



MODELAGEM DA PROTEÇÃO NA SIMULAÇÃO DE ILHAMENTO DE UM
AUTOPRODUTOR INDUSTRIAL E UMA USINA TERMELÉTRICA

Renis Rodrigues Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Rio de Janeiro

Maio de 2022

MODELAGEM DA PROTEÇÃO NA SIMULAÇÃO DE ILHAMENTO DE UM
AUTOPRODUTOR INDUSTRIAL E UMA USINA TERMELÉTRICA

Renis Rodrigues Ferreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Aprovada por: Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.

Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.

Prof. José Carlos de Melo Vieira Júnior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2022

Ferreira, Renis Rodrigues

Modelagem da Proteção na Simulação de Ilhamento de um Autoprodutor Industrial e uma Usina Termelétrica / Renis Rodrigues Ferreira – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XIX, 138 p. il.; 29,7 cm

Orientador: Glauco Nery Taranto

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 111-114.

1. Proteção. 2. Métodos de detecção de ilhamento. 3. Blackout. 4. Termoelétrica. I. Taranto, Glauco Nery II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir mais esta conquista. E gostaria de citar algumas pessoas que tiveram importância especial para mim durante essa jornada.

Aos ilustres: Jaime Mourente, Alessandro Bulhões, Thiago Trezza, Geraldo Bieler e ao meu professor de graduação na UnB, Anésio de Leles, que ainda se lembrou de mim depois de vários anos. A vocês minha sincera gratidão por terem me dado seu voto de confiança para meu ingresso nesta caminhada.

Ao professor Glauco Taranto, o qual tenho a honra de ter como orientador, agradeço os comentários e sugestões sempre perspicazes e construtivas, direcionando o trabalho para um caminho mais consistente.

Aos colegas “mestres”: Roberta Marchon e Thiago Carminatti, agradeço por me incentivarem a ingressar nesta jornada e, em algumas ocasiões, a continuar nela.

Aos amigos José Norberto e Alexandre Leitão, agradeço as opiniões e os conselhos durante os intervalos descontraídos de cafezinho no trabalho.

Aos colegas de turma em algumas disciplinas nesta pós-graduação: Marcelo Defillipo, Rodrigo Morimoto, Felipe Ribeiro, Leon Marcel e Fábio Padovani, agradeço a parceria e as trocas de ideia nos estudos durante o curso.

Ao Nicolás Leite do CEPTEL, pelo suporte ao Anatem, respondendo minhas dúvidas sobre o programa com profissionalismo e muito boa vontade.

Agradeço a Simone a compreensão pelas horas que precisei estudar; ao Nilo, Raul e Isabela, por incorporarem em seu caráter os ensinamentos mais importantes que tentei lhes passar; ao meu irmão Willian, por me inspirar com sua incrível força de vontade.

Principalmente, agradeço aos meus pais: Josino (*in memoriam*) e Arminda, que nunca mediram esforços para incentivar, de todas as formas, a educação dos seus filhos.

Dedico este trabalho à pequena Gabi (*in memoriam*), filha dos amigos Marcos e Gláucia. Foi muito marcante para mim quando, num dos momentos mais difíceis do curso, fiz uma pausa num trabalho cansativo para comparecer à sua emocionante despedida. Às vezes, é preciso parar e refletir, antes de prosseguir... Obrigado!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM DA PROTEÇÃO NA SIMULAÇÃO DE ILHAMENTO DE UM AUTOPRODUTOR INDUSTRIAL E UMA USINA TERMELÉTRICA

Renis Rodrigues Ferreira

Maio/2022

Orientador: Glauco Nery Taranto

Programa: Engenharia Elétrica

Uma instalação com geração própria de energia elétrica pode operar em paralelo com o sistema da concessionária ou de forma isolada (também chamada de “ilhada”). O “ilhamento” é a transferência do modo paralelo para o modo ilha, e atualmente tem sido assunto de vários trabalhos, devido principalmente ao aumento das fontes alternativas de energia no sistema elétrico. Neste trabalho, será tratado um caso particular de ilhamento de uma grande indústria autoprodutora, cuja subestação principal de 138 kV está interconectada através de duas linhas curtas a uma Usina Termelétrica (UTE), e esta última é interconectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN). É proposto um sistema de proteção elétrica para detectar condições desfavoráveis à indústria e que decida e execute o ilhamento, em tempo hábil. A proteção atuará em duas topologias de ilhamento: primeiro, formando uma ilha com a indústria e a UTE interconectadas entre si, porém isoladas do SIN; e segundo, a indústria autoprodutorailhada isoladamente. O estudo contempla o descarte de geração na UTE e o descarte de cargas na indústria, para equilibrar o balanço de potência carga-geração e manter a estabilidade na ilha. Os resultados mostram que o sistema de proteção proposto é adequado, e adaptável para cada aplicação, de acordo com as características de cada caso.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PROTECTION MODELING WHEN SIMULATING THE ISLANDING OF AN
INDUSTRIAL SELF-PRODUCER AND A THERMOELECTRIC POWER PLANT

Renis Rodrigues Ferreira

May/2022

Advisor: Glauco Nery Taranto

Department: Electrical Engineering

An installation with its internal electric generation can operate connected to the utility system or isolated (also called “islanded”). “Islanding” is the transfer for the “on grid” mode to the “island” mode, and lately several articles have been produced, especially because the increasing in alternative sources in the electrical system. This work presents a particular case of islanding of a large industrial plant with internal generation, whose its substation is connected to a thermoelectric power plant, and this is connected to the national power system. It is proposed a protection system to detect unfavorable conditions for the industry, decide and execute the islanding, in satisfactory time. The protection system will work in two topologies: first, forming an island with industry and thermoelectric power plant interconnected together, but isolated from the external grid. Second, industry will be islanded with its own generation. This work includes generation shedding in the thermoelectric power plant and load shedding in the industrial plant, to balance load-generation power and maintain the stability on the island. The results show that the proposed protection system is suitable, and adaptable for each application according to the characteristics of each case.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
SUMÁRIO VII	
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XVIII
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	7
CAPÍTULO 2 PROTEÇÕES E ESQUEMAS DE ILHAMENTO	8
2.1 INTRODUÇÃO	8
2.2 PRINCIPAIS PERTURBAÇÕES NO SISTEMA	9
2.2.1 Curto-Circuito.....	9
2.2.2 Subfrequência ou Sobrefrequência.....	9
2.2.3 Subtensão ou Sobretensão	10
2.3 FUNÇÕES DE PROTEÇÃO NO ILHAMENTO	12
2.3.1 Sincronismo (25)	13
2.3.2 Subtensão (27)	13
2.3.3 Direcional de Potência (32)	13
2.3.4 Sobrecorrente (50/51).....	14
2.3.5 Sobretensão (59).....	16
2.3.6 Sobrecorrente Direcional (67)	16
2.3.7 Deslocamento de fase (78)	16
2.3.8 Subfrequência ou Sobrefrequência (81U/81O)	19
2.3.9 Taxa de Variação de Frequência (81R).....	21
2.3.10 Rápida Taxa de Variação de Frequência (81RF).....	23
2.4 ESQUEMAS DE PROTEÇÃO.....	24
2.4.1 Esquema Audring-Lerch.....	24
2.4.2 Esquema Rajamani-Hambarde	26

2.4.3	Esquema Mozina	28
2.5	DESCARTE DE CARGAS	29
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA UTILIZADA		31
3.1	INTRODUÇÃO	31
3.2	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS E MODELAGEM DO SISTEMA.....	32
3.3	TOPOLOGIAS DO ILHAMENTO DURANTE PERTURBAÇÕES.....	33
3.3.1	Por Que Ilhar?.....	33
3.3.2	Onde Ilhar?	35
3.3.3	Ilhamento Nível 1	35
3.3.4	Ilhamento Nível 2	36
3.4	IMPLEMENTAÇÃO DAS PROTEÇÕES DE ILHAMENTO	37
3.4.1	Modelagem dos Relés 27 / 59	38
3.4.2	Modelagem dos Relés 32P / 32Q	38
3.4.3	Modelagem dos Relés 50 / 51	38
3.4.4	Modelagem do Relé 67.....	39
3.4.5	Modelagem dos Relés 81U / 81O.....	41
3.4.6	Modelagem dos Relés 81R_U / 81R_O	41
3.4.7	Modelagem do Relé 81RF.....	42
3.4.8	Modelagem dos Esquemas da Literatura.....	43
3.4.9	Relés Não Utilizados	45
3.4.10	Modelagem do Descarte de Cargas	45
3.4.11	Proteções de Ilhamento Propostas	46
3.5	CENÁRIOS PARA AS SIMULAÇÕES	49
CAPÍTULO 4 ESTUDO DE CASO		51
4.1	INTRODUÇÃO	51
4.2	O SISTEMA TESTE.....	51
4.3	VALIDAÇÃO DO MODELO	54
4.3.1	Validação com Perturbações Locais.....	54
4.3.2	Validação com Perturbações Sistêmicas	57
4.4	AJUSTES DAS PROTEÇÕES	61
4.4.1	Equações para os Relés de Frequência	61
4.4.2	Manuais dos Relés	63
4.4.3	Sugestões da Literatura.....	65

4.4.4	Ajustes do ERAC	67
4.4.5	Limites e Procedimentos Regulatórios	68
4.4.6	Dados das Proteções Existentes na Indústria.....	69
4.4.7	Ajustes Propostos	71
4.5	CENÁRIOS DE SUBFREQUÊNCIA	73
4.5.1	Perturbações Reais no SIN	73
4.5.2	Afundamentos de Frequência	75
4.5.3	Colapsos de Frequência	78
4.5.4	Resumo dos Cenários de Subfrequência	81
4.5.5	Abertura da Interconexão Indústria-UTE	82
4.6	CENÁRIOS DE SOBREFREQUÊNCIA	82
4.6.1	Perda de Blocos de Carga e Curto-Circuito	82
4.6.2	Abertura da Interconexão UTE-SIN.....	85
4.6.3	Resumo dos Cenários de Sobrefrequência	89
4.7	CENÁRIOS DE SUBTENSÃO.....	90
4.7.1	Curto-Circuito.....	90
4.7.2	Afundamentos de Tensão	90
4.7.3	Perda de uma Subestação Relevante	90
4.7.4	Colapso de Tensão.....	92
4.7.5	Resumo dos Cenários de Subtensão	93
4.8	CENÁRIOS DE SOBRETENSÃO.....	94
4.9	CENÁRIOS DE DESCARTE DE CARGAS NA INDÚSTRIA	94
4.10	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	98
4.10.1	Desempenho com Ajustes Propostos.....	98
4.10.2	Desempenho com Ajustes Modificados	101
4.10.3	Desempenho com os Ajustes Finais	104
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES.....		107
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	107
5.2	TRABALHOS FUTUROS	109
5.3	MENSAGEM FINAL.....	110
CAPÍTULO 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		111
ANEXOS		115

ANEXO I – GRAFICOS DAS ATUAÇÕES	115
Gráficos: Ajustes Propostos – Perturbação Real.....	115
Gráficos: Ajustes Propostos – Colapso de Frequência	116
Gráficos: Ajustes Propostos – Abertura LT UTE-SIN	119
Gráficos: Ajustes Propostos – Colapso de Tensão.....	123
Gráficos: Ajustes Modificados – Colapso de Frequência.....	125
Gráficos: Ajustes Modificados – Colapso de Tensão	127
ANEXO II – CÓDIGOS NO ANATEM	128
Código CDU (ANATEM): Esquema de Proteção de Ilhamento Nível 1	128
Código CDU (ANATEM): Esquema de Proteção de Ilhamento Nível 2	129
ANEXO III – DIAGRAMA DE BLOCOS 81RF	137
Diagrama Parte 1 – Monitoração da Frequência.....	137
Diagrama Parte 2 – Lógica 81RF.....	138

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: TOPOLOGIAS DE ILHAMENTO A SEREM ESTUDADAS NESTE TRABALHO.	2
FIGURA 2: MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO. DESTAQUE AOS MAIS PERTINENTES NESTE TRABALHO.	12
FIGURA 3: CARACTERÍSTICA DO ELEMENTO 81RF. (FONTE: ANNE ET AL., 2016).....	23
FIGURA 4: LÓGICA DE ATUAÇÃO 81RF. (FONTE: ANNE ET AL., 2016)	24
FIGURA 5: LÓGICA DO ESQUEMA DE ILHAMENTO DE UMA GRANDE INDÚSTRIA QUÍMICA AUTOPRODUTORA (AUDRING; LERCH, 2011).	25
FIGURA 6: LÓGICA DO ESQUEMA DE ILHAMENTO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL AUTOPRODUTORA TÍPICA (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999).	27
FIGURA 7: (A) ESQUEMA BASEADO EM SUBTENSÃO MONOFÁSICA NAS TRÊS FASES SIMULTANEAMENTE; (B) ESQUEMA BASEADO NA SUBTENSÃO DE SEQUÊNCIA POSITIVA (FONTE: MOZINA, 2007).	29
FIGURA 8: TOPOLOGIA DO SISTEMA NO ILHAMENTO NÍVEL 1.	36
FIGURA 9: TOPOLOGIA DO SISTEMA NO ILHAMENTO NÍVEL 2.	37
FIGURA 10: (A) REGIÃO DE ATUAÇÃO DO RELÉ 67 ORIGINAL DO ANATEM NO PLANO R-X (FONTE: CEPEL, 2019). (B) COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA IMPEDÂNCIA TÍPICA VISTA PELO RELÉ DURANTE CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NO FIM DA LINHA (FONTE: SIQUEIRA, 2007). (C) REGIÃO DE ATUAÇÃO DA FUNÇÃO 67 IMPLEMENTADA. (D) REGIÃO DE ATUAÇÃO DA FUNÇÃO 67 SOBREPOSTA À IMPEDÂNCIA VARIANDO NO PLANO R-X DURANTE UMA FALTA TÍPICA.	40
FIGURA 11: LÓGICA IMPLEMENTADA COM BASE NO ESQUEMA AUDRING-LERCH (2011). 43	
FIGURA 12: LÓGICA IMPLEMENTADA COM BASE NO ESQUEMA RAJAMANI-HAMBARDE (1999)	44
FIGURA 13: LÓGICA IMPLEMENTADA COM BASE NO ESQUEMA MOZINA (2007).....	44
FIGURA 14: LÓGICA PROPOSTA PARA O ILHAMENTO NÍVEL 1.	47
FIGURA 15: LÓGICA PROPOSTA PARA O ILHAMENTO NÍVEL 2.	48
FIGURA 16: DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO DO SISTEMA ELÉTRICO PROPOSTO.	52
FIGURA 17: DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA NO ANAREDE.....	53
FIGURA 18: OSCILOGRAFIA REAL DO PRIMEIRO ILHAMENTO INDÚSTRIA-UTE, COM 1 MÁQUINA CONECTADA. VELOCIDADE DO ROTOR: CURVA EM AZUL.	55
FIGURA 19: VALIDAÇÃO DO MODELO ANATEM - COMPARAÇÃO NO PRIMEIRO ILHAMENTO.	55

FIGURA 20: OSCILOGRAFIA REAL DO SEGUNDO ILHAMENTO INDÚSTRIA-UTE, COM 2 MÁQUINAS CONECTADAS. VELOCIDADE DO ROTOR: CURVA EM AZUL E CURVA EM PRETO.	56
FIGURA 21: VALIDAÇÃO DO MODELO ANATEM - COMPARAÇÃO NO SEGUNDO ILHAMENTO.	56
FIGURA 22: FREQUÊNCIA OBSERVADA PELA PMU DA UFPA NA PERTURBAÇÃO DE 28/01/2018.(FONTE: ONS, 2019).....	57
FIGURA 23: FREQUÊNCIA OBSERVADA PELA PMU DA SE-FOZ DO IGUAÇU E PMU DA UFPA NA PERTURBAÇÃO DE 03/06/2018. (FONTE: ONS, 2019).....	58
FIGURA 24: FREQUÊNCIA OBSERVADA PELA PMU DA SE-FOZ DO IGUAÇU, PMU DA UFRGS E PMU DA UNIPAMPA NA PERTURBAÇÃO DE 05/08/2018. (FONTE: ONS, 2019).....	58
FIGURA 25: COMPARATIVO DAS 3 PERTURBAÇÕES SISTÊMICAS.....	59
FIGURA 26: VALIDAÇÃO NO ANATEM DA OCORRÊNCIA ENVOLVENDO BLOQUEIO DO BIPOLO XINGU-ESTREITO. DESLIGADAS TAMBÉM AS BARRAS DE GERAÇÃO Nº 6424, 510, 303, 5061, 520.....	60
FIGURA 27: VALIDAÇÃO NO ANATEM DAS OCORRÊNCIAS ENVOLVENDO BLOQUEIO DOS 2 BIPOLOS FOZ DO IGUAÇU/IBIÚNA. DESLIGADAS TAMBÉM AS BARRAS DE GERAÇÃO Nº 6425 E 11.....	60
FIGURA 28: LIMITES PARA AJUSTES DA FUNÇÃO df/dt – TRECHOS DO MANUAL DE UM RELÉ COMERCIAL. (FONTE: ABB, 2002).....	63
FIGURA 29: FAIXAS DE AJUSTES DA FUNÇÃO 81R – TRECHOS DO MANUAL DE UM RELÉ COMERCIAL. (FONTE: SEL, 2021).....	64
FIGURA 30: AJUSTE DA FUNÇÃO 81R <i>VERSUS</i> JANELA DE TEMPO – TRECHOS DO MANUAL DE UM RELÉ COMERCIAL. (FONTE: SEL, 2021).....	64
FIGURA 31: CARACTERÍSTICAS E AJUSTES DA FUNÇÃO 81RF – TRECHOS DO MANUAL DE UM RELÉ COMERCIAL. (FONTE: SEL, 2021).....	65
FIGURA 32: FREQUÊNCIA [Hz] NAS BARRAS DA INDÚSTRIA E DA UTE – SIMULAÇÃO DE PERTURBAÇÃO REAL NO SIN: ELOS FOZ-IBIUNA.	74
FIGURA 33: TENSÃO [pu] NAS BARRAS DA INDÚSTRIA E DA UTE – SIMULAÇÃO DE PERTURBAÇÃO REAL NO SIN: ELOS FOZ-IBIUNA.	74
FIGURA 34: FREQUÊNCIA [Hz] NAS BARRAS DA INDÚSTRIA E DA UTE – SIMULAÇÃO DE PERTURBAÇÃO REAL NO SIN: ELO XINGU-ESTREITO.....	75

FIGURA 35: TENSÃO [p.u.] NAS BARRAS DA INDÚSTRIA E DA UTE – SIMULAÇÃO DE PERTURBAÇÃO REAL NO SIN: ELO XINGU-ESTREITO.....	75
FIGURA 36: FREQUÊNCIA [Hz] NA BARRA DA INDÚSTRIA – COMPARAÇÃO DOS CASOS DE AFUNDAMENTOS DE FREQUÊNCIA.	77
FIGURA 37: TENSÃO [p.u.] NA BARRA DA INDÚSTRIA – COMPARAÇÃO DOS CASOS DE AFUNDAMENTOS DE FREQUÊNCIA.	77
FIGURA 38: COMPORTAMENTO DA FREQUÊNCIA [Hz] NO CASO SIMULADO (CASO 4: MAIS SEVERO PARA PERTURBAÇÕES LOCAIS) E NAS PERTURBAÇÕES REAIS DO SIN.....	78
FIGURA 39: COLAPSOS DE FREQUÊNCIA (COMPORTAMENTO DA FREQUÊNCIA [Hz] EM DIFERENTES SIMULAÇÕES).....	80
FIGURA 40: COLAPSOS DE FREQUÊNCIA (COMPORTAMENTO DA TENSÃO [p.u.] EM DIFERENTES SIMULAÇÕES).....	80
FIGURA 41: RESUMO DOS CENÁRIOS DE SUBFREQUÊNCIA.....	81
FIGURA 42: FREQUÊNCIA [Hz] NA BARRA DA INDÚSTRIA – COMPARAÇÃO DOS CASOS DE SOBREFREQUÊNCIA.....	84
FIGURA 43: TENSÃO [p.u.] NA BARRA DA INDÚSTRIA – COMPARAÇÃO DOS CASOS DE SOBREFREQUÊNCIA.....	84
FIGURA 44: FREQUÊNCIA [Hz] NA BARRA DA INDÚSTRIA, EM TRÊS CENÁRIOS DE ABERTURA DA INTERCONEXÃO UTE-SIN (UTE SEM RV).....	86
FIGURA 45: FREQUÊNCIA [Hz] NA BARRA DA INDÚSTRIA, RESPOSTA DO SISTEMA COM REGULADOR DE VELOCIDADE DA UTE EM TRÊS CENÁRIOS DIFERENTES DE AJUSTES (A, B, C), E EM TRÊS SITUAÇÕES OPERACIONAIS DOS GERADORES (OTIMISTA, INTERMEDIÁRIA, PESSIMISTA).....	87
FIGURA 46: FREQUÊNCIA [Hz] NA BARRA DA INDÚSTRIA, NO CENÁRIO “OTIMISTA”, DURANTE A ABERTURA DA INTERCONEXÃO UTE-SIN (ILHAMENTO). RESPOSTA DO SISTEMA PARA QUATRO CENÁRIOS DE AJUSTES DO REGULADOR DE VELOCIDADE DA UTE.	88
FIGURA 47: FREQUÊNCIA [Hz] NA BARRA DA INDÚSTRIA, NO CENÁRIO “INTERMEDIÁRIO”, DURANTE A ABERTURA DA INTERCONEXÃO UTE-SIN (ILHAMENTO). RESPOSTA DO SISTEMA PARA QUATRO CENÁRIOS DE AJUSTES DO REGULADOR DE VELOCIDADE DA UTE.	88
FIGURA 48: FREQUÊNCIA [Hz] NA BARRA DA INDÚSTRIA, NO CENÁRIO “PESSIMISTA”, DURANTE A ABERTURA DA INTERCONEXÃO UTE-SIN (ILHAMENTO). RESPOSTA DO	

SISTEMA PARA QUATRO CENÁRIOS DE AJUSTES DO REGULADOR DE VELOCIDADE DA UTE.	89
FIGURA 49: FREQUÊNCIA [Hz] NA BARRA DA INDÚSTRIA, DURANTE PERDA DA SE CACHOEIRA PAULISTA.....	91
FIGURA 50: TENSÃO [pu] NA BARRA DA INDÚSTRIA, DURANTE PERDA DA SE CACHOEIRA PAULISTA.	91
FIGURA 51: COLAPSOS DE TENSÃO (COMPORTAMENTO DA TENSÃO [pu] EM DIFERENTES SIMULAÇÕES).....	93
FIGURA 52: COLAPSOS DE TENSÃO (COMPORTAMENTO DA FREQUÊNCIA [Hz] EM DIFERENTES SIMULAÇÕES).....	93
FIGURA 53: FREQUÊNCIA [Hz] NA BARRA DA INDÚSTRIA DURANTE A ABERTURA DA INTERCONEXÃO INDÚSTRIA-UTE, SEM DESCARTE DE CARGAS. COMPORTAMENTO EM TRÊS CENÁRIOS OPERACIONAIS.....	96
FIGURA 54: TENSÃO [Hz] NA BARRA DA INDÚSTRIA DURANTE A ABERTURA DA INTERCONEXÃO INDÚSTRIA-UTE, SEM DESCARTE DE CARGAS. COMPORTAMENTO EM TRÊS CENÁRIOS OPERACIONAIS.....	96
FIGURA 55: ABERTURA DA INTERCONEXÃO INDÚSTRIA-UTE NO CENÁRIO “OTIMISTA”. COMPARAÇÃO DA FREQUÊNCIA [Hz] COM E SEM DESCARTE DE CARGAS.	97
FIGURA 56: ABERTURA DA INTERCONEXÃO INDÚSTRIA-UTE NO CENÁRIO “INTERMEDIÁRIO”. COMPARAÇÃO DA FREQUÊNCIA [Hz] COM E SEM DESCARTE DE CARGAS.	97
FIGURA 57: ABERTURA DA INTERCONEXÃO INDÚSTRIA-UTE NO CENÁRIO “PESSIMISTA”. COMPARAÇÃO DA FREQUÊNCIA [Hz] COM E SEM DESCARTE DE CARGAS.	98
FIGURA 58: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBFREQ., ITEM 4.5.1, CASO “PERTURBAÇÃO REAL SIN ELOS XINGU-ESTREITO”. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO 8IRF_U EM 2,26 s (CURVA AZUL).	115
FIGURA 59: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBFREQ. / SUBTENSÃO, ITEM 4.5.3, COLAPSO DE FREQUÊNCIA, CASO 1. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO 8IRF_U EM 0,42 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUOU FUNÇÃO 8IR_U EM 2,21 s (CURVA AZUL)..	116
FIGURA 60: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBFREQ. / SUBTENSÃO, ITEM 4.5.3, COLAPSO DE FREQUÊNCIA, CASO 2. FREQUÊNCIA [Hz]	

NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_U$ EM 0,44 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUOU FUNÇÃO $8IR_U$ EM 2,52 s (CURVA AZUL).. 116

FIGURA 61: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBFREQ. /

SUBTENSÃO, ITEM 4.5.3, COLAPSO DE FREQUÊNCIA, CASO 3. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_U$ EM 2,3 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUARAM: ESQUEMA $32P/8IU$ EM 3,37 s (CURVA AZUL), E FUNÇÃO $8IU$ EM 7,21 s (CURVA ROSA)..... 117

FIGURA 62: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBFREQ. /

SUBTENSÃO, ITEM 4.5.3, COLAPSO DE FREQUÊNCIA, CASO 4. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_U$ EM 3,21 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUARAM: PROTEÇÃO $8IR_U$ EM 3,5 s (CURVA AZUL), ESQUEMA $32P/8IU$ EM 4,37 s (CURVA AZUL), E FUNÇÃO $8IU$ EM 7,43 s (CURVA ROSA). 117

FIGURA 63: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBFREQ. /

SUBTENSÃO, ITEM 4.5.3, COLAPSO DE FREQUÊNCIA, CASO 5. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_U$ EM 2,86 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUARAM: PROTEÇÃO $8IR_U$ EM 3,11 s (CURVA AZUL), E FUNÇÃO $8IU$ EM 6,9 s (CURVA ROSA);..... 118

FIGURA 64: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SOBREFREQ, ITEM 4.6.2,

ABERTURA DA INTERCONEXÃO UTE-SIN, CASO “SEM RV/OTIMISTA”. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_O$ EM 0,41 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUOU O FUNÇÃO $8I_U$ EM 4,21 s (CURVA ROSA). 119

FIGURA 65: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SOBREFREQ, ITEM 4.6.2,

