

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Leonardo Martins Kattah

ANÁLISE DA ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO ANTI-ILHAMENTO “SALTO DE VETOR” EM GERADORES DISTRIBUÍDOS SÍNCRONOS DURANTE EVENTOS SISTÊMICOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Florianópolis

2021

Leonardo Martins Kattah

Análise da atuação da proteção anti-ilhamento “Salto de Vetor” em geradores distribuídos síncronos durante eventos sistêmicos no Sistema Elétrico de Potência

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Miguel Moreto, Dr.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kattah, Leonardo

Análise da atuação da proteção anti-ilhamento "Salto de Vetor" em geradores distribuídos síncronos durante eventos sistêmicos no Sistema Elétrico de Potência / Leonardo Kattah ; orientador, Miguel Moreto, 2021.

98 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Geração Distribuída. 3. Geradores síncronos. 4. Proteção Anti-ilhamento. I. Moreto, Miguel. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Leonardo Martins Kattah

Análise da atuação da proteção anti-ilhamento “Salto de Vetor” em geradores distribuídos síncronos durante eventos sistêmicos no Sistema Elétrico de Potência

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 30 de setembro de 2021.

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino, D.Sc.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dionatan Augusto Guimarães Cieslak, M. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado ao meus queridos pais e irmãs.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente à minha família, que sempre me incentivou em todos os momentos durante essa jornada. Ao meu pai, Renato, pelo companheirismo e apoio que foram imprescindíveis para finalização desta etapa. À minha mãe, Eunice, por todo amor e carinho fornecidos, mesmo quando tudo parecia impossível. Às minhas irmãs, Fabiana e Alessandra, por serem minhas melhores amigas.

À minha namorada, Mariana, que me acompanhou durante boa parte desta trajetória, pelo carinho, paciência e compreensão durante os melhores e piores dias.

Aos meus amigos, representados pelos nomes de Gustavo, Luan, Lucas, Luis Felipe e Yago, pelo apoio e parceria.

Ao professor e orientador Miguel Moreto pela orientação, confiança e disposição, que foram fundamentais na realização deste trabalho.

Estendo também meus agradecimentos aos profissionais da Celesc Distribuição S.A. que ajudaram durante o curso de Engenharia Elétrica, em especial ao Daniel Bez e André Mota, pela ajuda e motivação durante este ano.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina, ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica, seu corpo docente e demais colaboradores pela excelente educação pública, gratuita e de qualidade.

RESUMO

Com o aumento da inserção de geradores no sistema de distribuição de energia, através da Geração Distribuída, é de extrema importância a adequação da proteção anti-ilhamento, de forma a garantir a segurança do sistema. São então apresentadas as diferentes proteções anti-ilhamento passivas, que utilizam medidas de tensão e corrente disponíveis no local da instalação do gerador. Através dos *softwares* Anarede e Anatem, é analisada a resposta dinâmica de geradores síncronos para eventos de ilhamento e eventos sistêmicos na rede de transmissão, tais como aumento e retirada de carga repentinamente e curto-circuitos e abertura de linhas de transmissão, utilizando diferentes cenários de carga, investigando a proteção anti-ilhamento “Salto de Vetor”. O presente Trabalho de Conclusão de Curso aponta a indevida atuação desta proteção, apresentando também conclusões quanto à sua utilização e sua parametrização encontrada em normas vigentes brasileiras. Com a utilização de uma ferramenta computacional auxiliar escrito em linguagem Visual Basic no *software* Excel, é emulado um relé de proteção de deslocamento de fase, a partir do conhecimento do funcionamento de relés comumente utilizados e encontrados no mercado.

Palavras-chave: Geração distribuída. Geradores síncronos. Proteção anti-ilhamento, Sistema Elétrico de Potência.

ABSTRACT

With the increase in the insertion of generators in the energy distribution system, through Distributed Generation, it is extremely important to adapt the anti-islanding protection, in order to guarantee the safety of the system. The different passive anti-islanding protections are then presented, which use voltage and current measurements available at the generator installation site. Through Anarede and Anatem *softwares*, the dynamic response of synchronous generators to islanding events and systemic events in the transmission network is analyzed, such as sudden increase and withdrawal of load and short circuits and opening of transmission lines, using different scenarios of load, investigating the “Vector Shift” anti-islanding protection. This work points out the improper performance of this protection, also presenting conclusions regarding its use and its parameterization found in current Brazilian standards. Using an auxiliary computational tool written in Visual Basic language in Excel *software*, a phase shift protection relay is emulated, based on the knowledge of the operation of commonly used relays found in the market.

Keywords: Distributed Generation, Synchronous Generators, Anti-islanding protection, Electrical Power System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Potência instalada (em MW) de Geração Distribuída	1
Figura 2: Deslocamento de fase da tensão terminal	8
Figura 3: Representação das formas de onda da tensão	9
Figura 4: Representação das formas de onda da tensão [2]	10
Figura 5: Fluxograma de dados de entrada e saída do Anatem.....	13
Figura 6: Organização de Dados Dinâmicos no Anatem	13
Figura 7: Modelo pi equivalente da linha de transmissão	15
Figura 8: Cargas como função da magnitude da tensão da barra.....	16
Figura 9: Diagrama unifilar do sistema IEEE-14 barras	17
Figura 10: Representação do alimentador de distribuição	20
Figura 11: Representação Simplificada do alimentador real.....	20
Figura 12: Curva de saturação exponencial (tipo 2).....	24
Figura 13: Parâmetros do regulador de tensão e sistema de excitação	24
Figura 14: Parâmetros do regulador de velocidade e turbina da máquina síncrona....	24
Figura 15: Fluxo de potência convergido para carga leve (gerador 1 MW)	27
Figura 16: Fluxo de potência convergido para carga média (gerador 1 MW)	27
Figura 17: Fluxo de potência convergido para carga pesada (gerador 1 MW)	27
Figura 18: Fluxo de potência convergido para carga igual geração (gerador 1 MW).27	
Figura 19: Fluxo de potência convergido para carga leve (gerador 5 MW)	28
Figura 20: Fluxo de potência convergido para carga média (gerador 5 MW)	28
Figura 21: Fluxo de potência convergido para carga pesada (gerador 5 MW)	28
Figura 22: Código de execução do Anatem para Contingência 1	30
Figura 23: Código de execução do Anatem para contingência 2	30
Figura 24: Tensão na barra 10000; Contingência 1.	31
Figura 25: Tensão na barra 10003; Contingência 2.	32
Figura 26: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga média; Gerador 1 MW (déficit de 4,5 MW).....	32
Figura 27: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga leve; Gerador 1 MW (déficit de 3 MW).	33
Figura 28: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW (déficit de 6 MW).....	33

Figura 29: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 2; Cenário de carga igual geração; Gerador 1 MW.	34
Figura 30: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga média; Gerador 5 MW (déficit de 0,5 MW).	35
Figura 31: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW (excedente de 1 MW).	36
Figura 32: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW (déficit de 2 MW).	36
Figura 33: Tensão na barra 10 – 66 kV.	38
Figura 34: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga média; Gerador 1 MW.	39
Figura 35: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga leve; Gerador 1 MW.	39
Figura 36: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW.	40
Figura 37: Tensão na barra 11 – 66 kV.	41
Figura 38: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga média; Gerador 1 MW.	41
Figura 39: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga leve; Gerador 1 MW.	42
Figura 40: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW.	42
Figura 41: Tensão na barra 5 – 138 kV.	43
Figura 42: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga média; Gerador 1 MW.	44
Figura 43: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga leve; Gerador 1 MW.	44
Figura 44: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW.	45
Figura 45: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga média; Gerador 1 MW.	46
Figura 46: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga leve; Gerador 1 MW.	46

Figura 47: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW.....	47
Figura 48: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga média; Gerador 1 MW.....	48
Figura 49: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga leve; Gerador 1 MW.....	48
Figura 50: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW.....	49
Figura 51: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga média; Gerador 5 MW.....	50
Figura 52: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW.....	50
Figura 53: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW.....	51
Figura 54: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga média; Gerador 5 MW.....	52
Figura 55: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW.....	52
Figura 56: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW.....	53
Figura 57: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga média; Gerador 5 MW.....	54
Figura 58: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW.....	54
Figura 59: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW.....	55
Figura 60: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga média; Gerador 5 MW.....	56
Figura 61: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW.....	56
Figura 62: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW.....	57

Figura 63: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga média; Gerador 5 MW.....	58
Figura 64: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW.....	58
Figura 65: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados dos transformadores	18
Tabela 2: Dados dos motores de indução.....	18
Tabela 3: Dados das linhas de transmissão	19
Tabela 4: Dados das barras do alimentador real.....	21
Tabela 5: Dados das linhas de distribuição (Zbase=1,9044 ohm).....	21
Tabela 6: Dados do transformador	21
Tabela 7: Parâmetros do Gerador 1 MW.....	23
Tabela 8: Parâmetros do Gerador 5 MW.....	23
Tabela 9: Parâmetros das curvas de saturação dos modelos de gerador	23
Tabela 10 Cenário de Carga Leve	25
Tabela 11: Cenário de Carga Nominal (média).....	25
Tabela 12: Cenário de Carga Pesada	26
Tabela 13: Cenário de Carga=Geração	26
Tabela 14: Valores de variação do ângulo da tensão na barra para Contingências 1 e 2 (Gerador 1 MW).....	34
Tabela 15: Valores de variação do ângulo da tensão na barra para Contingência 1 (Gerador 5 MW).....	37
Tabela 16: Deslocamento de fase para Contingência 3 - Gerador 1 MW.....	40
Tabela 17: Deslocamento de fase para Contingência 4 - Gerador 1 MW.....	43
Tabela 18: Deslocamento de fase para Contingência 5 - Gerador 1 MW.....	45
Tabela 19: Deslocamento de fase para Contingência 6 - Gerador 1 MW.....	47
Tabela 20: Deslocamento de fase para Contingência 7 - Gerador 1 MW.....	49
Tabela 21: Deslocamento de fase para Contingência 3 - Gerador 5 MW.....	51
Tabela 22: Deslocamento de fase para Contingência 4 - Gerador 5 MW.....	53
Tabela 23: Deslocamento de fase para Contingência 5 - Gerador 5 MW.....	55
Tabela 24: Deslocamento de fase para Contingência 6 - Gerador 5 MW.....	57
Tabela 25: Deslocamento de fase para Contingência 7 - Gerador 5 MW.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGD – Associação Brasileira de Geração Distribuída
AEP - American Electric Power
ANAREDE – Análise de Redes Elétricas
ANATEM – Análise de Transitórios Eletromecânicos
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
GD – Geração Distribuída
REN – Resolução Normativa
SEP – Sistema Elétrico de Potência
SIN – Sistema Interligado Nacional
VBA – Visual Basics for Application

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta\theta$: variação do ângulo da tensão terminal;

$\Delta\theta_i$: diferença angular da tensão terminal a cada passo de integração (1 ms);

θ_i : valor do ângulo no momento “i”;

θ_r : valor do ângulo de referência;

T: período medido pelo relé;

ω : frequência angular do sinal de tensão;

Δt : diferença nos tempos de duração dos semiciclos do sinal de tensão.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	1
1.1.OBJETIVO GERAL.....	3
1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3.ORGANIZAÇÃO.....	4
2.CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	5
2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.2. PROTEÇÃO ANTI-ILHAMENTO LOCAIS	6
2.2.1. Técnicas ativas	6
2.2.2. Técnicas passivas	6
<i>2.2.2.1. Proteções de sub/sobrefrequência.....</i>	<i>6</i>
<i>2.2.2.2. Proteção de taxa de variação de frequência (RoCoF).....</i>	<i>7</i>
<i>2.2.2.3. Proteções de sub/sobretensão</i>	<i>7</i>
<i>2.2.2.4. Proteção de deslocamento de fase.....</i>	<i>7</i>
3.MODELAGEM DO SISTEMA TESTE.....	11
3.1. ANAREDE	11
3.2. ANATEM.....	12
3.3 MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA.....	14
3.3.1. Barras CA.....	14
3.3.2. Circuitos CA.....	14
3.3.3 Geradores	15
3.3.4. Cargas.....	15
3.4. DADOS DO SISTEMA IEEE-14 BARRAS	16
3.5. REPRESENTAÇÃO DE UM ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO REAL	19
3.6. GERADORES CONECTADOS AO SISTEMA	22
3.6.1. Parâmetros dos geradores.....	22
4.RESULTADOS	25

4.1. CENÁRIOS DE CARGA.....	25
4.2. FLUXO DE POTÊNCIA CONVERGIDO	26
4.2.1. Gerador 1 MW.....	26
4.2.2. Gerador 5 MW.....	28
4.3. EVENTOS SIMULADOS.....	29
4.4. DEFINIÇÃO DOS AJUSTES DE PROTEÇÃO	29
4.4.1. Gerador 1 MW.....	29
4.4.2. Gerador 5 MW.....	35
4.5. EMULAÇÃO DO RELÉ DE PROTEÇÃO	37
4.6. AVALIAÇÃO DA ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO	38
4.6.1. Gerador 1 MW.....	38
4.6.1.1. <i>Contingência 3</i>	38
4.6.1.2. <i>Contingência 4</i>	40
4.6.1.3. <i>Contingência 5</i>	43
4.6.1.4. <i>Contingência 6</i>	45
4.6.1.5. <i>Contingência 7</i>	47
4.6.2. Gerador 5 MW.....	49
4.6.2.1. <i>Contingência 3</i>	49
4.6.2.2. <i>Contingência 4</i>	51
4.6.2.3. <i>Contingência 5</i>	53
4.6.2.4. <i>Contingência 6</i>	55
4.6.2.5. <i>Contingência 7</i>	57
4.7. COMENTÁRIOS GERAIS.....	59
5. CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICE A	66
APÊNDICE B.....	76

APÊNDICE C	79
------------------	----

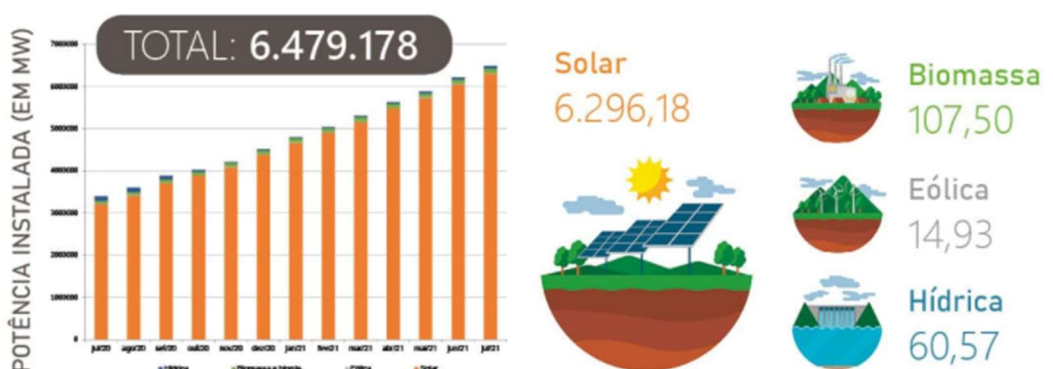
1. INTRODUÇÃO

A geração distribuída é definida como a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis de pequeno porte realizada junto ao próprio agente consumidor, no sistema de distribuição. As principais vantagens dessa forma de geração são: a proximidade ao centro de consumo, adiando assim investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, já que há redução de perdas nas linhas; o baixo impacto ambiental, contribuindo para mitigar o aquecimento global; e a diversificação da matriz energética, com inserção de mais fontes renováveis.

No Brasil, a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2012). Porém, somente a partir de novembro de 2015, com a publicação da Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015, que revisa a Resolução Normativa 482, houve um maior crescimento do mercado de geração distribuída no país, principalmente no setor de energia solar (ANEEL, 2015).

Conforme dados da ABGD (Associação Brasileira de Geração Distribuída), em julho de 2021, o número de conexões de geração distribuída no sistema de distribuição brasileiro já ultrapassou 540 mil, totalizando aproximadamente 6000 MW de potência instalada. Dessas conexões, 97% são de gerações que utilizam a energia solar como fonte de energia, com utilização de conversores eletrônicos (ABGD, 2021).

Figura 1: Potência instalada (em MW) de Geração Distribuída



Fonte: Associação Brasileira de Geração Distribuída (2021)

Devido ao grande aumento de geradores conectados à rede de distribuição, torna-se imprescindível o estudo das proteções anti-ilhamento utilizadas nesses sistemas, de tal forma que a conexão da GD seja tal que minimize os eventuais impactos negativos ao sistema de distribuição e ao próprio gerador.

A operação ilhada dos geradores distribuídos pode levar a problemas relacionados à segurança técnica do pessoal técnico da concessionária, à qualidade de energia elétrica da ilha formada, à descoordenação da proteção da ilha, ao aterramento inadequado, além de problemas relacionados ao religamento automático do sistema de distribuição/subtransmissão (Wallyng e Miller, 2002). Logo, é de grande importância para as concessionárias de distribuição a utilização dos ajustes corretos das proteções anti-ilhamento para atuar em eventos de ilhamento e não em eventos sistêmicos.

Este trabalho se desenvolveu a partir da possibilidade de ocorrência de operação indevida da proteção de “Salto de Vetor” frente a oscilações no sistema elétrico de potência, devido a utilização de ajustes incorretos para os geradores distribuídos.

No Brasil, existem diferentes recomendações de ajustes para as proteções anti-ilhamento. A Resolução Normativa I-432.0004, referente a Conexão de micro ou minigerador de energia ao sistema elétrico da Celesc estipula valores padronizados de ajuste para as proteções de sub/sobretensão (27/59), sub/sobrefrequência (81U/81O), taxa de variação de frequência (81 RoCoF) e Salto Vetor (78) em relés de proteção, onde para geradores distribuídos com potência inferior a 1 MW não são necessários estudos para as últimas duas funções mencionadas, bastando colocá-las abaixo de valores estabelecidos (CELESC, 2014). Esses ajustes devem ser sensíveis para detecção do ilhamento, porém podem atuar de maneira errônea em casos de eventos sistêmicos no Sistema Interligado Nacional.

Na Norma Técnica NTC 905200, referente ao Acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema da COPEL (com compensação de energia) não é estipulado uma margem específica para a função de proteção 78 em que o ajuste deve ser colocado, sendo necessários para proteção de geradores convencionais de todas as potências para as tensões de 13,8 kV e 34,5 kV. Já no caso em que são

utilizados inversores, é requisitada a utilização da proteção anti-ilhamento 78 apenas para potências superiores a 300 kW (COPEL, 2021)

No contexto europeu, a Energy Networks Association recomenda a não utilização da função Salto de Vetor (78), executando a proteção anti-ilhamento apenas com um ajuste das funções de frequência (81RoCoF, 81O, 81U) e de tensão (27,59). Essa recomendação surge da identificação que relés de taxa de variação de frequência e relés de Salto Vetor podem operar inadvertidamente e causar o desligamento de geradores distribuídos após eventos que não resultam em ilhamento. Esta perda de geração resultante pode causar uma perturbação significativa no sistema e uma perda generalizada de abastecimento de energia (Engineering Recommendation G99 - ENA, London, 2020).

Como forma de investigar a resposta dos geradores, foram utilizados os *softwares* Anarede e Anatem, desenvolvidos pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL). Além destes, também foram utilizados os programas PlotCepel, que permite auxiliar a visualização gráfica dos resultados obtidos através do Anatem, e Excel, como ferramenta computacional auxiliar.

O sistema utilizado foi o Sistema Exemplo IEEE-14 barras, com a conexão de um alimentador de 13,8 kV a uma barra de 138 kV deste sistema. O alimentador inserido simula os parâmetros de um alimentador real de distribuição. A partir deste alimentador foi conectado um gerador, e realizado eventos para avaliação do comportamento transitório perante contingências de contingência.

1.1.OBJETIVO GERAL

Diante do apresentado, este trabalho tem como objetivo principal analisar a resposta dinâmica de geradores para eventos de ilhamento e eventos sistêmicos na rede de transmissão, tais como aumento e retirada de carga repentinamente, e curto-circuitos monofásicos e abertura nas linhas de transmissão, investigando especificamente a proteção “Salto de Vetor”.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos deste trabalho:

- Revisão bibliográfica sobre as proteções passivas de anti-ilhamento;

- Apresentar a função “Salto de Vetor” e como é realizada sua medição e estimação em relés comerciais encontrados no mercado;
- Definir e modelar um sistema teste em programas de análise de fluxo de potência e transitórios eletromecânicos;
- Realizar o estudo de casos, verificando o comportamento do ângulo de tensão na barra do gerador no *software* Anatem;
- Emular o relé de proteção “Salto de Vetor” através de um programa auxiliar em Visual Basic no Excel;
- Obter conclusões e analisar os resultados das simulações.

1.3. ORGANIZAÇÃO

O primeiro capítulo é destinado a introdução do tema, além de apresentados os objetivos e a organização do trabalho.

O segundo capítulo é uma contextualização do trabalho, apresentando a revisão bibliográfica, e também indicando o objetivo das proteções passivas de anti-ilhamento, além de modelos de relé de proteção que utilizam esta proteção, e seus respectivos funcionamentos e métodos de estimação.

No terceiro capítulo, é feita uma breve descrição dos métodos de solução dos problemas de fluxo de potência e estabilidade nos *softwares* Anarede e Anatem, e apresentadas as modelagens dos equipamentos (geradores, barras, carga, motores de indução e redes CA) utilizados nas simulações. Em seguida, é descrito o sistema IEEE-14 barras modificado, com detalhamento da rede de distribuição conectada, assim como os parâmetros dos geradores, reguladores e curvas de saturação utilizados nas simulações.

O quarto capítulo detalha os cenários de carga utilizados para as simulações de contingência e o fluxo de potência convergido para cada cenário e são apresentadas as contingências observadas através do *software* Anatem. Em seguida, são expostas as simulações realizadas, definindo os ajustes corretos da proteção anti-ilhamento, para cada tipo de gerador. Além disso, é elaborada uma ferramenta auxiliar em VBA no Excel utilizada para emular a atuação da função de proteção 78, juntamente com as suas características de estimação implementadas.

O quinto capítulo se destina as conclusões quanto à proteção de “Salto de Vetor”, assim como comentários quanto sua utilização.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Com o aumento da geração distribuída em diversos países, o estudo das proteções anti-ilhamento nas redes de distribuição/subtransmissão é extremamente importante para a operação segura do sistema de energia. Nesse capítulo são apresentados os artigos e publicações que serviram como apoio para a realização deste trabalho. Em seguida, são descritas as principais proteções passivas anti-ilhamento, com foco principal na “Salto de Vetor”.

2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No artigo de Mourinho *et al* (2019) é abordado o tema de proteção anti-ilhamento e realizado simulações para identificação de atuações das proteções em eventos de ilhamento e em eventos sistêmicos, tais como perturbações no SIN (Sistema Interligado Nacional). Também é utilizado um mapa de ajustes para as funções de proteção sub/sobrefrequência e sub/sobretensão, obtendo bons resultados quanto a não atuação das proteções em eventos sistêmicos. Porém, os ajustes utilizados para as funções de proteção se diferem dos encontrados em normas nacionais e internacionais, além de não utilizar a função de salto de vetor para proteção anti-ilhamento.

Em Vieira Junior (2006), são abordados diversos métodos para ajuste e avaliação do desempenho de relés de proteção anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos. Os capítulos iniciais detalham de forma simples e explicativa a utilização das diversas técnicas de detecção de ilhamento, sejam elas passivas ou ativas, e cita ajustes típicos utilizados para as principais funções de proteção.

