Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação – SEL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Daniel Motter

Modelagem Computacional de Funções de Proteção Baseadas em Medidas de Frequência para Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída

São Carlos
2014

Daniel Motter

Modelagem Computacional de Funções de Proteção Baseadas em Medidas de Frequência para Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências pelo Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury.

São Carlos

2014

Trata-se da versão original.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Motter, Daniel

M922m Modelagem Computacional de Funções de Proteção Baseadas em Medidas de Frequência para Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída / Daniel Motter; orientador Denis Vinicius Coury. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Geração distribuída. 2. Proteção anti-ilhamento. 3. Estimação de frequência. 4. Proteção de sub/sobre frequência. 5. Proteção de taxa de variação de frequência. 6. Proteção de deslocamento de fase. 7. Simulação em tempo real. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DANIEL MOTTER.**

Título da dissertação: "Modelagem computacional de funções de proteção baseadas em medidas de freqüência para detecção de ilhamento de geração distribuída".

Data da defesa: 28/01/2014

Comissão Julgadora: **Resultado:**

Prof. Dr. **José Carlos de Melo Vieira Júnior (Orientador substituto)** APROVADO
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Giovanni Manassero Junior** APROVADO
(Escola Politécnica/USP)

Dr. **Rodrigo Hartstein Salim** Aprovado
(Global Research/GE)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Dedicatória

Para minha família, por
todo apoio nos últimos anos.

Agradecimento

Agradeço acima de tudo a Deus por me ajudar na conclusão do mestrado;

Agradeço ao meu pai Elias, minha mãe Delma, meus irmãos Kelli e Mateus, e ao padrasto José Dantas Neto, por me apoiarem a fazer o mestrado;

À minha namorada e melhor amiga Vivian J. Fellizzetti, por todo apoio, dedicação, carinho e paciência durante os últimos anos;

Aos colegas de laboratório, de pós-graduação, e aos grandes amigos que fiz em São Carlos, em especial ao Alexandre V. Festa, Daniel A. P. Ferreira, Danilo L. A. Negrão, Fernando B. Bottura, Juliana Aramizu, Luciano C. M. de Andrade, Marcelo A. A. Lima, Ricardo A. S. Fernandes, Ricardo de O. C. Scarcelli, Rodrigo P. Bataglioli, Vinicius C. Moro e Yuri A. O. Assagra, por toda a amizade, momentos de descontração e pelos cafezinhos do laboratório; e a todos os amigos e colegas da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, principalmente ao Basilio R. Protzek, Dabit G. Sonoda e Felipe A. Dias;

Aos colegas e amigos Juliano C. Miranda, Lazaro E. da Silva e Renato M. Monaro, pelo auxílio com os equipamentos do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica;

Ao Prof. Dr. Samuel da Silva pro me incentivar a fazer o mestrado e por me apresentar a área de pesquisa; Ao Prof. Dr. Ulisses C. Netto, pela amizade, conselhos, auxílios laboratoriais e comentários e correções no exame de qualificação de mestrado; e ao Prof. Dr. Mário Oleskovicz, pelos comentários e correções no exame de qualificação de mestrado e em trabalhos paralelos desenvolvidos na Universidade de São Paulo;

Ao colaborador e co-orientador dessa dissertação, Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior, por idealizar, orientar e corrigir este trabalho desde o início, sempre com dedicação, paciência, excelência e valiosas contribuições técnicas. Agradeço também por toda acessibilidade em relação a dúvidas e conversas, pelos conselhos e por toda amizade;

Ao meu orientador, Prof. Tit. Denis Vinicius Coury, pela orientação, acessibilidade, oportunidades oferecidas e por me receber de braços abertos como seu orientado de mestrado;

Agradeço a todos os meus professores da Universidade Estadual do Oeste do Paraná e da Universidade de São Paulo, por toda a contribuição na minha formação profissional e pessoal, que de forma indireta contribuiu para a conclusão dessa pesquisa;

À comissão julgadora da defesa de mestrado, composta pelo Prof. Dr. Giovanni Manassero Junior e Dr. Rodrigo Hartstein Salim, pelos valiosos comentários e correções.

Ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, ao Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, à Escola de Engenharia de São Carlos e à Universidade de São Paulo, por toda a infraestrutura a mim disponibilizada;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação e da Escola de Engenharia de São Carlos, por toda a disponibilidade e pronto atendimento;

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

"...Yes, there are two paths you can go by, but in the long run
There's still time to change the road you're on..."

Stairway to Heaven, Led Zeppelin.

Resumo

MOTTER, D. **Modelagem Computacional de Funções de Proteção Baseadas em Medidas de Frequência para Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída**. 2014. 167 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

O ilhamento em sistemas elétricos contendo geração distribuída ocorre quando parte da rede elétrica torna-se eletricamente isolada da concessionária e o subsistema isolado continua a ser energizado por geradores distribuídos. É importante detectar essa condição, que pode, por exemplo, levar a problemas como alteração da qualidade da energia elétrica e religamento automático fora de sincronismo, causando danos irreversíveis aos equipamentos da rede elétrica. Uma forma de detecção do ilhamento é o uso de funções de proteção de frequência e suas variações, tais como a função de taxa de variação de frequência e a função de deslocamento de fase (ou salto de vetor). Neste contexto, é importante que se tenham modelos computacionais e analíticos confiáveis dessas funções de proteção para que sejam executadas simulações, permitindo validar ajustes e verificar condições anormais de operação. O objetivo desta dissertação é desenvolver e validar modelos computacionais e analíticos das funções de proteção de sub/sobre frequência, taxa de variação de frequência e deslocamento de fase, empregados na detecção de ilhamento de geradores distribuídos. Os modelos computacionais são desenvolvidos em uma plataforma que permite realizar simulações dinâmicas em tempo real. A validação dos modelos é efetuada utilizando funções de proteção existentes em relés comerciais. A avaliação de desempenho dos modelos em relação à proteção anti-ilhamento é realizada utilizando o conceito das curvas de desempenho, as quais foram obtidas a partir de simulações computacionais em tempo real e em malha fechada pelo uso de um simulador digital em tempo real. Os resultados permitem comprovar a efetividade dos modelos para representar as funções de proteção dos relés comerciais ensaiados, com erros abaixo de 3% para uma ampla faixa de pontos de operação do sistema elétrico e do gerador distribuído.

Palavras-chave: Geração distribuída, Proteção anti-ilhamento, Estimação de frequência, Proteção de sub/sobre frequência, Proteção de taxa de variação de frequência, Proteção de deslocamento de fase, Simulação em tempo real.

Abstract

MOTTER, D. **Computational Modeling of Frequency-Based Protection Functions for Distributed Generation Islanding Detection**. 2014. 167 p. Dissertation (Master Degree) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2014.

Islanding in power distribution systems with distributed generators occurs when part of the electrical network becomes isolated from the electrical company and the isolated area is still energized by distributed generation. It is important to detect this condition which can lead to problems such as low power quality levels and out of step reclosing, causing severe equipment damages. One of the island detection methods is the use of frequency protection functions and their variations, such as the rate of change of frequency relay and phase shift relay (or vector surge relay). In this context, it is important to obtain reliable relay computational and analytical models to execute simulations that allow verifying and validating settings, and investigating abnormal operation conditions. This dissertation aims to develop and validate computational and analytical models of under and over frequency, rate of change of frequency and phase shift protection functions applied to distributed generation islanding detection. The computational model development is performed on a real time dynamic simulation platform. The model validations are performed using protection functions of commercial relays. The models performance evaluation and validation were carried out by using the performance curves, which are obtained through real time closed loop simulations using a real time digital simulator. The results prove the model effectiveness to represent commercial protection functions, with errors below 3% for a wide range of distribution system and distributed generator operating conditions.

Keywords: Distributed generation, Anti-islanding protection, Frequency estimation, Under/over frequency relay, Rate of change of frequency relay, Vector surge relay, Real time simulation.

Lista de Figuras

Figura 1 – Ensaio de equipamentos em malha aberta e fechada. 33
Figura 2 – Sistema hipotético 1. 36
Figura 3 – Diagrama esquemático dos métodos de detecção de ilhamento. 38
Figura 4 – Sistema hipotético 2. 43
Figura 5 – Curva de desempenho da função de SSF com ajuste de ±1,5 Hz. 45
Figura 6 – Simulação em malha fechada com o RTDS®. 49
Figura 7 – Componentes do RSCAD no RTDS®. 50
Figura 8 – Diagrama unifilar do sistema elétrico em estudo. 50
Figura 9 – Diagrama trifilar do sistema elétrico em estudo (ambiente *Draft* do RSCAD). 52
Figura 10 – Sistema de controle usado para modelar as cargas (ambiente *Draft*). 54
Figura 11 – Modelo completo de um relé digital de proteção. 55
Figura 12 – Diagrama do MSSW. 56
Figura 13 – Modelagem do bloqueio de mínima tensão. 56
Figura 14 – Diagrama do MSSW no RSCAD. 57
Figura 15 – Modelagem do bloqueio de tensão no RSCAD. 57
Figura 16 – Princípio de medição de frequência por cruzamentos consecutivos por zero. 58
Figura 17 – Diagrama simplificado de estimação da frequência para o MSSF. 59
Figura 18 – Modelo da estimação de frequência do MSSF no RSCAD. 59
Figura 19 – Diagrama do MSSF no RSCAD. 60
Figura 20 – Diagrama do MTVW. 60
Figura 21 – Diagrama do MTVW no RSCAD. 61
Figura 22 – Diagrama do MTVF. 61
Figura 23 – Diagrama do MTVF no RSCAD. 61
Figura 24 – Diferença angular resultante de um ilhamento. 62
Figura 25 – Princípio do MDFA1. 63
Figura 26 – Diagrama do MDFA1. 64
Figura 27 – Estimação da diferença angular no RSCAD. 64
Figura 28 – Diagrama do MDFA1 no RSCAD. 64
Figura 29 – Princípio de medição ângulo para o MDFA2. 65
Figura 30 – Diagrama do MDFA2. 65

Figura 31 – Variação do desbalanceamento de potência ativa. 76
Figura 32 – Fluxograma da rotina de simulações do RTDS®. 78
Figura 33 – Procedimento do ensaio em malha fechada do relé comercial 1. 82
Figura 34 – Comparação dos casos operativos para cargas impedância e corrente constante. 86
Figura 35 – Comparação dos casos operativos para cargas potência constante. 87
Figura 36 – Repetição do COM1: função de SSF. 89
Figura 37 – Repetição do COM1: função de TVF. Situação de DPDQ com cargas P_{cte}. 90
Figura 38 – Repetição do COM1: função de DFA. 91
Figura 39 – Repetição do COM2: função de SSF. 92
Figura 40 – Repetição do COM2: função de TVF. 93
Figura 41 – Repetição dos modelos MSSW e MSSF. 94
Figura 42 – Uma das dez curvas de repetição do MSSF, com ajuste de ±0,5 Hz. 95
Figura 43 – Ampliação no ponto de variação abrupta da curva. 95
Figura 44 – Oscilografia do MSSF para os quatro pontos em estudo. 96
Figura 45 – Comparação do MSSW e MSSF para o ajuste de ±0,5 Hz. 97
Figura 46 – Oscilografia do MSSW para os quatro pontos em estudo. 98
Figura 47 – Repetição do modelo MTVW: 5 ajustes. 98
Figura 48 – Repetição do modelo MTVF: 2 ajustes. 99
Figura 49 – Repetição do MDFA1. 100
Figura 50 – Comparação do MSSW com o COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ. 102
Figura 51 – Comparação do MSSW com o COM1 e COM2: I_{cte}, EPDQ. 103
Figura 52 – Comparação do MSSW com o COM1 e COM2: Z_{cte}, EPEQ. 104
Figura 53 – Comparação do MSSF com o COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ. 105
Figura 54 – Comparação do MSSF com o COM1 e COM2: Z_{cte}, DPDQ. 106
Figura 55 – Comparação do MSSF com o COM1 e COM2: I_{cte}, DPEQ. 107
Figura 56 – Comparação da EQSSF com o COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ. 108
Figura 57 – Comparação da EQSSF com o COM1 e COM2: Z_{cte}, EPDQ. 109
Figura 58 – Comparação da EQSSF com o COM1 e COM2: I_{cte}, EPEQ. 110
Figura 59 – Comparação do MTVW com o COM1: P_{cte}, DPDQ. 112
Figura 60 – Comparação do MTVW com o COM2: P_{cte}, DPDQ. 112
Figura 61 – Comparação do MTVW com o COM1: I_{cte}, DPDQ. 113
Figura 62 – Comparação do MTVW com o COM2: I_{cte}, DPDQ. 114
Figura 63 – Comparação do MTVW com o COM1: Z_{cte}, DPEQ. 114
Figura 64 – Comparação do MTVW com o COM2: Z_{cte}, DPEQ. 115

Figura 65 – Comparação do MTVF com o COM1: P_{cte}, DPDQ. 115
Figura 66 – Comparação do MTVF com o COM2: P_{cte}, DPDQ. 116
Figura 67 – Comparação do MTVF com o COM1: I_{cte}, DPDQ. 117
Figura 68 – Comparação do MTVF com o COM2: I_{cte}, DPDQ. 117
Figura 69 – Comparação do MTVF com o COM1: Z_{cte}, DPEQ. 118
Figura 70 – Comparação do MTVF com o COM2: Z_{cte}, DPEQ. 118
Figura 71 – Comparação da EQTVF com o COM1: P_{cte}, DPDQ. 119
Figura 72 – Comparação da EQTVF com o COM2: P_{cte}, DPDQ. 120
Figura 73 – Comparação da EQTVF com o COM1: I_{cte}, DPDQ. 121
Figura 74 – Comparação da EQTVF com o COM2: I_{cte}, DPDQ. 122
Figura 75 – Comparação da EQTVF com o COM1: Z_{cte}, DPEQ. 123
Figura 76 – Comparação da EQTVF com o COM2: Z_{cte}, DPEQ. 123
Figura 77 – Comparação do MDFA1 com o COM1: P_{cte}, DPDQ. 124
Figura 78 – Comparação do MDFA1 com o COM1: outros casos. 125
Figura 79 – Comparação do MDFA2 com o COM1: P_{cte}, DPDQ. 126
Figura 80 – Comparação do MDFA2 com o COM1: outros casos. 127
Figura 81 – Comparação da EQDFA com o COM1: P_{cte}, DPDQ. 128
Figura 82 – Comparação da EQDFA com o COM1: outros casos. 130
Figura 83 – Comparação da EQDFA com o COM1 para variação do *c*. 131
Figura 84 – Comparação do DFA do COM1 com a SSF de COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ... 139
Figura 85 – Comparação do DFA do COM1 com a SSF de COM1 e COM2: Cargas Z_{cte}.... 141
Figura 86 – Comparação do DFA do COM1 com a SSF de COM1 e COM2: Cargas I_{cte}..... 143
Figura 87 – Sistema elétrico modelado. 153
Figura 88 – Diagrama de controle do sistema de excitação IEEE do tipo DC1A. 155
Figura 89 – Componentes do *Draft* – Sistema completo com medição nas barras. 157
Figura 90 – Componentes do *Draft*: Blocos de controle e filtro da tensão. 158
Figura 91 – Controle do ilhamento e medição do tempo de atuação da proteção. 158
Figura 92 – Código do bloco tempo de atuação (feito no *CBuilder*). 159
Figura 93 – Componentes do *Draft*: Estimadores de f, df/dt e $\Delta\theta$. 160
Figura 94 – Componentes do *Draft*: Modelos MSSF, MSSW, MTVF e MSSW. 161
Figura 95 – Componentes do *Draft*: Modelo DFA. 161
Figura 96 – Componentes do *Draft*: Blocos de saída analógica e entradas digitais. 162
Figura 97 – Ajuste do ganho do bloco de saída analógica do *Draft* do RSCAD. 162
Figura 98 – Componente do *Draft*: Configuração do bloco de saídas analógicas. 163

Figura 99 – Componentes do *RunTime*: Controles. 164
Figura 100 – Componentes do *RunTime*: Medidas de potência..... 164
Figura 101 – Componentes do *RunTime*: Medição dos tempos de atuação..... 164
Figura 102 – *Script* para coleta de dados: Caso DPDQ com cargas Z_{cte}..... 167

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Definição dos tipos de cargas elétricas. 54
Tabela 2 – Valor da constante k para cada tipo de carga, cenário e equação. 72
Tabela 3 – Casos a serem apresentados. 87
Tabela 4 – Comparação de ε do MSSW com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ. 103
Tabela 5 – Comparação de ε do MSSW com COM1 e COM2: I_{cte}, EPDQ. 104
Tabela 6 – Comparação de ε do MSSW com COM1 e COM2: Z_{cte}, EPEQ. 105
Tabela 7 – Comparação de ε do MSSF com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ. 106
Tabela 8 – Comparação de ε do MSSF com COM1 e COM2: Z_{cte}, DPDQ. 106
Tabela 9 – Comparação de ε do MSSF com COM1 e COM2: I_{cte}, DPEQ. 107
Tabela 10 – Comparação de ε da EQSSF com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ. 108
Tabela 11 – Comparação de ε da EQSSF com COM1 e COM2: Z_{cte}, EPDQ. 110
Tabela 12 – Comparação de ε da EQSSF com COM1 e COM2: I_{cte}, EPEQ. 111
Tabela 13 – Comparação de ε do MTVW com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ. 113
Tabela 14 – Comparação de ε do MTVW com COM1 e COM2: I_{cte}, DPDQ. 114
Tabela 15 – Comparação de ε do MTVF com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ. 116
Tabela 16 – Comparação de ε do MTVF com COM1 e COM2: I_{cte}, DPDQ. 117
Tabela 17 – Comparação de ε da EQTVF com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ. 120
Tabela 18 – Comparação de ε da EQTVF com COM1 e COM2: I_{cte}, DPDQ. 122
Tabela 19 – Comparação de ε do MDFA1 com o COM1: P_{cte}, DPDQ. 125
Tabela 20 – Comparação da ε do MDFA1 com o COM1: outros casos. 126
Tabela 21 – Comparação de ε do MDFA2 com o COM1: P_{cte}, DPDQ. 127
Tabela 22 – Comparação de ε do MDFA2 com o COM1: outros casos. 127
Tabela 23 – Comparação de ε da EQDFA com o COM1: P_{cte}, DPDQ. 129
Tabela 24 – Comparação de ε da EQDFA com o COM1: outros casos. 130
Tabela 25 – Resumo dos resultados comparativos entre modelos e COM1. 132
Tabela 26 – Resumo dos resultados comparativos entre modelos e COM2. 132
Tabela 27 – Relação entre ajuste de SSF e DFA. 139
Tabela 28 – Comparação de ε entre funções de SSF e DFA: P_{cte}, DPDQ. 140
Tabela 29 – Comparação de ε entre funções de SSF e DFA: Cargas Z_{cte}. 142
Tabela 30 – Comparação de ε entre funções de SSF e DFA: Cargas I_{cte}. 144

Tabela 31 – Dados do sistema equivalente da concessionária. 153
Tabela 32 – Dados das linhas. 153
Tabela 33 – Dados dos transformadores. 154
Tabela 34 – Dados do gerador síncrono. 154
Tabela 35 – Parâmetros do sistema de excitação do gerador síncrono. 155

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
COM1	Relé Comercial 1
COM2	Relé Comercial 2
COMTRADE	*Common Format for Transient Data Exchange*
DFA	Deslocamento de Fase
DPDQ	Déficit de Potência Ativa e Reativa
DPEQ	Déficit de Potência Ativa e Excesso de Potência Reativa
EPDQ	Excesso de Potência Ativa e Déficit de Potência Reativa
EPEQ	Excesso de Potência Ativa e Reativa
EQDFA	Equação Analítica do Relé de Deslocamento de Fase
EQSSF	Equação Analítica do Relé de Sub/Sobre Frequência
EQTVF	Equação Analítica do Relé de Taxa de Variação de Frequência
GD	Gerador Distribuído
GOOSE	*Generic Object Oriented Substation Event*
I_{cte}	Corrente Constante
MOD	Modelo
MDFA1	Modelo de Deslocamento de Fase Baseado no Cruzamento por Zero
MDFA2	Modelo de Deslocamento de Fase desenvolvido no Simulink®
MSSF	Modelo de Sub/Sobre Frequência Baseado no Sinal de Tensão
MSSW	Modelo de Sub/Sobre Velocidade Angular
MTVF	Modelo de Taxa de Variação de Frequência Baseado no Sinal de Tensão
MTVW	Modelo de Taxa de Variação da Velocidade Angular
P_{cte}	Potência Constante
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
RTDS®	*Real Time Digital Simulator*
SSF	Sub/Sobre Frequência
SUB	Subestação
TVF	Taxa de Variação de Frequência
Z_{cte}	Impedância Constante

Lista de Símbolos

β	Ajustes de proteção
c	Número de ciclos anteriores usados na comparação do deslocamento de fase
δ_i	Ângulo inicial
δ_f	Ângulo final
ΔP_{crit}	Desbalanço crítico de potência ativa
$\Delta P_{crit,MOD}$	Desbalanço crítico de potência ativa do modelo
$\Delta P_{crit,COM}$	Desbalanço crítico de potência ativa do relé comercial
$\Delta\omega$	Variação da frequência angular
Δf	Variação da frequência elétrica
ΔP	Desbalanço de potência ativa
Δt	Tempo mínimo de atraso do cálculo da taxa de variação de frequência
$\Delta\delta$	Variação do deslocamento angular
ΔP_0	Desbalanço de potência ativa imediatamente antes da ocorrência do ilhamento
ΔP_F	Desbalanço de potência ativa resultante da correção
ε	Diferença entre os desbalanços críticos de potência ativa
f_0	Frequência elétrica nominal
H	Constante de inércia do gerador
J	Momento de inércia
k	Constante de correção
n_p	Expoente que indica a natureza do consumo de potência ativa
n_{pi}	Expoente que indica a natureza do consumo de potência ativa do nó *i*
n_q	Expoente que indica a natureza do consumo de potência reativa
n_{bar}	Número de barras do sistema elétrico
NP_t	Índice de tipo de carga equivalente
P_0	Potência ativa nominal da carga
P_E	Potência ativa demandada pelas cargas
P_{fac}	Fator de correção do desbalanço de potência ativa
P_i	Potência ativa da carga conectada ao nó *i*
P_M	Potência mecânica fornecida pelo gerador
P_T	Potência ativa total das cargas do sistema elétrico

Q_0	Potência reativa nominal da carga
t_{crit}	Tempo crítico de detecção
t_d	Tempo de detecção do ilhamento
T_0	Período do sinal na frequência nominal
T_a	Constante de tempo da função de transferência de primeira ordem da proteção de taxa de variação de frequência
T_{acel}	Torque acelerante
T_e	Torque elétrico exigido pelas cargas do sistema
T_m	Torque mecânico no eixo do gerador
T_{set}	Temporização dos relés de proteção
V_{min}	Valor mínimo de tensão para o bloqueio das proteções
ω	Velocidade angular do eixo do gerador síncrono distribuído
ω_0	Velocidade angular síncrona

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO **29**

1.1 Justificativa **31**

1.2 Objetivos **33**

1.3 Estrutura da dissertação **34**

CAPÍTULO 2 - PROTEÇÃO ANTI-ILHAMENTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA **35**

2.1 Modos de operação de centrais de geração distribuída **36**

2.2 Métodos de detecção de ilhamento **37**

2.3 Relés de proteção **40**

2.3.1 Função de sub/sobre frequência (SSF) *40*

2.3.2 Função de taxa de variação de frequência (TVF) *41*

2.3.3 Função de deslocamento de fase (DFA) *41*

2.4 Curvas de desempenho **42**

2.4.1 Relação entre frequência e potência ativa *43*

2.4.2 Características das curvas de desempenho *44*

CAPÍTULO 3 - MODELAGEM COMPUTACIONAL E ANALÍTICA **47**

3.1 Simulação em Tempo Real e RSCAD **47**

3.2 Modelagem do sistema elétrico **50**

3.3 Modelagem computacional das funções de proteção **54**

3.3.1 Modelo computacional de SSF baseado na velocidade angular *55*

3.3.2 Modelo computacional de SSF baseado no sinal de tensão *58*

3.3.3 Modelo computacional de TVF baseado na velocidade angular *60*

3.3.4 Modelo computacional de TVF baseado no sinal de tensão *61*

3.3.5 Modelo computacional de DFA baseado no cruzamento por zero *62*

3.3.6 Modelo computacional de DFA no Simulink *65*

3.4 Modelagem analítica considerando cargas potência constante 66

3.4.1 Equação analítica de SSF *66*

3.4.2 Equação analítica de TVF *67*

3.4.3 Equação analítica de DFA *69*

3.5 Equações empíricas para cargas dependentes da tensão 71

CAPÍTULO 4 - OBTENÇÃO DAS CURVAS DE DESEMPENHO..... 75

4.1 Método de obtenção das curvas de desempenho no RTDS® 75

4.2 Equipamentos usados para a simulação em malha fechada 79

4.2.1 Relés comerciais ensaiados *79*

4.2.2 Simulação em malha fechada *81*

CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÕES E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS..... 85

5.1 Casos estudados..... 85

5.2 Repetitividade das curvas e análise preliminar dos resultados 88

5.2.1 Resultados do COM1-SSF *88*

5.2.2 Resultados do COM1-TVF *89*

5.2.3 Resultados do COM1-DFA *90*

5.2.4 Resultados do COM2-SSF *91*

5.2.5 Resultados do COM2-TVF *92*

5.2.6 Resultados do COM2-DFA *93*

5.2.7 Resultados do MSSW e MSSF *94*

5.2.8 Resultados do MTVW e MTVF *98*

5.2.9 Resultados do MDFA1 ..... *99*

5.2.10 Conclusões parciais *100*

5.3 Resultados comparativos da proteção de sub/sobre frequência.....101

5.3.1 Comparações do MSSW com os relés comerciais.....101

5.3.2 Comparações do MSSF com os relés comerciais.....105

5.3.3 Comparações da EQSSF com os relés comerciais.....107

5.4 Resultados comparativos da proteção de taxa de variação de frequência.....111

5.4.1 Comparações do MTVW com os relés comerciais.....111

5.4.2 Comparações do MTVF com os relés comerciais.....115

5.4.3 Comparações da EQTVF com os relés comerciais.....119

5.5 Resultados comparativos da proteção de deslocamento de fase 123

5.5.1 Comparações do MDFA1 (cruzamento por zero) com os relés comerciais.....124

5.5.2 Comparações do MDFA2 (Simulink®) com os relés comerciais.....126

5.5.3 Comparações da EQDFA com os relés comerciais 128

5.6 Conclusões sobre os resultados comparativos 131

5.7 Comparação das curvas de desempenho de SSF e DFA 136

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES 145

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 149

APÊNDICE A - DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO.....153

APÊNDICE B - MODELAGEM NO RSCAD 157

Capítulo 1

Introdução

A inserção de geração distribuída no sistema elétrico traz benefícios ao sistema, se for aplicada de forma tecnicamente correta, podendo promover a diversificação da matriz energética, diminuição das perdas elétricas em linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica, e permitir adiar investimentos relacionados à construção de grandes centrais geradoras ou novas linhas de transmissão. Entretanto, a geração distribuída eleva a complexidade do sistema de energia elétrica, originando preocupações inexistentes em sistemas de distribuição no passado, sendo uma delas a operação em ilhamento. O ilhamento ocorre quando parte da rede elétrica torna-se eletricamente isolada da concessionária e o subsistema isolado continua a ser energizado por geradores distribuídos (GDs) conectados no interior da ilha. É importante detectar essa condição operativa, que pode implicar diversos problemas, como por exemplo, os apresentados a seguir [1] [2] [3].

- **Comprometimento da segurança das equipes de operação e manutenção do sistema**: na ocorrência de um evento de ilhamento, uma parcela do sistema fica energizada, levando a potenciais riscos para as equipes de manutenção da concessionária que não tenham conhecimento sobre a energização.
- **Comprometimento da segurança da população**: ocorrendo uma situação de falta de alta impedância, a concessionária poderia detectá-la e interromper o fornecimento, na tentativa de eliminar a falta. Porém, caso um gerador distribuído não seja desconectado, a falta seria mantida, comprometendo a segurança de pessoas que estão no local.
- **Baixa qualidade da energia elétrica**: quando ocorre o ilhamento, a magnitude e frequência da tensão da ilha serão controladas pelos GDs existentes, podendo degradar a qualidade da energia elétrica, caso os geradores não atendam aos limites mínimos.
- **Problemas na atuação e coordenação da proteção devido à redução dos níveis de curto-circuito**: os cálculos dos ajustes das proteções de sobrecorrente consideram os casos de maior e menor amplitude de corrente de curto-circuito causado por faltas no

sistema. Quando uma ilha é formada, normalmente os valores das correntes de curto-circuito diminuem, já que a concessionária deixa de contribuir em situações de falta. Dessa forma, o efeito dessa variação de magnitude nas correntes de curto-circuito pode levar a atuação lenta ou mesmo não atuação do sistema de proteção de sobrecorrente. Essa redução das correntes pode provocar a descoordenação dos dispositivos de proteção contra curto-circuito que se encontram dentro da ilha.

- **Aterramento inadequado**: ocorrendo o ilhamento, a conexão entre a ilha e a concessionária é desfeita, o que pode deixar a ilha não aterrada. O sistema ilhado ficará com aterramento inadequado a depender do tipo de conexão do transformador de acoplamento [4], sendo que em certos casos o GD energiza a ilha fazendo com que ela perca a referência de terra. Com aterramento inadequado, as magnitudes de corrente de curto-circuito entre fase e terra podem apresentar valores pequenos e não detectáveis pela proteção de sobrecorrente.
- **Religamento automático fora de sincronismo**: para a realização do sincronismo entre sistemas elétricos, as tensões de ambos devem estar com a magnitude, frequência e fase próximas entre si, para que então possam ser conectados. Quando ocorre o religamento automático entre a concessionária e o sistema ilhado (no ponto em que houve a desconexão causando o ilhamento), é possível que os requisitos de sincronismo não tenham sido cumpridos, levando a transitórios elevados no sistema elétrico.
- **Dificuldade na restauração do fornecimento de energia**: ilhas no sistema elétrico podem dificultar a restauração manual ou automática do sistema, já que os operadores terão que levar em conta o sincronismo entre o sistema e a ilha energizada.

Em decorrência de tais problemas, as normas técnicas internacionais e nacionais das concessionárias de distribuição de energia elétrica recomendam que os geradores distribuídos sejam rapidamente desconectados do sistema elétrico quando ocorre o evento de ilhamento [5] [6] [7]. Dessa maneira, o ilhamento deve ser detectado, para que então haja a desconexão do gerador distribuído, como sugerem as normas vigentes.

Uma forma de detecção do ilhamento é o emprego de funções de proteção de sub/sobre frequência (81 U/O) e suas variações, tais como a função de taxa de variação de frequência (81 dfdt) e a função de deslocamento de fase (78, ou ainda chamada de salto de vetor ou perda de sincronismo). Estas funções de proteção atuam para variações de frequência causadas pelo desbalanço de potência ativa que surge logo após a ocorrência do ilhamento [8]. Entretanto, é possível que na ocorrência do ilhamento um GD esteja fornecendo grande parte

da potência ativa das cargas da ilha, e assim o desbalanço de potência é pequeno, levando a desvios de frequência que não violem os ajustes das funções de proteção. Consequentemente, funções de frequência precisam de uma análise criteriosa de ajustes, de forma a minimizar as possíveis zonas de não detecção do ilhamento.

Para analisar a faixa adequada de operação das funções de proteção de frequência, pode ser empregado o método de curvas de desempenho, que relaciona o tempo de detecção com o desbalanço de potência ativa ocorrido no momento do ilhamento [1]. Portanto, áreas seguras e não seguras podem ser definidas nessas curvas, permitindo ajustar as funções de proteção de forma mais criteriosa. As curvas de desempenho também podem ser usadas para comparar a resposta de modelos computacionais ou analíticos de funções de proteção com relés comerciais aplicados na proteção anti-ilhamento, uma vez que apresentam várias condições operativas em uma mesma curva [1].

1.1 Justificativa

As simulações computacionais são extremamente importantes para a análise de sistemas elétricos de potência, pois possibilitam causar eventos que não seriam possíveis de serem aplicados propositalmente em sistemas reais, de forma a obter, por exemplo, valores de magnitude de tensão e corrente de curto-circuito.

As simulações contribuem para a análise de sistemas de potência, pois raramente um evento simulado ocorrerá exatamente no ponto em estudo do sistema elétrico real, e isso pode ser facilmente obtido com a modelagem apropriada da rede. Toma-se como exemplo a ferramenta computacional de análise de redes elétricas (ANAREDE) [9] desenvolvida pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), que possibilita realizar estudos de fluxo de potência e contingências em todo o sistema interligado brasileiro, sendo essencial para estudo do planejamento da operação e expansão do sistema elétrico brasileiro.

Como simulações computacionais são usadas extensivamente na área de sistemas elétricos de potência, é importante que os componentes do sistema elétrico apresentem modelos representativos, pois quanto melhor o modelo, mais coerentes e próximos da realidade são os resultados. Modelos analíticos e computacionais representam equipamentos e processos reais em ambientes computacionais, permitindo a realização de simulações.

Em relação à proteção anti-ilhamento, em [1] são propostos modelos computacionais simplificados das funções de proteção de sub/sobre frequência (SSF), taxa de variação de frequência (TVF) e deslocamento de fase (DFA), sendo o modelo de SSF e TVF derivados da

medida de frequência proveniente da velocidade do gerador síncrono. A modelagem computacional dessas funções de proteção foi desenvolvida no SimPowerSystems do ambiente Simulink® da ferramenta computacional MATLAB®, bem como a modelagem analítica por *scripts* no MATLAB®. O método das curvas de desempenho foi aplicado aos modelos, o que possibilitou realizar análises que verificaram os melhores ajustes de proteção, para quando estas estão atuando para detectar o ilhamento [1]. Entretanto, não foram comparados, nesse trabalho, os resultados dos modelos com um relé de proteção comercial. Além disso, os modelos de SSF e TVF propostos em [1] usam a frequência proveniente da velocidade do gerador síncrono, restringindo os modelos para aplicações em máquinas síncronas, como também a uma só máquina, já que não foi realizado um estudo para obter a velocidade equivalente de vários geradores síncronos.

Em [10], foi desenvolvida a validação do modelo computacional de SSF (proposto em [1]) com dois relés comerciais. A partir do sistema elétrico modelado no Simulink® [1] [10], os sinais de tensão trifásicos de uma barra específica foram convertidos para o formato de arquivo *Common Format for Transient Data Exchange* (COMTRADE), para que fosse possível injetar os sinais em uma caixa de testes de relés. A partir da caixa de testes, os relés comerciais puderam ser testados, e o tempo de atuação foi comparado com o resultado do modelo computacional do Simulink® [10]. Entretanto, os modelos das funções TVF e DFA não foram comparados. O processo de ensaio do equipamento comercial desenvolvido em [10] é chamado de ensaio em malha aberta, como apresentado na Figura 1. No caso discutido, é preciso simular o sistema, converter o formato do arquivo de dados, injetar os sinais e coletar os tempos de atuação do relé comercial.

A simulação em malha fechada automatiza o processo de coleta de dados em relação ao proposto em [10], pois a cada passo de integração, os sinais de tensão do sistema são amplificados e enviados ao relé comercial por meio de portas analógicas de saída, e a resposta da atuação do relé é recebida por uma porta de entrada digital, permitindo realizar todas as etapas de forma contínua. Na Figura 1 é explicado o processo de malha aberta e fechada.

Como apresentado na Figura 1, a resposta de atuação do relé, quando a simulação é em malha fechada, pode ser usada no ambiente computacional, podendo causar a abertura de um disjuntor ou testar lógicas de sistemas de proteção, por exemplo. Isso não pode ser feito em malha aberta, pois a resposta do relé não é enviada para o ambiente computacional. Neste contexto, justifica-se o uso da simulação em malha fechada nesse trabalho, pois a resposta dos relés comerciais ensaiados é usada no ambiente computacional para medir o tempo de atuação das proteções comerciais, melhorando, assim, o processo de coleta de dados.

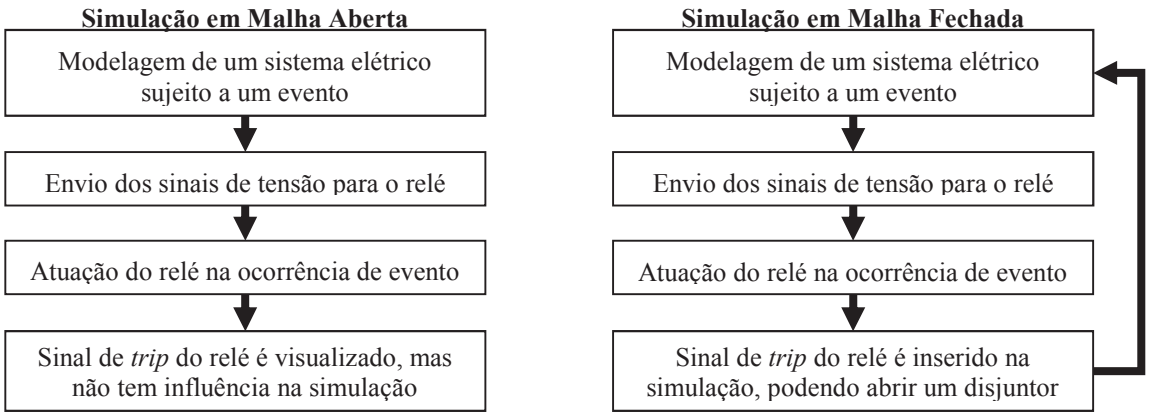


Figura 1 – Ensaio de equipamentos em malha aberta e fechada.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver novos modelos das funções de proteção de SSF, TVF e DFA, como também comparar os modelos em [1] com as respectivas funções de proteção de dois relés comerciais de fabricantes distintos. As comparações serão feitas com o intuito de usar essas funções de proteção na detecção de ilhamento de geradores distribuídos. Para a comparação e validação, será usado o método das curvas de desempenho apresentado em [1]. Todo o processo de coleta de dados será realizado por simulação em tempo real no simulador *Real Time Digital Simulator* (RTDS®). A coleta de dados experimentais será feita com base em ensaios em malha fechada entre o RTDS® e os relés de proteção comerciais. Os objetivos específicos dessa dissertação são apresentados a seguir:

- Modelar, no ambiente computacional do RTDS®, um sistema elétrico já conhecido na análise de detecção anti-ilhamento e obtenção de curvas de desempenho [1] [10];
- Modelar, no RTDS®, as funções de proteção de SSF e TVF apresentadas em [1];
- Propor novos modelos de SSF e TVF, baseados na estimativa da frequência a partir do sinal de tensão, tornando o modelo aplicável a qualquer tipo de gerador;
- Propor um novo modelo de DFA que seja aplicável no RTDS®;
- Desenvolver uma rotina computacional no RTDS® para obtenção automática das curvas de desempenho dos modelos e dos relés comerciais em estudo;
- Realizar as conexões e testes para ensaiar o relé comercial em malha fechada;
- Comparar as curvas de desempenho dos modelos computacionais e analíticos com os resultados dos relés comerciais, sendo analisados os modelos:
    - computacionais de SSF, TVF e DFA propostos em [1];

  - analíticos de SSF e TVF propostos em [1];
  - analítico de DFA proposto nesta dissertação;
  - computacionais de SSF, TVF e DFA desenvolvidos nesta dissertação e baseados no sinal de tensão.
- Avaliar a proximidade dos modelos com as proteções dos relés comerciais.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação é dividida nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 2 – Proteção Anti-ilhamento da Geração Distribuída**: apresenta conceitos sobre ilhamento de geradores distribuídos, como também formas de detecção desse evento. As funções de proteção de frequência são apresentadas, juntamente com os conceitos das curvas de desempenho usadas para a avaliação e comparação.
- **Capítulo 3 – Modelagem Computacional e Analítica**: descreve o simulador em tempo real, apresentando a modelagem do sistema elétrico e dos modelos computacionais e analíticos das funções de proteção em estudo.
- **Capítulo 4 – Obtenção das Curvas de Desempenho**. apresenta a rotina de simulações empregada para coleta de dados, as conexão dos equipamentos para ensaio experimentais em malha fechada e as características dos relés comerciais.
- **Capítulo 5 – Simulações e Comparação dos Resultados**: inicialmente, cada modelo e relé comercial são analisados de forma individual, verificando a repetitividade das curvas de desempenho. Em seguida, são comparados os modelos com os relés comerciais. Por fim, os resultados experimentais das proteções de SSF e DFA são comparados.
- **Capítulo 6 – Conclusões**: apresenta a conclusão da dissertação.
- **Referências Bibliográficas**: lista as referências utilizadas nessa pesquisa.
- **Apêndice A – Dados do Sistema Elétrico**: são apresentados os dados do sistema elétrico, o modelo do regulador de tensão e os valores atribuídos para os parâmetros.
- **Apêndice B – Modelagem no RSCAD**: apresenta a modelagem realizada no RSCAD, juntamente com o *script* desenvolvido para realizar as simulações de forma automática.

Capítulo 2

Proteção Anti-ilhamento da Geração Distribuída

Segundo o primeiro módulo dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), criado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a geração distribuída é caracterizada como [11]:

> Centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas – ou não – pelo Operador Nacional do Sistema.

A inserção de geração distribuída no sistema elétrico é crescente, o que pode ser explicado pelos benefícios que traz para os consumidores e para o sistema elétrico em geral. Em comparação com sistemas de energia convencionais, a inserção de geração distribuída apresenta vantagens como [12] [13]: possibilidade de redução de custos e perdas de energia elétrica em sistemas de transmissão e distribuição; uso em casos emergenciais de falta de energia, de forma a aumentar a confiabilidade e continuidade da geração para os consumidores; e possibilidade de autoprodutores gerarem energia para seu próprio consumo em horários de pico, de forma a diminuir o valor da própria fatura de energia elétrica.

Na geração distribuída, vários são os possíveis tipos de fontes de energia primária. Em [2], são citadas como fontes primárias as pequenas centrais hidrelétricas, unidades de geração eólicas *onshore* (em terra) e *offshore* (no mar), os painéis fotovoltaicos, energia das ondas do mar, termelétricas com gás proveniente de aterro sanitário e de esgoto municipal, biomassa e energia geotérmica, sendo que todas essas fontes podem ser caracterizadas como renováveis.

A inserção de geração distribuída no sistema pode trazer diversos benefícios, mas várias questões devem ser analisadas de maneira a não levar a prejuízos ao sistema elétrico,

como perda de estabilidade, elevação das perdas no sistema e violação dos limites da magnitude de tensão. Uma dessas questões é a operação em ilha, que deve ser detectada de maneira a evitar problemas para consumidores e para a concessionária responsável [2].

A seguir serão apresentados os modos de operação de sistemas contendo geração distribuída; os métodos de detecção de ilhamento, incluindo o emprego de funções de proteção de sub e sobre frequência (SSF), de taxa de variação de frequência (TVF) e de deslocamento de fase (DFA); e por fim, as curvas de desempenho, usadas na avaliação de funções de proteção quando aplicadas na proteção anti-ilhamento.

2.1 Modos de operação de centrais de geração distribuída

Existem três modos possíveis de operação de centrais de geração distribuída, que são a operação isolada, paralela e ilhada à rede de energia elétrica. A Figura 2 apresenta um sistema hipotético, que será usado para explicar esses três modos de operação.

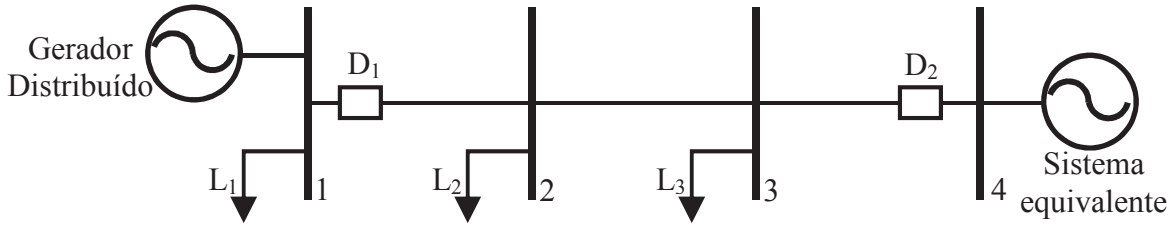


Figura 2 – Sistema hipotético 1.

Na Figura 2, o GD e a carga L_1 estão conectados à barra 1, e esse conjunto GD + L_1 representa um consumidor que pode exportar energia elétrica para a rede de distribuição, caso haja excedente de geração. Em relação ao restante do sistema, L_2 e L_3 são cargas que não têm relação com o GD, e na barra 4 encontra-se um equivalente do sistema elétrico.

A operação do GD de forma isolada ao sistema elétrico se daria quando o disjuntor D_1 estivesse aberto. Nessa situação, o GD unicamente supriria a carga L_1, sem ter relação com o restante do sistema, sendo que o sistema equivalente supriria as cargas L_2 e L_3. Essa configuração pode ser usada como geração de emergência no caso de perda da conexão com a subestação da concessionária [14].

A operação em paralelo com a rede ocorreria se os disjuntores D_1 e D_2 estivessem fechados. Nessa configuração, o GD assumiria duas possíveis condições operativas: exportando o excedente da energia gerada ou importando o que falta para suprir a carga L_1.

Por fim, a operação do GD de forma ilhada à rede ocorreria se o disjuntor D_1 estivesse fechado e D_2 aberto. Nessa condição, o equivalente do sistema (Figura 2) não poderia suprir as cargas L_1, L_2 e L_3, já que D_2 estaria aberto. Como o disjuntor D_1 estaria fechado, o GD energizaria as cargas L_1, L_2 e L_3, formando uma ilha no sistema.

Segundo o módulo 1 do PRODIST [11], o ilhamento é definido como a "operação em que a central geradora supre uma porção eletricamente isolada do sistema de distribuição da acessada (concessionária distribuidora de energia elétrica). O mesmo que operação ilhada". Essa definição está de acordo com a norma internacional IEEE 1547 [5], que define ilhamento como um modo de operação em que uma porção do sistema de distribuição, eletricamente separada do resto do sistema, é energizado por geração distribuída presente no local.

Como citado na introdução, as normas internacionais e nacionais recomendam que os geradores distribuídos sejam rapidamente desconectados do sistema elétrico quando ocorre o evento de ilhamento [5] [6] [7], e a prática de desconexão é comumente adotada e empregada pela maioria das concessionárias brasileiras. Entretanto, é importante ressaltar que segundo o módulo 3 do PRODIST [15], as distribuidoras podem operar em ilhamento, desde que haja comum acordo entre a central geradora, a distribuidora e o Operador Nacional do Sistema Elétrico, e que os procedimentos operativos do módulo 4 do PRODIST [16] sejam cumpridos.

2.2 Métodos de detecção de ilhamento

Existem vários métodos de detecção de ilhamento em sistemas elétricos com geração distribuída. A Figura 3 apresenta uma visão geral dos métodos, sendo que as técnicas destacadas em cinza/negrito representam o que será apresentado no decorrer desse trabalho. A seguir serão explicadas as técnicas de detecção de ilhamento da Figura 3 [17] [18].

As técnicas remotas envolvem algum tipo de comunicação entre a concessionária, dispositivos de proteção e os GDs. Elas são eficientes para detecção de ilhamento, mas apresentam um custo maior que outras técnicas, por se basearem em esquemas complexos de comunicação. Algumas técnicas remotas são explicadas nos próximos tópicos.

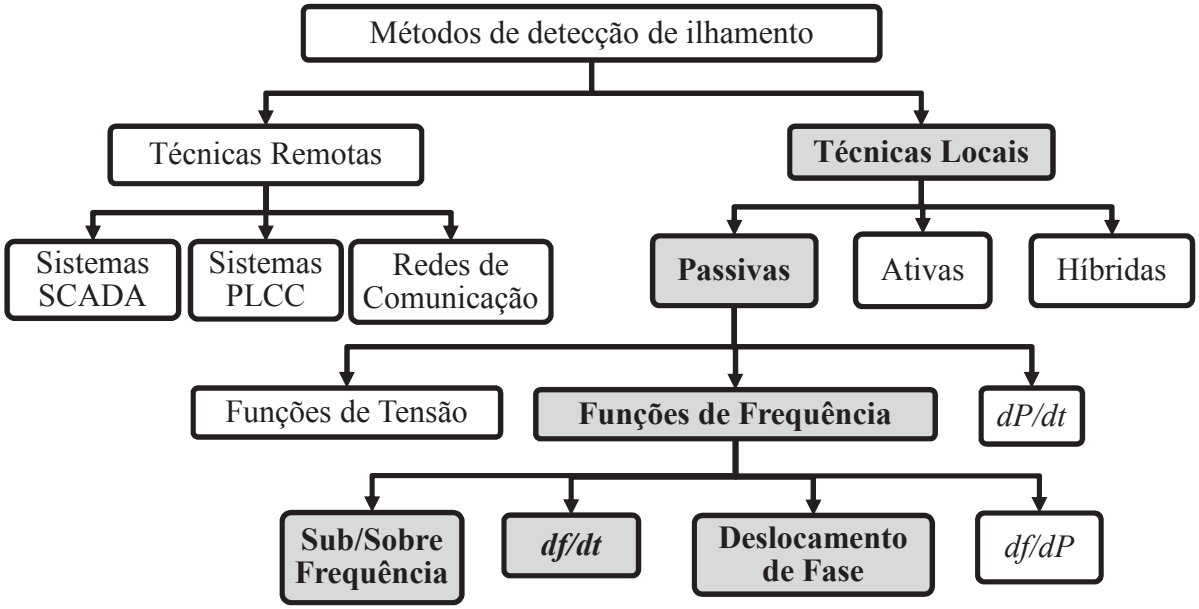


Figura 3 – Diagrama esquemático dos métodos de detecção de ilhamento.

- **Sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA)**: monitoram o estado de todos os disjuntores. Na ocorrência de ilhamento, o sistema SCADA identifica a área isolada e o GD é desligado por esquemas de teleproteção. Essa técnica é eficiente, porém o custo cresce com o aumento da complexidade da rede.
- **Sistemas *Power Line Carrier Communication* (PLCC)**: todos os GDs devem estar equipados com um receptor de sinal *Carrier* em uma frequência específica [17]. O sinal é recebido continuamente por meio das linhas do sistema elétrico. Se por algum motivo o recebimento de sinal for interrompido, então o ilhamento é caracterizado. Esse esquema tem como vantagem a confiabilidade e facilidade de implantação, porém alto custo do transmissor e receptor se comparado aos custos das técnicas convencionais.
- **Redes de comunicação de dispositivos de proteção**: todos os dispositivos de proteção devem ser interligados por uma rede de comunicação. Essas redes minimizam a possibilidade de falsa operação, como também aumentam a capacidade de detecção, apesar de não contribuírem com a melhoria da capacidade de detecção do relé de proteção em si. Entretanto, esse sistema se torna caro com o aumento dos elementos, devido ao custo dos dispositivos. Um exemplo são os sincrofasores, cuja função é monitoramento sincronizado de fasores instalados em pontos estratégicos do sistema [19], de forma a monitorar várias grandezas que, entre outras funções, podem detectar o ilhamento.

As técnicas locais têm o princípio básico de detectar o ilhamento usando as medições de tensão e corrente no ponto de conexão do GD. Essas técnicas não adotam comunicação entre dispositivos e/ou centro de controle. As técnicas locais são divididas em três grupos: técnicas passivas, ativas e híbridas (Figura 3), que são explicadas nos próximos parágrafos.

As **técnicas passivas** são baseadas somente em medidas elétricas no ponto de acoplamento comum entre o GD e o sistema. Normalmente têm baixo custo e fácil instalação. Entretanto, apresentam zonas de não detecção do ilhamento, que correspondem a uma região de pontos operativos no plano de desbalanço de potência reativa *versus* desbalanço de potência ativa, em que não há detecção do evento, ou a detecção excede o tempo máximo permitido [1] [10]. Essas técnicas podem ser compostas por funções de proteção de frequência, de tensão, de taxa de variação da potência pelo tempo (*dP/dt*) e até mesmo pela medida da variação da impedância do ponto de conexão do gerador, que altera no momento em que ocorre um ilhamento [18]. As funções de proteção de frequência podem ser de sub/sobre frequência (SSF), taxa de variação de frequência (TVF, ou *df/dt*) e deslocamento de fase (DFA) [18]. Outro tipo de função de proteção baseada em frequência é a de taxa de variação da frequência pela potência (*df/dP*), discutida em [20], na análise de ilhamento.

As **técnicas ativas** têm o princípio de inserir pequenas perturbações no sistema de potência. Em [18], afirma-se que a perturbação inserida irá causar uma significativa mudança em algum parâmetro do sistema elétrico se este estiver ilhado, o que não ocorreria se o GD estivesse em paralelo com a rede elétrica. Um tipo de método ativo apresentado em [18] é baseado no acréscimo de potência reativa e medição da tensão no ponto de conexão do GD. O controle potência reativa do GD insere, de tempo em tempo, uma quantidade de potência reativa em seu ponto de conexão. Se o GD estiver em paralelo à rede, a potência reativa irá fluir para o sistema e a tensão no ponto de conexão não aumentará significativamente. Entretanto, se a tensão terminal do gerador aumentar significativamente com o aumento de injeção de potência reativa, então o GD está operando ilhado. Vale ressaltar que esse método não pode ser usado se o GD pretende gerar potência ativa com fator de potência unitário [18].

