitude suficiente para que pelo menos quatro amostras consecutivas na entrada do detector no Arduino Due tivessem desvio significativo em relação a referência da PLL, levando o algoritmo a acusar afundamento devido a ruído, mesmo com a regra dos 4 pontos. Deve ser lembrado que o número de pontos para a regra concilia desempenho de detecção rápida com robustez contra falsas detecções, de forma que se aumentar esse número, aumenta-se também o atraso de detecção.

O monitoramento do valor de pico com atraso de tempo teve desempenho ótimo em termos de detecção rápida, com atraso apenas devido a regra dos 4 pontos, e de robustez contra falsa detecção na condição de ruído. Porém sofreu o problema de falsa detecção um quarto de ciclo após o início do afundamento na fase B.

Por fim, a técnica proposta teve o mesmo bom desempenho de detecção visto no primeiro transitório para detectar o afundamento rapidamente e não teve detecção falsa, nem de fim antecipado, nem de início durante o momento de tensão sem afundamento. Esse resultado experimental é importante na comprovação da robustez dessa técnica em contraste aos pontos fracos observados nas demais técnicas individualmente.

#### **4.4.4 Resultados para o Quarto Transitório**

O quarto e último transitório contém um afundamento retangular que mantém a forma senoidal da tensão, variando apenas a amplitude e sem salto de fase, de maneira semelhante a um teste comum em simulações. Os resultados para esse transitório são mostrados na figura 4.16.



Figura 4.16: Resultados experimentais com protótipo de detector de afundamento de tensão executando cada técnica em cada fase submetida ao quarto regime transitório programado.



Para esse transitório, o monitoramento do valor no último pico teve desempenho variável em velocidade de detecção em função da forte dependência de quão próximo os eventos de início e fim de afundamento estão de um pico posterior. Na fase B, o afundamento começou logo após um pico, o que levou o algoritmo a atrasar meio ciclo para detectar o início. Na fase C, os atrasos de início e de fim foram de aproximadamente um quarto de ciclo. Na fase A, no entanto, a detecção de início foi praticamente imediata, visto que o afundamento ocorreu logo antes de um pico, levando a troca de sinal da derivada de tensão.

O monitoramento do valor de pico com atraso de tempo também teve desempenho bastante variável. A detecção foi rápida na fase A, com atraso devido apenas a regra dos 4 pontos. Na fase B, houve o problema de detecção falsa dentro de um quarto de ciclo após o fim do afundamento. Já na fase C, quase houve o mesmo problema, mas com a medida da regra dos 4 pontos, o efeito de tal problema foi reduzido a atraso considerável na detecção de fim do afundamento.

Já com a outra variante da técnica de monitoramento do valor de pico, com estimação da componente ortogonal com derivada e ajuste de escala, os resultados para a detecção no quarto transitório revelam bom desempenho quando o afundamento se mantém senoidal, o que é esperado. A ideia dessa técnica é construída já assumindo afundamento senoidal conforme a equação (2.12) e sua demonstração matemática, o que justifica a rapidez com que o início e fim foram detectados, com atrasos apenas devido a regra dos 4 pontos.

A técnica de monitoramento do desvio do valor instantâneo detectou rapidamente o início e o fim do afundamento em cada fase, com atraso apenas devido a regra dos 4 pontos. Por outro lado, o ponto fraco evidenciado, que também tinha sido manifesto nas simulações, é a falsa detecção de fim durante o distúrbio, o que ficou mais nítido com o afundamento senoidal. Em ambas as três fases ocorreu tal problema.

Assim como no primeiro transitório, a técnica proposta apresentou resultados ótimos no quarto transitório em cada uma das fases. As detecções de início e de fim foram rápidas, considerando a regra dos 4 pontos. Os instantes de detecções em relação aos eventos de início e fim foram bastante próximos dos instantes correspondentes nas técnicas apontadas como mais adequadas no estado de detecção individualmente. Esse é o resultado esperado e confirma a robustez do comitê de técnicas tradicionais selecionadas, conciliando a rapidez de detecção de início e fim e resistência a falhar com detecções falsas de fim durante um distúrbio ou início durante a condição normal de tensão.