ABERTURA DA INTERCONEXÃO UTE-SIN, CASO “SEM RV/INTERMEDIÁRIO”. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_O$ EM 0,41 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUARAM: FUNÇÃO $8IR_O$ EM 0,61 s (CURVA AZUL), E FUNÇÃO $8I_U$ EM 3,87 s (CURVA ROSA). 119

FIGURA 66: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SOBREFREQ, ITEM 4.6.2,

ABERTURA DA INTERCONEXÃO UTE-SIN, CASO “SEM RV/PESSIMISTA”. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_O$ EM 0,41 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUARAM: FUNÇÃO $8IR_O$ EM 0,48 s (CURVA AZUL), E FUNÇÃO $8I_U$ EM 3,61 s (CURVA ROSA). 120

FIGURA 67: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SOBREFREQ, ITEM 4.6.2, ABERTURA DA INTERCONEXÃO UTE-SIN, CASO “COM REGULADOR DE VELOCIDADE / AJUSTE-B / OTIMISTA”. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_O$ EM 0,41 s (CURVA VERDE).	120
FIGURA 68: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SOBREFREQ, ITEM 4.6.2, ABERTURA DA INTERCONEXÃO UTE-SIN, CASO “COM REGULADOR DE VELOCIDADE / AJUSTE-C / OTIMISTA”. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_O$ EM 0,41 s (CURVA VERDE).	121
FIGURA 69: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SOBREFREQ, ITEM 4.6.2, ABERTURA DA INTERCONEXÃO UTE-SIN, CASO “COM REGULADOR DE VELOCIDADE / AJUSTE-C / INTERMEDIÁRIO”. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_O$ EM 0,41 s (CURVA VERDE).....	121
FIGURA 70: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SOBREFREQ, ITEM 4.6.2, ABERTURA DA INTERCONEXÃO UTE-SIN, CASO “COM REGULADOR DE VELOCIDADE / AJUSTE-C / PESSIMISTA”. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_O$ EM 0,41 s (CURVA VERDE).	122
FIGURA 71: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBTENSÃO, ITEM 4.7.4, COLAPSO DE TENSÃO, CASO 1. TENSÃO NA UTE, À ESQUERDA, E FREQUÊNCIA NA INDÚSTRIA, À DIREITA (CURVAS VERMELHAS). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO $8IRF_U$ EM 3,01 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUOU FUNÇÃO $8IR_U$ EM 3,22 s (CURVA AZUL).	123
FIGURA 72: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBTENSÃO, ITEM 4.7.4, COLAPSO DE TENSÃO, CASO 2. TENSÃO NA UTE, À ESQUERDA, E FREQUÊNCIA NA INDÚSTRIA, À DIREITA (CURVAS VERMELHAS). ILHAMENTO PELO ESQUEMA NÍVEL 1 EM 1,21 s (CURVA AZUL). EM SEGUIDA ATUARAM: ESQUEMA 67/27 EM 2,43 s (CURVA VERDE), FUNÇÃO $8IRF_O$ EM 2,62 s (CURVA ROSA), E FUNÇÃO $8IRF_U$ EM 4,45 s (CURVA PRETA).	123
FIGURA 73: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBTENSÃO, ITEM 4.7.4, COLAPSO DE TENSÃO, CASO 3. TENSÃO NA UTE, À ESQUERDA, E FREQUÊNCIA NA INDÚSTRIA, À DIREITA (CURVAS VERMELHAS). ILHAMENTO PELO ESQUEMA NÍVEL 1 EM 1,85 s (CURVA AZUL).....	124
FIGURA 74: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBTENSÃO, ITEM 4.7.4, COLAPSO DE TENSÃO, CASO 5. TENSÃO NA UTE, À ESQUERDA, E FREQUÊNCIA NA INDÚSTRIA, À DIREITA (CURVAS VERMELHAS). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO	

81RF_U EM 2,42 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUARAM: FUNÇÃO 81RF_U EM 2,99 s (CURVA AZUL), E ESQUEMA 67/27 EM 3,12 s (CURVA ROSA).	124
FIGURA 75: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBFREQ. / SUBTENSÃO, ITEM 4.5.3, COLAPSO DE FREQUÊNCIA, CASO 1. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO 81RF_U EM 0,42 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUOU FUNÇÃO 81R_U EM 2,21 s (CURVA AZUL), .	125
FIGURA 76: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBFREQ. / SUBTENSÃO, ITEM 4.5.3, COLAPSO DE FREQUÊNCIA, CASO 2. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO 81RF_U EM 0,44 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUOU FUNÇÃO 81R_U EM 2,52 s (CURVA AZUL). .	125
FIGURA 77: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBFREQ. / SUBTENSÃO, ITEM 4.5.3, COLAPSO DE FREQUÊNCIA, CASO 4. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO 81RF_U EM 3,21 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUARAM: FUNÇÃO 81R_U EM 3,5 s (CURVA AZUL), ESQUEMA 32P/81U EM 4,37 s (CURVA AZUL), E FUNÇÃO 81U EM 7,43 s (CURVA ROSA);	126
FIGURA 78: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBFREQ. / SUBTENSÃO, ITEM 4.5.3, COLAPSO DE FREQUÊNCIA, CASO 5. FREQUÊNCIA [Hz] NA INDÚSTRIA (CURVA VERMELHA). ILHAMENTO PELA FUNÇÃO 81RF_U EM 2,86 s (CURVA VERDE). EM SEGUIDA ATUARAM: FUNÇÃO 81R_U EM 3,11 s (CURVA AZUL), E FUNÇÃO 81U EM 6,9 s (CURVA ROSA);	126
FIGURA 79: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBTENSÃO, ITEM 4.7.4, COLAPSO DE TENSÃO, CASO 3. TENSÃO NA UTE, À ESQUERDA, E FREQUÊNCIA NA INDÚSTRIA, À DIREITA (CURVAS VERMELHAS). ILHAMENTO PELO ESQUEMA NÍVEL 1 EM 1,65 s (CURVA AZUL).	127
FIGURA 80: RESULTADO GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DO CENÁRIO SUBTENSÃO, ITEM 4.7.4, COLAPSO DE TENSÃO, CASO 4. TENSÃO NA UTE, À ESQUERDA, E FREQUÊNCIA NA INDÚSTRIA, À DIREITA (CURVAS VERMELHAS). ILHAMENTO PELO ESQUEMA NÍVEL 1 EM 4,46 s (CURVA AZUL).	127
FIGURA 81: DIAGRAMA DE BLOCOS DA FUNÇÃO 81RF. PARTE 1: MONITORAÇÃO DA FREQUÊNCIA.	137
FIGURA 82: DIAGRAMA DE BLOCOS DA FUNÇÃO 81RF. PARTE 2: LÓGICA 81RF.	138

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA PERMITIDA (ANEEL, 2021).....	10
TABELA 2: TENSÃO DE ATENDIMENTO NOS PONTOS DE CONEXÃO EM TENSÃO NOMINAL IGUAL OU SUPERIOR A 69 kV E INFERIOR A 230 kV (ANEEL, 2021).....	11
TABELA 3: VALORES DAS CONSTANTES PARA CURVAS IEC 60255-3.....	15
TABELA 4: VALORES DAS CONSTANTES PARA CURVAS ANSI C37.90.	15
TABELA 5: VALORES DAS CONSTANTES PARA CURVAS ANSI C37.112.	16
TABELA 6: TEMPOS DE DETECÇÃO DOS RELÉS DE FREQUÊNCIA, CALCULADOS (VIEIRA ET AL., 2008).....	62
TABELA 7: RESUMO DOS AJUSTES UTILIZADOS NO ARTIGO (AUDRING; LERCH, 2011) PARA SEU ESQUEMA DE PROTEÇÃO.	65
TABELA 8: RESUMO DOS AJUSTES SUGERIDOS NO ARTIGO (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999) PARA SEU ESQUEMA DE PROTEÇÃO.	66
TABELA 9: AJUSTES SUGERIDOS NO ARTIGO (MOZINA, 2007) PARA SEU ESQUEMA DE PROTEÇÃO CONTRA COLAPSO DE TENSÃO.	66
TABELA 10: RESUMO DOS AJUSTES UTILIZADOS NO ARTIGO (SCHIEFEN ET AL., 2006) PARA SEU ESQUEMA DE DESCARTE DE CARGAS.	67
TABELA 11: AJUSTES DO ERAC PARA AS REGIÕES GEOELÉTRICAS DO SIN (ONS, 2020A).	68
TABELA 12: AJUSTES ERAC PARA A REGIÃO GEOELÉTRICA SUDESTE E CENTRO-OESTE (ONS, 2020A).	68
TABELA 13: VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA PERMITIDA (ANEEL, 2021).....	69
TABELA 14: TENSÃO DE ATENDIMENTO NOS PONTOS DE CONEXÃO EM TENSÃO NOMINAL IGUAL OU SUPERIOR A 69 kV E INFERIOR A 230 kV (ANEEL, 2021).....	69
TABELA 15: NÍVEL DE CONTRIBUIÇÃO DA INDÚSTRIA PARA CURTO-CIRCUITO EM 138kV NA ENTRADA DA PLANTA, CORRENTE EM AMPÈRE (REFERÊNCIA EM 138 kV).	70
TABELA 16: PROTEÇÕES EXISTENTES NAS LINHAS DE ENTRADA DA INDÚSTRIA (REFERÊNCIA EM 138 kV).	70
TABELA 17: PROTEÇÕES EXISTENTES NOS GERADORES DA INDÚSTRIA (REFERÊNCIA EM 13,8 kV).	71
TABELA 18: AJUSTES PROPOSTOS PARA O ESQUEMA DE ILHAMENTO NÍVEL 1.....	71
TABELA 19: AJUSTES PROPOSTOS PARA O ESQUEMA DE ILHAMENTO NÍVEL 2.....	72

TABELA 20: EQUIPAMENTOS DESLIGADOS (SE GERADOR) OU COM POTÊNCIA ATIVA DOBRADA (SE CARGA), PARA AS SIMULAÇÕES DE AFUNDAMENTO DE FREQUÊNCIA.	76
TABELA 21: EQUIPAMENTOS DESLIGADOS PARA AS SIMULAÇÕES DE COLAPSO DE FREQUÊNCIA.	79
TABELA 22: PERDA DE BLOCOS DE CARGA OU APLICAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO PARA AS SIMULAÇÕES DE SOBREFREQUÊNCIA.	83
TABELA 23: EQUIPAMENTOS DESLIGADOS PARA AS SIMULAÇÕES DE COLAPSO DE TENSÃO.	92
TABELA 24: CIRCUITOS PRÉ-DEFINIDOS PARA ATUAÇÃO NO DESCARTE DE CARGAS.	95
TABELA 25: DESEMPENHO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO PROPOSTO: TEMPOS DE DISPARO DAS PROTEÇÕES QUE ATUARAM NAS SIMULAÇÕES.	99
TABELA 26: AJUSTE MODIFICADO PARA O ESQUEMA DE ILHAMENTO NÍVEL 1.	101
TABELA 27: AJUSTES MODIFICADOS PARA O ESQUEMA DE ILHAMENTO NÍVEL 2.	101
TABELA 28: DESEMPENHO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO COM OS AJUSTES MODIFICADOS: TEMPOS DE DISPARO DAS PROTEÇÕES QUE ATUARAM NAS SIMULAÇÕES.	102
TABELA 29: AJUSTES PROPOSTOS PARA O ESQUEMA DE ILHAMENTO NÍVEL 1, REVISÃO FINAL.	104
TABELA 30: AJUSTES PROPOSTOS PARA O ESQUEMA DE ILHAMENTO NÍVEL 2, REVISÃO FINAL.	105
TABELA 31: DESEMPENHO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO COM OS AJUSTES FINAIS: TEMPOS DE DISPARO DAS PROTEÇÕES QUE ATUARAM NAS SIMULAÇÕES.	106

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A indústria, de uma forma geral, tem papel de destaque no crescimento da economia, é um dos mais importantes alicerces da evolução da sociedade e contribui para a inovação e a evolução da tecnologia no país. Por ser um setor que tradicionalmente gera empregos, as regiões mais industrializadas do Brasil são também as mais desenvolvidas em diversos outros aspectos.

Um dos grandes problemas enfrentados pela indústria é a perda das “utilidades” de processo, que são os insumos auxiliares necessários para a operacionalidade do processo na indústria, como vapor, água, energia elétrica, ar comprimido etc. No caso específico da energia elétrica, a maior consequência na interrupção de seu fornecimento é a paralisação da produção na indústria. Dependendo do tipo de empresa e da linha de produção, há perda de matéria-prima, produtos e horas ou até dias de trabalho, além de questões ambientais como índices de emissões, manejo de efluentes e outros processos. Vasconcelos e Grinbaum (1999) citam alguns exemplos: nas indústrias de alumínio os fornos esfriam e o alumínio se solidifica dentro dos fornos; na indústria alimentícia há risco de estragar produtos, como congelados e frios; as indústrias farmacêuticas só operam com rigorosos controles de temperatura e filtragem, onde uma parada pode levar à perda de lotes que estão na linha de produção; há também as indústrias de ciclo contínuo, como celulose, fundição, vidros e outras, onde o tempo para retomar a operação é crucial.

Um **autoprodutor** é definido pela ANEEL (2021) como "pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo, podendo, mediante autorização da

ANEEL, comercializar seus excedentes de energia". Muitas grandes indústrias são autoprodutoras, na maioria das vezes através da cogeração (produção combinada de calor e energia elétrica), o que diminui o custo da produção de vapor utilizado no processo industrial e aumenta a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica para a planta, podendo até comercializar o excedente de energia caso a geração local ultrapasse a demanda de suas cargas (MORAIS, 2014).

De acordo com (IEEE, 2009), uma **ilha** é definida como “a condição na qual uma porção da área do sistema elétrico de potência é energizado somente por uma ou mais fontes locais através de Pontos de Acoplamento Comum associados, enquanto essa porção de área do sistema é eletricamente separada do restante do sistema”.

Nesse contexto, no caso de uma grande **indústria** autoprodutora interconectada a uma Usina Termelétrica (**UTE**), e esta última por sua vez conectada ao Sistema Interligado Nacional (**SIN**), é natural pensar que na ocorrência de uma perturbação capaz de levar o sistema todo ao colapso, a indústria e a UTE poderiam juntas se desconectar do SIN e formar uma ilha eletricamente estável, mantendo a continuidade operacional da indústria. Ou pelo menos de suas cargas mais prioritárias, numa situação de *backup* onde a indústria autoprodutora se tornaria uma ilha isolada. A figura 1 apresenta esquematicamente essas situações.

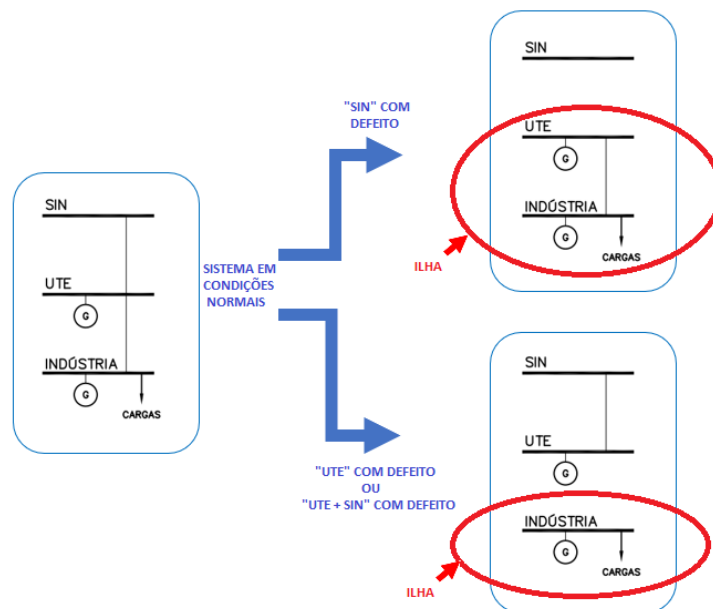


Figura 1: Topologias de ilha a serem estudadas neste trabalho.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é propor um esquema de proteção, baseado nas funções de proteção existentes e disponíveis nos relés comerciais (listadas no item 2.3), que detecte uma situação de iminente risco de colapso elétrico na indústria autoprodutora, e a separe do sistema com defeito, formando uma ilha contendo a indústria e uma UTE interconectadas entre si, porém isoladas do SIN. Como *backup*, o sistema de proteção deve executar um segundo nível de ilhamento, desconectando a indústria da UTE se necessário, de forma que a indústria autoprodutora se torne uma ilha isolada, suprida apenas por sua própria geração interna.

O trabalho contempla também o descarte de geração na UTE e o descarte de cargas na indústria, para os casos em que se fizer necessário, para equilibrar o balanço de potência carga-geração e manter a estabilidade na ilha.

1.3 Revisão Bibliográfica

Recursivos cenários de baixa vazão hidrológica no Brasil conjugados com o aumento da mini e microgeração distribuída, motivam cada vez mais concessionárias e autoprodutores a operarem partes do sistema elétrico ilhadas, quando excepcionalmente necessário. Muitos estudos relacionados ao tema “ilhamento” têm sido realizados, e não apenas no contexto nacional. Nesta seção, apresentam-se alguns desses trabalhos.

Em (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999) os autores propõem combinações de funções de proteção para ilhamento de uma planta industrial autoprodutora. O artigo não trata de um caso específico, mas sim de aspectos genéricos de uma indústria típica conectada a um sistema de 132 kV a 220 kV, com 5 MW a 40 MW de geração. As cargas são segregadas de acordo com sua prioridade em: **essenciais**, **importantes** e **comuns**, respectivamente relacionadas à segurança de equipamentos ou pessoas, à continuidade na produção e aos processos não-essenciais ou não-importantes. Os autores apresentam um esquema típico em formato de diagrama lógico, e descrevem várias combinações de proteções tipicamente usadas no ilhamento de uma indústria autoprodutora, além de

detalhes a serem considerados no esquema de descarte de cargas após a execução do ilhamento.

Em (VIEIRA JR.; FREITAS; FRANÇA, 2005) os autores propõem uma metodologia para avaliar o desempenho de relés baseados em medidas de frequência empregados na detecção de ilhamento de geradores síncronos utilizados em Geração Distribuída (GD). A metodologia é baseada num conjunto de curvas relacionando tempo de detecção de ilhamento *versus* desbalanço de potência ativa e no conceito de desbalanço crítico de potência, obtidas utilizando simulações dinâmicas não-lineares e variando-se o perfil de geração/carga na rede ilhada. O trabalho destaca que a capacidade de detecção de ilhamento desses relés e os principais fatores que ditam seus comportamentos são o desbalanço de potência ativa, a constante de inércia do gerador síncrono e os ajustes dos relés.

Em (VIEIRA et al., 2006) os autores propõem um método para determinação direta do comportamento dinâmico do relé de taxa de variação de frequência (em inglês, ROCOF – *Rate Of Change Of Frequency*) por simples uso de fórmulas que podem economizar tempo de planejamento e implementação de sistemas de proteção anti-ilhamento, o que geralmente exige numerosas simulações dinâmicas. Tais fórmulas são desenvolvidas resolvendo-se analiticamente os modelos matemáticos que descrevem o gerador síncrono e o relé.

Em (VIEIRA et al., 2008) os autores ampliam a abrangência do trabalho anterior (VIEIRA et al., 2006) e propõem um conjunto de fórmulas para determinar diretamente, de forma analítica, o comportamento dinâmico, não somente do relé ROCOF, mas também de outros relés baseados em medidas de frequência, que são os mais empregados em esquemas de ilhamento. São analisados o relé de sub/sobre frequência, o relé de taxa de variação de frequência (ROCOF) e o relé de deslocamento de fase ou “salto vetorial” (em inglês *Vector Surge*, *Vector Shift* ou *Voltage Jump relay*). As fórmulas analíticas são desenvolvidas em três formatos, para se determinar umas das três seguintes variáveis, conhecendo-se as outras duas: desbalanço de potência ativa, tempo requerido de detecção e ajuste do relé (*pickup*).

Em (SCHIEFEN et al., 2006) os autores apresentam critérios para projeto e implementação de um sistema de controle que detecta a condição de ilha na indústria,

promove o ilhamento se necessário e executa descarte de cargas, com foco nesta última etapa. O cálculo da quantidade de cargas a descartar é feito com base no balanço dinâmico entre a carga e a geração existente no momento pré-ilhamento. Para a aplicação, o autor menciona que foram escolhidos relés com protocolo IEC6150 para comunicação dos dados analógicos a serem processados no cálculo do balanço carga-geração.

Em (SCUTARIU; MACDONALD, 2009) os autores propõem um esquema de proteção contra *blackouts* no sistema de transmissão que pode ser usado por consumidores industriais que possuem geração própria. O esquema emprega a combinação de relés de subfrequência e subtensão, reconhecendo os complexos padrões que caracterizam a cascata de eventos desencadeados pelo *blackout* do sistema de potência. Essas funções são coordenadas para atuação primária ou secundária, dependendo do comportamento das tensões e frequências durante o fenômeno de *blackout*, disparando o comando de ilhamento: em caso de subtensão e subfrequência simultaneamente, atua o relé mais rápido; em caso de subtensão seguida de subfrequência, atua o relé de subtensão como principal e o de subfrequência como backup; em caso de subfrequência sem subtensão, atua o relé de subfrequência.

Em (AUDRING; LERCH, 2011) os autores propõem requisitos e restrições para ilhamento e operação de uma grande indústria química e de processamento, que é um autoprodutor com capacidade de geração superior ao seu consumo interno, composta de duas turbinas Siemens SGT5-3000 (191MW cada) para suprir 200-300 MW de carga, ou 130-180 MW na indisponibilidade de uma das turbinas, dependendo da configuração operacional. É proposto um esquema para ilhamento que combina várias funções de proteção. Os autores afirmam que o desacoplamento só pode ser otimizado com simulações da rede detalhada, e no artigo utilizaram o software PSS®SINCAL.

Em (ANNE et al., 2016) os autores apresentam um caso de uma indústria com dois geradores próprios e interconectada ao sistema elétrico, onde o esquema de detecção de ilhamento originalmente instalado tinha atrasos devido às dificuldades de mudanças de topologia da instalação, onde um evento indesejado poderia resultar em danos aos equipamentos. O artigo apresenta uma solução de detecção confiável para ilhamento, que foi proposta, implementada e testada numa refinaria no Texas, sendo um esquema com dois níveis. O ilhamento primário foi baseado no elemento de frequência 81RF (*“Fast*

Rate of Change of Frequency”), que segundo os autores, é relativamente mais rápido que o elemento ROCOF convencional. Para o ilhamento secundário os autores utilizaram a função direcional de potência. Os autores citam fatores que podem afetar a segurança e o desempenho da proteção no ilhamento: como os contatos auxiliares não refletirem o atual *status* do disjuntor ou a perda de canal de comunicação, que por exemplo inviabilize a transmissão de algum *transfer-trip*.

Em (MOZINA, 2007), o autor propõe um esquema usando a tensão para decidir quando separar eletricamente uma indústria do sistema elétrico externo, tendo em vista que, segundo o autor, a investigação de *blackouts* indica que a causa raiz da grande parte dos distúrbios no sistema de potência é o colapso de tensão, em vez de condições de frequência. Com a premissa de que o colapso de tensão é um evento balanceado, são propostos dois esquemas similares, o primeiro utilizando a tensão fase-neutro em todas as fases simultaneamente, e o segundo utilizando a tensão de sequência positiva. Em ambos os casos há bloqueio do esquema por um segundo ajuste de subtensão ou por tensão de sequência negativa.

Em (MOZINA, 2014), o autor apresenta os aspectos da proteção para a interconexão de uma refinaria no sistema elétrico. São abordadas separadamente as proteções típicas para cada equipamento da refinaria diretamente relacionado com a interconexão: proteções das linhas de transmissão, proteções dos transformadores e proteções do barramento principal da refinaria. São abordadas também a proteção de falha de disjuntor e a proteção de ilhamento. Uma seção do artigo é dedicada aos impactos do aterramento do transformador, onde são destacadas as características do transformador com sistema de aterramento delta-estrela, tipicamente o mais utilizado por refinarias para interconexões com o sistema elétrico, pelas vantagens de o delta no lado de alta tensão minimizar tensões de terceiro harmônico e o bloqueio de correntes de sequência-zero para faltas à terra no lado de baixa tensão.

Observa-se que vários trabalhos são encontrados a respeito de proteção e ilhamento, muitos deles envolvendo plantas industriais. No entanto destaca-se a lacuna hoje existente na literatura a respeito de um ilhamento envolvendo uma indústria com uma usina termelétrica. O presente trabalho, com base nas referências introduzidas acima, entre outras, se propõe a abordar esse tema, que é também o título desta dissertação.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta as principais funções e esquemas de proteção mais utilizados para detecção ou execução de ilhamento, seus conceitos teóricos e fundamentos. São apresentadas as principais perturbações que ocorrem nos sistemas elétricos e suas características. São discutidos os conceitos para o descarte de cargas, os métodos mais utilizados e suas vantagens e desvantagens.

O capítulo 3 apresenta a metodologia do trabalho, com a estruturação de suas etapas. São apresentadas as ferramentas computacionais adotadas, os detalhes para a modelagem do sistema no *software* de simulação, as topologias definidas para o ilhamento e a forma de implementação das proteções no programa computacional. É proposto um esquema de proteção para o ilhamento e são definidos os cenários a se utilizar nas simulações.

O capítulo 4 apresenta um estudo de caso, onde foi aplicado o sistema de proteção proposto através da simulação de um sistema real existente. O sistema teste é descrito, e são apresentadas simulações para validação do modelo. São mostradas as fontes que serviram de subsídio para a definição dos ajustes das proteções para o caso em estudo. São simulados os cenários com o sistema teste e são apresentados os resultados.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

PROTEÇÕES E ESQUEMAS DE ILHAMENTO

2.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentadas as principais funções de proteção e esquemas de proteção utilizados para detecção ou execução do ilhamento.

Proteção é a ciência, a habilidade e a arte na aplicação e ajuste de relés ou fusíveis, ou ambos, para prover máxima sensibilidade a faltas e condições indesejáveis, mas evitar sua operação sob todas as condições permissíveis e toleráveis. Proteção não significa Prevenção, mas sim minimizar a duração do problema e limitar os danos, tempo fora de operação e outros problemas que podem resultar. É importante reconhecer que a "janela de tempo" de decisão na proteção do sistema de potência é muito estreita, e onde faltas podem ocorrer, uma segunda verificação, ou um procedimento para tomada de decisão que envolva tempo adicional, não é desejável (BLACKBURN, 2007).

Tanto uma falha na operação quanto uma operação incorreta podem resultar num maior problema no sistema envolvendo aumento de danos em equipamentos, integridade física das pessoas, e possível longa interrupção de serviço.