A vantagem de técnicas ativas é a independência do balanço entre carga e geração, o que não ocorre para técnicas passivas, como afirmado em [18]. Como desvantagem, cita-se o fato de que pode haver interferência entre os sinais em situações em que haja múltiplos geradores, como também gerar perturbações no sistema elétrico [17] [18], podendo degradar a qualidade da energia elétrica. Nesse caso, o esquema ativo de proteção anti-ilhamento pode fornecer uma resposta errônea. Em [17] e [18] são apresentadas diversas técnicas ativas de detecção de ilhamento.

As **técnicas híbridas** empregam as técnicas passivas e ativas simultaneamente. Em alguns casos de técnicas híbridas, a técnica ativa atua unicamente se a técnica passiva identificar o ilhamento. Em [18] são apresentados casos híbridos para detecção de ilhamento.

Embora haja uma diversidade de métodos de detecção de ilhamento, este trabalho foca nos métodos passivos, e, especificamente, nas funções de proteção de SSF, TVF e DFA. Estas funções de proteção foram escolhidas por apresentar baixo custo, fácil instalação e parametrização, por serem usadas por concessionárias de energia elétrica no ponto de conexão de GDs [6] e por serem funções já conhecidas e empregadas em relés comerciais [21] [22].

2.3 Relés de proteção

Um relé de proteção (ou relé, como será referenciado neste trabalho) é considerado a ferramenta mais poderosa da engenharia de proteção, pois atua sobre disjuntores no sistema elétrico, baseando-se em uma lógica interna e em valores de tensão e corrente [23].

Um relé de proteção pode conter várias funções de proteção, inclusive as funções de SSF, TVF e DFA. Essas três funções de proteção são as mais empregadas na proteção anti-ilhamento de sistemas elétricos com geração distribuída [2], e são detalhadas a seguir.

2.3.1 Função de sub/sobre frequência (SSF)

Os relés com função de SSF, caracterizados como 81U/O na tabela ANSI [24], calculam a frequência elétrica do sinal de tensão da barra a qual o relé está conectado [1]. Se a frequência violar os ajustes de sub ou sobre frequência, então o relé atua enviando um sinal (*trip*) para abrir o disjuntor e desligar o circuito. Essas funções podem apresentar ajustes temporizados e ajuste de mínima tensão de operação [21] [22].

A temporização é usada para que seja certificada a violação dos ajustes. Se o ajuste de frequência for violado por um tempo maior que a temporização especificada, então a função de proteção atua. Se acaso a frequência retornar a uma condição que não viola o ajuste, enquanto a temporização não for excedida, então a função de proteção não atua.

O ajuste de mínima tensão é o menor valor da magnitude da tensão a partir do qual a função de SSF pode atuar por violações nos ajustes de frequência [1]. Caso a tensão seja menor que esse ajuste, então a atuação de SSF é bloqueada, mesmo que os ajustes de frequência sejam violados. A restrição por mínima tensão de operação é usada para que a

função de SSF não atue para condições específicas, como por exemplo, um curto-circuito, em que a tensão nas barras diminui.

2.3.2 Função de taxa de variação de frequência (TVF)

O relé de taxa de variação de frequência (TVF), *rate of change of frequency* (ROCOF), *df/dt* ou 81dfdt, é uma função de proteção que calcula a variação da frequência pelo tempo e que pode ser usada no sistema de proteção anti-ilhamento [2]. Além da detecção de ilhamento, a função de TVF pode ser usada para promover o corte de carga, como afirmado em [25], em que o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC) é um sistema especial de proteção para corte de carga por sub frequência e/ou TVF.

Na ocorrência do ilhamento, a frequência varia dinamicamente. Se o desbalanço de potência é pequeno, a função de SSF pode demorar ou não chegar a atuar. Dependendo das condições operativas e da resposta dinâmica dos elementos do sistema de elétrico, a taxa de variação da frequência pode variar de forma significativa para atuar essa proteção, acelerando a detecção do ilhamento [26].

Segundo [26], o ajuste típico de TVF, para a frequência nominal de 60 Hz, é de 0,1 a 1,2 Hz/s. Entretanto, [2] menciona que os ajustes variam de 0,1 a 0,2 Hz/s (sem especificar a frequência nominal), mas que podem ser maiores a depender das condições operativas.

Essa função de proteção, assim como a de SSF, apresenta bloqueio por mínima tensão de operação. Também pode apresentar atuação instantânea ou temporizada, a depender do relé comercial em uso, já que cada modelo e fabricante são distintos [21] [22].

2.3.3 Função de deslocamento de fase (DFA)

A função de proteção por deslocamento de fase (DFA) também é conhecida na literatura como [1] [2]: medição do ângulo de fase, proteção contra falta de sincronismo, salto de vetor, *vector surge relay*, *vector jump relay*, *voltage jump relay* ou pelo número 78 da tabela ANSI [24]. Essa função mede a variação do ângulo do sinal de tensão. Se o ângulo exceder um valor mínimo estabelecido pelo ajuste (como 6° ou 9°), a função de DFA atua.

Chaveamentos que inserem ou desconectam cargas ou bancos de capacitores no sistema elétrico, bem como curtos-circuitos, podem causar uma mudança abrupta de fase na forma de onda da tensão nos terminais de um GD, em comparação com a tensão pré-evento

[2]. Isso justifica o uso dessa função na proteção anti-ilhamento, já que o evento de ilhamento é causado por uma desconexão entre a ilha e o restante do sistema.

As funções de DFA usam os sinais de tensão para medir o tempo entre os cruzamentos do sinal por zero [26]. O relé pode medir o tempo entre cruzamentos por zero a partir do momento em que ocorre a transição do sinal da tensão do semiciclo negativo para o positivo (crescente), do positivo para o negativo (decrescente) ou ambos, a depender do modelo e fabricante [21] [22]. A medida do ângulo nos relés comerciais é semelhante à estimação da frequência elétrica, ou seja, parte da medida do tempo entre cruzamentos sucessivos da forma de onda da tensão com o eixo zero do sinal [21], sendo a que o DFA é dado em graus [26].

Segundo [2], as funções de DFA normalmente são ajustadas em 6° para serem sensíveis à detecção do ilhamento, mas o valor pode ser maior se, ao ocorrer um ilhamento, a variação angular atingir valores maiores devido à inserção ou desconexão de grandes geradores ou cargas no sistema elétrico.

A função de proteção de DFA empregada em relés comerciais pode apresentar apenas atuação instantânea [21], ou instantânea e temporizada [22], a depender do modelo e fabricante. Esta função, assim como as anteriores, possui bloqueio por mínima tensão.

2.4 Curvas de desempenho

Como comentado na seção 2.2, os métodos passivos apresentam zonas de não detecção de ilhamento, que dependem do desbalanço de potência ativa e reativa na provável ilha antes da ocorrência do evento. Sendo assim, os dispositivos das proteções passivas podem não atuar (ou atuar em tempo maior que o esperado) caso o desbalanço de potência, entre a concessionária e a ilha, seja suficientemente baixo. Entretanto, esses dispositivos apresentam respostas rápidas quando o desbalanço de potência é relativamente grande [1].

As curvas de desempenho vêm a contribuir com o mapeamento das condições operativas das proteções passivas, sendo que o foco deste trabalho são as funções de SSF, TVF e DFA, uma vez que a frequência está intimamente relacionada com o desbalanço de potência ativa [8]. Para orientar os projetistas e engenheiros de proteção, é útil apresentar uma curva de tempo de atuação das proteções de frequência *versus* desbalanço de potência ativa entre a concessionária e um sistema ilhado. A relação gráfica de tempo de detecção do ilhamento com o desbalanço de potência ativa é a curva de desempenho [1].

A seguir será apresentada a relação entre a frequência e a potência ativa, e posteriormente os pontos principais das curvas de desempenho. Vale ressaltar que foram

utilizados os conceitos de geradores síncronos para abordar as curvas de desempenho. Entretanto, esse método pode ser usado para analisar diferentes tipos de fontes e geradores, tais como geradores de indução para fonte eólica ou inversores de frequência de painéis fotovoltaicos.

2.4.1 Relação entre frequência e potência ativa

A frequência do sistema elétrico está fortemente relacionada ao balanço entre carga e geração de potência ativa, o que é explicado por meio do sistema hipotético da Figura 4, representando dois subsistemas compostos por geração e carga, sendo que a análise foi conduzida considerando geradores síncronos.

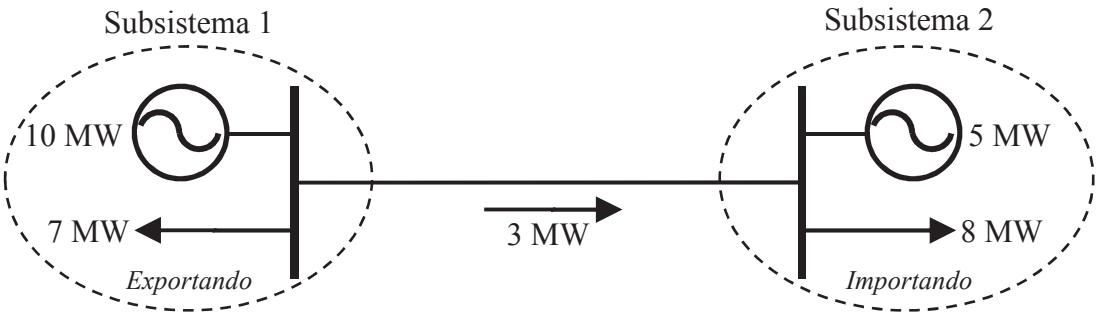


Figura 4 – Sistema hipotético 2.

Na Figura 4, dois subsistemas hipotéticos estão conectados por uma linha ideal sem perdas, responsável pelo intercâmbio de potência ativa entre áreas, sendo que o subsistema 1 está com excesso de potência ativa, e o subsistema 2, déficit. Se a linha sair de operação, o intercâmbio de 3 MW é interrompido, levando instantaneamente o subsistema 1 ao excesso, e o 2 à falta de potência ativa, até que os reguladores de velocidade operem.

Para o subsistema 1, a potência excedente é convertida em energia cinética no eixo dos geradores síncronos. Como a energia cinética é proporcional ao quadrado da velocidade, o incremento na energia leva ao aumento da velocidade mecânica do eixo dos geradores, e consequentemente, à elevação da frequência elétrica do subsistema 1. Já para o subsistema 2, o déficit de potência ativa faz com que parte da carga não seja suprida. Assim, uma parcela da energia cinética dos geradores síncronos contribui para suprir essas cargas, levando ao decréscimo da energia cinética e, consequentemente, da frequência do subsistema 2.

O desbalanço de potência ativa é equivalente ao desbalanço do torque no eixo dos geradores síncronos. Quando ocorre o desbalanço, surge um torque que acelera ou freia o

eixo, que depende se houve excesso ou déficit de potência ativa, respectivamente [8]. Dessa forma, a Equação (1) relaciona a variação da velocidade mecânica do eixo dos geradores síncronos com a diferença entre torque elétrico e mecânico [8], sendo que T_m é o torque mecânico no eixo do gerador, T_e é o torque elétrico exigido pelas cargas do sistema, T_{acel} é o torque acelerante, ω é a velocidade angular do rotor e J o momento de inércia. Vale ressaltar que o desbalanço de potência ativa, em pu, é igual ao torque acelerante.

$$J\frac{d\omega}{dt} = T_{acel} = T_m - T_e \tag{1}$$

A Equação (1) indica que se o torque mecânico for maior que o elétrico, o torque acelerante é positivo, levando a uma variação positiva da velocidade angular, e por consequência, aumento da frequência elétrica. Se o torque mecânico for menor que o elétrico, o torque acelerante é negativo, levando ao decréscimo da velocidade angular do rotor, e consequentemente, ao decréscimo da frequência elétrica do sistema. Portanto, a variação da frequência é determinada pelo desbalanço de potência ativa, o que possibilita a análise de funções baseadas em medidas de frequência, tal como explicado nas subseções seguintes.

2.4.2 Características das curvas de desempenho

A curva de desempenho é uma relação entre o tempo de atuação da proteção anti-ilhamento e o desbalanço de potência ativa [1]. A Figura 5 apresenta uma curva de desempenho de um modelo computacional da função de SSF, com o ajuste de ± 1,5 Hz (isto é, ± 1,5 Hz em função da frequência nominal de 60 Hz, sendo então, 58,5 e 61,5 Hz) e atuação instantânea com o bloqueio de mínima tensão desabilitado. O desbalanço de potência ativa está em pu (por unidade) na base de 30 MVA de um gerador síncrono distribuído.

A prática da indústria é desconectar os geradores distribuídos imediatamente após o ilhamento [27], sendo que este deve ser detectado em até dois segundos, para então desenergizar a região ilhada [5]. Na Figura 5, o tempo crítico de detecção do ilhamento (t_{crit}) foi adotado como sendo de 500 ms, seguindo o valor adotado na literatura [1] [10].

A curva de desempenho da Figura 5 apresenta um comportamento inverso entre desbalanço de potência ativa (ΔP) e tempo de detecção do ilhamento (t_d). Sendo assim, quanto maior o ΔP, maior e/ou mais rápida é a variação da frequência, fazendo com que o tempo de

detecção seja menor. Entretanto, quanto menor ΔP, menor e/ou mais lenta é a variação da frequência, fazendo com que a proteção demore a atuar, levando a valores altos de t_d.

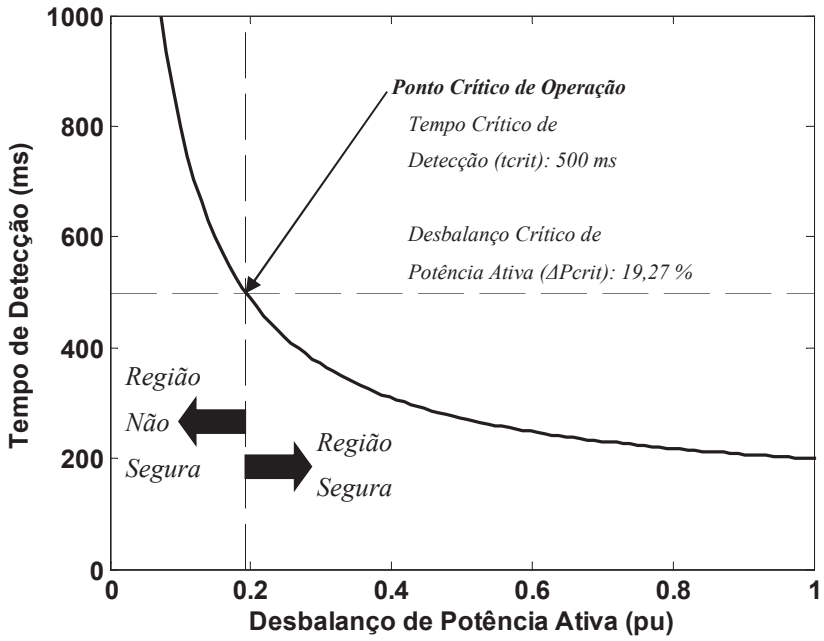


Figura 5 – Curva de desempenho da função de SSF com ajuste de ±1,5 Hz.
Fonte: [1].

O ponto de intersecção da reta de 500 ms (Figura 5) com a curva de desempenho indica o valor mínimo de desbalanço de potência ativa para que a função de SSF, com ajuste de ±1,5 Hz, detecte a condição de ilhamento sem exceder o tempo limite. Esse valor é caracterizado como desbalanço crítico de potência ativa (ΔP_{crit}) [1] [28], e representa o limiar entre as regiões segura e insegura de operação da função de proteção em estudo.

Na Figura 5, o valor de ΔP_{crit} é 19,27%. Qualquer desbalanço de potência menor que isso leva a função de SSF a atuar com tempo superior ao t_{crit}. Por outro lado, se o desbalanço de potência for maior que o crítico, a função atua em tempo inferior ao t_{crit}. Dessa forma, desbalanços de potência maiores que o crítico fazem parte da região segura da curva de desempenho, e desbalanços menores que o crítico fazem parte da região não segura [1] [10], como apresentado na Figura 5.

Sabendo o valor do desbalanço crítico, é possível conhecer as limitações de tempo de detecção de determinados ajustes da proteção. Com essa informação, funções de proteção anti-ilhamento podem ser ajustadas de forma mais eficiente [1].

Neste capítulo foi contextualizada a proteção anti-ilhamento de geradores distribuídos, apresentando os métodos de detecção usados, focando principalmente nas funções de proteção baseadas na medida de frequência, que são o objeto de estudo desta dissertação.

O próximo capítulo apresenta o ambiente computacional do RTDS® e o processo de ensaio em malha fechada, a modelagem do sistema elétrico de potência, e a modelagem computacional e analítica das funções de proteção.

Capítulo 3

Modelagem Computacional e Analítica

Este capítulo apresenta a modelagem computacional do sistema elétrico em estudo, em conjunto com os modelos computacionais e analíticos das funções de proteção. A seguir será apresentada a justificativa de uso da simulação em tempo real e a estrutura a da ferramenta computacional RSCAD, usada no RTDS®. Após essa etapa, serão apresentados o sistema elétrico e os modelos computacionais e analíticos das funções de proteção de sub/sobre frequência, taxa de variação de frequência e deslocamento de fase.

3.1 Simulação em Tempo Real e RSCAD

Simuladores em tempo real são frequentemente utilizados para executar testes em malha fechada de equipamentos físicos de controle e proteção [29], permitindo testar, por exemplo, o comportamento de dispositivos comerciais em ambientes de simulação. Uma simulação em malha fechada é caracterizada pela realimentação dos componentes externos às entradas do simulador. Pelo simulador, é possível alterar parâmetros na simulação, analisando a resposta dos dispositivos. Além disso, sistemas de proteção podem ser testados usando uma ou mais funções de proteção, submetidos a condições virtuais idênticas ao que se encontra em sistemas elétricos de potência reais [29]. Com esse processo, é possível ensaiar equipamentos reais, tais como relés comerciais, medidores de energia elétrica ou algoritmos embarcados.

O simulador RTDS® é uma combinação de software e hardware capaz de realizar simulações de transitórios em sistemas de potência em tempo real e malha fechada, com flexibilidade para uso de portas analógicas e digitais de entrada e saída, interface gráfica amigável e extensa biblioteca de componentes de sistemas de potência, proteção e controle [30]. Alguns casos de aplicação do RTDS® serão descritos a seguir, em forma de tópicos.

- **Ajuste das proteções**: o RTDS® pode ser usado para simular vários eventos em sistemas elétricos, e então analisar a resposta do sistema de proteção [31]. Essas simulações possibilitam, por exemplo, ajustar as funções de perda de sincronismo, analisar a sensibilidade de funções direcionais de sobrecorrente, testar a proteção diferencial e de impedância em linhas de transmissão ou de sobre tensão em barramentos [31] [32].
- **Testes de coordenação, ajustes e esquemas de proteção**: com o RTDS® é possível realizar testes de coordenação de esquemas de proteção, levando em consideração as condições dinâmicas do sistema [31]. Muitas vezes o ajuste ideal da função de proteção é obtido após o dispositivo atuar incorretamente, ou não ter atuado quando preciso, de forma que a função de proteção seja reajustada para evitar uma nova ocorrência de operação incorreta. Em [33], uma validação dos ajustes de proteção foi realizada, devido à mudança na topologia do sistema elétrico, ocorrida pela interligação de 500 kV da linha Foz do Iguaçu – Cascavel Oeste, entre a Usina Hidrelétrica de Itaipu, 60 Hz, e a subestação de Foz do Iguaçu. Essa validação de ajustes promoveu maior confiabilidade na inserção dos dispositivos de proteção no sistema físico real, pois com o RTDS® foi possível eliminar e corrigir falhas, melhorando o desempenho do sistema de proteção [33] e diminuindo os riscos de interrupções de fornecimento de energia elétrica [31].
- **Análise da eficiência de esquemas de teleproteção**: em [34] foi analisado um esquema de teleproteção para a localização de faltas em linhas de transmissão pelo RTDS®, mostrando a diferença entre a aplicação da teleproteção convencional (que usa as saídas digitais dos relés para operarem como funções de bloqueio) com o recebimento de mensagens *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) da IEC 61850[1], aplicados em relés comerciais. Nesse trabalho, ambas as técnicas localizaram a falta. Usando GOOSE a falta foi detectada 12 ms mais rápido que o método convencional. Entretanto, o esquema convencional se mostrou mais simples em questão de montagem em laboratório.
- **Validação de algoritmos embarcados**: com o RTDS® pode ser feita a verificação de algoritmos embarcados em controladores externos. Em [35], o RTDS® foi usado para verificar um algoritmo de controle embarcado em um processador digital, que tem o propósito de realizar o fechamento controlado de disjuntores usados em sistemas de transmissão, comprovando então que o algoritmo embarcado é realmente eficaz na realização do fechamento.

[1] Mais detalhes sobre a norma IEC 61850 na referência [30].

Como citado anteriormente, a simulação em malha fechada é muito utilizada para ensaiar equipamentos reais, como um relé comercial. Na Figura 6 é apresentado o esquema de malha fechada realizado neste trabalho. No simulador RTDS® da Figura 6, um sistema elétrico pode ser modelado, e é possível extrair as variáveis de tensão e/ou corrente enviando-as às saídas analógicas, e então, os sinais são amplificados, adequando o sinal ao equipamento externo. O equipamento externo pode ser um relé digital, um microcontrolador, um medidor, ou qualquer outro equipamento que recebe sinais elétricos e responde a esses estímulos com saídas analógicas ou digitais. As respostas de saída desse equipamento são então recebidas pelo simulador por meio de entradas analógicas e/ou digitais, que então podem ser usadas no ambiente de simulação (na Figura 6 é dado um exemplo de uso das entradas digitais).

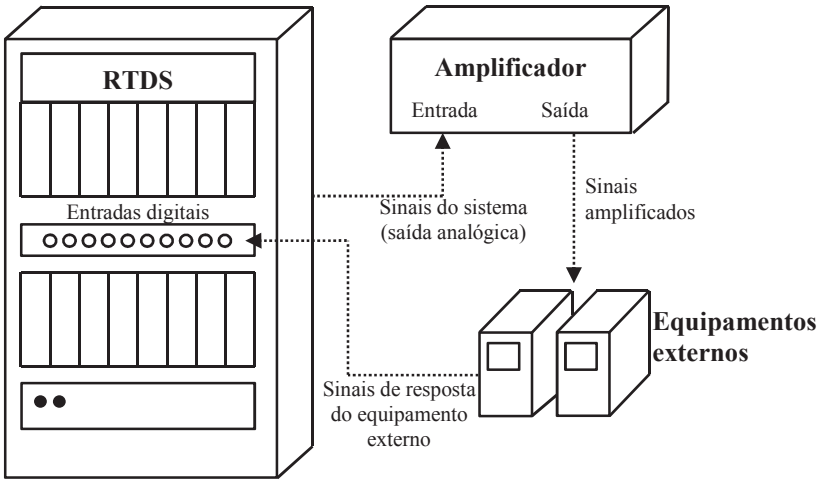


Figura 6 – Simulação em malha fechada com o RTDS®.

O RSCAD é uma ferramenta computacional usada para simulação de sistemas elétricos, e representa o ambiente computacional e interface gráfica do RTDS®. A estrutura do RSCAD se divide em várias abas quando aplicado às funcionalidades do RTDS®. Na Figura 7 são apresentadas as abas *Draft, RunTime* e *CBuilder*, que foram usadas neste trabalho.

O *Draft* é o ambiente computacional usado para a modelagem do sistema elétrico e de controle [29]. O *Draft* possui uma extensa biblioteca de componentes de sistemas de potência, como também elementos de controle, funções matemáticas, elementos de processamento de sinais e blocos responsáveis pela interface de sinais digitais e analógicos de entrada e saída.

O *RunTime* é usado para controlar a simulação do RTDS® [29]. Nesse ambiente é que são controlados os comandos de início e fim de simulações, comandos para abertura e fechamento de chaves e eventos no sistema elétrico modelado no *Draft*. No ambiente *RunTime* é possível escrever rotinas em linguagem C para executar tarefas bem determinadas,

tais como inicializar a simulação, causar eventos no sistema (como ilhamento), coletar dados e salvar em relatórios e outras funções. As rotinas são úteis quando é necessário executar diversas simulações sequenciais, variando alguns parâmetros do sistema.

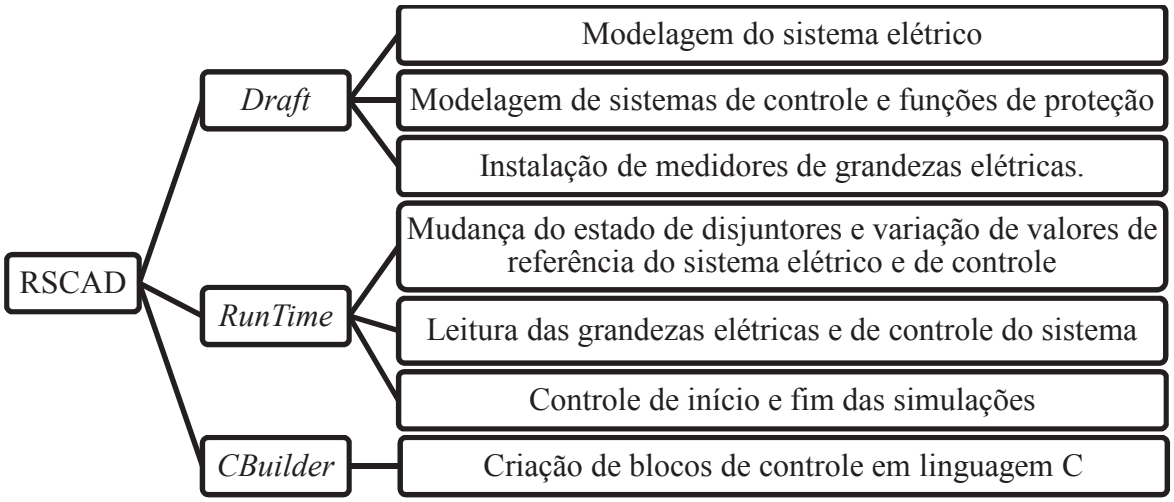


Figura 7 – Componentes do RSCAD no RTDS®.

Por fim, o *CBuilder* permite modelar componentes que não estão disponíveis na biblioteca do *Draft*. Esses componentes podem ser elementos de sistemas de potência ou controle. A modelagem de um elemento de controle é realizada por meio de uma rotina escrita em linguagem C, que é executada em tempo real.

3.2 Modelagem do sistema elétrico

O diagrama unifilar do sistema elétrico em estudo é apresentado na Figura 8. Esse sistema já foi usado na análise de detecção de ilhamento em trabalhos anteriores [1] [26] [36].

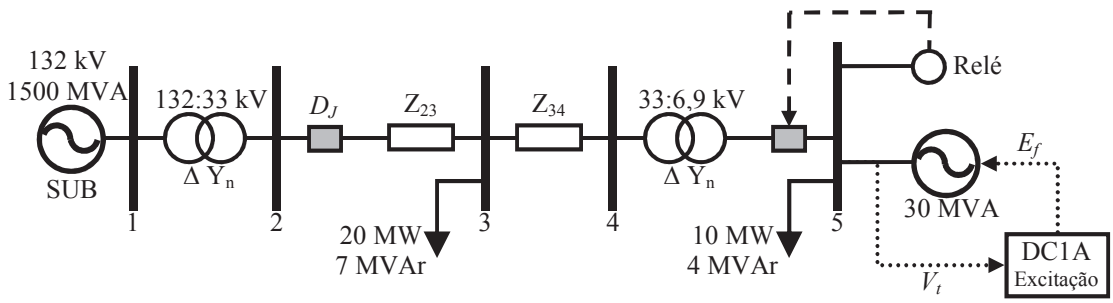


Figura 8 – Diagrama unifilar do sistema elétrico em estudo.

O sistema elétrico da Figura 8 é um sistema de subtransmissão operando na frequência nominal de 60 Hz, com uma subestação (SUB) de 132 kV e potência de curto-circuito de 1500 MVA na barra 1, representada por um equivalente de Thévenin. Um transformador de potência de 132Δ/33 Y_n kV conecta a subestação ao alimentador de 33 kV. O alimentador é composto por duas linhas de subtransmissão (Z_{23} e Z_{34}), modeladas como impedância série.

Esse sistema possui duas cargas, uma conectada a barra 3 com 20 MW e 7 MVAr e outra na barra 5 com 10 MW e 4 MVAr, ambas conectadas em estrela aterrada.

O sistema da Figura 8 possui um gerador síncrono de potência nominal de 30 MVA e tensão nominal de 6,9 kV. O gerador é conectado a barra 5 e é equipado com um regulador automático de tensão do tipo IEEE DC1A [37]. O gerador é conectado ao alimentador por meio de um transformador de potência de 33Δ/6,9Y_n kV. Os parâmetros do sistema elétrico e o modelo do regulador de tensão são apresentados no **apêndice A**.

O regulador de velocidade do gerador síncrono não foi considerado nas simulações, pois apresenta resposta lenta em comparação ao período de simulação empregado neste trabalho, que se estende apenas por um segundo. Baseado nisso, o gerador distribuído opera em modo de potência ativa constante, seguindo o modelo adotado em [1].

O relé de proteção é conectado na barra 5, sendo este responsável por abrir o disjuntor e desconectar o gerador distribuído do sistema, caso ocorra o ilhamento.

A Figura 9 apresenta o diagrama trifilar do sistema elétrico modelado no RSCAD. Para a representação dos transformadores e do gerador síncrono, foram usados os componentes "RTDS_SHARC_TRF3P2W" [38] e "RTDS_SHARC_MAC_V3" [38] do RSCAD, respectivamente. No **apêndice B** é apresentada a modelagem completa do sistema de potência, de proteção e de controle, e os algoritmos elaborados no RSCAD.

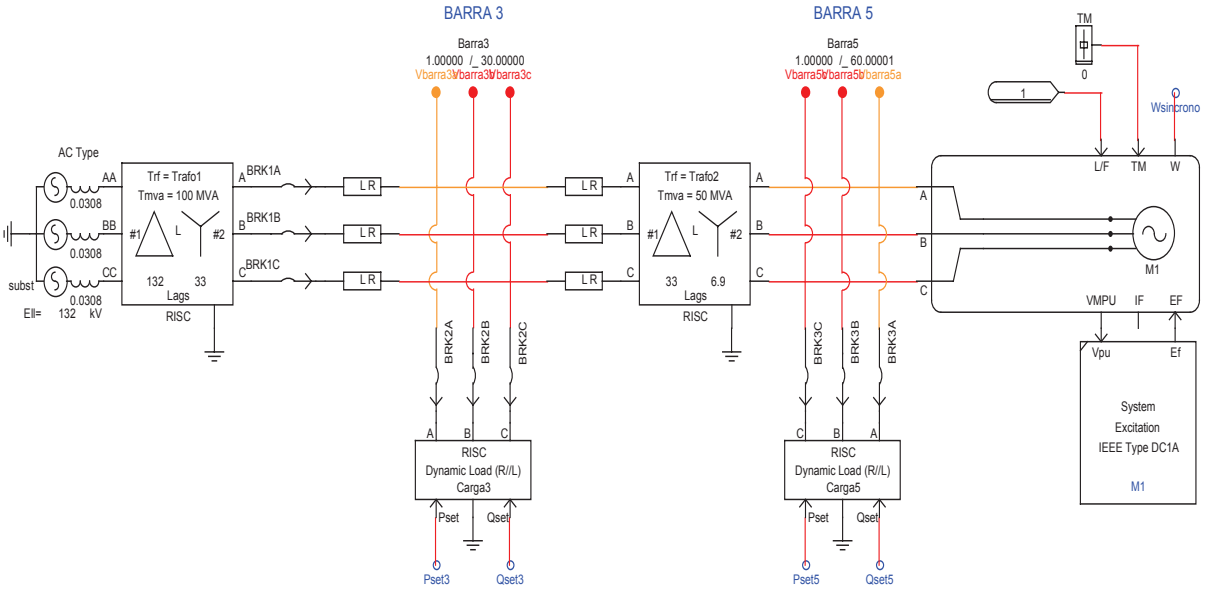


Figura 9 – Diagrama trifilar do sistema elétrico em estudo (ambiente *Draft* do RSCAD).

Em sistemas elétricos de potência, as cargas podem ser representadas por modelos dependentes da tensão, referentes a cargas de impedância constante (Z_{cte}), corrente constante (I_{cte}) ou potência constante (P_{cte}). As equações de potência ativa e reativa são apresentadas nas Equações (2) e (3), respectivamente.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_p} = P_0 \cdot V_{pu}^{\ n_p} \tag{2}$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_q} = Q_0 \cdot V_{pu}^{\ n_q} \tag{3}$$

Sendo que:

- P é a potência ativa consumida pela carga (MW);
- P_0 é a potência ativa nominal da carga (MW);
- Q é a potência reativa consumida pela carga (MVAr);
- Q_0 é a potência reativa nominal da carga (MVAr);
- V é a tensão da barra em que a carga está conectada (kV);
- V_0 é a tensão nominal da barra em que a carga está conectada (kV);
- V_{pu} é a tensão da barra em que a carga está conectada (pu);

- n_p é o expoente que indica a natureza do consumo de potência ativa (pu);
- n_q é o expoente que indica a natureza do consumo de potência reativa (pu).

Para explicar o porquê de a natureza da demanda variar em função dos coeficientes, foi escolhida a equação da potência ativa, e então variado o n_p.

A Equação (4) apresenta o caso em que n_p = 0, e a carga tem propriedades de demandar potência constante, pois P é fixa e independe da variação de tensão.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^0 = P_0 \cdot 1 = P_{cte} \tag{4}$$

No caso em que n_p = 1, a carga assume a propriedade de corrente constante. Na Equação (5), nota-se que P_0/V_0 é a corrente nominal, e possui valor constante. Neste caso, o modelo representa um consumo diretamente proporcional à tensão do barramento.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 = \left(\frac{P_0}{V_0} \right) V = I_{cte} \cdot V \tag{5}$$

Por fim, para o caso em que n_p = 2, a carga é caracterizada como impedância constante, pois a relação V_0^2/P_0 é constante, como visto na Equação (6), sendo $\mathrm{Re}\{Z_{cte}\}$ a parte real da impedância da carga (isto é, a parte resistiva). Neste caso, a potência consumida é diretamente proporcional ao valor quadrático da tensão.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 = \left(\frac{P_0}{V_0^2} \right) V^2 = \frac{V^2}{\left(\frac{V_0^2}{P_0} \right)} = \frac{V^2}{\mathrm{Re}\{Z_{cte}\}} \tag{6}$$

Uma carga modelada dessa forma varia sua natureza conforme os coeficientes n_p e n_q, como apresentado na Tabela 1, e quanto maiores os coeficientes, maior é a dependência da demanda de potência pela tensão.

Tabela 1 – Definição dos tipos de cargas elétricas.

Tipo de carga	Coeficientes do termo exponencial (n_p *ou* n_q)
Potência constante	0
Corrente constante	1
Impedância constante	2

No *Draft* do RSCAD, em que foi feita a modelagem do sistema elétrico, foi criado um sistema de controle de forma a representar o modelo das cargas. Esse sistema de controle, para a carga da barra 3, é mostrado na Figura 10, e foi baseado em [39].

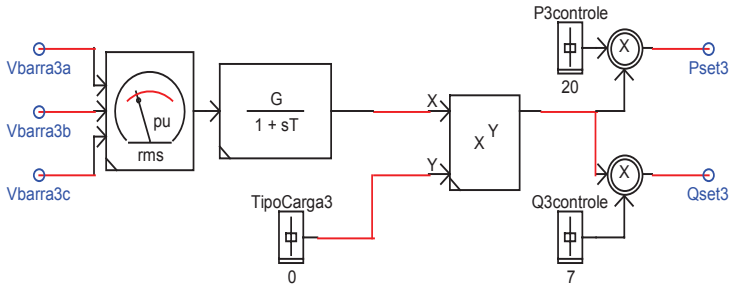


Figura 10 – Sistema de controle usado para modelar as cargas (ambiente *Draft*).

Na Figura 10, os sinais de tensão da barra 3 servem de entrada para um bloco que calcula o valor eficaz e por unidade (na base de 33 kV para a carga da barra 3). Após essa etapa, uma função de transferência de primeira ordem, com G = 1 e T = 0,01 segundos, é usada como filtro, como adotado em [39]. Um bloco de cálculo exponencial eleva a tensão ao coeficiente *TipoCarga3*, que estipula o tipo da carga (que na Figura 10 é 0, isto é, potência constante), como apresentado nas Equações (2) e (3). Por fim, é feita a multiplicação desse valor pelo valor de potências P_0 e Q_0, sendo que na Figura 10 P_0 é 20 MW (entrada *P3controle*) e Q_0 é 7 MVAr (entrada *Q3controle*).

As saídas *Pset3* e *Qset3*, apresentadas no bloco de controle da Figura 10, servem como entrada no bloco da carga 3 apresentado na Figura 9, que é conectado à barra 3 no sistema elétrico de potência. Assim, o bloco de controle da Figura 10 fornece o valor de potência de referência para o bloco de potência da Figura 9.

3.3 Modelagem computacional das funções de proteção

A frequência, taxa de variação de frequência e deslocamento de fase são calculados nos relés comerciais dispondo do sinal de tensão [21] [22]. Os sinais de entrada de tensão passam por uma série de etapas intermediárias até chegarem à etapa de processamento,

referente aos algoritmos de proteção. A Figura 11 apresenta o modelo completo de um relé digital de proteção, ilustrando as etapas de processamento desde a aquisição dos sinais de tensão na entrada, até os sinais de *trip* (ou saídas auxiliares) para saída [40] [41].

A primeira etapa intermediária é o bloco de transformação de potencial, que atenua o valor para níveis adequados ao microprocessador, servindo também como um isolador galvânico [41]. Após a transformação, o filtro passa-baixa é aplicado para atenuar os erros de processamento de sinais [41]. O conversor analógico/digital (A/D) converte os dados advindos do elemento *sample and hold*, que realiza a amostragem dos dados analógicos [41].

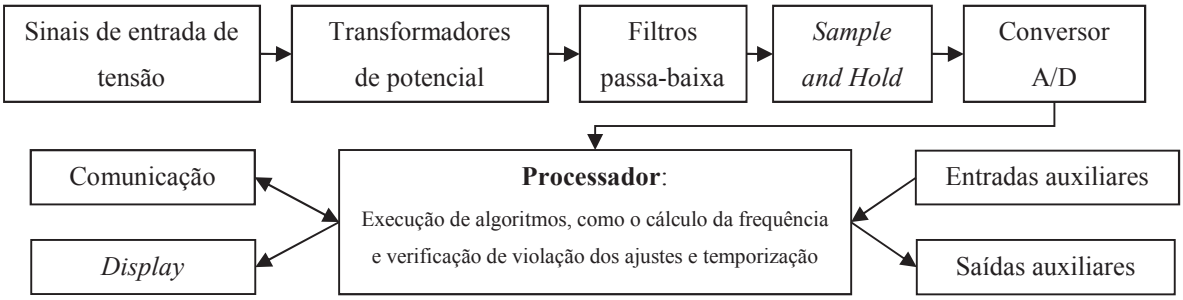


Figura 11 – Modelo completo de um relé digital de proteção.

O processador executa várias tarefas, como o cálculo da frequência e verificação da violação dos ajustes, a troca de informações por interfaces de comunicação, a apresentação dos estados e medidas no *display* do dispositivo e o fechamento/abertura dos contatos por meio das saídas auxiliares, responsáveis pela atuação de disjuntores e alarmes [41].

Nas próximas seções são apresentados os modelos computacionais propostos em [1], como também os modelos computacionais propostos nesta dissertação. Os modelos computacionais de SSF e TVF são baseados na velocidade angular do GD síncrono [1], como também no sinal de tensão do terminal do GD, baseando-se em algoritmos dos relés digitais.

3.3.1 Modelo computacional de SSF baseado na velocidade angular

A frequência elétrica do sistema e a velocidade (ou frequência) angular do eixo do gerador síncrono são semelhantes em situações de ilhamento. Dessa maneira, em simulações de ilhamento, a modelagem da função de SSF pode ser baseada na frequência angular do gerador síncrono, pois apresenta resultados fiéis e de fácil aquisição em ambientes de simulação, já que pode ser obtida diretamente do modelo do gerador [1].

A Figura 12 apresenta o modelo de sub/sobre velocidade angular (MSSW) proposto em [1], com atuação instantânea. Os ajustes superior (β_{sobre}) e inferior (β_{sub}) são comparados

com a frequência medida, ocorrendo a atuação caso haja violação de um desses ajustes. A frequência angular (ω) é obtida diretamente da velocidade angular do rotor do gerador síncrono distribuído, e então é convertida para Hertz pela divisão por 2π.

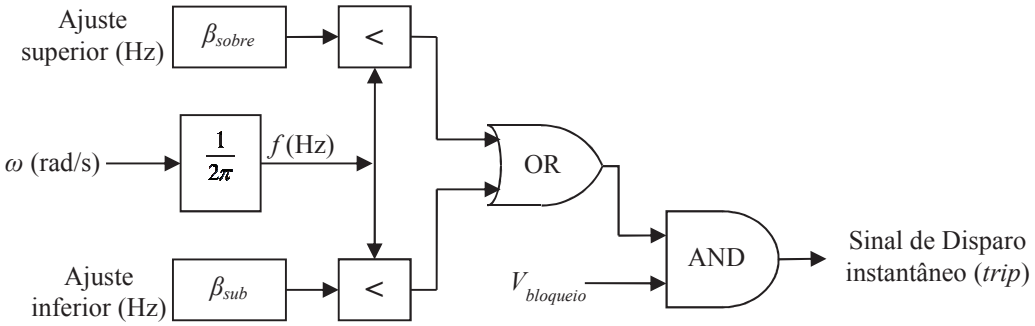


Figura 12 – Diagrama do MSSW.
Fonte: [1] [10].

No modelo da Figura 12 foi inserida a restrição de mínima tensão, que bloqueia o sinal de disparo de SSF caso a tensão de entrada seja menor que o valor mínimo pré-definido (V_{min}). O modelo de restrição de tensão é apresentado na Figura 13. Se houver o bloqueio, a função de proteção não atua, mesmo que o valor da frequência viole os ajustes.

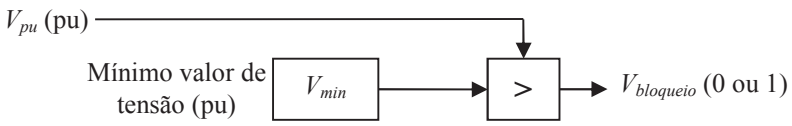


Figura 13 – Modelagem do bloqueio de mínima tensão.
Fonte: [1].

A Figura 14 apresenta a modelagem no RSCAD para representar o MSSW, para quando o modelo está ajustado para atuar quando a variação da frequência é de ±0,5 Hz. Nota-se que o valor 0,159155 é igual a 1/2π, que converte o sinal de rad/s para Hz.

O modelo da Figura 14 difere da Figura 12 ao utilizar ajustes simétricos em relação à frequência de 60 Hz (por exemplo, ±0,5 Hz, significando o ajuste inferior de 59,5 Hz e superior de 60,5 Hz). Isso simplifica o modelo, pois permite calcular o módulo da diferença entre frequência medida e nominal (Figura 14), para então comparar com o ajuste. No entanto, esta simplificação torna o modelo aplicável apenas para os casos em que os ajustes inferior e superior são simétricos em relação à frequência nominal (como 59 e 61 Hz).

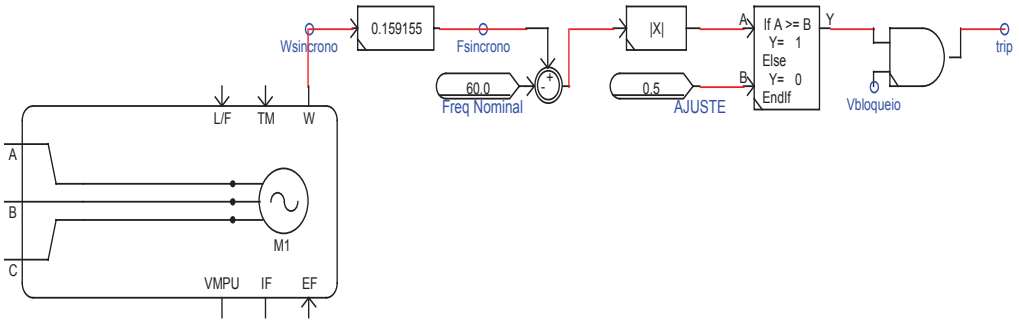


Figura 14 – Diagrama do MSSW no RSCAD.

A Figura 15 apresenta a modelagem da restrição de tensão no *Draft* do RSCAD. Esse bloco tem por finalidade medir a tensão da fase *a* da barra 5 (sistema elétrico da Figura 8), calcular o valor eficaz e por unidade (fazendo o cálculo por meio de integral e raiz quadrada), e então comparar com o ajuste de mínima tensão de operação. Se o valor medido for maior que o valor mínimo, então a variável $V_{bloqueio}$ é 1, habilitando a função de SSF. Caso contrário, o sinal de *trip* da função de SSF é bloqueado.

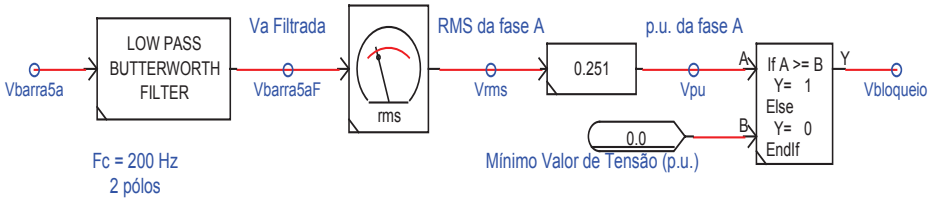


Figura 15 – Modelagem do bloqueio de tensão no RSCAD.

O valor da constante de multiplicação que relaciona o valor eficaz da tensão da barra 5 do sistema da Figura 8 com o valor em por unidade, apresentada na Figura 15, é obtido pela Equação (7), que leva em consideração a tensão nominal entre linhas (6,9 kV) da barra 5.

$$V_{pu} = \frac{V_{medido}[kV]}{V_{base}[kV]} = \frac{V_{medido}}{\left(\frac{6,9}{\sqrt{3}}\right)} = 0,251 \cdot V_{medido} \tag{7}$$

É importante ressaltar que a funcionalidade da restrição de tensão foi modelada, mas foi desabilitada. Isso foi feito para que fosse analisado exclusivamente o comportamento da frequência. O mesmo procedimento foi adotado para os outros modelos propostos, e esta funcionalidade foi inibida nos relés comerciais.

3.3.2 Modelo computacional de SSF baseado no sinal de tensão

O modelo da função de sub/sobre frequência baseado no sinal de tensão (MSSF) estima a frequência elétrica a partir da forma de onda da tensão terminal do GD.

A medição de frequência foi obtida por meio do cruzamento do sinal de tensão por zero, como apresentado em [21], em que a cada novo meio ciclo, a frequência elétrica é atualizada, conforme apresentado na Figura 16.

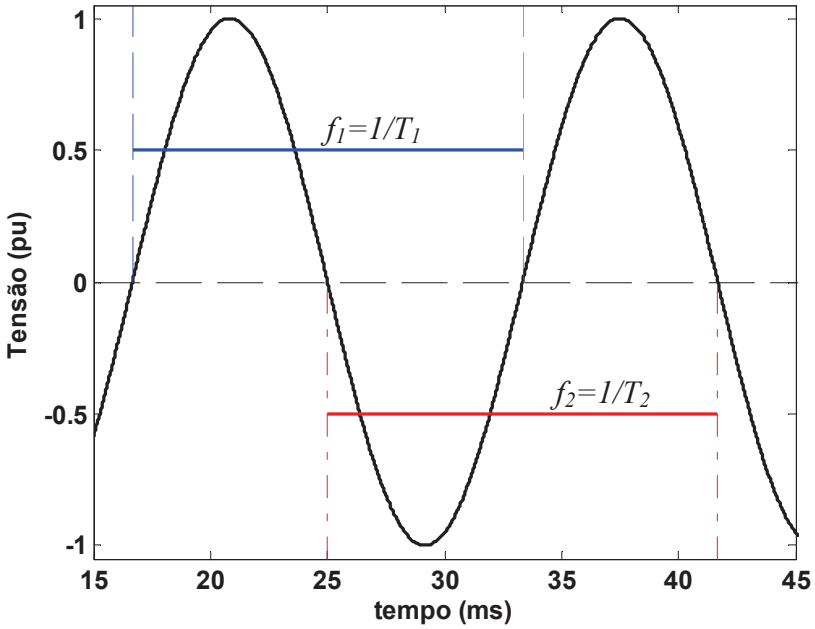


Figura 16 – Princípio de medição de frequência por cruzamentos consecutivos por zero.
Baseado em: [21].

A frequência f_1 é obtida a partir do período T_1 da Figura 16, e no próximo meio ciclo, o valor será atualizado pela frequência f_2, obtida medindo-se o período T_2. Na Figura 16, f_1 é obtida por cruzamentos crescentes, e f_2, decrescentes, o que é explicado de forma esquemática na Figura 17, sendo que como entrada tem-se a forma de onda da tensão, e saída, a frequência elétrica estimada.

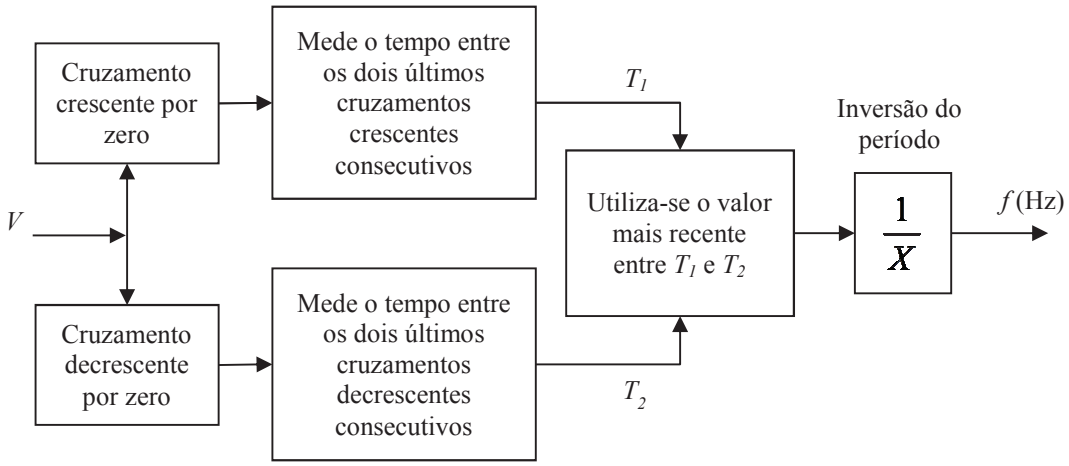


Figura 17 – Diagrama simplificado de estimação da frequência para o MSSF.

O modelo computacional no RSCAD desse método de estimação da frequência é apresentado na Figura 18. O modelo possui dois filtros, sendo que o filtro de entrada é um *Butterworth* passa-baixa de segunda ordem, ajustado na frequência de corte de 200 Hz, visando eliminar transitórios de alta frequência sem causar atraso significativo ao sinal. Já o filtro de saída possui as mesmas características, exceto pela frequência de corte, que foi ajustada em 30 Hz para eliminar as oscilações do sinal de frequência.

O modelo da Figura 18 é composto de duas etapas: uma estima a frequência f_1, e a outra, f_2. Como exemplo, observa-se como f_1 é estimada na Figura 18. Um detector de passagem de - para + acusa o cruzamento por zero, iniciando um contador de tempo. Quando ocorrer novamente o cruzamento de - para +, o contador é reinicializado e o valor é enviado à saída da posição *A* da chave, que então é invertido para obter a frequência. O mesmo ocorre para f_2, sendo que f_1 e f_2 são atualizados pela comutação das posições *A* e *B* da chave.

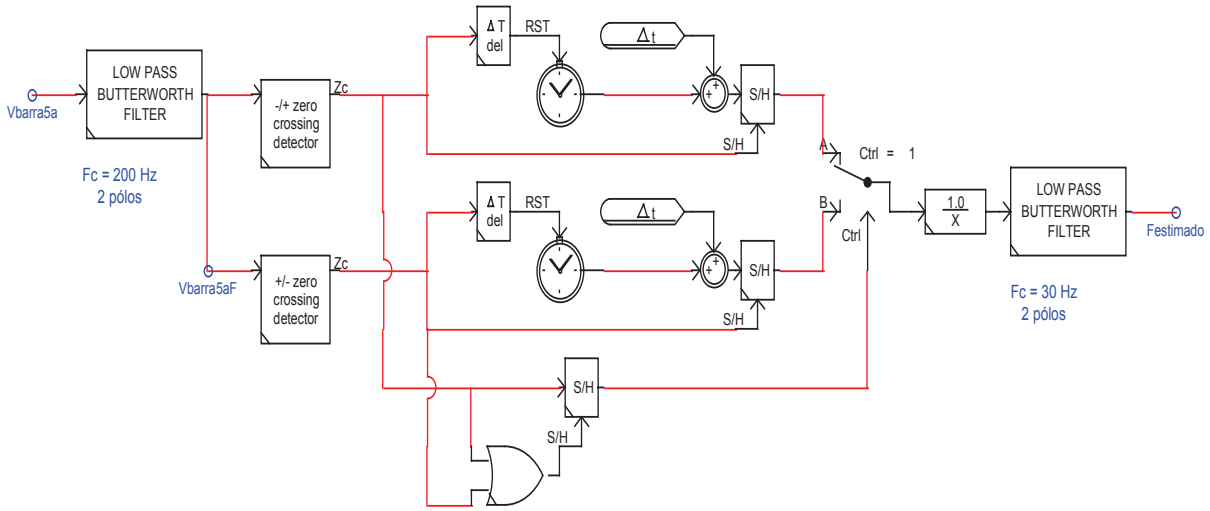


Figura 18 – Modelo da estimação de frequência do MSSF no RSCAD.