Com esses resultados, foi demonstrado que o comitê utiliza as melhores características de cada técnica que o compõe para conciliar a velocidade de detecção e a robustez contra falsos positivos ou negativos. As técnicas mais vulneráveis a transitar para um estado de detecção que não reflete a realidade da tensão monitorada tende a ser silenciada, enquanto as que são geralmente mais adequadas para o estado de detecção em instante atual têm maior peso e direciona a detecção final do comitê ao acerto.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

A primeira parte deste trabalho consistiu em contextualizar o problema de afundamento de tensão com uma revisão bibliográfica, que além de definições, apontar motivações e contextualização de aplicações, o foco específico foi o processo de detecção de afundamento de tensão, em especial as principais técnicas encontradas na literatura. As técnicas encontradas têm implementações relativamente simples, o que viabiliza o uso em aplicações de tempo real com tempo de amostragem na ordem de centenas de microssegundos. Essas técnicas são:

- Monitoramento do valor no último pico;
- Monitoramento do valor de pico (ambas variantes para obter a função ortogonal: usando atraso puro de tempo e usando derivação e ajuste de escala);
- Monitoramento do valor eficaz;
- Monitoramento do desvio do valor instantâneo;
- Análise da transformada de Fourier com janela.

Além dessas técnicas de detecção de afundamento, também foi incluído o controle de tensão com histerese como uma técnica de detecção com atuação, que pode ser usada em conjunto com um sistema de detecção de afundamento. Essa última técnica foi usada em simulações em conjunto com cada uma das demais técnicas de detecção para se obter mais resultados computacionais na segunda parte deste trabalho.

Em continuidade com a revisão, apenas viabilidade de executar em tempo real não é requisito único e suficiente, e a segunda parte deste trabalho demonstra e prova os desempenhos de cada uma das técnicas estudadas em simulações a fim de avaliar o tempo de resposta ao início e ao fim de afundamento, tanto com dados gerados como com dados reais de medição, e também a robustez de detecção, contra ambos: falsos positivos e falsos negativos. Os resultados avaliados nessa parte foram fundamentais para a escolha da estrutura e valores de pesos no comitê da técnica proposta na terceira parte deste trabalho. Dessa forma, as técnicas de detecção baseada em monitoramento do valor no último pico, monitoramento do valor de pico (ambas as variantes) e monitoramento do desvio do valor instantâneo foram escolhidas para compor o comitê e os pesos foram atribuídos de acordo com observações levantadas nas simulações. Ainda na terceira parte, a técnica proposta é demonstrada e provada em simulações com os

mesmos dados reais utilizados em cada uma das técnicas tradicionais individualmente na segunda parte.

Os resultados gerais da segunda parte apontaram as vantagens e desvantagens de cada técnica tradicional. As técnicas baseadas em monitoramento do valor eficaz e em análise da transformadas de Fourier com janela tiveram forte fator desfavorável em termos de tempo de resposta de detecção de início e fim de afundamento, o que é crítico para aplicação de proteção de carga sensível. Por esse motivo, essas duas técnicas não foram selecionadas para compor o comitê da técnica proposta e também não foram utilizadas na parte final envolvendo demonstração experimental. No entanto, tais técnicas são mais adequadas para outras aplicações onde a preocupação é em acusar a presença de afundamento de tensão em averiguação de qualidade de energia em uma rede ou levantamento estatístico desse tipo de distúrbio. Um fator favorável para o uso dessas técnicas em tais aplicações seria a não ocorrência de falsas detecções de início ou fim, tanto em dados gerados como em dados reais de medição.