A dissertação de mestrado de Motter (2014), traz importantes informações teóricas sobre as proteções baseadas em medidas de frequência, e apesar de utilizar um *software* diferente do utilizado neste trabalho, foi essencial para o entendimento da modelagem da proteção de “Salto de Vetor”.

Em âmbito internacional, Teoh e Tan (2021), fazem uma revisão das proteções anti-ilhamento utilizadas, citando novas pesquisas nessa área. É apresentado um quadro com as principais funções de proteção utilizadas, comparando-as em requisitos como princípio de operação, tempo de resposta, efeito nas linhas de distribuição, custo do sistema, efeito na qualidade de energia,

entre outros. É possível observar que as funções de proteção passivas apesar de possuírem uma grande zona de não-detecção, possuem inúmeras características que viabilizam seu uso em maior escala, já que têm custo baixo e não degradam a qualidade de energia, além do baixo tempo de resposta.

2.2. PROTEÇÃO ANTI-ILHAMENTO LOCAIS

O princípio básico das técnicas locais para detecção do ilhamento é a medição de tensão e corrente, ou outra variável, disponível no local da instalação do gerador distribuído. Esta técnica é dividida em proteções passivas e ativas.

2.2.1. Técnicas ativas

As técnicas ativas requerem que o gerador distribuído injete sinais que provoquem pequenos distúrbios no sistema elétrico, sob os quais o sistema apresentará um comportamento diferente entre as condições de operação interligada com a concessionária e operação quando estiver isolado (Vieira, 2006).

2.2.2. Técnicas passivas

Já as técnicas passivas, se baseiam em medidas de grandezas elétricas no ponto de conexão entre o gerador distribuído e o sistema elétrico, e na ocorrência de um ilhamento, podem ser observadas significativas variações nas grandezas medidas. São esquemas de proteção bastante atrativos, devido ao seu baixo custo e fácil instalação, no entanto seu desempenho é prejudicado caso a diferença entre geração e carga seja pequena (Vieira, 2006). São apresentadas diferentes técnicas de proteção anti-ilhamento locais passivas utilizadas. As proteções sub/sobrefrequência são as mais difundidas dentro das técnicas passivas, com relés de deslocamento de fase também sendo empregados em geração distribuída (Jenkins, et al., 2000).

2.2.2.1. Proteções de sub/sobrefrequência

As proteções de sub/sobrefrequência calculam a frequência elétrica considerando uma janela de medição sobre, no mínimo, um ciclo da forma de onda da tensão na barra em que o relé está conectado. Depois de calculada, a frequência é então comparada com os ajustes pré-estabelecidos, e caso esse valor

ultrapasse os limites inferior ou superior, o relé envia um sinal para comandar a abertura do disjuntor do gerador (Vieira, 2006).

2.2.2.2. Proteção de taxa de variação de frequência (RoCoF)

O relé de taxa de variação de frequência é considerado uma técnica sensível e confiável para detectar ilhamentos quando a variação de frequência é relativamente lenta. A taxa de variação de frequência é calculada considerando-se uma janela de medida de alguns ciclos, sobre a forma de onda da tensão na barra onde se encontra instalado o relé. Se o valor da taxa de variação da frequência for maior que o ajuste do relé, um sinal é imediatamente enviado para comandar a abertura do disjuntor do gerador.

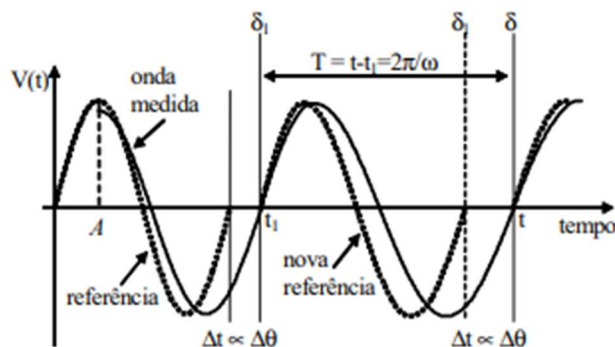
2.2.2.3. Proteções de sub/sobretensão

Os relés de tensão, determinam o valor eficaz da tensão da barra ao qual estão conectados considerando uma janela de medida de alguns ciclos elétricos sobre a forma de onda dessa tensão. Caso o valor medido da tensão ultrapasse os limites impostos pelos ajustes e se esta condição permanecer por um tempo superior a um valor ajustado, o relé opera enviando um sinal para comandar a abertura do disjuntor do gerador.

2.2.2.4. Proteção de deslocamento de fase

A proteção de deslocamento de fase, conhecida como “Salto de Vetor”, é utilizada comercialmente em relés de proteção, que medem a duração de um ciclo elétrico e iniciam uma nova medição cada vez que a forma de onda da tensão cruza o eixo horizontal em sentido ascendente. A duração dessa medida (onda atual) é então comparada com a duração do ciclo anterior (referência), que permanece armazenada no relé. Essa variação da duração do ciclo é proporcional ao deslocamento de fase, que é o sinal de entrada do relé (Vieira Junior, 2006). Na figura 2, é possível observar a diferença de duração dos ciclos de onda, que resulta em uma variação proporcional do ângulo da tensão terminal $\Delta\theta$. O ilhamento ocorre no instante A; T é o período medido pelo relé e ω é a frequência angular do sinal de tensão.

Figura 2: Deslocamento de fase da tensão terminal



Fonte: Vieira, 2008

Conforme apresentado em Mota (2015), o relé de salto de vetor pode ser uma alternativa importante para detecção de ilhamento, pois possui alta sensibilidade e deve ser considerado em sistemas de proteção de GD, seja qual for sua capacidade de geração e tipo de conexão, desde que a operação ilhada não seja permitida.

Desconexões de cargas ou bancos de capacitores, assim como curtos-circuitos, podem causar mudança abrupta de fase na forma de onda da tensão nos terminais de uma GD, em comparação com a tensão pré-evento, justificando o uso desta função para anti-ilhamento, já que o ilhamento é causado por uma desconexão entre a ilha e o restante do sistema (MOTTER, 2014).

Porém, apesar de serem muito utilizados, esses relés podem não detectar o ilhamento caso haja equilíbrio entre a potência ativa consumida e gerada na ilha formada.

Como o foco deste trabalho é a análise da proteção de deslocamento de fase, já que é a função designada especificamente para a desconexão das unidades geradoras em caso de ilhamento, foram pesquisados diferentes modelos de relés de proteção no mercado que são comumente utilizados para geradores distribuídos, tais como SEL-751, Pextron URP 6000, ZIV PIRV1203A e Woodward MRG3.

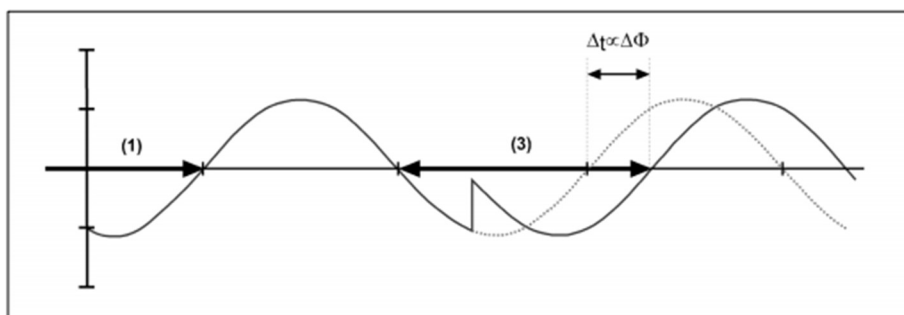
No relé SEL-751, desenvolvido pela Schweitzer Engineering Laboratories, a função “Vector Shift” opera dentro de três ciclos da forma de onda, o que é rápido o suficiente para evitar religamento fora de sincronismo com o alimentador da rede, evitando danos ao gerador. É possível configurar ajustes de 2 a 30°, com

incremento de 0,1 graus. Porém, não é descrito o modo de funcionamento da proteção, e como é feita a estimação do ângulo de tensão da barra do gerador.

No relé Pextron URP 6000, o salto vetorial é detectado através da verificação da diferença entre períodos de ciclos consecutivos de uma mesma fase de tensão para as três fases da rede elétrica. Quando houver uma diferença angular nos vetores de tensão acima do valor especificado e o relé não estiver bloqueado, é gerado um sinal na matriz das saídas de salto vetorial por um tempo fixo de 0,2 s. Possui uma faixa de ajuste de 2 a 31 graus.

O relé PIRV1203A da marca ZIV Grid Automation traz em seu manual uma descrição simplificada do funcionamento da unidade de “Salto de Vetor”. O equipamento realiza a medida detectando os cruzamentos por zero: medindo o tempo entre dois deles consecutivos e calculando a diferença entre os valores obtidos para dois semiperíodos consecutivos com o mesmo sinal da tensão. A figura 3 facilita a compreensão de como é detectada a perturbação, onde $\Delta t \propto \Delta \Phi$ é obtido através da diferença nos tempos de duração dos semiciclos (1) e (3). É possível configurar ajustes de 1 a 25°.

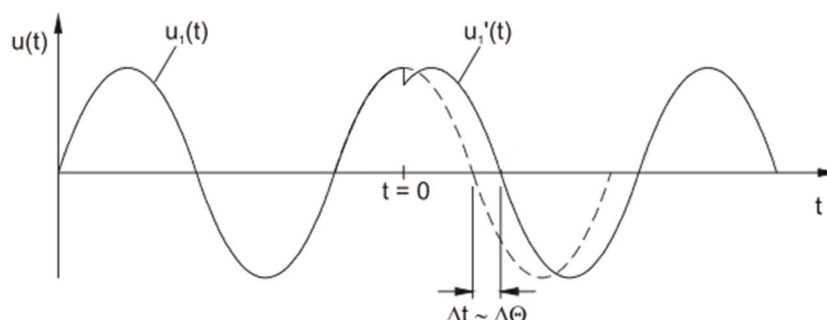
Figura 3: Representação das formas de onda da tensão



Fonte: ZIV GRID AUTOMATION, 2012

No relé Woodward MRG3, ocorre a medição pela duração do ciclo da onda de tensão, assim como nos relés apresentados anteriormente. Porém, a duração do ciclo é comparada internamente com um tempo de referência fixo, e assim, é verificado o desvio da duração do ciclo do sinal de tensão. Esse desvio estabelecido corresponde a uma variação do ângulo do vetor, apresentado na figura 4.

Figura 4: Representação das formas de onda da tensão [2]



Fonte: Manual Woodward MRG3, revisão B

A unidade de salto de vetor do relé Woodward MRG3 supervisiona as três fases da rede elétrica ao mesmo tempo, sendo necessário o “Salto de Vetor” exceder o parâmetro especificado nas três fases simultaneamente para que ocorra a abertura do relé. Porém, é possível supervisionar apenas uma delas, obtendo uma medição mais sensível.

O conhecimento do funcionamento dos diferentes relés de proteção encontrados no mercado é de extrema importância para o desenvolvimento do projeto, já que através do *software* Anatem não é possível obter o sinal da onda de tensão como resposta das simulações, apenas encontrando o valor da tensão em pu e o ângulo da tensão na barra desejada. Logo, foi necessário a modelagem de uma ferramenta auxiliar com base nas informações obtidas no *software*, visando emular a atuação da função de proteção 78, apresentada no capítulo 4.

3. MODELAGEM DO SISTEMA TESTE

Para as simulações necessárias para análise da proteção “Salto de Vetor”, foi fundamental a utilização de diferentes *softwares*, cada um com sua função especificada, que são brevemente apresentados neste capítulo. Além disso, a modelagem dos equipamentos do sistema, tais como geradores, cargas e redes CA, são de extrema importância para obtenção de resultados coerentes com o encontrado em redes elétricas reais.

Também neste capítulo, é apresentado o sistema IEEE-14 barras modificado, com detalhamento da rede de distribuição inserida à barra de 138 kV correspondente. Ao final, são apresentados os parâmetros dos geradores utilizados nas simulações, assim como seus reguladores de tensão e de velocidade.

3.1. ANAREDE

O ANAREDE, *software* desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), é utilizado para análise de SEP em regime permanente. Reúne programas de fluxo de potência, equivalente de redes, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão e de fluxo, e análise de segurança de tensão. Para este trabalho, foi utilizada a versão 11.2.4.

Neste trabalho, utilizou-se o *software* para realização do fluxo de potência do sistema teste, com objetivo de calcular o estado operativo da rede elétrica para definidas condições de carga, geração, topologia e determinadas restrições operacionais, e com isso obter as tensões e ângulos em todas as barras, e consequentemente, o fluxo de potência nas linhas.

O processo iterativo do cálculo do estado operativo da rede elétrica para as condições impostas consiste na obtenção, de forma alternada, de soluções para o sistema CA e para o sistema CC, até que as variações, entre interações consecutivas, das potências injetadas na rede CA pela rede CC sejam menores que uma determinada tolerância, escolhida pelo usuário. Dois métodos estão disponíveis para solução das equações da rede elétrica CA: Método Desacoplado Rápido e Método de Newton, onde o primeiro é o padrão, sendo necessário ativação para utilizar o método de Newton (opção NEWT durante a execução do código DOPC).

O método utilizado para solução do fluxo de potência foi de Newton, desenvolvido por Isaac Newton e Joseph Raphson, que consiste na linearização

de uma dada função em torno de um ponto inicial especificado utilizando a série de Taylor da função neste ponto.

Logo, através do Anarede, foi possível obter diferentes cenários de carga no sistema de distribuição anexado ao Sistema IEEE-14 barras, que serão apresentados no capítulo 4.

3.2. ANATEM

A análise de transitórios eletromecânicos do SEP envolve a avaliação do comportamento dinâmico não linear do sistema após a ocorrência de grandes distúrbios na rede elétrica, a partir de um ponto de operação em regime permanente, obtido através do restabelecimento de um caso convergido de fluxo de potência gravado no *software* Anarede.

Após a ocorrência de grandes perturbações na rede elétrica, usualmente decorrentes de súbitas mudanças estruturais na rede elétrica, o sistema sai do ponto de operação estável que se encontrava e tende a se acomodar em outro ponto de operação. Nestas circunstâncias, os geradores síncronos são submetidos a acelerações e desacelerações de tal intensidade que certas unidades ou grupos de unidades podem perder sincronismo entre si ou com o sistema (CEPEL, 2021).

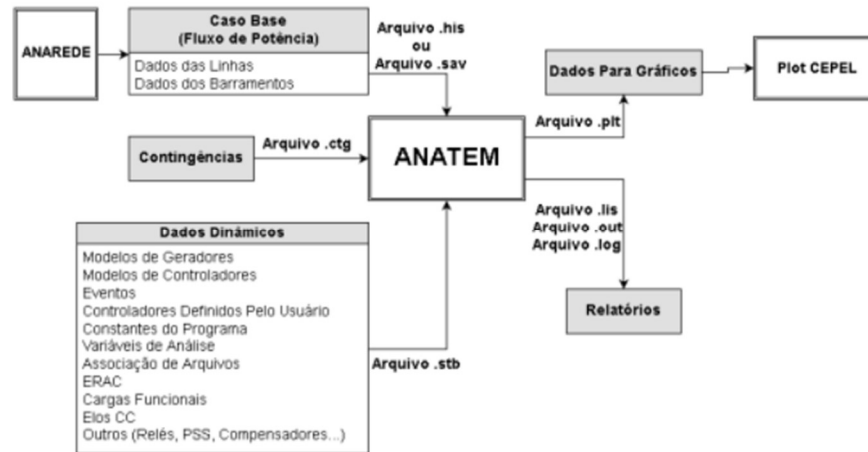
Logo, o programa Anatem é um *software* computacional para simulações dinâmicas no domínio do tempo, visando análise não linear da estabilidade transitória de sistemas de potência de grande porte, que é um problema algébrico-diferencial com valor inicial conhecido, consistindo de um amplo conjunto de equações diferenciais ordinárias e um grande conjunto de equações algébricas esparsas.

O esquema de solução utilizado pelo Anatem é o alternado implícito, que resolve primeiramente a equação algébrica do sistema de transmissão (fluxo de potência), e em seguida, as equações diferenciais, através do método de integração trapezoidal implícito, devido a sua generalidade de implementação e estabilidade numérica (SILVA, 2018).

Foi utilizada a versão 11.6.2. do Anatem. Na figura 5, são mostrados os principais arquivos necessários para realização das análises de transitórios eletromecânicos e seus respectivos formatos de dados. Já na figura 6 são descritos os dados dinâmicos e os diferentes modelos de dados de geradores, máquinas

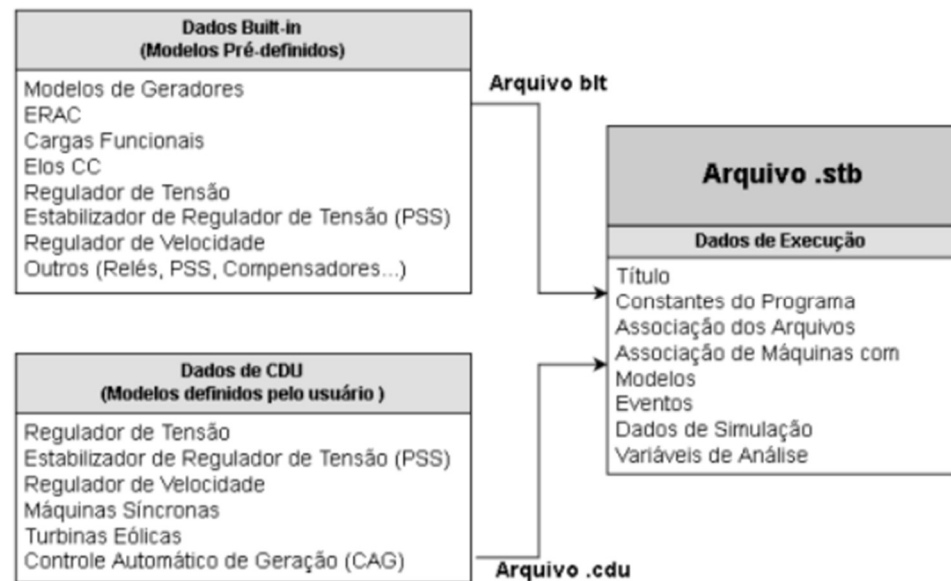
síncronas e reguladores que podem ser utilizados, sendo pré-definidos ou definidos pelo usuário.

Figura 5: Fluxograma de dados de entrada e saída do Anatem



Fonte: Sousa (2018)

Figura 6: Organização de Dados Dinâmicos no Anatem



Fonte: Sousa (2018)

3.3 MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA

Neste tópico é apresentada a modelagem das barras CA, circuitos CA, geradores e cargas, utilizando modelos obtidos através dos *softwares* Anarede e Anatem.

3.3.1. Barras CA

As barras podem ser modeladas, de acordo com seu tipo:

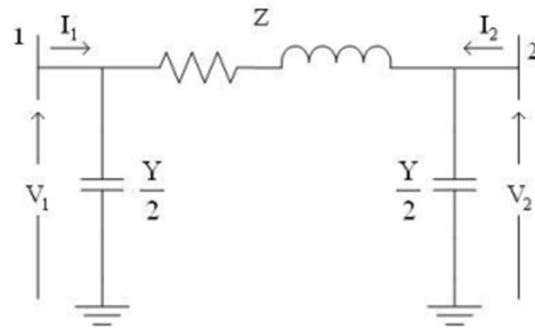
- a) Barras PQ: cargas e as gerações ativa e reativa são especificadas. A magnitude da tensão nessa barra não é regulada, exceto para os casos que são controladas por uma barra PV remota.
- b) Barras PV: cargas ativa e reativa e a geração ativa são especificadas. A geração reativa é variável entre limites especificados para manter a magnitude da tensão da barra constante em um valor especificado, ou controlar a magnitude da tensão em uma barra remota.
- c) Barra de referência: cargas ativa e reativa, a magnitude e ângulo de fase da tensão são especificados. Em qualquer sistema interconectado existe normalmente uma barra de referência cujo ângulo é a referência de fase do sistema. No entanto, podem ser definidas mais de uma barra de referência com a finalidade de atender os requisitos de determinados tipos de estudos.

3.3.2. Circuitos CA

As linhas de transmissão e transformadores são representadas pelos seus circuitos pi-equivalentes.

No modelo pi de linha de transmissão, os comportamentos resistivos e indutivos estão concentrados na impedância total longitudinal da linha, representada pela sigla Z , enquanto o comportamento indutivo está concentrado na admitância total transversal da linha, representada pela sigla Y , conforme apresentado na figura 7, onde V_1 e V_2 , e I_1 e I_2 correspondem as tensões e correntes nas barras 1 e 2. A principal limitação deste modelo é que com o uso de parâmetros concentrados, os comportamentos resistivo, indutivo e capacitivo da linha não ocorrem distribuídos ao longo da linha (LEMOS, 2008).

Figura 7: Modelo pi equivalente da linha de transmissão



Fonte: (LEMOS, 2008)

3.3.3 Geradores

No *software* Anarede, os geradores conectados ao sistema têm suas gerações ativas fixas em seus valores especificados, com a geração reativa variando dentro dos limites pré-estabelecidos. Essa modelagem é importante para a realização do fluxo de potência, e utiliza do código de execução DGER.

No Anatem, é possível representar os geradores com diferentes modelos. Para as máquinas síncronas, podem ser representados por modelo clássico (incluindo modelo de barra infinita), modelo de polos salientes e modelo de rotor liso. Utiliza-se do código DMAQ para associar as unidades geradoras com as barras de geração definidas no programa Anarede.

Porém, antes de definir uma máquina no Anatem, é necessário definir o modelo do gerador (código DMDG), modelo da curva de saturação (DCST) e reguladores de tensão, velocidade e estabilizador, representados por modelos built-in (DRGT, DRGV e DEST).

3.3.4. Cargas

No Anarede, as cargas são modeladas como potências ativa e reativa constantes, ou podem ser expressas como uma função da magnitude da tensão da barra de acordo com as formas gerais descritas na figura 8. Os parâmetros A, B, C e D definem as parcelas de carga

representadas por corrente e impedância constantes, respectivamente. P e Q são as potências ativa e reativa da carga para tensão inicial da barra. Para este trabalho, foram escolhidos valores de B igual a 40, D igual a 100 e V_{fld} , que corresponde a tensão abaixo da qual a carga passa a ser modelada como impedância constante, igual a 70.