A frequência estimada é usada como entrada ao relé de SSF, exatamente igual ao usado no MSSW. Por meio da Figura 19 é apresentado o modelo no RSCAD, com um ajuste de ±0,5 Hz, e a entrada sendo a variável *Festimado*, que é a saída do modelo da Figura 18.

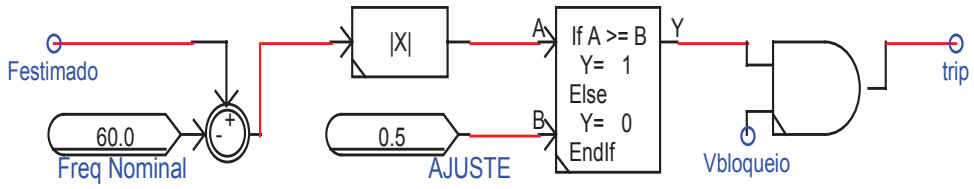


Figura 19 – Diagrama do MSSF no RSCAD.

3.3.3 Modelo computacional de TVF baseado na velocidade angular

A Figura 20 apresenta o diagrama esquemático do modelo do relé de taxa de variação da velocidade angular (MTVW) proposto em [1]. Esse modelo calcula a derivada da frequência baseando-se na frequência angular do gerador síncrono. O resultado da derivada é filtrado para atenuar as oscilações. O filtro foi representado por uma função de transferência de primeira ordem, com constante de tempo T_a igual a 0,1 s (como adotado em [1]).

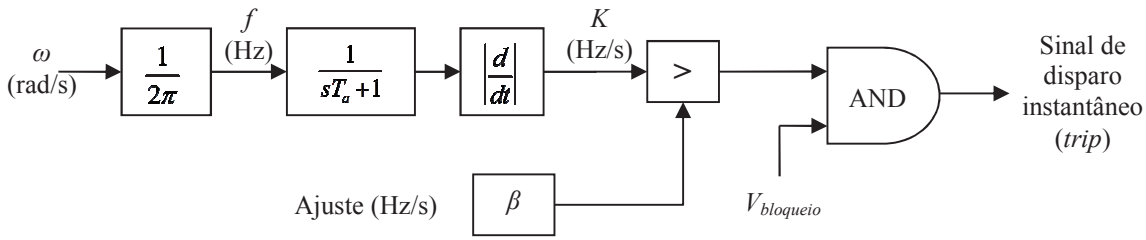


Figura 20 – Diagrama do MTVW.
Fonte: [1].

A modelagem dessa proteção no RSCAD é apresentada na Figura 21, para um exemplo em que o ajuste do MTVW é de 0,2 Hz/s.

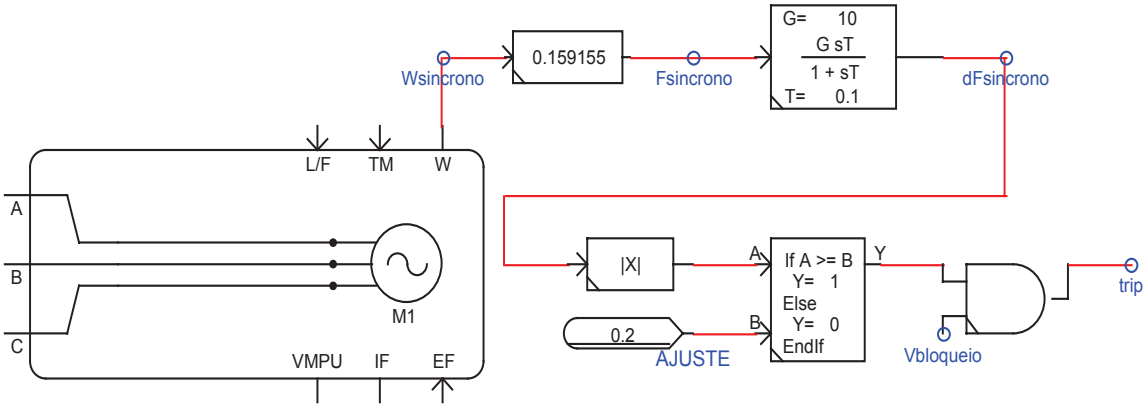


Figura 21 – Diagrama do MTVW no RSCAD.

3.3.4 Modelo computacional de TVF baseado no sinal de tensão

O modelo de taxa de variação de frequência baseado no sinal de tensão (MTVF) foi baseado na frequência estimada a partir no sinal de tensão terminal do GD, obtida por meio do método apresentado na Figura 16, Figura 17 e Figura 18.

O método de estimação da derivada da frequência foi realizado baseando-se na diferença entre a frequência medida no instante de tempo atual, *k*, e a frequência referente a um instante de tempo anterior, *k-1*, como apresentado na Figura 22.

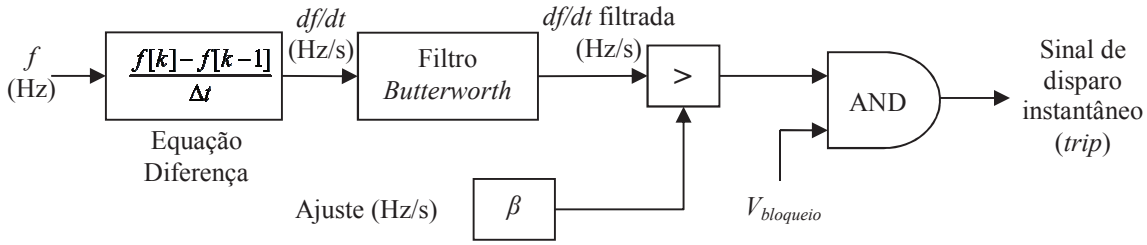


Figura 22 – Diagrama do MTVF.

O esquema apresentado na Figura 22 foi implantado no RSCAD como apresentado na Figura 23, sendo que a frequência *Festimado* de entrada é a saída da estimação apresentada na Figura 18.

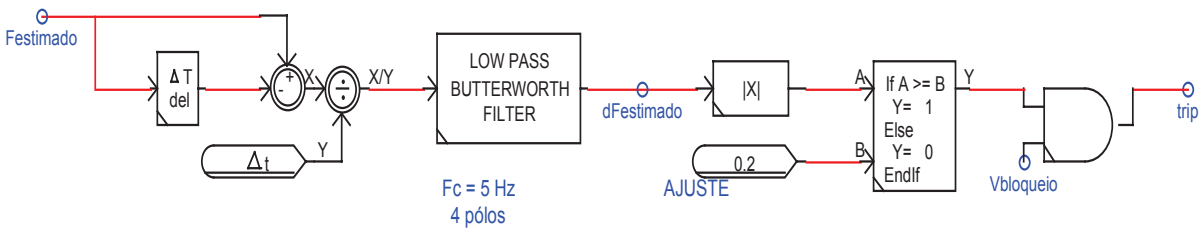


Figura 23 – Diagrama do MTVF no RSCAD.

3.3.5 Modelo computacional de DFA baseado no cruzamento por zero

A função de proteção de salto de vetor, ou chamada neste trabalho de função de deslocamento de fase (DFA), tem a propriedade de atuar para condições em que a variação do ângulo do sinal de tensão viola determinado ajuste da proteção.

Quando ocorre um ilhamento no sistema de potência, um transitório no sinal de tensão faz com que ocorra um desvio angular [1] [21], que pode ser observado na Figura 24. Nesta figura é apresentado um sinal em regime permanente e outro referente a um ilhamento ocorrido no tempo de 20,83 ms. O sinal de regime permanente tem o ângulo de 360°. Entretanto, o sinal referente ao ilhamento apresenta um ângulo maior, decorrente da alteração do período da forma de onda. Dessa forma, uma diferença angular $\Delta\theta=\theta_1-\theta_2$ é observada entre os sinais, que é então associada ao *trip* da proteção de DFA.

O princípio de medição da variação angular foi baseado no tempo de cruzamento por zero, como adotado em [21] e [22], formando então um modelo de deslocamento de fase baseado no cruzamento por zero (MDFA1). A estimação proposta neste trabalho busca comparar o tempo dos dois últimos ciclos do sinal de tensão com a referência de 720° (isto é, 2 ciclos de 360° em 60 Hz) produzidos na frequência fundamental de 60 Hz. A Figura 25 apresenta os pontos de cruzamento por zero do sinal de tensão, usados para explicar o método.

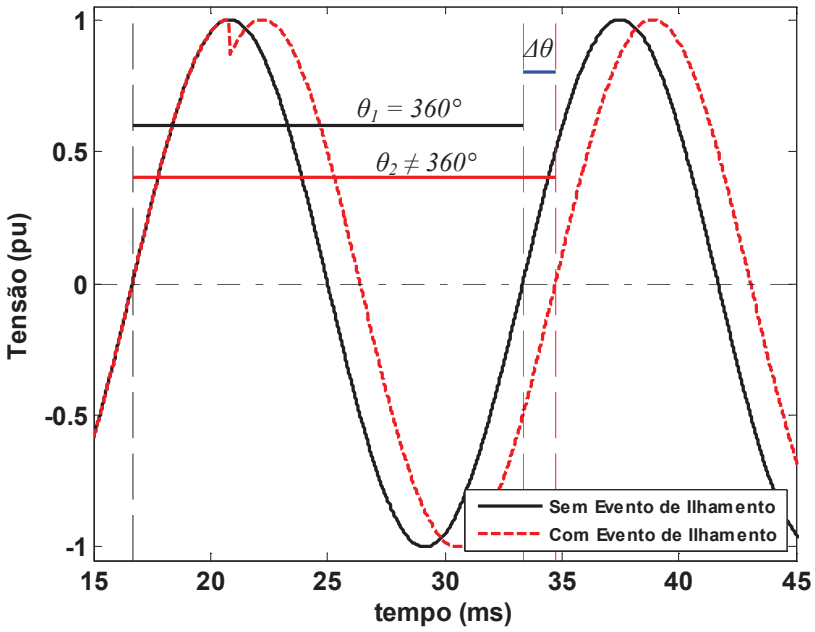


Figura 24 – Diferença angular resultante de um ilhamento.

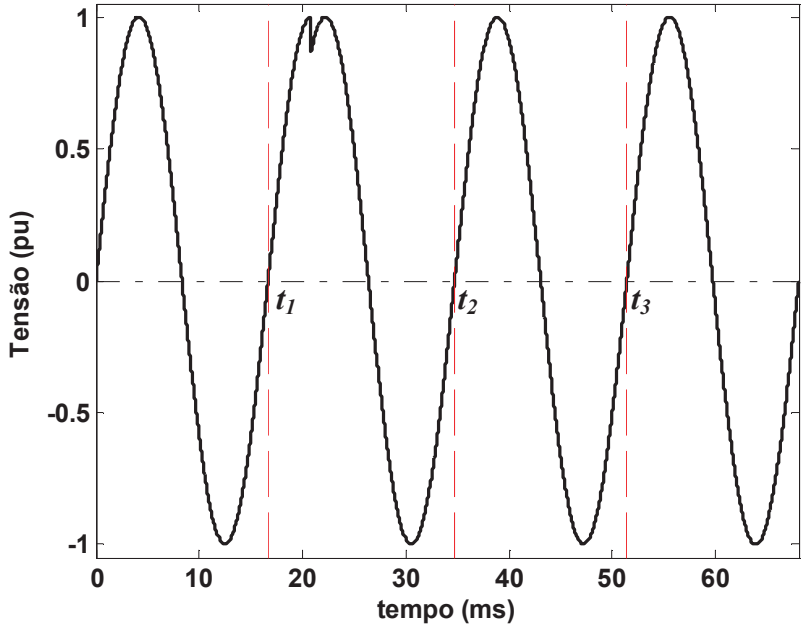


Figura 25 – Princípio do MDFA1.

Na Figura 25 são apresentados os tempos t_1, t_2 e t_3, cada um sendo equivalente a um ponto distinto de cruzamento crescente por zero. A diferença entre t_3 e t_1 equivale a dois ciclos completos do sinal. Se a forma de onda estivesse exatamente em 60 Hz, teria o tempo equivalente de *2/60 s*. O tempo equivalente entre os dois ciclos deve ser convertido para graus, para que então seja comparado com um valor de referência (ajuste da proteção de DFA). A conversão do tempo de cruzamento para graus é feita segundo a Equação (8), que relaciona um período na frequência nominal de 60 Hz com 360°.

$$\begin{array}{l} \frac{1}{60}[s] \longrightarrow 360[°] \\ (t_3 - t_1)[s] \longrightarrow \theta[°] \end{array} \quad \therefore \quad \theta = 360 \cdot 60 \cdot (t_3 - t_1) \tag{8}$$

O diagrama ilustrando a modelagem da função de DFA é apresentado na Figura 26. O modelo tem como entrada o sinal de tensão terminal do GD (fase *a* da barra 5 do sistema da Figura 9), e como saída, a diferença angular do sinal. Inicialmente é medida a diferença entre os tempos t_1 e t_3, que marcam os cruzamentos crescentes por zero apresentados na Figura 25. Após essa etapa, esse tempo é convertido para graus, e então é subtraído do valor de 720°, que é o ângulo de dois ciclos para a frequência nominal de 60 Hz.

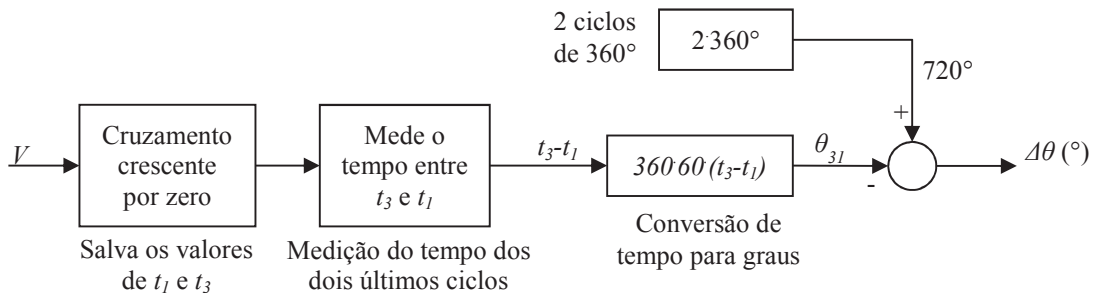


Figura 26 – Diagrama do MDFA1.

O modelo implementado no RSCAD é apresentado na Figura 27. Os blocos *ΔT del* provocam o atraso de um passo de integração no sinal de entrada. Esse valor é mantido pelo bloco *S/H* (*sample and hold*), até que um novo cruzamento por zero ocorra. Dessa maneira, é possível armazenar o valor do tempo no momento do cruzamento por zero, para que então seja calculado o tempo t_3-t_1. O modelo possui dois filtros, idênticos aos utilizados para o MSSF, com suas características apresentadas na Figura 27.

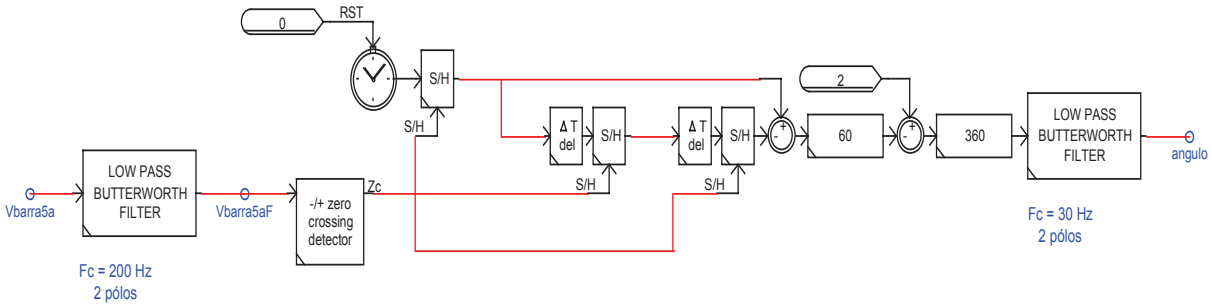


Figura 27 – Estimação da diferença angular no RSCAD.

O ângulo obtido pelo modelo da Figura 27 é inserido no relé da Figura 28, que então calcula o módulo do ângulo e o compara com o ajuste, que no exemplo da figura é 6°.

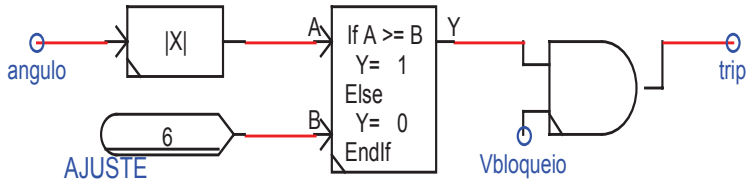


Figura 28 – Diagrama do MDFA1 no RSCAD.

3.3.6 Modelo computacional de DFA no Simulink

Esse modelo foi elaborado em [1] no ambiente Simulink® do MATLAB®, e tem como premissa obter o ângulo e compará-lo com uma referência que é atualizada a cada novo ciclo.

Para obter o ângulo em [1], foram utilizados os sinais de tensão das fases *a*, *b* e *c*, e então calculada, a partir da componente de sequência positiva, a transformada discreta de Fourier na frequência de 60 Hz, com janela deslizante de um ciclo. Esse processo de cálculo é realizado por um único bloco no Simulink®, e o ângulo é obtido em cada passo de integração.

O modelo de deslocamento de fase desenvolvido no Simulink® (MDFA2) se baseia na variação do ângulo. Então, o método empregado por obter $\Delta\theta$ em [1] segue o raciocínio apresentado na Figura 29. A cada novo ciclo do sinal de tensão da fase *a*, um ângulo de referência θ_0 é obtido. A cada novo passo de integração, θ é comparado com θ_0, até que o próximo ciclo determine um novo θ_0 de referência. A Figura 30 apresenta o modelo da função de proteção de DFA desenvolvida no Simulink®.

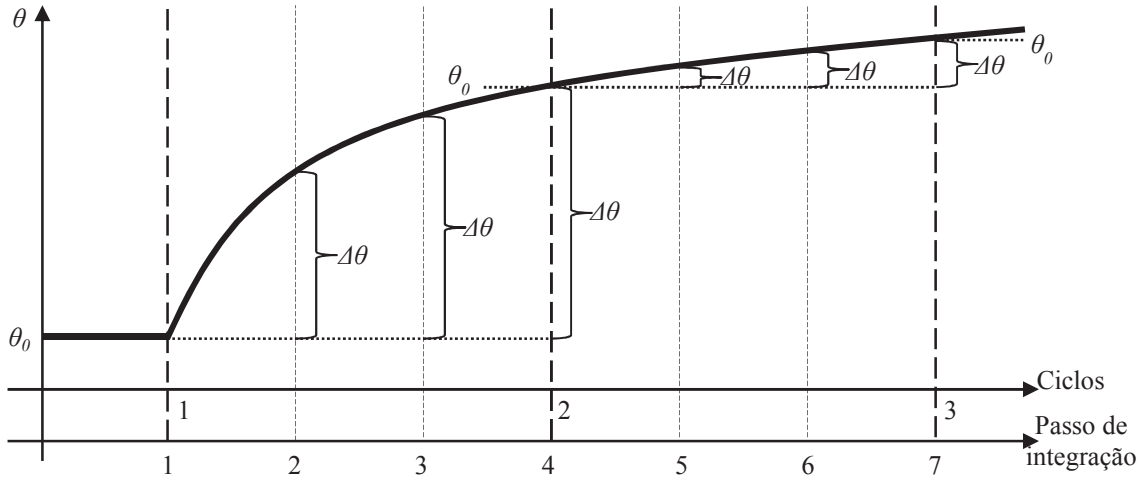


Figura 29 – Princípio de medição ângulo para o MDFA2.
Fonte: [1].

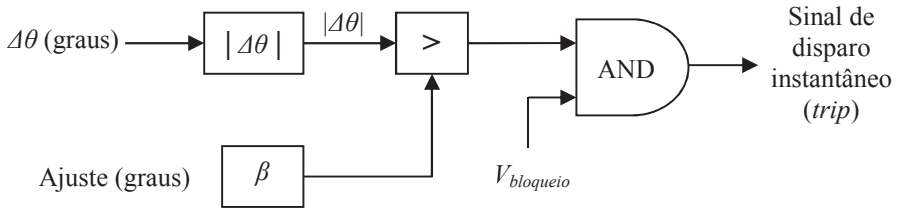


Figura 30 – Diagrama do MDFA2.
Fonte: [1].

3.4 Modelagem analítica considerando cargas potência constante

Os modelos apresentados nesta seção representam o comportamento das proteções para sistemas com cargas modeladas como potência constante. Para outros modelos de carga, adaptações são necessárias nas equações, como será visto na próxima seção.

A seguir, são apresentados os modelos analíticos de SSF e TVF propostos em [1] [27], e o modelo analítico de DFA proposto nessa dissertação e baseado em [1]. Esses modelos baseiam-se nas equações que representam a dinâmica de máquinas síncronas [1] [8].

3.4.1 Equação analítica de SSF

A equação analítica do relé de sub/sobre frequência (EQSSF) atuando como proteção anti-ilhamento foi proposta em [1] [27], em que, com base nas equações que representam o comportamento dinâmico da velocidade angular de um gerador síncrono, foi possível obter uma equação equivalente de tempo de atuação da proteção.

A Equação (9) apresenta a variação da velocidade angular do rotor do gerador síncrono quando ocorre um desbalanço entre carga e geração [8], sendo que H é a constante de inércia do gerador (em segundos), ω_0 é a velocidade angular síncrona (em rad/s), ω é a velocidade angular do rotor (rad/s), P_M é a potência mecânica fornecida pelo gerador (em pu), P_E é a potência ativa demandada pelas cargas (em pu) e ΔP é o desbalanço de potência ativa (em pu).

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt} = P_M - P_E = \Delta P \tag{9}$$

A frequência angular variante no tempo é apresentada na Equação (10), e foi obtida integrando a Equação (9) para a variável ω, como apresentado em [27].

$$\omega = \frac{\omega_0 \Delta P}{2H} t + \omega_0 \tag{10}$$

Manipulando a Equação (10), é possível obter uma relação de variação da frequência angular, como é expresso na Equação (11).

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 = \frac{\omega_0 \Delta P}{2H} t \tag{11}$$

Na Equação (12), ω foi substituído para encontrar a frequência elétrica, sendo que $\omega = 2\pi f$ e f_0 é a frequência elétrica nominal (em Hz).

$$\Delta f = \frac{f_0 \Delta P}{2H} t \tag{12}$$

No limiar de detecção da proteção, Δf é igual ao ajuste de SSF (β), que é um valor positivo, como, por exemplo, 1 Hz, que representa o ajuste de 59 e 61 Hz. Como $\Delta f = \beta$, t será o tempo de detecção do ilhamento (t_d), como mostra a Equação (13).

$$\beta = \frac{f_0 \Delta P}{2H} t_d \tag{13}$$

Isolando t_d e inserindo o valor da temporização T_{set}, é apresentado na Equação (14) o modelo analítico de SSF.

$$t_d = \frac{2H\beta}{f_0 \Delta P} + T_{set} \tag{14}$$

3.4.2 Equação analítica de TVF

Em [1] foi desenvolvida uma equação analítica do relé de taxa de variação de frequência (EQTVF) para detecção de ilhamento. O cálculo da TVF é baseado na Equação (15).

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} \Delta P \tag{15}$$

Da Equação (15), o termo ω é convertido para f, tendo então uma relação df/dt de variação de frequência elétrica no tempo (em Hz/s), apresentada na Equação (16).

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_0 \Delta P}{2H} \tag{16}$$

Na Equação (16), *df/dt* é calculada sem a presença de filtros. Dessa forma, um filtro de primeira ordem foi inserido no modelo analítico, representando a função de transferência do modelo da Figura 20. O filtro foi representado por uma função de transferência de primeira ordem, com constante de tempo T_a (Figura 20), como apresentado na Equação (17), sendo que K representa a derivada *df/dt*, como apresentado na Figura 20 e proposto em [1].

$$K = \frac{f_0 \Delta P}{2H} \frac{1}{\left(T_a s + 1\right)} \tag{17}$$

Para converter a Equação (17) para o domínio do tempo, usa-se a transformada inversa de Laplace, e a informação de que *df/dt=0* no tempo *t=0*, isto é, antes da ocorrência do ilhamento, a frequência está em seu valor nominal e sem sofrer variações. A Equação (18) apresenta a variação de frequência no domínio do tempo.

$$K = \frac{f_0 \Delta P}{2H} \left(1 - e^{\frac{-t}{T_a}} \right) \tag{18}$$

No limiar de detecção da proteção, *df/dt* é igual ao ajuste de TVF (β), como, por exemplo, o ajuste de 0,2 Hz/s. Como $df/dt = \beta$, t será o tempo de detecção do ilhamento (t_d), como mostra a Equação (19).

$$\beta = \frac{f_0 \Delta P}{2H} \left(1 - e^{\frac{-t_d}{T_a}} \right) \tag{19}$$

Por fim, a Equação (20) apresenta o resultado analítico de quando o tempo t_d é isolado na Equação (19). Na Equação (20), T_{set} é a temporização dessa função de proteção e Δt representa o tempo mínimo de atraso do cálculo da taxa de variação de frequência (em segundos).

$$t_d = -T_a \ln\left(1 - \frac{2H\beta}{f_0 \Delta P}\right) + \Delta t + T_{set} \tag{20}$$

3.4.3 Equação analítica de DFA

Em [1], uma equação analítica do relé de deslocamento de fase (EQDFA) foi desenvolvida, mas foi considerado que a estimativa da diferença angular ocorre em 1 ciclo. Neste trabalho, um novo modelo analítico foi proposto, o qual considera a variação angular em dois ciclos, de acordo com o MDFA1 e baseando-se nos princípios impostos em [1].

O modelo analítico proposto parte da equação de oscilação da máquina síncrona [8], apresentada na Equação (21), sendo que H é a constante de inércia do gerador (em segundos), ΔP é o desbalanço entre a potência mecânica e elétrica (em pu), ω_0 é a velocidade angular síncrona (rad/s) e δ deslocamento angular do rotor (em radianos) em relação a um eixo de referência que gira na velocidade síncrona.

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P \tag{21}$$

Integrando a Equação (21) e isolando o termo δ, uma expressão do ângulo é obtida, como apresentada na Equação (22), em que δ_0 é o deslocamento angular inicial.

$$\delta = \frac{\omega_0 \Delta P}{4H} t^2 + \delta_0 \tag{22}$$

Essa equação se baseia na atuação da proteção de DFA, para quando certo valor de ângulo é excedido. A variação do ângulo, $\Delta\delta$, é a diferença entre o ângulo inicial δ_i e ângulo final δ_f, que são calculados como apresentado no sistema de equações (23).

$$\begin{cases} \delta_f = \dfrac{\omega_0 \Delta P}{4H} t_f^{\,2} + \delta_0 \\ \delta_i = \dfrac{\omega_0 \Delta P}{4H} t_i^{\,2} + \delta_0 \end{cases} \tag{23}$$

No sistema de equações (23), o ângulo final δ_f é calculado para o tempo final t_f, e o ângulo inicial δ_i para o tempo inicial t_i.

Como visto na Figura 25, o ângulo do MDFA1 é obtido comparando os instantes em que ocorre o cruzamento por zero (instantes t_1 e t_3 da Figura 25), que se separam por dois ciclos consecutivos. De forma similar ao modelo computacional, os tempos t_f e t_i do sistema de equações (23) são usados para comparar a variação angular, sendo que o tempo final t_f é o tempo atual t, e o tempo inicial t_i está atrasado em dois ciclos em relação ao t_f.

A comparação do deslocamento angular é apresentada na Equação (24).

$$\Delta\delta = \delta_f - \delta_i = \left(\frac{\omega_0 \Delta P}{4H} t_f^{\,2} + \delta_0\right) - \left(\frac{\omega_0 \Delta P}{4H} t_i^{\,2} + \delta_0\right) = \frac{\omega_0 \Delta P}{4H}\left(t_f^{\,2} - t_i^{\,2}\right) \tag{24}$$

A Equação (24) relaciona a variação angular $\Delta\delta$ com os tempos t_f e t_i. Como t_f é referente ao tempo atual t, e t_i varia em função de t, as expressões de t_f e t_i são então adaptadas, como apresentadas no sistema de equações (25), sendo que c é o número de ciclos anteriores usados na comparação (dada em ciclos de 60 Hz) e T_0 é o período do sinal na frequência nominal.

$$\begin{cases} t_f = t \\ t_i = t - cT_0 \end{cases} \tag{25}$$

No sistema de equações (25), c é 2 ciclos, o que condiz ao que foi estipulado no MDFA1, isto é, a variação angular é calculada entre o ângulo atual é o ângulo obtido em dois ciclos anteriores. Se c=1 ciclo, o deslocamento angular é calculado a cada ciclo.

Substituindo os tempos t_f e t_i da Equação (25) na Equação (24), é obtido o equivalente apresentado na Equação (26).

$$\Delta\delta = \frac{\omega_0 \Delta P}{4H}\left[t^2 - \left(t - cT_0\right)^2\right] = \frac{\omega_0 \Delta P}{4H}\left[t^2 - \left(t^2 - 2cT_0 t + c^2 T_0^{\,2}\right)\right] \tag{26}$$

Simplificando os termos da Equação (26), obtém-se a Equação (27).

$$\Delta\delta = \frac{\omega_0 \Delta P}{4H}\left(2cT_0 t - c^2 T_0^{\,2}\right) = \frac{\omega_0 \Delta P c T_0}{4H}\left(2t - cT_0\right) \tag{27}$$

Simplificando a Equação (27), e sabendo que $T_0=1/f_0$, em que f_0 é a frequência nominal, obtém-se a Equação (28).

$$\Delta\delta = \frac{2\pi f_0 \Delta P c}{4Hf_0}\left(2t - cT_0\right) = \frac{\pi \Delta P c}{2H}\left(2t - \frac{c}{f_0}\right) \tag{28}$$

No limiar de detecção da proteção, $\Delta\delta$ é igual ao ajuste de DFA (β), que é um valor positivo, dado em radianos. Como $\Delta f=\beta$, t será o tempo de detecção do ilhamento (t_d) da EQDFA, como mostra a Equação (29).

$$\beta = \frac{\pi c \Delta P}{H}\left(t_d - \frac{c}{2f_0}\right) \tag{29}$$

Isolando t_d e inserindo o valor da temporização T_{set}, é apresentado na Equação (30) o modelo analítico de DFA.

$$t_d = \frac{H\beta}{\pi c \Delta P} + \frac{c}{2f_0} + T_{set} \tag{30}$$

3.5 Equações empíricas para cargas dependentes da tensão

As equações apresentadas na seção anterior representam o comportamento das proteções considerando cargas do tipo potência constante, porém não se aplicam com exatidão para cargas do tipo corrente e impedância constante. Dessa forma, nesse trabalho foram usadas as equações propostas em [1], sendo que foi desenvolvido um método de correção para que as equações possam ser aplicadas quando se consideram as cargas dependentes da tensão.

O procedimento desenvolvido em [1] é um método empírico de obtenção das curvas de desempenho, que corrige o desbalanço ΔP em função da carga e da condição operativa do sistema elétrico. Para a correção do ΔP, inicialmente é definido o índice de tipo de carga equivalente, NP_t, conforme é apresentada na Equação (31) e explicado com detalhes em [1].

$$NP_t = \sum_{i=1}^{n_{bar}} \frac{P_i}{P_T} n_{p_i} \tag{31}$$

Na Equação (31), NP_t é o índice de tipo de carga equivalente, P_T é a potência ativa total das cargas do sistema elétrico (em pu), n_{bar} é o número de barras do sistema elétrico e P_i é a potência ativa da carga (em pu) conectada ao nó i. Caso à n_{pi} sejam atribuídos valores entre 0 e 2, NP_t também assumirá valores entre 0 e 2. Adicionalmente, quanto maior o valor de NP_t maior é a variação do desbalanço da potência ativa em função da tensão [1]. Observa-se que se todas as cargas forem modeladas como P_{cte}, então $NP_t = 0$; modeladas como I_{cte}, então $NP_t = 1$; e modeladas como Z_{cte}, então $NP_t = 2$.

Após calcular o índice NP_t, usa-se a Equação (32) para calcular o fator de correção do desbalanço de potência ativa (P_{fac}), que depende do NP_t e de uma constante de correção k.

$$P_{fac} = 1 + k \cdot NP_t \tag{32}$$

A Equação (32) foi baseada na metodologia proposta em [1], em que o valor de k foi mantido constante em 0,2/2 = 0,1. Entretanto, neste trabalho foi visto que a constante k deve ser diferente para cada tipo de carga e condição operativa, o que levou à alteração da equação.

Na Tabela 2 são apresentadas as constantes k para cada modelo analítico, cada tipo de carga e tipo de condição operativa. Os três tipos de carga são os modelos P_{cte}, Z_{cte} e I_{cte}. As quatro condições operativas são de déficit de potência ativa e reativa (DPDQ), déficit de potência ativa e excesso de potência reativa (DPEQ), excesso de potência ativa e déficit de potência reativa (EPDQ) e excesso de potência ativa e reativa (EPEQ)[2].

As cargas de modelos P_{cte} não foram apresentadas na Tabela 2, pois as equações para esse tipo de carga são as próprias equações analíticas apresentadas anteriormente, independentemente das quatro condições operativas mencionadas.

Tabela 2 – Valor da constante k para cada tipo de carga, cenário e equação.

	Valor da constante *k* para cada carga, cenário operativo e equação							
	Z_{cte}				I_{cte}			
	DPDQ	**DPEQ**	**EPDQ**	**EPEQ**	**DPDQ**	**DPEQ**	**EPDQ**	**EPEQ**
EQSSF	-0,15	+0,04	+0,20	-0,04	-0,20	+0,04	+0,30	-0,04
EQTVF	-0,11	+0,04	+1,00	-0,04	-0,30	+0,04	+2,00	-0,04
EQDFA	-0,15	+0,04	+0,20	-0,04	-0,20	+0,04	+0,30	-0,04

[2] Na seção 4.1 serão explicados os quatro casos operativos, e na seção 5.1 o motivo de serem simulados.

Observa-se pela Tabela 2 que o valor da constante k varia de um caso para outro, para cada modelo analítico. Para cada caso da EQSSF e EQDFA, k é sempre a mesma. Entretanto, para a EQTVF os valores são distintos.

Os valores da constante k apresentados na Tabela 2 foram obtidos comparando as respostas dos relés comerciais com a resposta das equações. A constante k foi variada, e na Tabela 2 são apresentados os resultados visualmente mais próximos dos relés comerciais.

Com NP_t e k definidos, o índice P_{fac} é determinado para cada tipo de carga e condição operativa do sistema. Assim, P_{fac} é usado para corrigir ΔP dos modelos analíticos.

Em [1] foram especificados o ΔP_0 como o desbalanço de potência ativa imediatamente antes da ocorrência do ilhamento e o ΔP_F como desbalanço de potência ativa resultante. O ΔP_0 é o desbalanço apresentado nas equações das funções de proteção da seção 3.4 (Equações (14), (20) e (30)), e deve ser corrigido para ΔP_F quando a simulação envolver modelos de cargas dependentes da tensão.

Em [1] foi admitido que o fator de correção, para as equações das proteções de sub/sobre frequência e de defasamento de fase, afeta o desbalanço de potência ativa de forma exponencial, e o desbalanço de potência ativa resultante, ΔP_F, é dado pela Equação (33).

$$\Delta P_F = \Delta P_0^{\frac{1}{P_{fac}}} \tag{33}$$

Já para a equação do relé de taxa de variação de frequência, em [1] foi estipulada uma equação conservativa que obtém ΔP_F a partir de ΔP_0, o tipo de carga e o ajuste da função de TVF. A Equação (34) apresenta o resultado obtido em [1].

$$\Delta P_F = e^{\frac{\ln(\Delta P_0)}{0{,}0843\ln(\beta)+P_{fac}^{NP_t}}} \tag{34}$$

O valor do desbalanço corrigido ΔP_F, dado na Equação (33), deve substituir ΔP nas Equações (14) e (30), que correspondem à proteção de sub/sobre frequência e de deslocamento de fase, respectivamente. Já ΔP_F obtido em (34) deve substituir ΔP na Equação (20), para a proteção de taxa de variação de frequência.

Capítulo 4

Obtenção das Curvas de Desempenho

Este capítulo apresenta o método para obtenção das curvas de desempenho dos modelos computacionais e relés de proteção comerciais, como também a forma de conexão dos dispositivos quando realizados os ensaios experimentais em malha fechada.

Incialmente é apresentada a rotina de simulações para obtenção das curvas de desempenho no RTDS®. Em seguida, serão apresentadas as características individuais de cada um dos relés de proteção comerciais e as conexões dos dispositivos externos ao RTDS® para realizar simulações em malha fechada.

4.1 Método de obtenção das curvas de desempenho no RTDS®

Como apresentado na seção 2.4, as curvas de desempenho mostram a relação entre o tempo de atuação da proteção anti-ilhamento e o desbalanço de potência ativa no sistema ilhado. Para obter uma curva de desempenho é preciso causar um ilhamento no sistema e medir o tempo de atuação da proteção que se pretende analisar. São analisadas diversas condições operativas, que variam entre si pela quantidade de potência ativa transferida entre a região ilhada e o restante do sistema antes da ocorrência do ilhamento.

O evento de ilhamento é causado pela abertura do disjuntor D_J no sistema elétrico da Figura 31. Assim, ocorre a formação de uma ilha energizada envolvendo as barras 3, 4 e 5.

A condição operativa varia em função da potência ativa injetada pelo GD e da demanda de potência das cargas. A Figura 31 apresenta o sistema elétrico no qual é visto que a potência das cargas e do GD são controladas e ajustadas para obter diferentes valores de desbalanço de potência ativa (ΔP).

O desbalanço de potência ativa é igual à potência que flui no disjuntor D_J no instante anterior à abertura que causa o ilhamento. O valor de ΔP depende da potência injetada pelo gerador síncrono distribuído, da potência das cargas, bem como das perdas de potência ativa. Quanto maior ΔP no momento da abertura do disjuntor, maior será a variação da frequência,

fazendo com que a detecção do ilhamento seja rápida. Para valores baixos de ΔP, a variação de frequência é pequena, levando a tempos maiores de atuação das proteções anti-ilhamento.

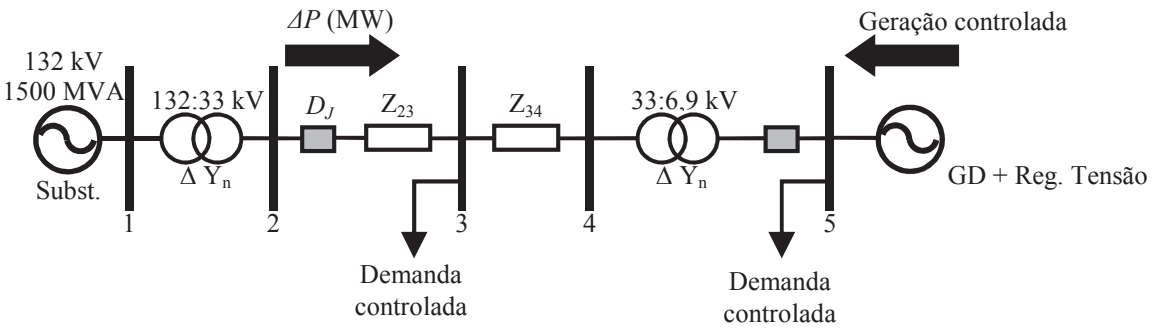


Figura 31 – Variação do desbalanceamento de potência ativa.

No instante do ilhamento, é possível que se tenha uma condição de déficit ou excesso de potências ativa ou reativa. Essas condições podem ser obtidas nas simulações por meio da escolha correta de certos parâmetros. É preciso analisar se as variações de ΔP são referentes ao excesso de consumo ou de geração, representando déficit e excesso de potência ativa na ilha, respectivamente. O déficit ou excesso de potência reativa também deve ser analisado.

Para o sistema da Figura 31, os quatro cenários operativos são:

1) Déficit de Potência Ativa e Reativa (DPDQ):

- <u>Controle do Desbalanço de Potência Ativa</u>
  - Torque mecânico do GD varia de 0 a 1 pu;
  - Carga da barra 3: fixa em 20 MW e 7 MVAr;
  - Carga da barra 5: fixa em 10 MW e 4 MVAr.
- <u>Controle do Desbalanço de Potência Reativa</u>
  - Tensão de referência do regulador de tensão do GD fixa em 1 pu.

2) Déficit de Potência Ativa e Excesso de Potência Reativa (DPEQ):

- <u>Controle do Desbalanço de Potência Ativa</u>
  - Torque mecânico do GD varia de 0 a 1 pu;
  - Carga da barra 3: fixa em 20 MW e 7 MVAr;
  - Carga da barra 5: fixa em 10 MW e 4 MVAr.
- <u>Controle do Desbalanço de Potência Reativa</u>
  - Tensão de referência do regulador de tensão do GD fixa em 1,05 pu.

3) Excesso de Potência Ativa e Déficit de Potência Reativa (EPDQ):

- Controle do Desbalanço de Potência Ativa
  - Torque mecânico do GD fixo em 1 pu;
  - Carga da barra 3: varia de 0 a 20 MW, mantendo-se o fator de potência constante;
  - Carga da barra 5: varia de 0 a 10 MW, mantendo-se o fator de potência constante.
- Controle do Desbalanço de Potência Reativa
  - Tensão de referência do regulador de tensão do GD fixa em 1 pu.

4) Excesso de Potência Ativa e Reativa (EPEQ):

- Controle do Desbalanço de Potência Ativa
  - Torque mecânico do GD fixo em 1 pu;
  - Carga da barra 3: varia de 0 a 20 MW, mantendo-se o fator de potência constante;
  - Carga da barra 5: varia de 0 a 10 MW, mantendo-se o fator de potência constante.
- Controle do Desbalanço de Potência Reativa
  - Tensão de referência do regulador de tensão do GD fixa em 1,05 pu.

Para obter as curvas de desempenho na simulação em laço fechado para relés comerciais, foi desenvolvida uma rotina no RTDS®. O RTDS® permite escrever uma rotina (ou *script*) para automatizar a simulação quando se deseja analisar várias condições operativas. Essa rotina é implantada no ambiente *RunTime*, de forma a obter os relatórios com os dados brutos de simulação. A rotina de simulações realizadas é apresentada pelo fluxograma[3] da Figura 32, contemplando os quatro casos operativos apresentados.

Na Figura 32, $V_{referência}$ é a tensão de referência do regulador automático de tensão do GD, e P_3 e P_5 são respectivamente as cargas ativas das barras 3 e 5, Q_3 e Q_5 são respectivamente as cargas reativas das barras 3 e 5, e T_M é o torque mecânico do GD.

[3] A simbologia adotada para o fluxograma seguiu a norma ISO 5807:1985: *Information processing - Documentation symbols and conventions for data, program and system flowcharts, program network charts and system resources charts*.

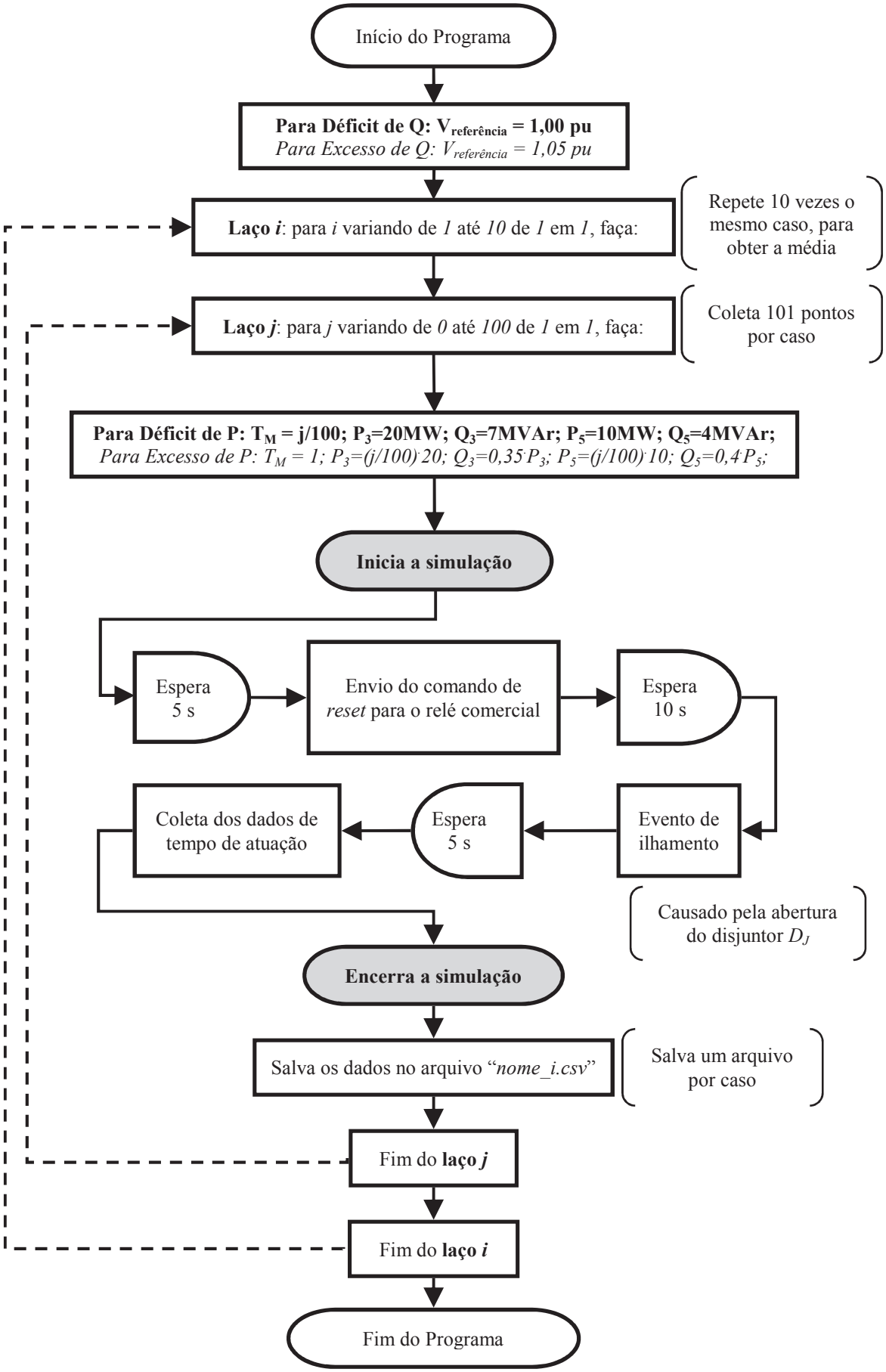


Figura 32 – Fluxograma da rotina de simulações do RTDS®.

No arquivo gerado pela rotina da Figura 32 são salvos os valores do: torque mecânico do gerador, desbalanço de potência ativa e reativa, potência ativa e reativa fornecida pelo gerador e tempo de detecção da função de proteção em teste. Cada um dos 101 casos (laço interno) apresenta essa lista de informações.

A rotina da Figura 32 gera 10 arquivos de saída. Esses arquivos representam as mesmas condições de operação. Essa repetição é feita para obter a média dos 10 resultados do tempo de atuação dos relés comerciais. Assim, 10 arquivos de 101 casos totalizam 1.010 dados a cada vez que essa rotina é executada.

O arquivo com os resultados da simulação é salvo no formato "*csv*". Esse arquivo é lido usando a ferramenta computacional MATLAB® utilizando uma rotina computacional nela desenvolvida, que faz a média do sinal, de forma a obter uma curva representativa dos dados brutos do relatório. A partir da leitura dos dados, as curvas de desempenho são geradas.

Em média, a rotina da Figura 32 é executada em sete horas e quarenta e cinco minutos. Apenas um ajuste por função de proteção é ensaiado por vez. Vale ressaltar que boa parte desse tempo é devido às temporizações inseridas no algoritmo da Figura 32, representadas por três blocos de espera de *5* segundos cada um. Essas temporizações foram inseridas para que fosse garantido que o sistema de potência entrasse em regime permanente, e que os relés estivessem recebendo um sinal adequado antes da ocorrência do ilhamento.

4.2 Equipamentos usados para a simulação em malha fechada

Para executar as simulações em malha fechada para ensaio das funções de proteção dos relés comerciais, utilizou-se o simulador RTDS®, um amplificador e dois relés comerciais. A seguir será comentado sobre os relés comerciais utilizados, para que então seja apresentado o procedimento de simulação em malha fechada.

4.2.1 Relés comerciais ensaiados

Os relés comerciais ensaiados nesta dissertação possuem as três funções de proteção usadas: a de SSF, TVF e DFA. Entretanto, são relés de fabricantes distintos e que contêm certas particularidades cada um. A seguir serão apresentadas as questões comuns entre eles.

- Tensão nominal: 115 V_{RMS} entre fase e neutro;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Saídas auxiliares: contato seco;
- Conexão interna dos transformadores de tensão: estrela com neutro;
- Ambos os relés comerciais possuem um programa computacional próprio desenvolvido pelo fabricante, que é usado para parametrização.

Sobre o relé comercial 1 (COM1[4]), algumas informações e particularidades são apresentadas a seguir:

- O COM1 não permite que as funções de proteção de TVF e DFA operem de forma simultânea. Isso faz com que o tempo de ensaios dobre, já que não é possível ensaiar as três funções de proteção ao mesmo tempo;
- Saídas auxiliares utilizadas:
  - Atuação de SSF: saída D_1, conectada na entrada digital 1 do RTDS®;
  - Atuação de TVF ou DFA: saída D_2, conectada na entrada digital 2 do RTDS®;
- As funções de SSF e TVF não têm atuação instantânea, somente temporizada;
- A função DFA não tem atuação temporizada, apenas instantânea.
- As temporizações das três funções de proteção foram parametrizadas como segue:
  - Função de SSF: 120 ms;
  - Função de TVF: 2 ciclos = 2/60 s = 33,33 ms;
  - Função de DFA: 0 s (instantâneo);
- COM1 precisa que um sinal de tensão seja aplicado em seus terminais de *reset* externo para a sua reinicialização, de forma que o relé interprete que está operando em regime permanente. Isso ocorre pela inserção de um sinal de tensão de 15 V de pico nos terminais *external reset* do COM1.
- COM1 tem a interface de comunicação RS485. Dessa maneira, um computador foi usado para se comunicar com o relé, sendo empregado um conversor RS485/RS232, responsável pela interface física de comunicação entre COM1 e a entrada RS232 do computador.

[4] Os modelos dos relés e os nomes dos respectivos fabricantes foram omitidos neste trabalho a fim de evitar qualquer promoção de um modelo em detrimento ao outro, uma vez que ambos serão comparados.

O relé comercial 2 (COM2) tem as seguintes propriedades:

- As três funções de proteção podem ser ensaiadas simultaneamente;
- Saídas auxiliares utilizadas:
  - Atuação de SSF: saída D_6, conectada na entrada digital 6 do RTDS®;
  - Atuação de TVF: saída D_7, conectada na entrada digital 7 do RTDS®;
  - Atuação de DFA: saída D_8, conectada na entrada digital 8 do RTDS®;
- As funções de SSF e TVF tem atuação temporizada partindo de 2 ciclos = 33,33 ms;
- A função DFA tem atuação instantânea e temporizada;
- A função de TVF atua apenas para os casos de sub frequência. Isso ocorre porque a TVF nesse relé é específica para corte de carga;
- As temporizações das três funções de proteção foram parametrizadas como:
  - Função de SSF: 120 ms + 2 ciclos = 153,33 ms;
  - Função de TVF: 2 ciclos = 2/60 s = 33,33 ms;
  - Função de DFA: 0 s (instantâneo);
- COM2 não precisa de inicialização;
- COM2 se comunica pelo padrão Ethernet por meio de fibra óptica. Para isso, um conversor de fibra óptica para par trançado foi utilizado. Um endereço *internet protocol* (IP) foi selecionado para COM2, permitindo a comunicação entre o computador e COM2 por uma rede Ethernet local.

Observando os ajustes de temporização do COM1 e COM2, nota-se que as funções de SSF não estão com mesmo valor. Dessa forma, quando são comparados os resultados dos modelos de atuação instantânea com o COM1, foi somado ao tempo dos modelos da proteção de sub/sobre frequência (modelo dependente da velocidade do gerador, dependente da tensão e equação) o valor de 120 ms. Já quando comparado com o COM2, foi somado o tempo de 153,33 ms. O mesmo vale para a proteção de TVF, que também é temporizada.

4.2.2 Simulação em malha fechada

A Figura 33 apresenta a conexão dos equipamentos usados na simulação em malha fechada (RTDS®+ amplificador + relé comercial 1). O diagrama apresenta o RTDS® de forma detalhada, separando os ambientes computacionais, como também o hardware do software.