Por outro lado, as demais técnicas, que foram escolhidas para a composição do comitê da técnica proposta, tiveram bom desempenho geral em termos de tempo para detectar o início e o fim de afundamento de tensão. Por esse motivo, foram escolhidas para o comitê e também foram implementadas na parte final com levantamento de resultados experimentais. Porém fatores desfavoráveis, ainda que não decisivos para eliminar tais técnicas para o prosseguimento com a técnica proposta, foram considerados na distribuição de pesos do comitê, que ainda estão em função do estado de detecção em tempo corrente e em instante atrasado em um quarto de ciclo. A forma com que foi feita tal distribuição atenua os pontos fracos observados por cada técnica e enfatiza as detecções das técnicas em momentos que são tidas como as mais adequadas em função do estado de detecção. Com essa estrutura, os resultados das simulações com a técnica proposta mostraram um desempenho geral superior que contorna as detecções falsas, tanto positivas como negativas, e o tempo de resposta de detecção verdadeira de afundamento se manteve rápido. Esse é um resultado muito importante para a continuidade em demonstração experimental e caminho para a construção de um protótipo de sistema de detecção de afundamento adequada para a proteção de uma carga sensível em processo crítico.

Por fim, a quarta e última parte deste trabalho demonstrou a técnica proposta e cada uma das técnicas tradicionais que compõem o seu comitê de forma prática em ambiente realista. Foram levantados resultados experimentais em ensaios com uma fonte de tensão programada com afundamento de tensão. Os resultados são condizentes com o que se obteve na segunda e

terceira parte. Mais uma vez os pontos fracos de cada técnica tradicional foram expostos, bem como o sucesso geral na detecção de afundamento de tensão. E a técnica proposta com comitê teve um desempenho geral mais elevado, incluindo velocidade de detecção e robustez contra detecções falsas de início e fim, assim como demonstrado na terceira parte. Isso completa a demonstração do resultado geral para este trabalho de uma técnica rápida e robusta de detecção de afundamento de tensão para atuar na proteção de cargas sensíveis e críticas.

Uma vez suprido o objetivo principal deste trabalho, possíveis continuidades e trabalhos futuros podem usar a técnica proposta em placas de processamento como Arduino Due ou quaisquer outras alternativas similares para fazer o monitoramento em uma carga real durante um período de tempo. Um sistema de aquisição e armazenamento de dados pode guardar conjuntos de dados nas ocorrências de afundamento e assim uma demonstração é feita em uma carga real sendo protegida, completando uma situação com distúrbio e atuação e convencendo a respeito da praticidade da solução. Com uma base de dados, também pode ser estimado um valor econômico poupado pela adoção da solução completa incluindo o processo de detecção em conjunto com algum atuador como o DVR.

Outra ideia de trabalho futuro, para extensão do método proposto, é generalizar o cálculo dos pesos do comitê de forma que a adequabilidade de cada técnica possa ser obtida por uma função contínua no tempo – o que equivale a dizer por uma função dinâmica. Diferentes formas de funções podem ser usadas. As formas usadas no presente trabalho são degraus no instante em que o estado de detecção sofre transição e um quarto de ciclo após. Outras formas alternativas são funções logísticas para suavizar a mudança de valores dos pesos, sendo que os parâmetros das funções podem ser calculados a partir de um critério de otimização, que considere velocidade de detecção e robustez contra detecções falsas, em conjunto com uma base de dados com afundamentos de tensão.



## REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso e H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2<sup>a</sup> ed., McGraw-Hill, 2012.
- [2] ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional,” 2016.
- [3] IEEE Power & Energy Society, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,” 2009.
- [4] J. Lamoree, D. Mueller, P. Vinett, W. Jones e M. Samotyj, “Voltage Sag Analysis Case Studies,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, n° 4, pp. 1083-1089, 1994.
- [5] J. J. d. A. L. Leitão e L. B. d. Reis, “Avaliação Econômica das Perdas por Distúrbios na Rede Básica,” *Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica*, pp. 495-502, 17 a 20 Agosto 2003.
- [6] S. M. Silva, “Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão,” UFMG, Belo Horizonte, 1999.
- [7] T. Takagi e M. Sugeno, “Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 15, n° 1, pp. 116-132, 1985.
- [8] H. Ezoji, A. R. Sheikholeslami, M. Shahverdi, A. Ghatresamani e M. H. Alborzi, “Hysteresis Voltage Control of DVR Based on Unipolar PWM,” em *Applications of Matlab in Science and Engineering*, Nowshahr, InTech, 2011, pp. 83-96.
- [9] X. Zhu, W. Chen, C. Ding e L. Wang, “Measures against Voltage Sags & Cases from On-Site Data,” *China International Conference on Electricity Distribution*, pp. 1-4, 2016.
- [10] Y. Sillapawicharn, “A Fast Voltage Sag Detector Based on Peak Detection,” *IEEE*, 2015.
- [11] Y.-H. Chen, C.-Y. Lin, J.-M. Chen e P.-T. Cheng, “An Inrush Mitigation Technique of Load Transformers for the Series Voltage Sag Compensator,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, n° 8, pp. 2211-2221, 2010.
- [12] M. J. Sullivan, T. Vardell e M. Johnson, “Power Interruption Costs to Industrial and Commercial Consumers of Electricity,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, n° 6, pp. 1448-1458, 1997.