2.2 Principais Perturbações no Sistema

2.2.1 Curto-Circuito

Curto-circuito é a passagem de corrente elétrica acima do normal em um circuito devido à redução abrupta da impedância deste. Também chamados de defeitos ou faltas, suas consequências podem ser extremamente danosas no sistema, se não forem prontamente eliminados pelos dispositivos de proteção.

Em média, os defeitos em sistemas de potência ocorrem na seguinte proporção (ALMEIDA; FREITAS, 1995):

- Trifásicos: 5%;
- Bifásicos sem terra: 15%
- Bifásicos com terra: 10%
- Monofásicos: 70%

Os curto-circuitos na linha de entrada da indústria são o caso mais típico de situação em que é necessário ilhamento. Para o caso de curto-circuito em alguma linha da UTE, poderá ou não ser necessário um ilhamento dependendo da topologia particular de cada sistema no momento do defeito.

2.2.2 Subfrequência ou Sobrefrequência

No sistema interligado, o desequilíbrio entre geração e carga reflete em variações de frequência e, eventualmente, em intercâmbios entre áreas de controle que fazem parte deste sistema. O controle da frequência é mantido principalmente pelos reguladores de velocidade dos geradores síncronos.

As subfrequências no sistema elétrico geralmente têm como causa raiz a perda de geração ou acréscimo de cargas no sistema. Também podem ser causadas por defeito na regulação de velocidade da geração. Eventos de menores proporções são usualmente

chamados de afundamento de frequência, enquanto situações de degradação progressiva e irreversível na frequência são chamados de colapso de frequência.

A sobrefrequência é uma perturbação provocada geralmente por perda de uma porção das cargas ou acréscimo de geração. Também pode ser causada por defeito na regulação de velocidade da geração. A sobrefrequência pode causar danos nos equipamentos, como consequência por exemplo de sobrevelocidade e vibração.

As condições da frequência de operação do sistema devem estar de acordo com o PRODIST, cujos requisitos estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 1: Variação de frequência permitida (ANEEL, 2021).

Varição da Frequência	Frequência pode permanecer abaixo de [Hz]	Frequência pode permanecer acima de [Hz]	Por até [s]
Em Condições normais	59,9	60,1	-
Durante recuperação após distúrbios	59,5	60,5	30
Durante distúrbios, com corte de geração ou de carga	56,5	66	0
	58,5	63,5	10
	-	62	30
	57,5	-	5

Relés baseados em medidas de frequência são reconhecidos pela indústria de energia elétrica como os métodos mais simples e eficazes para detectar o ilhamento. Logo, são também os métodos mais difundidos. No entanto, é bem reconhecido que esses dispositivos podem falhar caso o desbalanço de potência ativa no subsistema ilhado seja pequeno. (VIEIRA et al., 2008).

2.2.3 Subtensão ou Sobretensão

As subtensões são decorrentes, principalmente, do carregamento excessivo de circuitos alimentadores. Dentre os problemas causados por subtensões podem-se citar: redução da potência reativa fornecida por bancos de capacitores ao sistema, interrupção da operação de equipamentos eletrônicos, redução da potência de cargas resistivas, elevação do tempo de partida e aumento das correntes do estator em motores de indução, com consequente elevação de temperatura dessas máquinas.

Subtensões podem ser divididas pelo seu comportamento em: afundamento de tensão e colapso de tensão. O afundamento de tensão (do inglês “*voltage sag*”) é uma subtensão passageira de 0,1 a 0,9 pu (IEEE, 2008), geralmente com duração de alguns ciclos. O colapso de tensão é normalmente a consequência de um conjunto de fenômenos que levam a níveis muito baixos a tensão nos barramentos numa parte significativa do sistema. O colapso de tensão pode ser de curto-prazo, quando há uma queda brusca de tensão em poucos segundos, ou de longo-prazo, quando a queda de tensão pode se prolongar por dezenas de minutos.

As sobretensões podem ser transitórias ou temporárias. Sobretensões transitórias são causadas por descargas atmosféricas ou chaveamento de equipamentos, os fenômenos que as originam tem curta duração. As sobretensões temporárias são geralmente causadas por faltas no sistema, perda súbita de carga, condições de ressonância e não-linearidades.

As sobretensões podem resultar em falha na isolação dos equipamentos. Embora transformadores, cabos, disjuntores, TCs, TPs e máquinas rotativas geralmente não apresentem falhas imediatas, tais equipamentos, quando submetidos a repetidas sobretensões, poderão ter a sua vida útil reduzida.

Para sistemas com tensão entre 69kV e 230kV, caso da grande maioria das instalações industriais típicas que são escopo deste trabalho, a magnitude de tensão é classificada de acordo com a Tabela 2 (ANEEL, 2021).

Tabela 2: Tensão de atendimento nos pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV (ANEEL, 2021).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,93TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$
Crítica	$TL < 0,93TR$ ou $TL > 1,07TR$

2.3 Funções de Proteção no Ilhamento

De acordo com (MARCHESAN, 2016), os métodos de detecção de ilhamento podem ser classificados em “Remotos” ou “Locais”, sendo que os métodos remotos, embora sejam geralmente mais efetivos, necessitam de um sistema de comunicação veloz e confiável, tornando-se mais dispendiosos. Os métodos locais só dependem da aquisição de informações disponíveis no ponto de sua instalação, e estão subdivididos em “Passivos”, “Ativos” ou “Híbridos”. Os métodos locais passivos estão fundamentados na interpretação de parâmetros (tensão, corrente, frequência etc.), enquanto os métodos locais ativos provocam algum tipo de perturbação no sistema, geralmente desprezível, mas que na ocorrência de um ilhamento fazem com que os parâmetros sofram uma variação perceptível ao sistema de detecção.

A figura 2 apresenta alguns desses métodos (MARCHESAN, 2016), com destaque para os que se enquadram no contexto do presente trabalho.

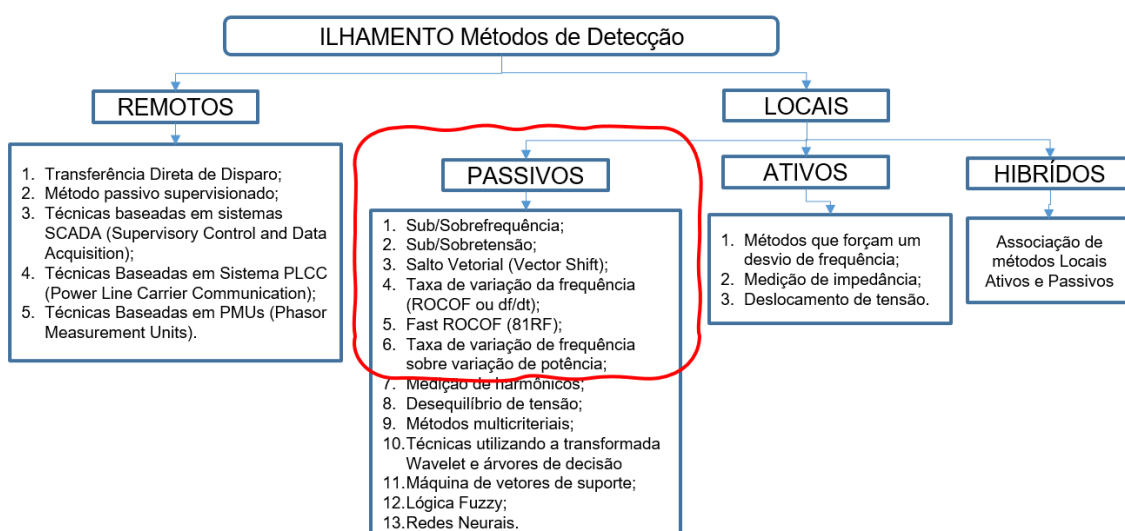


Figura 2: Métodos de detecção de ilhamento. Destaque aos mais pertinentes neste trabalho.

A seguir são descritas as principais funções de proteção utilizadas não só para detecção, mas também para disparo de abertura da interconexão e execução do ilhamento.

2.3.1 Sincronismo (25)

Sua relevância do relé de *check* de sincronismo não está na execução do ilhamento em si, mas na ocasião da normalização da configuração.

A norma IEEE (2014) recomenda um relé de *check* de sincronismo na interconexão com a configuração “duplo suprimento proveniente de subestação remota, através de 2 transformadores”, para o fechamento dos disjuntores no processo de restauração da linha. Um relé de *check* de sincronismo pode ser usado para garantir o fechamento do disjuntor quando as duas fontes estão em sincronismo e aproximadamente em fase. A norma IEEE (2008) acrescenta que as tensões devem estar dentro dos limites pré-estabelecidos de magnitude, ângulo de fase e frequência, além da mesma sequência de fases, para que o relé permita o paralelismo dos dois circuitos em questão.

2.3.2 Subtensão (27)

A função 27 opera quando a tensão é menor que um valor de ajuste predeterminado (IEEE, 2008).

Função bastante utilizada nas proteções de ilhamento, por exemplo nos esquemas propostos em (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999), (SCHIEFEN et al., 2006), (MOZINA, 2007), (SCUTARIU; MACDONALD, 2009) e (AUDRING; LERCH, 2011). A proposta de Mozina (2007) baseia-se em relés de subtensão, combinados numa lógica, que será apresentada no item 2.4.3.

2.3.3 Direcional de Potência (32)

Função que opera para um valor pré-ajustado de fluxo de potência em determinada direção, ou em um fluxo de potência reverso, tal como a motorização de um gerador após a perda de seu acionador motriz primário (IEEE, 2008).

É utilizada, por exemplo, nos esquemas propostos em (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999) e (ANNE et al., 2016).

2.3.4 Sobrecorrente (50/51)

A função 50 é definida pela norma IEEE (2008) como “Relé de Sobrecorrente Instantâneo”, que opera com uma temporização não-intencional quando a corrente excede um valor de ajuste. Enquanto a função 51 é definida nessa mesma norma como “Relé de Sobrecorrente AC Temporizado”, que opera quando a corrente excede um valor de ajuste predeterminado e no qual o desempenho da relação entre a corrente e o tempo de operação tem uma faixa ajustável.

O termo “**característica inversa**” para as curvas da função 51 se mantém até hoje desde a época dos relés de disco de indução. As características mais utilizadas são: Normal Inversa (NI ou SI, do inglês *Standard Inverse*), Muito Inversa (MI ou VI do inglês *Very Inverse*), Extremamente Inversa (EI, em inglês *Extremaly Inverse*), Tempo Longo Inversa (TLI ou LTI, do inglês *Long Time Inverse*) e Tempo Definido (TD ou DT = *Definite Time*), esta última mais usada na função 50.

Nos relés digitais as características tempo *versus* corrente são representados por equações, que mudam de acordo com a norma. Apresenta-se a seguir as mais usuais (MARDEGAN, 2010a):

- **Norma IEC 60255-3**

$$t = \frac{A}{I^P - 1} \cdot M \quad (2.1)$$

Onde:

t – Tempo de operação [s];

I – Relação entre Corrente circulante e Corrente de *pickup*;

M – Ajuste do multiplicador de tempo;

A, P – Constantes que variam de acordo com o tipo de curva escolhida.

Tabela 3: Valores das constantes para curvas IEC 60255-3.

TIPO DE CURVA	A	P
Nomal Inversa	0,14	0,02
Muito Inversa	13,5	1
Extremamente Inversa	80	2
Tempo Longo Inversa	120	1

- **Norma ANSI C37.90**

$$t = \left[A + \frac{B}{I - C} + \frac{D}{(I - C)^2} + \frac{E}{(I - C)^3} \right] \cdot M \quad (2.2)$$

Onde:

t – tempo de operação [s];

I – Relação entre Corrente circulante e Corrente de *pickup*;

M – ajuste do multiplicador de tempo;

A, B, C, D, E – constantes que variam de acordo com o tipo de curva escolhida.

Tabela 4: Valores das constantes para curvas ANSI C37.90.

TIPO DE CURVA	A	B	C	D	E
Moderadamente Inversa	0,1735	0,6791	0,8	-0,08	0,1271
Normal Inversa	0,0274	2,2614	0,3	-4,1899	9,1272
Muito Inversa	0,0615	0,7989	0,34	-0,284	4,0505
Extremamente Inversa	0,0399	0,2294	0,5	3,0094	0,7222

- **Norma ANSI C37.112**

$$t = \left(\frac{A}{I^P - 1} + B \right) \cdot M \quad (2.3)$$

Onde:

t – Tempo de operação [s];

I – Relação entre Corrente circulante e Corrente de *pickup*;

M – Ajuste do multiplicador de tempo;

A, B, P – Constantes que variam de acordo com o tipo de curva escolhida.

Tabela 5: Valores das constantes para curvas ANSI C37.112.

TIPO DE CURVA	A	B	P
Moderadamente Inversa	0,0515	0,114	0,02
Muito Inversa	19,61	0,491	2
Extremamente Inversa	28,2	0,1217	2

2.3.5 Sobretensão (59)

A função 59 opera quando a tensão excede um valor de ajuste predeterminado (IEEE, 2008).

Mozina (2014) cita a função 59 como uma das tipicamente usada na proteção de ilhamento. Foi utilizada, por exemplo, nos esquemas propostos em (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999) e (AUDRING; LERCH, 2011).

2.3.6 Sobrecorrente Direcional (67)

A função 67 opera quando um valor ajustado de corrente AC flui numa direção predeterminada (IEEE, 2008).

O princípio básico do relé direcional é comparar o ângulo de defasagem entre duas grandezas. Há várias formas de conexões possíveis, sendo mais usual a conexão 90° ou “em quadratura”, que compara o ângulo entre a corrente da fase que se deseja proteger e a tensão entre as outras duas fases.

Em, (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999) e (AUDRING; LERCH, 2011) são propostos esquemas de ilhamento utilizando a função 67 combinada com a função 27.

2.3.7 Deslocamento de fase (78)

A função de “Deslocamento de Fase” ou “Salto Vetorial” (em inglês *Vector Surge*, *Vector Shift* ou *Voltage Jump relay*) opera para um determinado ângulo de fase entre duas tensões, entre duas correntes, ou entre uma tensão e uma corrente (IEEE, 2008).

O código 78 também é utilizado para a função contra Falta de Sincronismo (*Out-of-Step*) ou Oscilação de Potência.

No artigo (VIEIRA et al., 2008) foram desenvolvidos analiticamente modelos matemáticos para determinação direta do comportamento dinâmico do relé, a partir da equação de oscilação do gerador síncrono (KUNDUR, 1994):

$$\frac{2.H}{\omega_0} \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_M - P_E = \Delta P \quad (2.4)$$

onde:

H – constante de Inércia;

ω – velocidade angular do rotor [rad/s];

ω_0 – velocidade angular nominal do rotor [rad/s];

P_M – potência mecânica;

P_E – potência elétrica;

ΔP – desbalanço de potência ativa.

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (2.5)$$

δ – posição angular do rotor [rad];

δ_0 – posição angular do rotor em $t=0$ [rad];

Da equação (2.4):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{2.H} \cdot \Delta P \quad (2.6)$$

Integrando a equação (2.4):

$$\omega = \frac{\omega_0 \cdot \Delta P}{2.H} \cdot t + \omega_0 \quad (2.7)$$

Substituindo-se a equação (2.7) na equação (2.5):

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\omega_0 \cdot \Delta P}{2.H} \cdot t \quad (2.8)$$

O ângulo do rotor do gerador pode ser obtido integrando-se a equação (2.8):

$$\delta = \frac{\omega_0 \cdot \Delta P}{4 \cdot H} \cdot t^2 + \delta_0 \quad (2.9)$$

A variação do ângulo a cada ciclo é $\Delta\delta = \delta - \delta_1$, então:

$$\Delta\delta = \left(\frac{\omega_0 \cdot \Delta P}{4 \cdot H} \cdot t^2 + \delta_0 \right) - \left(\frac{\omega_0 \cdot \Delta P}{4 \cdot H} \cdot t_1^2 + \delta_0 \right) \quad (2.10)$$

$$\Delta\delta = \frac{\omega_0 \cdot \Delta P}{4 \cdot H} \cdot [2 \cdot t - (t - t_1)] \cdot (t - t_1) \quad (2.11)$$

Observa-se que a duração do ciclo atual é, de fato, igual a $(t - t_1)$, mas a rigor, com a variação contínua do ângulo δ , a onda deixa de ser periódica. De forma aproximada, o período T do ciclo pode ser estimado utilizando-se a relação $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ e a equação (2.7):

$$t - t_1 = T = \frac{1}{f} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \quad (2.12)$$

Substituindo a equação (2.7) em (2.12):

$$t - t_1 = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{\omega_0 \cdot \Delta P}{2 \cdot H} \cdot t + \omega_0} \quad (2.13)$$

e substituindo a equação (2.13) em (2.11), onde $K = \omega_0 \cdot \Delta P / (2 \cdot H)$, obtém-se:

$$\Delta\delta = \frac{K}{2} \cdot \left(2 \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{K \cdot t + \omega_0} \right) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{K \cdot t + \omega_0} \quad (2.14)$$

onde:

$\Delta\delta$ – Variação angular do rotor (**ajuste do relé**) [*rad*];

Reorganizando a equação (2.14), e considerando o ajuste do relé (β) igual a $\Delta\delta$:

$$[K^2 \cdot (\beta - 2 \cdot \pi)] \cdot t^2 + [2 \cdot \omega_0 \cdot K \cdot (\beta - \pi)] \cdot t + [\omega_0^2 \cdot \beta + 2 \cdot \pi^2 \cdot K] = 0 \quad (2.15)$$

Observa-se que a equação (2.15) é de segunda ordem, do tipo $at^2 + bt + c = 0$, onde:

$$a = K^2 \cdot (\beta - 2 \cdot \pi) \quad (2.16)$$

$$b = 2. \omega_0. K. (\beta - \pi) \quad (2.17)$$

$$c = \omega_0^2. \beta + 2. \pi^2. K \quad (2.18)$$

As soluções da equação (2.15), onde tem interesse físico apenas valores positivos, são obtidas de:

$$t = \frac{-2. \omega_0. K. (\beta - \pi) \pm \sqrt{D_1}}{2. K^2. (\beta - 2. \pi)} \quad (2.19)$$

onde:

$$D_1 = [2. \omega_0. K. (\beta - \pi)]^2 - 4. [K^2. (\beta - 2. \pi)]. [\omega_0^2. \beta + 2. \pi^2. K] \quad (2.20)$$

O **tempo** que o relé levará para detectar o ilhamento é obtido através de:

$$t = \frac{-2. \omega_0. K. (\beta - \pi) - \sqrt{D_1}}{2. K^2. (\beta - 2. \pi)} \quad (2.21)$$

A equação pode ser solucionada para o **desbalanço de potência**:

$$\Delta P = \frac{2. H}{\omega_0} \cdot \left(\frac{-2. [\pi^2 + \omega_0. t. (\beta - \pi)] \pm \sqrt{D_2}}{2. t^2. (\beta - 2. \pi)} \right) \quad (2.22)$$

onde:

$$D_2 = \{2. [\pi^2 + \omega_0. t. (\beta - \pi)]\}^2 - 4. [t^2. (\beta - 2. \pi)]. (\omega_0^2. \beta) \quad (2.23)$$

2.3.8 Subfrequência ou Sobrefrequência (81U/81O)

As funções de frequência são, de uma forma geral, as mais utilizadas nas proteções de ilhamento, seja 81U, 81O, ou algumas variações, como 81R e 81RF (que virão a seguir). Essas funções são observadas, por exemplo, nos trabalhos (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999), (VIEIRA *et al.*, 2005, 2006, 2008), (SCHIEFEN *et al.*, 2006), (MOZINA, 2007, 2014), (SCUTARIU; MACDONALD, 2009) e (AUDRING; LERCH, 2011).

Da mesma forma que foi feito para o relé 78, em (VIEIRA et al., 2008) foram desenvolvidos também os modelos matemáticos para determinação direta do comportamento dinâmico dos relés 81U e 81O. O comportamento da velocidade angular no tempo pode ser representado por:

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \quad (2.24)$$

Substituindo (2.24) em (2.7):

$$\omega_0 + \Delta\omega = \frac{\omega_0 \cdot \Delta P}{2 \cdot H} \cdot t + \omega_0 \quad (2.25)$$

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0 \cdot \Delta P}{2 \cdot H} \cdot t \quad (2.26)$$

Sendo $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, segue que

$$\Delta f = \frac{f_0 \cdot \Delta P}{2 \cdot H} \cdot t \quad (2.27)$$

Considerando $t_d = t + \Delta t$, obtém-se as fórmulas analíticas em três formatos, para se determinar umas das três seguintes variáveis, conhecendo-se as outras duas: **desbalanço de potência** ativa, **tempo** requerido de detecção e **ajuste do relé** (*pickup*):

$$\Delta P = \frac{2 \cdot H \cdot \Delta f}{f_0 \cdot (t - \Delta t)} \quad (2.28)$$

$$t_d = \frac{2 \cdot H \cdot \Delta f}{f_0 \cdot \Delta P} + \Delta t + t_{set} \quad (2.29)$$

$$\Delta f = \frac{f_0 \cdot \Delta P}{2 \cdot H} \cdot (t_d - \Delta t) \quad (2.30)$$

Onde:

t – tempo de detecção do evento (duração da janela) [s].

Δt – atraso inerente do relé devido a medição e processamento [s]. Para a função 81, em (VIEIRA et al., 2008), o autor considerou **80 ms** para esta variável.

t_{set} – ajuste do elemento temporizado [s].

t_d – tempo total de detecção do relé [s].

Δf – Desvio da frequência nominal (ajuste do relé) [Hz];

2.3.9 Taxa de Variação de Frequência (81R)

Os relés de taxa de variação de frequência, também conhecidos por relés df/dt ou ROCOF (do inglês “*Rate of Change of Frequency*”), tem como uma de suas principais aplicações a detecção de ilhamento, e possuem um tempo de resposta relativamente mais rápido que os relés convencionais de subfrequência (81U) e sobrefrequência (81O). Os relés 81R são mais rápidos porque não existe a necessidade de tempo adicional nas condições de distúrbio (ANNE et al., 2016). A taxa de variação de frequência é proporcional ao desbalanço de potência ativa (VIEIRA et al., 2008).

Da mesma forma que foi feito para os relés 78, 81U e 81O, em (VIEIRA et al., 2008) são desenvolvidos também os modelos matemáticos para determinação direta do comportamento dinâmico do relé 81R, substituindo-se $\omega = 2\pi f$ na equação (2.6), obtendo-se:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_0}{2 \cdot H} \cdot \Delta P \quad (2.31)$$

O sinal df/dt utilizado para disparar o relé, é processado por filtros, os quais podem ser representados num bloco de primeira ordem, e pode ser calculado pela expressão abaixo, função de transferência representada no domínio da frequência:

$$K(s) = \frac{f_0}{2 \cdot H} \cdot \frac{\Delta P(s)}{(T_a s + 1)} \quad (2.32)$$

Onde:

K – taxa de variação de frequência (df/dt) após processo de filtragem do relé.

T_a – constante de tempo dos filtros e da janela de medição do relé. Na referência (Vieira, 2006), foi considerado o valor dessa constante igual a **100 ms** (6 ciclos).

No instante $t=0s$, o gerador será submetido a uma variação de carga de amplitude ΔP e, portanto, $\Delta P(s)$ pode ser representado por uma função degrau, ou seja, substituindo $\Delta P(s)=\Delta P/s$ na equação (2.32).

$$K(s) = \frac{f_0}{2.H.(T_a s + 1)} \cdot \frac{\Delta P}{s} \quad (2.33)$$

A solução da equação (2.33) no domínio do tempo, pela transformada inversa de Laplace, é:

$$k(t) = \frac{f_0 \cdot \Delta P}{2.H} \cdot (1 - e^{-t/T_a}) \quad (2.34)$$

A taxa de variação de frequência atua quando $k(t)$ for maior que o valor β ajustado no relé, e considerando $t_d = t + \Delta t$, obtém-se as fórmulas analíticas em três formatos, para se determinar umas das três seguintes variáveis, conhecendo-se as outras duas: **desbalanço de potência** ativa, **tempo** requerido de detecção e **ajuste do relé** (*pickup*):

$$\Delta P = \frac{2.H.\beta}{f_0 \cdot [1 - e^{-(t_d - \Delta t)/T_a}]} \quad (2.35)$$

$$t_d = -T_a \cdot \ln \left(1 - \frac{2.H.\beta}{f_0 \cdot \Delta P} \right) + \Delta t + t_{set} \quad (2.36)$$

$$\beta = \frac{f_0 \cdot \Delta P}{2.H} \cdot (1 - e^{-(t_d - \Delta t)/T_a}) \quad (2.37)$$

onde:

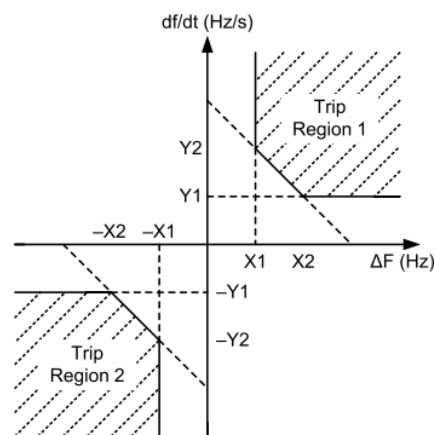
β – taxa de variação de frequência (**ajuste do relé**) [Hz/s];

Δt – atraso inerente do relé [s]. Para a função 81R, o autor considerou o valor de **130 ms** para esta variável (VIEIRA et al., 2008).

2.3.10 Rápida Taxa de Variação de Frequência (81RF)

Do inglês “*Fast Rate of Change of Frequency*”, esta função 81RF é uma variação da função 81R (“*Rate of Change of Frequency*”). Baseia-se, simultaneamente, no desvio da frequência (Δf) a partir da frequência nominal e na taxa de variação de frequência (df/dt) calculada por um período pré-definido (ANNE et al., 2016).

O intercâmbio de potência entre a rede local e o sistema externo afeta o tempo de resposta do sistema. Quanto maior o desvio da frequência nominal (Δf) menor a taxa de variação de frequência (df/dt) necessária para que o relé opere, conforme pode ser observado na figura 3.



81RF element characteristic.

Figura 3: Característica do elemento 81RF. (Fonte: ANNE et al., 2016)

O artigo (ANNE et al., 2016) propõe a utilização do relé 81RF para ilhamento conforme diagrama lógico da figura 4, onde é possível bloquear a atuação do elemento 81RF durante condições de falta, através dos ajustes dos limites de tensão (V_{BLK}) e de corrente (I_{BLK}) para o bloqueio.