Na Figura 33, dentro do bloco que representa o RTDS®, são apresentados os ambientes de simulação do *Draft* e *RunTime*. No *Draft* foram modelados o sistema elétrico e as três funções de proteção propostas. Nesse mesmo ambiente foi inserido um medidor de tensão na barra a qual o relé está conectado (barra 5 do sistema da Figura 8). Assim, os sinais instantâneos da tensão V_a, V_b e V_c são enviados a um bloco de saída analógica, juntamente com um sinal de *reset* (V_r), que é uma onda senoidal de 15 V de amplitude, usada como um comando que inicializa o relé a cada nova simulação. Os sinais analógicos *a*, *b* e *c* de referência são proporcionais à tensão de fase ao neutro da barra 5 do sistema da Figura 9 (que é 6,9/√3 kV).

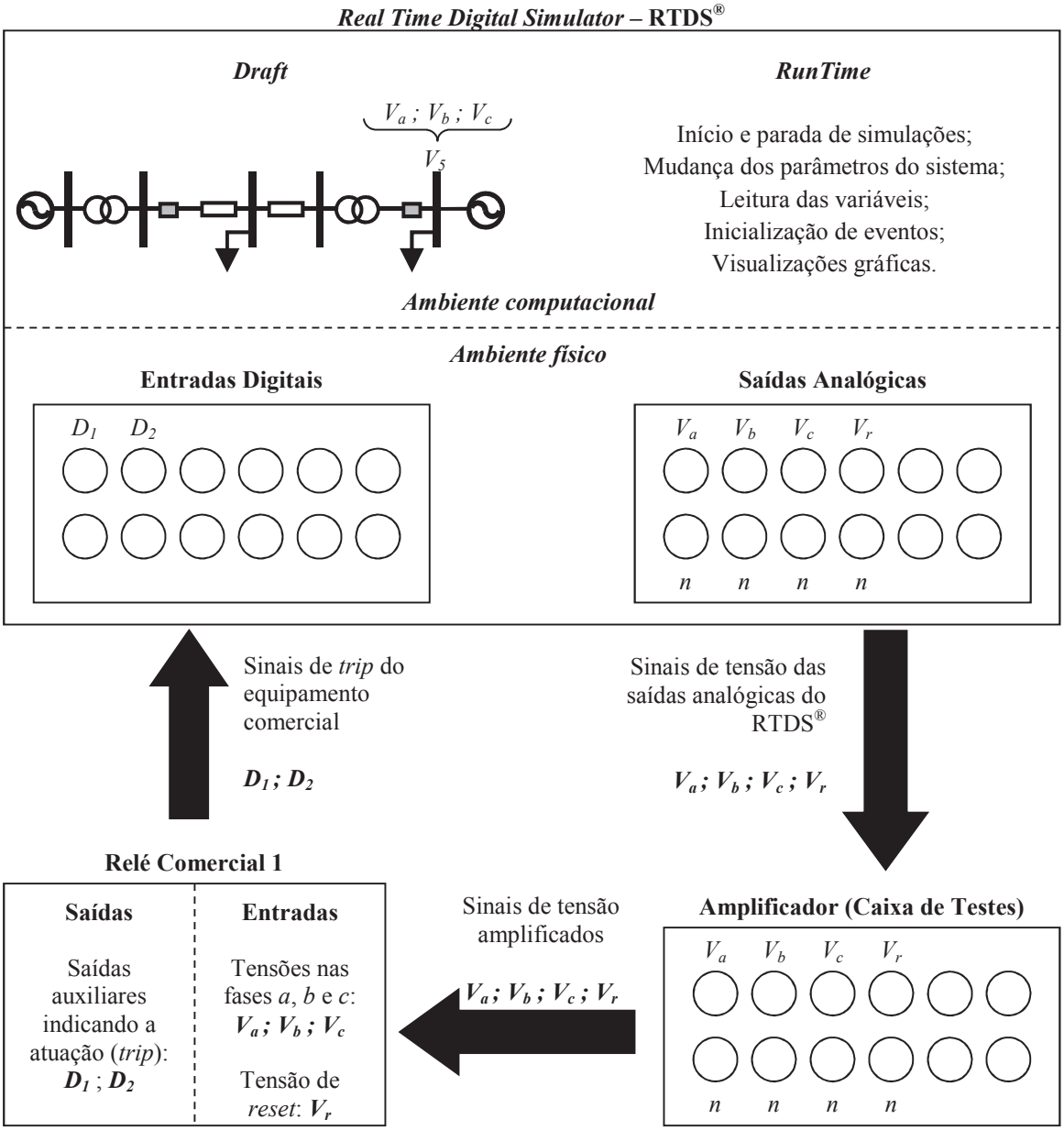


Figura 33 – Procedimento do ensaio em malha fechada do relé comercial 1.

O bloco de saída analógica (AO – *Analogue Output*) é um componente do ambiente de modelagem *Draft*, e faz com que os sinais sejam enviados para portas físicas de saída. Nesse bloco, é preciso ajustar um ganho que relaciona a tensão do modelo computacional com a fornecida ao relé comercial, considerando ainda que o amplificador tenha um ganho fixo. No **Apêndice B** esse bloco é apresentado em detalhes, juntamente com um procedimento simples para determinar o ajuste do bloco de saída analógica.

Quando a tensão na barra 5 do sistema modelado for 6,9/√3 kV entre fase e neutro, o amplificador terá como saída a tensão de 115 V entre fase e neutro, sendo adequada para servir de entrada ao relé comercial.

Em relação aos outros componentes do diagrama da Figura 33, os sinais das saídas analógicas do RTDS® são enviados para o amplificador. O amplificador eleva a tensão das três fases para 115 V entre fase e neutro. Os sinais de tensão amplificados são enviados aos relés comerciais. As tensões das fases *a*, *b* e *c* energizam as bobinas de entrada do relé por meio de uma conexão em estrela. A resposta do relé comercial é o fechamento de contatos internos na forma de um "contato seco". Como o dispositivo possui vários contatos internos (ou saídas auxiliares), dois deles são usados para indicar a atuação de duas funções de proteção distintas. As duas saídas são representadas pelos sinais de *trip* D_1 e D_2 (Figura 33), do relé COM1. Se fosse COM2, seriam as saídas D_6, D_7 e D_8.

As saídas auxiliares dos relés comerciais são conectadas diretamente na porta de entrada digital no painel frontal do RTDS®. Quando ocorrer a atuação da proteção associada à saída, o sinal pode ser visto em tempo real no *RunTime*, como também manipulado no *Draft*.

Todo o processo de inicialização de simulação, observação do resultado de *trip* dos relés por meio das saídas auxiliares e envio do comando de *reset* ao relé é feito no ambiente *RunTime*. É no *RunTime* que a rotina da Figura 32 é executada.

Este capítulo apresentou o processo necessário para obtenção das curvas de desempenho usando o RTDS® e os equipamentos envolvidos para a análise do relé comercial. O próximo capítulo apresenta os resultados das simulações. Serão apresentados gráficos que compararam as curvas de desempenho dos modelos desenvolvidos com os relés comerciais.

Capítulo 5

Simulações e Comparação dos Resultados

Este capítulo apresenta os resultados das comparações entre os modelos e os dois relés comerciais ensaiados. Para melhorar a representatividade das curvas de desempenho obtidas dos ensaios com os relés comerciais, foram obtidas dez curvas para cada ajuste analisado, de forma que a curva média do relé comercial seja comparada com a resposta dos modelos. Isso permite, além de promover uma comparação adequada, apresentar a repetitividade dos resultados dos relés comerciais perante as mesmas condições operacionais do sistema elétrico.

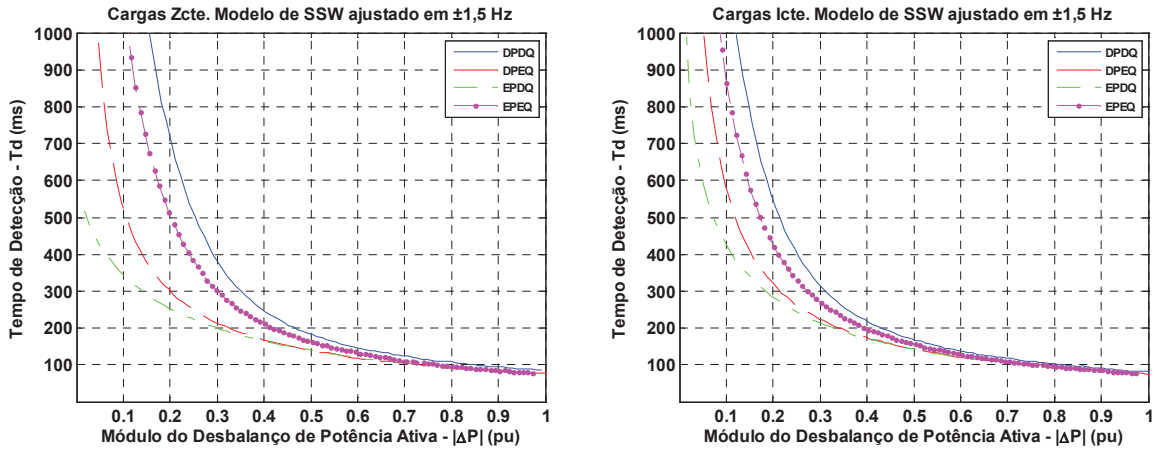
A seguir, serão apresentados os casos de estudo deste trabalho, sendo que houve a necessidade de variar os tipos de carga e condições operativas do sistema, de forma a obter uma base de comparação entre os modelos e os relés comerciais. Após essa etapa, será realizada uma análise individual da repetitividade das curvas de desempenho de cada relé comercial e modelo computacional. Os relés comerciais e modelos são comparados na etapa seguinte, seguido de uma sintetização dos resultados de todos os modelos. E por fim, as curvas de desempenho da proteção de sub/sobre frequência serão comparadas com as obtidas da atuação da proteção de deslocamento de fase.

5.1 Casos estudados

Neste trabalho foram apresentados três tipos de modelagem de cargas que podem ser usadas na análise do sistema de potência, sendo estes os modelos Z_{cte}, I_{cte} e P_{cte}. Além das possíveis variações de carga, foram definidos quatro tipos distintos de condições. As quatro condições operativas são de déficit de potência ativa e reativa (DPDQ), déficit de potência ativa e excesso de potência reativa (DPEQ), excesso de potência ativa e déficit de potência reativa (EPDQ) e excesso de potência ativa e reativa (EPEQ).

De forma a analisar as possíveis diferenças entre os cenários propostos, foi usada a curva de desempenho do modelo de SSW, ajustado em ±1,5 Hz, comparando então os quatro casos operativos para cada carga. A Figura 34(a) apresenta os resultados comparativos para as cargas Z_{cte}, observando-se que há diferença entre as quatro curvas, sendo, dessa forma, necessário obter a curva de desempenho para esses quatro casos.

Na Figura 34, a diferença das curvas é maior para desbalanços de potência menores. Isso porque a variação de frequência é mais lenta, levando mais tempo para o regulador de tensão do GD atuar, e por consequência, alterar a demanda das cargas dependentes da tensão.



a) Cargas modeladas como impedância constante. b) Cargas modeladas como corrente constante.

Figura 34 – Comparação dos casos operativos para cargas impedância e corrente constante.

A Figura 34(b) apresenta os resultados das cargas I_{cte}, ilustrando que as curvas dos quatro casos foram distintas, e seguiram o padrão da Figura 34(a), isto é, o caso EPDQ é o de atuação mais rápida, logo antes dos casos DPEQ, EPEQ e DPDQ, respectivamente. Para o caso EPDQ, o déficit de potência reativa faz com que a tensão diminua quando ocorre o ilhamento, e as cargas dependentes da tensão reduzem a potência ativa consumida. Como a demanda é menor e há excesso de potência ativa, ΔP será maior, levando a uma atuação mais rápida. O processo é similar para o caso DPEQ, mas este demora mais para atuar porque o nível de tensão desse caso altera menos a demanda das cargas, quando comparado com o caso EPDQ.

Por fim, a Figura 35 ilustra os resultados da carga P_{cte}, sendo que os quatro resultados se apresentaram sobrepostos. Isso siginifica que, independentemente da condição operativa, os resultados das curvas de desempenho são iguais, quando as cargas são modelos P_{cte}.

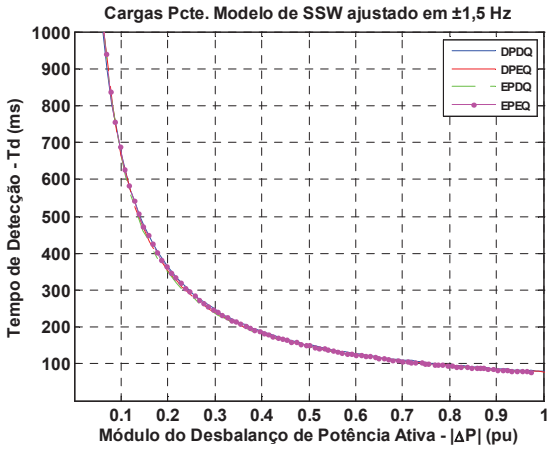


Figura 35 – Comparação dos casos operativos para cargas potência constante.

Com base no que foi comentado, foram selecionados nove casos distintos, sendo:

- Cargas Z_{cte} com: (1) DPDQ, (2) DPEQ, (3) EPDQ ou (4) EPEQ;
- Cargas I_{cte} com: (5) DPDQ, (6) DPEQ, (7) EPDQ ou (8) EPEQ;
- Cargas P_{cte} com (9) DPDQ.

Para a análise comparativa entre modelos e relés comerciais, serão apresentados três dos nove cenários por modelo, pois a quantidade de gráficos e tabelas seria elevada, e não trariam conclusões diferenciadas. Todos os nove cenários foram avaliados e analisados. O cenário de cargas P_{cte} e DPDQ é usado para todos os modelos, para que se tenha um caso base para comparações. Os outros dois cenários foram escolhidos de forma que todos pudessem ser apresentados em, no mínimo, um modelo. A Tabela 3 apresenta os cenários que são analisados para cada modelo dos relés de proteção, além do P_{cte} e DPDQ.

Tabela 3 – Casos a serem apresentados.

Modelo	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
MSSW	P_{cte}, DPDQ	I_{cte}, EPDQ	Z_{cte}, EPEQ
MSSF	P_{cte}, DPDQ	Z_{cte}, DPDQ	I_{cte}, DPEQ
EQSSF	P_{cte}, DPDQ	Z_{cte}, EPDQ	I_{cte}, EPEQ
MTVW	P_{cte}, DPDQ	I_{cte}, DPDQ	Z_{cte}, DPEQ
MTVF	P_{cte}, DPDQ	I_{cte}, DPDQ	Z_{cte}, DPEQ
EQTVF	P_{cte}, DPDQ	I_{cte}, DPDQ	Z_{cte}, DPEQ
MDFA1	P_{cte}, DPDQ	Z_{cte}, EPEQ	I_{cte}, DPEQ
MDFA2	P_{cte}, DPDQ	Z_{cte}, DPDQ	I_{cte}, DPEQ
EQDFA	P_{cte}, DPDQ	Z_{cte}, DPDQ	I_{cte}, EPEQ

A próxima seção apresenta a repetitividade das curvas de desempenho dos relés comerciais e modelos computacionais testados no RSCAD.

5.2 Repetitividade das curvas e análise preliminar dos resultados

Para cumprir os objetivos desse trabalho, é preciso comparar as curvas de desempenho dos modelos propostos com as obtidas experimentalmente dos relés comerciais. Para isso, as curvas de cada função de proteção precisam ser representativas, para que as comparações sejam coerentes.

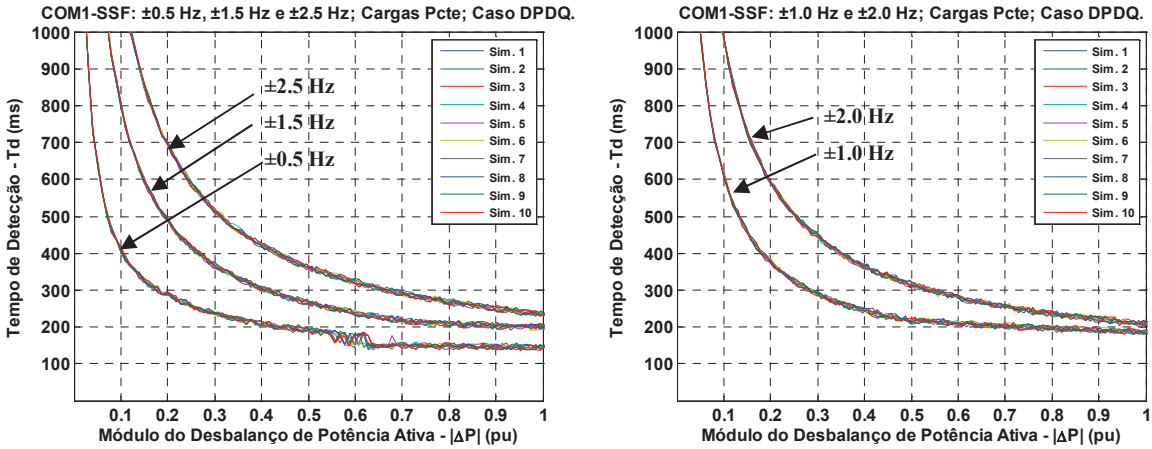
Para obter uma curva representativa, foram realizadas dez simulações por ensaio, isto é, cada ajuste de cada função, para cada carga e caso de déficit/excesso de potência, foi simulado dez vezes, para obter uma curva média representativa.

A seguir, serão apresentadas as dez curvas obtidas para as funções de proteção dos relés comerciais e dos modelos computacionais propostos, de forma a observar a repetitividade de cada curva, e fazer analises preliminares dos dados coletados. Como a quantidade de resultados é grande, já que foram simulados nove cenários distintos (apresentados na seção anterior), será apresentado a seguir apenas um cenário por função de proteção, sendo que o cenário apresentado para cada proteção representa os oito restantes.

5.2.1 Resultados do COM1-SSF

Os resultados da repetitividade das curvas de desempenho da função de sub/sobre frequência do relé comercial 1 são apresentados na Figura 36, sendo apresentados cinco ajustes distintos (±0,5; ±1,0; ±1,5; ±2,0 e ±2,5 Hz) para cargas P_{cte} com um caso de DPDQ. Para todos os cenários de condições operativas simuladas, foram observadas respostas semelhantes, e optou-se por apresentar o cenário com cargas P_{cte} e DPDQ.

Na Figura 36, cada ajuste apresentado contém dez curvas de desempenho, que foram obtidas para calcular uma curva média que representa cada ajuste.



a) Ajustes: ±0,5 Hz; ±1,5 Hz; e ±2,5 Hz. b) Ajustes: ±1,0 Hz e ±1,0 Hz.

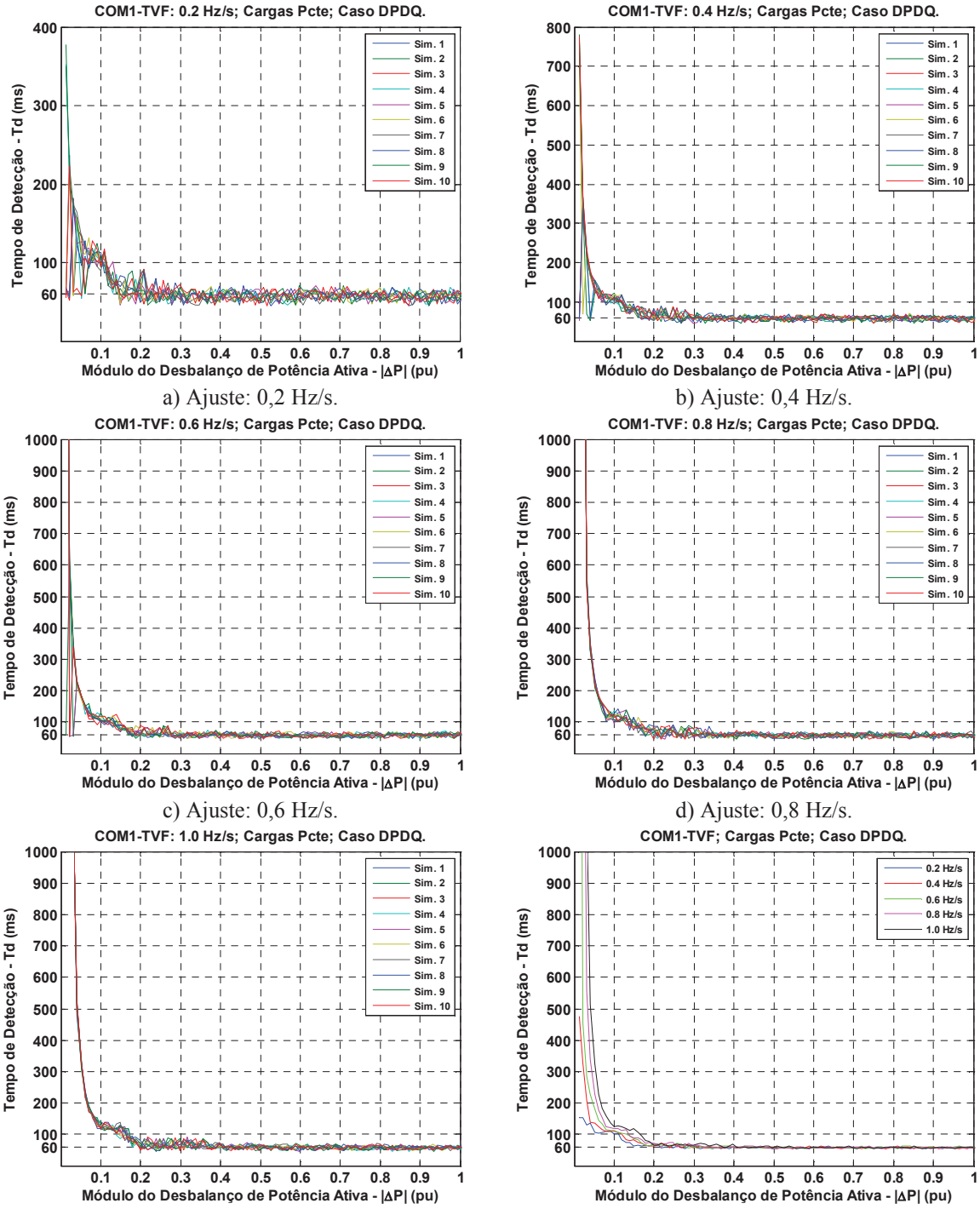
Figura 36 – Repetição do COM1: função de SSF.

Na Figura 36 observa-se que as dez curvas de cada ajuste apresentam resultados muito próximos entre si, e dessa forma, um baixo desvio dos resultados. Nota-se que para o ajuste de ±0,5 Hz ocorre uma variação abrupta na curva, que afeta as dez curvas de desempenho desse ajuste. Essa característica ocorre porque a filtragem do relé comercial não elimina todas as variações bruscas de frequência. Uma análise detalhada sobre essa variação abrupta é apresentada na seção 5.2.7, referente aos resultados do MSSF.

5.2.2 Resultados do COM1-TVF

Os resultados da proteção de taxa de variação de frequência do relé comercial 1 são apresentados na Figura 37, com os ajustes: 0,2 Hz/s; 0,4 Hz/s; 0,6 Hz/s; 0,8 Hz/s e 1,0 Hz/s. Na Figura 37(f) são ilustradas as curvas médias de cada ajuste dessa proteção (resultado de P_{cte}, DPDQ).

Para valores de desbalanço de potência superiores a 0,2 pu, os tempos de atuação da proteção de TVF, independentemente do ajuste, foram de aproximadamente 60 ms (Figura 37), sendo um comportamento diferente do observado na função de SSF.



a) Ajuste: 0,2 Hz/s. b) Ajuste: 0,4 Hz/s.

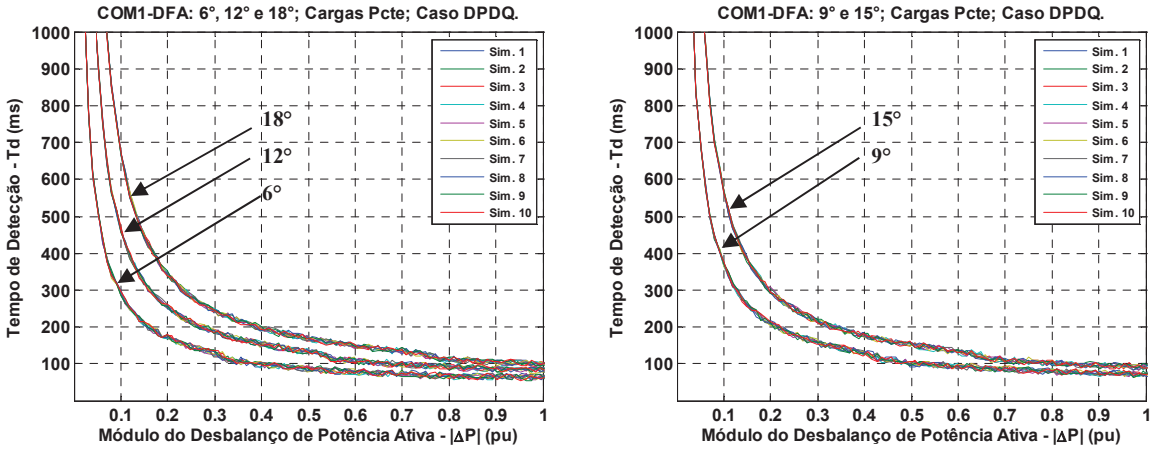
c) Ajuste: 0,6 Hz/s. d) Ajuste: 0,8 Hz/s.

e) Ajuste: 1,0 Hz/s. f) Curvas médias para cada ajuste.

Figura 37 – Repetição do COM1: função de TVF. Situação de DPDQ com cargas P_{cte}.

5.2.3 Resultados do COM1-DFA

Os resultados da proteção de DFA do COM1 para os ajustes de 6°; 9°; 12°; 15° e 18° são apresentados na Figura 38, para cargas P_{cte} com uma condição operativa de DPDQ. Os resultados são próximos entre si, sem apresentar as variações abruptas da proteção de SSF.



a) Ajustes: 6°, 12° e 18°. b) Ajustes: 9° e 15°.

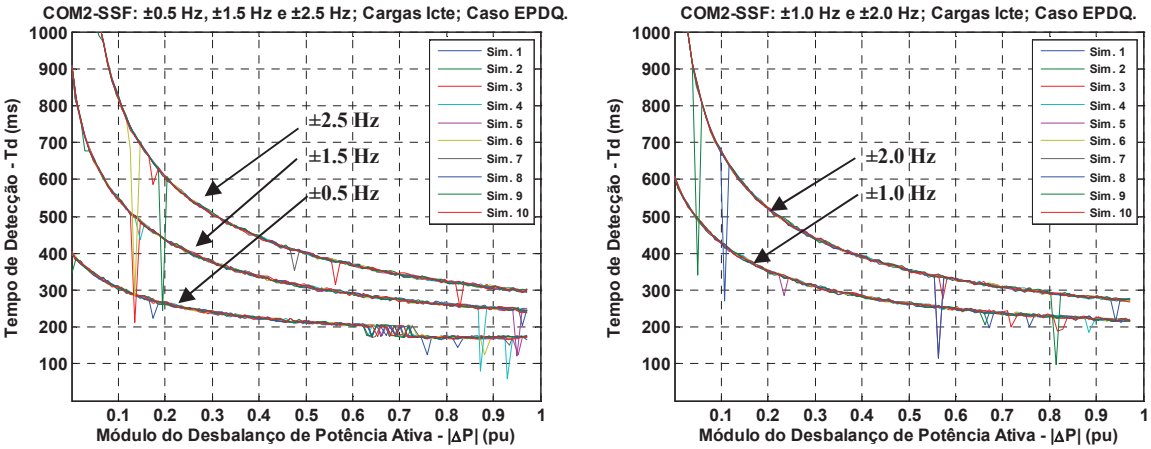
Figura 38 – Repetição do COM1: função de DFA.

5.2.4 Resultados do COM2-SSF

Nessa seção é apresentada a repetitividade da proteção de SSF do COM2. São apresentados os mesmos ajustes usados na função de SSF do COM1. Os resultados apresentados são referentes à cargas I_{cte} e a condição de EPDQ. Essa mudança foi realizada sem critério específico, de forma a apresentar resultados distintos, já que foram estudados vários cenários que apresentam curvas de desempenho distintas.

As curvas de desempenho apresentam vários picos que mostram que, em um ajuste específico, o relé atuou mais rápido do que a maioria. Um exemplo é observado na Figura 39(b), nas curvas referentes ao ajuste de ±2,0 Hz, para o desbalanço de potência de 0,1 pu. Nesse ponto, apenas uma das dez curvas atua antes que 300 ms, enquanto as outras nove atuam por volta de 650 ms. Essa atuação diferente mostra que, para a proteção de SSF, o COM2 não é tão repetitivo quanto a proteção de sub/sobre frequência do COM1.

Na Figura 39(a) é observado uma variação abrupta semelhante à proteção de SSF do COM1, que está entre o desbalanço de 0,6 e 0,8 pu no ajuste de ±0,5 Hz.



a) Ajustes: ±0,5 Hz; ±1,5 Hz; e ±2,5 Hz. b) Ajustes: ±1,0 Hz e ±2,0 Hz.

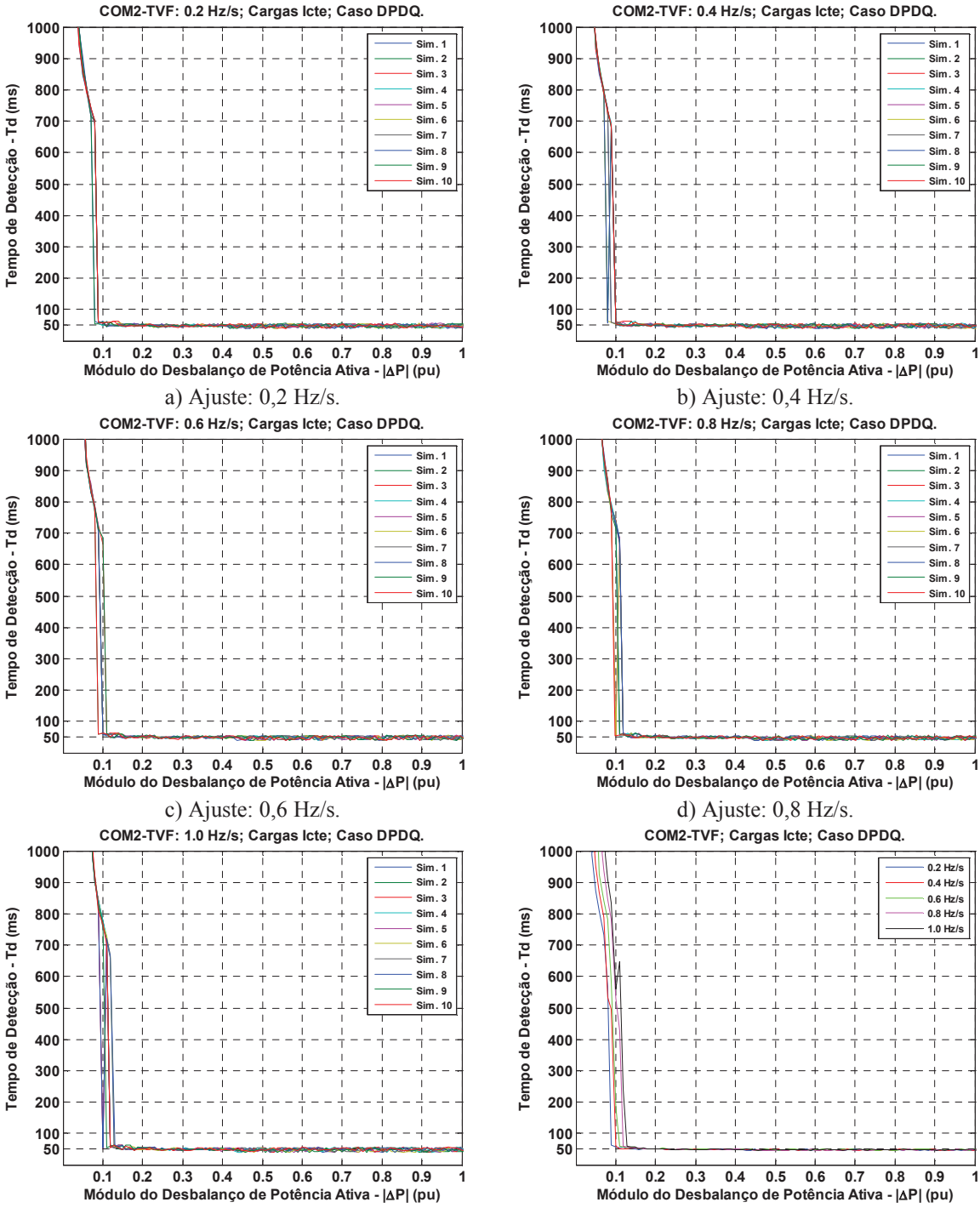
Figura 39 – Repetição do COM2: função de SSF.

5.2.5 Resultados do COM2-TVF

Para todas as análises da repetitividade das proteções, foram observados todos os nove casos de cargas e condições operativas, sendo unicamente apresentado um caso que representasse os demais. Entretanto, isso não ocorre para a função de TVF do COM2, pois esta função de proteção não atuou em nenhum dos casos de excesso de potência ativa (EP) na região da ilha. Apenas nos casos de déficit de potência ativa (DP) na ilha que realmente houve a atuação dessa proteção. A diferença de atuação para DP ou EP ocorre porque a função de TVF do COM2 foi desenvolvida para promover o corte de carga, que apenas é realizado quando há déficit de geração ou excesso de carga na ilha, que resulta em déficit de potência ativa. Logo, ela não atua para sobre frequências.

Na Figura 40 são apresentados os resultados da função de TVF do COM2, para o cenário de cargas I_{cte}, e DPDQ. Para valores de desbalanço de potência superiores a 0,15 pu, os tempos de atuação, independentemente do ajuste, foram de aproximadamente 50 ms, resultando no mesmo comportamento observado no relé comercial 1 (Figura 37(f)).

Observando a curva média no ajuste de 1,0 Hz/s (Figura 40(f)), nota-se que há uma descontinuidade na curva, por volta de 0,1 pu. Analisando a Figura 40(e), essa descontinuidade ocorre porque foi feita a média das curvas, e algumas atuaram rapidamente para o desbalanço referente a descontinuidade. Além disso, essa característica é observada apenas no COM2. Dessa forma, a descontinuidade está relacionada a estimação da frequência, levando ao mesmo efeito analisado na função de SSF do relé comercial 2.



a) Ajuste: 0,2 Hz/s. b) Ajuste: 0,4 Hz/s.

c) Ajuste: 0,6 Hz/s. d) Ajuste: 0,8 Hz/s.

e) Ajuste: 1,0 Hz/s. f) Curvas médias para cada ajuste.

Figura 40 – Repetição do COM2: função de TVF.

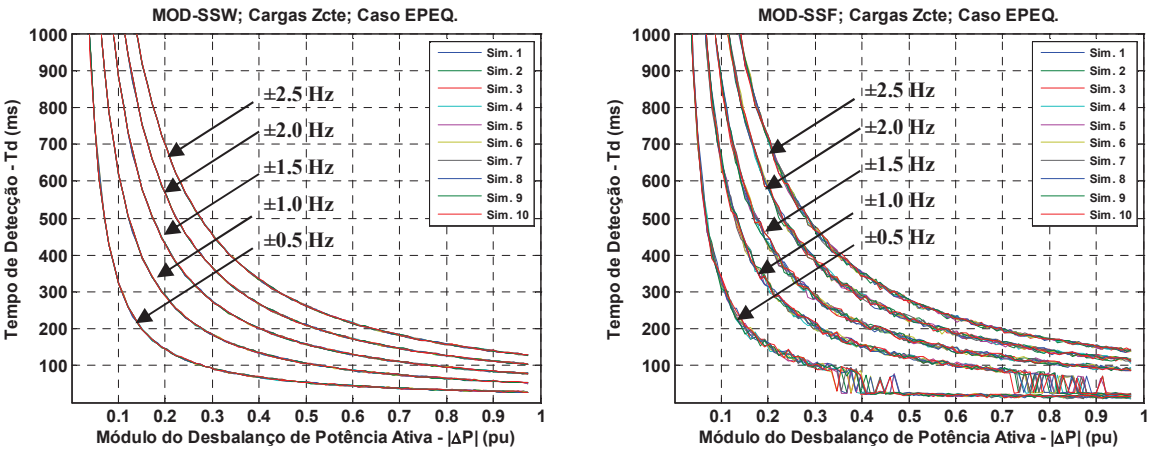
5.2.6 Resultados do COM2-DFA

Para a função de DFA do COM2 foi observado um comportamento diferente do esperado, sendo que o algoritmo do relé analisa apenas a variação abrupta do ângulo, que ocorre apenas no instante do ilhamento. Dessa forma, não foi possível obter uma curva de desempenho para essa proteção, e assim, a proteção de DFA do COM2 não foi analisada.

5.2.7 Resultados do MSSW e MSSF

Os resultados dos modelos computacionais de sub/sobre frequência são apresentados na Figura 41 para cargas Z_{cte} e EPEQ, sendo a Figura 41(a) o modelo baseado na frequência angular e Figura 41(b) o modelo baseado na tensão. Vale ressaltar que os resultados para outros cenários foram similares às repostas apresentadas na Figura 41.

Analisando a Figura 41(a), observa-se que não há variações abruptas, como observados nos relés comerciais e no MSSF da Figura 41(b). Isso não ocorre porque a frequência angular tem uma dinâmica lenta, quando comparada com um transitório eletromagnético. Dessa forma, os efeitos dos transitórios dos sinais de tensão, que são observados por um relé comercial ou o MSSF, não contribuem para a resposta do MSSW. Sendo assim, conclui-se que a variação das curvas de desempenho está associada à frequência obtida a partir do sinal de tensão.

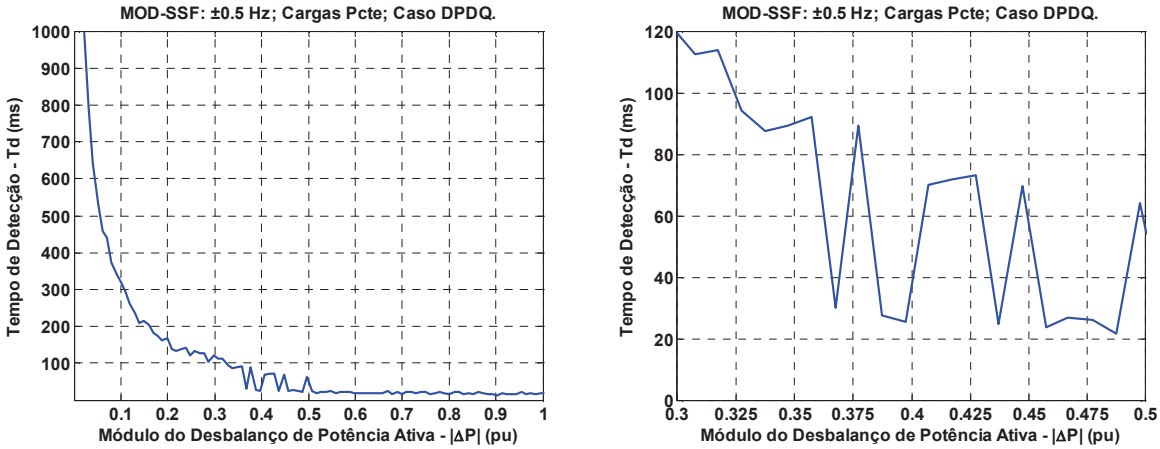


a) Modelo dependente da frequência angular. b) Modelo dependente da frequência estimada.

Figura 41 – Repetição dos modelos MSSW e MSSF.

No MSSF da Figura 41(b) ocorrem duas variações abruptas nas curvas de desempenho: uma para o ajuste de ±0,5 Hz no intervalo entre 0,3 e 0,5 pu de desbalanço, e outro para o ajuste de ±1,0 Hz, no intervalo de 0,7 a 1 pu, aproximadamente. Observando os resultados de COM1 (Figura 36(a)) e COM2 (Figura 39(a)), ocorrem também variações abruptas semelhantes à do MSSF, para o ajuste de ±0,5 Hz.

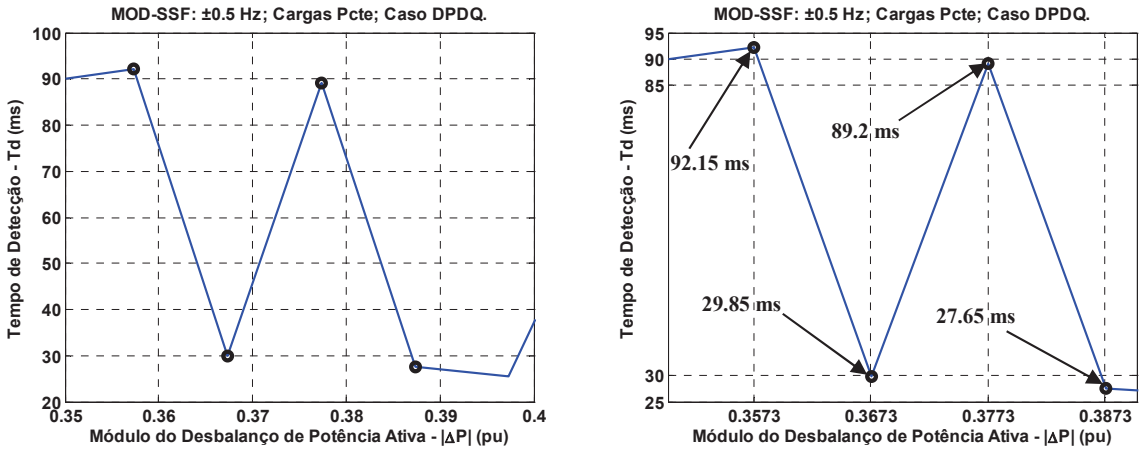
Para analisar a variação citada, deve-se estudar apenas uma entre as dez curvas do MSSF. Na Figura 42(a) é apresentada uma das curvas vistas na Figura 41(b), referente ao ajuste de ±0,5 Hz. Na Figura 42(a) fica evidente a variação abrupta para valores entre 0,3 e 0,5 pu, o que pode ser visto em mais detalhes na Figura 42(b).



a) Curva de desempenho completa. b) Aproximação entre 0,3 e 0,5 pu.

Figura 42 – Uma das dez curvas de repetição do MSSF, com ajuste de ±0,5 Hz.

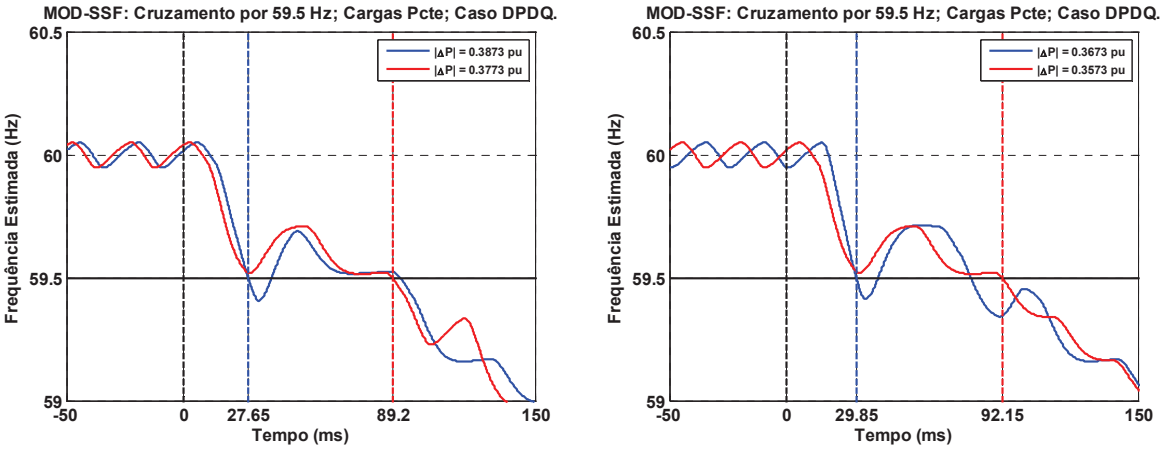
Analisando em detalhes uma variação abrupta específica da Figura 42(b), tal como apresentado na Figura 43(a), observa-se que dois pontos de desbalanços de potência consecutivos chegam a variar aproximadamente 60 ms. Na Figura 43(a), foram selecionados quatro pontos consecutivos, referentes aos desbalanços de 0,3573 pu, 0,3673 pu, 0,3773 pu e 0,3873 pu. Esses pontos foram selecionados por resultarem em tempos muito diferentes, para dois desbalanços consecutivos, o que pode ser visto com mais detalhes na Figura 43(b), que amplia o intervalo desses quatro pontos.



a) Ampliação na região de interesse. b) Marcação dos pontos de interesse.

Figura 43 – Ampliação no ponto de variação abrupta da curva.

Como esses quatro pontos apresentam respostas diferentes, foram obtidos os sinais de frequência estimados do MSSF, apresentado na Figura 17. Os quatro sinais de frequência são apresentados na Figura 44.



a) *ΔP* igual a 0,3773 pu e 0,3873 pu. b) *ΔP* igual a 0,3573 pu e 0,3673 pu.

Figura 44 – Oscilografia do MSSF para os quatro pontos em estudo.

A reta vertical em preto, da Figura 44, indica o momento em que ocorre o ilhamento (*t*=0 ms); as retas verticais azuis e vermelhas indicam o momento do cruzamento por 59,5 Hz (isto é, ajuste de ±0,5 Hz) dos sinais azuis e vermelhos, respectivamente.

Como observado na Figura 43(b), a atuação para *ΔP*=0,3873 pu foi 61,55 ms mais rápida que para *ΔP*=0,3773 pu, e a atuação para *ΔP*=0,3673 pu foi 62,3 ms mais rápida que para *ΔP*=0,3573 pu. Essa diferença representa a variação abrupta, que, analisando a Figura 44, ocorre devido ao primeiro vale observado no sinal estimado da frequência, após a ocorrência do ilhamento.

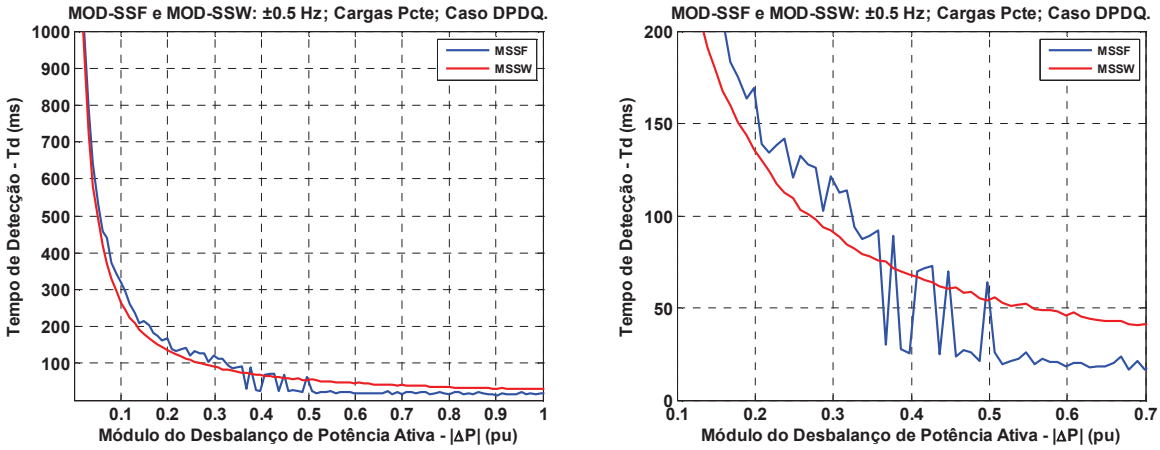
Na Figura 44(a), o primeiro vale do sinal de frequência leva a atuação da proteção para *ΔP*=0,3873 pu, mas não é suficientemente grande para fazer com que a proteção atue para *ΔP*=0,3773 pu. O mesmo ocorre para *ΔP* igual a 0,3573 pu e 0,3673 pu da Figura 44(b). Analisando a Figura 44(a), o primeiro vale, tanto para *ΔP* igual a 0,3873 pu quanto para 0,3773 pu, estão muito próximos de 59,5 Hz (isto é, ±0,5 Hz). Dessa forma, para ajustes maiores, como ±1,5 Hz, a oscilação do sinal de frequência não interfere na atuação do relé, pois a oscilação (ou vale) fica em torno de ±0,5 Hz, e por isso a variação abrupta na curva de desempenho ocorre apenas para os ajustes mais sensíveis.

Os resultados da Figura 44 indicam que há oscilações no sinal de frequência que podem levar a problemas na atuação da proteção, o que seria resolvido por filtros com frequência de corte inferior à utilizada no MSSF. Entretanto, o filtro foi mantido, pois, à medida que a frequência de corte diminui, ocorre atraso no sinal de frequência, fazendo com que a proteção leve mais tempo para atuar, piorando, de forma geral, as respostas do modelo. Vale ressaltar que, como descrito anteriormente, os dois relés comerciais apresentam a mesma

característica. Os filtros dos relés comerciais atenuam as oscilações do sinal de frequência, mas não o suficiente para eliminar as regiões de variações abruptas na curva de desempenho.

Na Figura 45 é apresentada a comparação entre as curvas de desempenho, no ajuste de ±0,5 Hz, do MSSW e MSSF, indicando que a frequência angular não apresenta as variações abruptas observadas na estimação de frequência a partir da tensão.

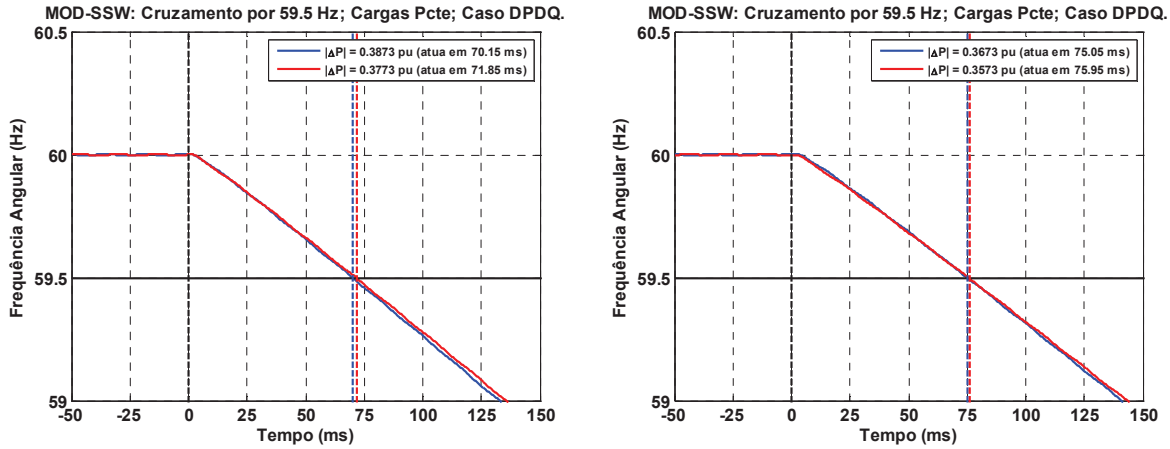
Observa-se na Figura 45 que para desbalanços maiores que 0,55 pu, o tempo de atuação do MSSF é menor que do MSSW, e atua pelos vales observados anteriormente. Entretanto, para desbalanços menores que 0,35 pu, o MSSW atua mais rápido que o MSSW, isto é, os vales não levam à atuação do MSSF. O MSSF demora mais a atuar que o MSSW no intervalo de ΔP<0,35 pu porque esse modelo tem o atraso dos filtros que o MSSW não utiliza.



a) Resultados completos. b) Ampliação no ponto de interesse.

Figura 45 – Comparação do MSSW e MSSF para o ajuste de ±0,5 Hz.

Na Figura 46 são apresentados os sinais de frequência angular para os desbalanços de 0,3573 pu, 0,3673 pu, 0,3773 pu e 0,3873 pu. As respostas confirmam que a frequência angular não oscila como a frequência estimada, e dessa maneira, o MSSW responde melhor que o MSSF.



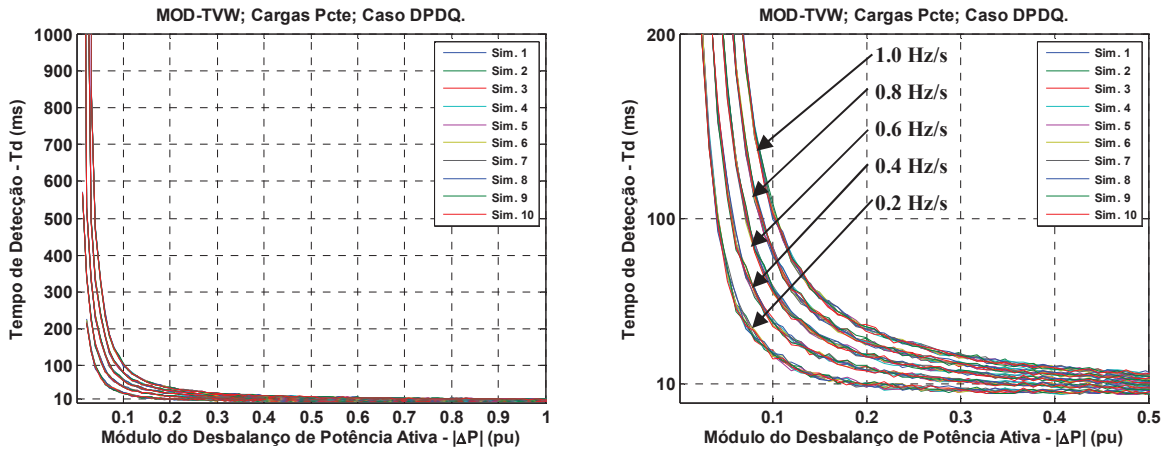
a) ΔP igual a 0,3773 pu e 0,3873 pu. b) ΔP igual a 0,3573 pu e 0,3673 pu.