- [13] M. J. Sullivan, B. N. Suddeth, T. Vardell e A. Vojdani, "Interruption Costs, Customer Satisfaction and Expectations for Service Reliability," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 11, nº 2, pp. 989-995, 1996.
- [14] A. S. Poste, B. T. Deshmukh e B. E. Kushare, "Detection, Classification and Characterisation of Voltage Sag," *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques*, pp. 232-237, 2016.
- [15] J. Guerrero, J. Soto, D. Robles e E. Luquez, "Study of the Impact of Non-rectangular Voltage Sags in Induction Motors," *International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*, pp. 172-176, 2008.
- [16] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems - Voltage Sags and Interruptions*, Gothenburg: Wiley-Interscience, 1999.
- [17] S. W. Middlekauff e E. R. C. Jr., "System and Customer Impact: Considerations for Series Custom Power Devices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, nº 1, pp. 278-282, 1998.
- [18] R. Omar e N. A. Rahim, "New Control Technique Applied in Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Mitigation," *IEEE ICIEA*, pp. 848-852, 2009.
- [19] R. Saxena e M. Kushwah, "Optimization of Voltage Sag/Swell Using Dynamic Voltage Restorer (DVR)," *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques*, pp. 4046-4051, 2016.
- [20] Portal Solar, "O que é Geração Distribuída," 2016. [Online]. Available: <https://www.portalsolar.com.br/o-que-e-geracao-distribuida.html>. [Acesso em 04 10 2017].
- [21] ANEEL, "Geração Distribuída," 25 05 2017. [Online]. Available: [http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset\\_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false](http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false). [Acesso em 04 10 2017].
- [22] L. F. J. Meloni, Â. J. J. Rezek e Ê. R. Ribeiro, "Small-Signal Modeling of a Single-Phase DVR for Voltage Sag Mitigation," *Harmonics and Quality of Power*, pp. 55-59, 2016.
- [23] D. M. Vilathgamuwa e H. M. Wijekoon, "Control and Analysis of a New Dynamic Voltage Restorer Circuit Topology for Mitigating Long Duration Voltage Sags," *IEEE*, pp. 1105-1112.
- [24] C. Fitzer, M. Barnes e P. Green, "Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 917-924, 2002.
- [25] S. M. Silva, "Análise e Implementação de um Restaurador Dinâmico de Tensão," UFMG, Belo Horizonte, 2003.