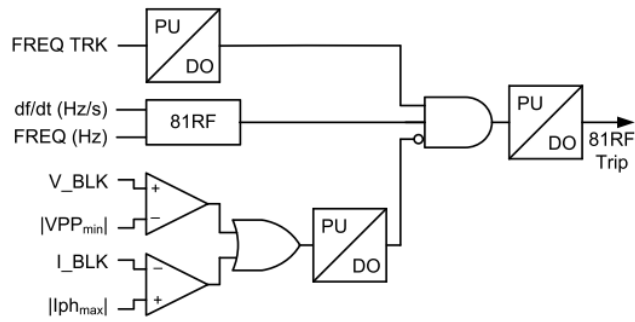


Figura 4: Lógica de atuação 81RF. (Fonte: ANNE et al., 2016)

2.4 Esquemas de Proteção

A seguir apresentam-se alguns esquemas de proteção de ilhamento encontrados na literatura, que se baseiam na combinação de diversas funções de proteção para detectar e atuar na execução do ilhamento.

2.4.1 Esquema Audring-Lerch

O artigo (AUDRING; LERCH, 2011) propõe o esquema de ilhamento da figura 5, onde a primeira parte da lógica combina as funções de subtensão (27) de sequência positiva, subtensão (27) monofásica em qualquer fase, sobrecorrente temporizada (51) e a característica direcional. A combinação das duas últimas (51 com direcionalidade) é a própria sobrecorrente direcional (67). O objetivo desta parte da lógica, segundo os autores, é que a função 27 promoverá o desacoplamento apenas quando a 67 detectar sobrecorrente no sentido “da indústria para o SIN”. Faltas internas não devem provocar o desacoplamento. Para a função 27 nesta combinação, os autores recomendam dois níveis de tempo para atuação, sendo que o primeiro nível deve ser mais lento que a proteção primária da interconexão e deve levar em conta o tempo crítico para estabilidade dos geradores, enquanto o segundo nível deve atuar antes da proteção 27 dos motores de indução, também coordenando com os geradores.

As funções de sobretensão (59) monofásica em qualquer fase, de subfrequência (81U) e de sobrefrequência (81O) têm a função de efetuar o ilhamento para resguardar a qualidade da energia na planta, atuando quando as condições operacionais se tornarem extremamente degradadas. Atuarão quando algum desses parâmetros (tensão ou

frequência) ultrapassarem os limites operacionais da planta, que devem estar de acordo com os requisitos dos órgãos reguladores e as diretrizes da concessionária de suprimento.

O critério de sobrecorrente temporizada (51) é um backup das outras proteções contra curto-circuito, e não faz distinção de sentido da corrente. Os autores advertem para usar este critério somente se realmente necessário, pois tende a desacoplar sob certas situações de carga. É sugerido um tempo relativamente alto, de 2 a 3 s, e deve coordenar com o *trip* da proteção primária dos geradores.

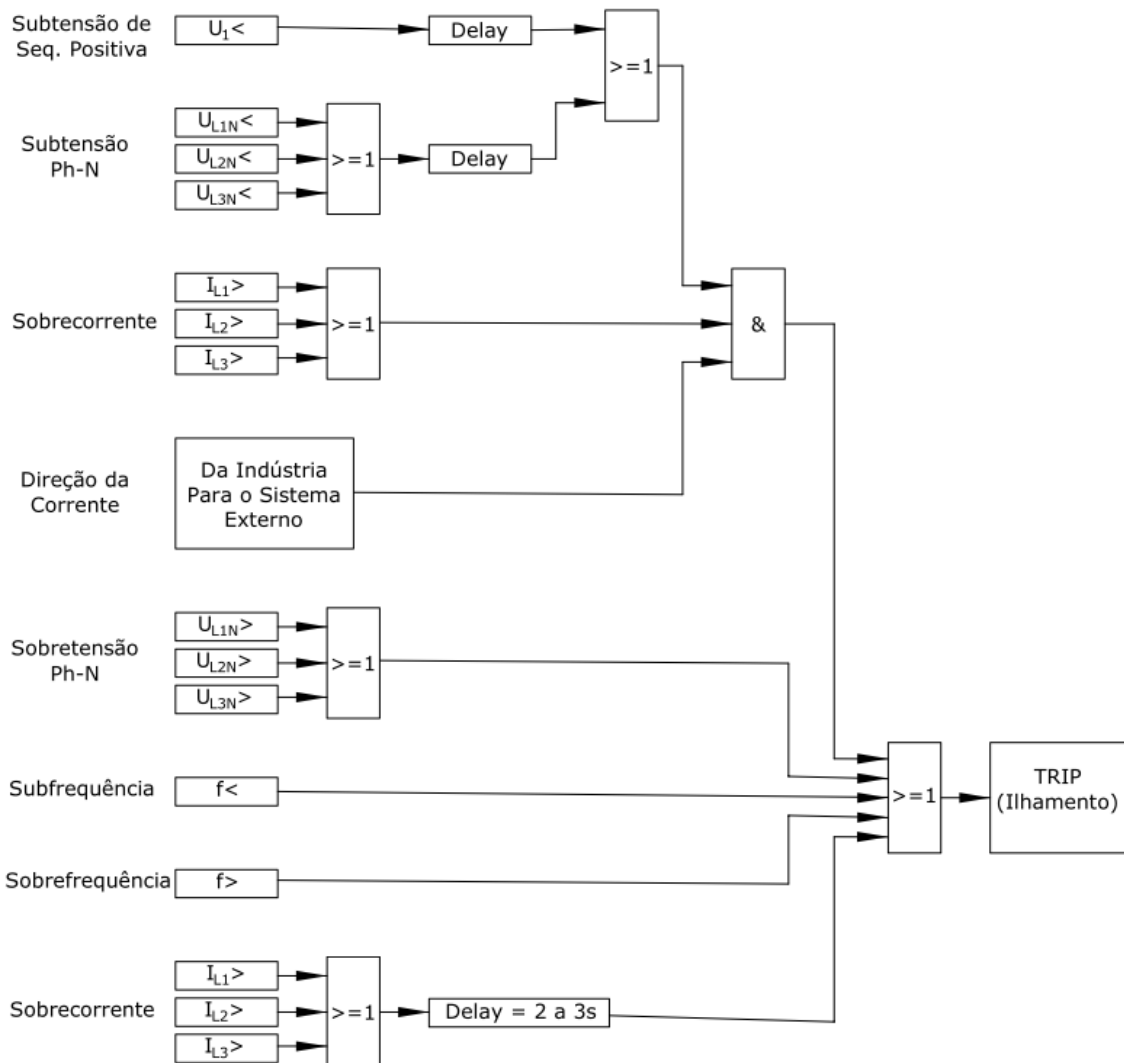


Figura 5: Lógica do esquema de ilhamento de uma grande indústria química autoprodutora (AUDRING; LERCH, 2011).

2.4.2 Esquema Rajamani-Hambarde

Em (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999) é proposto o esquema de ilhamento da figura 6, separados graficamente de acordo com seus objetivos de atuação.

O esquema “DIR O/C + UV” combina as funções de sobrecorrente direcional de fase (67) ou de neutro (67N), com subtensão (27), e atua como *backup* para um defeito externo, por exemplo na linha de entrada da indústria. A função 27 é temporizada para permitir que a proteção primária da linha promova a extinção do defeito, mas deve coordenar com a proteção dos geradores da planta, extinguindo o defeito antes do *trip* das máquinas. A função 27 garante que o defeito seja eletricamente próximo da indústria.

O esquema “DF/DT” é composto de duas proteções de taxa de variação de frequência (81R) independentes para atuar nos casos tanto de diminuição quanto de aumento da frequência. De acordo com os autores, este importante esquema é responsável por mais de 50% dos casos de ilhamento. O relé é ajustado para uma taxa de variação de frequência combinado com um ajuste na frequência, ou seja, só atua a partir de um certo valor de desvio da frequência nominal.

O esquema “RPUF” combina as funções de potência ativa reversa (32P) com subfrequência (81U), com a finalidade de detectar a perda do SIN, mesmo quando a diferença de potência ativa carga-geração não for suficiente para atuar a proteção df/dt (81R), mas a interconexão não abriu e a indústria exporta potência. A função 32 não deve atuar para transitórios de oscilação de potência, o ajuste deve ser superior à máxima exportação em condições normais e é diferente daquele usado na função 32 dos geradores.

O esquema “LINE CHARGING” utiliza as funções combinadas de sobretensão (59) e potência reativa reversa (32Q), para detectar aumento da tensão com zero de importação de potência ativa da rede externa. Sua utilidade se dá nos casos de abertura do terminal remoto de uma linha longa, em que a potência reativa da linha carregada é imposta sobre a indústria.

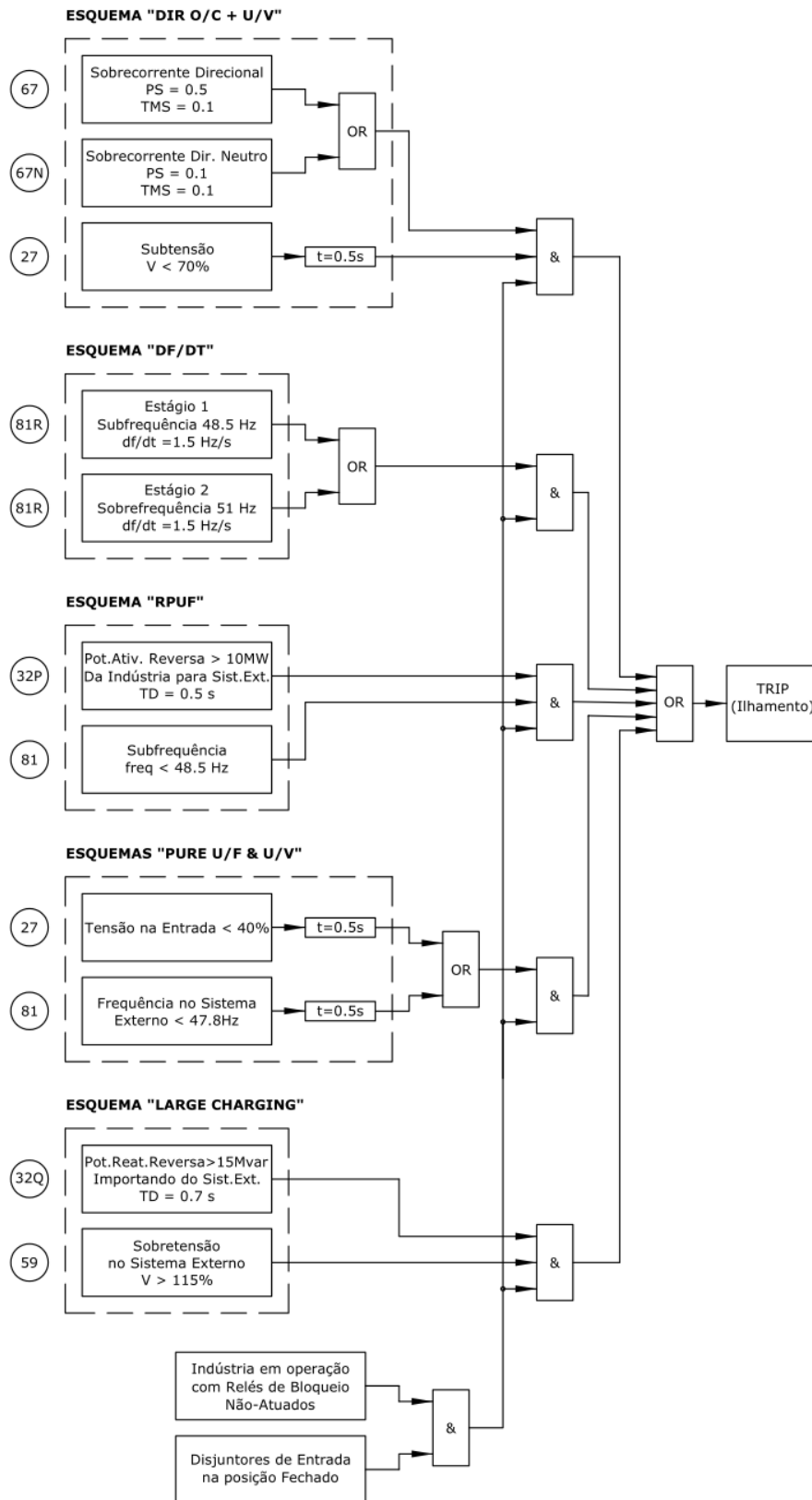


Figura 6: Lógica do esquema de ilhamento de uma planta industrial autoprodutora típica (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999).

O esquema “PURE U/F & U/V” é composto de duas proteções independentes. A primeira é a função de subtensão (27), contra afundamentos na tensão de longa duração, de um segundo ou mais, sem afetar outros parâmetros; é temporizada para não atuar em transitórios de tensão, mas deve atuar antes da instabilidade dos geradores. A segunda é a função de subfrequência (81U) para detectar redução na frequência, porém numa taxa pequena e sem afetar outros parâmetros; deve coordenar com descarte de cargas e com os geradores da planta.

2.4.3 Esquema Mozina

Em (MOZINA, 2007), o autor afirma que o colapso de tensão é um evento balanceado. Com base nessa característica, são propostos os dois esquemas similares da figura 7. O primeiro esquema requer que a tensão nas três fases deve cair abaixo do ajuste #1 (função 27), e qualquer fase que cair abaixo do ajuste #2 bloqueará o esquema (27B). Há também um bloqueio por sequência negativa de tensão (47B) para evitar sensibilidade a faltas desbalanceadas, ou seja, todas exceto faltas trifásicas. O segundo esquema é similar ao primeiro, os elementos de bloqueio são os mesmos: 27B e 47B. Porém utiliza-se a tensão de sequência positiva, em vez da tensão fase-neutro individual, para detectar uma condição de subtensão.

Da teoria de componentes simétricas, as sequências positiva e negativa de tensão podem ser calculadas respectivamente por (ALMEIDA; FREITAS, 1995):

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c) \quad (2.38)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c) \quad (2.39)$$

A magnitude da subtensão na iminência de um colapso de tensão é na faixa de 89-94% (Mozina, 2007). De acordo com o autor, o esquema deve ser bloqueio se qualquer tensão fase-neutro cair abaixo deste ajuste.

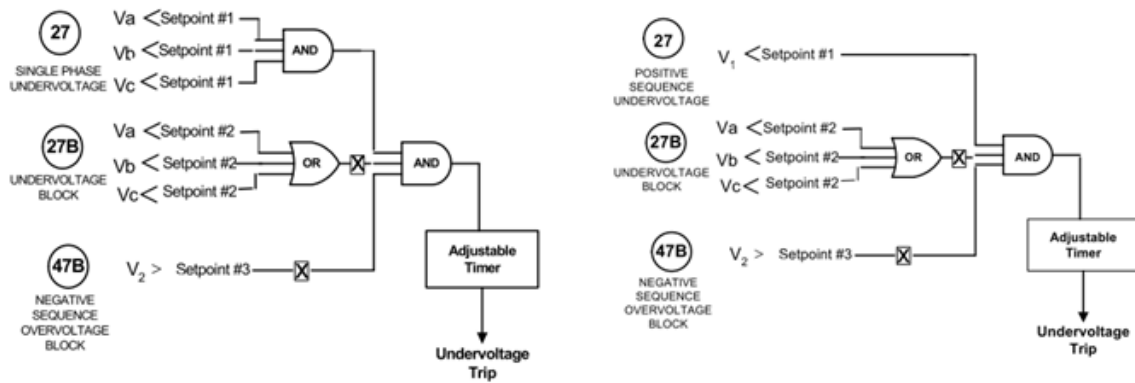


Figura 7: (a) Esquema baseado em subtensão monofásica nas três fases simultaneamente; (b) Esquema baseado na subtensão de sequência positiva (Fonte: MOZINA, 2007).

2.5 Descarte de Cargas

Na indústria, as cargas são geralmente segregadas em essenciais, importantes e comuns, e são alimentadas por diferentes transformadores ou painéis. Cargas essenciais são aquelas que devem funcionar para segurança dos equipamentos ou pessoas. Cargas importantes são aquela que devem preferencialmente funcionar para evitar descontinuidade de produção, mas podem ser descartadas se não houver outra alternativa. Cargas comuns ou não-importantes são aquelas que podem ser descartadas a qualquer momento sem afetar excessivamente o processo (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999).

Sempre que se estiver importando potência ativa do sistema externo, é essencial após o ilhamento que os geradores assumam carga adicional (basicamente, resposta dos reguladores de velocidade) para alimentar as cargas da planta. Se não tiver geração disponível adequada, cargas devem ser descartadas para atingir o balanço carga-geração (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999). E uma vez ilhado, ainda existe a chance de que eventos na planta possam iniciar uma sequência de condições elétricas desfavoráveis e levar toda a ilha ao colapso (SCHIEFEN et al., 2006). O descarte de cargas, também chamado de alívio de cargas ou rejeição de cargas (do inglês “*Load Shedding*”), promove o desligamento de algumas cargas pré-selecionadas para manter o equilíbrio entre a carga e a geração, e assim evitar o desligamento das cargas mais prioritárias de acordo com a geração disponível.

Há diversas formas de se fazer o descarte de cargas, destacando-se o descarte por intertravamento, por relés de frequência e por sistema de automação (MORAIS, 2014).

No descarte **por intertravamento**, quando ocorre a abertura do disjuntor da interconexão com a concessionária, os disjuntores dos alimentadores previamente selecionados são abertos, por intertravamento, descartando suas cargas. Tem como vantagens a simplicidade e a alta velocidade, pois não há processamento. A desvantagem é a pouca flexibilidade, já que é possível somente um único estágio de descarte e este é calculado pelo pior cenário, podendo descartar cargas desnecessariamente, o que pode levar a uma rápida aceleração dos geradores.

No descarte **por relés de frequência**, havendo um desequilíbrio no sistema ocasionado pela perda de geração, a frequência elétrica irá reduzir a um valor inferior ao nominal. Relés de frequência atuam no desligamento de um determinado percentual de carga, em estágios, em função do decréscimo do valor absoluto da frequência (relé 81U) ou da sua taxa de variação (relé 81R). Isto permite que a carga seja desligada em partes. Os relés 81U, além de também ser ajustados pelo pior cenário podendo descartar cargas desnecessariamente, devem ser temporizados para evitar atuação em transitórios, portanto são mais lentos que os relés 81R. Um exemplo do descarte por relés de frequência é o Esquema de Rejeição e Alívio de Cargas (ERAC) (ONS, 2019).

O descarte **por sistema de automação**, utilizando Controladores Lógicos Programáveis (CLP) ou um sistema de automação de grande porte, permite grande flexibilidade. O sistema trabalha com atualização dinâmica das informações da configuração operacional da instalação e dos sinais analógicas e digitais, agregando maior precisão no descarte. O cálculo da quantidade de cargas a descartar é feito com base no balanço dinâmico carga-geração existente no momento pré-ilhamento e numa sequência programada das cargas em função de uma lista pré-definida de prioridades. Como desvantagens destaca-se a maior complexidade e a necessidade de comunicação.

Independentemente do tipo de tecnologia empregada em sua implementação, o descarte de cargas é de importância crucial no sucesso do ilhamento de um subsistema onde a carga é superior à capacidade de geração local, pois o déficit de potência ativa fatalmente levará ao colapso de frequência. E quanto maior o desbalanço, mais importante é a velocidade de atuação do descarte de cargas.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA UTILIZADA

3.1 Introdução

O trabalho consiste em propor um sistema de proteção para o ilhamento de uma indústria com uma UTE conectada ao SIN, e aplicar num estudo de caso. Basicamente, a metodologia desta dissertação pode ser descrita nas seguintes etapas:

- Estudar na literatura as proteções clássicas para ilhamento;
- Com base nas referências bibliográficas, propor as funções e esquemas de proteção para ilhar uma indústria com uma UTE conectada ao SIN.
- Propor um sistema elétrico para estudo de caso.
- Modelar o sistema proposto num software de simulações adequado.
- Validar o sistema modelado com dados de ocorrências anteriores.
- Modelar no software os relés e lógicas de proteção propostos.
- Definir os cenários e eventos em que a proteção deve ou não atuar no ilhamento, a topologia para desconexão e o descarte de cargas adequado, se necessário.
- Simular os cenários e eventos definidos.
- Avaliar o desempenho e comparar os resultados.

3.2 Ferramentas Computacionais e Modelagem do Sistema

Os programas computacionais utilizados neste trabalho foram:

- ANAREDE (Análise de Redes Elétricas, do CEPEL) – para análise de Sistemas Elétricos de Potência em regime permanente;
- ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos, do CEPEL) – para análise de sistemas elétricos de potência em regime dinâmico;
- MATLAB (plataforma de programação e computação numérica da MathWorks) – para solução de equações e geração de gráficos;
- PTW (*Power Tools for Windows*, da SKM) – para simular valores de curto-circuito na indústria e gráficos de coordenação da proteção;
- WebPlotDigitizer (ROHATGI, 2020) – ferramenta *Web* para extrair dados de figuras, imagens e mapas.

O ilhamento é um evento dinâmico, e como tal é necessário um programa capaz de analisar o comportamento dinâmico do sistema modelado. Por isso, a principal ferramenta utilizada neste trabalho foi o software ANATEM, que por sua vez necessita de um arquivo com fluxo de potência do modelo executado com sucesso no ANAREDE, ou seja, um ponto inicial de operação do sistema em regime permanente, a partir do qual executará as simulações dinâmicas através da aplicação dos eventos desejados.

Outros softwares, descritos na lista acima, foram utilizados de forma pontual durante o trabalho, para auxiliar em algumas tarefas da pesquisa, como manipulações matemáticas, geração de curvas a partir de equações, coordenação gráfica de relés de proteção, conversão de dados gráficos em dados numéricos etc.

Neste trabalho, foi utilizado o modelo do sistema elétrico em formato ANATEM disponível na Base de Dados Técnica do ONS, denominado “CASO PEL 0618”, emitido por “ONS - DPL/EG/EGE” em junho/2018, a revisão mais atual na época do início deste trabalho. Além do arquivo principal ANATEM (extensão “stb”), o pacote de dados é composto também pelo arquivo ANAREDE em extensão “sav”, arquivos auxiliares em extensão “dat”, “blt” e “cdu”, como modelos de máquinas, modelos de elementos HVDC,

modelos utilizados no ERAC, e outros arquivos necessários para iniciar a execução do programa com sucesso.

A base de dados do ONS é amplamente utilizada para estudos elétricos e energéticos do sistema, como estudos para acesso de nova conexão à Rede Básica ou às demais instalações de transmissão, estudos para despachos de geração, intercâmbios e intervenções previstas nos equipamentos, estudos de planejamento da operação, de planejamento da expansão da geração e do sistema de transmissão, estudos de proteção e controle, para implantação e adequação das proteções de caráter sistêmico, entre outros. A base de dados do ONS é atualizada periodicamente, visando retratar fielmente o sistema, e contempla dados cadastrais de linhas de transmissão da rede de operação, sistemas de transformação da Rede Básica, dados de carga, dados de usinas supervisionadas e programadas pelo ONS, e outros.

Vale ressaltar que a usina termelétrica referente ao estudo de caso deste trabalho já estava modelada, uma vez que ela está conectada ao SIN e sua geração é despachada pelo ONS. Porém foi necessário acrescentar à base de dados toda a instalação da indústria, bem como as linhas de transmissão que a interligam à UTE, pois a indústria não estava modelada.

3.3 Topologias do Ilhamento durante Perturbações

3.3.1 Por Que Ilhar?

A decisão de implantar um sistema de ilhamento pode ser oriunda de diferentes necessidades. Os objetivos das proteções de ilhamento de grandes indústrias autoprodutoras, alimentadas em tensão de transmissão ou sub-transmissão são diferentes, por exemplo, dos objetivos de um sistema de Geração Distribuída (GD).

No caso da GD, uma perda da fonte de energia principal (subestação), fará com que uma parte da rede de distribuição torne-se eletricamente isolada, mas ainda

energizada por geradores distribuídos conectados no subsistema isolado, e assim faz-se necessária a detecção do ilhamento e desconexão da GD para evitar problemas como: **segurança das equipes de manutenção e dos consumidores** em geral devido às áreas permanecerem energizadas; **qualidade da energia** fornecida na rede ilhada fora do controle da concessionária; **coordenação do sistema de proteção** da rede ilhada insatisfatória devido à redução dos níveis de curto-circuito; sistema ilhado com **aterramento inadequado** devido à perda da concessionária; **reenergização da rede** com o gerador distribuído fora de sincronismo (VIEIRA et al., 2008).

Já uma grande indústria autoprodutora pode estar operando em três situações: capacidade de geração maior que a carga da planta, capacidade de geração menor que a carga da planta ou geração aproximadamente igual à carga. Em qualquer dos casos, mesmo quando a capacidade de geração interna é inferior à sua carga total, é possível com o ilhamento manter pelo menos as cargas mais prioritárias.

De acordo com (SCHIEFEN et al., 2006), os objetivos do ilhamento para a indústria autoprodutora são a **continuidade operacional da planta**, mantendo toda produção possível durante um distúrbio externo ou em condição de ilha, **minimizar impactos ambientais** e potenciais **danos aos equipamentos**.

As perturbações para as quais é desejável o ilhamento da **indústria** autoprodutora o mais rápido possível são (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999):

- Curto-circuito na linha de suprimento.
- Perda de suprimento externo devido a colapso na rede: o sistema externo entrou em colapso, mas a interconexão continua fechada;
- Grande flutuação na frequência ou na tensão da rede, ou em ambos: sistema externo operando fora dos limites determinados.

Os objetivos do ilhamento implicam diretamente na concepção do sistema de proteção, ou seja, na definição de quais funções utilizar, a topologia do ilhamento e os ajustes das funções. A depender da capacidade da UTE e carga da indústria pode até mesmo não ser possível o ilhamento indústria-UTE,

3.3.2 Onde Ilhar?

A ideia principal deste trabalho é ilhar uma indústria com a UTE, diante de determinadas perturbações. Sendo a capacidade de geração interna da indústria inferior à potência total de sua carga, a grande vantagem de se manter a UTE na ilha é que a potência gerada na UTE garantirá a continuidade operacional da indústria.

Entretanto, pode haver casos em que a perturbação seja oriunda da própria UTE, ou casos que a UTE e a indústria executem um ilhamento conjunto com sucesso, porém seguido de algum problema na UTE, como instabilidade das máquinas ou falha na regulação. Daí a necessidade de uma segunda estratégia de ilhamento, que isole a indústria da UTE, de forma que a indústria autoprodutora se torne uma ilha isolada.

Portanto a topologia das instalações envolvendo esses dois agentes possui mais interconexões e dispositivos a serem considerados do que num simples ilhamento de uma instalação única. Trata-se de uma situação mais complexa, onde o ponto de desconexão vai depender da topologia e do tipo de perturbação.