Figura 46 – Oscilografia do MSSW para os quatro pontos em estudo.

5.2.8 Resultados do MTVW e MTVF

Os resultados do MTVW são apresentados na Figura 47, para cargas P_{cte} com caso operativo de DPDQ, em que se observa que os resultados das dez simulações por ajuste são muito próximos entre si. Da mesma forma que para o MSSW, a variação da frequência angular é mais lenta que a variação da frequência elétrica.

Na Figura 47(a), observa-se que para desbalanço de potência maiores que 0,4 pu, os resultados tendem ao valor de 10 ms. As respostas podem ser visualizadas na ampliação da Figura 47(b), que confirma que as respostas das dez curvas do MSSW são muito próximas.



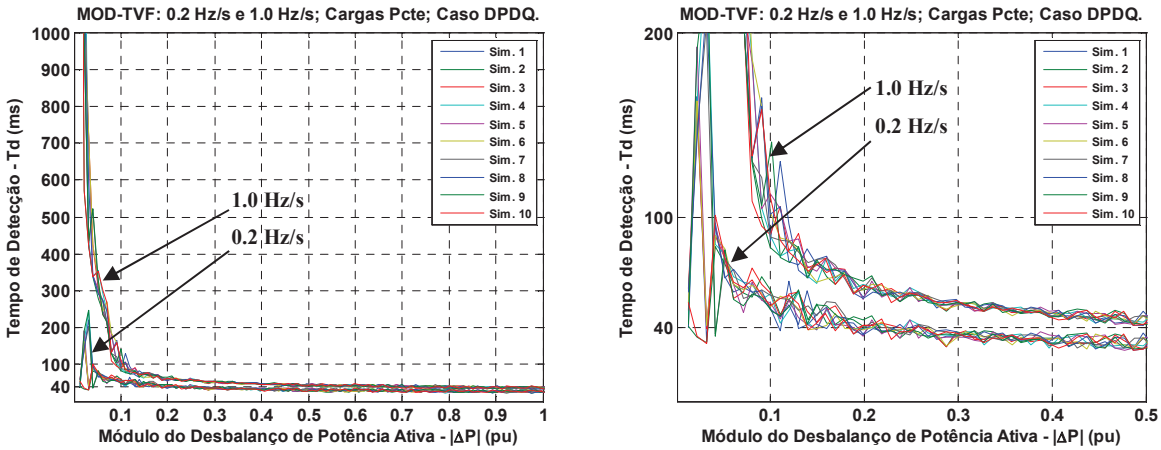
a) Resultados gerais. b) Resultados ampliados.

Figura 47 – Repetição do modelo MTVW: 5 ajustes.

A Figura 48 apresenta os resultados para o MTVF para o mesmo caso que o MTVW. Nessa figura foram apresentados dois ajustes (0,2 e 1,0 Hz/s), para melhorar a visualização

dos resultados. Nesse modelo é observado que as respostas não são tão próximas quanto foram para o MTVW.

Para a Figura 48(a), o tempo de atuação para desbalanço superiores a 0,4 pu é de aproximadamente 40 ms, como pode ser visto na Figura 48(b). Esse tempo é superior ao apresentado pelo MTVW na Figura 47, pois o MTVF tem mais filtros que levam à atrasos no sinal, e consequentemente, a proteção demora mais para atuar.



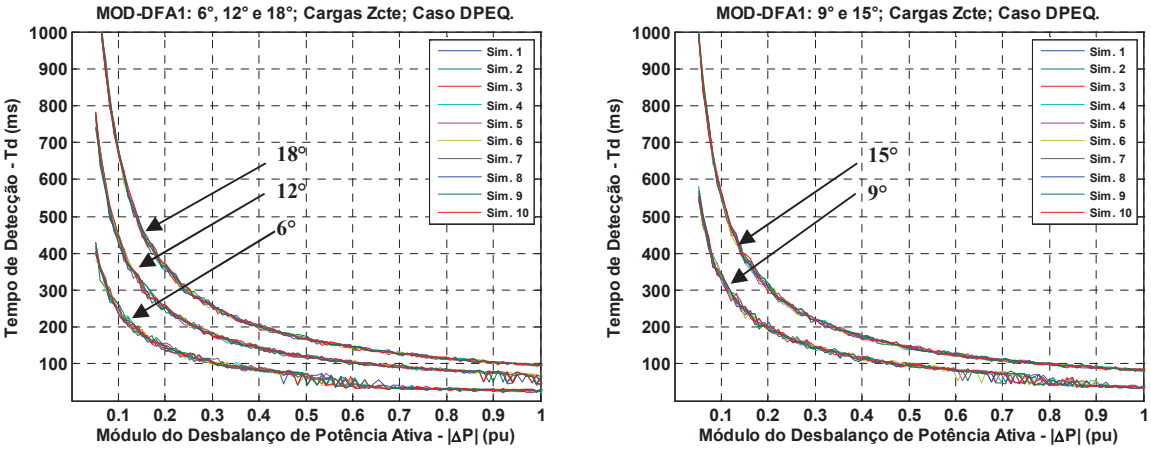
a) Resultados gerais. b) Resultados ampliados.

Figura 48 – Repetição do modelo MTVF: 2 ajustes.

5.2.9 Resultados do MDFA1

Na Figura 49 são apresentadas as curvas de desempenho do MDFA1 modelado no RSCAD, de um caso com cargas Z_{cte} e condição operativa de DPEQ. Pela figura é visto que as dez repetições de cada ajuste apresentam respostas muito próximas entre si.

Para esse modelo são vistas três variações abruptas na Figura 49: no ajuste de 6° entre 0,4 e 0,7 pu; no ajuste de 9° entre 0,6 e 0,9 pu; e para o ajuste de 12° entre 0,85 e 1 pu. Essas variações são associadas ao que foi exposto na seção referente aos modelos da proteção de sub e sobre frequência, seção 5.2.7. A lógica é a mesma, pois tanto a frequência do MSSF e o ângulo do MDFA1 são baseados medição do tempo entre cruzamentos por zero.



a) Ajustes: 6°, 12° e 18°. b) Ajustes: 9° e 15°.

Figura 49 – Repetição do MDFA1.

5.2.10 Conclusões parciais

Nessa seção foram analisadas as respostas dos relés comerciais e dos modelos computacionais, para que então seja feita a comparação entre modelos e dados experimentais.

Os resultados do MDFA2 não foram apresentados, pois esse modelo não passou por dez repetições de forma a obter uma curva média. Apenas uma curva foi obtida para o MDFA2, isso porque todas as curvas do RTDS® tiveram que ser exportadas ao MATLAB®, e a quantidade de dados era muito grande, devido ao passo de integração e tempo de simulação.

Os modelos analíticos das três funções de proteção também não foram apresentados, pois não há a necessidade de repetir as respostas das equações em dez vezes.

Das análises realizadas até então, as seguintes conclusões foram obtidas:

- Em algumas proteções que têm como entrada o sinal de tensão, foi observada uma variação abrupta nas curvas de desempenho, que está associada às oscilações no sinal de frequência, estimado a partir do sinal de tensão do ponto de conexão do GD. Essas oscilações estão associadas à frequência de corte dos filtros da proteção;
- Apesar de haver variações, os filtros dos modelos que estimam a frequência não foram alterados, pois com a diminuição da frequência de corte (o que diminui a variação abrupta), um atraso seria inserido ao modelo, prejudicando a resposta. Os valores de frequência de corte e polos dos filtros foram determinados de maneira a diminuir a variação das curvas de desempenho e o atraso das respostas dos modelos;
- A função de proteção de TVF do COM2 atuou apenas nos casos de déficit de potência ativa, ao contrário da respectiva função do COM1, que atua para os casos de déficit e de excesso de potência ativa.

A próxima seção apresenta os resultados comparativos dos modelos com os relés comerciais.

5.3 Resultados comparativos da proteção de sub/sobre frequência

Esta seção apresenta os resultados comparativos dos modelos de sub/sobre frequência com os relés comerciais. As curvas de desempenho apresentadas nesta seção, tanto para os modelos quanto para os relés comerciais[5], são a média das dez curvas apresentadas na seção anterior. Vale ressaltar que tanto para os modelos computacionais quanto para os relés comerciais, o bloqueio de mínima tensão foi desabilitado.

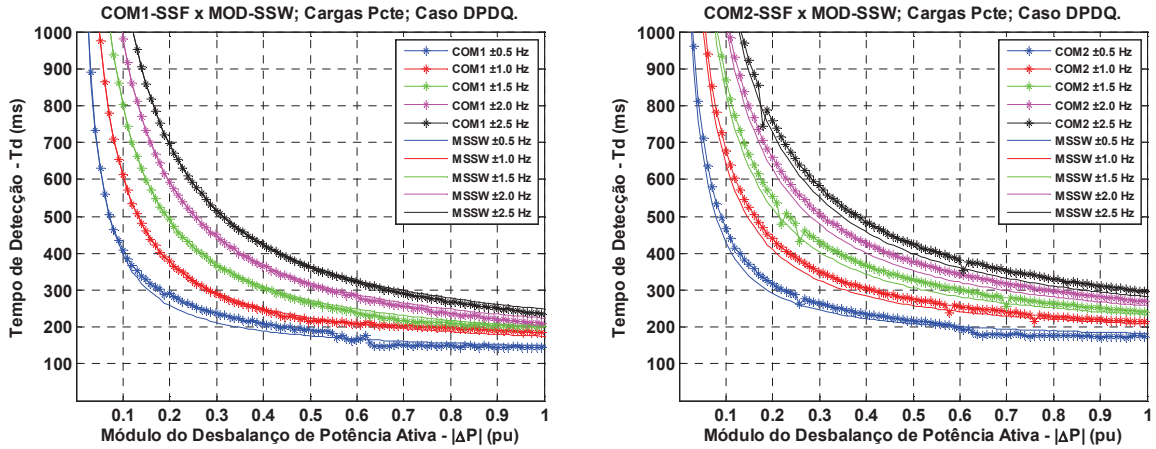
5.3.1 Comparações do MSSW com os relés comerciais

Nesta seção são comparados os resultados do MSSW com os dois relés comerciais ensaiados. A avaliação da comparação é feita com base nos gráficos das curvas de desempenho, como também na comparação numérica dos desbalanços críticos de potência.

Como o MSSW tem atuação instantânea e os relés comerciais têm atuação temporizada, o valor de temporização dos relés deve ser somado à resposta do modelo. Na comparação com o COM1, foi somado às curvas de desempenho do MSSW o valor de 120 ms. Já para a comparação com o COM2, foram somados 153,33 ms, como visto na seção 4.2.1, que apresenta os ajustes de temporização dos relés comerciais.

A Figura 50 ilustra a comparação das curvas de desempenho do MSSW com as obtidas para os dois relés comerciais, para um caso de carga P_{cte} e DPDQ (A Figura 50(a) é referente ao relé comercial 1, e Figura 50(b) ao relé comercial 2). Nessa figura foram comparados cinco ajustes diferentes da proteção de sub/sobre frequência, sendo observado que as curvas do modelo e dos relés comerciais apresentam respostas muito próximas, e aparentemente, o MSSW representa melhor o COM1 do que o COM2.

[5] Exceto para o MDFA2 do Simulink®, pois apenas uma curva foi obtida.



a) Comparação com COM1. b) Comparação com COM2.

Figura 50 – Comparação do MSSW com o COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ.

Para apresentar uma comparação numérica dos resultados das curvas de desempenho, foram definidos três tempos críticos (t_{crit}) de atuação das proteções: 300 ms, 500 ms e 700 ms. Para cada tempo crítico está associado um desbalanço crítico de potência ativa (ΔP_{crit}), que é obtido pela intersecção da reta que define os tempos de atuação com as curvas de desempenho. O ΔP_{crit} do modelo é então comparado com o respectivo ΔP_{crit} do relé comercial. A Equação (35) apresenta a forma de cálculo, sendo que $\Delta P_{crit,MOD}$ e $\Delta P_{crit,COM}$ são os desbalanços críticos de potência ativa do modelo e do relé comercial, respectivamente, e ε é a diferença entre os desbalanços críticos de potência ativa, apresentado em porcentagem.

$$\varepsilon = \left(\Delta P_{crit,COM} - \Delta P_{crit,MOD}\right) \cdot 100 \quad [\%] \tag{35}$$

Valores positivos de ε significam que os modelos atuam mais rápido que o relé comercial. Valores negativos, entretanto, significam que o relé comercial atua mais rápido que os modelos. Portanto, quando os modelos são usados para ajustar a proteção, é importante que ε seja negativo, pois o modelo é conservador quanto ao tempo de atuação, em relação ao relé comercial.

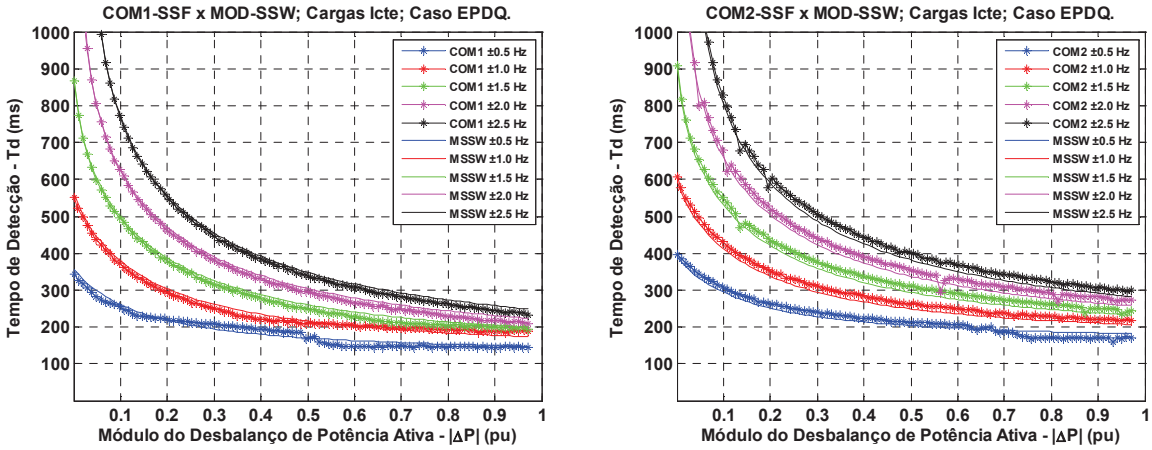
Na Tabela 4 são apresentados os resultados das comparações de ε entre o MSSW e os relés comerciais 1 e 2 para cada ajuste apresentado na Figura 50. Na última linha da tabela é apresentado o resultado médio do erro referente a cada tempo crítico. A média dos resultados considera o módulo de cada ε.

Tabela 4 – Comparação de ε do MSSW com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ.

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%)					
	MSSW e COM1			MSSW e COM2		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
±0,5 Hz	2,87	0,06	0,06	3,59	1,02	0,56
±1,0 Hz	-0,34	0,01	0,02	5,88	1,56	0,76
±1,5 Hz	-0,40	0,12	-0,01	7,57	2,14	0,99
±2,0 Hz	-1,92	0,07	-0,01	9,35	2,69	1,18
±2,5 Hz	-3,29	-0,05	0,02	11,32	3,33	1,47
Média de $|\varepsilon|$ (%)	1,77	0,06	0,02	7,54	2,15	0,99

O maior valor médio de ε entre MSSW e COM1 (Tabela 4) é de 1,77%, para 300 ms, e a maioria das comparações mostra que o modelo atua mais rápido que o relé comercial. O maior valor observado na comparação do MSSW com o COM1 é de |3,29|% (ou |0,0329| pu de desbalanço). Entretanto, para COM2 o resultado médio para t_{crit}=300 ms atinge 7,54%, com o máximo de 11,32% para o ajuste de ±2,5 Hz. Além disso, em todos os casos o modelo atuou mais rápido que o relé comercial. Baseando-se na Tabela 4, o MSSW apresenta resultados mais próximos do COM1 que do COM2.

Na Figura 51 é apresentado um caso com cargas I_{cte} e EPDQ. Na Figura 51(b) observa-se que o COM2 tem algumas pequenas oscilações no decorrer das curvas de desempenho. Essas oscilações ocorrem porque foi feita a média de dez curvas, e uma das dez atua, no ponto de oscilação, muito mais rápido que as outras, (como ilustrado na Figura 39), levando à oscilação apresentada.



a) Comparação com COM1. b) Comparação com COM2.

Figura 51 – Comparação do MSSW com o COM1 e COM2: I_{cte}, EPDQ.

A Tabela 5 resume a comparação da Figura 51, não havendo resultados numéricos para o ajuste de ±0,5 Hz com tempo crítico de 500 e 700 ms. Esses pontos de comparação não existem porque, analisando a Figura 51, as curvas de desempenho do ajuste de ±0,5 Hz não

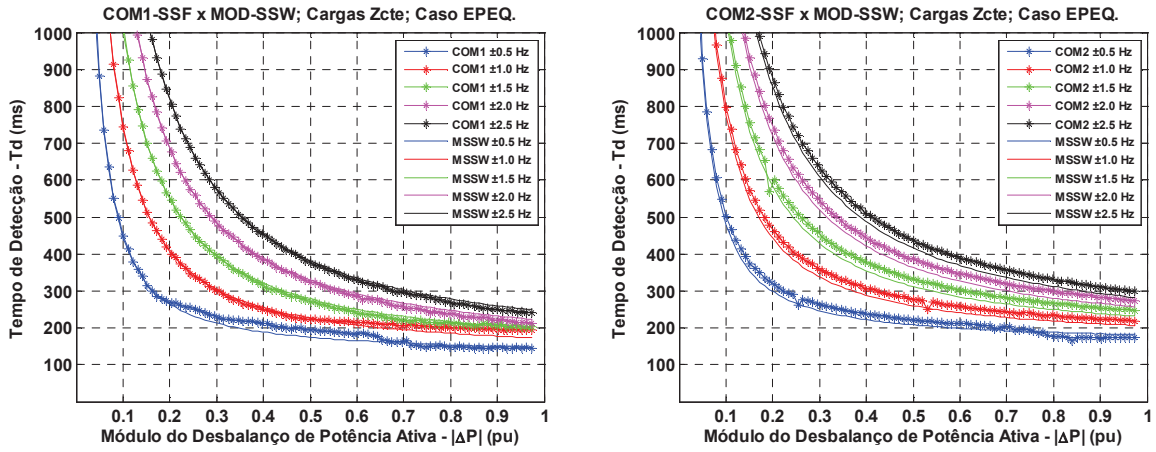
cruzam os tempos de 500 e 700 ms. O mesmo ocorre para o ajuste de ±1 Hz com o tempo crítico de 700 ms.

Tabela 5 – Comparação de ε do MSSW com COM1 e COM2: I_{cte}, EPDQ.

Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**					
	MSSW e COM1			**MSSW e COM2**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
±0,5 Hz	-1,44	-	-	2,20	-	-
±1,0 Hz	-2,21	-0,21	-	4,39	0,88	-
±1,5 Hz	-1,94	-0,38	-0,07	8,16	1,12	0,27
±2,0 Hz	-3,61	-0,48	-0,09	8,41	1,79	0,56
±2,5 Hz	-4,31	-0,69	-0,19	12,42	2,51	0,75
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	2,70	0,44	0,12	7,11	1,57	0,53

Observando os resultados da Tabela 5, na comparação com COM1, os erros foram negativos, e assim, o modelo é conservador em relação ao COM1. Já quando comparado com COM2, o modelo é otimista, pois sempre atua mais rápido que o COM2, pois os sinais de ε foram positivos. Além disso, todos os erros, em módulo, ficam mais próximos ao COM1.

A Figura 52 apresenta um caso com cargas Z_{cte} e EPEQ, em que as respostas do modelo e dos relés comerciais estão próximas entre si. A proximidade pode ser verificada pela análise numérica da Tabela 6, em que os maiores erros ocorreram para o ajuste de ±2,5 Hz e em 300 ms, sendo -3,66% para COM1 e 10,10% para COM2.



a) Comparação com COM1. b) Comparação com COM2.

Figura 52 – Comparação do MSSW com o COM1 e COM2: Z_{cte}, EPEQ.

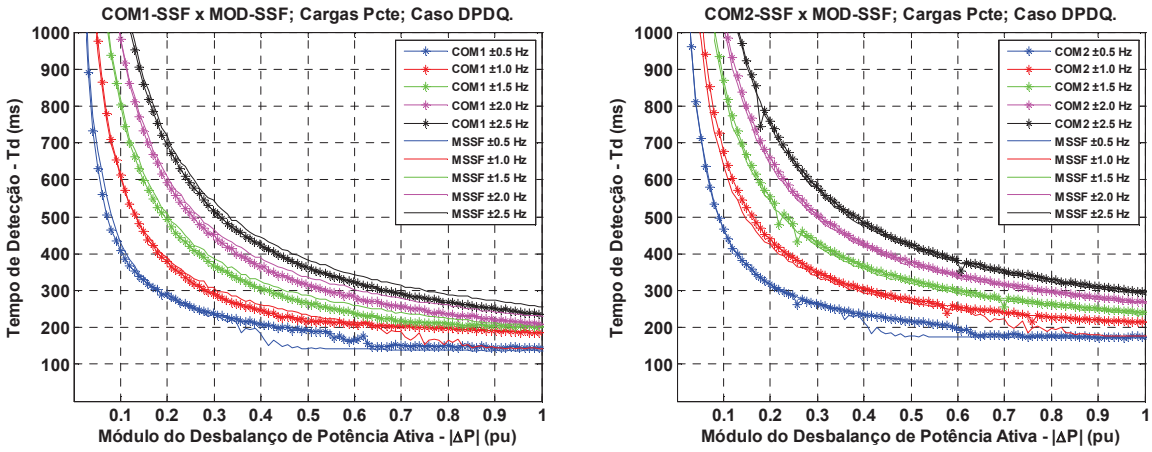
Tabela 6 – Comparação de ε do MSSW com COM1 e COM2: Z_{cte}, EPEQ.

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%)					
	MSSW e COM1			MSSW e COM2		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
±0,5 Hz	-0,24	0,12	0,09	2,71	0,59	0,25
±1,0 Hz	-0,41	-0,01	0,07	5,19	1,15	0,51
±1,5 Hz	-1,07	0,09	0,10	7,16	1,64	0,71
±2,0 Hz	-1,95	-0,14	-0,02	9,46	2,14	0,89
±2,5 Hz	-3,66	-0,29	0,02	10,10	2,52	1,10
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	1,46	0,13	0,06	6,92	1,61	0,69

Nos casos apresentados nessa subseção, foi observado que todos os resultados gráficos e numéricos foram muito próximos quando comparado o MSSW com o COM1. Os resultados gráficos de comparação com o COM2 também foram próximos, mas os resultados numéricos apresentaram um erro maior no tempo crítico de 300 ms e nos três ajustes menos sensíveis.

5.3.2 Comparações do MSSF com os relés comerciais

Na Figura 53 é apresentada a comparação do MSSF com dois relés comerciais (COM1 e COM2), para o caso de cargas P_{cte} e DPDQ, em que se observa uma boa aproximação entre as respostas do modelo e dos relés comerciais. A proximidade pode ser verificada pela análise numérica da Tabela 7.



a) Comparação com COM1. b) Comparação com COM2.

Figura 53 – Comparação do MSSF com o COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ.

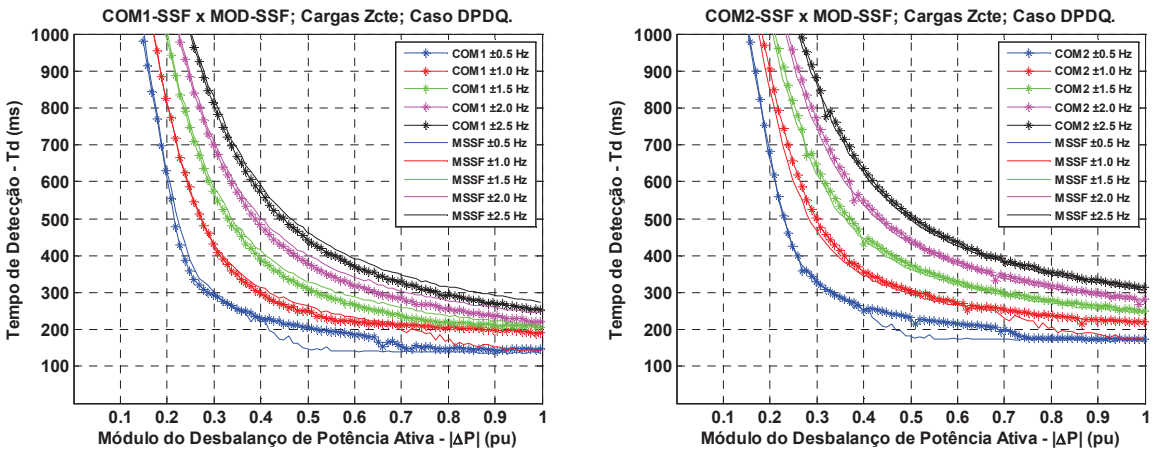
Observando a diferença média nos tempos críticos de 300 e 500 ms da Tabela 7, nota-se que o MSSF representa melhor o COM2 do que COM1. Na Figura 53(b), graficamente é visto que os resultados estão mais próximos do que na Figura 53(a).

Tabela 7 – Comparação de ε do MSSF com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ.

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%)					
	MSSF e COM1			MSSF e COM2		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
±0,5 Hz	0,27	-1,00	-0,44	0,08	-0,01	-0,01
±1,0 Hz	-2,81	-0,12	-0,20	3,35	1,53	0,87
±1,5 Hz	-4,20	-0,94	-0,35	2,82	0,82	0,36
±2,0 Hz	-6,64	-1,41	-0,45	2,90	0,87	0,66
±2,5 Hz	-8,55	-1,72	-0,74	3,88	1,36	0,64
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	4,49	1,04	0,44	2,61	0,92	0,51

Na Figura 54 é apresentada a comparação entre MSSF e COM1 e COM2, para o caso de cargas Z_{cte} e DPDQ. Os resultados são muito próximos, mas há uma diferença considerável entre os desbalanços de 0,4 e 0,7 pu devido à filtragem do MSSF, como explicada na seção 5.2.7.

A proximidade das curvas da Figura 54 pode ser verificada pela análise numérica da Tabela 8. Para o tempo crítico de 300 ms e ajuste de ±2,5 Hz, não há um valor comparativo entre o MSSF e COM2, pois a curva do COM2 não cruza o eixo de 300 ms, como observado na Figura 54(b). Isso ocorre apenas para o COM2 porque a temporização é 33,33 ms maior que a temporização de COM1.



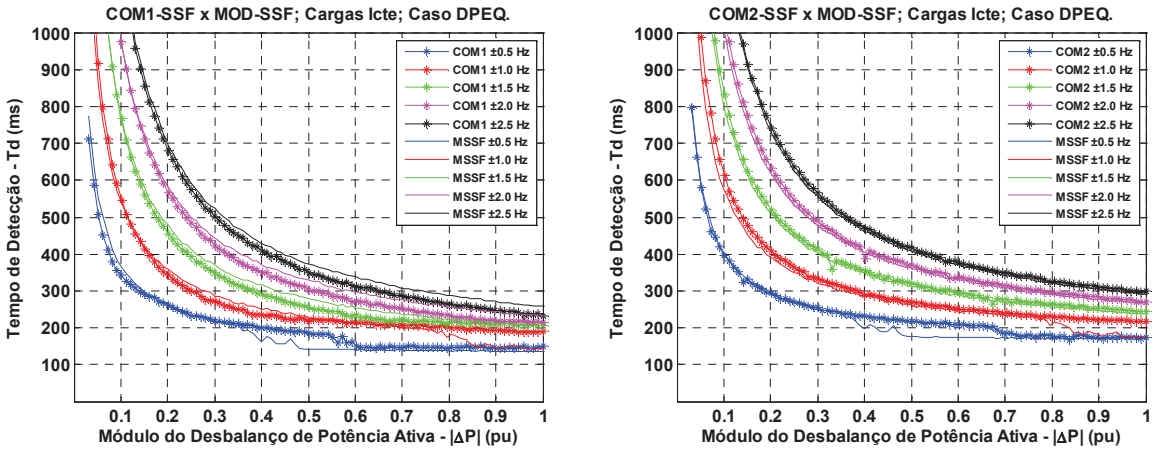
a) Comparação com COM1. b) Comparação com COM2.

Figura 54 – Comparação do MSSF com o COM1 e COM2: Z_{cte}, DPDQ.

Tabela 8 – Comparação de ε do MSSF com COM1 e COM2: Z_{cte}, DPDQ.

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%)					
	MSSF e COM1			MSSF e COM2		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
±0,5 Hz	-1,02	0,78	0,18	0,33	0,04	0,21
±1,0 Hz	-2,17	0,06	0,03	1,90	1,50	1,06
±1,5 Hz	-4,30	0,78	0,58	2,42	0,93	0,65
±2,0 Hz	-6,89	1,52	0,56	3,58	0,79	0,86
±2,5 Hz	-8,86	1,48	0,78	-	0,95	0,66
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	4,65	0,93	0,42	2,06	0,84	0,69

Na Figura 55 são apresentadas as curvas comparativas para o caso de cargas I_{cte} e DPEQ, observando-se uma boa aproximação gráfica entre elas, principalmente nos maiores ajustes da proteção de SSF. A Tabela 9 apresenta a comparação dos desbalanços críticos.



a) Comparação com COM1. b) Comparação com COM2.

Figura 55 – Comparação do MSSF com o COM1 e COM2: I_{cte}, DPEQ.

Tabela 9 – Comparação de ε do MSSF com COM1 e COM2: I_{cte}, DPEQ.

Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**					
	MSSF e COM1			**MSSF e COM2**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
±0,5 Hz	-0,87	-0,94	-0,45	-0,96	-0,32	-0,07
±1,0 Hz	-2,68	0,00	0,43	2,50	1,09	1,00
±1,5 Hz	-4,65	-0,91	-0,13	3,98	0,66	0,43
±2,0 Hz	-6,64	-1,07	-0,32	4,92	0,94	0,69
±2,5 Hz	-9,80	-1,78	-0,44	3,04	0,94	0,64
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	4,93	0,94	0,35	3,08	0,79	0,56

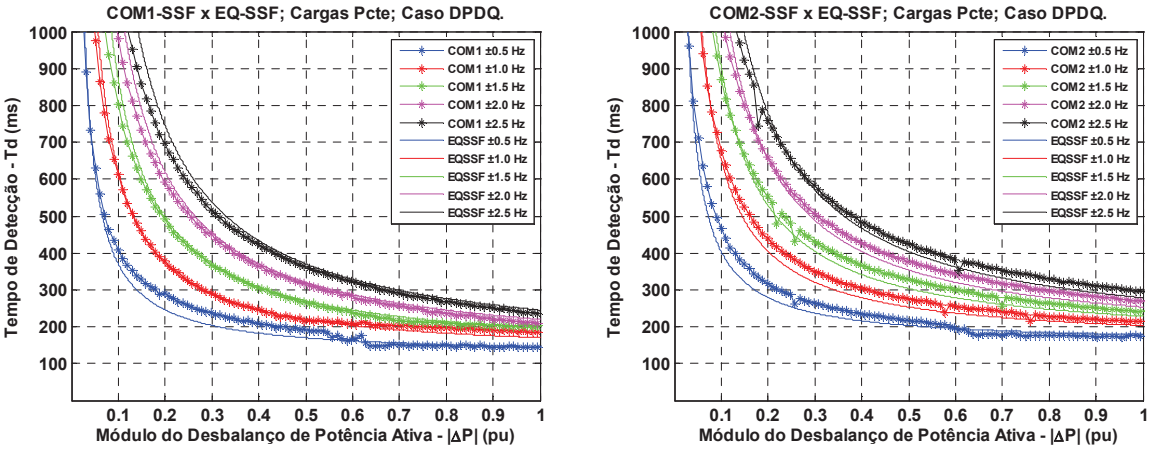
5.3.3 Comparações da EQSSF com os relés comerciais

Esta seção compara os resultados da EQSSF com os relés comerciais 1 e 2. Na EQSSF apresentada na Equação (36), H é 1,5 s; f_0 é 60 Hz; e ΔP varia de 1 pu a 0,0001 pu, com passos de decrescentes de 0,0001 pu. Os valores adotados são referentes ao sistema elétrico modelado e detalhado no **apêndice A**.

$$t_d = \frac{2H\beta}{f_0 \Delta P} + T_{set} \tag{36}$$

Para a Equação (36), T_{set} é 120 ms quando a EQSSF é comparada com o COM1, e igual a 153,33 ms quando comparado com COM2, como apresentado na seção 4.2.1.

A Figura 56 apresenta a comparação da EQSSF com dois relés comerciais, para o caso de cargas P_{cte} e DPDQ. Para cargas P_{cte}, a EQSSF não precisa de correções do ΔP.



a) Comparação com COM1. b) Comparação com COM2.

Figura 56 – Comparação da EQSSF com o COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ.

Os resultados gráficos entre a equação o os dados experimentais dos relés comerciais são muito próximos, e podem ser verificados numericamente na Tabela 10, que mostra um erro máximo de -3,10% entre a EQSSF e COM1, e 12,47% entre COM2.

Tabela 10 – Comparação de ε da EQSSF com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ.

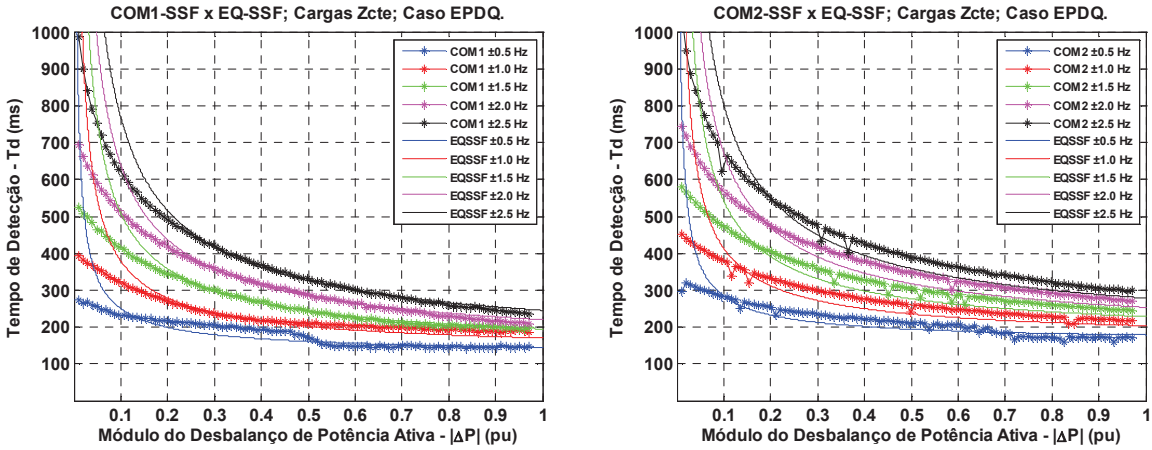
Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**					
	EQSSF e COM1			**EQSSF e COM2**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
±0,5 Hz	4,38	0,59	0,11	5,35	1,68	0,69
±1,0 Hz	0,61	0,04	-0,41	7,15	1,70	0,40
±1,5 Hz	0,08	-0,36	-0,93	8,61	1,79	0,14
±2,0 Hz	-1,71	-0,85	-1,36	10,47	1,81	-0,14
±2,5 Hz	-3,10	-1,46	-1,80	12,47	2,01	-0,28
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	1,98	0,66	0,92	8,81	1,80	0,33

Os próximos resultados são referentes ao caso de Z_{cte}, EPDQ. Para cargas diferentes de P_{cte} (isto é, Z_{cte} ou I_{cte} para este trabalho) a EQSSF precisa de correções do ΔP. A correção da EQSSF é feita usando a Equação (33) e a Tabela 2. O sistema de equações (37) apresenta a correção do ΔP, usando a constante k da Tabela 2, para o caso Z_{cte} e EPDQ.

$$\begin{cases} t_d = \dfrac{2H\beta}{f_0 \Delta P_F} + T_{set} \\ \Delta P_F = \Delta P^{\frac{1}{1+0,2\cdot 2}} \end{cases} \tag{37}$$

A Figura 57 apresenta os resultados do caso de Z_{cte} e EPDQ. O tempo de detecção na figura, referente à EQSSF, é obtida pelo tempo t_d do sistema de equações (37). O eixo x da Figura 57 é referente ao desbalanço, dado por ΔP. O ΔP_F é usado apenas para calcular o t_d, considerando a correção do desbalanço de potência.

Na Figura 57 a equação não está tão próxima aos relés como foi visto na Figura 56. Isto porque no caso de Z_{cte}, EPDQ a inclinação da curva dos relés muda para valores de desbalanço menores que 0,2 pu. Entretanto, os resultados, de forma geral, estão próximos, e como o tempo de atuação da EQSSF é maior que dos relés comerciais quando ΔP<0,2 pu, então usar a EQSSF é uma medida conservadora em relação à COM1 e COM2.



a) Comparação com COM1. b) Comparação com COM2.

Figura 57 – Comparação da EQSSF com o COM1 e COM2: Z_{cte}, EPDQ.

Observando o comportamento das curvas de desempenho da Figura 57, nota-se que os relés comerciais atuam para desbalanços de potência praticamente em zero, o que não deveria ocorrer, pois um desbalanço igual a zero não resulta em variações da frequência. Isso ocorre por ser um caso de cargas dependentes da tensão, pois, quando ocorre o ilhamento, um valor de ΔP muito próximo de zero é medido, e usado como coordenada no eixo x da curva de desempenho. Entretanto, após o ilhamento, o desbalanço de potência ativa na ilha é alterado, pois a tensão diminui por ser um caso de déficit de potência reativa, diminuindo a demanda das cargas. Como se trata de um caso de excesso de potência ativa, o valor de ΔP será maior que o valor usado como coordenada (isto é, o valor medido antes do ilhamento). Sendo assim, houve atuação da proteção para casos próximos de ΔP=0 pu porque o valor real do desbalanço de potência ativa era maior que zero, devido às cargas dependentes da tensão.

A Tabela 11 resume a comparação numérica entre a EQSSF e os dois relés comerciais, no caso de Z_{cte} e EPDQ. Os resultados numéricos desse caso foram piores do que o observado para as cargas P_{cte} e DPDQ, chegando ao erro de 15,88% em comparação à COM2.

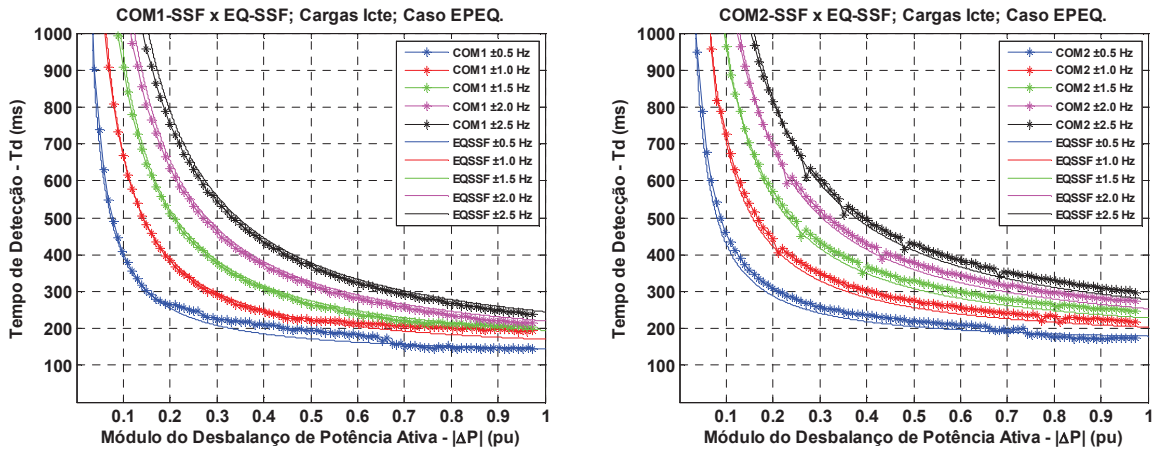
Tabela 11 – Comparação de ε da EQSSF com COM1 e COM2: Z_{cte}, EPDQ.

Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**					
	EQSSF e COM1			**EQSSF e COM2**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
±0,5 Hz	-	-	-	-2,85	-	-
±1,0 Hz	-2,98	-	-	7,47	-	-
±1,5 Hz	0,98	-7,47	-	13,22	-4,60	-
±2,0 Hz	2,12	-4,57	-	1,73	-0,81	-6,69
±2,5 Hz	0,66	-1,90	-5,21	15,88	2,33	-3,97
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	1,68	4,65	5,21	8,23	2,58	5,33

Os próximos resultados são referentes ao caso de I_{cte}, EPEQ, e então a correção de ΔP é necessária. O sistema de equações (38) apresenta a correção do ΔP, usando a constante k da Tabela 2, para o caso I_{cte} e EPEQ.

$$\begin{cases} t_d = \dfrac{2H\beta}{f_0 \Delta P_F} + T_{set} \\ \Delta P_F = \Delta P^{\frac{1}{1-0{,}04 \cdot 1}} \end{cases} \tag{38}$$

A Figura 58 apresenta os resultados comparativos para o caso I_{cte} e EPEQ, sendo que a equação representa muito bem os dois relés comerciais, ao contrário do apresentado no caso de Z_{cte} e EPDQ. A Tabela 12 apresenta a comparação numérica.



a) Comparação com COM1. b) Comparação com COM2.

Figura 58 – Comparação da EQSSF com o COM1 e COM2: I_{cte}, EPEQ.

Tabela 12 – Comparação de ε da EQSSF com COM1 e COM2: I_{cte}, EPEQ.

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%)					
	EQSSF e COM1			EQSSF e COM2		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
±0,5 Hz	0,10	0,38	0,33	2,87	0,85	0,49
±1,0 Hz	-1,00	-0,14	-0,10	5,68	1,04	0,34
±1,5 Hz	-1,32	-0,29	-0,45	7,08	1,12	0,18
±2,0 Hz	-3,07	-0,85	-0,70	8,57	1,40	0,26
±2,5 Hz	-3,05	-1,05	-0,89	10,91	1,82	0,13
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	1,71	0,54	0,49	7,02	1,24	0,28

Na Tabela 12 são observados resultados com erro muito baixo entre a EQSSF e os relés comercias, exceto para o tempo crítico de 300 ms e o COM2, apresentando um erro médio de 7,02%.

5.4 Resultados comparativos da proteção de taxa de variação de frequência

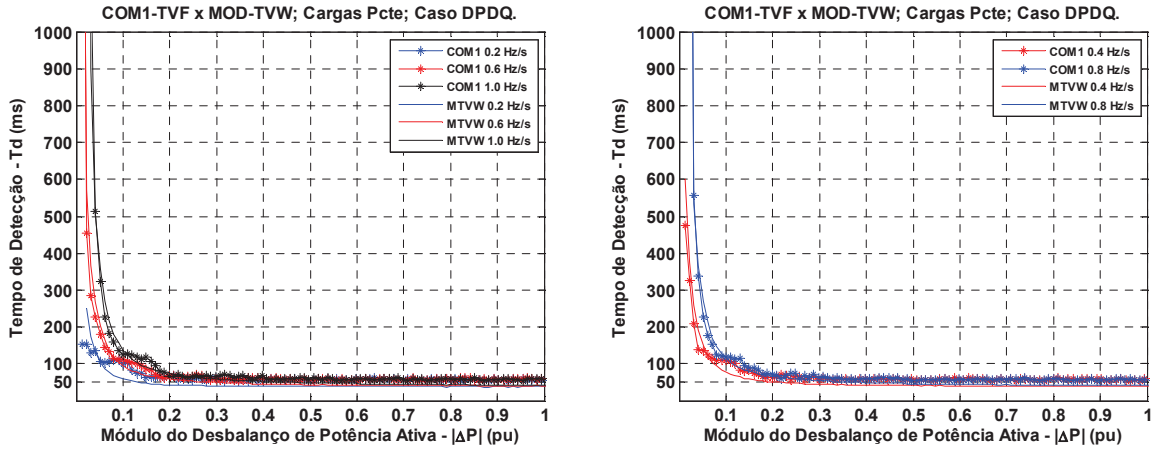
Esta seção apresenta os resultados comparativos dos modelos de taxa de variação de frequência com os relés comerciais.

5.4.1 Comparações do MTVW com os relés comerciais

Esta seção apresenta a comparação dos resultados do MTVW com os dois relés comerciais ensaiados. Como o COM2 unicamente atua para casos de déficit de potência ativa, todos os casos apresentados, referente aos modelos de taxa de variação da frequência, são relacionados a essa condição operativa, para que então possa haver a comparação com as curvas do COM2.

Na comparação com os relés comerciais, foi somado às curvas de desempenho dos modelos de TVF o valor de 33,33 ms, como visto na seção 4.2.1, que apresenta os ajustes de temporização dos relés comerciais.

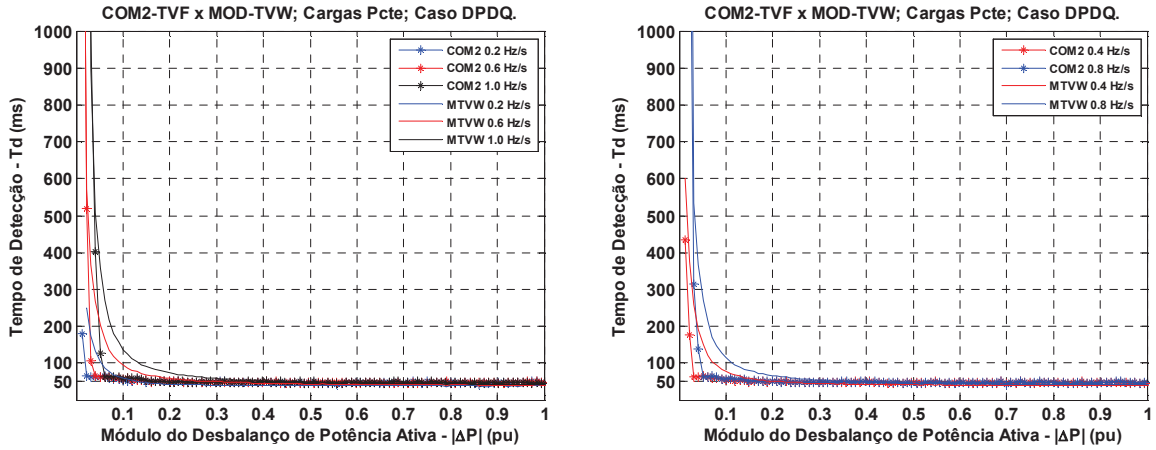
A Figura 59 apresenta os resultados do MTVW e do COM1 para 5 ajustes distintos, para o caso de cargas P_{cte} e a condição operativa de DPDQ.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 59 – Comparação do MTVW com o COM1: P_{cte}, DPDQ.

Na Figura 59 observa-se que graficamente os resultados são muito próximos entre si, e que tanto o modelo quanto o relé comercial apresentam o tempo da atuação praticamente constante para desbalanços de potência ativa superiores a 0,2 pu. O mesmo é concluído quando comparado o MTVW com o COM2, como apresentado na Figura 60, mas nesse caso, o erro para desbalanços menores que 0,2 pu tende a ser maior.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

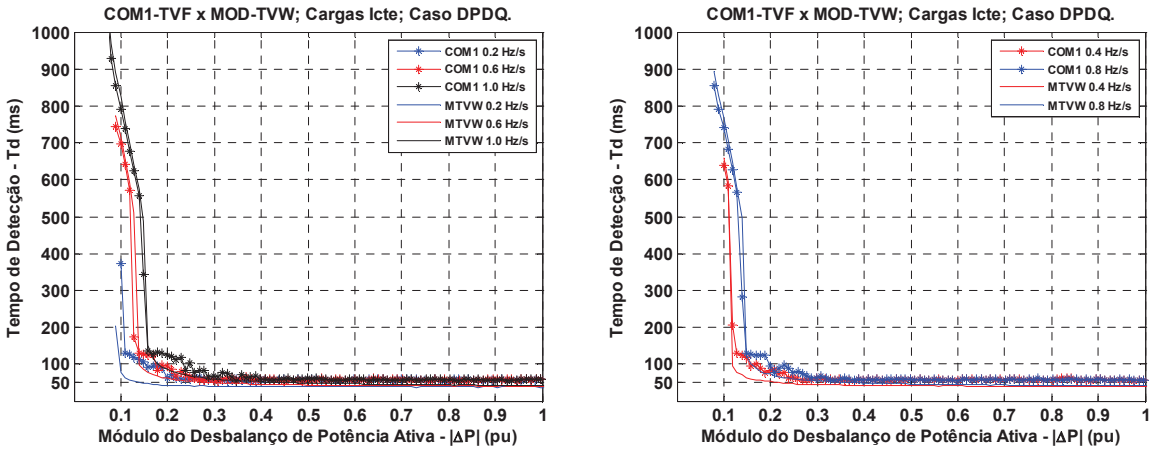
Figura 60 – Comparação do MTVW com o COM2: P_{cte}, DPDQ.

A Tabela 13 apresenta os resultados numéricos da comparação do MTVW com os relés comerciais, para o caso de P_{cte} e DPDQ. Nessa tabela, observa-se que o erro máximo foi de -1,57% em relação ao COM2 no ajuste de 0,8 Hz/s, e a maioria dos resultados apresentou erro abaixo de |0,5|%. Portanto, o MTVW, para esses casos, representou satisfatoriamente ambos os relés comerciais.

Tabela 13 – Comparação de ε do MTVW com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ.

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%)					
	MTVW e COM1			MTVW e COM2		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
0,2 Hz/s	-	-	-	-	-	-
0,4 Hz/s	-0,43	-	-	-1,11	-	-
0,6 Hz/s	-0,74	-0,36	-0,04	-1,11	-0,29	-0,01
0,8 Hz/s	-0,35	0,06	0,04	-1,57	-0,30	-0,09
1,0 Hz/s	-0,44	0,01	0,16	-1,28	-0,20	-0,01
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	0,49	0,15	0,08	1,27	0,27	0,03

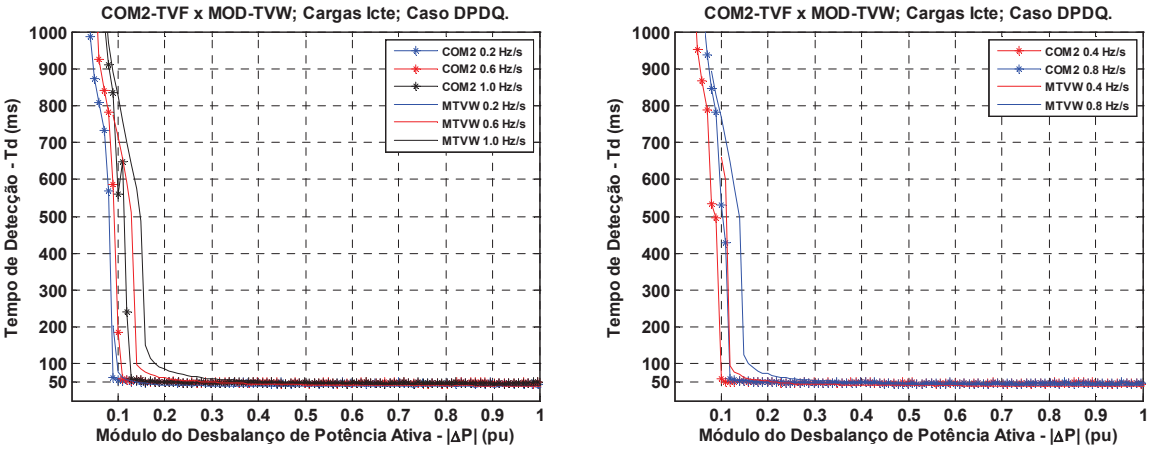
A Figura 61 apresenta os resultados do MTVW em relação ao COM1, e a Figura 62 em relação ao COM2, para um caso de I_{cte} e DPDQ. Nota-se que o MTVW representou melhor o COM1 do que o COM2. Em relação ao COM2, o modelo iniciou a inclinação da curva para um valor de ΔP maior, afastando-se dos resultados do MTVW.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 61 – Comparação do MTVW com o COM1: I_{cte}, DPDQ.