- [26] Z. Sizhan, L. Jinjun, Z. Linyuan, Z. Y. e Y. Xu, "Sag Detection Algorithm for Dynamic Voltage Restorer used in Wind F arms under Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 601-606, 2013.
- [27] D. D. Ferreira, C. A. G. Marques, A. S. Cerqueira, C. A. Duque e M. V. Ribeiro, "Sistema Automático de Detecção e Classificação de Distúrbios Elétricos em Qualidade da Energia Elétrica," *Revista Controle & Automação*, vol. 20, nº 1, pp. 53-62, 2009.
- [28] M. Oleskovicz, A. A. F. M. Carneiro, O. D. F., D. V. Coury, E. F. Arruda e S. A. Souza, "Estudo Comparativo de Ferramentas Modernas de Análise Aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica," *Revista Controle & Automação*, vol. 17, nº 3, pp. 331-341, 2006.
- [29] G. T. Heydt e A. W. Galli, "Transient Power Quality Problems Analyzed Using Wavelets," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, nº 2, pp. 908-915, 1997.
- [30] A. Gaouda e M. M. A. Salama, "Power Quality Detection and Classification Using Wavelet-Multiresolution Signal Decomposition," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, nº 4, pp. 1469-1476, 1999.
- [31] D. W. Novotny e T. A. Lipo, *Vector Control and Dynamics of AC Drivers*, Wisconsin: Clarendon Press Oxford, 1996.
- [32] P. C. Krause, O. Wasynczuk e S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drives Systems*, 2ª ed., Purdue: Wiley-Interscience, 2002.
- [33] L. N. Arruda, S. M. Silva e B. d. J. C. Filho, "PLL Structures for Utility Connected Systems," *Industry Applications Conference*, pp. 2655-2660, 2001.
- [34] M. Mansor e N. A. Rahim, "Voltage Sag Detection – A Survey," *International Conference for Technical Postgraduates*, 2009.
- [35] K. S. P. Kumar, P. Gowthami e P. M. Roseline, "Mitigation of Voltage Sag Using Dynamic Voltage Restorer With Hysteresis Voltage Control Technique," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 4, nº 12, pp. 9605-9610, 2015.
- [36] E. A. Kumar e D. V. N. Ananth, "Simulation of Dynamic Voltage Restorer with Hysteresis Voltage Control for Power Quality Improvement," *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, vol. 4, nº 3, pp. 432-437, 2015.
- [37] A. A. Koolaiyan, A. Sheikholeslami e R. A. Kordkheili, "A Voltage Sag Compensation Utilizing Autotransformer Switched by Hysteresis Voltage Control," *International Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 545-550, 2008.
- [38] IEEE Power & Energy Society, "Recommended Practice For Power Quality Measurements in A.C. Power Supply Systems," 2004.

- [39] N. R. N. Ama, W. Komatsu e L. M. Junior, “Digital Control for PLLs Based on Moving Average Filter: Analysis and Design in Discrete Domain,” *Eletrônica de Potência Campo Grande*, vol. 20, nº 3, pp. 293-299, 2015.
- [40] F. P. Marafão, S. M. Deckmann, J. A. Pomilio e R. Q. Machado, “Metodologia de Projeto e Análise de Algoritmos de Sincronismo PLL,” *Eletrônica de Potência*, vol. 10, nº 1, pp. 7-14, 2005.
- [41] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Mineapolis: Prentice-Hall, 1970.
- [42] J. J. E. Slotine e W. Li, *Applied Nonlinear Control*, New Jersey: Prentice-Hall, 1991.
- [43] A. Gelb e W. E. V. Velde, *Multiple-Input Describing Functions and Nonlinear System Design*, Massachusetts: McGraw-Hill, 1968.
- [44] D. P. Atherton, *Engineering, Nonlinear Control*, Falmer: Van Nostrand Reinhold, 1982.
- [45] L. A. Aguirre, *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, Belo Horizonte: UFMG, 2007.
- [46] L. Morgan, “Power Quality Event Characterization,” *IEEE Standards*, 6 Fevereiro 2001. [Online]. Available: <http://grouper.ieee.org/groups/1159/2/index.html>. [Acesso em 1 Maio 2017].
- [47] Institute of Electrical and Electronics Engineers, “Estado dos projetos de padrões IEEE em desenvolvimento,” [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/develop/project/status.txt>. [Acesso em 1 Junho 2017].
- [48] Pacific Power Source, “Pacific Power Source,” Pacific Power Source, 2016. [Online]. Available: <http://pacificpower.com/>. [Acesso em 31 07 2017].
- [49] Pacific Power Source, “UPC-32 UPC-12 Operation Manual,” Pacific Power Source, Irvine, 2007.
- [50] VXIplug&play Systems Alliance, “VPP-3.4.3: VISA Implementation Specification for COM,” IVI Foundation, 2016.
- [51] K. J. Astrom e B. Wittenmark, *Computer-Controlled Systems - Theory and Design*, Tsinghua: Prentice Hall, 1997.
- [52] C. L. Phillips e H. T. Nagle, *Digital Control System Analysis and Design*, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995.
- [53] A. Campos, “BR-Arduino,” BR-Arduino, 15 11 2014. [Online]. Available: <http://br-arduino.org/2014/11/arduino-o-que-e-e-pra-que-serve.html>. [Acesso em 01 08 2017].
- [54] Arduino, “Arduino,” Arduino, [Online]. Available: <https://www.arduino.cc>. [Acesso em 01 08 2017].