Figura 8: Cargas como função da magnitude da tensão da barra

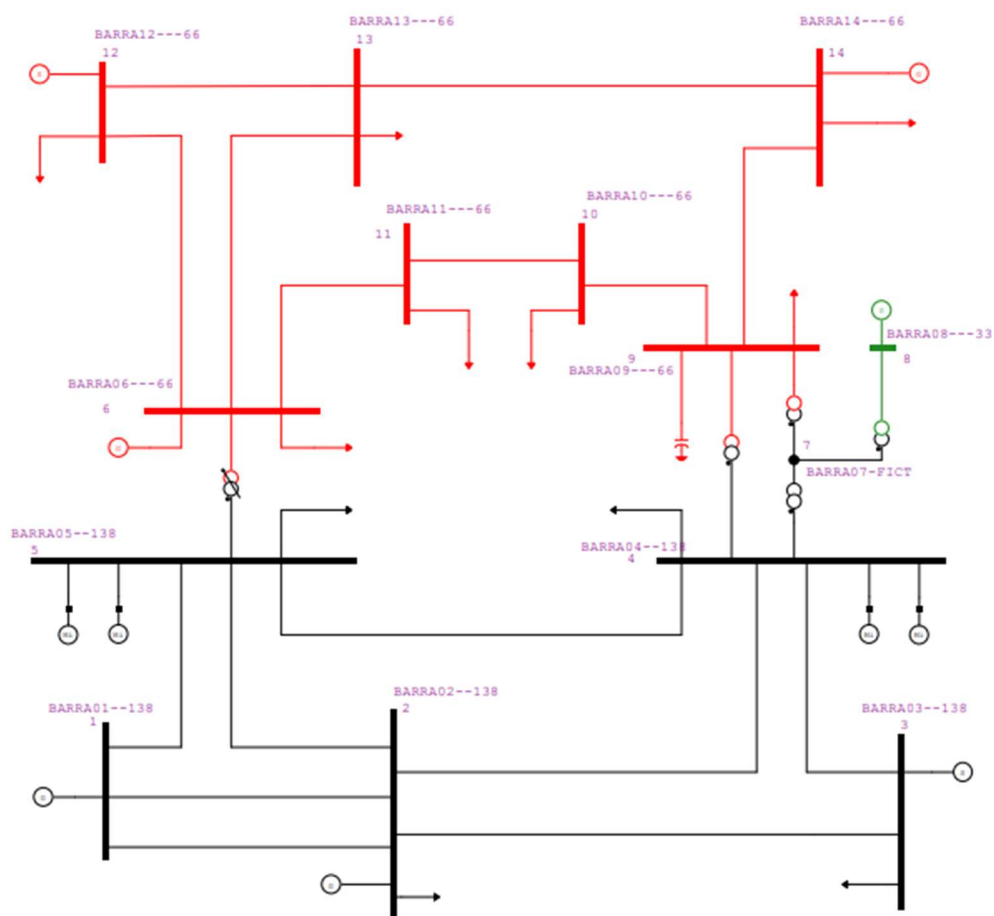
$$\begin{aligned}
 \text{Carga ativa} &= (100-A-B + A * V/V_{def} + B * V^2/V_{def}^2) * P/100 && \text{se } V \geq V_{fld} \\
 &= ((100-A-B) * V^2/V_{fld}^2 + A * V^2 / (V_{def} * V_{fld}) + B * V^2/V_{def}^2) * P/100 && \text{se } V < V_{fld} \\
 \\
 \text{Carga reativa} &= (100-C-D + C * V/V_{def} + D * V^2/V_{def}^2) * Q/100 && \text{se } V \geq V_{fld} \\
 &= ((100-C-D) * V^2/V_{fld}^2 + C * V^2 / (V_{def} * V_{fld}) + D * V^2/V_{def}^2) * Q/100 && \text{se } V < V_{fld}
 \end{aligned}$$

Fonte: CEPEL, 2021.

3.4. DADOS DO SISTEMA IEEE-14 BARRAS

O sistema é apresentado na figura 8. Tal sistema é formado por 14 barras (uma barra de referência, seis barras PV, sete barras PQ) com 7 geradores síncronos, 11 unidades de carga, 3 transformadores, 4 motores de indução e 20 ramos, sendo 17 linhas de transmissão e 3 transformadores, e um capacitor shunt. Foi obtido na pasta de Exemplos no diretório de execução do programa Anatem.

Figura 9: Diagrama unifilar do sistema IEEE-14 barras



Fonte: Autoria própria

Esse sistema representa uma parte da rede da companhia American Electric Power – AEP, nos Estados Unidos. Apesar de ser uma configuração de fevereiro de 1962, continua sendo uma referência para diversos estudos (BARBOSA, 2018).

O sistema possui diferentes bases de tensão, sendo diferenciadas pelas suas cores, com os equipamentos pertencentes à base de tensão de 138 kV em preto, os de 66 kV em vermelho e 33 kV em verde. A barra 8, conectada ao transformador entre as barras 4 e 7, correspondente ao terciário deste transformador, onde é conectado um compensador síncrono.

Dos geradores síncronos mencionados, três destes são compensadores síncronos, localizados nas barras 3 e 12, além do conectado à barra 8, já mencionado anteriormente. Dos quatro motores de indução do sistema, dois estão conectados na barra 4 e dois na barra 5. Nas tabelas 1, 2 e 3, são apresentados os

dados dos transformadores, dos motores de indução e das linhas de transmissão do sistema, respectivamente.

A coluna “EME” nas tabelas 1 e 3 corresponde à capacidade de carregamento do elemento em condições de emergência para fins de monitoração de fluxo, em MVA.

Já a coluna “Taps”, na tabela 1, corresponde ao valor do tap referido à barra definida para os transformadores de tap fixo, ou uma estimativa deste valor para os transformadores com variação automática de tap. Nas simulações realizadas, apenas o transformador localizado entre as barras 5-6 possui variação automática de tap, com seu tap mínimo fixado em 0,9 e o máximo em 1,1.

Tabela 1: Dados dos transformadores

Linhas	Reatância (%)	Taps	EME
4--7	20,91	0,978	100
4--9	55,62	0,969	100
5--6	25,2	0,9	200

Fonte: Autoria própria

Tabela 2: Dados dos motores de indução

Barra conectada	Fator de carregamento	Unidades	Resistência do estator	Reatância do estator	Reatância de magnetização	Resistência do rotor	Reatância do rotor	Potência base
4	10	40	0,7	10	320	1	9	500
4	20	50	0,6	8	320	1	8	600
5	10	40	0,6	9	320	1	7	800
5	20	40	0,6	9	320	1	7	800

Fonte: Autoria própria

Tabela 3: Dados das linhas de transmissão

Linhas	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (Mvar)	EME (MVA)
1--2	1,94	5,92	5,28	100
1--5	5,4	22,4	4,92	100
2--3	4,7	19,8	4,38	100
2--4	5,81	17,63	3,75	100
2--5	5,69	17,39	3,4	100
3--4	6,7	17,1	3,46	100
4--5	1,34	4,21	1,28	100
6--11	9,5	19,89	-	50
6--12	12,29	25,58	-	50
6--13	6,61	13,03	-	50
7--8	-	17,62	-	30
7--9	-	11	-	100
9--10	3,18	8,45	-	50
9--14	12,71	27,04	-	50
10--11	8,2	19,21	-	50
12--13	22,09	19,99	-	50
13--14	17,09	34,8	-	50

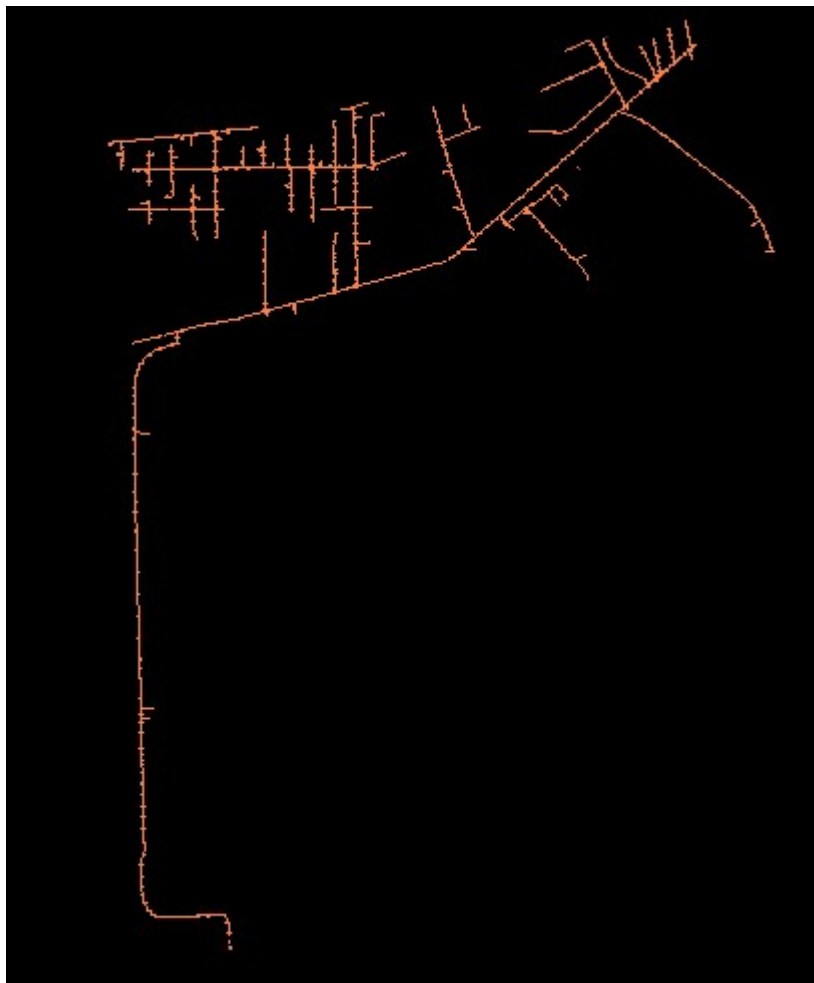
Fonte: Autoria própria

3.5. REPRESENTAÇÃO DE UM ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO REAL

Como forma de simular um sistema de distribuição no Anarede, foi adicionado à barra 4 de 138 kV do sistema IEEE-14 barras um alimentador de 13,8 kV, que simula os representa os parâmetros de um alimentador de distribuição real.

Uma representação do alimentador no *software* Sicoten, utilizado para solucionar o fluxo de potência, e de extrema importância para análise de conexão de unidades geradoras ao sistema de distribuição, é apresentado na figura 10.

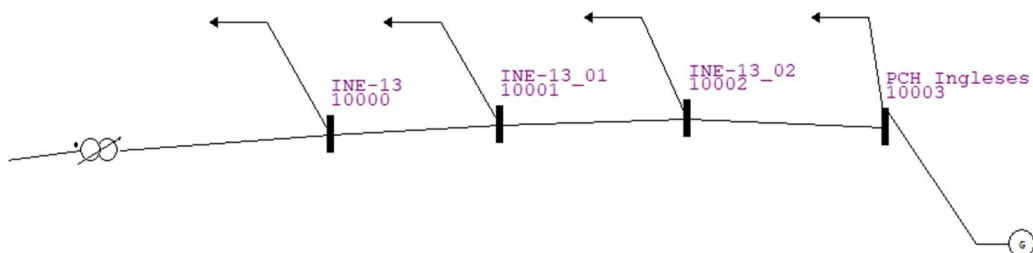
Figura 10: Representação do alimentador de distribuição



Fonte: Autoria própria.

A partir do alimentador acima, foi realizado um circuito equivalente no Anarede, com seus nós e cargas concentradas para simplificação do problema, apresentado na figura 10. Os nomes das barras correspondem à nomes fictícios, criados com intuito apenas de identificação, assim como o nome do gerador informado, que seria uma indicação da localização do alimentador real.

Figura 11: Representação Simplificada do alimentador real



Fonte: Autoria própria

Cada barra tem uma carga correspondente, e a impedância das linhas é calculada conforme sua distância e o condutor correspondente. No caso deste alimentador, é usado o cabo 336.4 CA por todo o ramo central. Este cabo nu é empregado como condutor em redes aéreas de distribuição ou transmissão de energia, e é formado por uma ou mais coroas de fios de alumínio, em torno de um fio central de alumínio, conforme Especificação Técnica E-313.0018, da Celesc Distribuição S.A.

Nas tabelas 4, 5 e 6 são apresentados os dados das barras, das linhas de distribuição e do transformador 138/13,8 kV inseridos. A barra 10000 simula a carga de outros alimentadores conectados ao mesmo transformador na subestação.

As resistências (%) e reatâncias (%) das linhas foram calculadas primeiramente em unidades físicas, com as informações de impedância do condutor e distância. Em seguida, com o conhecimento dos valores de base de tensão (13800 V) e potência (100 MVA), foi obtido o valor em pu. Como o Anarede utiliza o valor em porcentagem de pu, basta dividir o valor por 100, e encontra-se o valor a ser implementado no *software*.

Tabela 4: Dados das barras do alimentador real

Barras	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)
10000	8	2,8
10001	3,2	1
10002	0,7	0,1
10003	1,6	0,4
TOTAL	13,5	4,3

Fonte: Autoria própria

Tabela 5: Dados das linhas de distribuição ($Z_{base}=1,9044$ ohm)

Linha	Impedância (ohm/km)	Distância (km)	Resistência (%)	Reatância (%)
10000-10001	$0,187 + j0,403$	3,3	32,4	69,8
10001-10002	$0,187 + j0,403$	0,5	4,9	10,6
10002-10003	$0,187 + j0,403$	0,7	6,9	14,8

Fonte: Autoria própria

Tabela 6: Dados do transformador

Linha	Resistência (%)	Reatância (%)	Taps	CAP (MVA)	EME (MVA)
4-10000	1,33	38,78	1	40	48

Fonte: Autoria própria

3.6. GERADORES CONECTADOS AO SISTEMA

Para o sistema IEEE-14 barras modificado, foi inserido um gerador à barra 10003 para simulação das contingências necessárias para análise da proteção “Salto de Vetor”. Pela simplicidade de implantação no *software* Anatem, foram escolhidos dois geradores síncronos, que representam geradores conectados à rede, com potência base diferentes, um com 1 MW e outro com 5 MW, cada um com seus diferentes parâmetros. A potência de 1 MW foi escolhida pois é a potência limite descrita na norma de referência CELESC (2014) para conexão de micro e minigeração no sistema elétrico onde não é necessária a apresentação de estudo de proteção anti-ilhamento. Já a potência de 5 MW é a potência limite para conexão na modalidade de GD, não sendo permitida a conexão de usinas com maior potência no sistema de distribuição.

Além disso, para comparação do comportamento diante de perturbações, foram considerados diferentes cenários de carga, com situações de carga média, leve e pesada no sistema de distribuição, que serão apresentadas no capítulo seguinte.

3.6.1. Parâmetros dos geradores

Conforme descrito no item 3.3.3, é necessário a definição do modelo do gerador, dos controladores de tensão e velocidade utilizados e da curva de saturação, através de diversos comandos de execução no Anatem. Os geradores são modelos de máquina síncrona de polos salientes com um enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores, sendo um no eixo direto e um no eixo em quadratura, já que são usinas hidrelétricas. Logo, utilizam o código de execução DMDG MD02. Nas tabelas 7 e 8 são representados os parâmetros dos dois geradores:

Tabela 7: Parâmetros do Gerador 1 MW

Número	Curva de saturação	Indutância síncrona de eixo direto (%)	Indutância síncrona de eixo em quadratura (%)	Indutância transitória de eixo direto (%)	Indutância subtransitória de eixo direto (%)
9001	9001	212	208	51	29
Indutância de dispersão da armadura (%)	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto (segundos)	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto (segundos)	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto (segundos)	Constante de inércia (segundos)	Potência aparente nominal da máquina (MVA)
13,51	0,802	0,015	0,089	0,287	1,55

Fonte: Autoria própria

Tabela 8: Parâmetros do Gerador 5 MW

Número	Curva de saturação	Indutância síncrona de eixo direto (%)	Indutância síncrona de eixo em quadratura (%)	Indutância transitória de eixo direto (%)	Indutância subtransitória de eixo direto (%)
1016	1016	106,1	69,5	31	20,4
Indutância de dispersão da armadura (%)	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto (segundos)	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto (segundos)	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto (segundos)	Constante de inércia (segundos)	Potência aparente nominal da máquina (MVA)
9,94	3,63	0,062	0,089	2,25	6,143

Fonte: Autoria própria

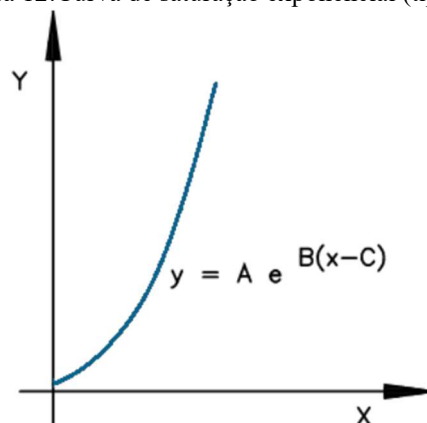
A curva de saturação escolhida corresponde a uma curva exponencial, com os valores para a equação apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros das curvas de saturação dos modelos de gerador

Número	Tipo	Valor de A	Valor de B	Valor de C
1016	2	0,0311	6,312	0,8
9001	2	0,0214	7,7022	0,9

Fonte: Autoria própria

Figura 12: Curva de saturação exponencial (tipo 2)



Fonte: Manual Anatem, versão 12.0

Por último foram definidos os parâmetros dos controladores de velocidade e de tensão. Como a proteção “Salto de Vetor” atua no momento da contingência, no tempo de resposta inercial do sistema, os controladores não são tão importantes para esta análise. Logo, foram usados modelos já informados no código de execução, usados nos geradores do sistema IEEE-14 barras. Os modelos selecionados para regulador de tensão e sistema de excitação e o para regulador de velocidade e turbina da máquina síncrona, são ambos modelos predefinidos, que podem ser encontrados no Manual do Anatem.

Figura 13: Parâmetros do regulador de tensão e sistema de excitação

```
(..... Modelo 102
(No)   (CS) (Ka) (Ke) (Kf) (Tm) (Ta) (Te) (Tf) (Lmn) (Lmx) LS
0102   32  408. 1.00.1046  0.0  0.0  1.00  3.17  -1.1  8.05EI
```

Fonte: Autoria própria

Figura 14: Parâmetros do regulador de velocidade e turbina da máquina síncrona

```
(No)   ( R ) (Rp) (At) (Qnl) (Tw) (Tr) (Tf) (Tg) (Lmn) (Lmx) (Dtb) ( D ) (Pbg) (Pbt)
0101   0.05 0.381.200 0.15  1.5  7.0  0.05  0.5  0.0 .984  0.5  1.0  1.0  1.0
```

Fonte: Autoria própria

4. RESULTADOS

Esse capítulo tem como objetivo o detalhamento dos cenários de carga utilizados para as simulações de contingência, apresentando também o fluxo de potência convergido do sistema de distribuição, para cada cenário e geração correspondente. Além disso, são demonstrados e explicados os eventos simulados.

São então definidos os ajustes corretos da proteção “Salto de Vetor” para atuação nas contingências de casos de ilha. Em seguida, com auxílio de um programa desenvolvido em Visual Basic no Excel para emular o relé de proteção, são então obtidos os valores do deslocamento de fase nas contingências, identificando a atuação ou não da proteção na geração distribuída.

4.1. CENÁRIOS DE CARGA

Foram delimitados três cenários de carga, considerando valores nominais do sistema, e valores de carga leve e pesada. Os cenários são apresentados nas tabelas 10, 11, 12 e 13, com as potências ativa e reativa de cada barra para cada cenário. Como a barra 10000 simula a carga de outros alimentadores conectados ao mesmo transformador na subestação, seu valor é fixado em 8 MW de carga ativa e 2,8 MVA de carga reativa.

Tabela 10 Cenário de Carga Leve

Barra	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
10001	1,7	1
10002	0,7	0,1
10003	1,6	0,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 11: Cenário de Carga Nominal (média)

Barra	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
10001	3,2	1
10002	0,7	0,1
10003	1,6	0,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 12: Cenário de Carga Pesada

Barra	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
10001	4,2	1
10002	0,7	0,1
10003	2,1	0,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 13: Cenário de Carga=Geração

Barra	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
10001	3,2	1
10002	0,7	0,1
10003	1	0,4

Fonte: Autoria própria

Os valores escolhidos de carga, na tabela 13, levaram em conta a possibilidade de equilíbrio entre potência ativa consumida e gerada na provável ilha formada, o que poderia levar a uma não detecção do ilhamento. Esse cenário de carga foi utilizado apenas para o gerador síncrono de 1 MW.

Para o gerador de 5 MW, não foi necessária a criação de mais um cenário visando um equilíbrio entre potência ativa consumida e gerada, já que o cenário de carga média já mencionado, tabela 11, possui essa característica.

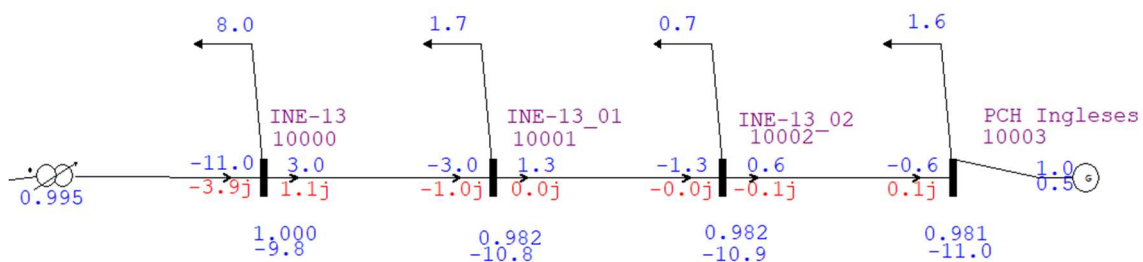
4.2. FLUXO DE POTÊNCIA CONVERGIDO

Com conhecimento das cargas das barras, foi solucionado o fluxo de potência no Anarede para cada cenário, através do método de Newton, conforme mencionado no tópico 3.1.

4.2.1. Gerador 1 MW

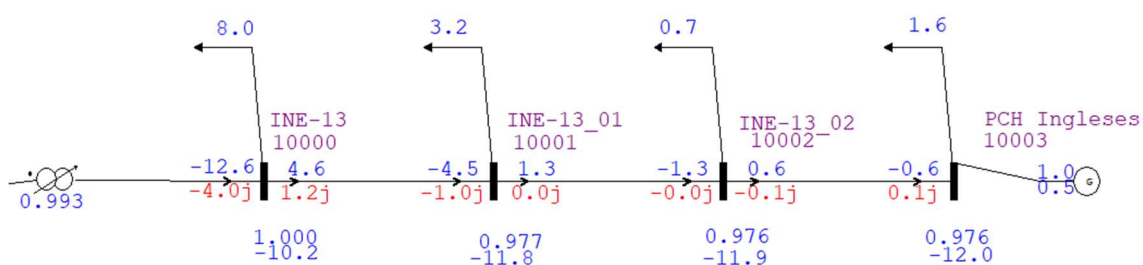
Nas figuras 15 a 18 são apresentados os estados operativos da rede elétrica, considerando o gerador de 1 MW, para cada condição de carga apresentada nas tabelas 10, 11, 12 e 13.