A diferença do MTVW com o COM2 é apresentada na Tabela 14, que atingiu um valor médio de erro de 3,53% para o tempo crítico de 500 ms, muito maior que os resultados observados na comparação com COM1. Na maioria dos casos, o modelo é conservador.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

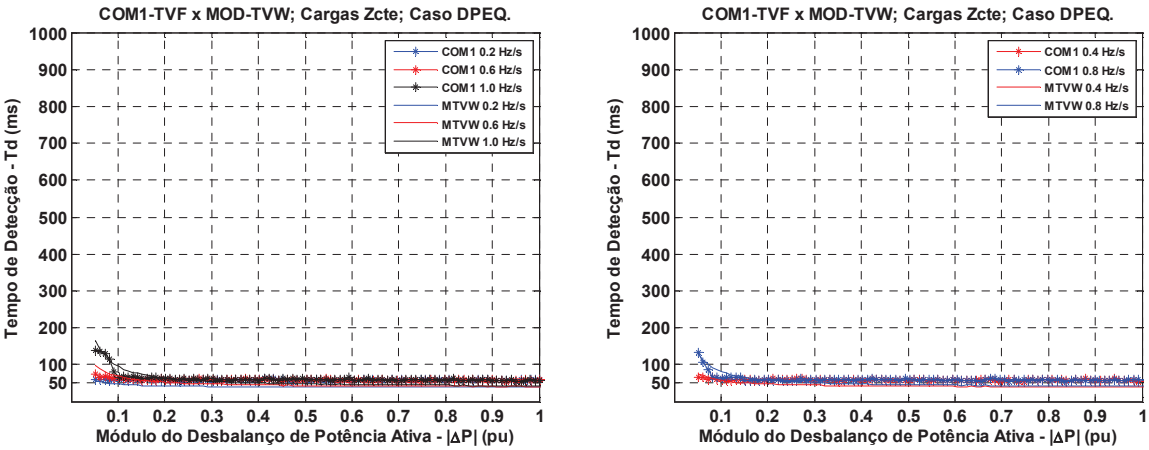
Figura 62 – Comparação do MTVW com o COM2: I_{cte}, DPDQ.

Tabela 14 – Comparação de ε do MTVW com COM1 e COM2: I_{cte}, DPDQ.

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%)					
	MTVW e COM1			MTVW e COM2		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
0,2 Hz/s	-	-	-	-	-	-
0,4 Hz/s	0,15	0,02	-	-2,12	-2,29	-
0,6 Hz/s	-0,81	-0,83	-0,34	-3,74	-3,75	-1,82
0,8 Hz/s	-0,58	-0,71	-0,43	-3,15	-3,64	-1,81
1,0 Hz/s	-0,33	-0,57	-0,37	-3,89	-4,43	-1,56
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	0,47	0,53	0,38	3,22	3,53	1,73

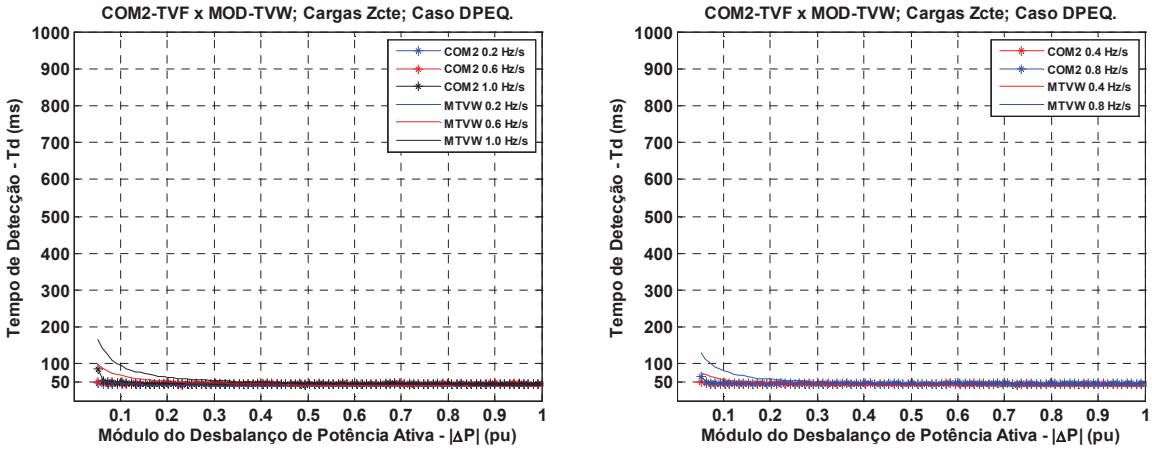
O último caso analisado é o de cargas Z_{cte} e condição operativa de DPEQ. As comparações são apresentadas na Figura 63, para o COM1, e na Figura 64, para COM2.

Graficamente, os resultados do modelo e dos relés comerciais observados na Figura 63 e Figura 64 são muito próximos, sendo que as curvas de desempenho praticamente se mantêm como uma reta horizontal. Como não houve cruzamento pelos tempos críticos especificados, não há meios de obter a comparação do $\Delta P_{crítico}$.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 63 – Comparação do MTVW com o COM1: Z_{cte}, DPEQ.



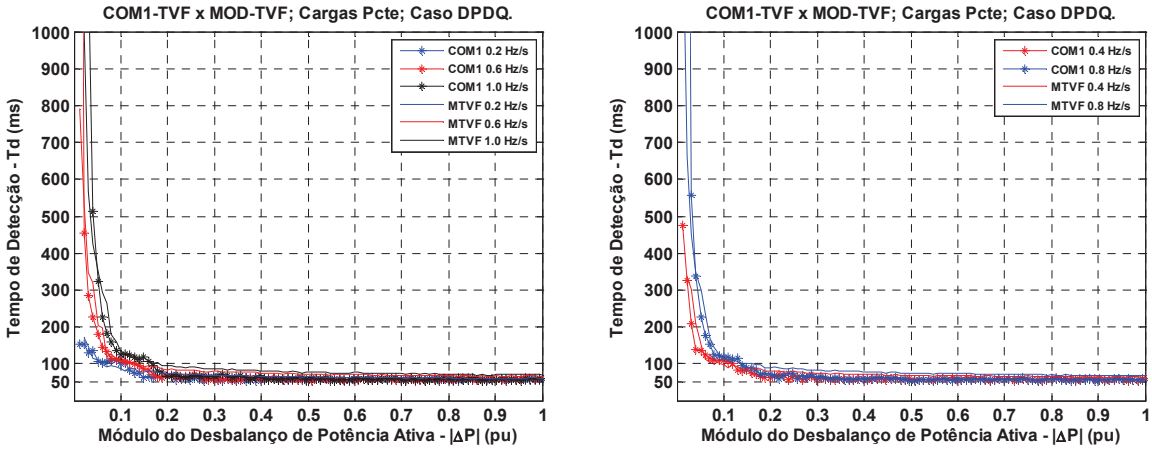
a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 64 – Comparação do MTVW com o COM2: Z_{cte}, DPEQ.

Baseando-se nos resultados gráficos e numéricos apresentados nessa seção, conclui-se que o MTVW representa muito bem os dois relés comerciais. Para o caso de I_{cte} e DPDQ, o MTVW representou melhor o COM1 que o COM2, mas ainda assim pode ser utilizado para representar o COM2.

5.4.2 Comparações do MTVF com os relés comerciais

Essa seção apresenta a comparação do MTVF com os relés comerciais. Na Figura 65 e na Figura 66 são apresentadas as curvas de desempenho comparativas para o caso de P_{cte} e DPDQ, quando comparado o MTVF com COM1 (Figura 65) e COM2 (Figura 66).

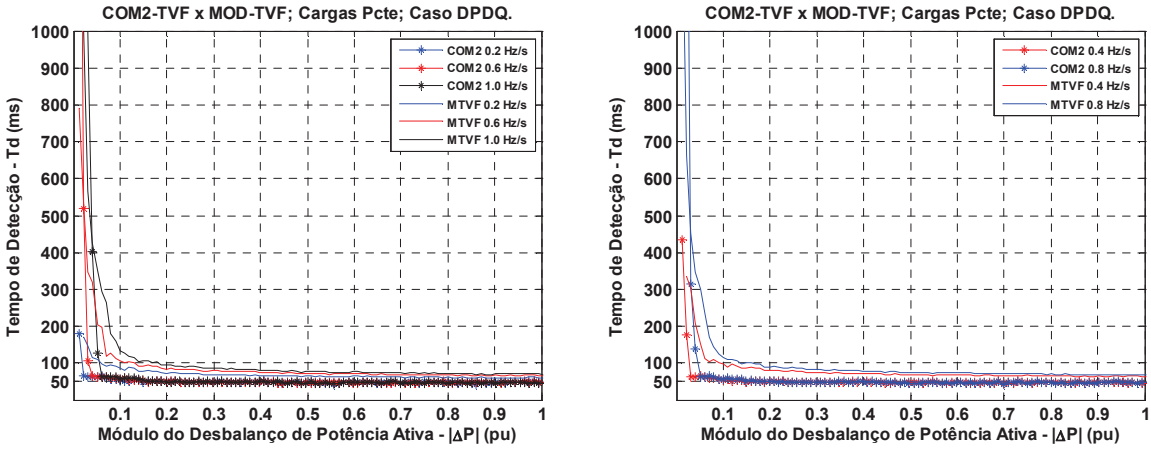


a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 65 – Comparação do MTVF com o COM1: P_{cte}, DPDQ.

Para a comparação com o COM1 na Figura 65, os resultados foram muito próximos. Em comparação ao COM2 na Figura 66, houve uma diferença um pouco maior para

desbalanços maiores de 0,2 pu. Entretanto, essa diferença não é significativa, pois, analisando os tempos de atuação para o ajuste de 0,8 Hz/s e desbalanço de 0,5 pu, observa-se que o COM1 atua em 53,93 ms, o COM2 atua em 46,12 ms e o modelo atua em 75,42 ms. Portanto, a resposta do MTVF está mais próxima de COM1, e ambos os relés comerciais estão afastados por uma diferença de 7,81 ms.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

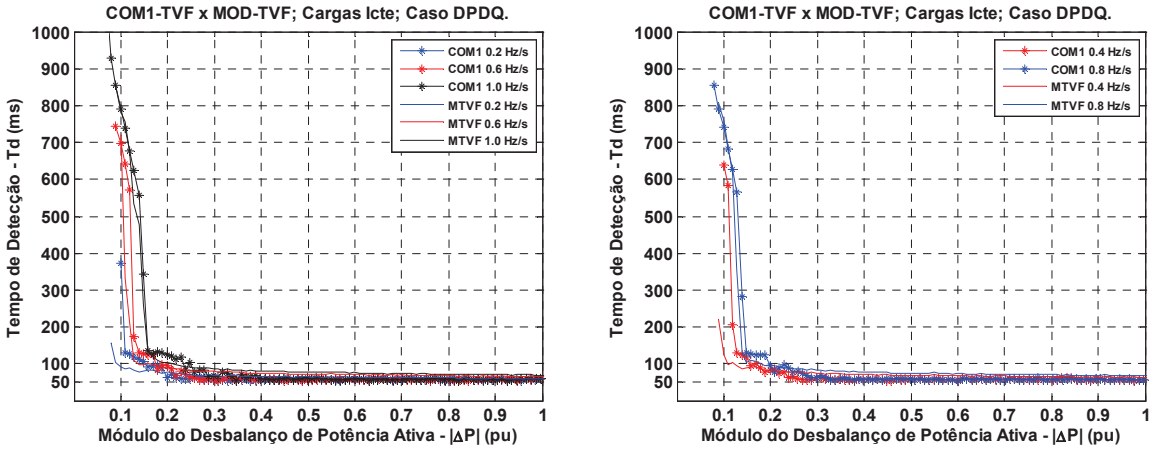
Figura 66 – Comparação do MTVF com o COM2: P_{cte}, DPDQ.

Os resultados comparativos para cargas P_{cte} e DPDQ são apresentados na Tabela 15, em que a diferença máxima de ε é -1,84%, e assim, o modelo proposto pode representar ambos os relés comerciais com baixo erro, para a condição operativa analisada.

Tabela 15 – Comparação de ε do MTVF com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ.

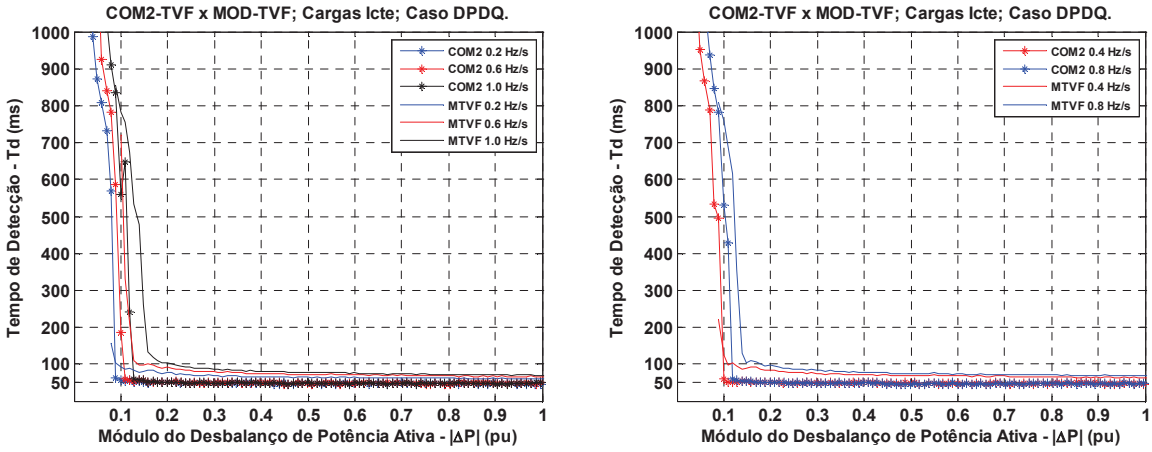
Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**					
	MTVF e COM1			**MTVF e COM2**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
0,2 Hz/s	-	-	-	-	-	-
0,4 Hz/s	-0,80	-	-	-1,48	-	-
0,6 Hz/s	-1,24	-0,18	0,54	-1,61	-0,11	0,57
0,8 Hz/s	-0,63	0,49	0,93	-1,84	0,12	0,80
1,0 Hz/s	-0,67	0,57	0,93	-1,51	0,35	0,76
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	0,83	0,41	0,80	1,61	0,19	0,71

Na Figura 67 e na Figura 68 são apresentadas as curvas de desempenho de um caso de cargas I_{cte} e DPDQ. Os resultados do modelo são muito próximos dos relés comerciais, mas para a comparação com COM2 da Figura 68, há uma diferença para valores de desbalanço maiores que 0,2 pu, assim como visto na Figura 66.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 67 – Comparação do MTVF com o COM1: I_{cte}, DPDQ.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

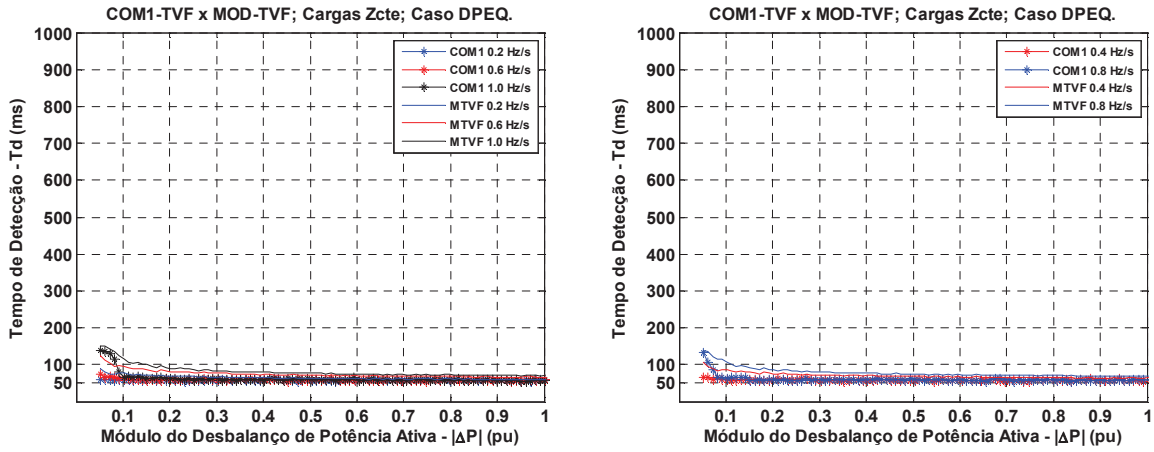
Figura 68 – Comparação do MTVF com o COM2: I_{cte}, DPDQ.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados comparativos de desbalanços críticos, para o caso de I_{cte} e DPDQ. Os resultados são muito próximos, sendo a maioria das comparações apresenta erro menor que |1|% para a comparação com o COM1, e menor que |2|% em comparação com o COM2.

Tabela 16 – Comparação de ε do MTVF com COM1 e COM2: I_{cte}, DPDQ.

Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**					
	MTVF e COM1			**MTVF e COM2**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
0,2 Hz/s	-	-	-	-	-	-
0,4 Hz/s	-	-	-	-	-	-
0,6 Hz/s	1,40	1,60	-0,13	-1,53	-1,33	-1,61
0,8 Hz/s	0,70	0,79	-0,12	-1,88	-2,13	-1,50
1,0 Hz/s	0,39	0,67	-0,03	-3,16	-3,19	-1,22
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	0,83	1,02	0,09	2,19	2,22	1,44

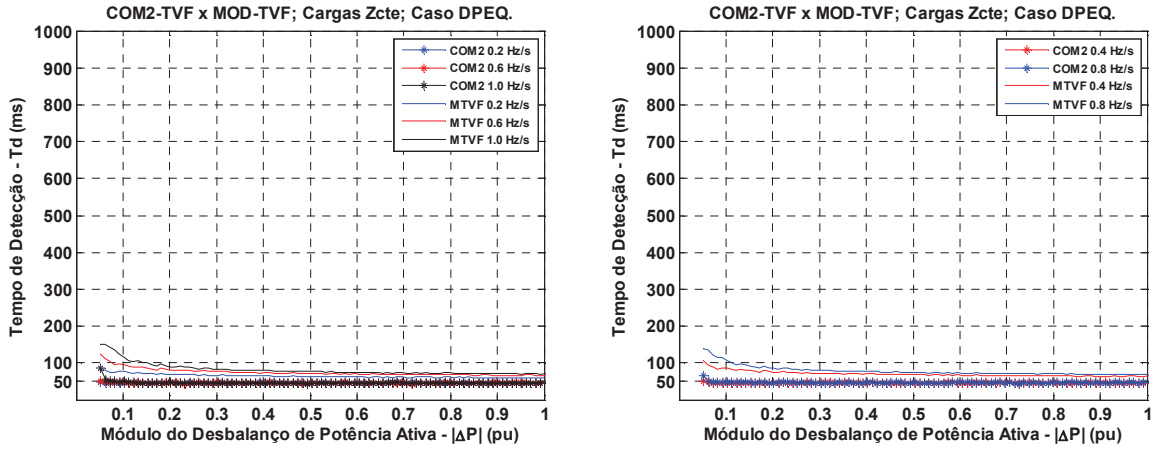
Uma comparação do caso de cargas Z_{cte} e DPEQ é apresentada, em relação ao COM1, na Figura 69. Os resultados são similares, e nesse caso, os tempos de atuação não excedem 200 ms, exceto para desbalanços próximos de zero, em que não ocorre a atuação.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 69 – Comparação do MTVF com o COM1: Z_{cte}, DPEQ.

Na Figura 70 são apresentados os resultados comparativos do MTVF com o COM2, considerando carga Z_{cte} e a condição DPEQ. Nessa figura os resultados ainda são próximos, mas o modelo demora mais a atuar que o COM2. Adicionalmente, o modelo tem uma inclinação maior que o COM2 para desbalanços menores que 0,1 pu, caracterizando uma pequena diferença.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 70 – Comparação do MTVF com o COM2: Z_{cte}, DPEQ.

Como não há cruzamento pelos tempos críticos de 300, 500 e 700 ms, não há uma tabela comparativa para o caso de Z_{cte} e DPEQ.

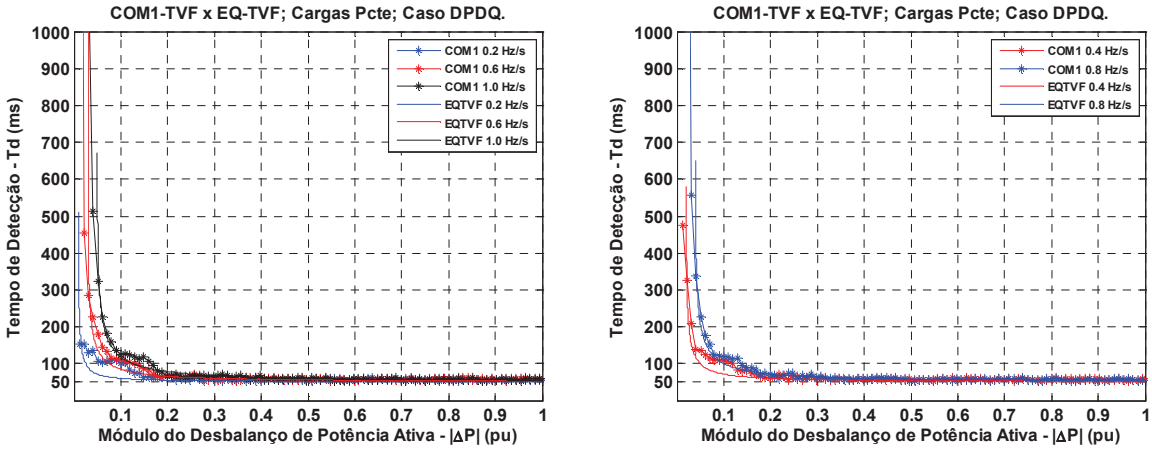
5.4.3 Comparações da EQTVF com os relés comerciais

Esta seção compara os resultados da EQTVF com os relés comerciais 1 e 2. Na EQTVF apresentada na Equação (39), H é 1,5 s; f_0 é 60 Hz; T_a é 0,1 s; Δt é 16,667 ms e ΔP varia de 1 pu a 0,0001 pu, com passos decrescentes de 0,0001 pu. Os valores adotados são referentes ao sistema descrito no **apêndice A**.

$$t_d = -T_a \ln\left(1 - \frac{2H\beta}{f_0 \Delta P}\right) + \Delta t + T_{set} \tag{39}$$

Para a Equação (39), T_{set} é 33,33 ms quando a EQTVF é comparada com quaisquer um dos relés comerciais, como apresentado na seção 4.2.1, referente às características dos relés.

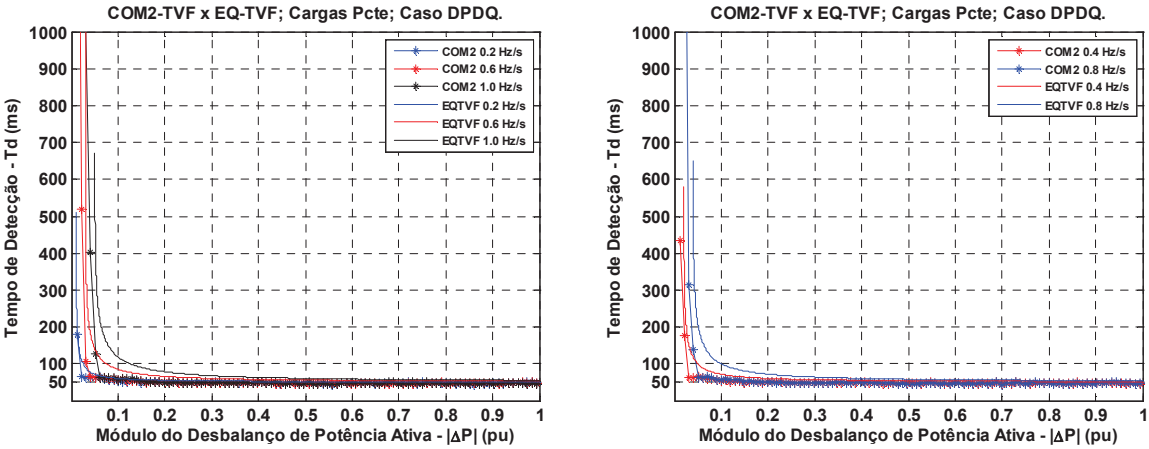
A Figura 71 compara a EQSSF com o COM1 para o caso de cargas P_{cte} e DPDQ. Nesse caso, a EQSSF não precisa de correções do ΔP. Os resultados da comparação foram separados em duas figuras, para melhorar a forma de visualização dos resultados. A EQTVF representa muito bem o COM1, como analisado graficamente na Figura 71, seguindo o comportamento do relé comercial para todos os valores de ΔP.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 71 – Comparação da EQTVF com o COM1: P_{cte}, DPDQ.

Os resultados da EQTVF e COM2 são apresentados na Figura 72, em que é visto que a equação também representa bem esse relé comercial, mas não acompanha a inclinação da curva, para valores de ΔP menores que 0,1 pu.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 72 – Comparação da EQTVF com o COM2: P_{cte}, DPDQ.

A Tabela 17 apresenta os resultados numéricos da comparação da EQTVF com os relés comerciais, para o caso de P_{cte}, DPDQ, sendo observado que os resultados são muito próximos, e a máxima diferença foi de -1,38% para o COM2 considerando o tempo crítico de 700 ms e o ajuste de 1,0 Hz/s. Na maioria dos resultados, a diferença do desbalanço crítico foi menor que |1|%.

Tabela 17 – Comparação de ε da EQTVF com COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ.

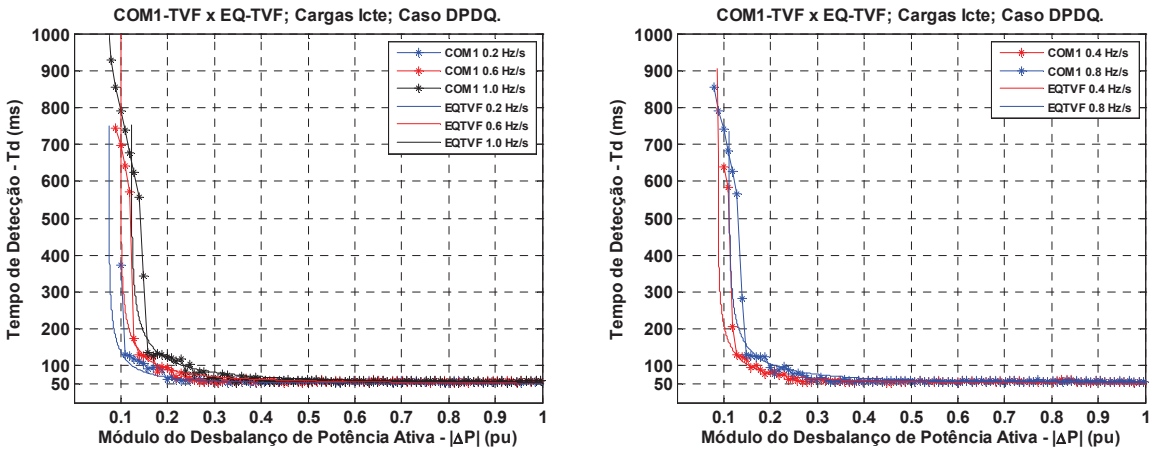
Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**					
	EQTVF e COM1			**EQTVF e COM2**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
0,2 Hz/s	-	-	-	-	-	-
0,4 Hz/s	0,19	-	-	-0,49	-	-
0,6 Hz/s	-0,21	-0,88	-0,95	-0,58	-0,82	-0,92
0,8 Hz/s	0,09	-0,64	-0,96	-1,13	-1,01	-1,09
1,0 Hz/s	-0,12	-0,88	-1,21	-0,97	-1,10	-1,38
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	0,15	0,80	1,04	0,79	0,97	1,13

Os próximos resultados são referentes ao caso de I_{cte} e DPDQ. Neste caso, as correções de ΔP são feitas, usando a Equação (34) e a Tabela 2. O sistema de equações (40) apresenta a correção do ΔP, usando a constante k da Tabela 2, para o caso I_{cte} e DPDQ.

$$\begin{cases} t_d = -T_a \ln\left(1 - \dfrac{2H\beta}{f_0 \Delta P_F}\right) + \Delta t + T_{set} \\ \Delta P_F = e^{\dfrac{\ln(\Delta P)}{0{,}0843\ln(\beta) + (1-0{,}3\cdot 1)^1}} \end{cases} \tag{40}$$

A Figura 73 apresenta os resultados comparativos entre a EQTVF e o COM1, para o caso de I_{cte} e DPDQ. O tempo de detecção na figura, referente à EQTVF, é obtido pelo tempo t_d do sistema de equações (40), e o eixo x é referente ao desbalanço, dado por ΔP. O ΔP_F é usado apenas para calcular o t_d, considerando a correção do desbalanço de potência.

Observando os resultados do relé comercial 1 na Figura 73, há inclinações nas curvas de desempenho (entre 500 ms e 800 ms) que não foram vistas para os casos de cargas modeladas como potência constante. Isso ocorre porque a taxa de variação de frequência é menor para desbalanços de potência próximos de zero, levando a tempos de atuação mais longos. Com isso, há mais tempo para que o regulador de tensão do GD atue, e por consequência, altere a potência consumida pelas cargas dependentes da tensão. Sendo assim, o formato da curva de desempenho é alterado, pois à variação na demanda das cargas, alterando o desbalanço de potência, a taxa de variação de frequência e o tempo de detecção.

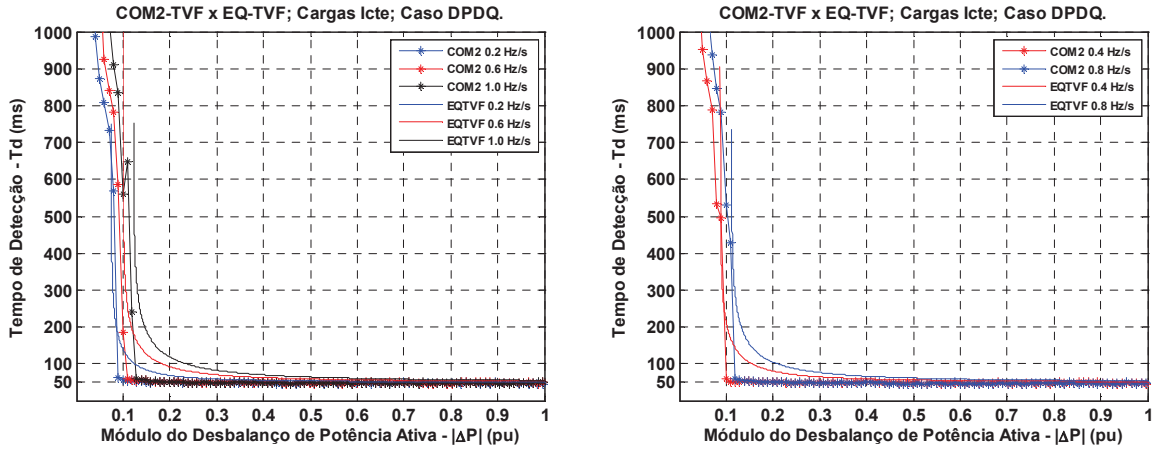


a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 73 – Comparação da EQTVF com o COM1: I_{cte}, DPDQ.

Os resultados da Figura 73 apresentam que o modelo e o relé comercial estão muito próximos. O mesmo é visto na comparação com o COM2 na Figura 74.

A principal diferença entre os relés comerciais e a equação é na região de 0,1 pu, em que as curvas dos relés comerciais mudam bruscamente sua característica, diferentemente da equação, que apresentam um comportamento contínuo.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 74 – Comparação da EQTVF com o COM2: I_{cte}, DPDQ.

A Tabela 18 apresenta os resultados comparativos da EQTVF com o COM1 e COM2, para o caso de I_{cte} e DPDQ. Observa-se que, em relação ao COM1, houve uma diferença máxima de 2,42%, para o tempo crítico de 300 ms e ajuste de 0,4 Hz/s.

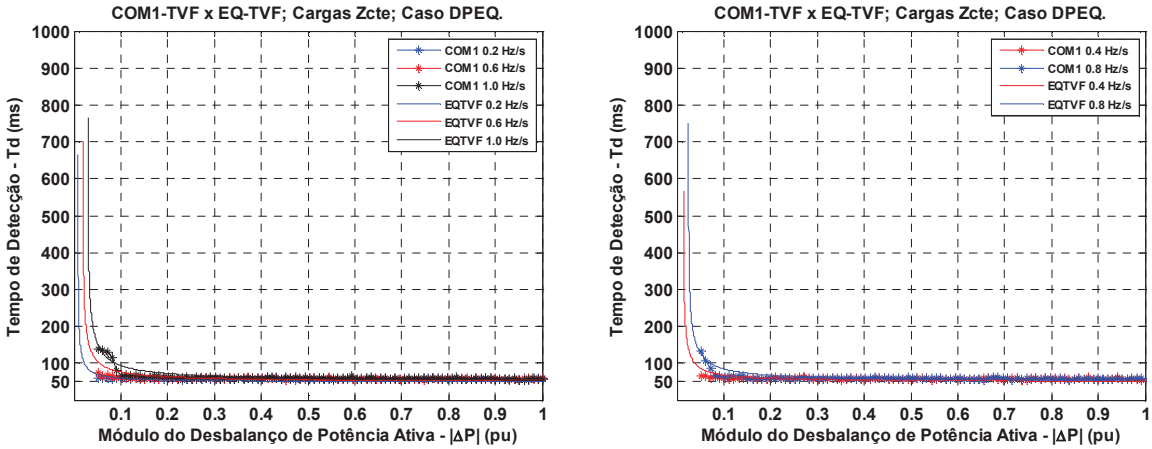
Tabela 18 – Comparação de ε da EQTVF com COM1 e COM2: I_{cte}, DPDQ.

Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**					
	EQTVF e COM1			**EQTVF e COM2**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
0,2 Hz/s	2,41	-	-	0,66	0,59	-0,29
0,4 Hz/s	2,42	2,32	-	0,15	0,01	-1,46
0,6 Hz/s	2,01	2,02	-0,15	-0,92	-0,91	-1,63
0,8 Hz/s	2,00	1,88	-0,55	-0,58	-1,04	-1,92
1,0 Hz/s	2,05	1,77	-0,75	-1,51	-2,09	-1,93
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	2,18	2,00	0,48	0,76	0,93	1,45

Os próximos resultados são referentes ao caso de Z_{cte} e DPEQ, e então ΔP necessita ser corrigido. O sistema de equações (41) apresenta a correção do ΔP, usando a constante k da Tabela 2, para o caso de cargas Z_{cte} e condição operativa de DPEQ.

$$\begin{cases} t_d = -T_a \ln\left(1 - \dfrac{2H\beta}{f_0 \Delta P_F}\right) + \Delta t + T_{set} \\ \Delta P_F = e^{\dfrac{\ln(\Delta P)}{0{,}0843\ln(\beta) + (1+0{,}04\cdot 2)^2}} \end{cases} \tag{41}$$

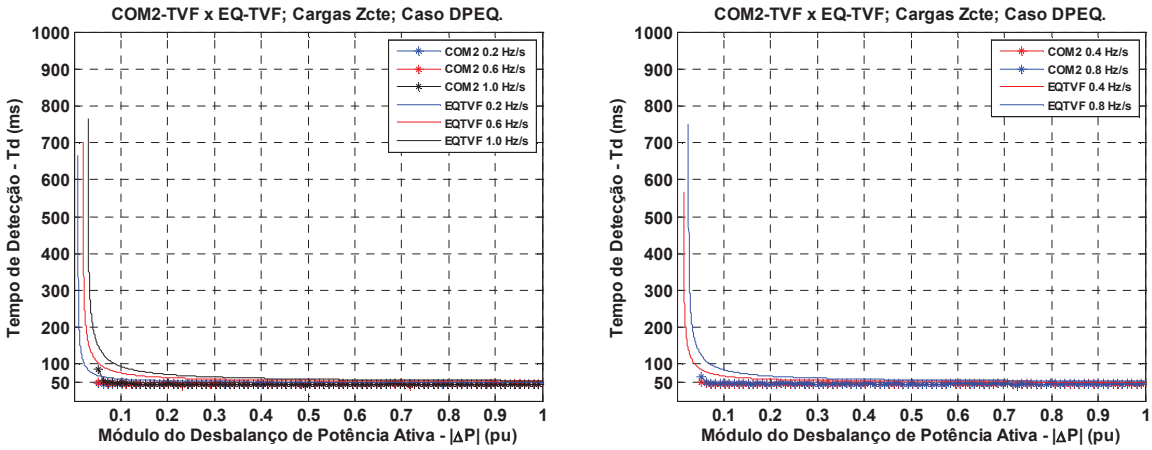
Na Figura 75 e na Figura 76 são apresentados os resultados comparativos da EQTVF com os relés comerciais, para o caso de Z_{cte} e DPEQ. Os resultados são, graficamente, muito próximos, e a equação segue a inclinação do COM1.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 75 – Comparação da EQTVF com o COM1: Z_{cte}, DPEQ.

Os relés comerciais 1 e 2, para o caso da Figura 75 e Figura 76, não têm respostas para desbalanços próximos de zero. Isto é, para essa faixa, os relés comerciais não atuam, e a equação representa bem esse comportamento, pois resulta em tempos muito altos.



a) 3 ajustes. b) 2 ajustes.

Figura 76 – Comparação da EQTVF com o COM2: Z_{cte}, DPEQ.

Como não há cruzamento dos relés comerciais pelos tempos críticos de 300, 500 e 700 ms, não há uma tabela comparativa para o caso de Z_{cte} e DPEQ.

5.5 Resultados comparativos da proteção de deslocamento de fase

Esta seção apresenta os resultados comparativos dos modelos de deslocamento de fase com o relé comercial 1, já que o relé comercial 2 não respondeu como esperado, como apresentado na seção 5.2.6.

5.5.1 Comparações do MDFA1 (cruzamento por zero) com os relés comerciais

Para as comparações dos modelos de DFA foi usado unicamente o COM1, pois de acordo com a seção 5.2.6, o COM2 não respondeu de forma adequada.

Na comparação com o COM1, não foi somado às curvas de desempenho dos modelos de DFA nenhuma correção da temporização, pois como visto na seção 4.2.1, a função de DFA, tanto para COM1 e COM2, tem atuação instantânea.

Na Figura 77 são apresentadas as cinco curvas de desempenho do MDFA1 e do COM1, referentes ao caso de cargas P_{cte} e DPDQ. Os ajustes são de 6°, 9°, 12°, 15° e 18°.

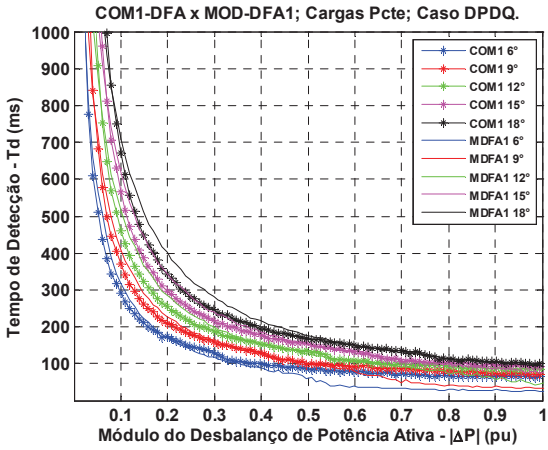


Figura 77 – Comparação do MDFA1 com o COM1: P_{cte}, DPDQ.

Os resultados da Figura 77 são graficamente próximos e satisfatórios. Entretanto, para valores de desbalanço de potência ativa maiores que 0,5 pu, o modelo atua mais rápido que o COM1, para os ajustes de 6° e 9°. Essa atuação mais rápida do modelo está relacionada ao filtro usado no MDFA1, como explicado na seção 5.2.7, em que nessa faixa a proteção acaba atuando por uma oscilação inicial do sinal de entrada.

Os resultados entre modelos computacionais de deslocamento de fase e o relé comercial 1 geralmente apresentaram as diferenças observadas na Figura 77, isto é, diferenças maiores para desbalanço maior que 0,5 pu e na região entre 0,15 pu à 0,4 pu. As diferenças observadas para desbalanços maiores que 0,5 pu são aceitáveis, pois essa é uma região que tanto o relé comercial quanto o modelo atuam rapidamente, detectando em tempo adequado o ilhamento. Sobre a diferença no intervalo de 0,15 pu à 0,4 pu, o modelo demora mais para atuar que o relé comercial. Sendo assim, o modelo é conservativo e pode ser usado para obter os ajustes de proteção, o que torna essa diferença aceitável.

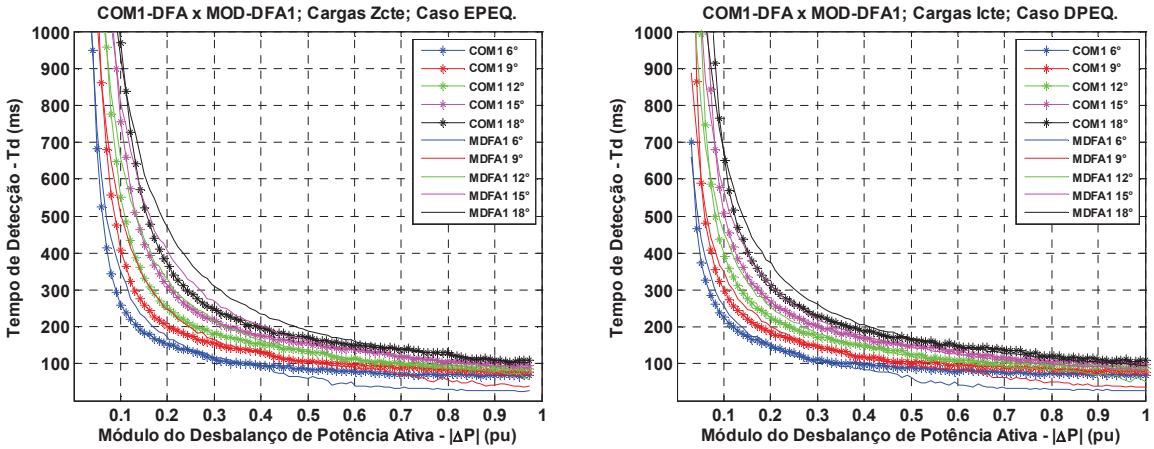
A análise comparativa da Tabela 19 para P_{cte} e DPDQ apresenta uma diferença média de 2,82% para o tempo crítico de 300 ms, e de forma geral, as diferenças são menores que |1,5|%. Para o tempo crítico de 700 ms os resultados numéricos foram mais próximos do que para 300 ms.

Tabela 19 – Comparação de ε do MDFA1 com o COM1: P_{cte}, DPDQ.

Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
6°	-1,14	-0,95	-0,27
9°	-1,80	-0,96	-0,27
12°	-2,48	-1,23	-0,34
15°	-3,82	-1,65	-0,54
18°	-4,86	-1,99	-0,57
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	2,82	1,36	0,40

Os próximos resultados são apresentados na Figura 78, e são referentes aos casos de Z_{cte} e EPEQ (Figura 78(a)) e I_{cte} e DPEQ (Figura 78(b)).

Observa-se que os resultados do MDFA1 são muito próximos dos resultados do COM1 (Figura 78), e essa proximidade é verificada na Tabela 20, em que são observados valores pequenos de erros, exceto para o tempo crítico de 300 ms e o caso Z_{cte} e EPEQ, em que a diferença média foi de 4,88%.



a) Z_{cte}, EPEQ. b) I_{cte}, DPEQ.

Figura 78 – Comparação do MDFA1 com o COM1: outros casos.

Tabela 20 – Comparação da ε do MDFA1 com o COM1: outros casos.

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%)					
	MDFA1 e COM1: Caso Z_{cte}, EPEQ			MDFA1 e COM1: Caso I_{cte}, DPEQ		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
6°	-2,59	-0,74	-0,36	-1,27	-0,40	-
9°	-3,55	-1,48	-0,49	-2,12	-0,39	0,42
12°	-4,77	-2,48	-0,84	-2,67	-0,90	0,42
15°	-6,21	-2,83	-1,11	-3,59	-1,35	0,06
18°	-7,28	-3,11	-1,09	-4,43	-1,57	-0,00
Média de $\|\varepsilon\|$ (%)	4,88	2,13	0,78	2,82	0,92	0,22

5.5.2 Comparações do MDFA2 (Simulink®) com os relés comerciais

Esta seção apresenta os resultados comparativos do MDFA2 (proposto em [1]) com o COM1. O primeiro caso analisado é de cargas P_{cte} e DPDQ, apresentado na Figura 79.

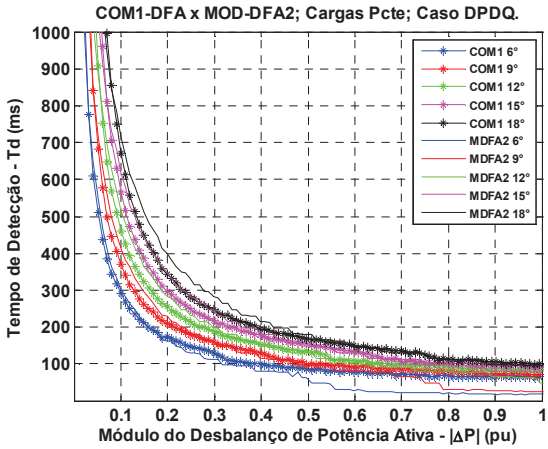


Figura 79 – Comparação do MDFA2 com o COM1: P_{cte}, DPDQ.

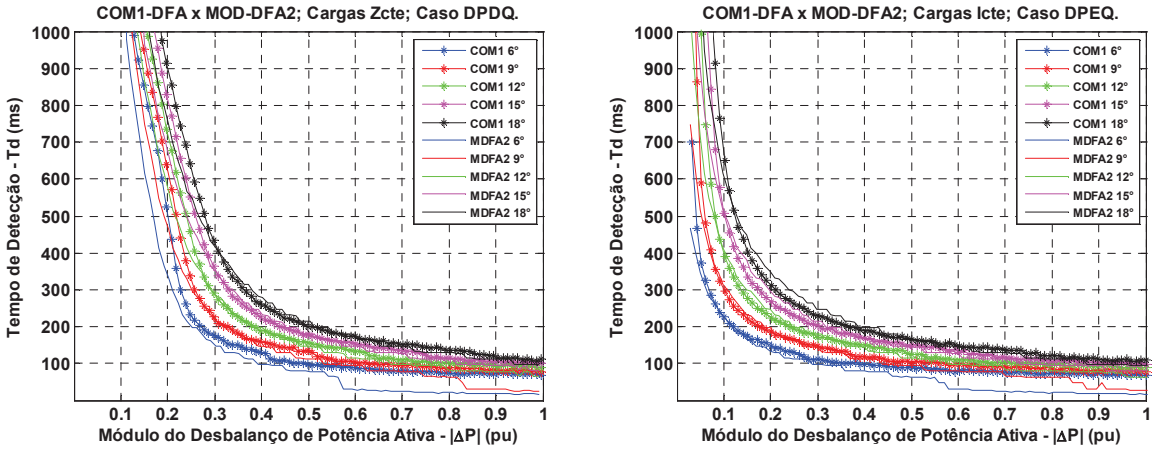
Graficamente, observa-se na Figura 79 que os resultados são muito próximos entre si, mas para valores de desbalanço de potência ativa maiores que 0,5 pu, o modelo atua mais rápido que o COM1 para os ajustes de 6° e 9°. A variação abrupta observada no MDFA2 é mais severa do que o observado para o MDFA1. Essa diferença entre os modelos ocorre devido à diferença dos filtros de entrada.

A Tabela 21 compara os desbalanços críticos para o caso de cargas P_{cte} e DPDQ. Os resultados comparativos são próximos, mas para 300 ms e 18° há uma diferença de -4,48%.

Tabela 21 – Comparação de ε do MDFA2 com o COM1: P_{cte}, DPDQ.

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%)		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
6°	-0,29	-0,43	-0,12
9°	-2,01	-0,96	-0,27
12°	-2,53	-1,19	-0,45
15°	-3,11	-1,55	-0,55
18°	-4,48	-2,01	-0,64
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	2,48	1,23	0,41

Os próximos dois casos são apresentados na Figura 80, referentes a cargas Z_{cte} e DPDQ (Figura 80(a)); e cargas I_{cte} e DPEQ (Figura 80(b)). Graficamente, ambos os casos apresentam variações abruptas nas curvas para ΔP>0,5 pu e para os dois ajustes mais sensíveis. Para o restante das curvas de desempenho, os resultados do MDFA2 e do COM1 são muito próximos.



a) Z_{cte}, DPDQ. b) I_{cte}, DPEQ.

Figura 80 – Comparação do MDFA2 com o COM1: outros casos.

A Tabela 22 apresenta os resultados comparativos dos casos de cargas Z_{cte} e DPDQ; e cargas I_{cte} e DPEQ. Para esses casos, a diferença máxima foi de 3,28%, e os valores médios apresentaram valores baixos.

Tabela 22 – Comparação de ε do MDFA2 com o COM1: outros casos.

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%)					
	MDFA2 e COM1: Caso Z_{cte}, DPDQ			MDFA2 e COM1: Caso I_{cte}, DPEQ		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
6°	1,65	3,18	3,28	0,48	-	-
9°	0,68	2,72	2,96	-0,70	0,80	1,49
12°	0,23	2,28	2,74	-1,05	0,30	1,41
15°	-0,18	1,83	2,58	-2,16	-0,05	1,16
18°	-1,84	1,33	2,48	-2,76	-0,33	1,11
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	0,92	2,27	2,81	1,43	0,37	1,29

5.5.3 Comparações da EQDFA com os relés comerciais

Esta seção compara os resultados da EQDFA com o COM1. Na EQDFA apresentada na Equação (42), os seguintes valores das variáveis são considerados: H é 1,5 s; f_0 é 60 Hz; c é 2 ciclos e ΔP varia de 1 pu a 0,0001 pu, com passos decrescentes de 0,0001 pu. Os valores adotados são referentes ao sistema elétrico modelado, e estão descritos no **apêndice A**. Para a Equação (42), T_{set} é 0 ms, pois a proteção de DFA do COM1 tem atuação instantânea, como apresentado na seção 4.2.1.

$$t_d = \frac{H\beta}{\pi c \Delta P} + \frac{c}{2f_0} + T_{set} \tag{42}$$

A Figura 81 apresenta comparação da EQDFA com o COM1, para o caso de cargas P_{cte} e DPDQ. Para cargas P_{cte}, a EQDFA não precisa de correções do ΔP.

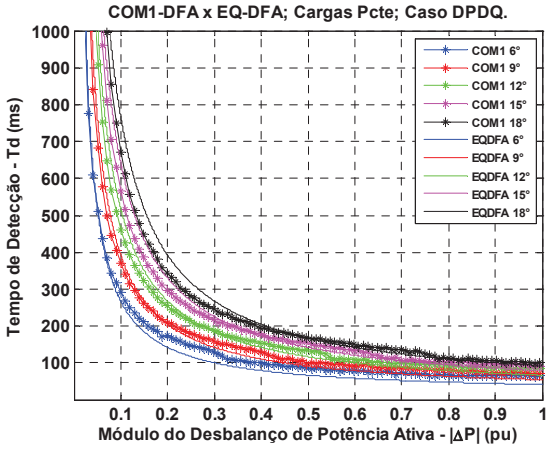


Figura 81 – Comparação da EQDFA com o COM1: P_{cte}, DPDQ.

Os resultados da equação e do relé estão graficamente próximos entre si, e assim, a equação representa muito bem os resultados experimentais. A Tabela 23 apresenta os resultados comparativos para cargas P_{cte} e DPDQ, em que a maioria dos resultados de diferenças do desbalanço de potência ficou abaixo de |2|%.

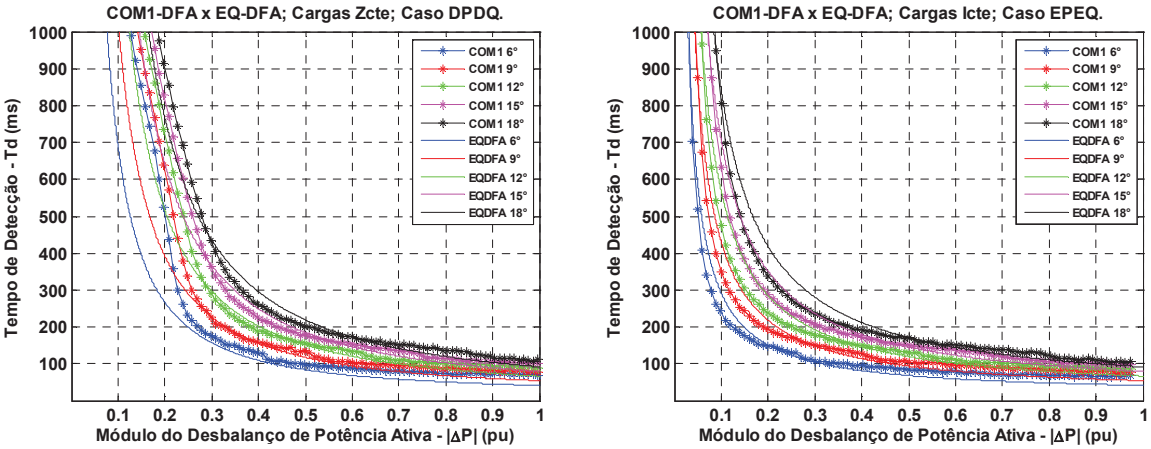
Tabela 23 – Comparação de ε da EQDFA com o COM1: P_{cte}, DPDQ.

Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
6°	0,84	0,05	-0,07
9°	-0,51	-0,72	-0,50
12°	-1,43	-1,11	-0,75
15°	-2,44	-1,60	-1,05
18°	-3,31	-2,19	-1,34
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	1,71	1,13	0,74

Os próximos resultados são referentes aos casos de Z_{cte}, DPDQ e I_{cte}, EPEQ. Para esses casos, a EQDFA precisa de correções do ΔP, como apresentada na Equação (33) e a Tabela 2. O sistema de equações (43) apresenta as correções do ΔP, usando a respectiva constante k da Tabela 2, para os casos de Z_{cte}, DPDQ e I_{cte}, EPEQ.

$$\begin{cases} t_d = \dfrac{H\beta}{\pi c \Delta P_F} + \dfrac{c}{2f_0} + T_{set} \\ Z_{cte}, DPDQ \Rightarrow \Delta P_F = \Delta P^{\frac{1}{1-0,04\cdot 2}} \\ I_{cte}, EPEQ \Rightarrow \Delta P_F = \Delta P^{\frac{1}{1-0,04\cdot 1}} \end{cases} \tag{43}$$

A Figura 82 apresenta os resultados comparativos da EQDFA com os ajustes do sistema de equações (43), e do COM1, para os casos de Z_{cte}, DPDQ e I_{cte}, EPEQ. Observa-se que na Figura 82(a), para valores de desbalanço menores que 0,3 pu, a equação não segue o comportamento do relé comercial, pois a correção de ΔP é constante, o que não altera o comportamento da equação para variações do desbalanço. Entretanto, o comportamento é adequado na Figura 82(b).



a) Z_{cte}, DPDQ. b) I_{cte}, EPEQ.

Figura 82 – Comparação da EQDFA com o COM1: outros casos.

Na Tabela 24 são apresentados os resultados comparativos dos casos de Z_{cte}, DPDQ e I_{cte}, EPEQ. Observa-se que para 700 ms no caso de Z_{cte} e DPDQ, a diferença é alta, que é explicada pelo comportamento da curva da Figura 82(a).

Tabela 24 – Comparação de ε da EQDFA com o COM1: outros casos.

Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**					
	EQDFA e COM1: Caso Z_{cte}, DPDQ			**EQDFA e COM1: Caso I_{cte}, EPEQ**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
6°	4,49	7,51	7,57	-1,94	-0,79	-0,30
9°	1,53	5,17	5,75	-2,63	-1,20	-0,42
12°	-0,36	3,49	4,37	-3,71	-1,79	-0,76
15°	-1,77	2,06	3,30	-4,31	-2,18	-0,81
18°	-3,19	0,82	2,32	-5,12	-2,61	-1,09
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	2,27	3,81	4,66	3,54	1,72	0,68

Mais da metade dos resultados da Tabela 24 são maiores que |2|%, e o maior erro é de 7,57%. Apesar dessa diferença, os resultados são considerados com erro baixo, pois a simplicidade da aplicação dessa equação torna esse método atraente.

Para o MDFA1 e a EQDFA foi considerado que a constante *c* é 2 ciclos. A Figura 83 apresenta uma comparação do COM1 e a EQDFA em 12°, sendo variado o parâmetro *c* de *1* a 5 ciclos na equação, para então observar a sensibilidade dos resultados perante essa constante.

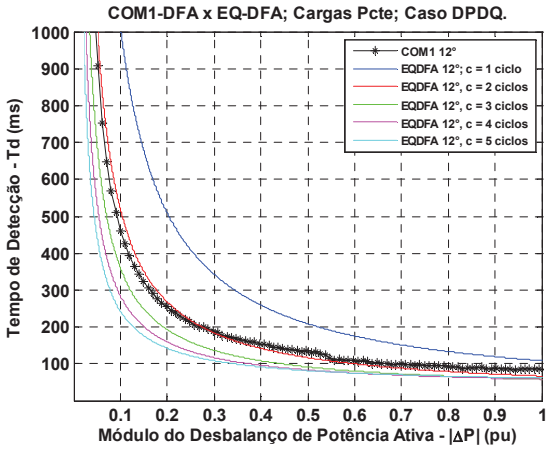


Figura 83 – Comparação da EQDFA com o COM1 para variação do *c*.

Observa-se na Figura 83 que quanto maior o valor de *c*, mais rápida é a atuação do relé, já que uma variação menor, por ciclo, é necessária para levar a atuação da proteção. O resultado da EQDFA mais próximo do COM1 é o que tem a constante *c* igual a 2 ciclos. O mesmo foi observado para o MDFA1.

5.6 Conclusões sobre os resultados comparativos

Esta seção apresenta as conclusões parciais em relação à comparação dos modelos computacionais e analíticos com os relés comerciais 1 e 2. Uma tabela contendo todos os resultados simulados é apresentada, em que nela foram considerados os nove cenários de estudo apresentados na seção 5.1, cinco ajustes para cada função de proteção e os tempos críticos de 300 ms, 500 ms e 700 ms. Na Tabela 25 são apresentados os resultados referentes à comparação de todos os modelos propostos com o relé comercial 1. Cada coluna da tabela é explicada nos seguintes tópicos:

- **N° de comparações**: são os números de casos testados para cada modelo. Ao todo foram ensaiados $9 \cdot 5 \cdot 3$=135 casos, referentes aos:
  - 9 cenários operativos, referentes a: P_{cte}-DPDQ; I_{cte}-DPDQ; I_{cte}-DPEQ; I_{cte}-EPDQ; I_{cte}-EPEQ; Z_{cte}-DPDQ; Z_{cte}-DPEQ; Z_{cte}-EPDQ; Z_{cte}-EPEQ;
  - 5 ajustes de cada proteção. Para as funções de SSF, os ajustes são ±0,5 Hz; ±1,0 Hz; ±1,5 Hz; ±2,0 Hz e ±2,5 Hz. Para as funções de TVF, 0,2 Hz/s; 0,4 Hz/s; 0,6 Hz/s; 0,8 Hz/s e 1,0 Hz/s; Para as funções de DFA, os ajustes são 6°; 9°; 12°; 15° e 18°.
  - 3 tempos críticos de atuação, sendo de 300 ms, 500 ms e 700 ms.

- Como exemplo, para o MSSW da Tabela 25, 123 casos foram testados. Isso porque 12 casos não apresentaram resultados, pois uma determinada curva não cruza o tempo crítico, como apresentada na Figura 51(a) e Tabela 5.

- **Média total**: é o valor médio do módulo de todas as diferenças de desbalanço crítico. Por exemplo, para o MSSW, é a média dos 123 valores de $|\varepsilon|$ obtidos para esse modelo.
- **Valor máximo**: é a maior diferença do módulo do desbalanço crítico observado. Para o MSSW, é o maior valor, para os 123 casos analisados ($\max\{|\varepsilon|\}$).
- **Quantidade que é ≤1%**: é o número de casos em que $|\varepsilon|$ é menor que 1%. Para o MSSW, 71,54% dos 123 casos apresenta uma diferença, em módulo, menor que 1% em relação ao COM1. O mesmo princípio é visto para a **quantidade que é ≤3%** e **Quantidade que é ≤5%**, porém o valor de referência é 3% e 5%, respectivamente.

A Tabela 25 apresenta a comparação dos modelos com o COM1, e a Tabela 26 da comparação com COM2. A Tabela 26 não apresenta os resultados comparativos dos modelos de DFA, pois a resposta de DFA do COM2 não pode ser usada para comparação.

Tabela 25 – Resumo dos resultados comparativos entre modelos e COM1.

Modelo	N° de comparações	Média Total	Valor Máximo	Quantidade que é ≤1 %	Quantidade que é ≤3 %	Quantidade que é ≤5 %
MSSW	123	0,78%	4,49%	71,54%	92,68%	100,00%
MSSF	123	2,31%	10,43%	51,22%	73,98%	82,11%
EQSSF	123	1,59%	7,68%	52,03%	82,11%	94,31%
MTVW	64	0,38%	1,58%	96,88%	100,00%	100,00%
MTVF	51	0,82%	1,79%	74,51%	100,00%	100,00%
EQTVF	68	1,11%	3,84%	58,82%	95,59%	100,00%
MDFA1	106	1,96%	8,50%	42,45%	76,42%	91,51%
MDFA2	102	2,70%	11,46%	26,47%	67,65%	83,33%
EQDFA	106	2,32%	10,22%	32,08%	71,70%	87,74%

Tabela 26 – Resumo dos resultados comparativos entre modelos e COM2.

Modelo	N° de comparações	Média Total	Valor Máximo	Quantidade que é ≤1 %	Quantidade que é ≤3 %	Quantidade que é ≤5 %
MSSW	124	3,33%	13,91%	25,81%	67,74%	75,00%
MSSF	124	1,37%	10,79%	60,48%	87,10%	97,58%
EQSSF	124	4,03%	15,88%	22,58%	57,26%	69,35%
MTVW	34	2,04%	5,32%	29,41%	64,71%	97,06%
MTVF	27	1,61%	3,84%	29,63%	88,89%	100,00%
EQTVF	46	0,99%	2,44%	56,52%	100,00%	100,00%

A seguir estão listadas algumas conclusões relevantes de cada modelo testado com os relés comerciais, baseadas nas seções 5.3, 5.4 e 5.5 e na Tabela 25 e Tabela 26.

- **MSSW:** Modelo de Sub/Sobre Velocidade Angular

Apresentou uma resposta próxima aos dois relés comerciais. Na análise numérica do desbalanço crítico, o MSSW apresentou respostas melhores para o COM1 do que para COM2. As maiores diferenças observadas na comparação com COM2 foram para o tempo crítico de 300 ms. O MSSW não apresentou uma região de variações abruptas nas curvas de desempenho, como visto no MSSF. Isso porque é baseado na velocidade angular do GD.

Observando a Tabela 25 e a Tabela 26, 100% dos casos têm uma diferença de desbalanço crítico menor ou igual a 5% em relação ao COM1, mas apenas 75% dos casos são menores que 5% quando esse modelo é comparado ao COM2. Além disso, a média total em relação ao COM1 é de 0,78%, e em relação ao COM2 é 3,33%.

- **MSSF:** Modelo de Sub/Sobre Frequência Baseado no Sinal de Tensão

O MSSF apresenta uma variação abrupta na curva, que foi explicada na seção 5.2.7. Essa variação ocorre devido à filtragem do sinal e porque esse modelo é baseado no sinal de tensão, assim como os relés comerciais. Vale ressaltar que os relés comerciais também apresentam essa característica.

Em relação aos resultados comparativos, foi observado que graficamente o MSSF apresentou respostas satisfatórias e que representam bem os relés comerciais.

Observando a Tabela 25 e a Tabela 26, a média total é de 2,31% em relação ao COM1, e de 1,37% em relação ao COM2. O valor máximo foi maior que 10% em relação aos dois relés, mas 97,58% dos resultados são menores ou iguais a 5% quando comparado com COM2, e 82,11% em relação ao COM1, o que caracteriza uma boa representatividade.

Observando os números citados, entende-se que o MSSF está um pouco mais próximo do COM2 do que do COM1. De forma geral, esse modelo apresentou bons resultados, já que a maioria dos desbalanços críticos está abaixo de 5%.

- **EQSSF:** Equação Analítica de Sub/Sobre Frequência

A EQSSF é uma maneira fácil e rápida de obter as curvas de desempenho da função de SSF, para qualquer ajuste e temporização. Entretanto, correções no desbalanço de potência são necessárias se o modelo de carga a ser usado não for P_{cte}. Para isso usa-se a Tabela 2.

Dos resultados gráficos apresentados na seção 5.3.3, a EQSSF ficou muito próxima dos casos de P_{cte}-DPDQ e I_{cte}-EPEQ, mas se distanciou no caso de Z_{cte}-EPDQ para a região de desbalanços de potência menor que 0,2 pu. Essa diferença para o caso de Z_{cte}-EPDQ ocorre porque os relés comerciais respondem de uma forma diferente do esperado, isto é, o padrão de curvatura está diferente da maioria das curvas de desempenho obtidas por outros casos, e a equação usada para correção do ΔP não é adequada.

Observando a Tabela 25 e a Tabela 26, as médias totais são de 1,59% e 4,03%, em relação ao COM1 e COM2, respectivamente. A média em relação ao COM1 apresenta resultados próximos, sendo que 52,03% dos casos apresentam ε menores que 1%. Entretanto, em relação ao COM2, a média de 4,03% é considerada alta, e para COM2, apenas 22,58% dos casos apresenta ε menores que 1%.

A EQSSF seguiu melhor o comportamento do COM1 do que o COM2. Isso mostra que essa equação representa bem um relé comercial, que é um dos objetivos deste trabalho. Porém, para uma mesma função de proteção, relés comerciais de fabricantes distintos podem apresentar grandes diferenças nas respostas.

- **MTVW:** Modelo de Taxa de Variação da Velocidade Angular

Uma característica interessante dos dois modelos de taxa de variação de frequência é que eles não apresentaram as variações abruptas vistas nos modelos de SSF e DFA.

Graficamente o MTVW apresentou erro baixo quando comparado com os relés comerciais (seção 5.4.1). Para ΔP<0,2 pu, o comportamento do modelo seguiu melhor a resposta do COM1. Isso é confirmado pelos resultados apresentados na Tabela 25 e na Tabela 26, em que a média total em relação ao COM1 é de 0,38%, e com o COM2 é de 2,04%.

Os resultados do MTVW são muito próximos aos relés comerciais. Em relação ao COM1, 96,88% dos casos apresentam ε menor ou igual a 1%, e para o COM2, 97,06% dos casos apresentam ε menor ou igual a 5%.

- **MTVF:** Modelo de Taxa de Variação de Frequência Baseado no Sinal de Tensão

Este modelo, abordado na seção 5.4.2, apresenta resultados gráficos muito próximos aos relés comerciais, e as respostas estão mais próximas dos resultados do COM1.

Para ΔP>0,2 pu, esse modelo apresentou uma diferença de tempo de atuação em relação ao COM2, o que não foi visto para o COM1. Para ΔP<0,2 pu, o comportamento inclinado da curva se assemelha mais ao COM1 que ao COM2.

Observando a Tabela 25 e a Tabela 26, as médias totais são de 0,82% em relação ao COM1, e de 1,61% em relação ao COM2, com um valor máximo de 1,79% e 3,84%, respectivamente.

- **EQTVF:** Equação Analítica de Taxa de Variação de Frequência

A EQTVF não acompanhou a muito bem a inclinação das curvas apresentadas na seção 5.4.3, mas de forma geral, o comportamento dos relés comerciais foi seguido. Na Tabela 25 e a Tabela 26, as médias totais da EQTVF são de 1,11% em relação ao COM1, e de 0,99% em relação ao COM2, com um valor máximo de 3,84% e 2,44%, respectivamente. A EQTVF está mais próxima das curvas do COM2.

- **MDFA1**: Modelo de Deslocamento de Fase Baseado no Cruzamento por Zero

Os resultados gráficos apresentados na seção 5.5.1 indicam que o MDFA1 representa bem o comportamento do COM1. Nas figuras apresentadas, ocorrem variações abruptas a partir de ΔP=0,5 pu e para os ajustes mais sensíveis. Esse efeito é equivalente ao que ocorre nos modelos de SSF.

Na Tabela 25, observa-se que a média total é de 1,96% e que 91,51% dos 106 casos analisados têm erro menor que 5%. Esses resultados são satisfatórios, e o MDFA1 é considerado como adequado para representar a função de SSF do COM1.

- **MDFA2**: Modelo de Deslocamento de Fase desenvolvido no Simulink®

Os resultados gráficos do MDFA2 (seção 5.5.2) são graficamente próximos dos resultados do COM1. Esse modelo apresenta variações abruptas a partir de ΔP=0,5 pu para os ajustes mais sensíveis, sendo maior que a do MDFA1. Isso pode ser justificado pela diferença de métodos usados na filtragem do MDFA1 e do MDFA2, ou porque os resultados do MDFA2 não terem sido repetidos 10 vezes, e uma curva média não pôde ser obtida.

Na Tabela 25, observa-se que a média total é de 2,70% e que 83,33% dos 102 casos apresentam ε menor que 5%. Esses resultados apresentam erro maior do que o verificado para o MDFA1, principalmente quando observando os erros médio e máximo.

- **EQDFA:** Equação Analítica de Deslocamento de Fase

Nas figuras apresentadas na seção 5.5.3, a EQDFA apresentou resultados muito próximos do COM1. Para o caso de Z_{cte}-DPDQ, a equação se afastou do COM1 para a região de desbalanços de potência menores que 0,2 pu. Essa diferença ocorre porque o padrão de curvatura está diferente da maioria das curvas de desempenho obtidas por outros casos.

Uma análise da variação do parâmetro c foi feita, e para c igual a 2 ciclos foram observados os melhores resultados.

Na Tabela 25, observa-se que a média total é de 2,32% e que 87,74% dos 106 casos analisados têm erros menores que 5%. Esses resultados são melhores em relação aos obtidos para o MDFA2, entretanto piores quando comparados com o MDFA1.

5.7 Comparação das curvas de desempenho de SSF e DFA

Para comparar as respostas das funções de SSF e DFA, inicialmente deve-se obter uma relação entre os ajustes dessas proteções, como por exemplo, o ajuste de 6° de DFA é equivalente ao ajuste de ±0,5 Hz da função de SSF. Para obter essa relação, usam-se as equações de SSF e DFA deduzidas anteriormente.

O sistema de equações (44) apresenta a EQSSF e EQDFA descritas nas seções anteriores, sendo que $t_{d,SSF}$ e $t_{d,DFA}$ são os tempos de detecção da EQSSF e EQDFA, respectivamente, e β_{SSF} e β_{DFA} são os ajustes da função de SSF (em Hertz) e DFA (em radianos), respectivamente.

$$\begin{cases} t_{d,SSF} = \dfrac{2H\beta_{SSF}}{f_0 \Delta P} + T_{set} \\ t_{d,DFA} = \dfrac{H\beta_{DFA}}{\pi c \Delta P} + \dfrac{c}{2f_0} + T_{set} \end{cases} \tag{44}$$

Para desenvolver uma equivalência entre os ajustes de SSF e DFA, os tempos de detecção dessas duas equações são comparados, conforme apresentado na Equação (45).

$$t_{d,SSF} = t_{d,DFA} \tag{45}$$

Na Equação (46) os tempos de detecção são substituídos pelo visto na Equação (44).

$$\frac{2H\beta_{SSF}}{f_0\Delta P} + T_{set} = \frac{H\beta_{DFA}}{\pi c\Delta P} + \frac{c}{2f_0} + T_{set} \tag{46}$$

Isolando o termo β_{SSF}, obtém-se a Equação (47).

$$\beta_{SSF} = \frac{f_0\Delta P}{2H}\left(\frac{H\beta_{DFA}}{\pi c\Delta P} + \frac{c}{2f_0}\right) \tag{47}$$

Por fim, a Equação (48) apresenta a relação entre β_{SSF} e β_{DFA}, que foi separada em duas partes: uma dependente de β_{DFA} e outra de ΔP. Observa-se por essa equação que a relação entre os ajustes depende de ΔP, e assim, varia a cada ponto de desbalanço da curva de desempenho.

$$\beta_{SSF} = \frac{f_0\beta_{DFA}}{2\pi c} + \frac{c\Delta P}{4H} \tag{48}$$

Como a Equação (48) depende de ΔP, conclui-se que não há uma relação constante entre os ajustes, que leva à mesma resposta das funções de SSF e DFA.

A Equação (49) apresenta a forma de cálculo do ajuste de DFA, sendo que foi separada em duas partes, uma relacionada à β_{SSF} e outra em a ΔP.

$$\beta_{DFA} = \frac{2\pi c}{f_0}\beta_{SSF} - \frac{2\pi c^2\Delta P}{4Hf_0} \tag{49}$$

Usando as relações apresentadas na Equação (48) ou (49), os resultados das curvas de desempenho da EQSSF e EQDFA serão os mesmos. Entretanto, o termo ΔP faz com que o ajuste seja variável para cada ΔP, tornando impraticável a aplicação dessas equações.

A Equação (50) busca analisar unicamente a contribuição da parte que envolve o termo *ΔP* na Equação (48). Substituindo as constantes na Equação (50), observa-se que esse termo pode variar de 0 Hz (para *ΔP*=0 pu) a 0,333 Hz (para *ΔP*=1 pu).

$$\frac{c\Delta P}{4H} = \frac{2 \cdot \Delta P}{4 \cdot 1,5} = 0,333 \cdot \Delta P \quad \therefore \quad 0 \Rightarrow 0,333 \ Hz \tag{50}$$

Fazendo a mesma análise para a Equação (49), nota-se pela Equação (51) que o ajuste varia de 0 (para *ΔP*=0 pu) a -4° (para *ΔP*=1 pu) desde o início ao fim de uma curva de desempenho qualquer, apenas pela contribuição da parte dependente de *ΔP*.

$$-\frac{2\pi c^2 \Delta P}{4Hf_0} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot 2^2 \cdot \Delta P}{4 \cdot 1,5 \cdot 60} = -0,0698 \cdot \Delta P \ rad = -4 \cdot \Delta P \ ° \quad \therefore \quad 0 \Rightarrow -4° \tag{51}$$

As variações observadas nas Equações (50) e (51) não são significativas, e são menores do que o menor ajuste proposto nas simulações (isto é, 4° é menor que o ajuste de 6°, e 0,33 Hz é menor que 0,5 Hz). Portanto, a parte dependente de *ΔP* é retirada, obtendo uma relação constante e não dependente de *ΔP*. As relações equivalentes e simplificadas são apresentadas pelo sistema de equações (52), em que β_{DFA} é apresentado em radianos.

$$\begin{cases} \beta_{SSF} \approx \dfrac{f_0}{2\pi c} \beta_{DFA} \ \ [Hz] \\ \beta_{DFA} \approx \dfrac{2\pi c}{f_0} \beta_{SSF} \ \ [rad] \end{cases} \tag{52}$$

O sistema de equações (53) apresenta as relações simplificadas, em que β_{DFA} é em graus (°).

$$\begin{cases} \beta_{SSF} \approx \dfrac{f_0}{360 \cdot c} \beta_{DFA} \ \ [Hz] \\ \beta_{DFA} \approx \dfrac{360 \cdot c}{f_0} \beta_{SSF} \ \ [°] \end{cases} \tag{53}$$

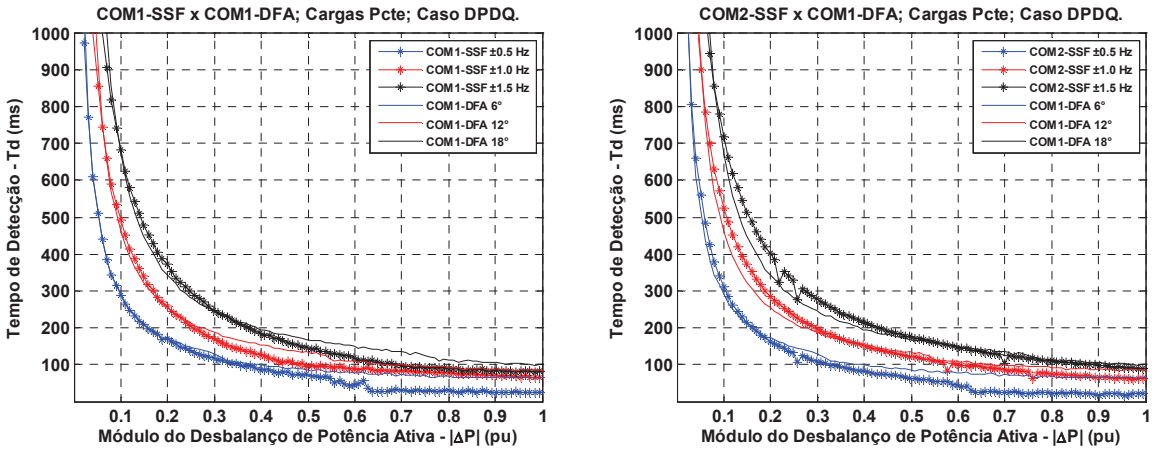
A Tabela 27 apresenta as relações entre os ajustes de SSF e DFA, obtidas pelas expressões do sistema de equações (53) e para f_0 é 60 Hz e c é 2 ciclos. Observa-se, na Tabela 27, que os ajustes de DFA em 6°, 12° e 18° são equivalentes aos ajustes de SSF de ±0,5 Hz, ±1,0 Hz e ±1,5 Hz.

Tabela 27 – Relação entre ajuste de SSF e DFA.

Ajuste de DFA	Equivalente de SSF
6°	±0,50 Hz
9°	±0,75 Hz
12°	±1,00 Hz
15°	±1,25 Hz
18°	±1,50 Hz

A Figura 84 apresenta a comparação dos dados experimentais obtidos dos relés comerciais 1 e 2, do caso de cargas P_{cte}. A comparação é entre a função de DFA do COM1 com a função de SSF do COM1 (Figura 84(a)) e COM2 (Figura 84(a)), e a equivalência de ajustes obtida na Tabela 27 foi apresentada nessa figura.

Na comparação feita entre a função de SSF e DFA apresentada nesta seção, é preciso manter as respostas de cada relé em um mesmo valor de T_{set}. Para o COM1, a SSF está com T_{set} de 120 ms, e DFA de 0 ms. Já em COM2, a função de SSF está com temporização de 153,33 ms e a DFA não atuava corretamente, e assim não foi apresentada. Assim, para comparar a resposta de DFA do COM1 com a de SSF do COM1, foi subtraído o valor de 120 ms da curva de SSF. Para comparar a resposta de DFA do COM1 com a de SSF do COM2, foi subtraído o valor de 153,33 ms da curva de SSF.



a) Comparação com COM1. b) Comparação com COM2.

Figura 84 – Comparação do DFA do COM1 com a SSF de COM1 e COM2: P_{cte}, DPDQ.

Os resultados numéricos e comparativos da Figura 84 são apresentados na Tabela 28, sendo relacionado cada ajuste de SSF com o respectivo ajuste de DFA. Para essa análise, valores positivos da diferença ε significam que a proteção de SSF atuou antes que a proteção de DFA, e valores negativos significam que a proteção de SSF atuou depois que a proteção de DFA.

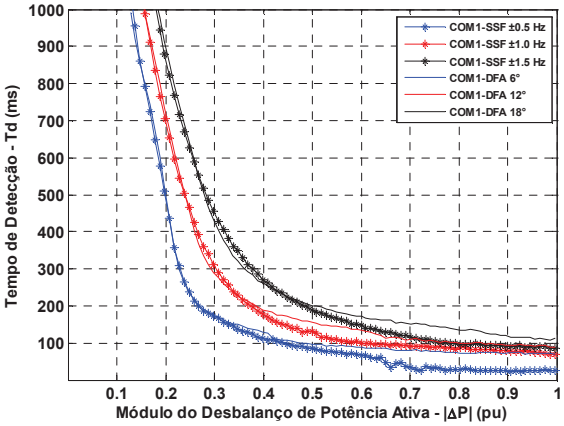
Tabela 28 – Comparação de ε entre funções de SSF e DFA: P_{cte}, DPDQ.

Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%)**					
	COM1-SSF e COM1-DFA			**COM1-SSF e COM2-DFA**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
SSF: ±0,5 Hz; DFA: 6°	-0,11	0,02	-0,01	0,78	0,65	0,26
SSF: ±1,0 Hz; DFA: 12°	0,75	0,57	0,03	2,59	1,39	0,49
SSF: ±1,5 Hz; DFA: 18°	1,60	0,94	0,08	4,27	2,11	0,68
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	0,82	0,51	0,04	2,55	1,38	0,47

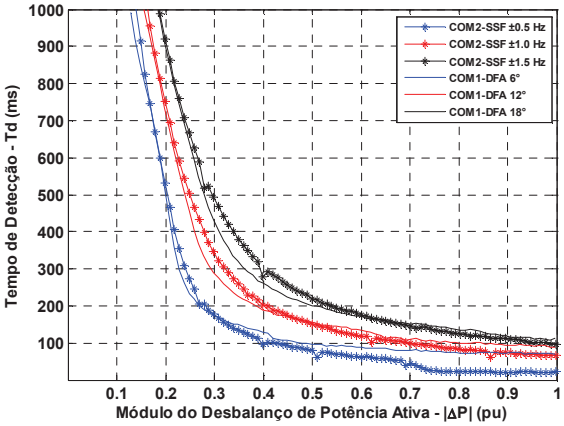
Analisando as curvas de desempenho da Figura 84 e a Tabela 28, observa-se que quanto menor é o desbalanço de potência ativa, mais próximas estão as curvas de desempenho de ajustes equivalentes. Por exemplo, a diferença entre o COM1-SSF e COM1-DFA para o ajuste de 18° e ±1,5 Hz, e tempo crítico de 700 ms (e ΔP baixo) é de 0,08 %, mas tem uma diferença de 1,6% para o tempo crítico de 300 ms (e ΔP alto). Essa diferença ocorre devido ao fator de correção que está relacionado com o ΔP, nas Equações (48) e (49). Quanto mais perto de ΔP=0, menor é a contribuição desse fator, levando a bons resultados da equação simplificada. Quanto mais perto de ΔP=1 pu, maior será a contribuição da parcela dependente de ΔP, e maior é a diferença entre os ajustes correspondentes.

Os resultados comparativos da Figura 84 e a Tabela 28 são muito próximos entre si, confirmando então que é possível desconsiderar a parcela dependente de ΔP, e, portanto, obter uma relação constante entre ajustes de funções de SSF e DFA.

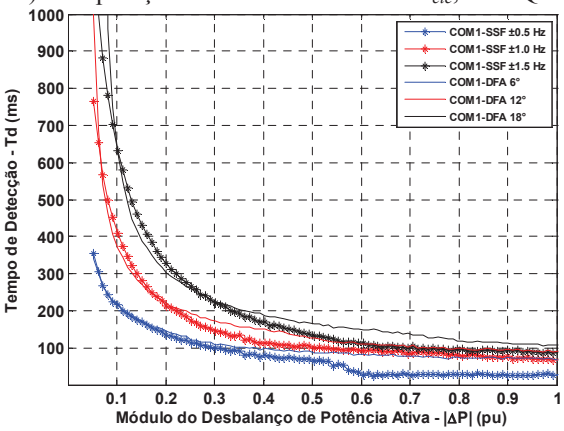
A Figura 85 apresenta a comparação entre as curvas de desempenho experimentais da função de SSF e DFA, para todos os quatro casos de cargas Z_{cte}. Os resultados comparativos seção muito próximos entre si, principalmente na região de ΔP<0,3 pu. Essa proximidade é analisada na Tabela 29, em que a grande maioria das diferenças do desbalanço crítico é menor que |1|%.



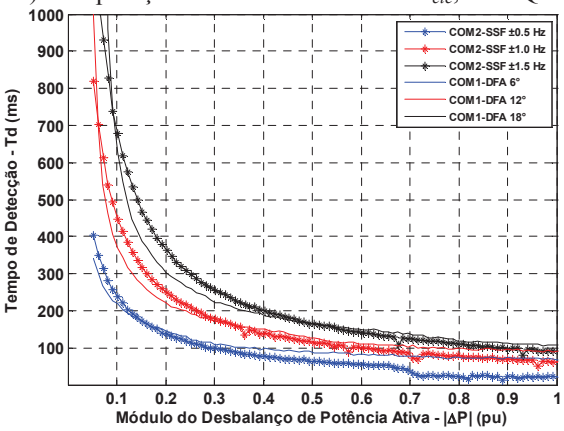
a) Comparação com COM1: Cenário Z_{cte}, DPDQ.



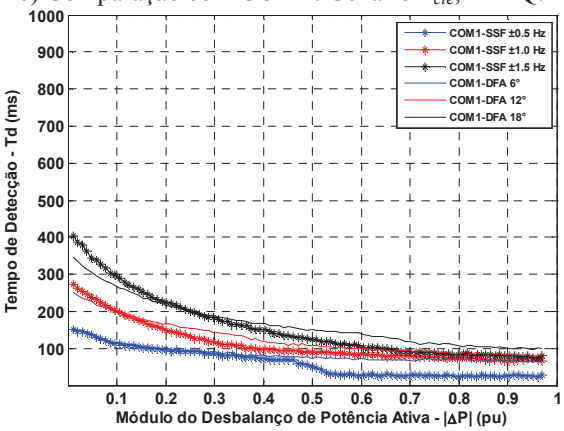
b) Comparação com COM2: Cenário Z_{cte}, DPDQ.



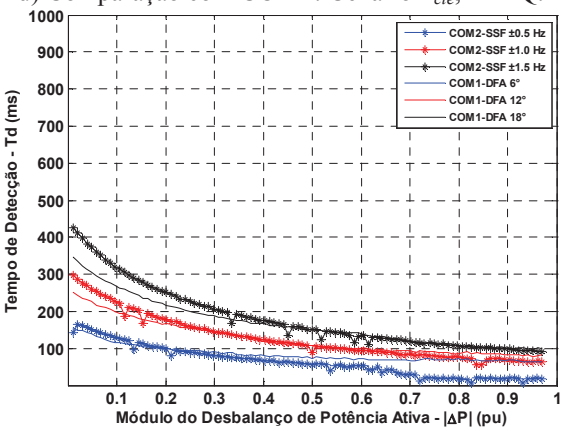
c) Comparação com COM1: Cenário Z_{cte}, DPEQ.



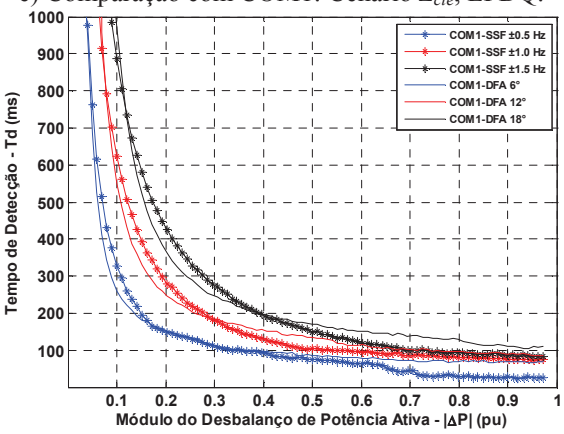
d) Comparação com COM2: Cenário Z_{cte}, DPEQ.



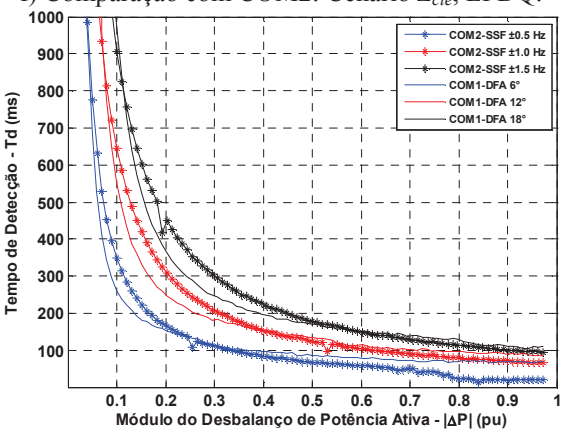
e) Comparação com COM1: Cenário Z_{cte}, EPDQ.



f) Comparação com COM2: Cenário Z_{cte}, EPDQ.



g) Comparação com COM1: Cenário Z_{cte}, EPEQ.



h) Comparação com COM2: Cenário Z_{cte}, EPEQ.

Figura 85 – Comparação do DFA do COM1 com a SSF de COM1 e COM2: Cargas Z_{cte}.

Tabela 29 – Comparação de ε entre funções de SSF e DFA: Cargas Z_{cte}.

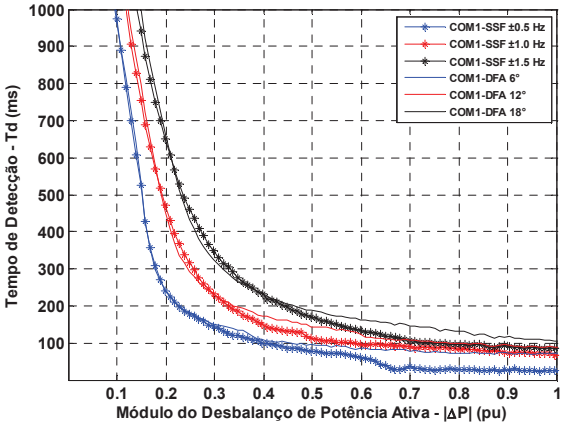
Ajuste	ε para cada tempo crítico (%): Cenário Z_{cte}, DPDQ					
	COM1-SSF e COM1-DFA			COM2-SSF e COM1-DFA		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
SSF: ±0,5 Hz; DFA: 6°	0,23	-0,17	-0,31	1,31	0,24	0,01
SSF: ±1,0 Hz; DFA: 12°	0,97	-0,00	-0,49	2,84	1,04	0,37
SSF: ±1,5 Hz; DFA: 18°	1,53	0,35	-0,50	4,09	1,31	0,45
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	0,91	0,18	0,43	2,75	0,86	0,28

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%): Cenário Z_{cte}, DPEQ					
	COM1-SSF e COM1-DFA			COM2-SSF e COM1-DFA		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
SSF: ±0,5 Hz; DFA: 6°	0,14	-	-	1,43	-	-
SSF: ±1,0 Hz; DFA: 12°	0,92	0,49	-0,37	2,87	1,38	0,13
SSF: ±1,5 Hz; DFA: 18°	1,78	0,99	-0,36	4,59	2,21	0,30
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	0,94	0,74	0,37	2,96	1,80	0,22

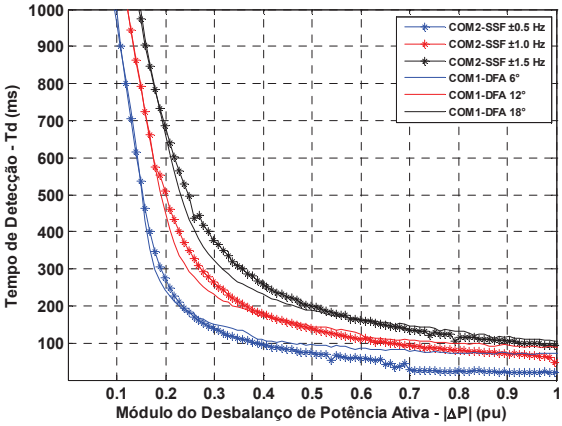
Ajuste	ε para cada tempo crítico (%): Cenário Z_{cte}, EPDQ					
	COM1-SSF e COM1-DFA			COM2-SSF e COM1-DFA		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
SSF: ±0,5 Hz; DFA: 6°	-	-	-	-	-	-
SSF: ±1,0 Hz; DFA: 12°	-	-	-	-	-	-
SSF: ±1,5 Hz; DFA: 18°	3,95	-	-	6,84	-	-
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	3,95	-	-	6,84	-	-

Ajuste	ε para cada tempo crítico (%): Cenário Z_{cte}, EPEQ					
	COM1-SSF e COM1-DFA			COM2-SSF e COM1-DFA		
	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms	t_{crit}=300 ms	t_{crit}=500 ms	t_{crit}=700 ms
SSF: ±0,5 Hz; DFA: 6°	1,96	0,98	0,50	2,63	1,20	0,60
SSF: ±1,0 Hz; DFA: 12°	2,53	1,41	0,43	4,19	1,99	0,69
SSF: ±1,5 Hz; DFA: 18°	3,55	1,74	0,26	5,84	2,59	0,67
Média de $\lvert\varepsilon\rvert$ (%)	2,68	1,38	0,39	4,22	1,93	0,65

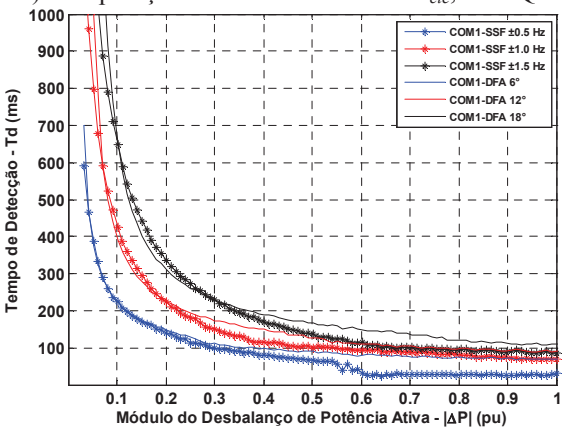
Por fim, na Figura 86 são ilustradas as curvas de desempenho que comparam a função de SSF com a de DFA, para os quatro casos operativos e considerando carga do tipo I_{cte}. As curvas da proteção de SSF e DFA são muito próximas entre si, independentemente do relé comercial envolvido. Esses resultados são verificados na Tabela 30, em que novamente a grande maioria dos resultados apresenta diferenças pequenas.



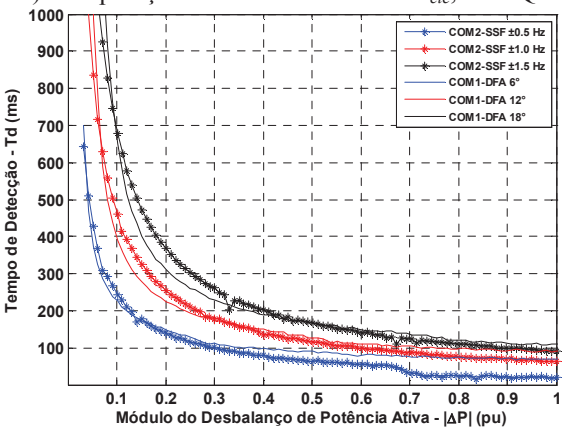
a) Comparação com COM1: Cenário I_{cte}, DPDQ.



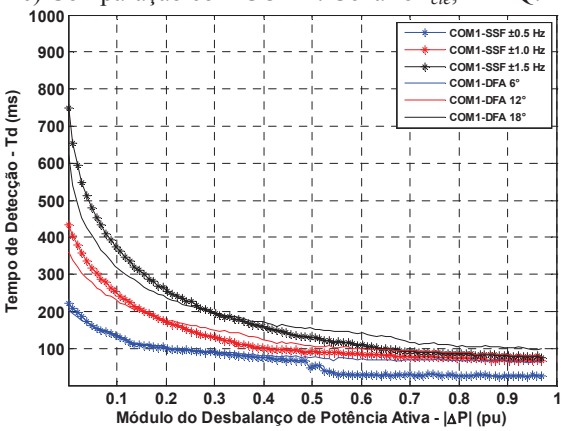
b) Comparação com COM2: Cenário I_{cte}, DPDQ.



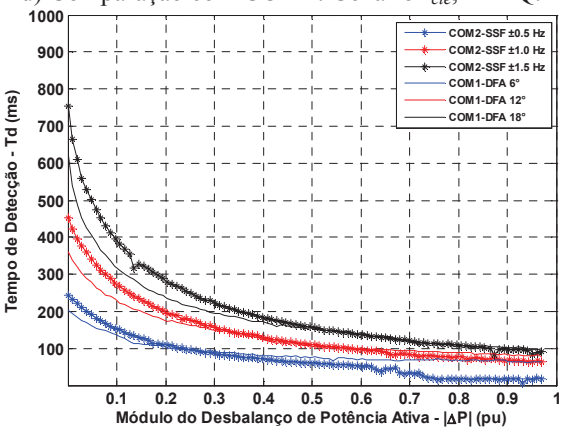
c) Comparação com COM1: Cenário I_{cte}, DPEQ.



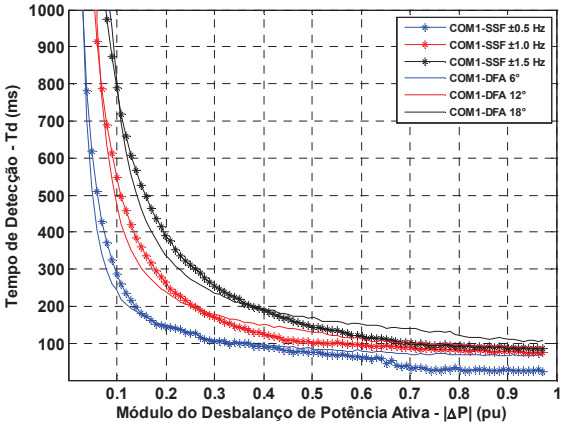
d) Comparação com COM2: Cenário I_{cte}, DPEQ.



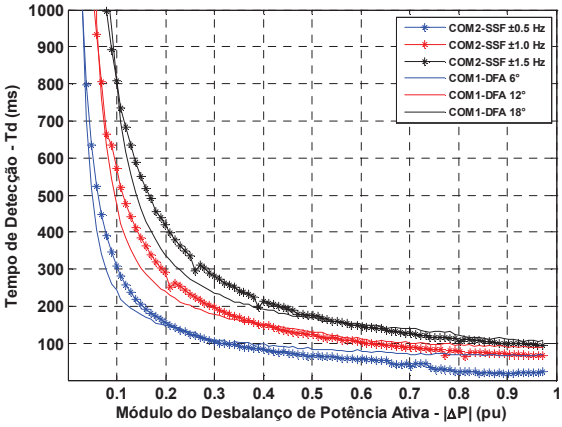
e) Comparação com COM1: Cenário I_{cte}, EPDQ.



f) Comparação com COM2: Cenário I_{cte}, EPDQ.



g) Comparação com COM1: Cenário I_{cte}, EPEQ.



h) Comparação com COM2: Cenário I_{cte}, EPEQ.

Figura 86 – Comparação do DFA do COM1 com a SSF de COM1 e COM2: Cargas I_{cte}.

Tabela 30 – Comparação de ε entre funções de SSF e DFA: Cargas I_{cte}.

Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%): Cenário I_{cte}, DPDQ**					
	COM1-SSF e COM1-DFA			**COM2-SSF e COM1-DFA**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
SSF: ±0,5 Hz; DFA: 6°	0,26	-0,04	-0,31	1,27	0,18	-0,25
SSF: ±1,0 Hz; DFA: 12°	1,10	0,19	-0,51	2,77	1,00	0,06
SSF: ±1,5 Hz; DFA: 18°	1,58	0,45	-0,48	4,17	1,57	0,24
Média de $\|\varepsilon\|$ (%)	0,98	0,23	0,44	2,73	0,92	0,18
Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%): Cenário I_{cte}, DPEQ**					
	COM1-SSF e COM1-DFA			**COM2-SSF e COM1-DFA**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
SSF: ±0,5 Hz; DFA: 6°	0,12	-0,13	-	0,89	0,24	-
SSF: ±1,0 Hz; DFA: 12°	1,13	0,45	-0,48	2,88	1,10	-0,13
SSF: ±1,5 Hz; DFA: 18°	1,46	0,77	-0,38	4,37	1,78	0,11
Média de $\|\varepsilon\|$ (%)	0,90	0,45	0,43	2,71	1,04	0,12
Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%): Cenário I_{cte}, EPDQ**					
	COM1-SSF e COM1-DFA			**COM2-SSF e COM1-DFA**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
SSF: ±0,5 Hz; DFA: 6°	-	-	-	-	-	-
SSF: ±1,0 Hz; DFA: 12°	2,81	-	-	4,62	-	-
SSF: ±1,5 Hz; DFA: 18°	3,74	2,55	-	6,37	3,15	-
Média de $\|\varepsilon\|$ (%)	3,27	2,55	-	5,49	3,15	-
Ajuste	**ε para cada tempo crítico (%): Cenário I_{cte}, EPEQ**					
	COM1-SSF e COM1-DFA			**COM2-SSF e COM1-DFA**		
	t_{crit}=300 ms	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**	**t_{crit}=300 ms**	**t_{crit}=500 ms**	**t_{crit}=700 ms**
SSF: ±0,5 Hz; DFA: 6°	1,79	0,96	0,49	2,43	1,16	0,59
SSF: ±1,0 Hz; DFA: 12°	2,56	1,31	0,40	4,01	1,85	0,27
SSF: ±1,5 Hz; DFA: 18°	3,24	1,72	0,35	4,73	2,50	0,70
Média de $\|\varepsilon\|$ (%)	2,53	1,33	0,42	3,72	1,84	0,52

Baseado nessa seção, a resposta da proteção de SFF é muito próxima da resposta da DFA, desde que haja uma equivalência entre os ajustes de SSF (Hz) e DFA (°), e que a temporização seja a mesma para ambas as proteções.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho, foram propostos três modelos computacionais de funções de proteção baseadas no sinal de tensão. Além disso, um novo modelo analítico da proteção de deslocamento de fase foi proposto, baseando-se em [1], que apresentou resultados mais próximos ao relé comercial 1. Em relação às equações empíricas, foi proposta uma forma de corrigir suas respostas através de uma nova constante *k*, que é modificada para cada cenário simulado, sendo a estrutura básica das correções desenvolvidas em [1]. Por fim, uma rotina de ensaios em tempo real foi proposta, para a obtenção de dados usados para os estudos da proteção anti-ilhamento.

O RTDS® foi usado para simulações e ensaios, pois é um simulador em tempo real capaz de injetar sinais nos relés comerciais por meio de um amplificador, como também receber os sinais das saídas auxiliares por um módulo de entradas digitais. Dessa forma, foi possível executar simulações em malha fechada considerando os relés comerciais. Por meio de uma rotina computacional, o RTDS® possibilitou executar diversas simulações sequenciais, facilitando o processo de obtenção de dados.

As curvas de desempenho foram usadas como método de comparação, pois possibilitam analisar o tempo de atuação das funções para diversas condições operativas. O indicativo de proximidade entre as curvas de desempenho dos relés comerciais e dos modelos foi o desbalanço de potência crítico. É de extrema importância que o modelo represente muito bem a função de proteção do relé comercial no ponto de desbalanço crítico, que separa as regiões de operação seguras e inseguras da proteção em estudo.

Dentre os modelos ensaiados, os baseados na frequência angular têm a simplificação de medir a velocidade diretamente do eixo do gerador síncrono distribuído. Com isso, é dispensada a modelagem do circuito de estimação de frequência e filtragem dos sinais, simplificando a modelagem. Entretanto, essas simplificações restringem a aplicação do modelo ao uso em apenas geradores síncronos.

Os modelos das funções de proteção baseadas no sinal de tensão são elaborados baseando-se no cruzamento por zero da forma de onda da tensão medida nos terminais do gerador distribuído. Os resultados mostraram que esses modelos podem ser empregados para representar os relés comerciais com boa precisão. Além disso, como não dependem da velocidade de geradores síncronos, podem ser aplicados para situações de ilhamento de outros tipos de geradores distribuídos, tais como geradores eólicos e geradores baseados em conversores de frequência, e também para casos de variações de frequência que não tenham sido causadas por ilhamento.

Sobre os relés comerciais, uma função de proteção pode apresentar resultados distintos, a depender do fabricante dos relés de proteção. Isso ocorre porque cada fabricante incorpora seu próprio algoritmo, e os elementos físicos dos relés podem ser variados. No capítulo de resultados, uma seção apresenta a repetitividade das curvas e a análise preliminar dos dados. Nessa seção foi observado que entre relés comerciais há diferenças. Foi analisado que a função de SSF do COM1 apresentou maior precisão que o COM2, pois os desvios foram menores para as dez repetições analisadas. Para a função de TVF, enquanto o COM1 atuava para todos os casos, o COM2 apenas atuava para casos de déficit de potência ativa na região ilhada, pois foi projetado para usar essa função de proteção como ferramenta de corte de carga. Por fim, a função de DFA do COM2 não atuava de maneira adequada, ao contrário do COM1, que apresentou uma curva de acordo com o esperado. Essas possíveis diferenças entre relés comerciais alavancam a importância das simulações e ensaios de equipamentos, tais como estão feitas neste trabalho usando simulação em tempo real e em malha fechada, de forma a testar os equipamentos que serão usados para a proteção anti-ilhamento, ou em quaisquer filosofias de proteção.

Uma variação abrupta foi observada nas curvas de desempenho dos modelos: MSSF, MDFA1 e MDFA2. Essa variação também ocorreu para o COM1 e COM2, para a proteção de SSF, e foi explicada em detalhes no capítulo de resultados, sendo que ocorre devido a oscilações de frequência ou de deslocamento de fase, que não são atenuados pela filtragem da respectiva proteção. Sendo assim, a atuação da proteção ocorre para uma oscilação do sinal, que deveria ser atenuada pelo filtro. Nos modelos, se a frequência de corte dos filtros fosse mais baixa, a região de variações abruptas da curva diminuiria. Entretanto, um atraso maior seria acrescentado à resposta do modelo devido ao filtro, e os valores das constantes do filtro foram escolhidos de forma equilibrar a região de variações abruptas com o atraso provocado.

É importante observar que tanto os modelos discutidos acima quanto os relés comerciais apresentam variações abruptas. Dessa forma conclui-se que a estimação de

frequência proposta nesse trabalho é equivalente à dos relés comerciais, por produzir uma resposta semelhante nos pontos de variações.

Para as comparações entre os nove modelos e o COM1 na Tabela 25, a média total da diferença dos desbalanços críticos atingiu o máximo de 2,70%, o valor máximo chegou a 11,46% e no pior dos casos, 82,11% dos resultados tem uma diferença do desbalanço crítico menor que 5%. Para as comparações com o COM2 na Tabela 26, a média total da diferença dos desbalanços críticos chegou a um máximo de 4,03%, o valor máximo atingiu 15,88% e, no pior caso, 69,35% dos resultados tem uma diferença do desbalanço crítico menor que 5%. Portanto, de forma geral, os modelos representaram melhor o relé comercial 1 ao 2.

No capítulo de resultados, na seção 5.7, a função de deslocamento de fase do relé comercial 1 foi comparada com a função de sub/sobre frequência dos relés comerciais 1 e 2, devido à similaridade das curvas de desempenho desses dois modelos. Uma equivalência entre os ajustes de deslocamento de fase, em graus, e de sub/sobre frequência, em Hertz, foi obtida por meio da EQSSF e EQDFA. Dessa maneira, foi possível comparar as respostas dessas funções, e concluir que realmente são muito próximas entre si. Portanto, para a proteção anti-ilhamento, deve-se repensar sobre o uso das duas funções de proteção simultaneamente, já que ambas apresentam respostas praticamente iguais.