- [55] Wiring, “Wiring,” Wiring, [Online]. Available: <http://wiring.org.co/>. [Acesso em 01 08 2017].
- [56] D. Medved e P. Stastny, “Electric Power Quality Analyser Design Using of Open-Source Platform Arduino,” *Elektroenergetika*, vol. 9, n° 2, pp. 9-12, 2016.
- [57] IVI Foundation, “IVI Foundation,” IVI Foundation, [Online]. Available: <http://www.ivifoundation.org/default.aspx>. [Acesso em 04 08 2017].
- [58] National Instruments, “National Instruments,” National Instruments, 2014. [Online]. Available: <https://www.ni.com/visa/>. [Acesso em 04 08 2017].



## APÊNDICE A

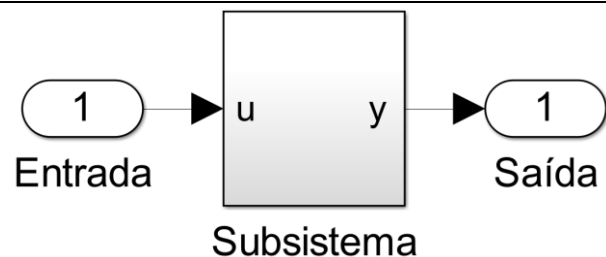
### BLOCOS SIMULINK USADOS NAS MODELAGENS E SIMULAÇÕES

O programa Simulink foi usado para fazer os modelos e simulações em diagramas de blocos mostrados no Capítulo 2 Revisão de Afundamentos de Tensão e no Capítulo 3 Algoritmos e Simulações. Este apêndice apresenta breves descrições de cada tipo de bloco Simulink que aparece nas figuras a fim de que o leitor não familiarizado com Simulink entenda e interprete mais facilmente os diagramas de blocos.

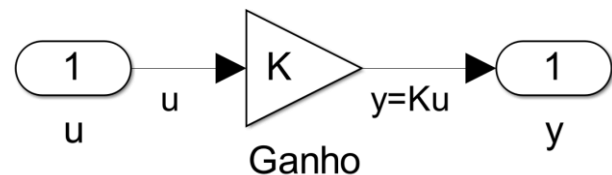
Entrada e saída: representam a entrada e a saída de um sistema.



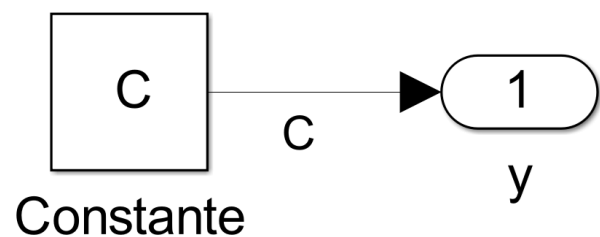
Subsistema: aplica um subsistema com entradas (opcionais) e saídas (opcionais). Um subsistema, por sua vez, contém um diagrama de blocos interno com as entradas e saídas definidas.



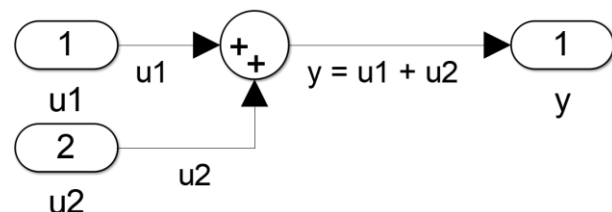
Ganho: aplica um ganho a um sinal, ou seja, multiplica por uma constante.



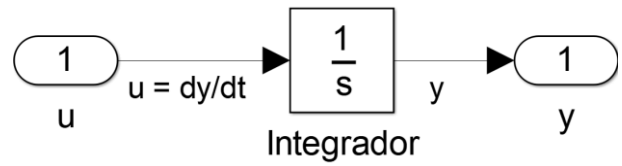
Constante: produz um sinal constante.