Figura 15: Fluxo de potência convergido para carga leve (gerador 1 MW)



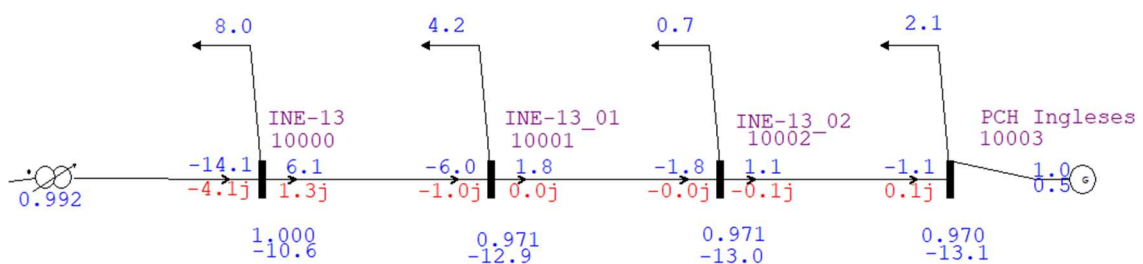
Fonte: Autoria própria

Figura 16: Fluxo de potência convergido para carga média (gerador 1 MW)



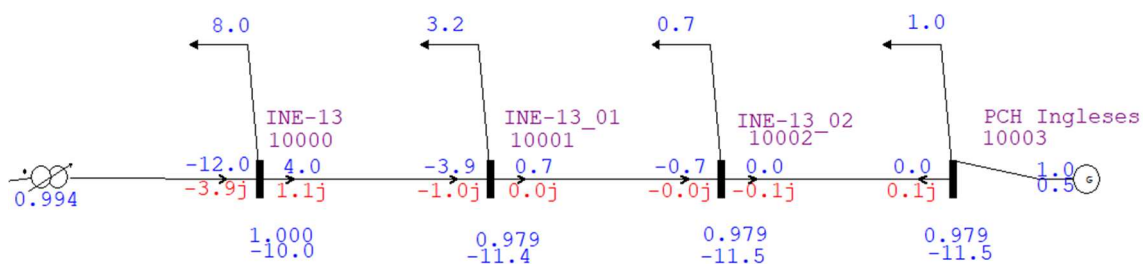
Fonte: Autoria própria

Figura 17: Fluxo de potência convergido para carga pesada (gerador 1 MW)



Fonte: Autoria própria

Figura 18: Fluxo de potência convergido para carga igual geração (gerador 1 MW)



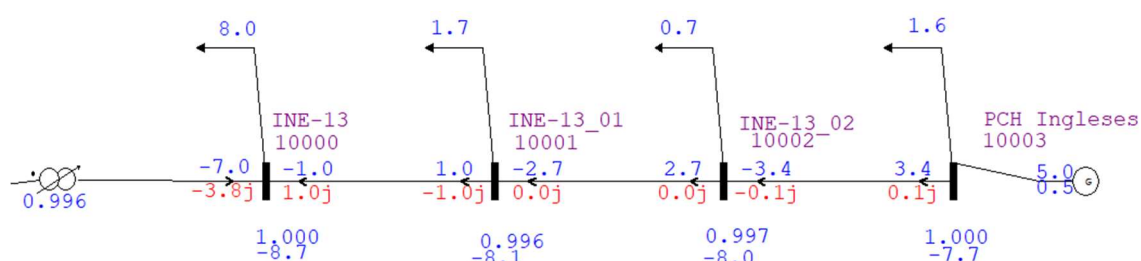
Fonte: Autoria própria

É possível notar que a PCH Ingleses, de 1 MW, fornece energia apenas para a carga da barra 10003, com as outras barras de distribuição necessitando energia do sistema de transmissão, através dos geradores de maior potência, apresentados na figura 8.

4.2.2. Gerador 5 MW

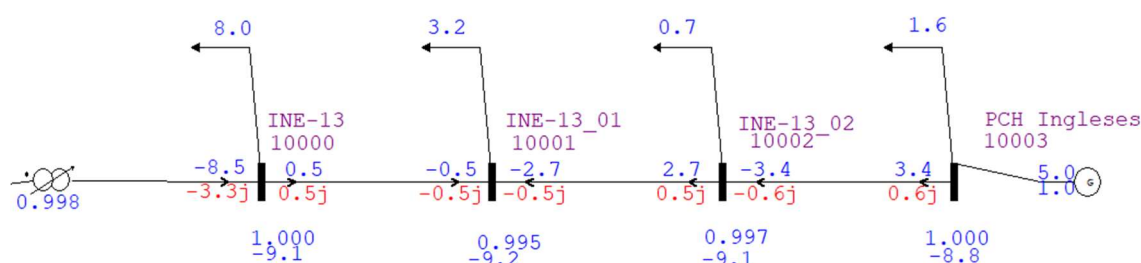
Nas figuras 19 a 21 a seguir são apresentados os estados operativos da rede elétrica, considerando o gerador de 5 MW, para cada condição de carga apresentada nas tabelas 10, 11 e 12.

Figura 19: Fluxo de potência convergido para carga leve (gerador 5 MW)



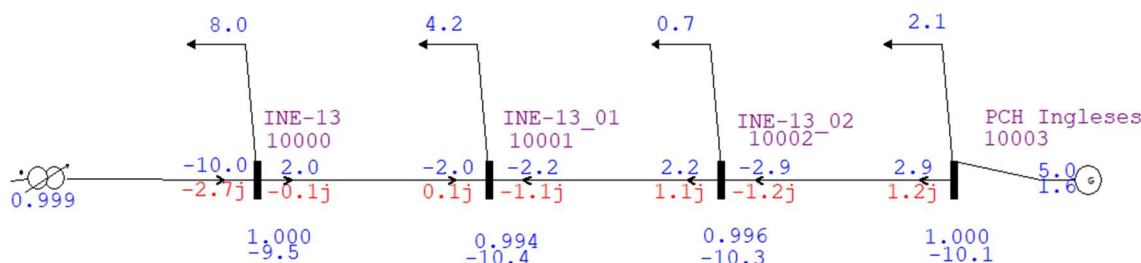
Fonte: Autoria própria

Figura 20: Fluxo de potência convergido para carga média (gerador 5 MW)



Fonte: Autoria própria

Figura 21: Fluxo de potência convergido para carga pesada (gerador 5 MW)



Fonte: Autoria própria

Com o gerador de 5 MW, é notável o fornecimento de energia às barras 10001 a 10003 em todos os casos.

4.3. EVENTOS SIMULADOS

Através do *software* Anatem, foram realizadas diferentes simulações para cada cenário de carga dos geradores. As simulações são definidas através do código de execução DEVT, com aplicação pontual dos eventos no sistema. Foram analisadas as seguintes contingências:

- Contingência 1 – Curto-circuito monofásico na barra 10000 e abertura total da linha 10000-10001, com intuito de ilhar a geração;
- Contingência 2 – Curto-circuito monofásico na barra 10002 e abertura total da linha 10002-10003 (realizado apenas para o gerador 1 MW).
- Contingência 3 – Curto-circuito monofásico na barra 10 de 66 kV e abertura total da linha 10-11;
- Contingência 4 – Curto-circuito trifásico na barra 11 de 66 kV e abertura total da linha 6-11;
- Contingência 5 – Curto-circuito monofásico na barra 5 de 138 kV e abertura total da linha 1-5;
- Contingência 6 – Aumento repentino em 20% da carga ativa da barra 4;
- Contingência 7 – Retirada repentina de toda a carga ativa da barra 10000;

4.4. DEFINIÇÃO DOS AJUSTES DE PROTEÇÃO

4.4.1. Gerador 1 MW

Através das contingências 1 e 2 apresentadas são então realizadas simulações no *software* Anatem para identificação do correto ajuste para a função de “Salto de Vetor”.

A contingência 1 corresponde à um curto-circuito monofásico na barra 10000 em 0,3 segundos, com retirada do curto-circuito e abertura total da linha 10000-10001 após 200 milissegundos com atuação. Essa contingência tem o intuito de promover o ilhamento intencional da geração, para que seja possível encontrar o ajuste correto da proteção 78. São realizadas então três simulações considerando esta situação, alterando os cenários de carga, conforme tabelas 10,

11 e 12. No Anatem, o código utilizado para execução dos eventos, que são os pontos centrais na simulação de transitórios eletromecânicos, é o DEVT. Este código tem seu preenchimento dependente do tipo de evento a ser aplicado. A contingência 1 é apresentada na figura 22.

Figura 22: Código de execução do Anatem para Contingência 1

```

DEVT
(Tp) ( Tempo)( E1 )( Pa)†
APCC  0.300 10000
RMCB  0.500 10000
ABCI  0.500 1000010001

```

Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado, para simulação de curto-circuito monofásico no Anatem, é utilizado o código APCC com valor *default* 0,65 pu, que corresponde ao afundamento da tensão na barra CA. Este evento simula de maneira aproximada o comportamento esperado de um curto-circuito fase-terra, calculando-se a impedância de falta necessária para levar ao afundamento de tensão desejado, não requerendo a informação de impedância de curto-circuito (CEPEL, 2021). O evento permanece ativo enquanto não for eliminado por meio do evento de remoção de curto-circuito, código RMCB, que acontece juntamente com a abertura total de circuito CA, código ABCI.

Já a contingência 2, foi idealizada com intuito de obter o equilíbrio entre potência ativa gerada e consumida, o que poderia levar a uma não detecção do ilhamento. Para isso, foi realizado um curto-circuito monofásico na barra 10002, em 0,3 segundos, com retirada do curto-circuito e abertura total da linha 10002-10003 após 200 milissegundos de atuação. Com isso, a geração de 1 MW localizada na barra 10003 fica ilhada à carga, também de 1 MW. Na figura 23 é apresentada a situação 2. Esta contingência é simulada em apenas um cenário de carga, apresentado na tabela 13, tópico 4.1.

Figura 23: Código de execução do Anatem para contingência 2

```

DEVT
(Tp) ( Tempo)( E1 )( Pa)†
APCC  0.300 10002
RMCB  0.500 10002
ABCI  0.500 1000210003

```

Fonte: Autoria própria

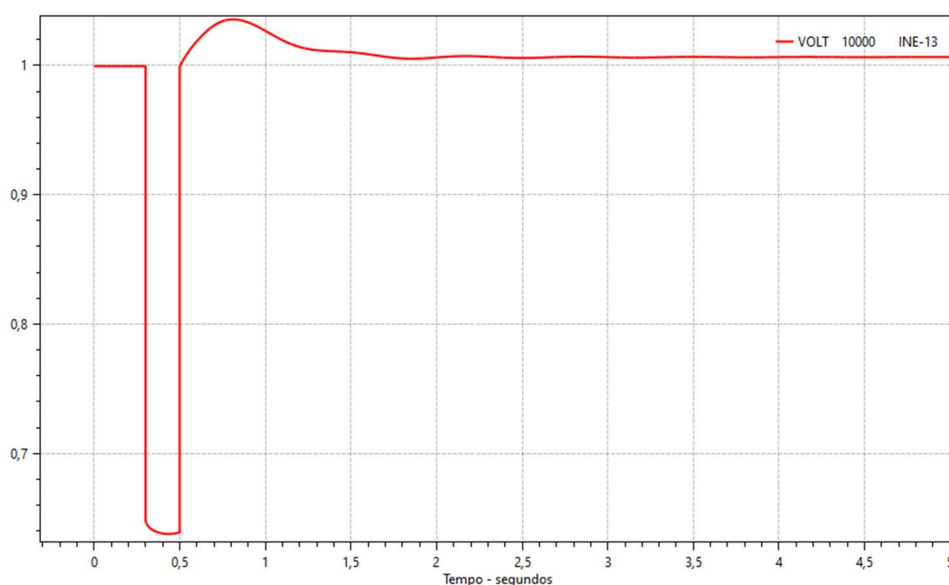
A identificação do correto ajuste para a função de deslocamento de fase é realizada através de programação em *Visual Basic for Application* no Excel. O VBA é uma ferramenta que permite a criação e automatização de diversos processos dentro das planilhas do Excel.

Esta primeira ferramenta computacional utilizada não emula o relé de proteção, calculando a diferença angular $\Delta\theta$ através das seguintes etapas:

- O arquivo de plotagem (PLT) da saída do Anatem correspondente ao ângulo da tensão na barra do gerador é importado para o Excel;
- A cada passo de integração de 1 ms é calculada a diferença angular $\Delta\theta = \theta_i - \theta_r$, onde θ_i é o valor do ângulo no momento “i” do tempo e θ_r é o valor do ângulo de referência;
- A cada 8 ms (meio ciclo de onda de tensão), o θ_r é atualizado sendo adotado como referência.

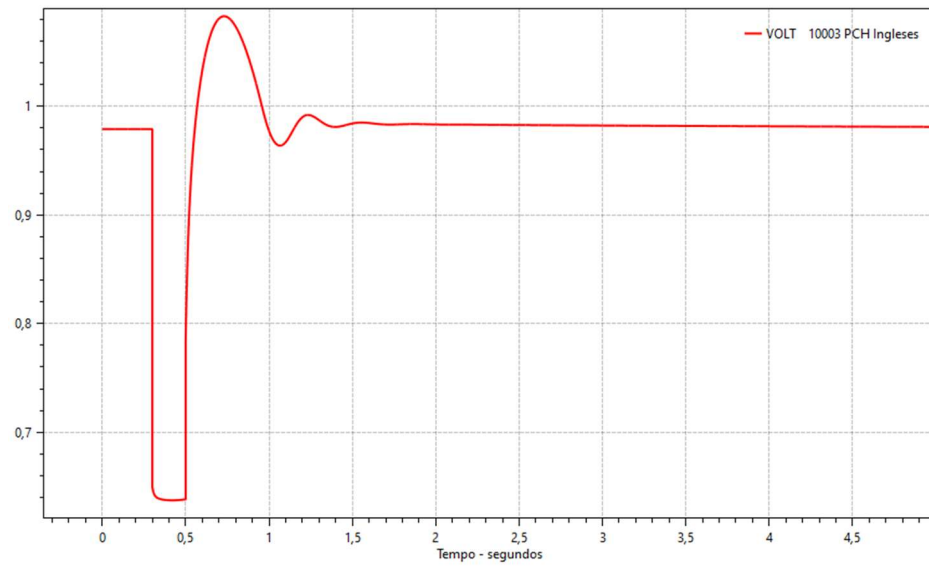
Com a definição da ferramenta auxiliar a ser utilizada, foram então realizadas as simulações. Os gráficos do ângulo da tensão na barra do gerador obtidos através do PlotCepel são exibidos nas figuras 24 a 29 abaixo, juntamente com os gráficos da tensão nas barras 10000 e 10003, mostrando o afundamento da tensão no instante 0,3 segundos.

Figura 24: Tensão na barra 10000; Contingência 1.



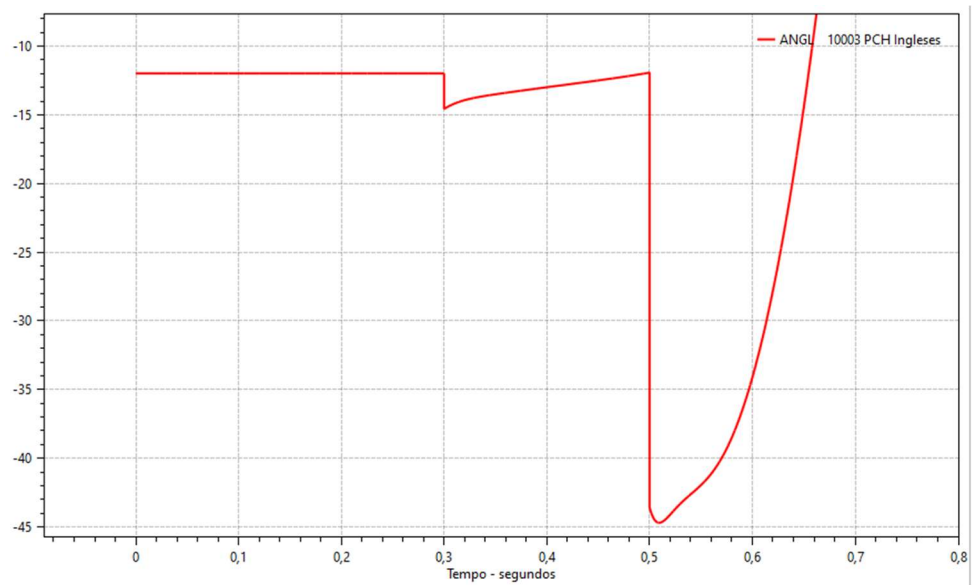
Fonte: Autoria própria

Figura 25: Tensão na barra 10003; Contingência 2.



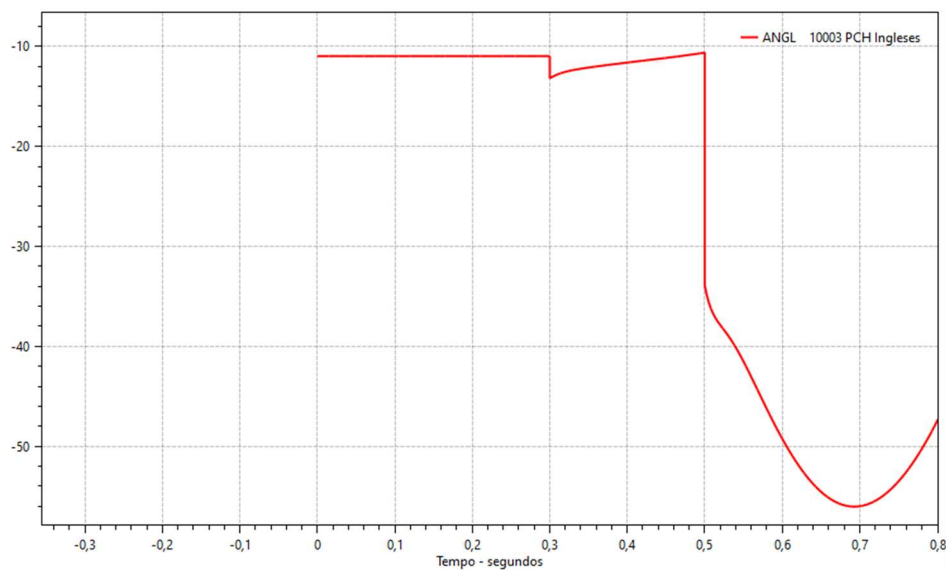
Fonte: Autoria própria

Figura 26: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga média; Gerador 1 MW (déficit de 4,5 MW)



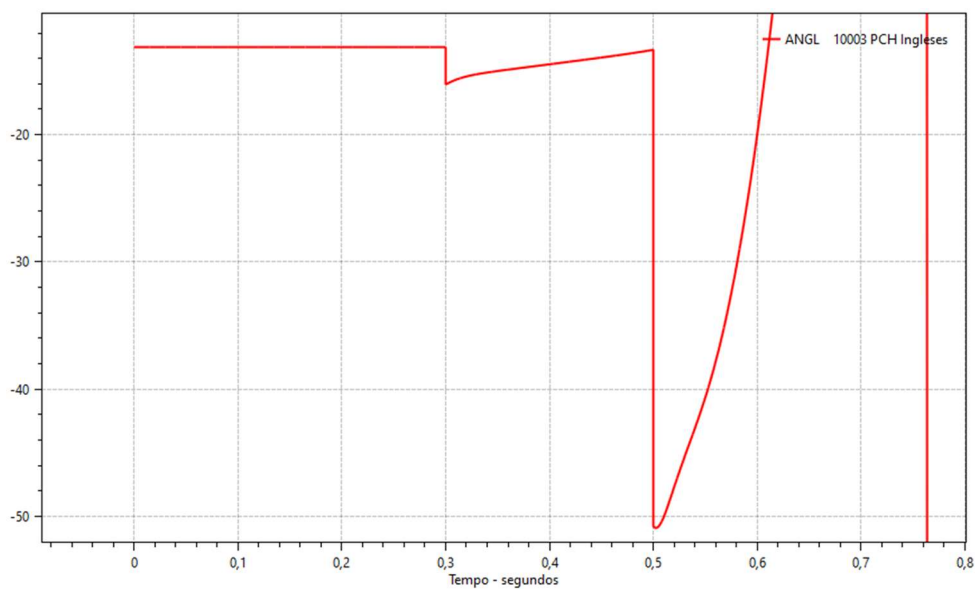
Fonte: Autoria própria.

Figura 27: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga leve; Gerador 1 MW (déficit de 3 MW).



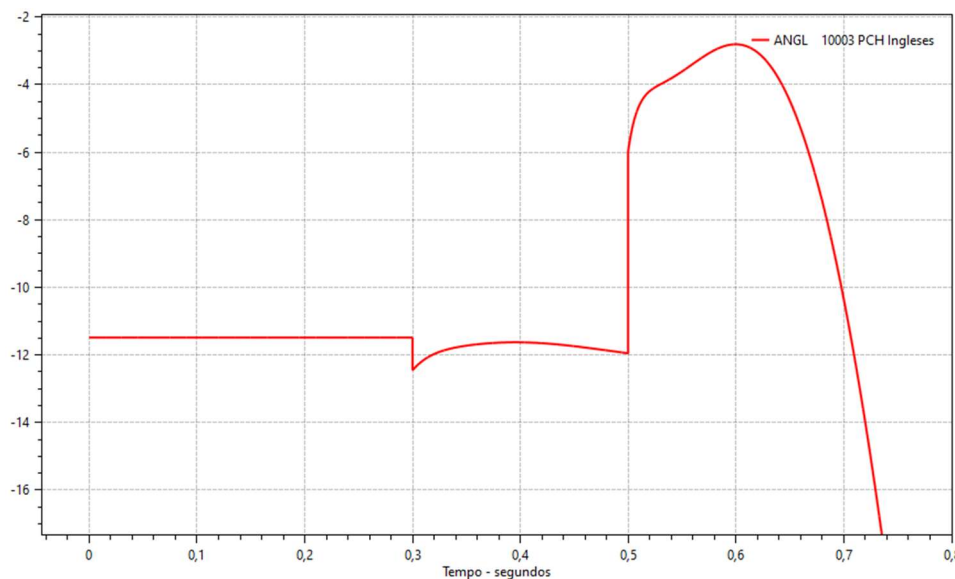
Fonte: Autoria própria.

Figura 28: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW (déficit de 6 MW).



Fonte: Autoria própria

Figura 29: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 2; Cenário de carga igual geração; Gerador 1 MW.



Fonte: Autoria própria

Através das figuras, é possível notar a diferença angular obtida no instante do curto-circuito monofásico, e também no instante de desconexão do circuito CA 10000-10001, nas figuras 26, 27 e 28, e do circuito CA 10002-10003 na figura 29. Utilizando a ferramenta computacional auxiliar, é possível calcular este salto do ângulo de tensão, apresentando os seguintes resultados:

Tabela 14: Valores de variação do ângulo da tensão na barra para Contingências 1 e 2 (Gerador 1 MW)

Evento	Cenário de Carga	Salto vetorial aproximado
Contingência 1	Média	31,66
Contingência 1	Leve	23,69
Contingência 1	Pesada	37,45
Contingência 2	Carga igual geração	5,97

Fonte: Autoria própria

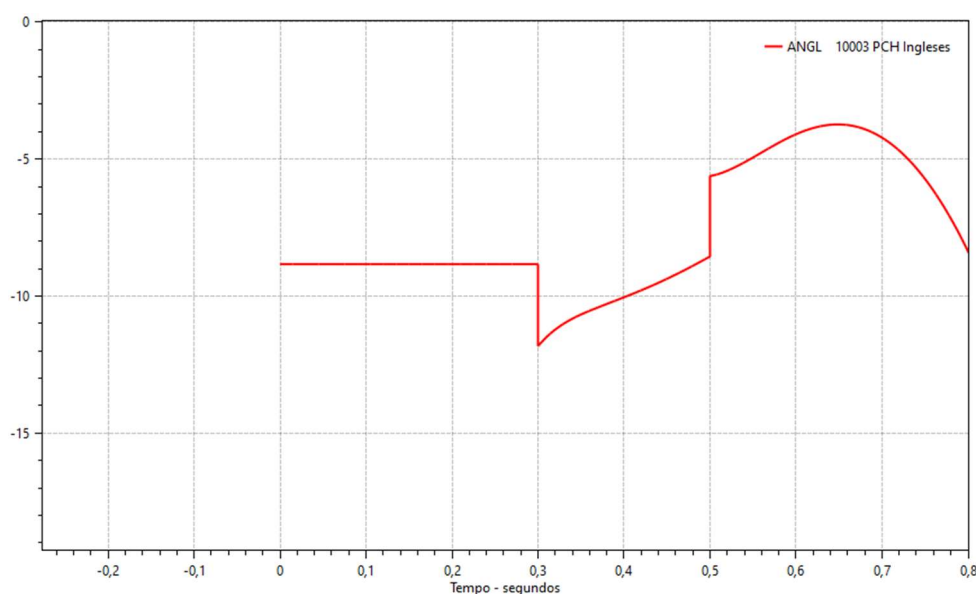
Logo, o ajuste da função de proteção 78 deve ser o menor valor entre os encontrados, para que a proteção atue em todas as ocasiões de ilhamento, mantendo a confiabilidade do sistema. Como os relés comerciais permitem ajustes com até uma casa decimal, foi escolhido o valor de 5,8° como ajuste para o gerador de 1 MW.