Propõem-se dois níveis de ilhamento: “Ilhamento Nível 1” e “Ilhamento Nível 2”. Esses dois níveis de ilhamento são independentes um do outro, e **não** necessariamente o nível 1 atua primeiro que o nível 2. Mais detalhes nos itens a seguir.

3.3.3 Ilhamento Nível 1

O primeiro nível de ilhamento **abre a interconexão entre a UTE e o SIN**, formando uma ilha com indústria e a UTE interconectadas entre si, porém isoladas do SIN, conforme apresentado na figura 8.

Importante destacar que o *hardware* do sistema de proteção (relés, transformadores de corrente, transformadores de potencial etc.) necessário ao **Ilhamento Nível 1** localiza-se fisicamente na subestação da **UTE**, evitando a necessidade de sistemas de comunicação ou aquisição de parâmetros externos à instalação local, agregando confiabilidade ao sistema de proteção do ilhamento.

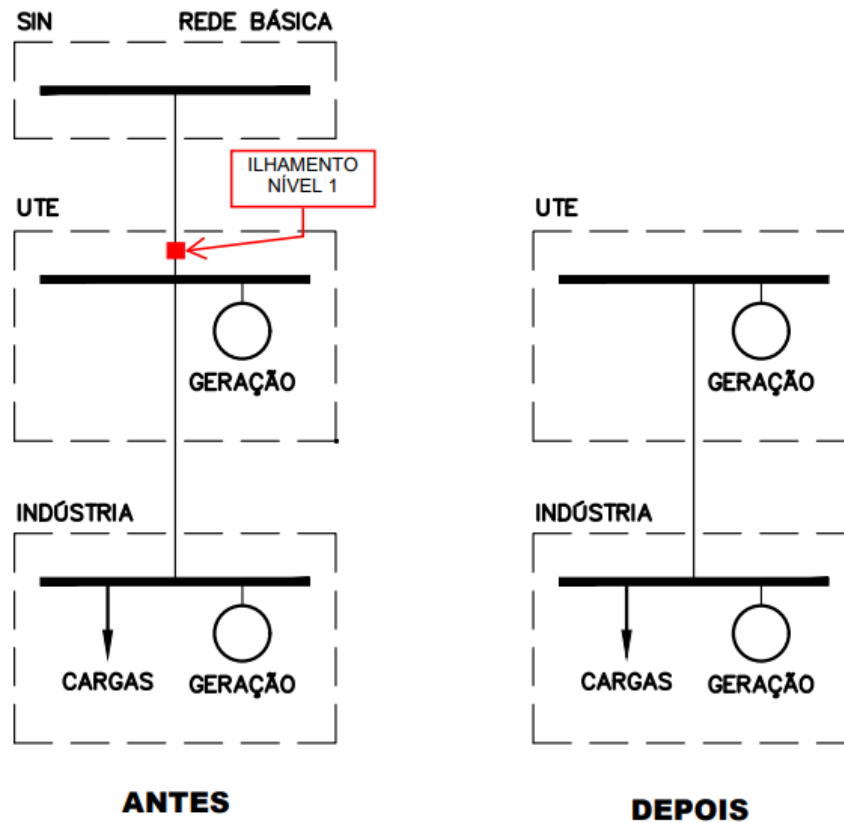


Figura 8: Topologia do sistema no Ilhamento Nível 1.

3.3.4 Ilhamento Nível 2

O segundo nível de ilhamento **abre a interconexão entre indústria e a UTE**, mantendo a indústria autoprodutora totalmente isolada, conforme apresentado na figura 9. Uma vez ocorrido o ilhamento **nível 2**, pode ser necessário descarte de cargas para equilibrar o balanço de potência carga/geração da indústria e evitar a perda de estabilidade na ilha.

De forma análoga ao ilhamento nível 1, todo o *hardware* do sistema de proteção (relés, transformadores de corrente, transformadores de potencial etc.) necessário ao **ilhamento nível 2** localiza-se fisicamente na subestação de entrada da **indústria**

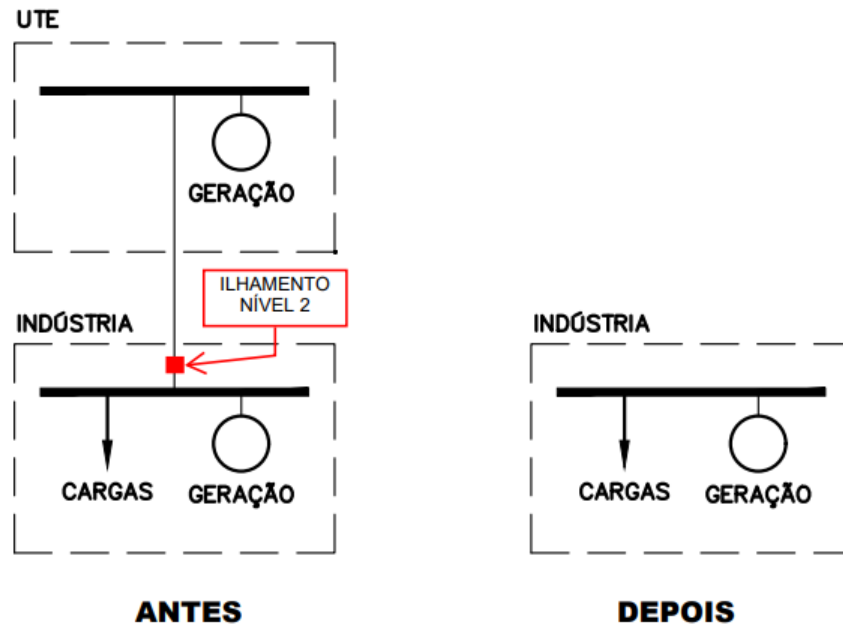


Figura 9: Topologia do sistema no Ilhamento Nível 2.

3.4 Implementação das Proteções de Ilhamento

O *software* ANATEM possui vários relés predefinidos no seu código de execução “DREL”, inclusive relés de sub/sobretensão, sub/sobrefrequência, sobrecorrente e outros. Nas aplicações deste trabalho não se utilizou nenhum dos relés predefinidos no programa (extensão “*blt*”) porque eles só estão disponíveis para comandos específicos e suas informações não são disponibilizadas para utilização em outras lógicas dentro do programa. Dessa forma, todos os relés utilizados foram programados individualmente no formato “Controlador Definido pelo Usuário” (CDU), via linha de códigos de comando ou diagrama de blocos. Os esquemas de proteção usando combinações de funções também foram programados em CDU.

Com base na literatura, foram modelados os relés e esquemas de proteção mais adequados para utilização no ilhamento, descritos a seguir.

3.4.1 Modelagem dos Relés 27 / 59

Os relés de tensão foram programados separadamente, ou seja, um modelo para a função de subtensão (27) e outro modelo para a função de sobretensão (59).

Na utilização das funções 27 ou 59 implementadas, é permitida a alteração dos seguintes parâmetros:

- Local da aquisição da tensão para medição da frequência;
- Local para onde será enviado o disparo de abertura;
- *Pickup* [*pu*];
- *Delay* [*s*].

3.4.2 Modelagem dos Relés 32P / 32Q

Os relés de frequência foram programados separadamente, ou seja, um modelo para a função Direcional de Potência Ativa (32P) e outro modelo para a função Direcional de Potência Reativa (32Q). No ANATEM, a potência (ativa ou reativa, conforme a função utilizada) é obtida diretamente das variáveis do programa.

Na utilização das funções 32P ou 32Q implementadas, é permitida a alteração dos seguintes parâmetros:

- Local da aquisição da potência (ativa ou reativa, conforme o relé utilizado);
- Local para onde será enviado o disparo de abertura;
- *Pickup* [MW ou Mvar] (conforme o relé utilizado);
- *Delay* [*s*];
- Direcionalidade [direto/reverso].

3.4.3 Modelagem dos Relés 50 / 51

Os relés de sobrecorrente instantânea (50) e de sobrecorrente temporizada (51) foram programados com um único modelo usando um tempo definido que pode ser ajustado. Caso se deseje a função 50, basta utilizar um tempo igual a zero, ou um valor

baixo para considerar apenas os tempos de atraso intrínsecos aos equipamentos, como tempo de processamento do relé ou tempo de abertura do disjuntor.

Na utilização da função 50/51 implementada, é permitida a alteração dos seguintes parâmetros:

- Local da aquisição da tensão para medição da corrente;
- Local para onde será enviado o disparo de abertura;
- *Pickup* [A];
- *Delay* [s].

3.4.4 Modelagem do Relé 67

O relé de sobrecorrente direcional (67) foi implementado no ANATEM usando como base a filosofia do relé nativo do próprio programa, que opera caso a impedância “vista” no ponto de medição esteja numa área específica do plano R-X.

A figura 10a apresenta a região de *trip* do relé 67 original do ANATEM (CEPEL, 2019), considerando-se o sentido “direto” da corrente, o ângulo do elemento direcional do relé (θ) é configurável pelo usuário numa faixa de 0° a 45° . A figura 10b mostra o comportamento dinâmico de uma impedância típica vista pelo relé durante um curto-circuito fase-terra no fim da linha (SIQUEIRA, 2007). A figura 10c mostra a característica de atuação da função 67 programada no ANATEM para o presente trabalho, onde a área hachurada é a região de trip do relé, tendo como referência uma sobrecorrente no sentido direto. A figura 10d é uma sobreposição da área de trip do relé implementado sobre a curva da impedância variando durante uma falta, onde percebe-se o desempenho satisfatório.

Na proteção 67 implementada neste trabalho, a região de trip do relé foi propositadamente programada para atuar numa impedância em torno de um ângulo (fixo) de 90° no sentido direto e 180° no sentido reverso, tendo em vista a natureza indutiva das correntes de curto-circuito, que são o foco deste trabalho. E a região adjacente a esse ângulo pode ser ajustável através de um parâmetro (θ) que pode ser ajustado pelo usuário numa faixa de 0° a 45° .

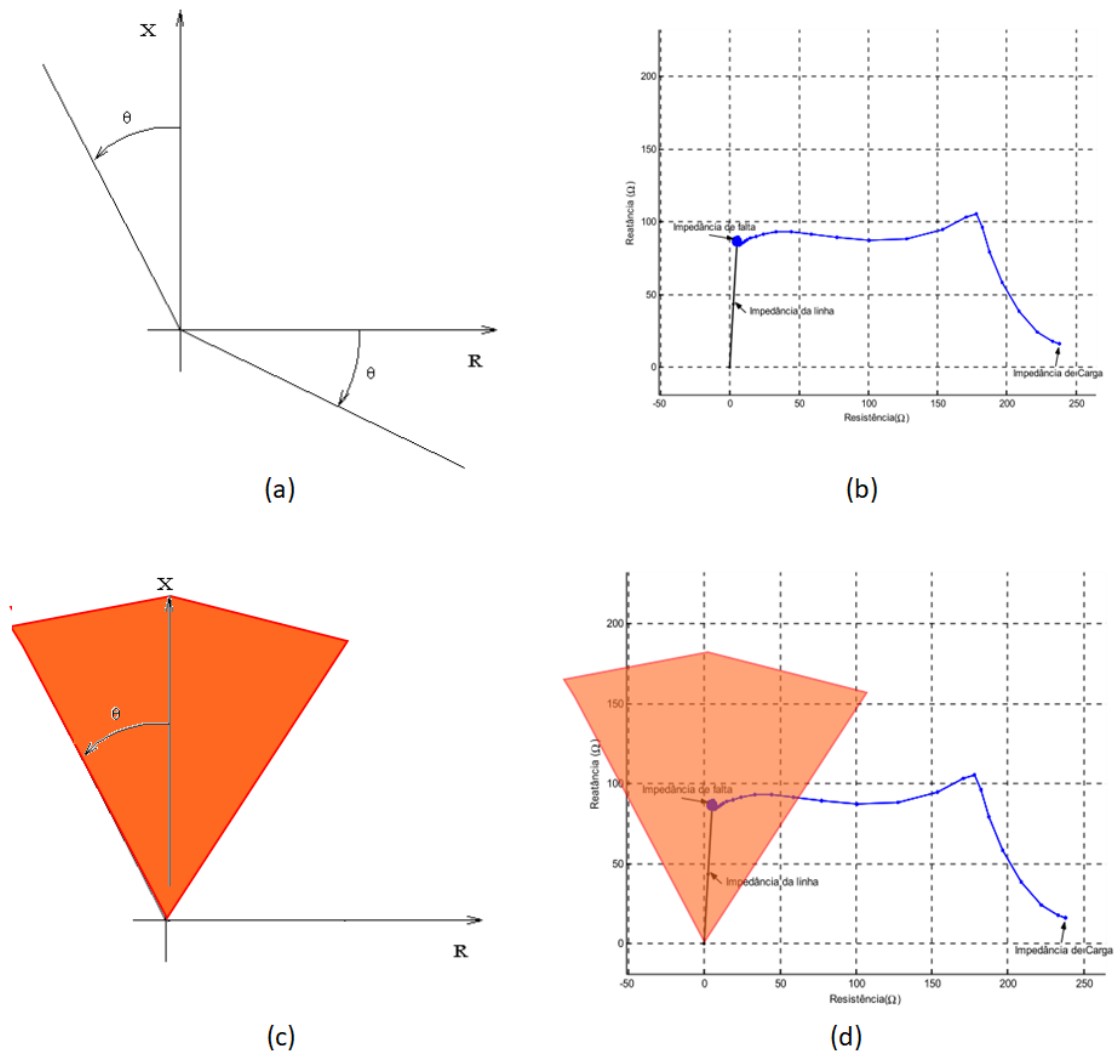


Figura 10: (a) Região de atuação do relé 67 original do ANATEM no plano R-X (Fonte: CEPEL, 2019). (b) Comportamento dinâmico de uma impedância típica vista pelo relé durante curto-circuito fase-terra no fim da linha (Fonte: SIQUEIRA, 2007). (c) Região de atuação da função 67 implementada. (d) Região de atuação da função 67 sobreposta à impedância variando no plano R-X durante uma falta típica.

Na utilização da função 67 implementada, é permitida a alteração dos seguintes parâmetros:

- Local da aquisição da tensão;
- Local da aquisição da corrente;
- Local para onde será enviado o disparo de abertura;
- *Pickup* [A];
- *Delay* [s].

- Ângulo do elemento direcional [graus];
- Direcionalidade [direto/reverso].

3.4.5 Modelagem dos Relés 81U / 81O

Os relés de frequência foram programados separadamente, ou seja, um modelo para a função de subfrequência (81U) e outro modelo para a função de sobrefrequência (81O).

Na utilização dos relés 81U ou 81O implementados, é permitida a alteração dos seguintes parâmetros:

- Local da aquisição da tensão para medição da frequência;
- Local para onde será enviado o disparo de abertura;
- Pickup [Hz];
- Delay [s].

3.4.6 Modelagem dos Relés 81R_U / 81R_O

Os relés de taxa de variação de frequência foram programados separadamente, ou seja, um modelo para a função df/dt de subfrequência (81R_U) e outro modelo para a função df/dt de sobrefrequência (81R_O).

Na utilização dos relés 81R_U ou 81R_O implementados, é permitida a alteração dos seguintes parâmetros:

- Local da aquisição da tensão para medição da frequência;
- Local para onde será enviado o disparo de abertura;
- *Pickup df/dt* [Hz/s];
- Frequência de supervisão [Hz];
- Frequência de corte [Hz];
- Delay [s].

Onde: “frequência de supervisão” é a frequência a partir da qual o cálculo da taxa de variação de frequência é ativado; e “frequência de corte” é a frequência na qual o cálculo da taxa de variação de frequência é efetuado (CEPEL, 2019). Ou seja, os pontos

inicial e final para o cálculo da taxa de variação de frequência são amostrados respectivamente na “frequência de supervisão” e “frequência de corte” durante a variação da frequência medida.

3.4.7 Modelagem do Relé 81RF

Os relés “*Fast Rate of Change of Frequency*” (81RF) foram programados separadamente, ou seja, um modelo para a função de subfrequência (81RF_U) e outro modelo para a função de sobrefrequência (81RF_O).

Na utilização da função 81RF implementada, é permitida a alteração dos seguintes parâmetros:

- Local da aquisição da tensão para medição da frequência;
- Local para onde será enviado o disparo de abertura;
- X_{offset} [Hz] – banda morta em torno da frequência nominal, onde o relé propositalmente não atua para evitar imprecisão;
- Y_{offset} [Hz/s] – banda morta de df/dt em torno zero, onde o relé propositalmente não atua para evitar imprecisão;
- $X_{pickup} - pickup$ do desvio na frequência Δf [Hz];
- $Y_{pickup} - pickup$ da taxa de variação de frequência df/dt [Hz/s];
- $Delay$ [s].

O limite de atuação é definido pela equação:

$$y = \frac{Y_{pickup}}{X_{pickup}} \cdot x + Y_{pickup} \quad (3.1)$$

Onde:

- x – desvio na frequência medido [Hz];
- y – taxa de variação de frequência (df/dt) correspondente a “ x ” [Hz/s].

3.4.8 Modelagem dos Esquemas da Literatura

Com base no artigo (AUDRING; LERCH, 2011), apresentado na figura 5, implementou-se no ANATEM o diagrama lógico da figura 11, adaptação do esquema original do artigo, onde os blocos da função 51 e o bloco de direção da corrente foram substituídos por uma única função 67 na lógica implementada, pois a sobrecorrente combinada com direcionalidade nada mais é do que a própria sobrecorrente direcional (67). Houve adaptação também nas funções 27 e 59, que no artigo original consideram as variações das tensões fase-neutro em qualquer uma das fases, entretanto, na implementação do ANATEM consideram apenas a sequência positiva.

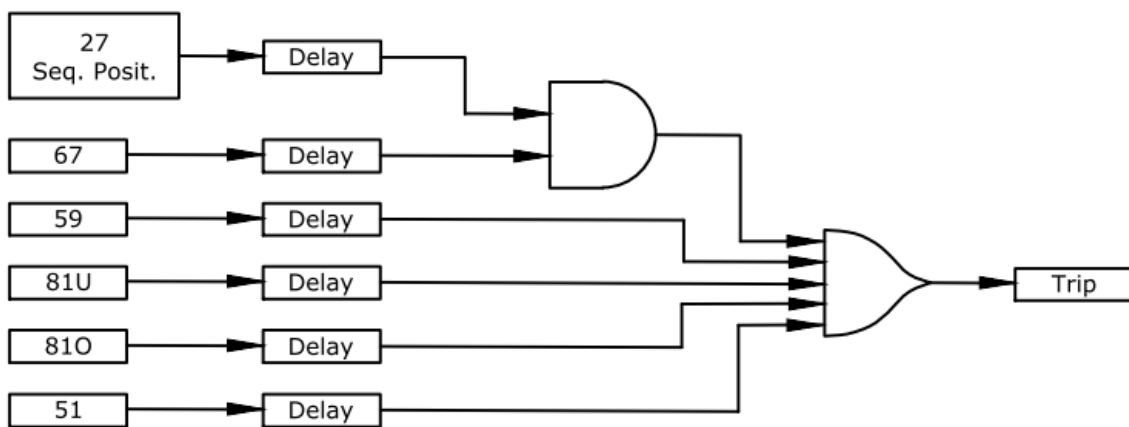


Figura 11: Lógica implementada com base no esquema Audring-Lerch (2011)

Com base no artigo (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999), apresentado na figura 6, implementou-se no ANATEM o diagrama lógico da figura 12. Assim como o esquema anterior, os dois blocos da função 27 implementados nesta lógica também consideram a sequência positiva da tensão, por limitação do *software*. Pelo mesmo motivo, o bloco de sobrecorrente direcional de neutro (67N) não foi implementado, pois como o ANATEM trabalha apenas a sequência positiva da corrente, não há diferença entre as correntes de fase e por consequência a corrente de neutro é sempre nula. Outra adaptação a se observar é que foram suprimidos o bloco que representa a “*Indústria em operação com os relés de bloqueio Não-Atuados*” e o bloco de “*Disjuntores de entrada na posição Fechado*”, que não foram implementados porque esses blocos são desnecessários para o propósito das simulações deste trabalho.

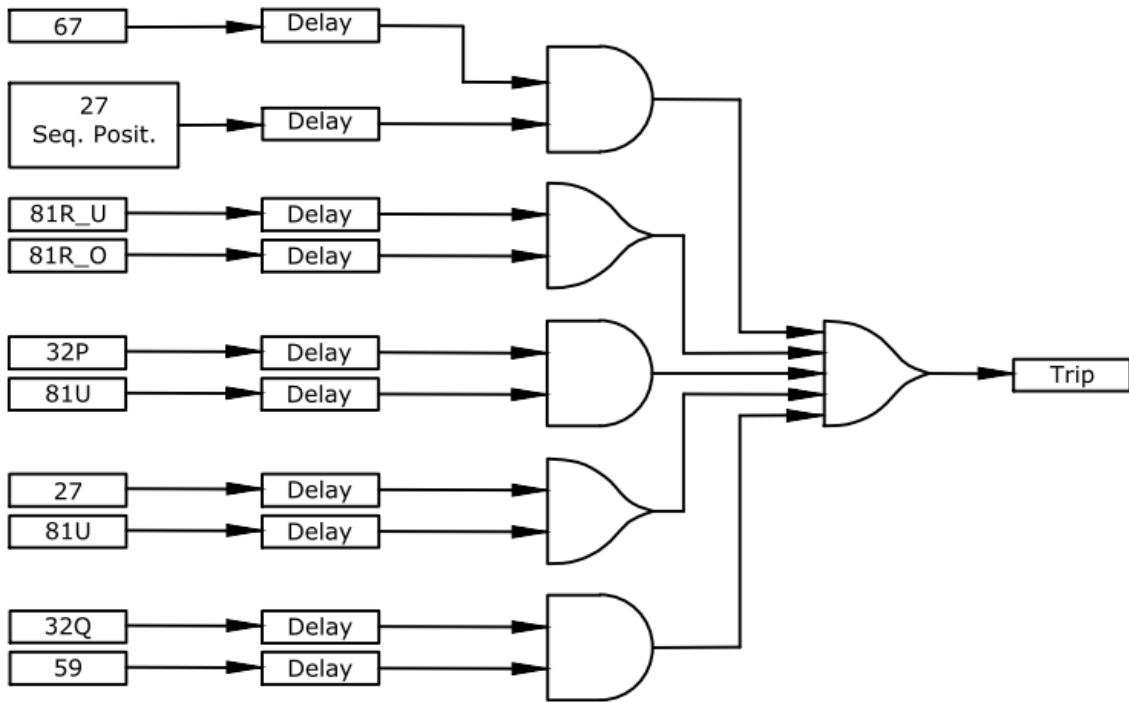


Figura 12: Lógica implementada com base no esquema Rajamani-Hambarde (1999)

Com base no artigo (MOZINA, 2007), apresentado na figura 7, implementou-se no ANATEM o diagrama lógico da figura 13. Devido ao fato de o *software* considerar apenas a sequência positiva da tensão, foram necessárias algumas adaptações nos blocos do esquema original do artigo. Primeiramente, a escolha entre as duas propostas similares do autor ficou limitada apenas ao esquema baseado na subtensão de sequência positiva (figura 7b), pois o ANATEM não considera subtensões monofásicas, que seriam necessárias no esquema da figura 7a. Quanto ao bloco 27B, que no esquema original bloqueia a atuação da lógica se a tensão fase-neutro em qualquer das fases cair abaixo do ajuste, foi adaptado para bloquear se houver subtensão de sequência positiva, que corresponde a subtensão em todas as fases simultaneamente. Foi suprimido o bloco 47B, que no esquema original do artigo bloqueia a lógica em caso de sobretensão de sequência negativa, a qual não é considerada pelo *software*.

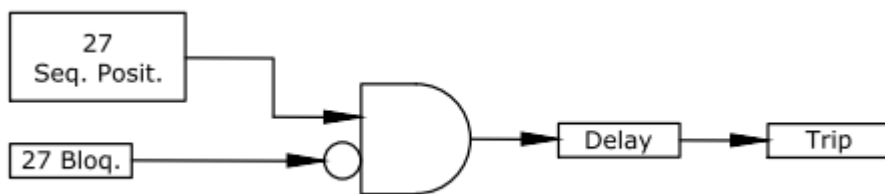


Figura 13: Lógica implementada com base no esquema Mozina (2007)

Cada um dos relés, utilizados nos esquemas das figuras 11, 12 e 13 foi modelado individualmente no programa para cada um dos esquemas, conforme descrito nos itens anteriores. Cada um deles tem seus respectivos parâmetros ajustáveis individualmente, exceto os parâmetros de locais de aquisição das grandezas (corrente e tensão) e locais para envio do *trip*, que também são ajustáveis mas são únicos para todos os relés de cada esquema. São eles:

- Local da aquisição da tensão de referência;
- Local da aquisição da corrente de referência;
- Local para onde será enviado o disparo de abertura;

3.4.9 Relés Não Utilizados

Alguns relés, embora utilizados na literatura para o ilhamento, não foram implementados neste trabalho.

O relé de sincronismo (25), não foi necessário, pois é utilizado na recomposição do sistema para garantir o fechamento do disjuntor em condições adequadas. Para o propósito deste trabalho, que se restringe ao ilhamento, não será simulada a normalização do sistema.

O relé de deslocamento de fase (78) não foi implementado por limitação de software. Na literatura, o modelo da função 78 para aplicações de ilhamento estima o ângulo de deslocamento comparando o tempo de dois ciclos consecutivos da onda senoidal de tensão. O ANATEM não trabalha com ângulos na forma senoidal, mas sim com o valor absoluto da defasagem em relação a uma barra de referência, o que inviabiliza a modelagem da função 78.

3.4.10 Modelagem do Descarte de Cargas

Para a finalidade das simulações, foi programado um relé com uma lista de blocos de cargas para descarte. O relé comanda a abertura dos circuitos ou o desligamento das barras selecionadas. A seleção é feita manualmente no programa, em forma de parâmetros.

3.4.11 Proteções de Ilhamento Propostas

A estratégia utilizada é propor um sistema de proteção para o ilhamento de uma indústria com uma UTE conectada ao SIN que se aplique a **qualquer caso genérico**. Nesse intuito, o sistema de proteção proposto é composto de duas lógicas distintas, operando simultaneamente, porém em pontos diferentes do sistema, sendo uma para o Ilhamento Nível 1, que abre a interconexão entre a UTE e o SIN, e outra para o Ilhamento Nível 2, abre a interconexão entre a indústria e a UTE.