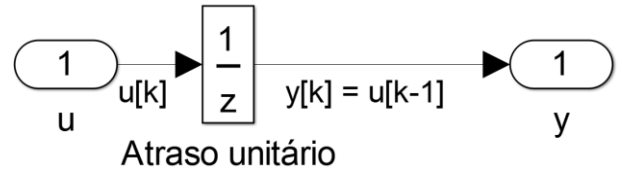
Somador: soma (ou subtrai) dois ou mais sinais. Sinais com o símbolo + entram em soma e sinais com o símbolo - entram em subtração.



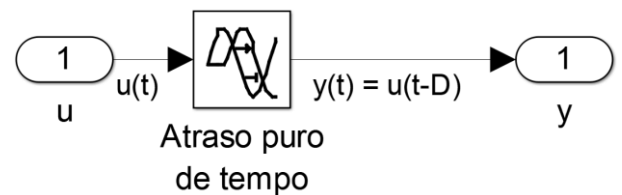
Integrador: calcula a integral de um sinal.



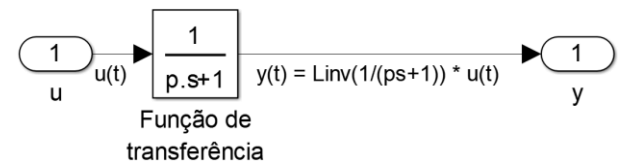
Atraso unitário: obtém o sinal atrasado em uma amostra.



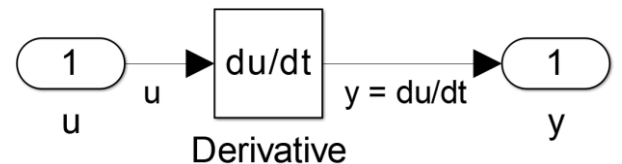
Atraso puro de tempo: obtém o sinal com um atraso puro de tempo. É usado para atraso de tempo contínuo.



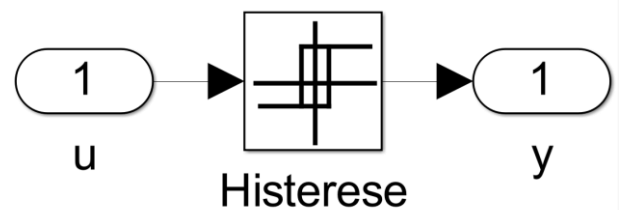
Função de transferência: aplica uma relação dinâmica linear, representada por uma função de transferência, sobre um sinal.



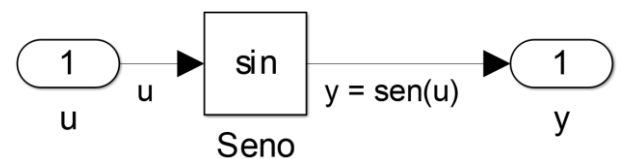
Derivativo: calcula a derivada aproximada de um sinal.



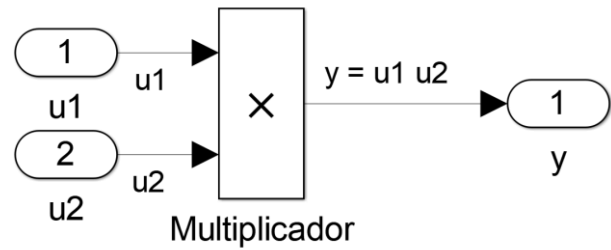
Histerese: impõe um efeito de histerese no sinal de entrada de forma que a saída percorre a subida e a descida em caminhos diferentes em torno dos limites da histerese.



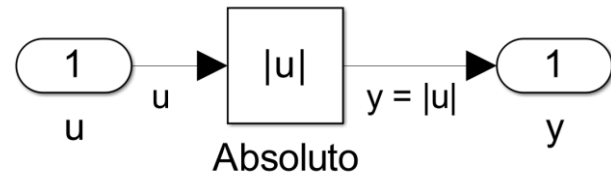
Seno: aplica a função seno sobre o sinal de entrada.