4.4.2. Gerador 5 MW

Para o gerador de 5 MW, foi utilizada apenas a contingência 1 para identificação do ajuste correto da proteção. As simulações para os cenários de carga leve, média e pesada foram realizadas conforme figura 22.

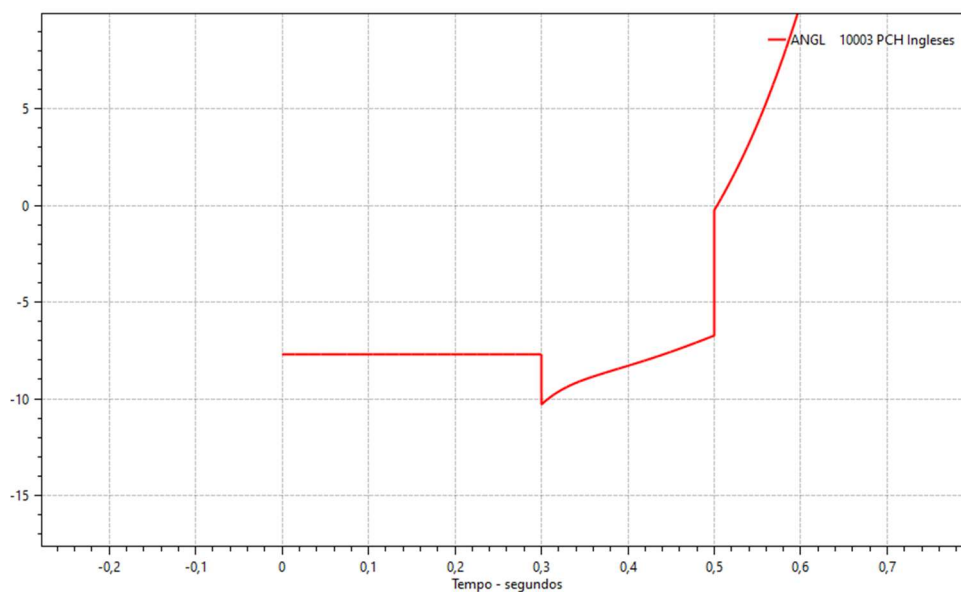
De forma equivalente ao demonstrado para o gerador de 1 MW, utilizando da ferramenta computacional auxiliar, os ângulos da tensão na barra do gerador foram obtidos e são apresentados nas figuras a seguir.

Figura 30: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga média; Gerador 5 MW (déficit de 0,5 MW).



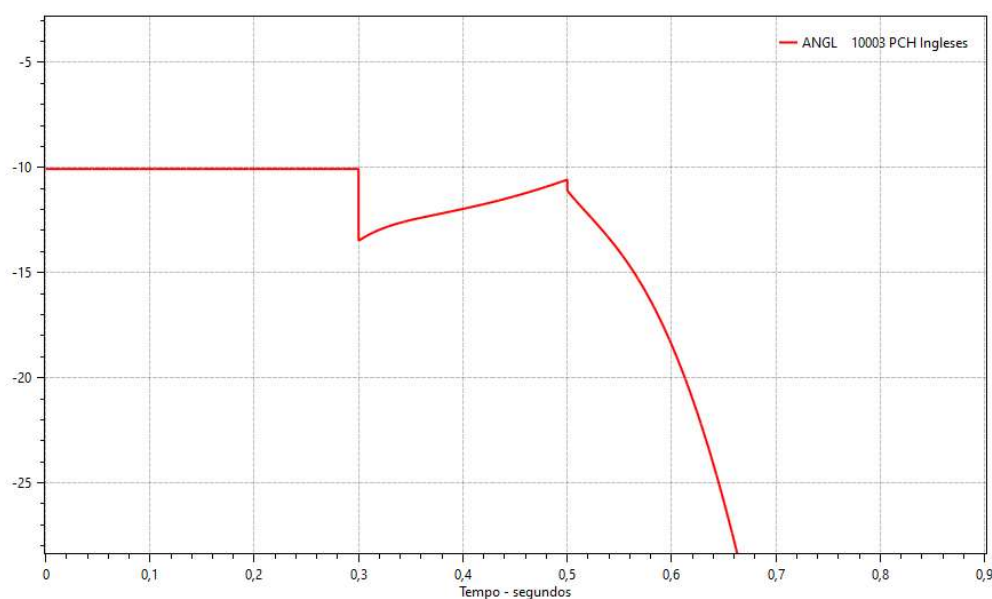
Fonte: Autoria própria

Figura 31: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW (excedente de 1 MW).



Fonte: Autoria própria

Figura 32: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 1; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW (déficit de 2 MW).



Fonte: Autoria própria

Com auxílio da ferramenta computacional auxiliar, foram calculados os deslocamentos de fase para cada cenário, apresentando os seguintes resultados:

Tabela 15: Valores de variação do ângulo da tensão na barra para Contingência 1
(Gerador 5 MW)

Evento	Cenário de Carga	Salto vetorial aproximado
Situação 1	Média	2,93
Situação 1	Leve	6,47
Situação 1	Pesada	3,40

Fonte: Autoria própria

Logo, para a correta atuação da função de proteção 78 é escolhido o menor valor entre os encontrados nas simulações. O ajuste é definido em 2, 8°.

4.5. EMULAÇÃO DO RELÉ DE PROTEÇÃO

Com conhecimento da estimação da função de proteção “Salto de Vetor” realizada pelos diferentes relés encontrados no mercado, descrita no capítulo 2, foi criada uma ferramenta computacional auxiliar através do VBA no Excel, que permite emular o funcionamento do relé.

Para isso, a ferramenta computacional utiliza características dos diferentes relés, tais como tempo de atuação da proteção do relé SEL-751 e referência fixa de ângulo, do relé Woodward MRG3. As seguintes etapas descrevem o funcionamento do relé:

- O arquivo de plotagem (PLT) da saída do Anatem correspondente ao ângulo da tensão na barra do gerador é importado para o Excel;
- A cada passo de integração de 1 ms é calculada a diferença angular $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_r$, onde θ_i é o valor do ângulo no momento “i” do tempo e θ_r é o valor do ângulo de referência;
- A cada 8 ms (meio ciclo de onda de tensão), o θ_r é atualizado sendo adotado como referência;
- Caso o $\Delta\theta_i$ seja superior ao valor de ajuste pré-estabelecido, o valor do ângulo de referência é mantido sem atualizações, por 48 ms (três ciclos de onda);
- Se o valor de $\Delta\theta_i$ continuar superior ao ajuste após este tempo, é considerado que o relé atuou, sendo guardado este valor.

4.6. AVALIAÇÃO DA ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO

Com conhecimento do funcionamento do relé, são realizadas as simulações referentes as contingências 3 a 7 para os diferentes geradores. Os resultados do valor do “Salto de Vetor” após utilização do relé de proteção são apresentados nas tabelas referentes a cada contingência.

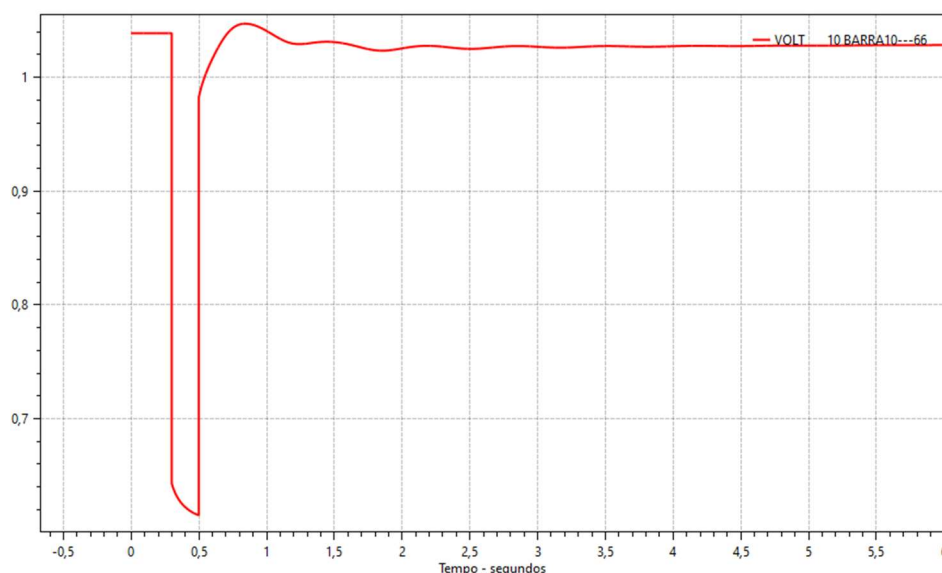
4.6.1. Gerador 1 MW

A partir do ajuste já encontrado de $5,8^\circ$ para a função de proteção 78, as contingências são descritas, e os gráficos de ângulo de tensão na barra do gerador apresentados para cada cenário.

4.6.1.1. Contingência 3

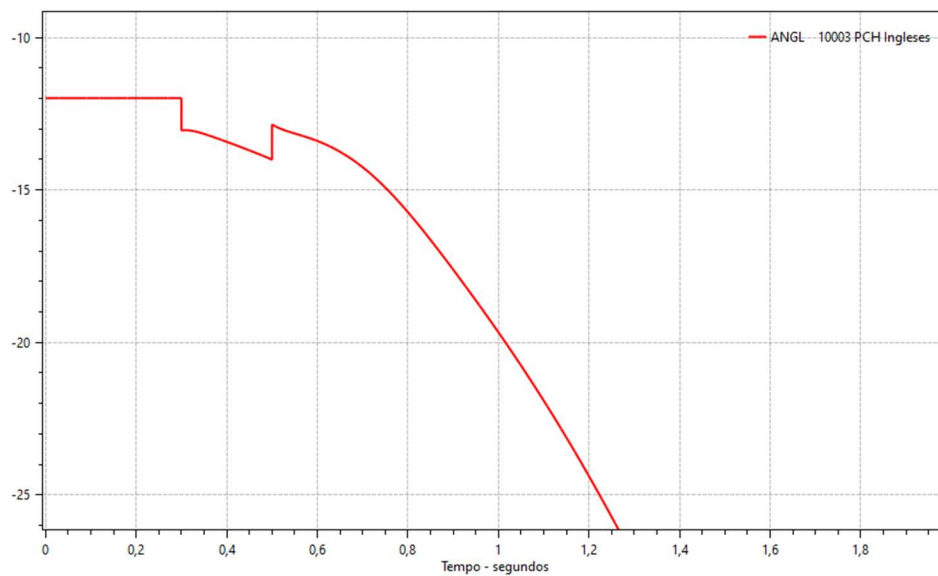
A contingência 3 corresponde à um curto-circuito monofásico na barra 10, de 66 kV, em 0,3 segundos, com retirada do curto-circuito e abertura total da linha 10-11 após 200 milissegundos de atuação. Os gráficos abaixo representam o afundamento de tensão na barra 10 e o ângulo da tensão na barra do gerador para cada cenário de carga. O deslocamento de fase obtido através da emulação do relé de proteção é apresentado na tabela 16.

Figura 33: Tensão na barra 10 – 66 kV.



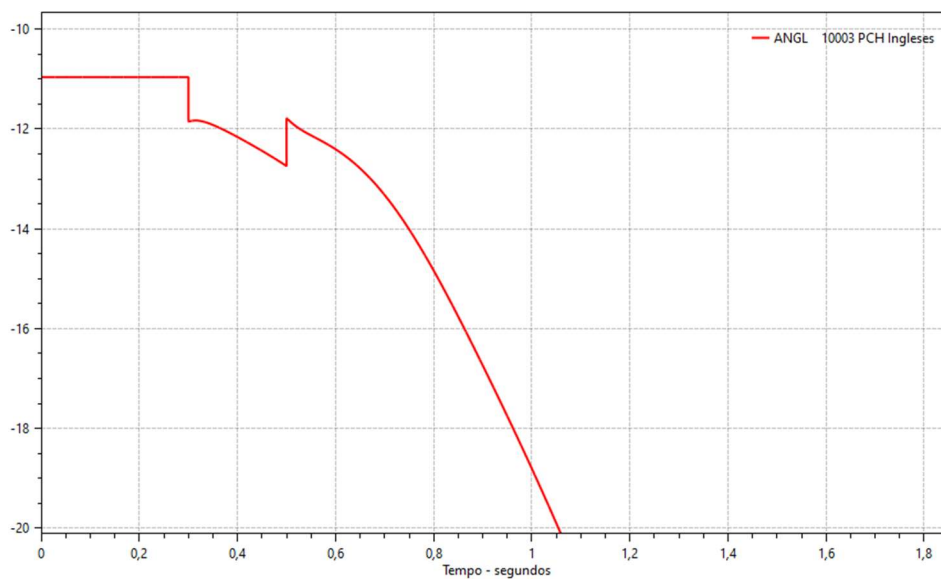
Fonte: Autoria própria

Figura 34: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga média;
Gerador 1 MW.



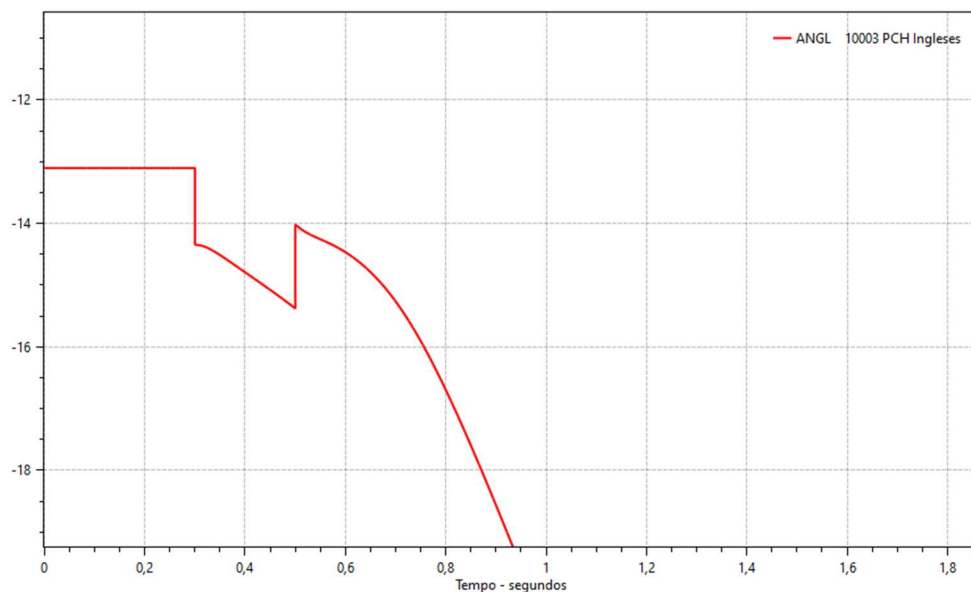
Fonte: Autoria própria

Figura 35: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga leve;
Gerador 1 MW.



Fonte: Autoria própria

Figura 36: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW.



Fonte: Autoria própria

Tabela 16: Deslocamento de fase para Contingência 3 - Gerador 1 MW

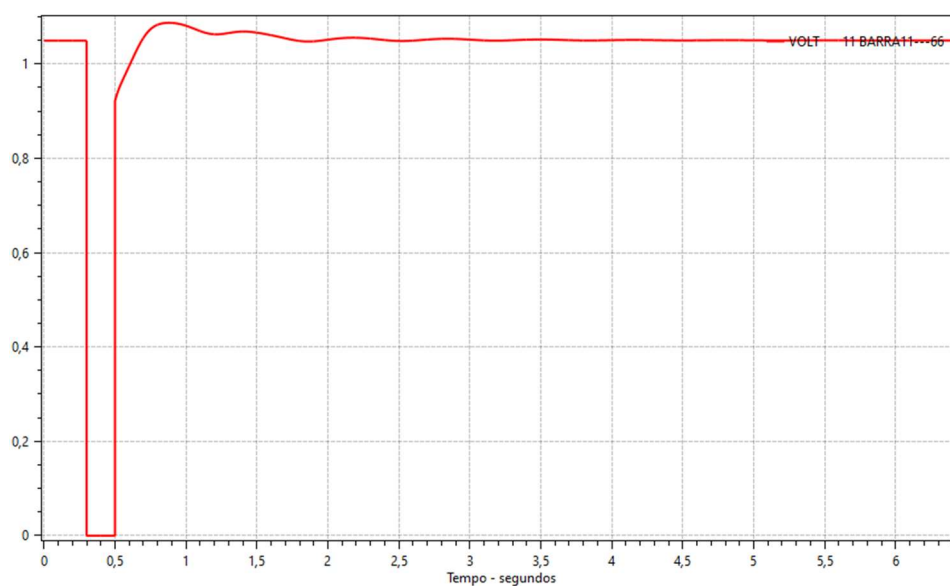
Situação	Cenário de Carga	Salto de vetor
3	Média	1,06
3	Leve	0,96
3	Pesada	1,24

Fonte: Autoria própria

4.6.1.2. Contingência 4

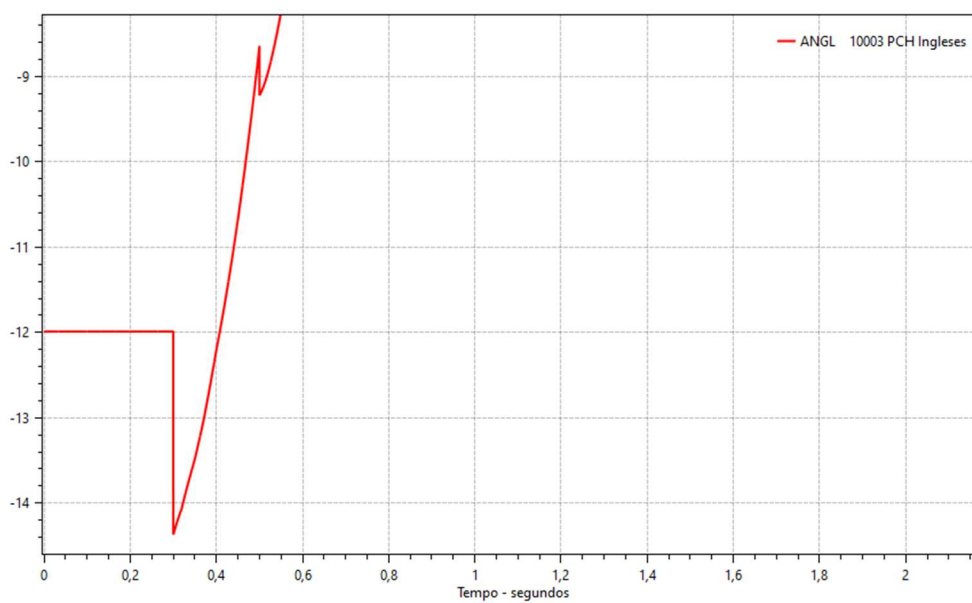
Na contingência 4 é simulado um curto-circuito trifásico na barra 11, de 66 kV, em 0,3 segundos, através do código APCB, com retirada do curto-circuito e abertura total da linha 6-11 após 200 milissegundos de atuação. Os gráficos abaixo representam a tensão na barra 11 e o ângulo da tensão na barra do gerador para cada cenário de carga. O deslocamento de fase obtido através da emulação do relé de proteção é apresentado na tabela 17.

Figura 37: Tensão na barra 11 – 66 kV.



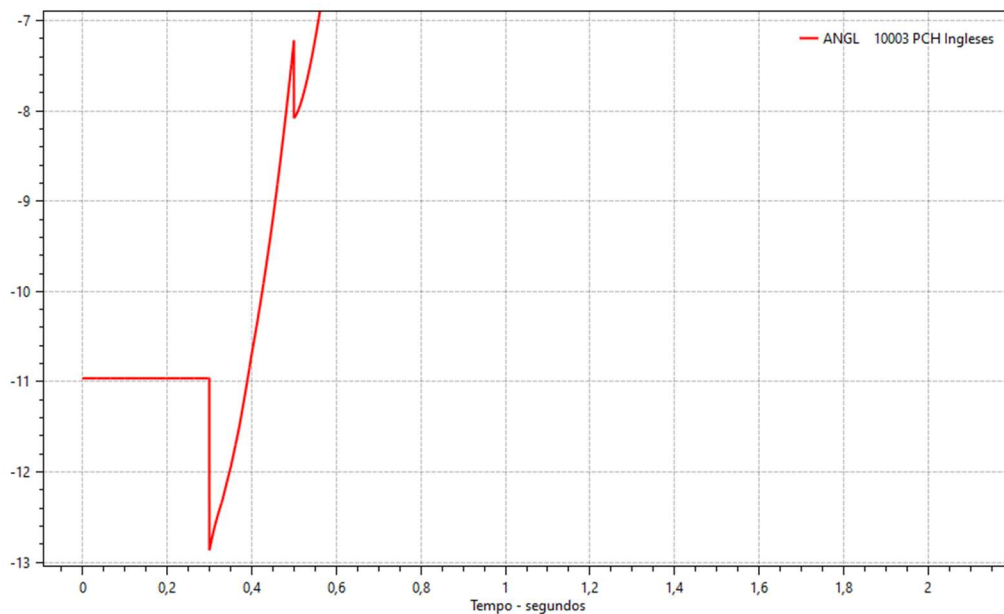
Fonte: Autoria própria

Figura 38: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga média; Gerador 1 MW.



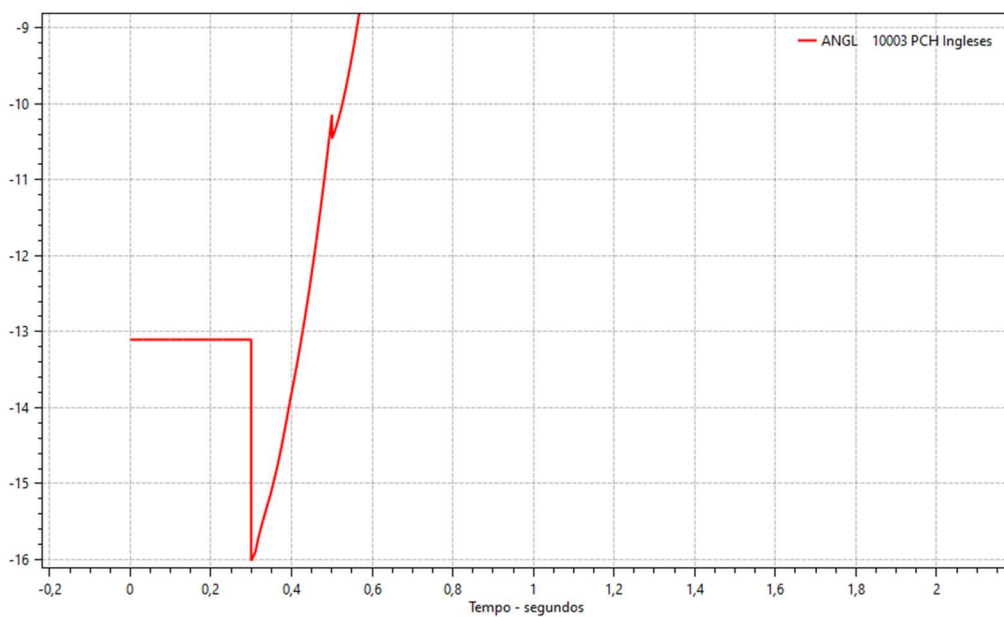
Fonte: Autoria própria

Figura 39: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga leve; Gerador 1 MW.



Fonte: Autoria própria.

Figura 40: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW.