Para o **Ilhamento Nível 1**, em casos de perturbações de frequência, principalmente nos eventos transitórios, sem grandes problemas até o retorno à estabilidade, não é desejável a desconexão entre a UTE e o SIN, pois o controle da frequência é mantido principalmente pelos reguladores de velocidade das máquinas e a UTE tem importante papel nesse contexto, para atender as condições exigidas pela ANEEL (2021), conforme tabela 1 e tabela 2.

Para os casos de subfrequência, o SIN possui o ERAC, que auxilia no balanço de potência através do corte de montantes de carga em diversos estágios por relés de frequência (ONS, 2019). Mesmo nos casos mais severos, como no colapso de frequência, onde a degradação é progressiva e até irreversível, a proposta é que não ocorra abertura da interconexão entre a UTE e o SIN, sendo que neste caso a atuação se daria pelo **Ilhamento Nível 2**.

Outra consideração é que a UTE está conectada ao SIN e, portanto, não atende somente a indústria, o que tende a dificultar em muito a obtenção de autorização dos órgãos competentes para retirar de operação uma UTE atendendo ao SIN, em prol de atender exclusivamente uma única indústria, especialmente em situações de contingência sistêmica de subfrequência, quando o sistema mais precisa de toda geração disponível.

Para o Ilhamento Nível 1, em casos de perturbações de tensão, nenhum evento transitório deverá provocar a desconexão entre a UTE e o SIN, pois também não trazem grandes problemas até o retorno à estabilidade, e a UTE também possui importante papel na regulação de tensão para atender as condições exigidas pela ANEEL (2021), conforme tabela 2. O caso mais severo é o colapso de tensão, evento lento e sistêmico que, de acordo com MOZINA (2007), é a causa raiz de quase todos os maiores distúrbios no sistema de

potência, em vez de subfrequência, e pode levar ao *blackout*. Contra o colapso de tensão, sim, é desejável o ilhamento, no qual UTE permaneça conectada à indústria, conforme topologia da figura 8.

A proposta para o **Ilhamento Nível 1** resume-se, portanto, no diagrama lógico da figura 14, que é lógica contra colapso de tensão proposta em (MOZINA, 2007), e provoca a abertura da interconexão entre a UTE e o SIN. Em qualquer outro tipo de perturbação, o ilhamento ficaria a cargo do esquema de **Ilhamento Nível 2**, instalado na indústria.

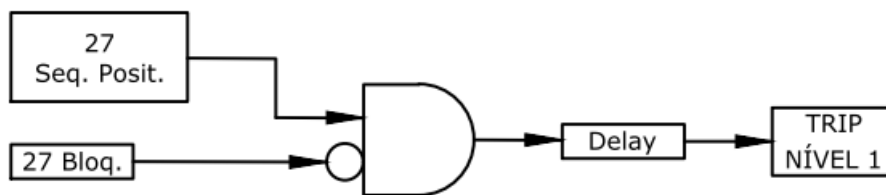


Figura 14: Lógica proposta para o Ilhamento Nível 1.

A proposta para o **Ilhamento Nível 2** é apresentada no diagrama lógico da figura 15, e provoca a abertura da interconexão entre a indústria e a UTE, resultando na topologia apresentada na figura 9.

A proposta para o **Ilhamento Nível 2** consiste num resumo das proteções e esquemas de ilhamento aplicáveis à indústria, que foram apresentados anteriormente com base nas referências. Como a proposta do trabalho é um **esquema genérico** adaptável a diversas situações, a utilização de cada função dependerá da necessidade específica, da topologia das instalações e das características do sistema em cada caso.

Todas as funções podem ser desabilitadas. No *software*, uma forma simples de bloquear a função desejada é ajustando-se o parâmetro de *delay* com valor excessivo, maior que o tempo da simulação.

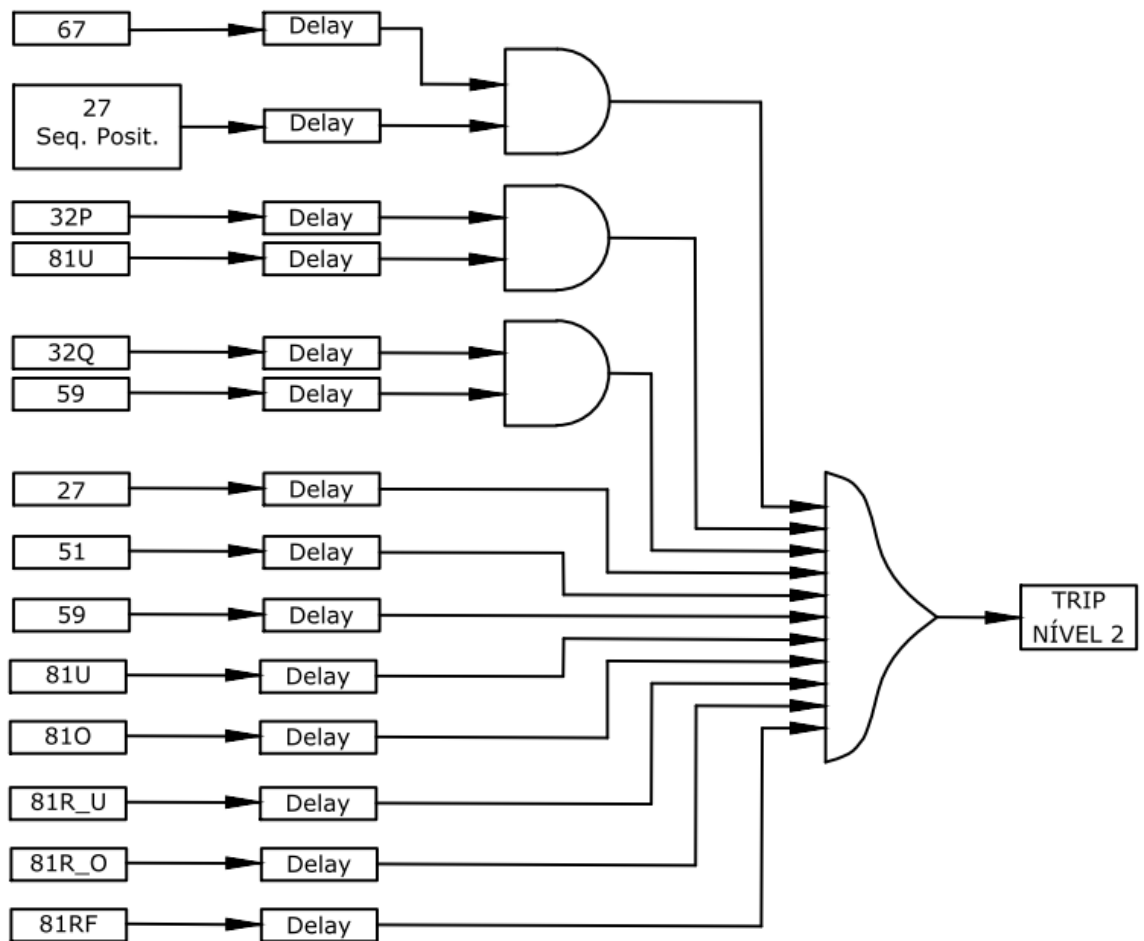


Figura 15: Lógica proposta para o Ilhamento Nível 2.

Cada função ou bloco proposto na lógica apresentada na figura 15 teve como base a seguinte filosofia:

- O bloco 67/27 é baseado nos artigos (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999) e (AUDRING; LERCH, 2011), e tem a função o ilhamento para faltas externas à indústria.
- O bloco 32/81U é baseado no artigo (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999), com a função de detectar a perda do sistema externo principalmente quando a diferença de potência ativa carga-geração não for suficiente para atuar as outras proteções de frequência.

- Bloco 32Q/59 é baseado no artigo (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999), para atuar nos casos de conexão através de linha longa, na qual ocorra abertura no terminal remoto.
- As funções individuais de tensão e frequência absolutas (27, 59, 81U e 81O), baseadas nos artigos (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999) e (AUDRING; LERCH, 2011), são para os casos de ultrapassagem dos limites operacionais estabelecidos ou aceitáveis.
- A função 51 é um backup das outras proteções contra curto-circuito e deve ser usada somente se necessário, pois pode atuar sob certas condições de carga, de acordo com o artigo (AUDRING; LERCH, 2011).
- Uma vez que as funções de frequência têm sua eficácia reconhecida para detecções de ilhamento, de acordo com (VIEIRA et al., 2005) e (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999), as funções de taxa de variação de frequência (81R) e rápida taxa de variação de frequência (81RF) são utilizadas na intenção de acelerar o ilhamento, já que os relés 81R (df/dt) tendem a ser mais rápidos que os relés 81 (VIEIRA et al., 2005), e os relés 81RF tendem a ser mais rápidos que os relés 81R (ANNE et al., 2016).

3.5 Cenários para as Simulações

Para verificar o desempenho do sistema de proteção proposto, serão simulados os seguintes cenários de perturbações no sistema:

- Cenários de **subfrequência**: para análise das proteções de ilhamento nível 2, aplicável na indústria. Simular contingências de perda de geração e acréscimo de blocos de carga. Simular cenários de colapso de frequência. Simular a abertura da interligação indústria-UTE, uma vez que a capacidade de geração da indústria é inferior à carga, tendendo à subfrequência no sistema.
- Cenários de **sobrefrequência**: para análise das proteções de ilhamento nível 2, aplicável na indústria. Simular contingências de perda de blocos de carga e curto-circuitos. Simular a abertura da interligação UTE-SIN

uma vez que a geração da indústria é inferior à carga, mas a geração da UTE é superior.

- Cenários de **subtensão**: para análise das proteções de ilhamento nível 1 e de ilhamento nível 2, aplicável na UTE e na indústria. Simular contingências de curto-circuito, perda de geração e acréscimo de blocos de carga. Simular a perda de uma subestação relevante na região da indústria. Simular cenário de colapso de tensão.
- Cenários de **sobretensão**: para análise das proteções de ilhamento nível 2, aplicável na indústria. Simular contingências de perda de blocos de carga no sistema.

Dependendo da capacidade da geração da UTE com relação à capacidade da indústria autoprodutora, pode ser necessário considerar diferentes condições de operação da geração na indústria, o que pode impactar principalmente em casos de necessidade de descarte de cargas. Deve-se avaliar de acordo com o sistema específico de cada estudo, sugerindo-se os cenários de balanço carga-geração na indústria: **geração máxima**, com indústria operando com sua carga típica e com sua capacidade total de geração; **geração mínima**, com indústria operando com sua carga típica e com sua configuração reduzida de máquinas; e um cenário de **geração intermediária**. Ressalta-se que “geração mínima”, neste caso, não significa necessariamente todos os geradores desligados, condição na qual o Ilhamento Nível 2 não teria sentido. Obviamente deve-se avaliar em cada caso as condições operacionais a considerar.

Outras considerações são necessárias, dependendo do caso. Por exemplo, as condições operacionais da UTE; ou se a indústria autoprodutora tem capacidade de geração interna superior à sua própria carga, caso em que um ilhamento indústria-UTE pode não trazer vantagem. Deve-se avaliar de acordo com o sistema específico de cada estudo.

Ao final das simulações, os resultados serão comparados e o desempenho dos sistemas de proteção propostos para Ilhamento Nível 1 e Ilhamento Nível 2 será avaliado.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASO

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a aplicação do sistema de proteção proposto através de um estudo de caso com simulação de um sistema real existente.

4.2 O Sistema Teste

O sistema elétrico proposto neste estudo de caso é uma instalação existente na região sudeste do Brasil, composto de uma grande indústria petroquímica autoprodutora, conectada a uma UTE e esta última interligada a uma subestação da Rede Básica (SIN), conforme diagrama simplificado da figura 16.

A indústria tem uma subestação de entrada em 138 kV , de onde se distribuem alimentadores para três blocos de carga, sendo que dois desses blocos possuem geração e o terceiro bloco possui apenas cargas. No total são cinco geradores a vapor, com potência total instalada de 76 MVA , porém a capacidade de geração é limitada pelo sistema térmico de acionamento primário em aproximadamente 50 MW . A carga total da planta é de aproximadamente 70 MW , distribuída nos três blocos. A indústria sempre importa energia elétrica da UTE, em torno de 20 MW a 35 MW , mas numa contingência severa pode importar 70 MW , valor aproximado de sua carga total.

A UTE possui três blocos de geração, conectados à sua subestação de 138 kV . Cada um dos três blocos possui três geradores que trabalham em ciclo combinado, sendo duas turbinas a gás e uma a vapor em cada bloco. No total são nove máquinas, sendo seis

a gás e três a vapor, com potência total instalada de 1368 MVA , porém a capacidade de geração é limitada pelo sistema térmico de acionamento primário em aproximadamente 1000 MW . Para fins de ilhamento, a premissa é que, para diminuir o desbalanço de potência e aumentar confiabilidade, uma vez disparado o comando de Ilhamento Nível 1 na UTE, apenas uma máquina ficará conectada na barra da indústria, e todas as demais máquinas desta barra serão desconectadas automaticamente por *transfer-trip*. Com isso, a potência típica da máquina a gás a ser considerada no ilhamento pela UTE é de 100 MW .

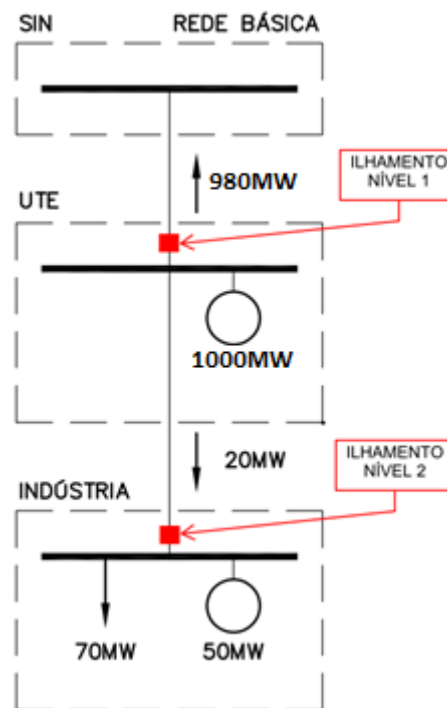


Figura 16: Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico proposto.

A subestação SIN faz parte da Rede Básica em 500 kV , sendo que seu barramento de 138 kV se interliga à UTE.

A interligação indústria-UTE é feita através de duas linhas de transmissão 138 kV , assim como a interligação UTE-SIN. É importante destacar que os seguintes equipamentos 138 kV têm a **proteção diferencial (87)** como sua proteção principal:

- As duas LT indústria-UTE;
- As duas LT UTE-SIN;

- O barramento de entrada da indústria;
- O barramento da subestação UTE;
- O barramento da subestação SIN.

A figura 17 apresenta o diagrama unifilar do sistema modelado no *software* ANAREDE, para utilização das simulações no programa ANATEM. Conforme a configuração operacional real, os blocos 1 e 2 da indústria (que possuem geração) ficam conectados a uma das barras da UTE com parte da geração da usina. O bloco 3 da indústria, que não possui geração, fica conectado à outra barra da UTE, com o restante da geração da usina. Nessa topologia, o bloco 3 não participa do ilhamento nível 2, sendo automaticamente descartado, já que a geração da indústria não é suficiente para toda sua carga.

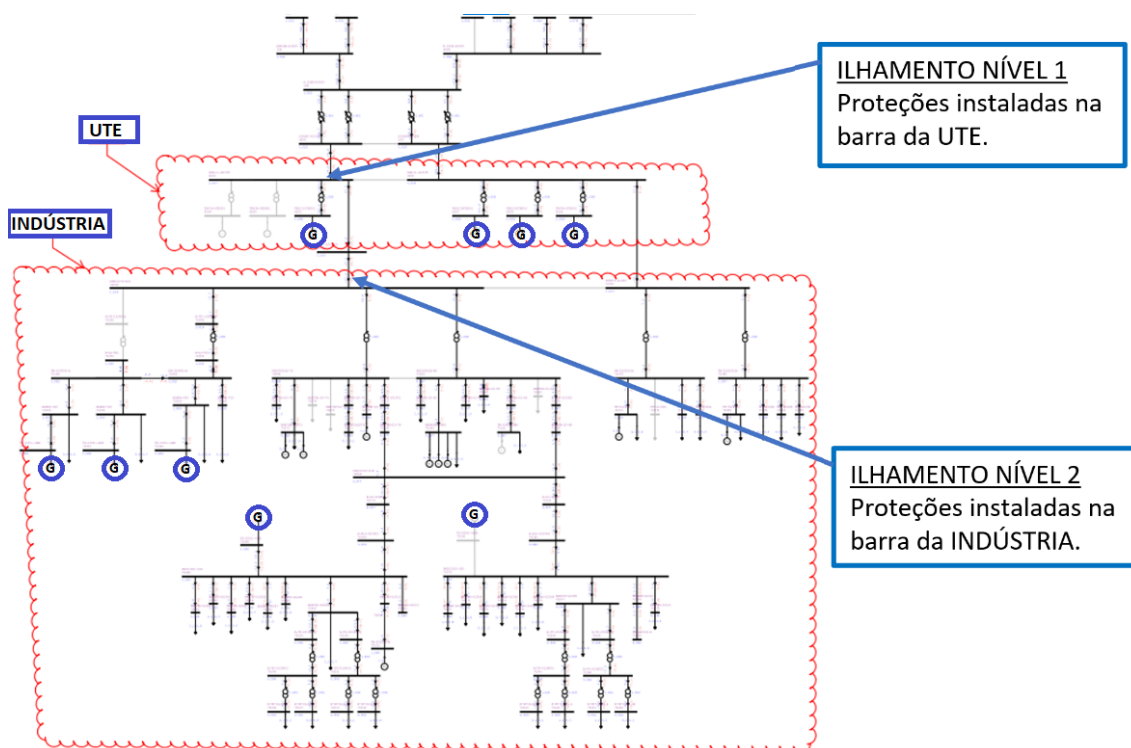


Figura 17: Diagrama unifilar do sistema no ANAREDE.

O **modelo de máquina** utilizado no software ANATEM (CEPEL, 2019), para todos os geradores da UTE e da Indústria, foi o “*Modelo 03 Predefinido de máquina síncrona (DMDG MD03)*”.

Os **modelos dos reguladores de velocidade** utilizados no software ANATEM (CEPEL, 2019), para todos os geradores da UTE e da Indústria, foi o “*Modelo 02 Predefinido de Regulador de Velocidade (DRGV MD02)*”, exceto para as máquinas do bloco 2 da indústria, onde utilizou-se um “*Controlador Definido pelo Usuário (CDU)*”.

Os **modelos dos reguladores de velocidade** utilizados no software ANATEM (CEPEL, 2019), para todos os geradores da UTE e da Indústria, foram implementados através de “*Controladores Definidos pelo Usuário (CDU)*”, exceto para as máquinas do bloco 2 da indústria, onde utilizou-se o “*Modelo 02 Predefinido de Regulador de Velocidade (DRGV MD02)*”.

Os **modelos dos estabilizares (PSS)** utilizados no software ANATEM (CEPEL, 2019), para todos os geradores da UTE e da Indústria, foram implementados através de “*Controladores Definidos pelo Usuário (CDU)*”. As máquinas da indústria não possuem, PSS.

4.3 Validação do Modelo

4.3.1 Validação com Perturbações Locais

Durante o período de elaboração desta dissertação, por duas vezes ocorreram perturbações no sistema real que culminaram no ilhamento involuntário da indústria com a UTE em questão. A operação ilhada durou poucos segundos **em condições precárias** até o *trip* dos equipamentos, pois **o sistema não estava preparado para esse ilhamento**. Atualmente a UTE opera com o regulador de velocidade das máquinas no modo “Regulação de Emissões” para atender requisitos legais, onde controla a temperatura de exausto, mantendo máxima potência. Em outras palavras, não foi prevista a operação “ilhada” e nesse caso tende a acelerar a máquina como se não houvesse regulador de velocidade. Nessas oportunidades foi possível obter a oscilografia desses eventos locais e comparar com o modelo configurado no ANATEM, a fim de validar os dados modelados.

A figura 18 apresenta a oscilografia real do primeiro evento, onde a velocidade do rotor é a curva em azul, que é proporcional à frequência da máquina. Os dados da curva foram extraídos e colocados num mesmo gráfico (figura 19) junto com o resultado do mesmo evento simulado pelo ANATEM com o modelo configurado no presente trabalho. Observa-se que as curvas estão bem coerentes até aproximadamente 65 Hz. Conforme a frequência se desvia do valor nominal de 60 Hz os modelos matemáticos começam a não representar bem a realidade, visto que outros efeitos passam a distorcer os resultados.

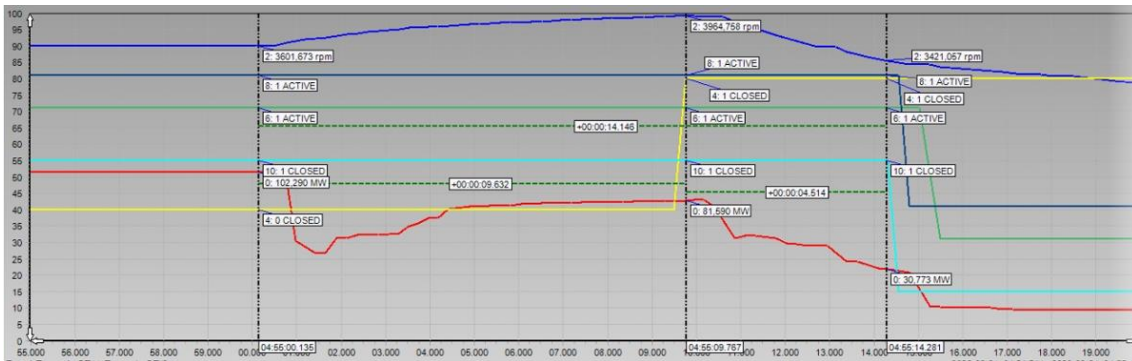


Figura 18: Oscilografia real do primeiro ilhamento indústria-UTE, com 1 máquina conectada. Velocidade do rotor: curva em azul.

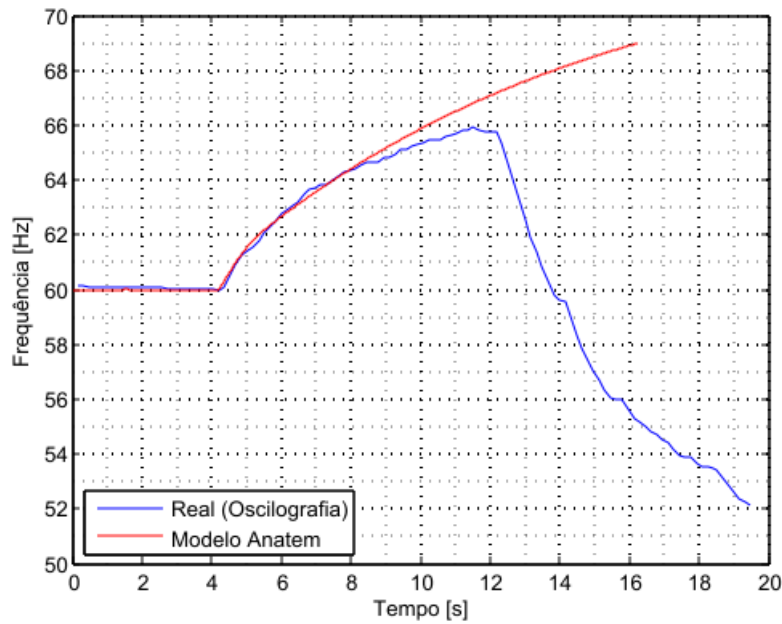


Figura 19: Validação do modelo ANATEM - comparação no primeiro ilhamento.

Analogamente, a figura 20 apresenta a oscilografia real do segundo evento, dessa vez duas máquinas da UTE ficaram conectadas na mesma barra da indústria. A figura 21 compara os dados da oscilografia real com a simulação do ANATEM, e novamente se observa um resultado bastante coerente, levando-se em consideração que neste evento com duas máquinas, a tendência é haver mais imprecisão, já que quanto maior a quantidade de máquinas, a tendência é aumentar também erros, devido aos efeitos mecânicos, térmicos etc.) que não são bem representados pelos modelos matemáticos do *software*.

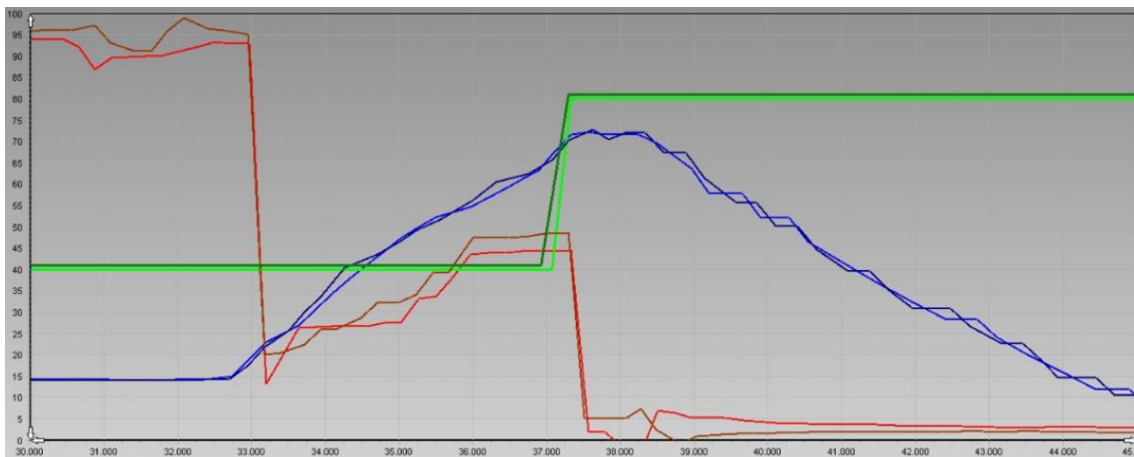


Figura 20: Oscilografia real do segundo ilhamento indústria-UTE, com 2 máquinas conectadas. Velocidade do rotor: curva em azul e curva em preto.

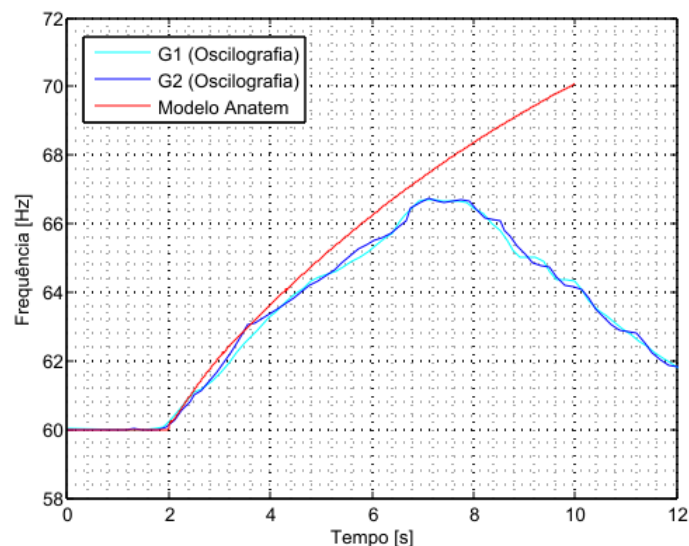


Figura 21: Validação do modelo ANATEM - comparação no segundo ilhamento.