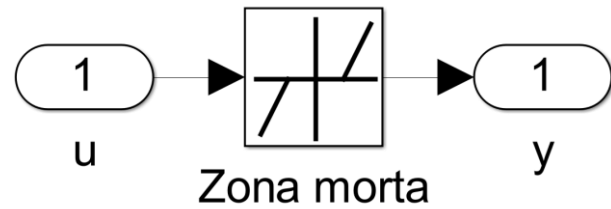
Multiplicador: multiplica dois ou mais sinais ponto a ponto.



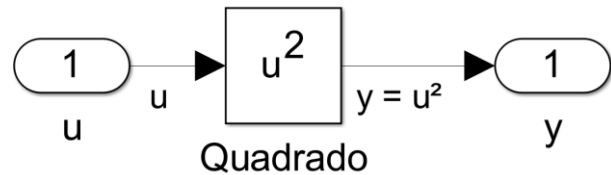
Absoluto: calcula o valor absoluto ponto a ponto de um sinal de entrada.



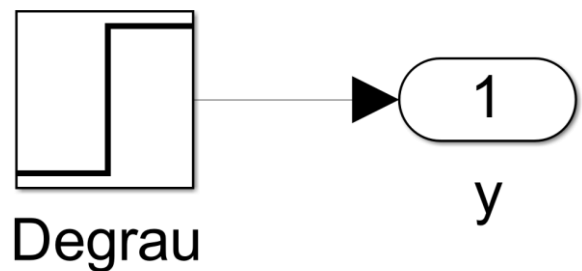
Zona morta: impõe efeito de zona morta no sinal de entrada de forma que a saída sai do zero apenas quando a entrada ultrapassa um limite de zona morta.



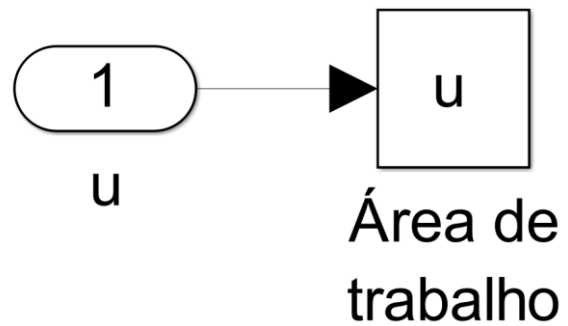
Quadrado: eleva um sinal ao quadrado ponto a ponto.



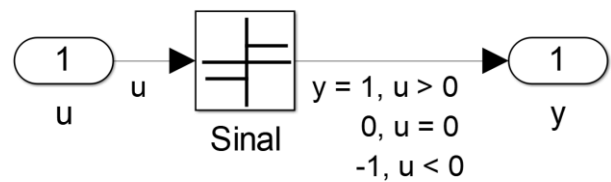
Degrau: produz um sinal que passa de um valor inicial a um valor final instantaneamente a partir de um instante de tempo limite do degrau.



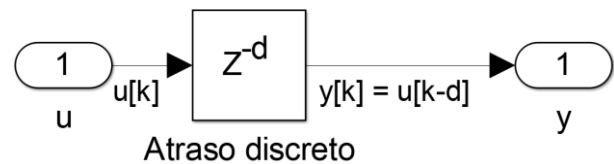
Área de trabalho: salva um sinal na área de trabalho do Matlab para que possa ser usado mais tarde, por exemplo, para executar outras operações ou plotar via script Matlab.



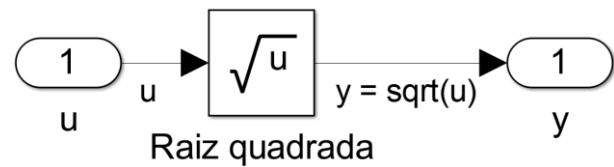
Sinal: obtém o sinal matemático de um sinal ponto a ponto. Retorna 1 se positivo, -1 se negativo e 0 se zero.



Atraso discreto: obtém o sinal atrasado em um número inteiro de amostras.



Raiz quadrada: extrai raiz quadrada de um sinal ponto a ponto.



Divisor: divide um sinal por outro ponto a ponto.