Fonte: Autoria própria

Tabela 17: Deslocamento de fase para Contingência 4 - Gerador 1 MW

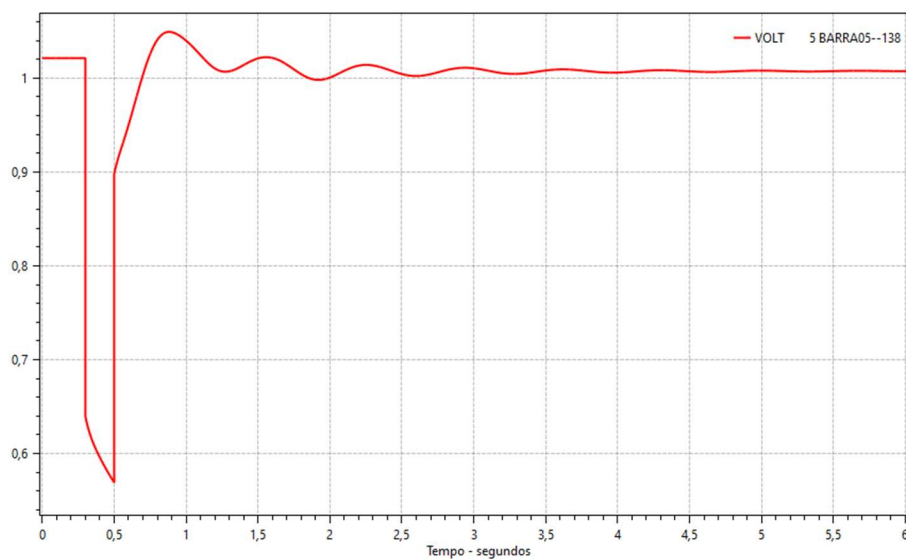
Situação	Cenário de Carga	Salto de vetor
4	Média	2,38
4	Leve	1,91
4	Pesada	2,91

Fonte: Autoria própria

4.6.1.3. Contingência 5

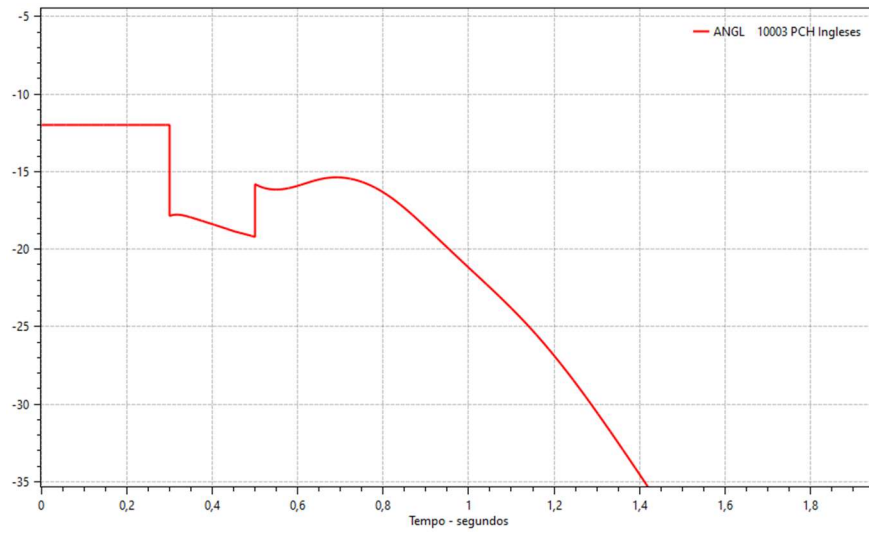
A contingência 5 corresponde à um curto-circuito monofásico na barra 5, de 138 kV, em 0,3 segundos, com retirada do curto-circuito e abertura total da linha 1-5 após 200 milissegundos de atuação. Os gráficos abaixo representam o afundamento de tensão na barra 5 e o ângulo da tensão na barra do gerador para cada cenário de carga. O deslocamento de fase obtido através da emulação do relé de proteção é apresentado na tabela 18.

Figura 41: Tensão na barra 5 – 138 kV.



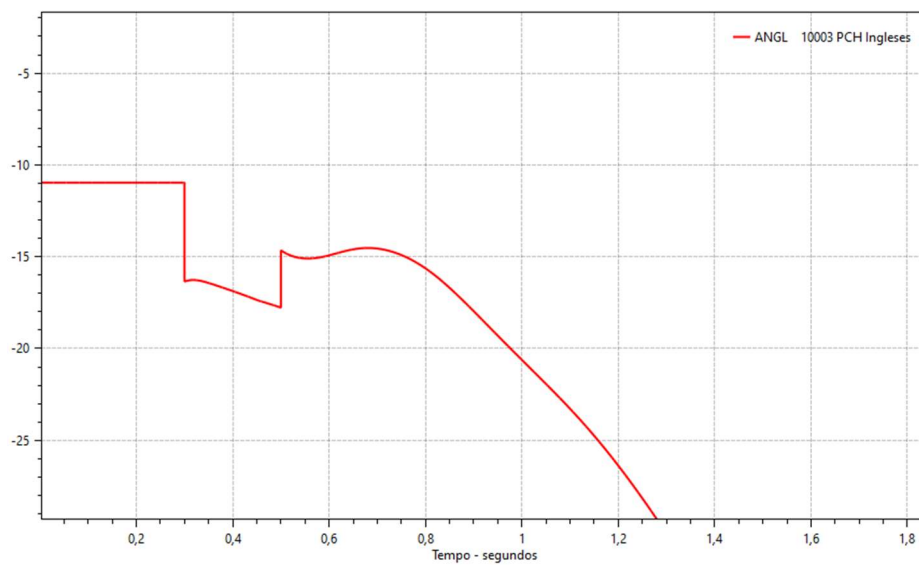
Fonte: Autoria própria.

Figura 42: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga média; Gerador 1 MW.



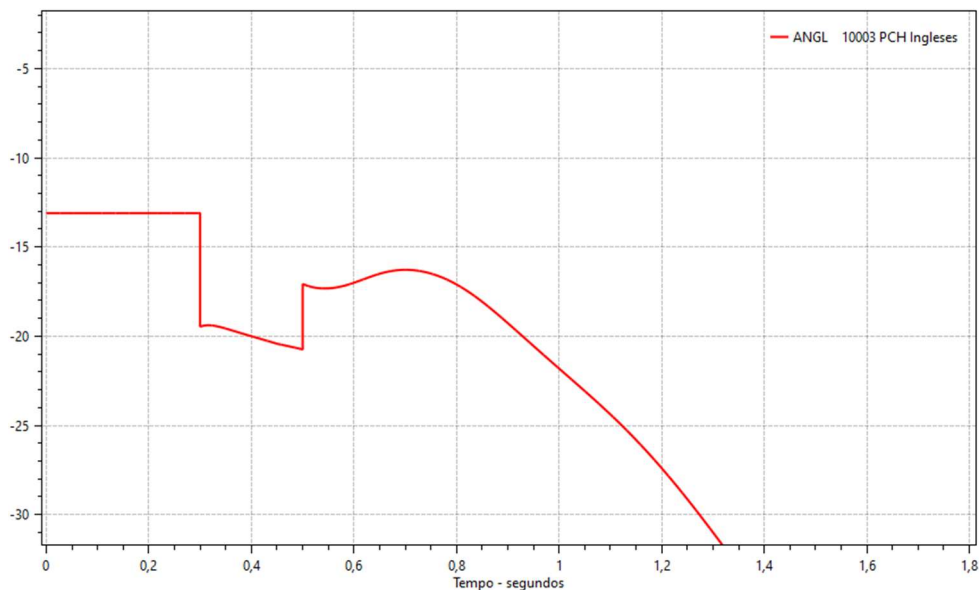
Fonte: Autoria própria

Figura 43: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga leve; Gerador 1 MW.



Fonte: Autoria própria

Figura 44: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW.



Fonte: Autoria própria

Tabela 18: Deslocamento de fase para Contingência 5 - Gerador 1 MW

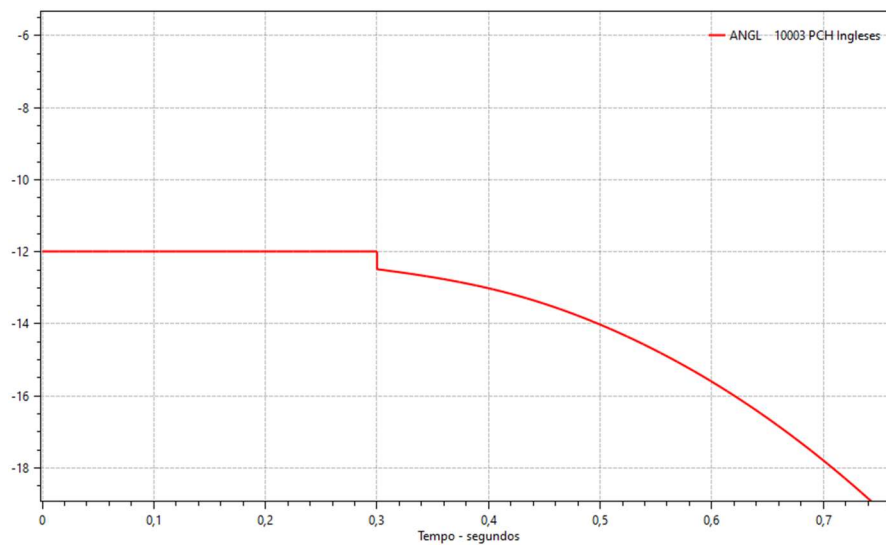
Situação	Cenário de Carga	Salto de vetor
5	Média	5,87
5	Leve	5,39
5	Pesada	6,36

Fonte: Autoria própria

4.6.1.4. Contingência 6

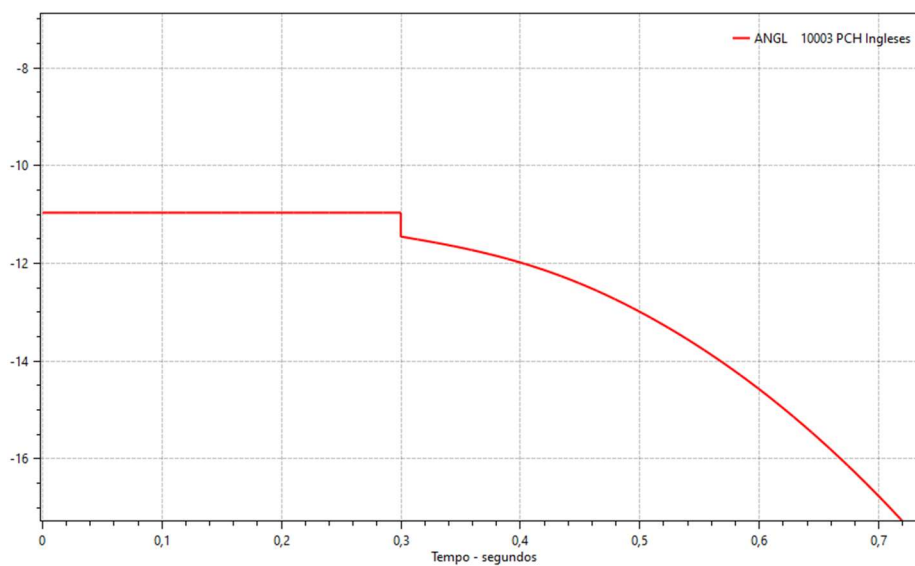
Na contingência 6 é realizado um aumento repentino de 20% da carga ativa na barra 4, através do código MDLP. Esta variação percentual corresponde a um aumento de aproximadamente 10 MW. Os gráficos abaixo representam o ângulo da tensão na barra do gerador para cada cenário de carga. O deslocamento de fase obtido através da emulação do relé de proteção é apresentado na tabela 19.

Figura 45: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga média; Gerador 1 MW



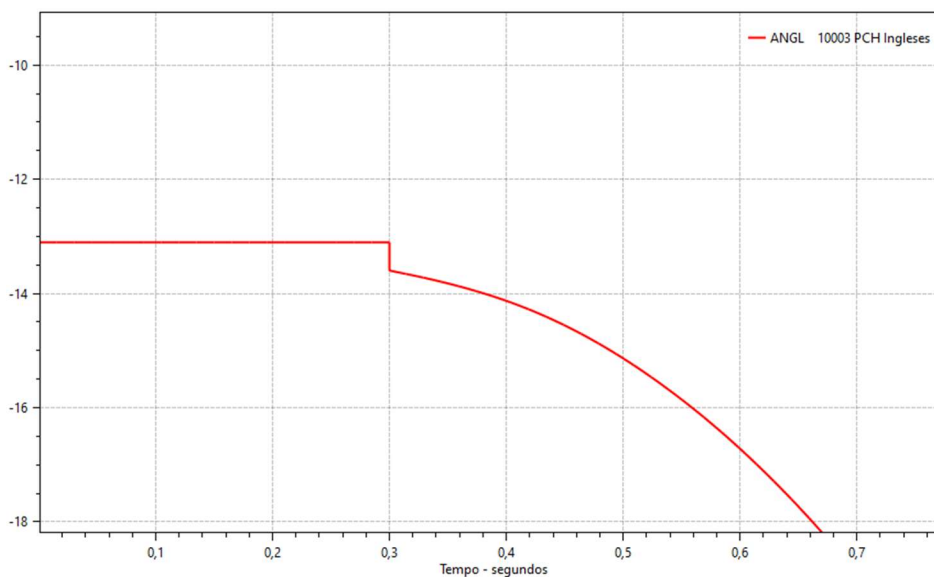
Fonte: Autoria própria.

Figura 46: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga leve; Gerador 1 MW.



Fonte: Autoria própria

Figura 47: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW.



Fonte: Autoria própria

Tabela 19: Deslocamento de fase para Contingência 6 - Gerador 1 MW

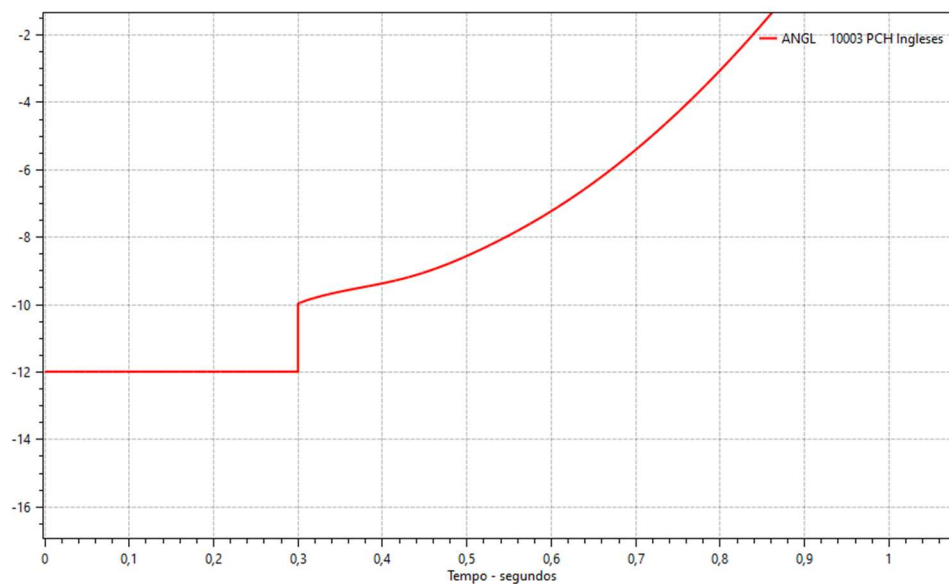
Situação	Cenário de Carga	Salto de vetor
6	Média	0,49
6	Leve	0,49
6	Pesada	0,49

Fonte: Autoria própria

4.6.1.5. Contingência 7

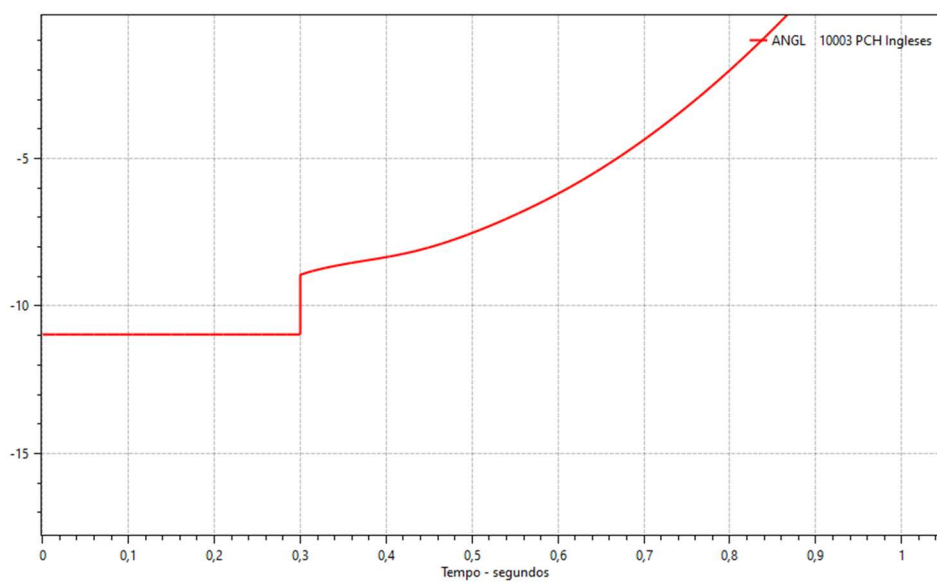
Na contingência 7 é realizada uma retirada repentina de 100% da carga ativa na barra 10000, através do código MDLP. Esta variação percentual corresponde a 8 MW. Os gráficos abaixo representam o ângulo da tensão na barra do gerador para cada cenário de carga. O deslocamento do ângulo de tensão na barra do gerador obtido através da emulação do relé de proteção é apresentado na tabela 20.

Figura 48: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga média; Gerador 1 MW.



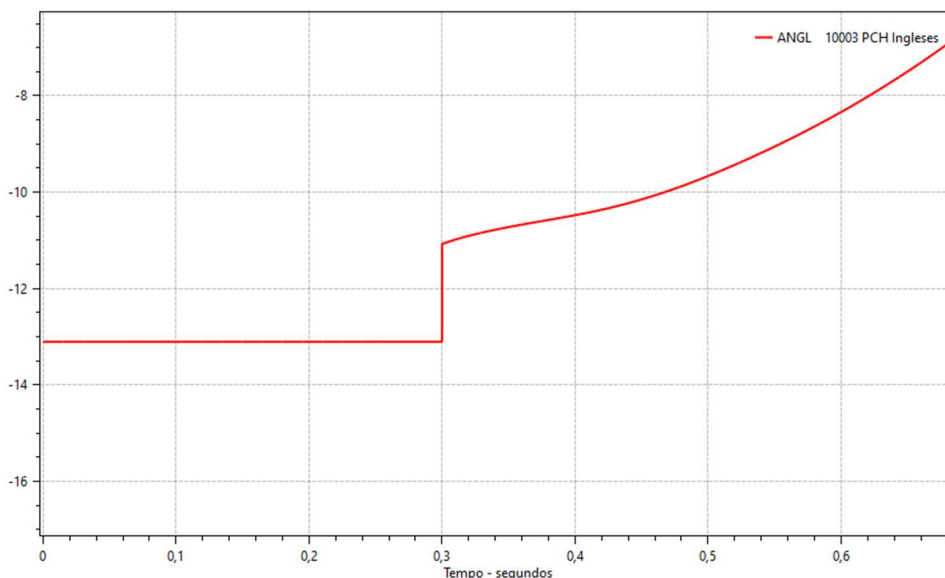
Fonte: Autoria própria

Figura 49: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga leve; Gerador 1 MW.



Fonte: Autoria própria

Figura 50: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga pesada; Gerador 1 MW.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 20: Deslocamento de fase para Contingência 7 - Gerador 1 MW

Situação	Cenário de Carga	Salto de vetor
7	Média	2,02
7	Leve	2,02
7	Pesada	2,03

Fonte: Autoria própria

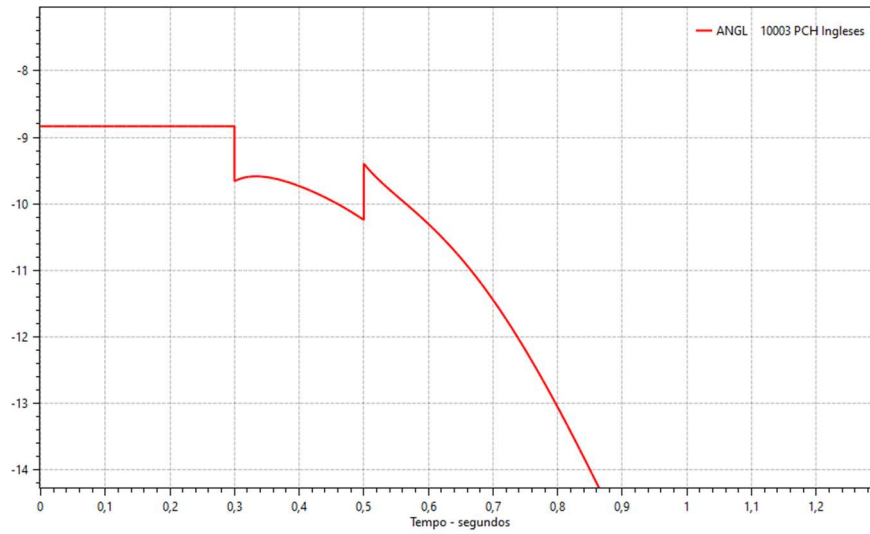
4.6.2. Gerador 5 MW

Similarmente ao apresentado do gerador de 1 MW, agora com um ajuste de $2,8^\circ$ para a proteção anti-ilhamento de “Salto de Vetor”, são apresentados os gráficos para cada cenário das contingências.

4.6.2.1. Contingência 3

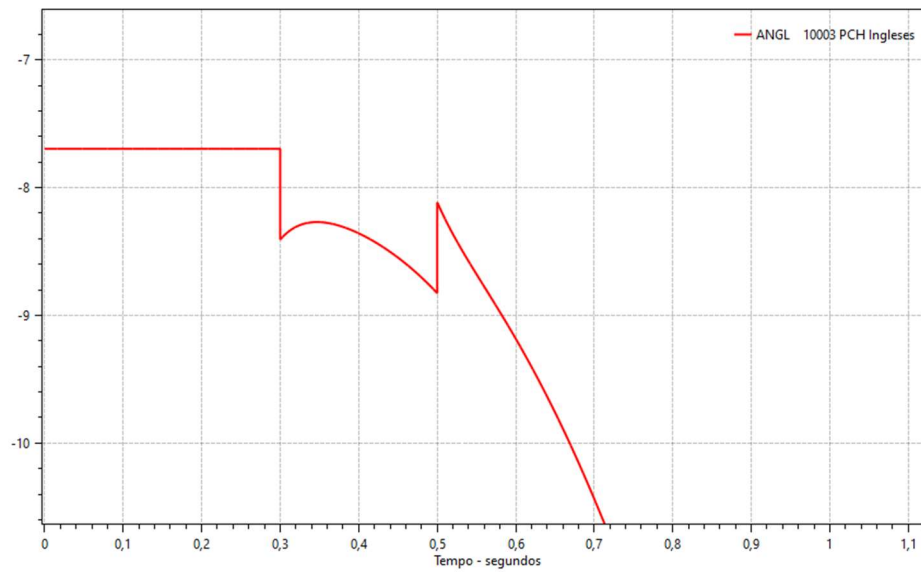
Esta contingência corresponde ao curto-circuito monofásico na barra 10, de 66 kV, e abertura do circuito CA 10-11, conforme apresentado em 4.6.1.1. O afundamento de tensão na barra 10 é demonstrado na figura 33, e os respectivos ângulos de tensão na barra do gerador para cada cenário são exibidos abaixo. O deslocamento de fase obtido através da emulação do relé de proteção é apresentado na tabela 21.

Figura 51: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga média; Gerador 5 MW.