A comparação entre eventos reais e os eventos simulados no *software* mostrou que o modelo do sistema da indústria e da UTE configurados está bem adequado para os propósitos do trabalho.

4.3.2 Validação com Perturbações Sistêmicas

Para validação dos dados do SIN modelados, foram comparadas também algumas oscilografias de perturbações reais sistêmicas através da simulação destas no modelo configurado no ANATEM.

Foram selecionadas três perturbações, com impactos sistêmicos na frequência do SIN, a partir de um relatório do ONS (2019), onde são apresentadas oscilografias dessas perturbações, registradas por PMUs em diferentes localizações físicas do sistema.

A figura 22 apresenta a oscilografia de uma perturbação de 28 de janeiro de 2018 às 11h57, onde houve bloqueio do Bipolo 1 do Elo de Transmissão em Corrente Contínua Xingu-Estreito e desligamento de 4 unidades geradoras na UHE Tucuruí. No SIN, a subfrequência atingiu o valor mínimo de 58,38 Hz.

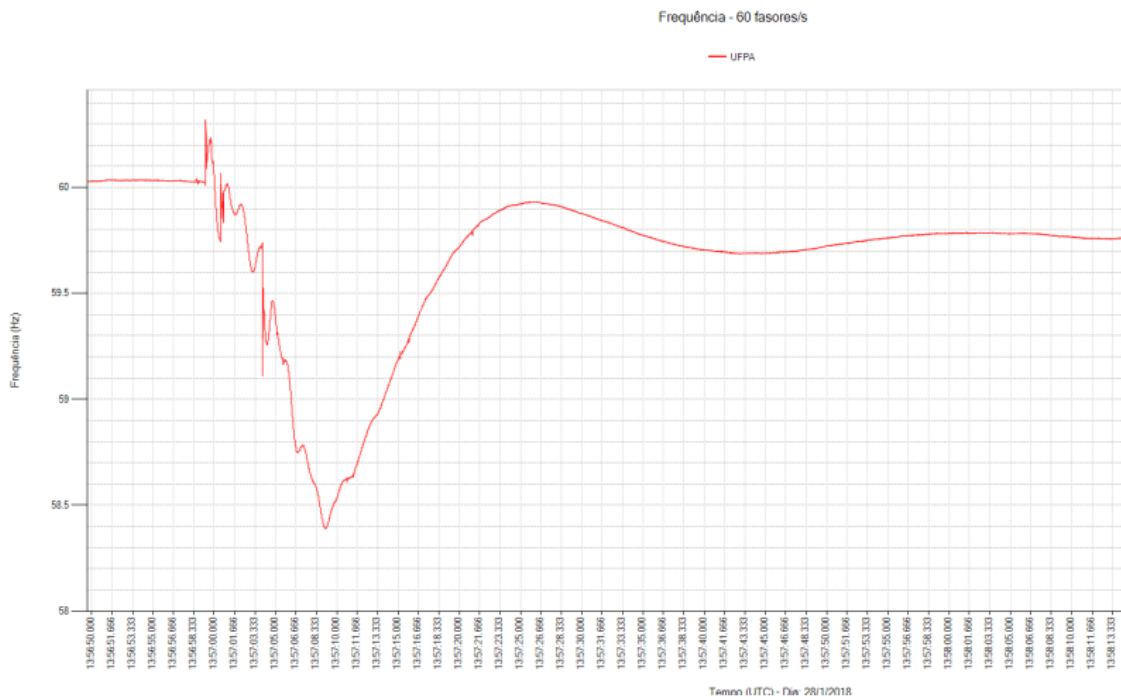


Figura 22: Frequência observada pela PMU da UFPA na perturbação de 28/01/2018.(Fonte: ONS, 2019)

A figura 23 apresenta a oscilografia de uma perturbação de 03 de junho de 2018 às 23h31, onde ocorreu bloqueio dos Bipolos 1 e 2 do Elo de Transmissão em Corrente Contínua Foz do Iguaçu/Ibiúna, associado à UHE Itaipu 50 Hz. A frequência no SIN atingiu o valor mínimo de 58,65 Hz.

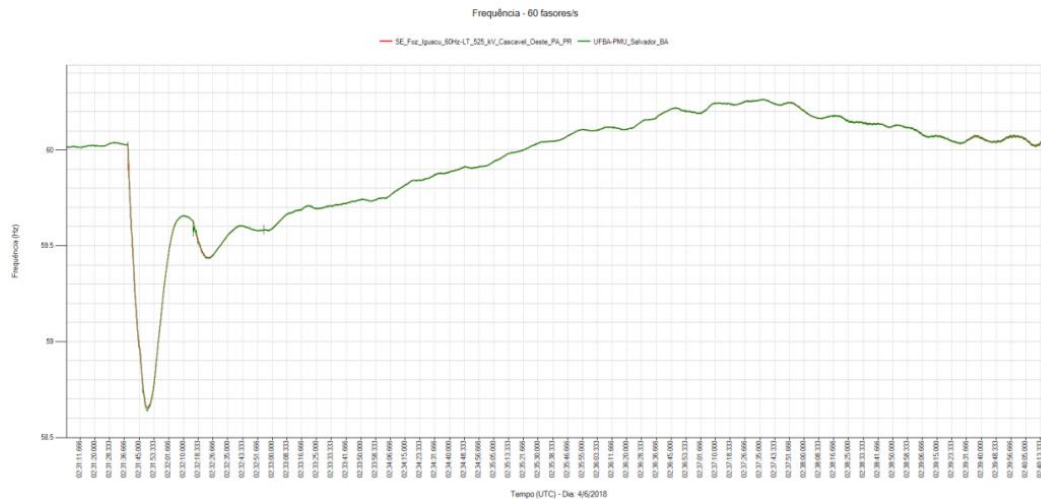


Figura 23: Frequência observada pela PMU da SE-Foz do Iguaçu e PMU da UFPA na perturbação de 03/06/2018. (Fonte: ONS, 2019)

A figura 24 apresenta a oscilografia de uma perturbação de 05 de agosto de 2018 às 07h49, quando durante as manobras para isolar o Bipolo 2 do sistema de transmissão em Corrente Contínua Foz do Iguaçu/Ibiúna, ocorreu bloqueio do Bipolo 1. A frequência no SIN atingiu o valor mínimo de 58,58 Hz.

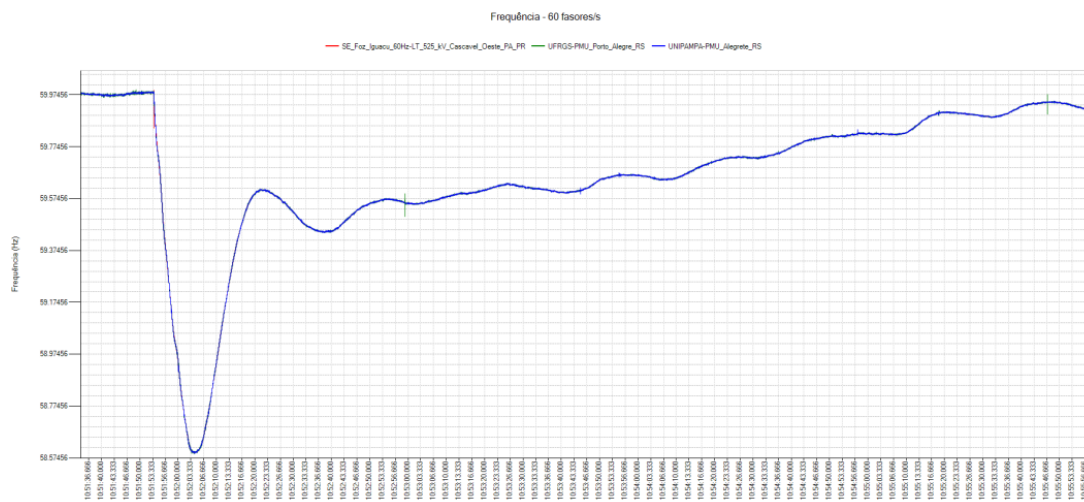


Figura 24: Frequência observada pela PMU da SE-Foz do Iguaçu, PMU da UFRGS e PMU da UNIPAMPA na perturbação de 05/08/2018. (Fonte: ONS, 2019)

A figura 25 apresenta os gráficos de comportamento da frequência do SIN, para as perturbações divulgadas pelo ONS, sincronizadas num mesmo gráfico e uma ampliação do minuto inicial, para melhor visualização.

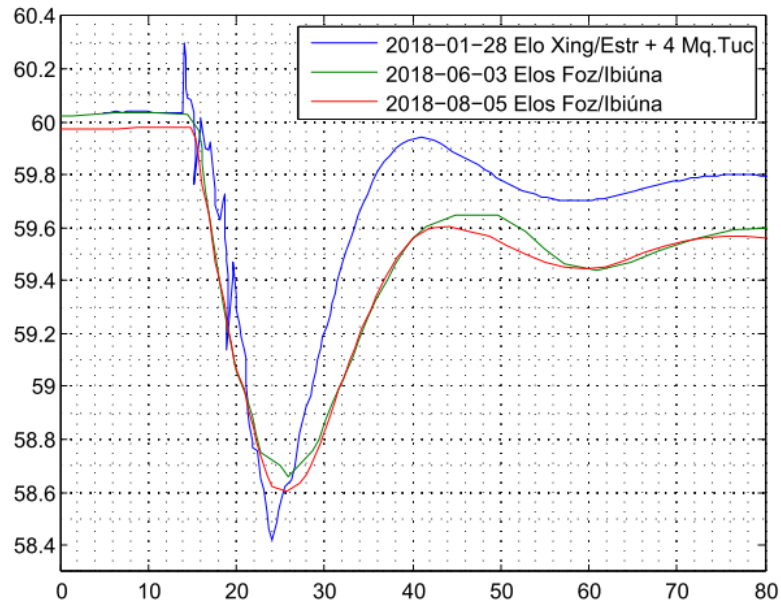


Figura 25: Comparativo das 3 perturbações sistêmicas.

Para validar o modelo do sistema no Anatem, foram simulados os três eventos. Como não era possível saber todas as condições operacionais reais, foram necessárias algumas adequações de ajustes de geração de algumas usinas. Após alguns ajustes de geração, os resultados obtidos são apresentados nas figuras 26 e 27, comparando a oscilografia real e a simulada no Anatem num mesmo gráfico.

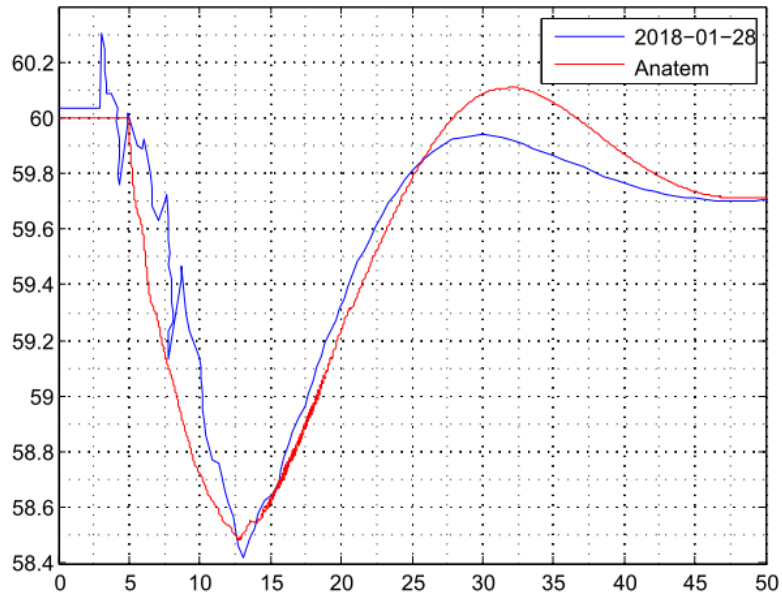


Figura 26: Validação no Anatem da ocorrência envolvendo bloqueio do bipolo Xingu-Estremo. Desligadas também as barras de geração n° 6424, 510, 303, 5061, 520.

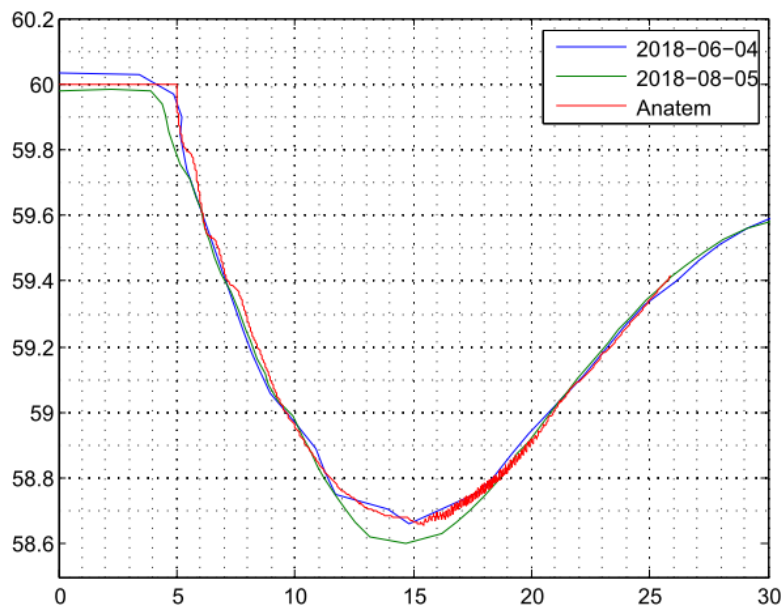


Figura 27: Validação no Anatem das ocorrências envolvendo bloqueio dos 2 Bipolos Foz do Iguaçu/Ibiúna. Desligadas também as barras de geração n° 6425 e 11.

A comparação entre eventos reais e os eventos simulados no software mostrou que o modelo sistêmico configurado está bem adequado para os propósitos do trabalho.

4.4 Ajustes das Proteções

Embora os esquemas propostos para Ilhamento Nível 1 e Ilhamento Nível 2 sejam genéricos, podendo ser aplicados em diversas situações, os ajustes a serem utilizados não o são. Cada caso específico necessita de ajustes sob medida para sua aplicação.

Os ajustes dependem de vários fatores, como a topologia do sistema, a potência dos equipamentos e instalações, a configuração operacional, os limites operacionais vigentes etc.

Citam-se a seguir os critérios que foram usados como referência para definição dos parâmetros de ajuste das proteções de ilhamento propostas neste trabalho:

- As equações para os relés de frequência desenvolvidas analiticamente em (VIEIRA et al., 2008);
- Os valores mínimos e máximos de ajuste ou outras limitações de relés comerciais, encontrados nos manuais de alguns fabricantes;
- Os ajustes sugeridos ou utilizados nas proteções e esquemas propostos nas referências;
- Os ajustes utilizados pelo ONS no ERAC para a região geoeletrica deste estudo de caso;
- Os limites de órgãos reguladores e procedimentos internos da indústria deste estudo de caso;
- Os dados das proteções existentes nas instalações da indústria e valores de contribuição da indústria para curto-circuito na entrada da subestação.

4.4.1 Equações para os Relés de Frequência

Para definição dos parâmetros de ajuste das proteções de frequência, com base nas equações desenvolvidas analiticamente em (VIEIRA et al., 2008), nos itens 2.3.8 e 2.3.9, é possível estimar o tempo de detecção do relé para um determinado desbalanço de potência.

Conforme o item 3.4.11, somente o Ilhamento Nível 2 terá proteções de frequência. Isso implica que o desbalanço de potência considerado é aplicável apenas ao

fluxo na linha de interconexão indústria-UTE. Foram considerados os cenários de fluxo de potência com geração mínima, intermediária e máxima na indústria, conforme item 3.5.

As equações 2.29 e 2.36, reproduzidas abaixo, referentes respectivamente à proteção 81 (equação 4.1) e proteção 81R (equação 4.2), e considerando quatro diferentes valores de ajuste (*pickup*) para cada relé, obteve-se os resultados apresentados na tabela 6.

$$t_d = \frac{2 \cdot H \cdot \Delta f}{f_0 \cdot \Delta P} + \Delta t + t_{set} \quad (4.1)$$

$$t_d = -T_a \cdot \ln \left(1 - \frac{2 \cdot H \cdot \beta}{f_0 \cdot \Delta P} \right) + \Delta t + t_{set} \quad (4.2)$$

Tabela 6: Tempos de detecção dos relés de frequência, calculados (VIEIRA et al., 2008).

Tempo de detecção [s]	Ajuste do Relé	Fluxo em regime permanente Sentido: da UTE para indústria		
		15 MW	28 MW	70 MW
Relé 81	0,1 Hz	0,0811	0,0806	0,0802
	1 Hz	0,0905	0,0856	0,0823
	2 Hz	0,101	0,0913	0,0845
	10 Hz	0,1851	0,1363	0,1025
Relé 81R (df/dt)	0,1 Hz/s	0,1301	0,1301	0,1300
	1 Hz/s	0,1311	0,1306	0,1302
	2 Hz/s	0,1321	0,1311	0,1305
	10 Hz/s	0,1411	0,1358	0,1323

Observa-se que nos casos de elevado desbalanço de potência e valores baixos de ajuste, os resultados calculados dos tempos de atuação tendem a *80 ms* na proteção 81 e *130 ms* na proteção 81R. Esses valores são exatamente os tempos de atraso (Δt) de processamento e medição do relé, considerados conforme sugerido do artigo (VIEIRA et al., 2008). Destaca-se que o tempo de *delay*, que é ajustado propositalmente nos relés reais durante sua parametrização, foi considerado nulo nas equações acima. Ou seja, os valores da tabela correspondem aos tempos de atuação “instantânea” dos relés.

Observa-se também que, em relação ao tempo de detecção, o relé 81R é mais estável que o relé 81, tendo menos variação nos resultados para uma faixa maior de desbalanços de potência e de ajustes do relé (*pickup*).

Para as simulações, o tempo de *delay* das funções 81 e 81R será utilizado valor sempre igual ou superior ao tempo obtido através das equações, para considerar o tempo de detecção do relé para um determinado desbalanço de potência.

4.4.2 Manuais dos Relés

Manuais de fabricantes de relés podem ser uma fonte útil de informações das características das funções de proteção. Muitos fabricantes disponibilizam em seus manuais, além de orientações para configurar seu equipamento, textos conceituais sobre a filosofia das funções e sobre a aplicação delas no sistema.

Para o propósito deste trabalho, foi observado que certos relés possuem limitações na faixa de ajuste de algumas funções, o que influencia nos ajustes do esquema de ilhamento proposto. Apresentam-se a seguir os limites de alguns relés comerciais, para que a implementação seja viável na prática.

Para a função 81R (df/dt), a figura 28 apresenta trechos do manual de um fabricante, onde observam-se as informações de limites do relé para os ajustes de *pickup*. O tempo de atraso para esta função não é ajustável neste relé, porém o *delay* mínimo é de 150ms, conforme mostrado na mesma figura.

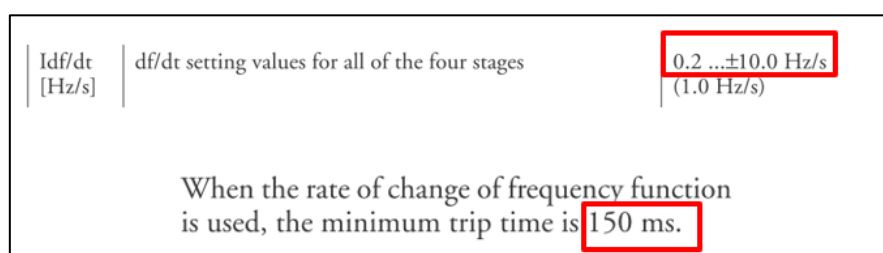


Figura 28: Limites para ajustes da função df/dt – trechos do manual de um relé comercial. (Fonte: ABB, 2002)

A figura 29 apresenta trechos do manual de um outro fabricante, cujo relé também possui a função 81R (df/dt), onde observam-se as informações de limites do relé para os

ajustes de *pickup* e *delay*. Para este relé, ambos os parâmetros são ajustáveis, sendo que o *delay* mínimo permitido é *100ms*.

Setting Prompt	Setting Range	Setting Name := Factory Default
ENABLE 81R	N, 1–4	E81R := N
81R VOLTAGE SUP	OFF, 12.5–300.0 V	81RVSUP := 12.5
81R CURRENT SUP	OFF, 0.1–2.0 * I _{NOM} ^a	81RISUP := OFF
81R1 TRIP LEVEL	OFF, 0.10–15.00 Hz/sec	81R1TP := OFF
81R1 TREND	INC, DEC, ABS	81R1TRND := ABS
81R1 TRIP DELAY	0.10–60.00 sec	81R1TD := 1.00
81R1 DO DELAY	0.00–60.00 sec	81R1DO := 0.00
81R1 TRQCTRL	SELOGIC	81R1TC := 1
81R2 TRIP LEVEL	OFF, 0.10–15.00 Hz/sec	81R2TP := OFF

Figura 29: Faixas de ajustes da função 81R – trechos do manual de um relé comercial. (Fonte: SEL, 2021)

Para este relé, ambos os parâmetros são ajustáveis, porém observa-se na figura 30 que a janela de tempo que o relé necessita para processar a taxa de variação da frequência varia em função do valor ajustado no parâmetro de *pickup*, em *Hz/s*, desta função.

81RnTP Setting (Hz/sec)	Time Window (Cycles)
15.00–2.33	3
2.32–1.17	6
1.16–0.78	9
0.77–0.58	12
0.57–0.47	15
0.46–0.38	18
0.37–0.33	21
0.32–0.29	24
0.28–0.26	27
< 0.25	30

Figura 30: Ajuste da função 81R versus Janela de tempo – trechos do manual de um relé comercial. (Fonte: SEL, 2021)

A figura 31 apresenta trechos do manual de um fabricante, onde à direita observam-se os parâmetros ajustáveis disponíveis para o relé (81RF). Os códigos mnemônicos dos parâmetros estão relacionados com o gráfico à esquerda dessa figura. Destaca-se neste relé que as bandas mortas em torno da origem (faixa onde o relé não

atua para evitar imprecisão) para os eixos “x” e “y” são respectivamente $\pm 0,1\text{Hz}$ e $\pm 0,2\text{Hz/s}$, e o *delay* da função é ajustável, porém o mínimo permitido é *100ms*.

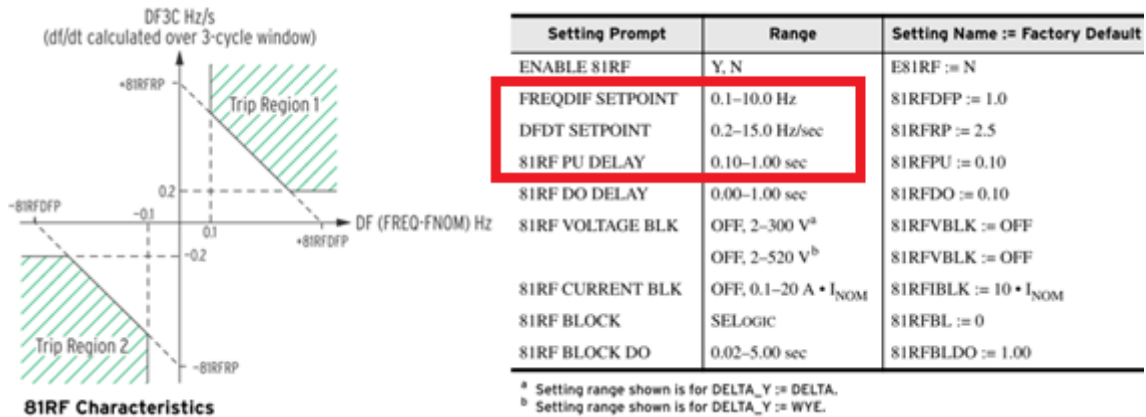


Figura 31: Características e ajustes da função 81RF – trechos do manual de um relé comercial. (Fonte: SEL, 2021)

4.4.3 Sugestões da Literatura

No artigo (AUDRING; LERCH, 2011), os autores usaram em seu esquema de proteção os ajustes resumidos na tabela 7.

Tabela 7: Resumo dos ajustes utilizados no artigo (AUDRING; LERCH, 2011) para seu esquema de proteção.

Função	Descrição	Unidade	Ajuste	Observação
67 (com 27)	pickup	[A]	-	(sem sugestão)
	delay	[s]	0	Não se aplica, a temporização é pelo 27
27 (com 67)	pickup	[pu]	0,9	
	delay	[s]	-	Sem sugestão. Ver recomendações do item 2.4.1.
59	pickup	[pu]	1,1	
	delay	[s]	-	(sem sugestão)
81U	pickup	[Hz]	58,8	0,98pu
	delay	[s]	-	(sem sugestão)
81O	pickup	[Hz]	62,4	1,04pu
	delay	[s]	-	(sem sugestão)
51	pickup	[A]	-	Usar somente se necessário. Ver item 2.4.1.
	delay	[s]	2 a 3	Usar Somente se necessário. Ver item 2.4.1.

No artigo (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999), os autores sugerem para seu esquema de proteção os ajustes resumidos na tabela 8.

Tabela 8: Resumo dos ajustes sugeridos no artigo (RAJAMANI; HAMBARDE, 1999) para seu esquema de proteção.

Função	Descrição	Unidade	Ajuste	Observação
67 (com 27)	pickup	[A]	-	Autor usa $pickup=0,5$ porém não especifica em qual unidade base.
	delay	[s]	-	Autor usa curva de tempo inverso ($TMS=0,1$) porém não especifica qual.
27 (com 67)	pickup	[pu]	0,7	
	delay	[s]	0,5	
81R_U	pickup	[Hz/s]	1,8	Valor já convertido para base de 60Hz.
	fmin	[Hz]	58,2	Valor já convertido para base de 60Hz.
81R_O	pickup	[Hz/s]	1,8	Valor já convertido para base de 60Hz.
	fmax	[Hz]	61,2	Valor já convertido para base de 60Hz.
32P (com 81U)	pickup	[MW]	10	
	delay	[s]	0,5	
81U (com 32P)	pickup	[Hz]	58,2	Valor já convertido para base de 60Hz.
	delay	[s]	-	
32Q (com 59)	pickup	[Mvar]	15	
	delay	[s]	0,7	
59 (com 32Q)	pickup	[pu]	1,15	
	delay	[s]	-	
27	pickup	[pu]	0,4	
	delay	[s]	0,5	
81U	pickup	[Hz]	57	Valor já convertido para base de 60Hz.
	delay	[s]	0,5	

No artigo (MOZINA, 2007), o autor sugere para seu esquema de proteção os ajustes apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Ajustes sugeridos no artigo (MOZINA, 2007) para seu esquema de proteção contra colapso de tensão.