Não foram feitas comparações da proteção de SSF ou DFA com a de TVF, pois a TVF apresenta um comportamento muito diferente das proteções de SSF e DFA, e a equivalência dos ajustes ficaria fortemente dependente do desbalanço de potência ativa.

Após a validação dos modelos computacionais e analíticos apresentada neste trabalho, é possível modelar quaisquer funções apresentadas em ambientes computacionais distintos. Os modelos computacionais podem ser reproduzidos em simuladores de sistemas de potência convencionais para a análise da detecção de ilhamento, sem que haja a necessidade de executar testes experimentais em malha fechada com relés comerciais. As equações analíticas, por sua vez, podem ser reproduzidas em rotinas e planilhas, sendo uma alternativa rápida e fácil para obter ajustes ou o ponto de desbalanço crítico de potência ativa, por dispensar ou minimizar as simulações no domínio do tempo. As equações analíticas devem considerar os fatores de correção empíricos para casos de cargas modeladas como impedância ou corrente constante. Deve-se observar qual o modelo mais adequado para determinada aplicação, baseando-se no erro que cada modelo em relação aos relés comerciais.

Como continuidade da pesquisa é proposto:

- O estudo do desempenho da proteção direcional de potência (32) e de subcorrente/subpotência (37) na detecção de ilhamento;
- Analisar a resposta dos modelos computacionais e de relés comerciais para chaveamento de cargas;
- Obter as curvas de desempenho da proteção de deslocamento de fase para um terceiro relé comercial, pois o relé comercial 2 não apresentou respostas satisfatórias;
- Desenvolver modelos computacionais genéricos que tenham parâmetros ajustáveis para cada relé comercial, já que alguns modelos apresentaram respostas próximas de um relé comercial e distantes de outros;
- Propor melhorias e alternativas para as equações usadas para casos de cargas dependentes da tensão;
- Estudar e implementar outras técnicas de cruzamento por zero nos modelos dependentes da tensão, como também outras alternativas de estimação de frequência.

Referências Bibliográficas

1. VIEIRA JR, J. C. M. **Metodologias para Ajuste e Avaliação do Desempenho de Relés de Proteção Anti-Ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos**. 2006. 197 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2006.

2. JENKINS, N.; EKANAYAKE, J. B.; STRBAC, G. **Distributed Generation**. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010.

3. WALLING, R. A.; MILLER, N. W. Distributed Generation Islanding – Implications on Power System Dynamic Performance. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, v. 1, p. 92-96, july 2002.

4. MOZINA, C. J. Interconnection Protection of IPP Generators at Commercial/Industrial Facilities. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 37, n. 3, p. 681-688, may/june 2001.

5. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard 1547TM-2003 (R2008):** IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE. New York: IEEE inc., June, 2003.

6. COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Manual de Acesso de Geração Distribuída ao Sistema da COPEL**. Norma Técnica. Curitiba, p. 145. 2012.

7. COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Requisitos para a Conexão de Acessantes Produtores de Energia Elétrica ao Sistema de Distribuição Cemig - Conexão em Média Tensão (ND 5.31)**. Manual de Distribuição. Belo Horizonte. 2011.

8. KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994. 1176 p.

9. CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. Programa ANAREDE - Análise de Redes Elétricas. **Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.anarede.cepel.br/cprog.html>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2013.

10. HERNANDES, L. **Aplicação da Metodologia das Curvas de Desempenho na Avaliação do Desempenho de Relés de Frequência Comerciais**. 2009. 85 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2009.

11. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 1 - Introdução**. Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.], p. 60. 2012.

12. QIAN, K.; ZHOU, C.; YUAN, Y.; SHI, X.; ALLAN, M. Analysis of the Environmental Benefits of Distributed Generation. **IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**, p. 1-5, 2008.

13. DALY, P. A.; MORRISON, J. Understanding the Potential Benefits of Distributed Generation on Power Delivery Systems. **Rural Electric Power Conference**, p. A2.1-A2.13, 2001.

14. MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

15. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.], p. 86. 2012.

16. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição**. Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.], p. 27. 2010.

17. VIEIRA JR, J. C. M. Detecção de Ilhamento de Geradores Distribuídos: Uma Revisão Bibliográfica sobre o Tema. **Revista Eletrônica de Energia**, v. 1, n. 1, p. 3-14, jul/dez 2011.

18. MAHAT, P.; CHEN, Z.; BAK-JENSEN, B. Review of Islanding Detection Methods for Distributed Generation. **DRPT2008**, Nanjing- China, p. 2743-2748, april 2008.

19. SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. Sincrofasores: O Sistema Elétrico sob uma nova perspectiva. **Schweitzer Engineering Laboratories**. Disponível em: <http://www.selinc.com.br/sincrofasores.aspx>. Acesso em: 14 de agosto de 2013.

20. PAI, F. S.; HUANG, S. J. A Detection Algorithm for Islanding-Prevention of Dispersed Consumer-Owned Storage and Generating Units. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 16, n. 4, p. 346-351, december 2001.

21. WOODWARD. **MRG3 – Generator Protection with Mains Supervision, Time Overcurrent Protection and Earth Current Supervision - Manual MRG3 (Revision B)**. [S.l.], p. 96.

22. ZIV GRID AUTOMATION. **IRV: Terminal Integrado de Proteção, Controle e Medida - Manual de Instruções PIRV1203A**. [S.l.], p. 609. 2012.

23. CAMINHA, A. C. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1977.

24. SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. Tabela ANSI. **Schweitzer Engineering Laboratories**. Disponível em: <http://www.selinc.com.br/tab_ansi.aspx>. Acesso em: 11 de junho de 2013.

25. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos de Rede. Submódulo 11.4: Sistemas especiais de proteção (rev 1.0)**. [S.l.], p. 8. 2009.

26. FREITAS, W.; XU, W.; AFFONSO, C. M.; HUANG, Z. Comparative Analysis Between ROCOF and Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 1315-1324, april 2005.

27. VIEIRA JR, J. C. M.; FREITAS, W.; XU, W.; MORELATO, A. Performance of Frequency Relays for Distributed Generation Protection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 3, p. 1120-1127, July 2006.

28. FREITAS, W.; HUANG, Z.; XU, W. A Practical Method for Assessing the Effectiveness of Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 1, p. 57-63, Janeiro 2005.

29. FORSYTH, P.; MAGUIRE, T.; KUFFEL, R. Real Time Digital Simulation for Control and Protection System Testing. **35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference**, Aachen, Germany, v. 1, p. 329-335, 2004.

30. KUFFEL, R.; GIESBRECHT, J.; MAGUIRE, T.; WIERCKX, R. P.; MCLAREN, P. RTDS - A Fully Digital Power System Simulator Operating in Real Time. **IEEE Communications, Power, and Computing (WESCANEX 95 - Conference Proceedings)**, v. 2, p. 300-305, 1995.

31. SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. Estudos Avançados em Simuladores Digitais de Tempo Real (RTDS). **Schweitzer Engineering Laboratories**. Disponível em: <http://www.selinc.com.br/RTDS.aspx>. Acesso em: 25 de janeiro de 2013.

32. LABORATÓRIO DE AUTOMAÇÃO E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS. LASSE. **Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação**. Disponível em: <http://www.itai.org.br/lasse>. Acesso em: 25 de janeiro de 2013.

33. SILVA, J. L. J.; CARVALHO, S. M.; COLMAN, L. R. S.; JUNIOR, J. B. M.; NYZNYK, E. Ensaio de modelo utilizando simulador RTDS para validação dos ajustes das proteções das LIs de 500kV entre a Usina Hidrelétrica de Itaipu e a Subestação Foz do Iguaçu devido a alteração de configuração na Subestação de Foz do Iguaçu. **IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (IV SBSE)**, Goiânia - Goiás, 2012.

34. GUERRERO, C. A. V. **Uso do RTDS em Testes de Esquemas de Teleproteção Aplicando o Padrão IEC 61850**. 2011. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2011.

35. DANTAS, K. M. C.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES JR, D.; CARDOSO, G. A.; FONSECA, L. C. A. Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão: uma Abordagem em Tempo Real via RTDS^TM. **Revista Controle & Automação**, v. 22, n. 2, p. 157-168, Março/Abril 2011.

36. VIEIRA, J. C. M.; SALLES, D.; FREITAS, W. Power Imbalance Application Region Method for Distributed Synchronous Generator Anti-Islanding Protection Design and Evaluation. **Electric Power Systems Research**, v. 81, n. 10, p. 1952– 1960, october 2011.

37. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard 421.5TM-2005:** IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power Systems Stability Studies. New York: IEEE inc., oct, 2005.

38. RTDS® TECHNOLOGIES. **Real Time Digital Simulator: Power System User Manual (manual set)**. [S.l.]. Nov. 2006.

39. RTDS® TECHNOLOGIES. **Real Time Digital Simulator: Controls Library Manual (manual set)**. [S.l.]. Dec. 2010.

40. PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer Relaying for Power Systems**. 2. ed. New York: Wiley, 2009. 326 p.

41. COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência:** dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. São Carlos: EDUSP, 2007.

Apêndice A

Dados do Sistema Elétrico

Os dados usados no sistema elétrico serão apresentados nessa seção. A Figura 87 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico, 60 Hz, recorrente na literatura [1] [10] [28].

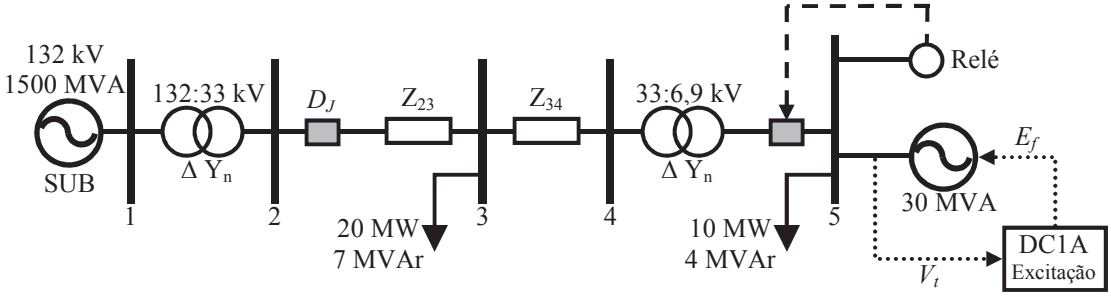


Figura 87 – Sistema elétrico modelado.

Os dados do sistema elétrico são apresentados na Tabela 31, Tabela 32, Tabela 33 e Tabela 34, tomando como base os valores adotados nas referências [1] [10].

Tabela 31 – Dados do sistema equivalente da concessionária.

Tensão nominal (kV)	132
Potência de curto-circuito (MVA)	1500
Resistência (Ω)	0
Indutância (mH)	30,80

Tabela 32 – Dados das linhas.

	Linhas	
	Entre a barra 2 e 3 (Z_{23})	**Entre a barra 3 e 4 (Z_{34})**
Resistência (Ω/km)	0,3645	0,9720
Reatância indutiva (Ω/km)	1,5664	4,1772
Indutância (mH/km)	4,1550	11,08
Comprimento (km)	1,0	0,5

Tabela 33 – Dados dos transformadores.

	Transformadores	
	Entre a barra 1 e 2	**Entre a barra 4 e 5**
Potência nominal (MVA)	100	50
Conexão do primário	Δ	Δ
Tensão nominal do primário (kV)	132	33
Resistência do primário (pu)	0	0
Indutância do primário (pu)	0,02	0,02
Conexão do secundário	Yn	Yn
Tensão nominal do secundário (kV)	33	6,9
Resistência do secundário (pu)	0	0
Indutância do secundário (pu)	0,02	0,02

Tabela 34 – Dados do gerador síncrono.

Tipo de gerador	Polos lisos
Número de pares de polos	2
Potência nominal (MVA)	30
Tensão nominal (kV)	6,9
Constante de inércia (s)	1,5
Resistência do estator (pu)	0,0014
Reatância de dispersão (pu)	0,050
X_d (pu)	1,400
X_d' (pu)	0,231
X_d'' (pu)	0,118
X_q (pu)	1,372
X_q' (pu)	0,800
X_q'' (pu)	0,118
T_{do}' (s)	5,500
T_{do}'' (s)	0,050
T_{qo}' (s)	1,250
T_{qo}'' (s)	0,190

A Figura 88 apresenta o diagrama de controle do sistema de excitação do gerador síncrono distribuído. Foi usado o modelo padronizado IEEE tipo DC1A [1] [37] [39]. Os parâmetros do sistema de controle da excitação são apresentados na Tabela 35.

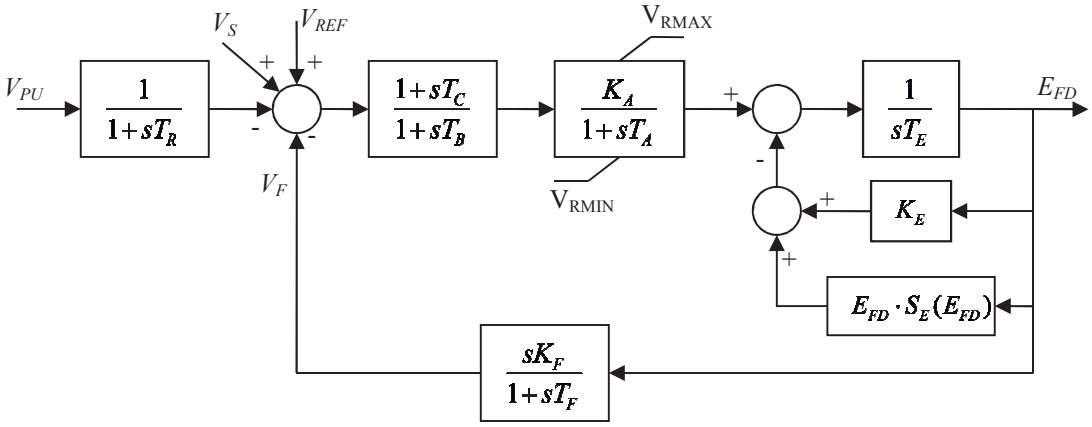


Figura 88 – Diagrama de controle do sistema de excitação IEEE do tipo DC1A.

Tabela 35 – Parâmetros do sistema de excitação do gerador síncrono.

Constante de tempo do filtro passa-baixa de entrada do regulador – T_R (s)	0,005
Ganho do regulador – K_A (pu)	270
Constante de tempo do regulador – T_A (s)	0,1
Constante de tempo T_B (s)	0
Constante de tempo T_C (s)	0
Limite superior da saída do regulador – V_{RMAX} (pu)	7
Limite inferior da saída do regulador – V_{RMIN} (pu)	-4
Ganho da excitatriz – K_E (pu)	1
Constante de tempo da excitatriz – T_E (s)	0,65
Ganho do bloco de amortecimento – K_F (pu)	0,048
Constante de tempo do bloco de amortecimento – T_F (s)	0,95
Ponto de saturação 1: valor de $E_{FD,1}$ em $S_{E,1}$ (pu)	0,9
Ponto de saturação 1: valor de $S_{E,1}$ em $E_{FD,1}$ (pu)	0,01
Ponto de saturação 2: valor de $E_{FD,2}$ em $S_{E,2}$ (pu)	0,9
Ponto de saturação 2: valor de $S_{E,2}$ em $E_{FD,2}$ (pu)	0,01

Apêndice B

Modelagem no RSCAD

Este apêndice apresenta os componentes modelados no ambiente *Draft* e *RunTime* do RSCAD, como também o *script* usado para obtenção das curvas de desempenho dos modelos computacionais e relés comercias. Cabe ressaltar que procura-se mostrar superficialmente o que foi realizado no RSCAD, e não será comentado a fundo sobre os blocos ou *script*, visto que isso já é feito ao longo do corpo da dissertação.

A Figura 89 apresenta o modelo do sistema elétrico. Esse modelo está diferenciado do que foi exposto anteriormente, pois comtempla a medição de tensão em todas as barras.

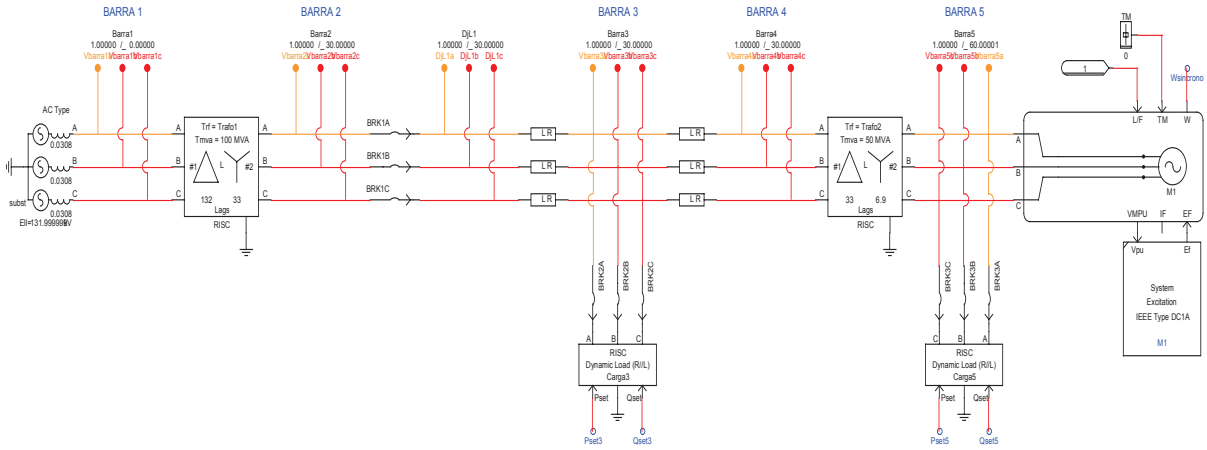


Figura 89 – Componentes do *Draft* – Sistema completo com medição nas barras.

A Figura 90 apresenta os blocos de controle das cargas das barras 3 e 5, a medição de desbalanço de potência, o controle do ilhamento e a filtragem do sinal de tensão da barra 5. O bloco de fluxo de potência da barra 2 para a 3 é responsável por medir o desbalanço de potência ativa e reativa antes da ocorrência do ilhamento, e por meio dele é possível obter o eixo x de todas as curvas de desempenho apresentadas nessa dissertação.

O disjuntor D_J do sistema da Figura 8 é responsável por causar o ilhamento no sistema elétrico. O disjuntor irá separar a subestação equivalente do GD e as cargas, sendo então os relés de proteção do GD responsáveis por abrir o disjuntor do gerador.

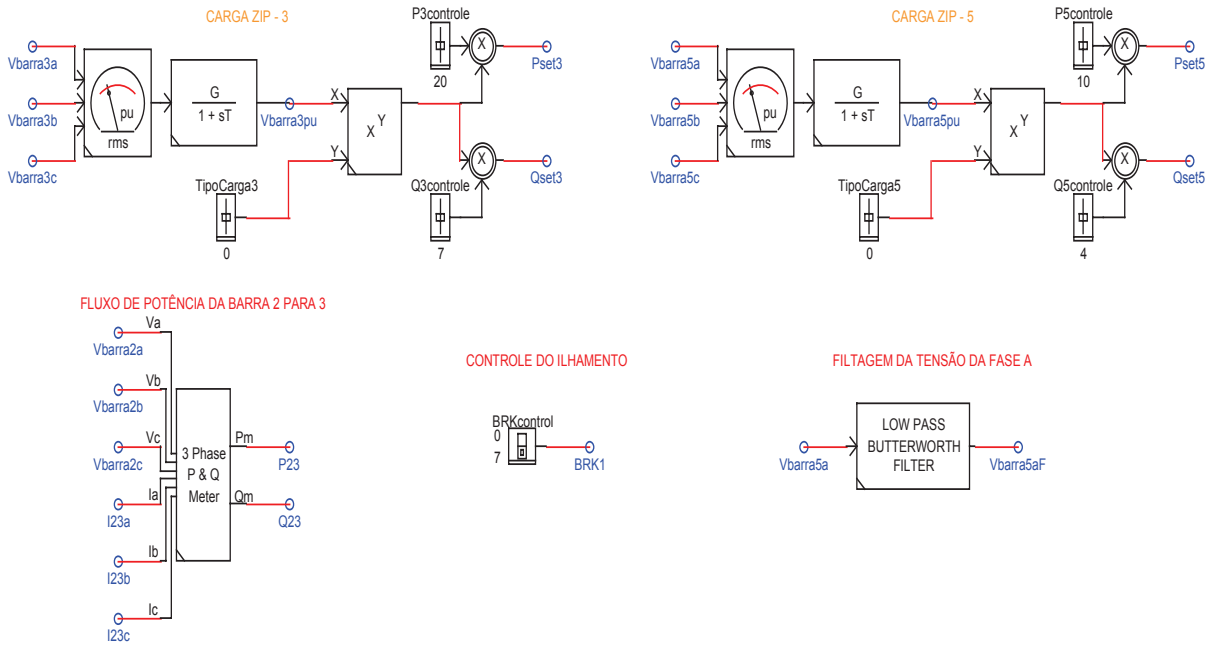


Figura 90 – Componentes do *Draft*: Blocos de controle e filtro da tensão.

O controle do disjuntor D_J no RSCAD (Figura 89) é controlado de forma simples, por meio de uma chave que indica se o disjuntor está aberto ou fechado. Com base no momento em que D_J foi aberto, e no tempo de atuação (*trip*) de um modelo ou relé comercial, pode-se medir o tempo de atuação da proteção anti-ilhamento. Essa medição de tempo foi realizada por um bloco, que foi criado usando o *CBuilder* do RSCAD, como apresentado na Figura 7. O controle da abertura de D_J e o bloco criado são apresentados na Figura 91.

Figura 91 – Controle do ilhamento e medição do tempo de atuação da proteção.

Na Figura 91, quando *BRKcontrol* é 7, então o disjuntor está fechado. Entretanto, se *BRKcontrol* é 0, então D_J está aberto. Assim, *BRKcontrol* controla o ilhamento do sistema.

O comando de saída da chave de controle do ilhamento é *BRK1*. Esta variável serve de referência para o bloco "Tempo de Atuação" da Figura 91, que mede a diferença de tempo em que BRK1 muda de estado, e o momento do *trip* de uma função de proteção qualquer. Dessa maneira, o produto desse bloco é o tempo de atuação da proteção em questão.

O tempo de atuação é calculado por um algoritmo em linguagem C, como apresentado na Figura 92, sendo que a variável *chave* é referente à entrada *BRK1*. Esse algoritmo é

implementado no bloco criado pelo *CBuilder*, que retorna o tempo de atuação, em função da abertura de D_J e atuação da proteção pelo sinal de *trip*.

```
STATIC:

double dt;
int condicao;
int cond2;


RAM_FUNCTIONS:

RAM:

dt= getTimeStep();
condicao = 0;
cond2 = 0;


CODE:

// Enquanto estiver sem abrir a chave e sem atuar, tempo = 0.
if((chave==7) && (cond2 == 0))
{
        tempo = 0;
}

// Enquanto estiver com a chave aberta e sem atuar, conta o tempo.
if((chave==0) && (trip == 0) && (condicao == 0))
{
        tempo = tempo + dt;
        cond2 = 1;
}

// Quando ocorrer o trip, não se faz mais nada.
if((chave==0) && (trip == 1) && (condicao == 0))
{
        condicao = 1;
        cond2 = 1;
}
```

Figura 92 – Código do bloco tempo de atuação (feito no *CBuilder*).

A Figura 93 apresenta os modelos de estimação de frequência, variação de frequência e deslocamento angular, usados com entrada para os relés de proteção.

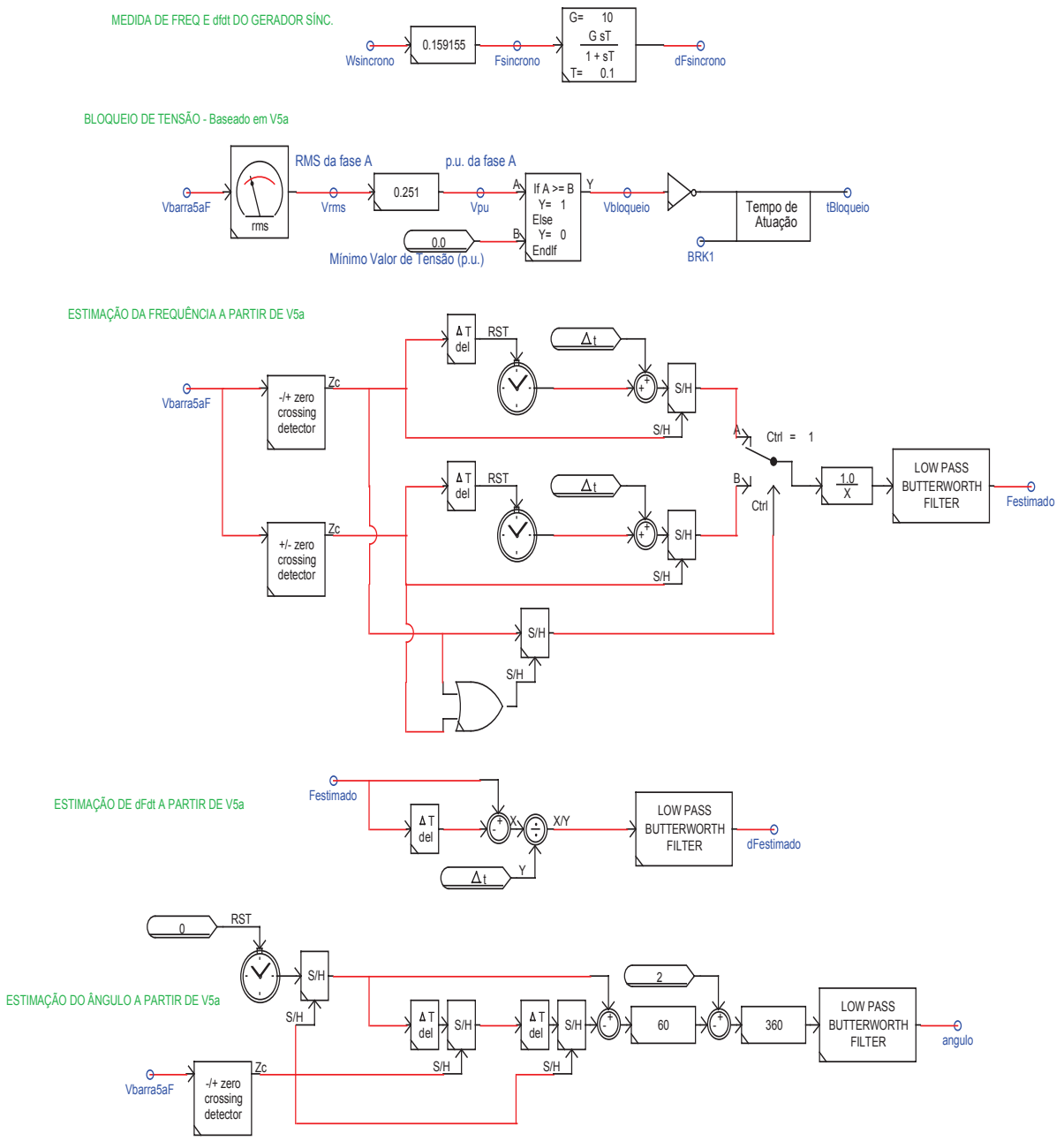


Figura 93 – Componentes do *Draft*: Estimadores de *f*, *df/dt* e *Δθ*.

A Figura 94 apresenta os relés dos modelos de SSF e TVF, com os cinco ajustes propostos e apresentados na dissertação. A Figura 95 apresenta o relé do modelo de DFA.

Figura 94 – Componentes do *Draft*: Modelos MSSF, MSSW, MTVF e MSSW.

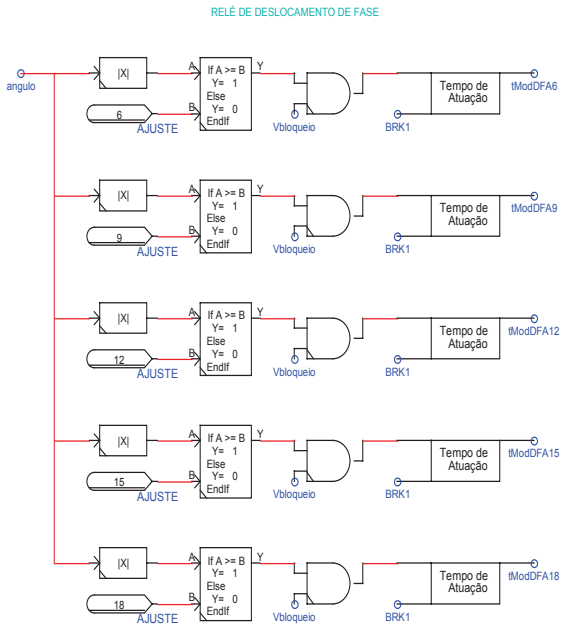


Figura 95 – Componentes do *Draft*: Modelo DFA.

Na Figura 96 são apresentados os blocos de saídas analógicas a serem enviadas aos relés comerciais, e o bloco de entradas digitais, que recebe os sinais de *trip*. As entradas digitais 1 e 2 são referentes ao relé comercial 1. As entradas 6, 7 e 8 são referentes ao relé comercial 2. Isso foi feito devido as características dos relés comerciais, que possuem um número específico de saídas auxiliares para as funções de proteção que se deseja ensaiar.

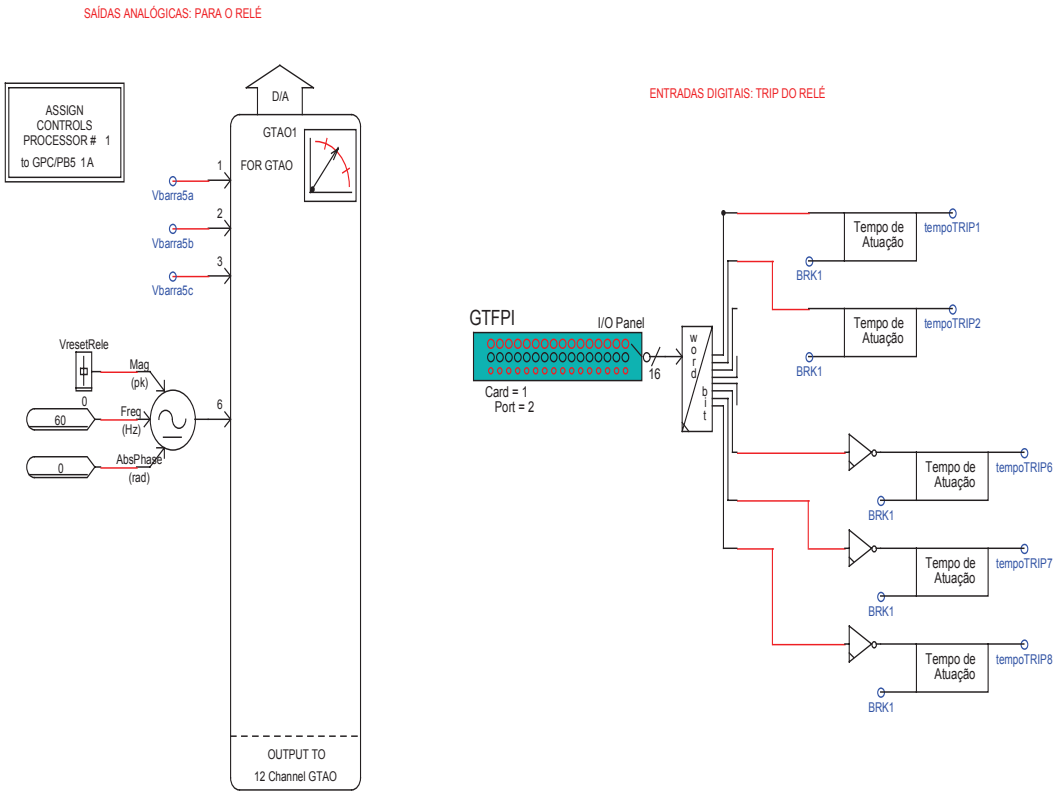


Figura 96 – Componentes do *Draft*: Blocos de saída analógica e entradas digitais.

A Figura 97 apresenta um diagrama de como o ganho G_{AO} do bloco de saída analógica deve ser ajustado. As portas analógicas fornecem um sinal de referência de tensão que varia na faixa de ±10 V de pico, o que é representado pela saturação do diagrama. O amplificador utilizado nessa dissertação apresenta um ganho fixo de 150/6,7, o que é representado na Figura 97 pelo ganho G_{AMP}.

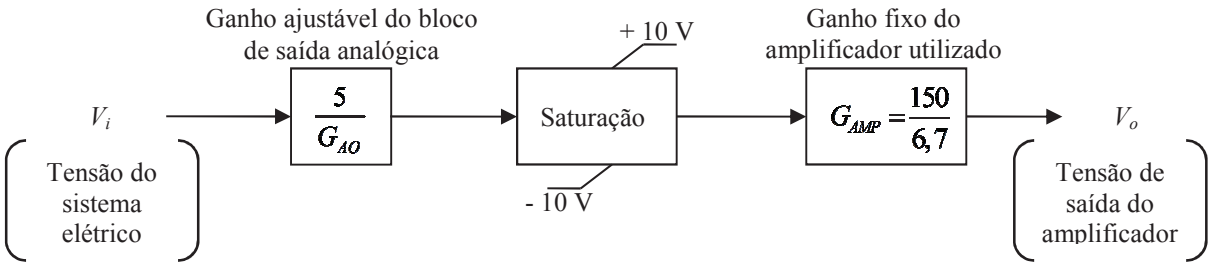


Figura 97 – Ajuste do ganho do bloco de saída analógica do *Draft* do RSCAD.

Como o objetivo é determinar o ganho G_{AO} relacionando o valor da tensão de saída (V_o) com a de entrada (V_i), pode-se fazer o equacionamento representado na Equação (54).

$$V_i \cdot \left(\frac{5}{G_{AO}} \right) \cdot G_{AMP} = V_o \tag{54}$$

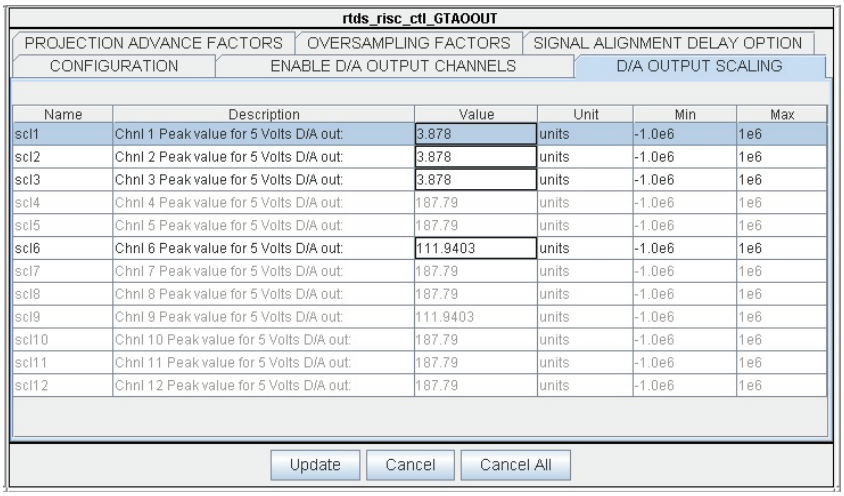
Dessa maneira, considerando o valor do ganho G_{AMP}=150/6,7, o ganho do bloco de saída analógica pode ser determinado pela Equação (55).

$$G_{AO} = 111{,}9403 \left(\frac{V_i}{V_o} \right) \tag{55}$$

Nesse trabalho, a tensão de fase-neutro do sistema elétrico da barra 5 (ponto de conexão dos relés, como visto na Figura 8) é 6,9/√3 kV. A tensão de saída do amplificador é atribuída como sendo 115 V. Assim, o valor do ganho G_{AO} é apresentado na Equação (56).

$$G_{AO} = 111{,}9403 \left(\frac{\left({}^{6,9}/_{\sqrt{3}} \right)[kV]}{115[V]} \right) = 3{,}878 \tag{56}$$

A configuração do bloco de saídas analógicas é apresentada na Figura 98. Os canais *1*, *2* e *3* tem o ganho dado na Equação (56), pois se referem às fases *a*, *b* e *c* da barra 5. Como o canal 6 é apenas é o comando de *reset*, e tem um valor de pico de 15 V no *Draft*, então foi usado o ganho da Equação (55), sendo V_i e V_o igual a 15 V cada.



Name	Description	Value	Unit	Min	Max
scl1	Chnl 1 Peak value for 5 Volts D/A out:	3.878	units	-1.0e6	1e6
scl2	Chnl 2 Peak value for 5 Volts D/A out:	3.878	units	-1.0e6	1e6
scl3	Chnl 3 Peak value for 5 Volts D/A out:	3.878	units	-1.0e6	1e6
scl4	Chnl 4 Peak value for 5 Volts D/A out:	187.79	units	-1.0e6	1e6
scl5	Chnl 5 Peak value for 5 Volts D/A out:	187.79	units	-1.0e6	1e6
scl6	Chnl 6 Peak value for 5 Volts D/A out:	111.9403	units	-1.0e6	1e6
scl7	Chnl 7 Peak value for 5 Volts D/A out:	187.79	units	-1.0e6	1e6
scl8	Chnl 8 Peak value for 5 Volts D/A out:	187.79	units	-1.0e6	1e6
scl9	Chnl 9 Peak value for 5 Volts D/A out:	111.9403	units	-1.0e6	1e6
scl10	Chnl 10 Peak value for 5 Volts D/A out:	187.79	units	-1.0e6	1e6
scl11	Chnl 11 Peak value for 5 Volts D/A out:	187.79	units	-1.0e6	1e6
scl12	Chnl 12 Peak value for 5 Volts D/A out:	187.79	units	-1.0e6	1e6

Figura 98 – Componente do *Draft*: Configuração do bloco de saídas analógicas.

Os blocos apresentados até então fazem parte do ambiente *Draft* do RSCAD. As variáveis do *Draft* são controladas pelo ambiente *RunTime*, como é possível observar na Figura 99, em que blocos de controle determinam o torque do GD (variável *TM*), a tensão terminal (variável *V_M1*) entre outras variáveis.

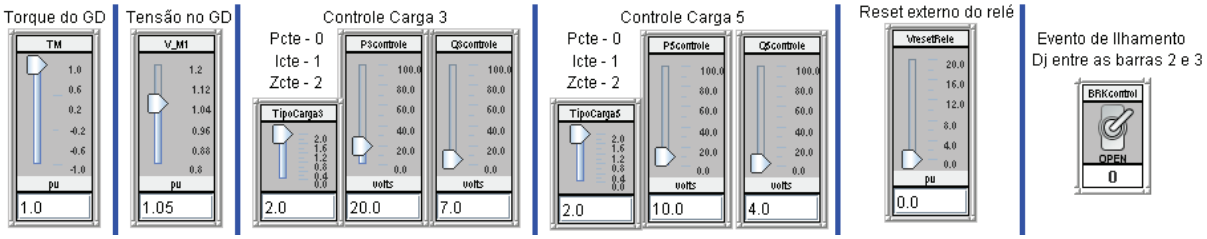


Figura 99 – Componentes do *RunTime*: Controles.

Além de realizar o controle, os blocos do ambiente *RunTime* são usados para visualizar as grandezas, como, por exemplo, a medição de potência, como apresentado na Figura 100. Nessa figura, é apresentada a medição de desbalanço e da potência das cargas.

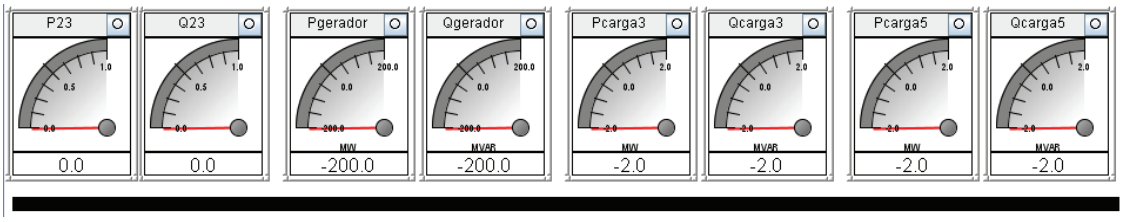


Figura 100 – Componentes do *RunTime*: Medidas de potência.

A Figura 101 apresenta a medição dos tempos de detecção de todos os relés de proteção envolvidos, sendo estes os comerciais e os modelos do *Draft*.

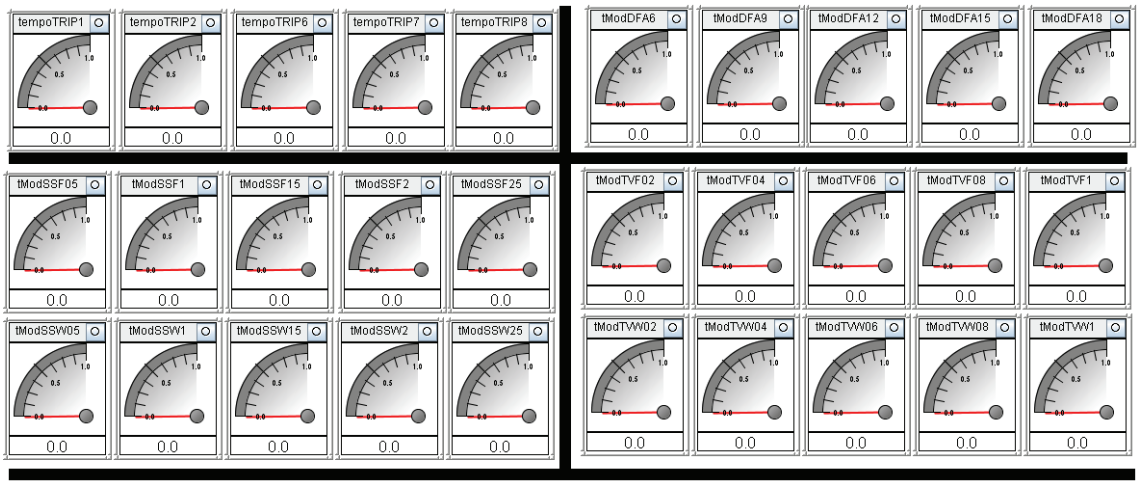


Figura 101 – Componentes do *RunTime*: Medição dos tempos de atuação.

Devido ao grande número de simulações a serem realizadas nesse trabalho, foi desenvolvido um *script* no *RunTime*, que controla todos os blocos de controle e medição desse ambiente, salvando os resultados em um relatório, de maneira a otimizar o processo. Essa rotina é apresentada na Figura 102 em linguagem C, para um cenário de Z_{cte} e DPDQ, sendo que a essência desse algoritmo segue o diagrama esquemático da Figura 32.

```
// Declarando variáveis
int i, j, MaxSimulacao, InicioRepeticoes, Repeticoes, EnsaiarReleComercial, EnsaiarModelos, VariaTorqueOUcarga,variaCasos;
float PotAtiva23,PotReativa23, teste, Pgerador, Qgerador, TorqueGD, Pcarga3, Qcarga3, Pcarga5, Qcarga5;
float tSSF05, tSSF1, tSSF15, tSSF2, tSSF25, tSSW05, tSSW1, tSSW15, tSSW2, tSSW25,
float tTVF02, tTVF04, tTVF06, tTVF08, tTVF1, tTVW02, tTVW04, tTVW06, tTVW08, tTVW1;
float tDFA6, tDFA9, tDFA12, tDFA15, tDFA18, trele1, trele2, trele6, trele7, trele8;
string fname, SubPasta;
Loadflow 60.0,0.001; // Setando configurações iniciais
SetPlotSeconds 2,1,1; //SetPlotSeconds Finish Time, every point, pre-trigger, value;
MaxSimulacao = 100;
Repeticoes = 10;
EnsaiarReleComercial = 1; // 1 para ensaiar, 0 para não ensaiar o relé comercial
EnsaiarModelos = 1; // 1 para ensaiar, 0 para não ensaiar os modelos computacionais do Draft do RSCAD.
InicioRepeticoes = 1; // Essa variável diz em qual repetição vai começar.
SubPasta = "Ensaio N";
SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : TipoCarga3" = 2; // Carga da barra 3: Pcte = 0; Icte = 1; Zcte = 2.
SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : TipoCarga5" = 2; // Carga da barra 5: Pcte = 0; Icte = 1; Zcte = 2.
VariaTorqueOUcarga = 0; // 0 para variar o Torque, 1 para variar as cargas 3 e 5
SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : V_M1" = 1.00;
for(i=InicioRepeticoes;i<=Repeticoes;i++) // Fazendo o laço de simulações
{
	WAIT 5;
	for(j=0;j<=MaxSimulacao;j++)
	{
		WAIT 1;
		if (VariaTorqueOUcarga == 0)
		{
			TorqueGD = 1*(j/MaxSimulacao);
			Pcarga3 = 20;
			Qcarga3 = 7;
			Pcarga5 = 10;
			Qcarga5 = 4;
		}
		if (VariaTorqueOUcarga == 1)
		{
			TorqueGD = 1;
			Pcarga3 = 20*(j/MaxSimulacao);
			Qcarga3 = 0.35*Pcarga3;
			Pcarga5 = 10*(j/MaxSimulacao);
			Qcarga5 = 0.4*Pcarga5;
			if (Pcarga3 < 0.001)
			{
				Pcarga3 = 0.001;
			}
			if (Qcarga3 < 0.001)
			{
				Qcarga3 = 0.001;
			}
			if (Pcarga5 < 0.001)
			{
				Pcarga5 = 0.001;
			}
			if (Qcarga5 < 0.001)
			{
				Qcarga5 = 0.001;
			}
		}
		SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : TM" = TorqueGD;
		SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : P3controle" = Pcarga3;
		SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : Q3controle" = Qcarga3;
		SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : P5controle" = Pcarga5;
		SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : Q5controle" = Qcarga5;
```

```
SetSwitch "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : BRKcontrol" = 7;
WAIT 1;
Start; // Iniciando a simulação "i,j"
        WAIT 5;
        SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : VresetRele" = 15; // Resetando o relé
        WAIT 5; // Tempo para que entre em regime;
        SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : VresetRele" = 0; // Tirando o Reset do relé
        WAIT 5;
        PotAtiva23 = MeterCapture("P23"); // Lê a potência ativa antes da ocorrência do evento
        PotReativa23 = MeterCapture("Q23"); // Lê a potência reativa antes da ocorrência do evento
        Pgerador = MeterCapture("Pgerador");
        Qgerador = MeterCapture("Qgerador");
        SetSwitch "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : BRKcontrol" = 0; // Evento de ilhamento
        WAIT 4; // Espera esse tempo para ver se os relés atuaram nesse tempo
                if (EnsaiarReleComercial == 1) // Leitura dos tempos de atuação:
                {
                  trele1 = MeterCapture("tempoTRIP1"); // Relé COM1 - Saída Auxiliar D1-E1;
                  trele2 = MeterCapture("tempoTRIP2"); // Relé COM1 - Saída Auxiliar D3-E3;
                  trele6 = MeterCapture("tempoTRIP6"); // Relé COM2 - Saída Auxiliar Out 1;
                  trele7 = MeterCapture("tempoTRIP7"); // Relé COM2 - Saída Auxiliar Out 2;
                  trele8 = MeterCapture("tempoTRIP8"); // Relé COM2 - Saída Auxiliar Out 3;
                }
                if (EnsaiarModelos == 1)
                {
                  tSSF05 = MeterCapture("tModSSF05"); // Apenas esse caso será mostrado abaixo.
                  tSSF1  = MeterCapture("tModSSF1");
                  tSSF15 = MeterCapture("tModSSF15");
                  tSSF2  = MeterCapture("tModSSF2");
                  tSSF25 = MeterCapture("tModSSF25");
                  tSSW05 = MeterCapture("tModSSW05"); // Apenas esse caso será mostrado abaixo.
                  tSSW1  = MeterCapture("tModSSW1");
                  tSSW15 = MeterCapture("tModSSW15");
                  tSSW2  = MeterCapture("tModSSW2");
                  tSSW25 = MeterCapture("tModSSW25");
                  tTVF02 = MeterCapture("tModTVF02"); // Apenas esse caso será mostrado abaixo.
                  tTVF04 = MeterCapture("tModTVF04");
                  tTVF06 = MeterCapture("tModTVF06");
                  tTVF08 = MeterCapture("tModTVF08");
                  tTVF1  = MeterCapture("tModTVF1");
                  tTVW02 = MeterCapture("tModTVW02"); // Apenas esse caso será mostrado abaixo.
                  tTVW04 = MeterCapture("tModTVW04");
                  tTVW06 = MeterCapture("tModTVW06");
                  tTVW08 = MeterCapture("tModTVW08");
                  tTVW1  = MeterCapture("tModTVW1");
                  tDFA6  = MeterCapture("tModDFA6"); // Apenas esse caso será mostrado abaixo.
                  tDFA9  = MeterCapture("tModDFA9");
                  tDFA12 = MeterCapture("tModDFA12");
                  tDFA15 = MeterCapture("tModDFA15");
                  tDFA18 = MeterCapture("tModDFA18");
                }
Stop;           // Simulação "i,j" finalizada
WAIT 1;
if (EnsaiarReleComercial == 1)
{
        // Relé COM1 - Saída Auxiliar D1-E1;
        fname = "RESULTADOS/":: SubPasta ::"/COM1_SSF_02.5_120_" ::itoa(i):: ".csv";
        fprintf(fname,"%i%s", j,",");
        fprintf(fname,"%f%s", TorqueGD,",");
        fprintf(fname,"%f%s", PotAtiva23,",");
        fprintf(fname,"%f%s", PotReativa23,",");
        fprintf(fname,"%f%s", Pgerador,",");
        fprintf(fname,"%f%s", Qgerador,",");
        fprintf(fname,"%f\n", trele1);
        // Relé COM1 - Saída Auxiliar D3-E3;
        fname = "RESULTADOS/":: SubPasta ::"/COM1_DFA_0018_000_" ::itoa(i):: ".csv";
        fprintf(fname,"%i%s", j,",");
        fprintf(fname,"%f%s", TorqueGD,",");
        fprintf(fname,"%f%s", PotAtiva23,",");
        fprintf(fname,"%f%s", PotReativa23,",");
        fprintf(fname,"%f%s", Pgerador,",");
        fprintf(fname,"%f%s", Qgerador,",");
        fprintf(fname,"%f\n", trele2);
        // Relé COM2 - Saída Auxiliar Out 1;
        fname = "RESULTADOS/":: SubPasta ::"/COM2_SSF_02.5_120_" ::itoa(i):: ".csv";
        fprintf(fname,"%i%s", j,",");
        fprintf(fname,"%f%s", TorqueGD,",");
```

```
                    fprintf(fname,"%f%s", PotAtiva23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotReativa23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Pgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Qgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f\n", trele6);
                    // Relé COM2 - Saída Auxiliar Out 2;
                    fname = "RESULTADOS/":: SubPasta ::"/COM2_TVF_01.0_002_" ::itoa(i):: ".csv";
                    fprintf(fname,"%i%s", j,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", TorqueGD,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotAtiva23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotReativa23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Pgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Qgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f\n", trele7);
                    // Relé COM2 - Saída Auxiliar Out 3;
                    fname = "RESULTADOS/":: SubPasta ::"/COM2_DFA_0018_000_" ::itoa(i):: ".csv";
                    fprintf(fname,"%i%s", j,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", TorqueGD,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotAtiva23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotReativa23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Pgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Qgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f\n", trele8);
                }
                if (EnsaiarModelos == 1)
                {
                    // Modelo de Sub/Sobre Frequência (SSF)
                    fname = "RESULTADOS/":: SubPasta ::"/MOD_SSF_00.5_000_" ::itoa(i):: ".csv";
                    fprintf(fname,"%i%s", j,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", TorqueGD,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotAtiva23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotReativa23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Pgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Qgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f\n", tSSF05);
                    // Modelo de Sub/Sobre Frequência Angular (SSW)
                    fname = "RESULTADOS/":: SubPasta ::"/MOD_SSW_00.5_000_" ::itoa(i):: ".csv";
                    fprintf(fname,"%i%s", j,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", TorqueGD,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotAtiva23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotReativa23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Pgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Qgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f\n", tSSW05);
                    // Modelo de Taxa de Variação de Frequência (TVF)
                    fname = "RESULTADOS/":: SubPasta ::"/MOD_TVF_00.2_000_" ::itoa(i):: ".csv";
                    fprintf(fname,"%i%s", j,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", TorqueGD,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotAtiva23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotReativa23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Pgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Qgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f\n", tTVF02);
                    // Modelo de Taxa de Variação de Frequência Angular (TVW)
                    fname = "RESULTADOS/":: SubPasta ::"/MOD_TVW_00.2_000_" ::itoa(i):: ".csv";
                    fprintf(fname,"%i%s", j,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", TorqueGD,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotAtiva23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotReativa23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Pgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Qgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f\n", tTVW02);
                    // Modelo de Deslocamento de Fase (DFA)
                    fname = "RESULTADOS/":: SubPasta ::"/MOD_DFA_0006_000_" ::itoa(i):: ".csv";
                    fprintf(fname,"%i%s", j,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", TorqueGD,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotAtiva23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", PotReativa23,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Pgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f%s", Qgerador,",");
                    fprintf(fname,"%f\n", tDFA6);
                }
            }
}
```

Figura 102 – *Script* para coleta de dados: Caso DPDQ com cargas Z_{cte}.