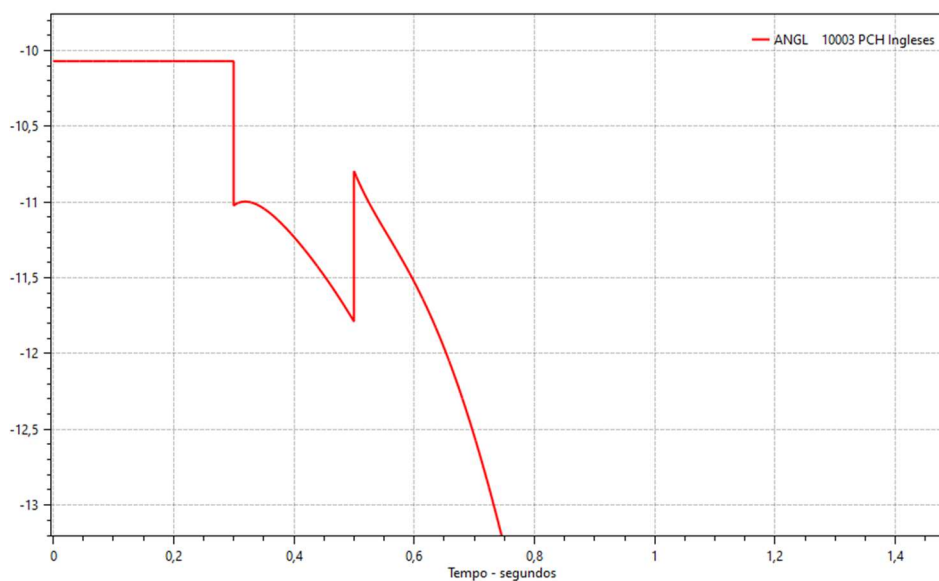
Fonte: Autoria própria

Figura 52: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW.



Fonte: Autoria própria

Figura 53: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 3; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW



Fonte: Autoria própria

Tabela 21: Deslocamento de fase para Contingência 3 - Gerador 5 MW

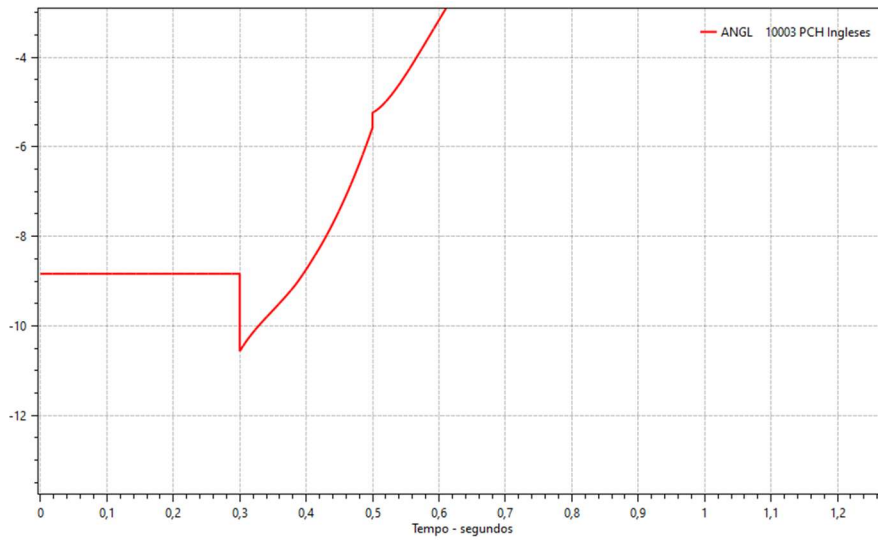
Situação	Cenário de Carga	Salto de vetor
3	Média	0,83
3	Leve	0,71
3	Pesada	0,95

Fonte: Autoria própria

4.6.2.2. Contingência 4

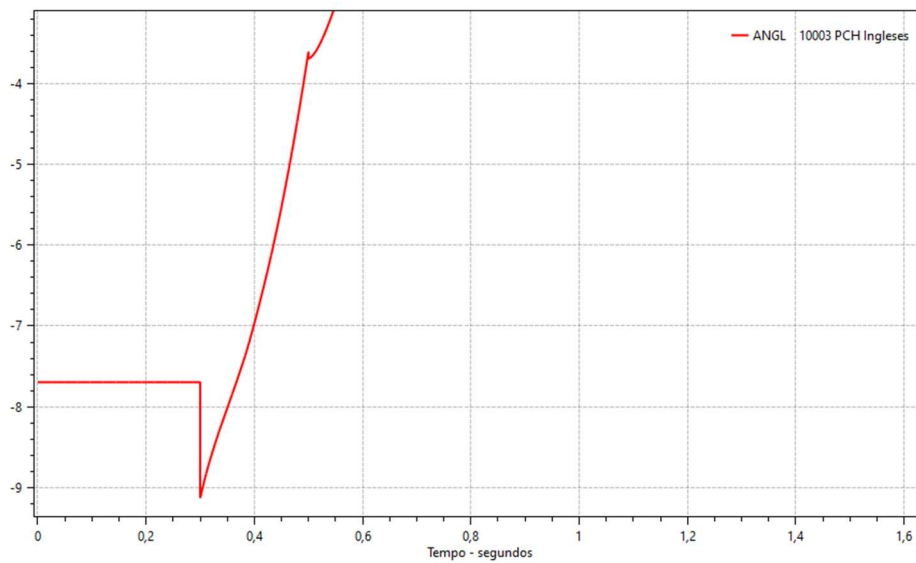
Esta contingência corresponde ao curto-circuito trifásico na barra 11, de 66 kV, e abertura do circuito CA 6-11, conforme apresentado em 4.6.1.2. A tensão na barra 10 é demonstrado na figura 37, e os respectivos ângulos de tensão na barra do gerador para cada cenário são exibidos abaixo. O deslocamento de fase obtido através da emulação do relé de proteção é apresentado na tabela 22.

Figura 54: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga média; Gerador 5 MW



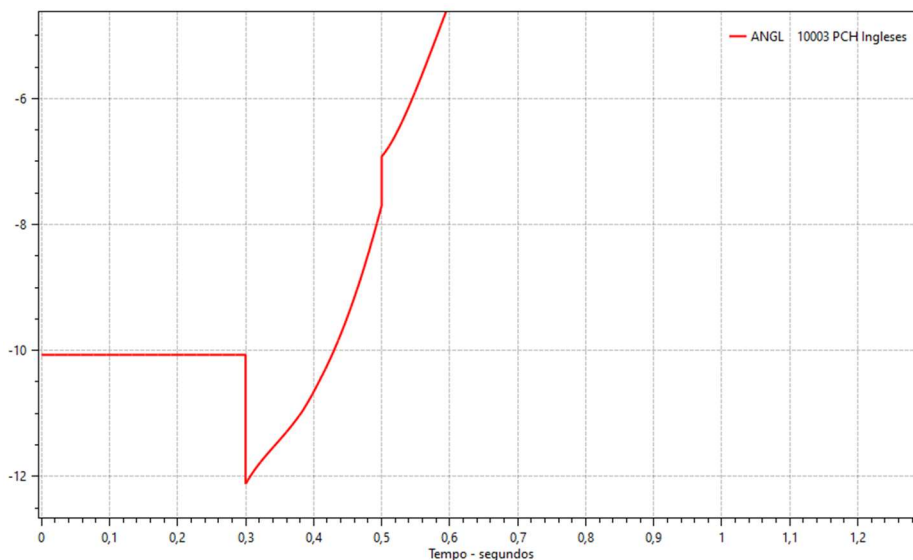
Fonte: Autoria própria

Figura 55: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW



Fonte: Autoria própria

Figura 56: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 4; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW.



Fonte: Autoria própria

Tabela 22: Deslocamento de fase para Contingência 4 - Gerador 5 MW

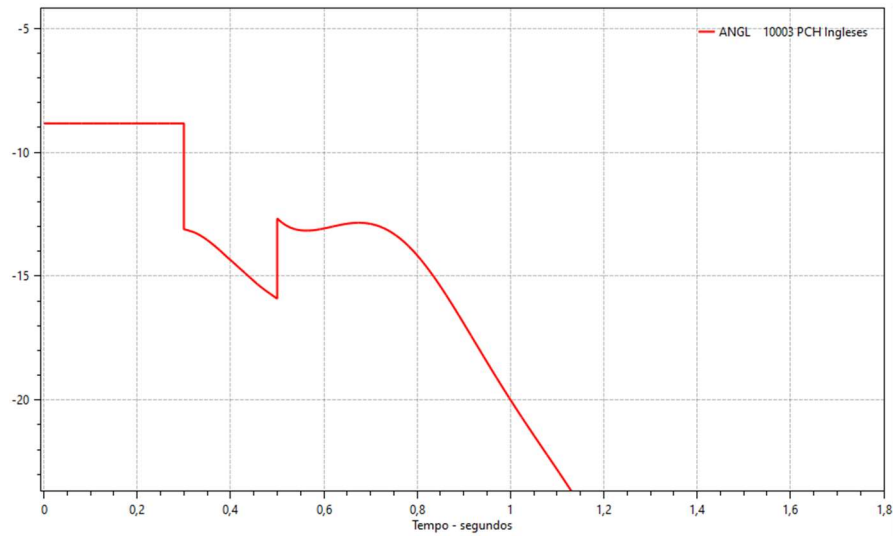
Situação	Cenário de Carga	Salto de vetor
4	Média	1,73
4	Leve	1,43
4	Pesada	2,05

Fonte: Autoria própria

4.6.2.3. Contingência 5

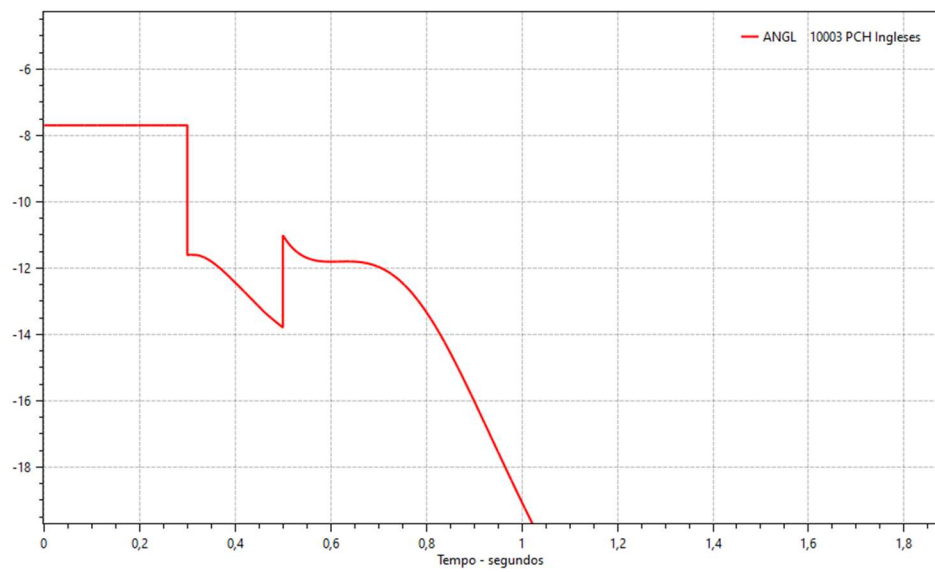
A contingência 5 representa um curto-circuito monofásico na barra 5, de 138 kV, e abertura do circuito CA 1-5, conforme apresentado em 4.6.1.3. O afundamento de tensão na barra 5 é demonstrado na figura 41, e os respectivos ângulos de tensão na barra do gerador para cada cenário são exibidos abaixo. O deslocamento de fase obtido através da emulação do relé de proteção é apresentado na tabela 23.

Figura 57: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga média; Gerador 5 MW



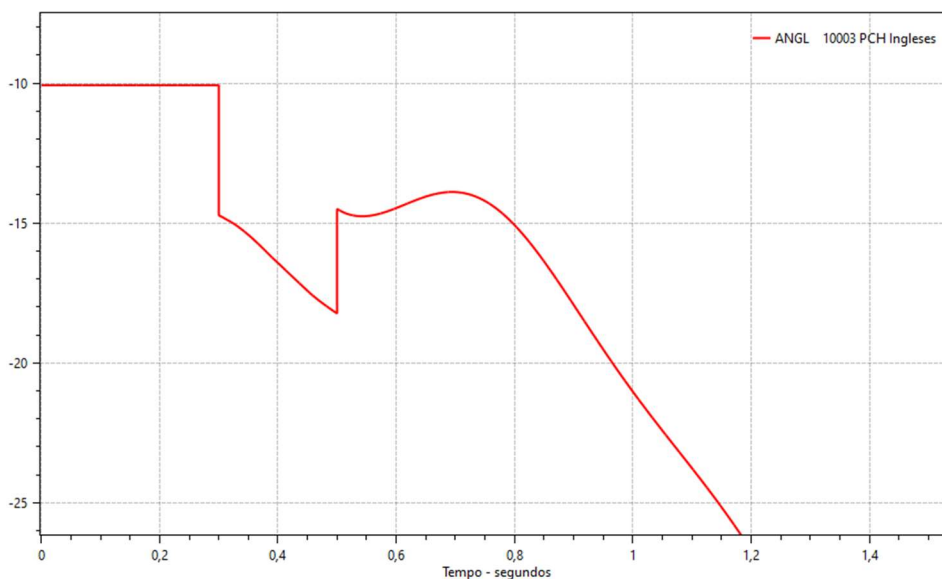
Fonte: Autoria própria

Figura 58: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW.



Fonte: Autoria própria

Figura 59: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 5; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW



Fonte: Autoria própria

Tabela 23: Deslocamento de fase para Contingência 5 - Gerador 5 MW

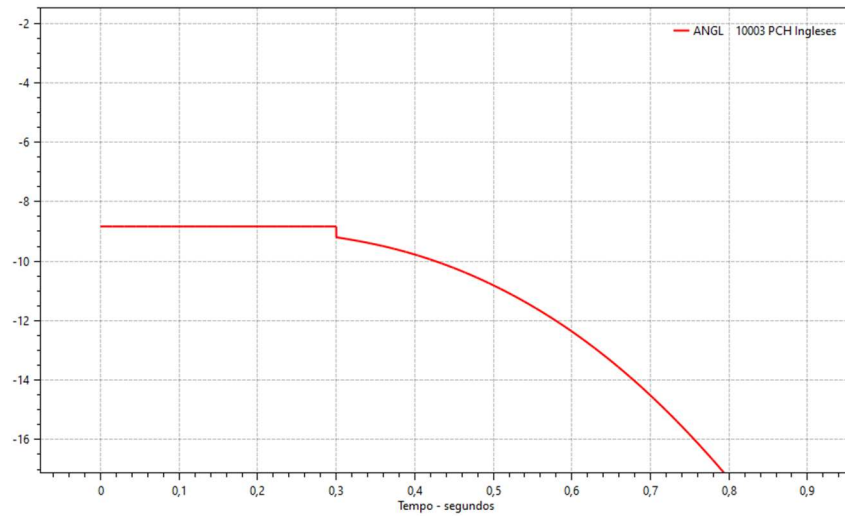
Situação	Cenário de Carga	Salto de vetor
5	Média	4,28
5	Leve	3,92
5	Pesada	4,66

Fonte: Autoria própria

4.6.2.4. Contingência 6

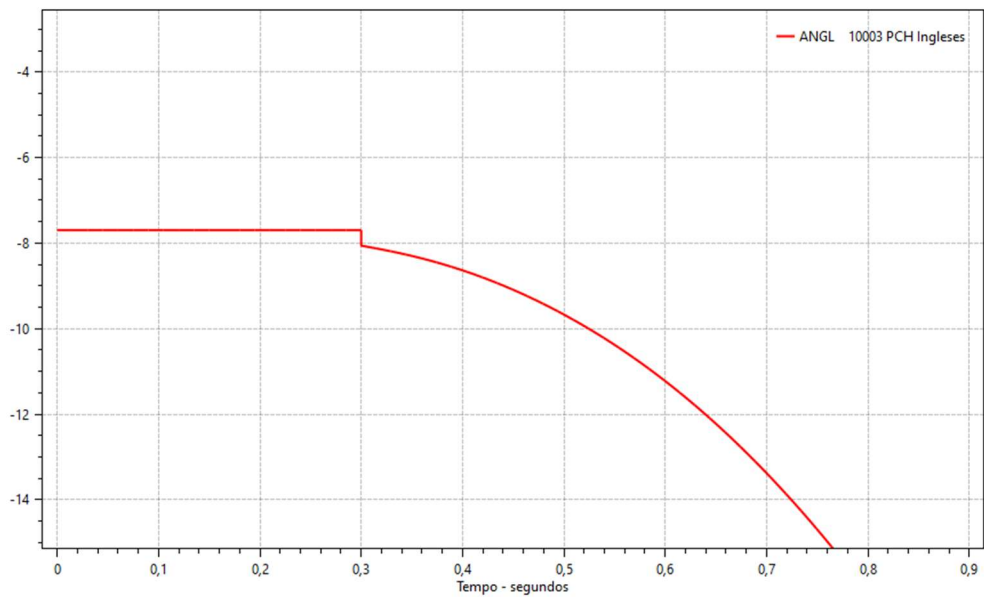
Conforme apresentado em 4.6.1.4, nesta contingência é representado um aumento repentino na carga ativa da barra 4. Os respectivos ângulos de tensão na barra do gerador para cada cenário são exibidos abaixo. O deslocamento de fase obtido através da emulação do relé de proteção é apresentado na tabela 24.

Figura 60: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga média; Gerador 5 MW



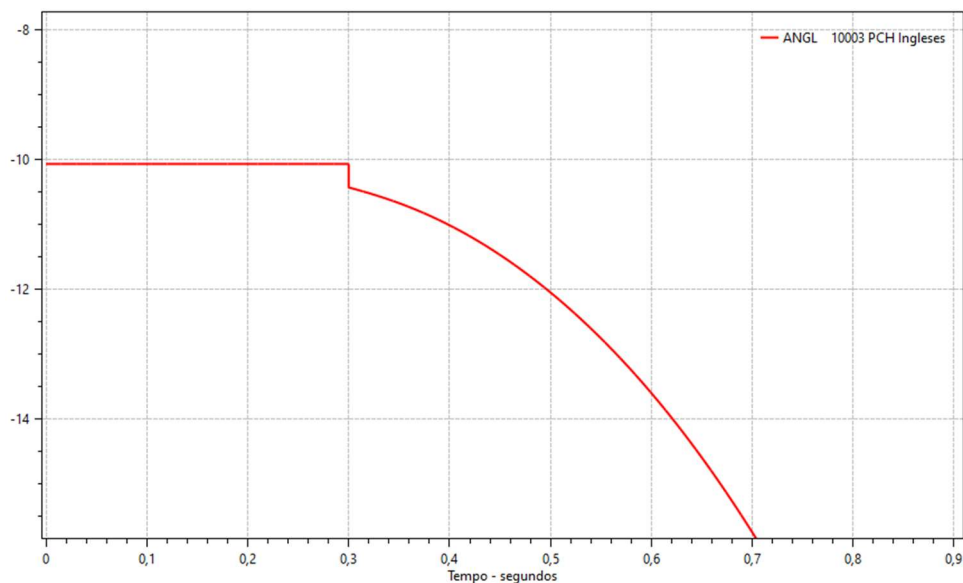
Fonte: Autoria própria

Figura 61: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW.



Fonte: Autoria própria

Figura 62: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 6; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW



Fonte: Autoria própria

Tabela 24: Deslocamento de fase para Contingência 6 - Gerador 5 MW

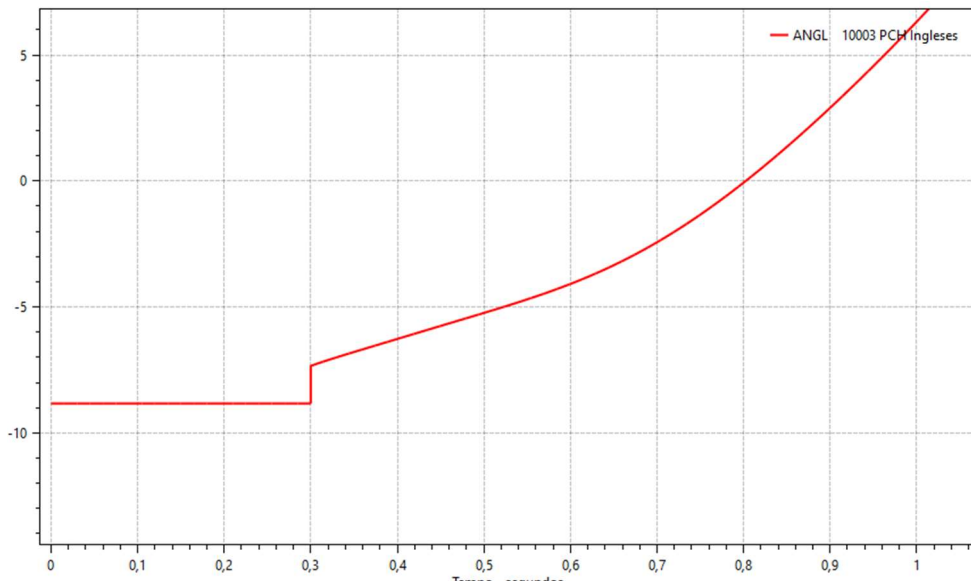
Situação	Cenário de Carga	Salto de vetor
6	Média	0,36
6	Leve	0,36
6	Pesada	0,36

Fonte: Autoria própria

4.6.2.5. Contingência 7

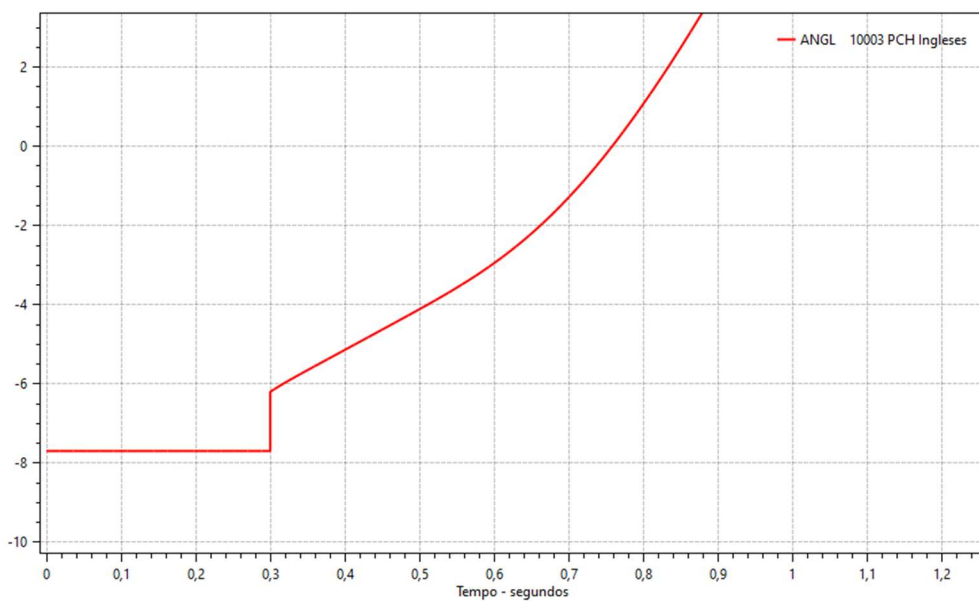
A contingência 7 representa uma retirada repentina de toda a carga ativa da barra 10000, e é descrita em 4.6.1.5. Os respectivos ângulos de tensão na barra do gerador para cada cenário são exibidos abaixo. O deslocamento de fase obtido através da emulação do relé de proteção é apresentado na tabela 25.

Figura 63: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga média; Gerador 5 MW.



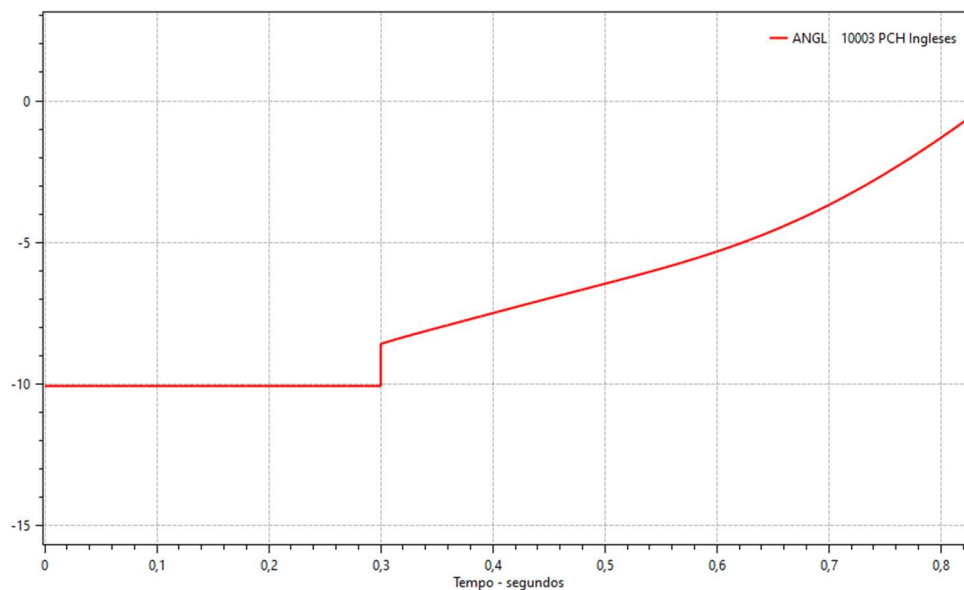
Fonte: Autoria própria

Figura 64: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga leve; Gerador 5 MW.



Fonte: Autoria própria

Figura 65: Ângulo da tensão na barra do gerador; Contingência 7; Cenário de carga pesada; Gerador 5 MW.



Fonte: Autoria própria

Tabela 25: Deslocamento de fase para Contingência 7 - Gerador 5 MW

Situação	Cenário de Carga	Salto de vetor
7	Média	1,5
7	Leve	1,5
7	Pesada	1,49

Fonte: Autoria própria

4.7. COMENTÁRIOS GERAIS

Nas contingências onde ocorre um evento e em seguida a abertura total do circuito CA correspondente, é apresentado o maior valor do deslocamento do ângulo em até 200 ms após o evento, como por exemplo em um curto-circuito monofásico. Já nas contingências referentes a retirada ou aumento repentino de carga, a variação do ângulo é calculada no momento exato do evento.

A partir da emulação do relé, é possível confirmar a atuação indevida da proteção de “Salto de Vetor” na situação 5, que corresponde a um curto-circuito monofásico em 138 kV, em ambos os geradores.

No caso do gerador de 1 MW, é perceptível a importância da simulação da situação 2, onde há equilíbrio entre potência ativa consumida e gerada, já que com esta simulação encontramos o ajuste correto. Caso fossem usadas como parâmetro

apenas as simulações envolvendo a situação 1, o ajuste seria de tal forma que não protegeria o gerador de um ilhamento, podendo causar riscos à segurança dos profissionais técnicos da concessionária.

Além disso, é notável o aumento do deslocamento do ângulo nas contingências comparando o gerador de 1 MW e de 5 MW, com o gerador de menor potência sendo mais sensível aos eventos ocorridos no sistema de potência simulado.

5. CONCLUSÕES

Com o aumento da geração distribuída, é de extrema importância a identificação de proteções que impeçam estes geradores de se “ilhar”. Conforme resultados apresentados no capítulo anterior, é possível a identificação da atuação indevida da proteção de “Salto de Vetor” em eventos sistêmicos que ocorrem no SEP, não sendo confiável a utilização unicamente desta proteção, requerendo outras proteções que atuem simultaneamente.

Como forma de evitar a parte da atuação indevida, os fabricantes de relé disponibilizam um bloqueio por mínima tensão de operação, que bloqueia o relé quando a tensão é inferior ao valor ajustado. O intuito é de que o relé não opere erroneamente em momentos de afundamento de tensão ou em situações de partida de geradores e motores. Tais situações descaracterizariam o objetivo principal da função Salto de Vetor, que é a de identificar transitórios na rede não relacionados à curto-circuito.

Conforme apresentado anteriormente, a Resolução Normativa I-432.0004 da Celesc Distribuição S.A., permite a não apresentação de estudos de proteção para geradores com potência inferior a 1 MW, desde que o ajuste da proteção de anti-ilhamento 78 seja um valor menor que 10°. Utilizando o resultado das simulações para o gerador de 1 MW, caso fosse escolhido um ajuste entre 6 e 10°, permitido pela Norma, e ocorresse um evento conforme apresentado na situação 2, com equilíbrio carga-geração, haveria um ilhamento não-intencional do gerador, já que o deslocamento do ângulo da tensão na barra do gerador neste caso não ultrapassou o ajuste selecionado. Logo, é imprescindível a apresentação de estudos de proteção para geradores distribuídos que utilizem relé de proteção na entrada de sua unidade consumidora, independente da potência de geração.

Para trabalhos futuros, seria importante a introdução de geradores distribuídos que utilizem outras fontes de energia, tais como solar e eólica, ambos utilizando conversores eletrônicos de potência, avaliando a atuação da proteção para estes geradores. Além disso, a utilização de diferentes sistemas de distribuição, com alteração dos parâmetros da rede e inserção de mais de um gerador no sistema, poderiam apresentar resultados diferentes, que podem ser comparados ao deste trabalho. Também, a representação do relé de proteção

dentro do *software* Anatem, através de modelagem através de controladores definidos pelo usuário (CDU) seria uma importante ferramenta para análise da proteção sem a necessidade de uma ferramenta computacional auxiliar.

REFERÊNCIAS

ABGD, Dados do Mercado de Geração Distribuída no Brasil. 2021. Elaborado pela Associação Brasileira de Geração Distribuída. Disponível em: <http://www.abgd.com.br/portal/dados-mercado/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

ANEEL. **Resolução Normativa N° 482**, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2021

ANEEL. **Resolução Normativa N° 687**, de 24 de novembro de 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2021.

BARBOSA, Raisa Dias. **Análise da Sensibilidade de Metodologias para Monitoramento da Segurança do Sistema Elétrico quanto à Estabilidade de Tensão**. 2018. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-B6SGW8>. Acesso em: 25 ago. 2021.

CELESC. **Resolução Normativa I-432.0004: Requisitos para a conexão de micro e minigeradores de energia ao sistema elétrico da Celesc Distribuição**, de 10 de setembro de 2014, Revisão 5. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/conexao-centrais-geradoras/conexao-micro-mini-geradores-out2020.pdf>. Acesso em 11 mai. 2021.

CELESC. **Especificação Técnica E-313.0018 – Cabo de alumínio nu CA e CAA**, de 30 de setembro de 2019. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/especificacao-tecnica/e3130018.pdf>. Acesso em 26 ago. 2021.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Manual Anatem – Release 12.0**, de 27 de maio de 2021. Disponível em: <https://dre.cepel.br/manual/anatem/index.html>. Acesso em: 12 set. 2021.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Manual do Usuário – Programa de Análise de Redes V11.02.04**. junho, 2019.

COPEL. **NTC 905200**: Acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema da COPEL (com compensação de energia). Curitiba: Copel, 2021. 101 p. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcweb/copel-distribuicao/poder-publico/micro-e-mini-geracao/>. Acesso em: 04 set. 2021.

Energy Networks Association. **“Requirements for the connection of generation equipment in parallel with public distribution networks on or after 27 April 2019,”** Engineering Recommendation G99 - ENA, London, 2020. Disponível em: [https://www.energynetworks.org/assets/images/Resource%20library/ENA_ERE_C_G99_Issue_1_Amendment_6_\(2020\).pdf](https://www.energynetworks.org/assets/images/Resource%20library/ENA_ERE_C_G99_Issue_1_Amendment_6_(2020).pdf). Acesso em: 17 mar. 2021.

JENKINS, N. et al **“Embedded Generation”** The Institution of Electrical Engineers, London, 2000.

LEMOS, João Ricardo Ferreira. **Modelagem de Linhas de Transmissão para Estudos de Transitório Eletromecânicos**. 2008. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica da Escola

Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001145.pdf>. Acesso em: 20 set. 2021.

MOTA, Igor Lopes. **Análise de Alternativas de Proteção Anti-ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos**. 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação - EMC, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/7027>. Acesso em: 01 set. 2021.

MOTTER, Daniel. **Modelagem Computacional de Funções de Proteção Baseadas em Medidas de Frequência para Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída**. 2014. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação - SEL, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-14032014-083240/pt-br.php>. Acesso em: 01 ago. 2021.

MOURINHO, Fabricio Andrade; MOTTER, Daniel. **Avaliação do Desempenho das Proteções Anti-ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos durante perdas de grandes blocos de geração no Sistema Interligado Nacional**. 2018, XIV STPC - Seminário Técnico de Proteção e Controle. Acesso em: 17 mar. 2021.

MOURINHO, Fabricio Andrade *et al.* **Análise da atuação das proteções anti-ilhamento de recursos energéticos distribuídos considerando eventos de grande porte no Sistema Interligado Nacional**. 2019. XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Acesso em: 17 mar. 2021.

PEXTRON CONTROLES ELETRÔNICOS LTDA. **Manual de Operação: Apresentação URP-6000 e URP-6001, Revisão 01**. 2015.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **SEL-751 Feeder Protection Relay**. Disponível em: https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Product%20Literature/Data%20Sheets/751_DS_20200331.pdf?v=20200522-170658. Acesso em: 12 set. 2021.

SILVA, Andreza Ferreira da. **Análise de Transitórios Eletromecânicos através do programa Anatem**. 2018. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Elétrica Ênfase em Eletrotécnica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (Daelt), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11714/1/CT_COELE_2018_2_01.pdf. Acesso em: 24 maio 2021.

SOUSA, Natalia Bastos de. **Análise de Estabilidade Angular utilizando os softwares Anarede e Anatem**. 2018. 99 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15806>. Acesso em: 24 maio 2021.

TEOH, Wee Yee; TAN, Chee Wei. **An Overview of Islanding Detection Methods in Photovoltaic Systems**. Disponível em: <https://publications.waset.org/5748/an-overview-of-islanding-detection-methods-in-photovoltaic-systems>. Acesso em: 23 mar. 2021.

VIEIRA, José Carlos de Melo. **Metodologias para ajuste e avaliação do desempenho de relés de proteção anti-ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos**, Dissertação, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2006. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/260506/1/VieiraJunior_JoseCarlosdeJose_D.pdf. Acesso em: 21 mar. 2021.

VIEIRA, José Carlos M. *et al.* Um método prático para definição dos ajustes de relés baseados em medidas de frequência usados para detecção de ilhamento de geração distribuída. **Revista Controle & Automação**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 199-213, abr. 2008.

WALLING, Reigh A.; MILLER, Nicholas W. **Distributed generation islanding-implications on power system dynamic performance**, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002, pp. 92-96 vol.1, doi: 10.1109/PESS.2002.1043183.

WOODWARD. **MRG3 – Generator protection with mains supervision, time overcurrent protection and earth current supervision – Manual MRG3 (Revision B)**.

ZIV GRID AUTOMATION. **IRV: Terminal Integrado de Proteção, Controle e Medida – Manual de Instruções PIRV1203A**. 2012.

APÊNDICE A

Código de arquivo de execução do ANATEM

(

(TITULO DO CASO

(

TITU

* Sistema teste 14 barras - com distribuição INE*

(

(

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO PARA SAIDA DE RELATORIOS (opcao

FILE)

(

ULOG

4

sis14b_22.out

(

(

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM FLUXO DE POTENCIA (ANAREDE

)

(

ULOG

2

sis14b.his

(

(

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM DADOS PARA PLOTAGEM

(

ULOG

8

sis14b_22.plt

(

(

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO DE SAIDA DE MENSAGENS DE
EVENTOS

(
ULOG

9
sis14b_22.log

(

(

(DADOS DE OPCOES DEFAULT DE EXECUCAO

(

DOPC IMPR CONT

(Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E

IMPR L FILE L CONT L 80CO L

999999

(

(

(TOLERANCIA DE CONVERGENCIA DESEJADA PARA O FLUXO DE

POTENCIA

(

DCTE

(Ct) (Val)

TEPQ .1

999999

(

(

(RESTABELECIMENTO DO CASO DE FLUXO DE POTENCIA

(

ARQV REST

20

(

(

(RESTABELECIMENTO DOS MODELOS DOS REGULADORES

(

ULOG

3

sis14b.blr

(

ARQM

(

(

(DADOS DE MAQUINAS E ASSOCIACAO DAS MAQUINAS AOS

CONTROLES

(

DMAQ

(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)

(..... Barra 1

01 10 3 202 102 101

(..... Barra 2

02 10 1 201 102 101

(..... Barra 3

03 10 1 201 102

(..... Barra 6

06 10 1 201 102 101

(..... Barra 8

08 10 1 201 101 0

(..... Barra 12

12 10 1 201 101

(..... Barra 14

14 10 1 202 1201 101

(..... PCH Ingleses

(Nb) Gr (P) (Q) Uni (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)

(10003 10 1 1016 102 101

10003 10 1 9001 102 101

999999

(

(

(DADOS DOS MOTORES DE INDUCAO

(

DMOT

(Nb) Gr (H) (K0) (K1) (K2) (EXP) M (Mt)

4 10 4. 1. 1.52

4 20 4. 1. 1.52

5 10 4. 1. 1.52

5 20 4. 1. 1.52

999999

(

(

(DADOS DE CARGAS FUNCIONAIS

(

DCAR IMPR

(tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) (A) (B) (C) (D) (Vmn)

BARR 1 A BARR 10003 0 40 0 100 70

(BARR 1 A BARR 9998 100 0 100 0 70

(BARR 1 A BARR 9998 0 0 0 0 70

999999

(

(

(

(DADOS DAS VARIAVEIS DE SAIDA

(

DPLT

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

VOLT 4

VOLT 10000

VOLT 10003

FMAQ 10003 10

DELT 10003 10 0

PELE 10003 10

QELE 10003 10

ANGL 10003

(angulos

DELT	2	10	1 10
DELT	3	10	1 10
DELT	6	10	1 10
DELT	8	10	1 10
DELT	12	10	1 10
DELT	14	10	1 10

(frequencias

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

FMAQ	1	10
FMAQ	2	10
FMAQ	3	10
FMAQ	6	10
FMAQ	8	10
FMAQ	12	10
FMAQ	14	10

(

(potencias ativas

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

PELE	1	10
PELE	2	10
PELE	3	10
PELE	6	10
PELE	8	10
PELE	12	10
PELE	14	10
PMEC	1	10
PMEC	2	10
PMEC	3	10
PMEC	6	10

PMEC	8	10
PMEC	12	10
PMEC	14	10

(

(potencias reativas

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

QELE	1	10
QELE	2	10
QELE	3	10
QELE	6	10
QELE	8	10
QELE	12	10
QELE	14	10

(

(tensoes de campo

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

EFD	1	10
EFD	2	10
EFD	3	10
EFD	6	10
EFD	8	10
EFD	12	10
EFD	14	10

(

(tensoes de barras

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

VOLT	1
VOLT	2
VOLT	3
VOLT	4
VOLT	5
VOLT	6
VOLT	7

VOLT 8
 VOLT 9
 VOLT 10
 VOLT 11
 VOLT 12
 VOLT 13
 VOLT 14

(

(motor de inducao

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

SLIP 4 10
 SLIP 4 20
 SLIP 5 10
 SLIP 5 20
 PMOT 4 10
 PMOT 4 20
 PMOT 5 10
 PMOT 5 20
 QMOT 4 10
 QMOT 4 20
 QMOT 5 10
 QMOT 5 20
 IMOT 4 10
 IMOT 4 20
 IMOT 5 10
 IMOT 5 20
 TMOT 4 10
 TMOT 4 20
 TMOT 5 10
 TMOT 5 20

(

(fluxo de potencia ativa

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

FLXA 2 3

(

(fluxo de potencia reativa

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

FLXR 2 3

(

(Modulo da corrente no circuito

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

ILIN 2 3

(

(potencias ativas e reativas das cargas

(Tipo)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

PCAR 2

QCAR 2

PCAR 3

QCAR 3

PCAR 4

QCAR 4

PCAR 5

QCAR 5

PCAR 6

QCAR 6

PCAR 9

QCAR 9

PCAR 10

QCAR 10

PCAR 11

QCAR 11

PCAR 12

QCAR 12

PCAR 13

QCAR 13

PCAR 14

QCAR 14
 PCAR 10000
 QCAR 10000

(
 999999

(

(

(

(DADOS DE EVENTOS

(

DEVT

(Tp) (Tempo)(El)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (Bl)P (Rc) (Xc) (

Bc) (Defas)

(APCC 0.300 10000

(RMCB 0.500 10000

(ABCI 0.500 1000010001

(APCC 0.300 10002

(RMCB 0.500 10002

(ABCI 0.500 1000210003

(APCC 0.300 10

(RMCB 0.500 10

(ABCI 0.500 10 11

(APCC 0.300 5

(RMCB 0.500 5

(ABCI 0.500 1 5

(MDLP 0.300 4 +20

(MDLP 0.300 10000 -100

(APCB 0.300 11

(RMCB 0.500 11

(ABCI 0.500 6 11

999999

(

(

```
( DADOS DE SIMULACAO
(
DSIM
( Tmax ) ( Stp ) ( P ) ( I )
  50.00 .001  1
(
(
( INICIALIZACAO DE VARIAVEIS SEM SIMULACAO
(
EXSI INIC
(
( RELATORIOS
(
RELA RBAR RLIN RGER ROPG RMOT
(
(
( EXECUCAO DA SIMULACAO
(
EXSI ECHO
(
(
( RELATORIO DE MAXIMOS E MINIMOS
(
RELA RMXG
(
FIM
```

APÊNDICE B

Código dos modelos de reguladores e geradores.

(

(MODELOS DE GERADORES TIPO CLASSICO

(

DMDG MD01

(No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

0101 (barra infinita)

(

999999

(MODELOS DE GERADORES COM POLOS SALIENTES

(

DMDG MD02

(

(..... Modelo 201

(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L''d)(Ll)(T'd) (T''d)(T''q)

0201 1 100.3 59.9 35.7 28.3 19.8 7.28 .050 .100

(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

0201 2.474 50.

(

(..... Modelo 202

(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L''d)(Ll)(T'd) (T''d)(T''q)

0202 2 94.6 62.1 31.0 27.4 20.2 8.13 .048 .140

(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

0202 3.588 72.

(..... Modelo PCH 5 MW

(No) (CS) (Xd)(Xq)(X'd) (X''d)(Xl)(T'd) (T''d)(T''q)

1016 1016 106.1 69.5 31.0 20.4 9.94 3.63 0.0620.089

(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

1016 2.25 6.143 N

(..... Modelo PCH 1 MW

(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L''d)(Ll)(T'd) (T''d)(T''q)

9001 9001 212.0208.051.00 29.0013.510.802 0.0150.089

(No) (Ra) (H) (D) (MVA) Fr C

9001 0.287 1.550 N

999999

(

(

(MODELOS DE REGULADORES DE TENSAO (Pre'-definidos)

(

DRGT MD01

(..... Modelo 101

(No) (CS) (Ka) (Ke) (Kf) (Tm) (Ta) (Te) (Tf) (Lmn) (Lmx) LS

0101 31 300. 3.00 0.30 0.0 0.0 6.00 3.00 -1.1 8.05ED

(

(..... Modelo 102

(No) (CS) (Ka) (Ke) (Kf) (Tm) (Ta) (Te) (Tf) (Lmn) (Lmx) LS

0102 32 408. 1.00.1046 0.0 0.0 1.00 3.17 -1.1 8.05EI

(

999999

(

DRGT MD12

(..... Modelo 1201

(No) (CS) (Ka) (Ke) (Kf) (Kp) (Ki) (Kg) (Tq) (Ta) (Te) (Tf1) (Tf2)

1201 33 25.0 -.05 .080 .0 1.0 1.0 .0 .20 .50 1.0 .0

(No) (Ln1) (Lx1) (Ln2) (Lx2) (Ln3) (Lx3) L

1201 -1.0 1.0 -4.6 4.6 .0 .0D

(

999999

(

(

(CURVAS DE SATURACAO

(

DCST

(..... Curvas de Saturacao de Geradores

(No) T (Y1) (Y2) (X1)

(..... Curva 1
0001 2 0.016 8.198 0.8
..... Curva 2
0002 2 0.013 7.92 0.8
(
..... PCH Ingleses
(No) T (Y1) (Y2) (X1)
1016 2 0.0311 6.312 0.8
..... Modelo PCH 1 MW
(Nc) T (P1) (P2) (P3)
9001 2 0.0214 7.7022 0.9
..... Curvas de Saturacao das Excitatrizes
((para modelos pre'-definidos)
(No) T (Y1) (Y2) (X1)
..... Curva 31
0031 2 0.0147 1.206
..... Curva 32
0032 2 0.024 1.36
..... Curva 33
0033 2 0.016 1.54
(
999999
(
(
(MODELOS DE REGULADORES DE VELOCIDADE (Pre'-definidos)
(
DRGV MD01
..... Modelo 0101
(No) (R)(Rp)(At)(Qnl)(Tw)(Tr)(Tf)(Tg)(Lmn)(Lmx)(Dtb)(D)(Pbg)(Pbt)
0101 0.05 0.381.200 0.15 1.5 7.0 0.05 0.5 0.0 .984 0.5 1.0 1.0 1.0
(
999999
FIM

APÊNDICE C

Código utilizado para emulação do relé de proteção no VBA no Excel

Sub SaltoVetor()

'Inicialização de variáveis

Dim salto As Integer

Dim linha As Integer

Dim linhas As Integer

Dim angulo As Integer

Dim referencia As Integer

Dim passo As Integer

Dim aux As Double

Dim max_deslocamento As Double

Dim selecao As Range

Dim nome_planilha As String

'Declaração de variáveis

passo = 0 'Possibilita iterar o if no primeiro termo da tabela

salto = 8 'Alterar para o número de linhas que deseja repetir

nome_planilha = "planilha1" 'Alterar para o nome da planilha que está usando

Set selecao = Sheets(nome_planilha).Range("A3:E605") 'Alterar para a
seleção da tabela inteira

linhas = selecao.Rows.Count 'Conta quantas linhas tem na seleção

angulo = 3 'Alterar para o número da coluna do ângulo

referencia = 4 'Alterar para o número da coluna da referência

deslocamento = 5 'Alterar para o número da coluna do deslocamento vetorial

max_deslocamento = 6 'Alterar para o número do maior deslocamento

aceitável!!!

'Código parte 1

For linha = 1 To linhas

If (linha Mod salto) = 1 Then

aux = selecao.Cells(linha - passo, angulo).Value

End If

```
    passo = 8
    secao.Cells(linha, referencia) = aux
Next linha

'Código parte 2
For linha = 1 To linhas
    If Abs(secao.Cells(linha, deslocamento).Value) >= max_deslocamento
Then
        aux = secao.Cells(linha, referencia).Value
        For i = 1 To (salto * 6 - 1)
            secao.Cells(linha + i, referencia) = aux
        Next i
        linha = linha + 47
    End If
Next linha
End Sub
```