Função	Descrição	Unidade	Ajuste	Obs.
27	pickup	[pu]	0,94	Sequência Positiva da tensão.
27B	pickup	[pu]	0,89	Bloqueia se qualquer fase entrar nesta condição.
-	delay	[s]	1 a 3	

No artigo (SCHIEFEN et al., 2006), os autores usaram em seu esquema de proteção os ajustes resumidos na tabela 10.

Tabela 10: Resumo dos ajustes utilizados no artigo (SCHIEFEN et al., 2006) para seu esquema de descarte de cargas.

Função	Descrição	Unidade	Ajuste
81U	pickup	[Hz]	58,8
	delay	[s]	1
27	pickup	[pu]	0,85
	delay	[s]	1,5

A proteção dos motores, que constituem a maior parte da carga da indústria, a princípio não está diretamente relacionada com as proteções deilhamento. No entanto, observa-se que a proteção de subtensão (27) dos motores tem relação indireta com as proteções 27 do ilhamento, tanto que é recomendado (AUDRING; LERCH, 2011) verificar essa coordenação. Em (MARDEGAN, 2010b) é sugerido para **proteção 27 de motores** de média tensão o ajuste de **80% da tensão** nominal, **com delay de 2 s**. Segundo o autor, na grande maioria das vezes esse ajuste é adequado porque as quedas de tensão na partida normalmente não excedem 12%, e as concessionárias podem ter de 5 a 7% de queda, chegando-se a 19% de subtensão.

Outra proteção que não está diretamente listada nos esquemas de ilhamento é a proteção contra perda de excitação (**função 40**) dos geradores. Em (MOZINA et al., 2008) são sugeridos dois ajustes de temporização para esta proteção: uma zona com tempo de 30 a 45 ciclos (**0,5 a 0,75 s**) para prevenir operações indevidas durante transitórios, e outra zona para condições de excitação mais severas temporizada em alguns ciclos.

4.4.4 Ajustes do ERAC

O ONS, através do ERAC, promove descarte de cargas nas regiões geoeletricas do SIN, conforme tabela 11, no intuito de equilibrar o balanço carga-geração em condições de contingências no sistema.

Tabela 11: Ajustes do ERAC para as regiões geoeletricas do SIN (ONS, 2020a).

ÁREA	df/dt (ROCOF)					81U (inst)			81U (temp) f<58,5Hz		
	nº estág.	min [Hz/s]	max [Hz/s]	f_superv [Hz]	f_corte [Hz]	nº estág.	min [Hz]	max [Hz]	nº estág.	min [s]	max [s]
Regiões Sudeste e Centro-Oeste	-	-	-	-	-	5	58,5	57,5	-	-	-
Região Sul	-	-	-	-	-	5	58,5	57,3	-	-	-
Região Nordeste	4	0,7	1,8	59	58,5	5	57,9	57,4	3	10	12
Sistema Manaus (Subsistema 1)	4	0,7	5,5	59,7	59,2	5	58,4	57,2	-	-	-
Sistema Manaus (Subsistema 1)	4	4	10	59,7	59,2	5	57,8	57	-	-	-
Macapá e Interligação Tucuruí-Macapá-Manaus	4	0,5	4	59,7	59,2	5	58,3	57,2	-	-	-
Maranhão, Pará, Tocantins	3	1,5	3,5	59	58,5	3	57,7	57,3	-	-	-
Acre – Rondônia	-	-	-	-	-	5	58,5	57,5	-	-	-
Pará – Tramo Oeste	5	1,4	7,5	59,5	59	5	58,5	56,4	-	-	-
Roraima	-	-	-	-	-	5	58,5	57,3	-	-	-

Observa-se que para a região Sudeste, onde localizam-se as instalações da indústria e da UTE deste estudo de caso, o ERAC atua apenas com a proteção de subfrequência (81U) instantânea. A tabela 12 mostra mais detalhes do ERAC na região geoeletrica Sudeste e Centro-Oeste, onde observam-se cinco estágios de corte de carga por subfrequência, atuando na faixa de 58,5 Hz a 57,5 Hz.

Tabela 12: Ajustes ERAC para a região geoeletrica Sudeste e Centro-Oeste (ONS, 2020a).

ERAC - Sudeste e Centro-Oeste		
Estágios	Frequência de Atuação (Instantâneo) [Hz]	Corte de Carga [%]
1º	58,5	7
2º	58,2	7
3º	57,9	7
4º	57,7	7
5º	57,5	7

4.4.5 Limites e Procedimentos Regulatórios

Os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica para o sistema deste estudo de caso são estabelecidos pelo PRODIST (ANEEL, 2021), e foram apresentados nos itens 2.2.2 e 2.2.3, cujas tabelas estão reproduzidas abaixo referentes respectivamente às frequências (tabela 13) e tensões (tabela 14) de operação.

Tabela 13: Variação de frequência permitida (ANEEL, 2021).

Variação da Frequência	Frequência pode permanecer abaixo de [Hz]	Frequência pode permanecer acima de [Hz]	Por até [s]
Em Condições normais	59,9	60,1	-
Durante recuperação após distúrbios	59,5	60,5	30
Durante distúrbios, com corte de geração ou de carga	56,5	66	0
	58,5	63,5	10
	-	62	30
	57,5	-	5

Tabela 14: Tensão de atendimento nos pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV (ANEEL, 2021).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,93TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$
Crítica	$TL < 0,93TR$ ou $TL > 1,07TR$

4.4.6 Dados das Proteções Existentes na Indústria

A indústria possui instalados vários relés, de diversos fabricantes, com diferentes funções para a proteção de seus equipamentos. Neste item são apresentadas as proteções existentes instaladas na indústria e seus respectivos ajustes, que são de interesse para o ilhamento, bem como os níveis de curto-circuito na entrada da indústria.

Os valores de contribuição da indústria para um curto-circuito em 138 kV na entrada da subestação são mostrados na tabela 15, que foram calculados por simulação no *software PTW*, onde considerou-se para contribuição máxima da indústria para curto-circuito o cenário com todos os geradores operando, e para contribuição mínima somente um gerador operando.

Tabela 15: Nível de contribuição da Indústria para curto-circuito em 138kV na entrada da planta, corrente em Ampère (referência em 138 kV).

Corrente de Contribuição da Indústria [A] (valores referentes em 138 kV)	<i>I_{cc_0.5cyc}</i> <i>8 ms</i>	<i>I_{cc_30cyc}</i> <i>500 ms</i>
MÍNIMO [A]	710	195
MÁXIMO [A]	1670	830

As tabelas 16 e 17 apresentam, respectivamente, as proteções das linhas de entrada e dos geradores da indústria.

Tabela 16: Proteções existentes nas LINHAS DE ENTRADA da Indústria (referência em 138 kV).

FUNÇÃO	PARÂMETRO	AJUSTE
27	V [xVn]	0,47
	t [s]	5
50	I [A]	3000
	t [s]	0,42
51	IDMT	IEC-NI
	I [A]	750
	k	0,17
50N	I [A]	1200
	t [s]	0,47
51N	IDMT	IEC-NI
	I [xIn]	400
	k	0,2
59	V [xVn]	1,2
	t [s]	1
81U	f [Hz]	58
	t [s]	3
81O	f [Hz]	62
	t [s]	3
81R_U	f [Hz]	59
	t [s]	0,15
	df/dt [Hz/s]	2
81R_O	f [Hz]	61
	t [s]	0,15
	df/dt [Hz/s]	2
87	I [A]	960
	t [s]	0

Tabela 17: Proteções existentes nos GERADORES da Indústria (referência em 13,8 kV).

FUNÇÃO	PARÂMETRO	UNIDADE	GERADOR 1	GERADOR 2
27	V>1 Voltage Set	[x Vn]	0,6	0,6
	V>1 Time Delay	[s]	5	5
40	FFail1 –Xa1	[Ohms]	0,96	1,575
	FFail1 Xb1	[Ohms]	15,17	28,8
	FFail1 Time Delay	[s]	0,6	0,6
	FFail2 –Xa2	[Ohms]	0,96	1,575
	FFail2 Xb2	[Ohms]	7,968	20,4
	FFail2 Time Delay	[s]	0,05	0,05
51V	V Dep OC Char	-	IEC SI	IEC SI
	V Dep OC I> Set	[A]	1512	588
	V Dep OC TMS	-	0,275	1,2
	V Dep OC tRESET	[s]	0	0
	V DEP OC V<1Set	[V]	11040	11040
	V DEP OC V<2Set	[V]	1080	2670
	V DEP OC k Set	-	0,25	0,3
59	V>1 Voltage Set	[V]	1,3	1,3
	V>1 Time Delay	[s]	0,1	0,1
	V>2 Voltage Set	[V]	1,2	1,2
	V>2 Time Delay	[s]	1	1
81	F<1 Setting	[Hz]	54	54
	F<1 Time Delay	[s]	30	30
	F>1 Setting	[Hz]	65	65
	F>1 Time Delay	[s]	5	5

4.4.7 Ajustes Propostos

Os ajustes propostos para todas as funções de proteção dos esquemas de Ilhamento Nível 1 e Ilhamento Nível 2, das figuras 14 e 15 no item 3.4.11, são apresentados respectivamente nas tabelas 18 e 19. Os itens que serviram de base para a definição dos ajustes encontram-se em parêntesis no campo “Observações” da tabela.

Tabela 18: Ajustes propostos para o esquema de Ilhamento Nível 1.

Proteção	Descrição	Unidade	Ajuste	Observações
27	pickup	[pu]	0,94	Sugestão Mozina (4.4.3).
27B	pickup	[pu]	0,89	Sugestão Mozina (4.4.3).
-	delay	[s]	1	Sugestão Mozina (4.4.3).

Tabela 19: Ajustes propostos para o esquema de Ilhamento Nível 2.

Proteção	Descrição	Unidade	Ajuste	Observações
67 (com 27)	pickup	[A]	100	Sugestão Rajamani (4.4.3) é 0,5 porém não explicita unidade base. Contribuição mínima da indústria para faltas é 195A (em 138kV).
	delay	[s]	0	Temporização é pelo 27, segundo Audring (4.4.3)
	ângulo	[graus]	45	Baseado na filosofia do relé <i>built-in</i> do ANATEM.
	sentido	[dir/rev]	direto	Sentido: da indústria para a UTE.
27 (com 67)	pickup	[pu]	0,7	Sugestão Rajamani para faltas próximas. Coerente com Audring (4.4.3)
	delay	[s]	0,5	Sugestão Audring e Rajamani (4.4.3). Coordena com função 40 dos geradores, que é 0,6 s (4.4.6)
32P (com 81U)	pickup	[MW]	5	Para atender até caso de somente contribuição do menor gerador
	delay	[s]	0,5	Sugestão de Rajamani (4.4.3).
81U (com 32P)	sentido	[dir/rev]	direto	Sentido: da indústria para a UTE.
	pickup	[Hz]	58,2	Sugestão de Rajamani (4.4.3).
32Q (com 59)	delay	[s]	0	Temporização é pelo 32, segundo Rajamani (4.4.3)
	pickup	[Mvar]	-	Não utilizada, neste caso LT é curta.
	delay	[s]	-	Não utilizada, neste caso LT é curta.
	sentido	[dir/rev]	-	Não utilizada, neste caso LT é curta.
59 (com 32Q)	pickup	[pu]	-	Não utilizada, neste caso LT é curta.
	delay	[s]	-	Não utilizada, neste caso LT é curta.
27	pickup	[pu]	0,6	Para casos extremos de nível 2. Valor do 27 do gerador (4.4.6) e próximo do existente (4.4.6) e de Rajamani (4.4.3).
	delay	[s]	4,5	Para coordenar com 27 dos geradores (4.4.6).
51	pickup	[A]	-	Não utilizada, 87 é principal (4.4.6) e 67/27 é backup para faltas.
	delay	[s]	2 a 3	Não utilizada, 87 é principal (4.4.6) e 67/27 é backup para faltas.
59	pickup	[pu]	1,1	Sugestão Audring e Rajamani (4.4.3), embora pouco acima do PRODIST (4.4.5), não é problema para indústria.
	delay	[s]	1	Ajuste atual existente (4.4.6)
81U	pickup	[Hz]	58	Ajuste atual existente (4.4.6).
	delay	[s]	3	Ajuste atual existente (4.4.6). Atende as equações (4.4.1) e manuais de fabricante (4.4.2).
81O	pickup	[Hz]	62	Ajuste atual existente (4.4.6).
	delay	[s]	3	Ajuste atual existente (4.4.6). Atende as equações (4.4.1) e manuais de fabricante (4.4.2).
81R_U	pickup	[Hz/s]	2	Ajuste atual existente (4.4.5).
	fsuperv	[Hz]	59	Ajuste atual existente (4.4.5).
	fcorde	[Hz]	58,8	Ajuste atual existente (4.4.5).
	delay	[s]	0,2	Ajuste atual existente (4.4.6). Atende as equações (4.4.1) e manuais de fabricante (4.4.2).
81R_O	pickup	[Hz/s]	2	Ajuste atual existente (4.4.5).
	fsup	[Hz]	61	Ajuste atual existente (4.4.5).
	fcorde	[Hz]	61,2	Ajuste atual existente (4.4.5).
	delay	[s]	0,2	Ajuste atual existente (4.4.6). Atende as equações (4.4.1) e manuais de fabricante (4.4.2).
81RF	X_offset	[Hz]	0,1	Manual de fabricante (4.4.2).
	Y_offset	[Hz/s]	0,2	Manual de fabricante (4.4.2).
	delta_f	[Hz]	1	Mesmo usado nos relés <i>df/dt</i> , para comparar resultados. (4.4.5).
	df/dt	[Hz/s]	2	Mesmo usado nos relés <i>df/dt</i> , para comparar resultados. (4.4.5).
	delay	[s]	0,2	Mesmo usado nos relés <i>df/dt</i> , para comparar resultados. Atende manuais de fabricante (4.4.2).

Os esquemas de Ilhamento Nível 1 e Ilhamento Nível 2, com os ajustes propostos nas tabelas 18 e 19, serão aplicados nos cenários descritos a seguir.

4.5 Cenários de Subfrequência

Nos estudos de subfrequência, serão considerados os seguintes cenários:

- Perturbações sistêmicas reais no SIN, apresentadas no item 4.3.2;
- Afundamento de frequência, provocados por contingências na região da indústria;
- Colapso de frequência, provocados por contingências no SIN;
-

4.5.1 Perturbações Reais no SIN

As simulações das perturbações sistêmicas reais no SIN, apresentadas no item 4.3.2 para validação no Anatem, serão executadas: perturbação nos Elos CC Foz do Iguaçu - Ibiúna e perturbação no Elo CC Xingu – Estreito, porém dessa vez considerando a presença do sistema de proteção de Ilhamento Nível 1 e Nível 2 apresentado no item 3.4.11, com os ajustes informados no item 4.4.7. O comportamento da frequência e da tensão durante os eventos são apresentados nas figuras 32, 33, 34 e 35.

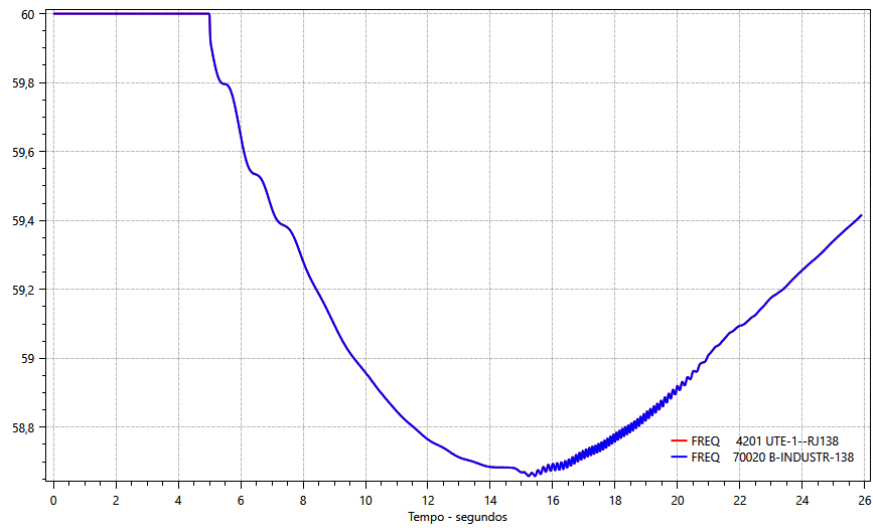


Figura 32: Frequência [Hz] nas barras da indústria e da UTE – Simulação de perturbação Real no SIN: Elos Foz-Ibiuna.

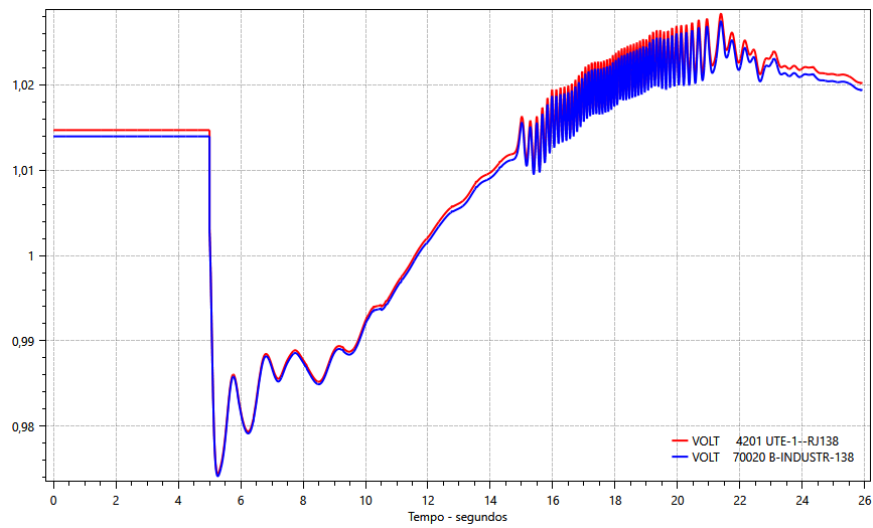


Figura 33: Tensão [pu] nas barras da indústria e da UTE – Simulação de perturbação Real no SIN: Elos Foz-Ibiuna.

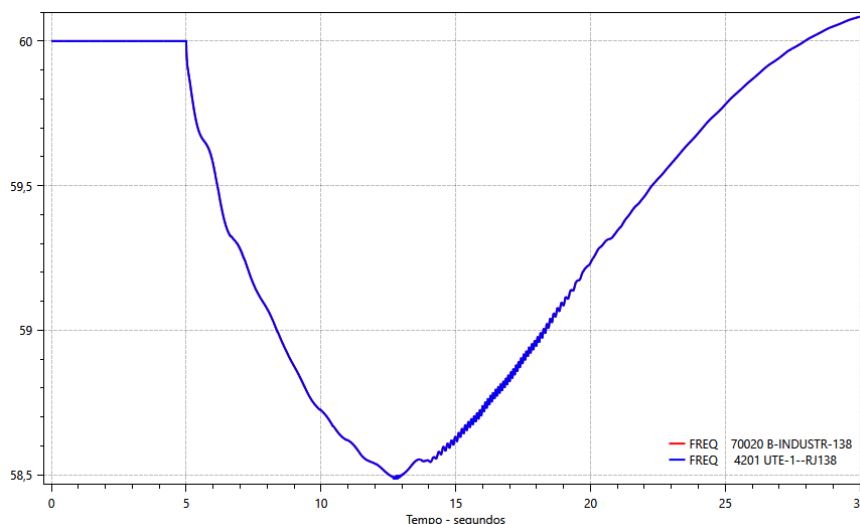


Figura 34: Frequência [Hz] nas barras da indústria e da UTE – Simulação de perturbação Real no SIN: Elo Xingu-Estreito.

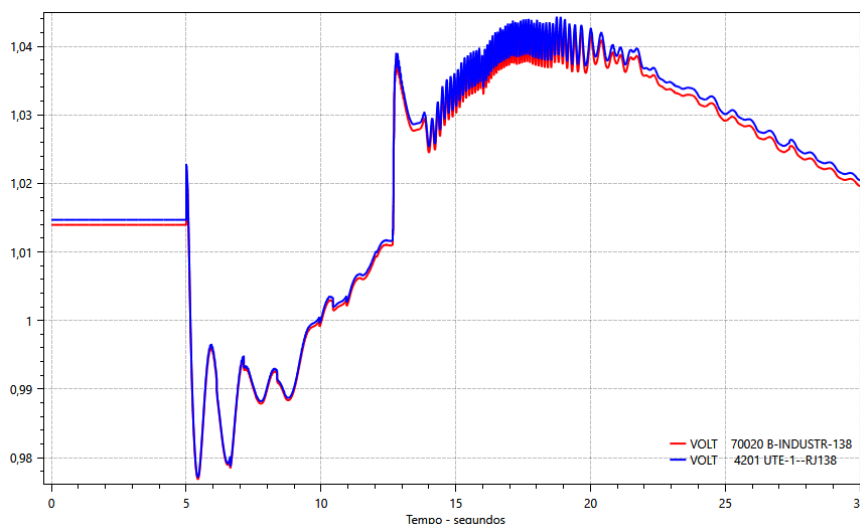


Figura 35: Tensão [pu] nas barras da indústria e da UTE – Simulação de perturbação Real no SIN: Elo Xingu-Estreito.

4.5.2 Afundamentos de Frequência

Para gerar situações de **afundamento de frequência por perda de geração** (de 2 GW a 4,3 GW) ou **por acréscimo de carga** (de 1 GW e 2 GW), foram simulados vários eventos simultâneos, todos na mesma região geográfica da indústria e da UTE, conforme

a tabela 20, que relaciona cada caso das figuras 36 e 37 com os equipamentos que mudaram de condição operacional: desligamento, no caso de barra de geração, ou acréscimo de potência ativa, dobrando a carga inicial, no caso de barra de carga.

Tabela 20: Equipamentos desligados (se gerador) ou com potência ativa dobrada (se carga), para as simulações de afundamento de frequência.

EQUIPAMENTO	DESCRIÇÃO	P	Q	Nº Caso					
		[MW]	[Mvar]	1	2	3	4	5	6
Barra Geração	10 - ANGRA1UNE001	640	96,84	x	x	x	x		
Barra Geração	11 - ANGRA2UNE001	1350	203,7	x	x	x	x		
Barra Geração	14 - FUNIL1UHE002	90	-35,9				x		
Barra Geração	32 - SCRU16UTE002	330	-3,83		x	x	x		
Barra Geração	250 - NPECANUHE006	302	-9,61		x	x	x		
Barra Geração	3962 - NFLU-GUTE002	232	-76,1		x	x	x		
Barra Geração	3963 - NFLU-VUTE001	118	-57				x		
Barra Geração	4205 - TRV28-UTE001	200	17,29			x	x		
Barra Geração	4206 - TRG212UTE001	111	4,704			x	x		
Barra Geração	4207 - TRG313UTE001	111	4,704			x	x		
Barra Geração	4208 - TRV38-UTE001	56	1.151			x	x		
Barra Geração	9603 - CSA-V-UTE001	161	-43,5				x		
Barra Geração	9627 - BFLUMGUTE002	325	-62,7		x	x	x		
Barra Geração	9628 - BFLUMVUTE001	175	-30,2				x		
Barra Carga	1673 - CSN----RJ138	340	76					x	x
Barra Carga	1745 - R-LEAO-RJ138	264,7	132,3					x	x
Barra Carga	277 - ZIN----RJ138	145	49,2					x	x
Barra Carga	9637 - CSA-2--RJ138	132,5	5,9					x	x
Barra Carga	3972 - CSNINT-RJ138	120	51,1					x	x
Barra Carga	87 - RESEND-RJ500	114	23,1						x
Barra Carga	1780 - RESEND-RJ138	103,2	46,9						x
Barra Carga	1736 - V.PEDR-RJ138	92,7	51						x
Barra Carga	284 - F.CANE-RJ138	92,5	-9,4						x
Barra Carga	1645 - PDAGUA-RJ138	78,1	-11,4						x
Barra Carga	1684 - S.ANTO-RJ138	76,2	-5,2						x
Barra Carga	1737 - Z.SUL--RJ138	66,9	26,9						x
Barra Carga	1628 - CAMERI-RJ138	64	-4,2						x
Barra Carga	9602 - CSA----RJ138	59,4	2,7						x
Barra Carga	289 - CAMARA-RJ138	59	-1,7						x
Barra Carga	261 - VIGARI-RJ013	58,9							x
Barra Carga	1629 - NIGUAC-RJ138	57,5	2,2						x
Barra Carga	1725 - S.LOUR-RJ069	56,5	28,1						x

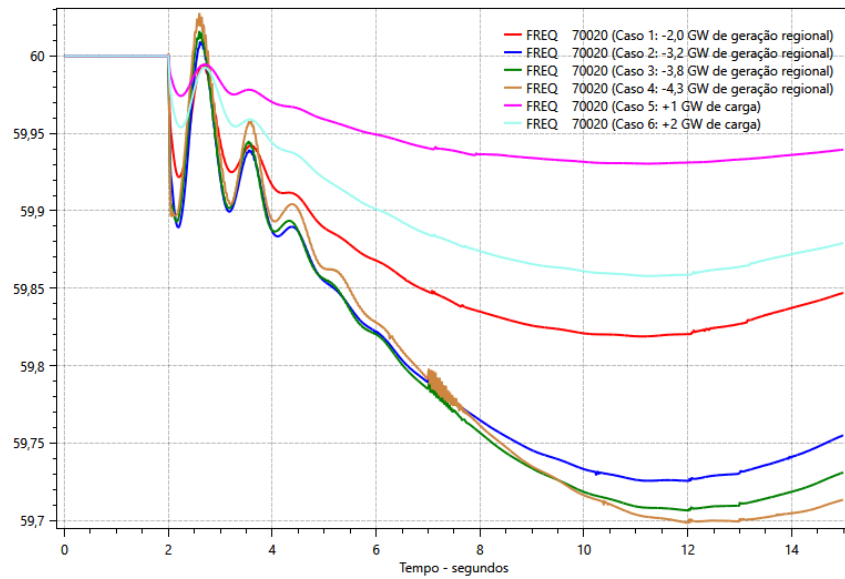


Figura 36: Frequência [Hz] na barra da indústria – comparação dos casos de Afundamentos de frequência.

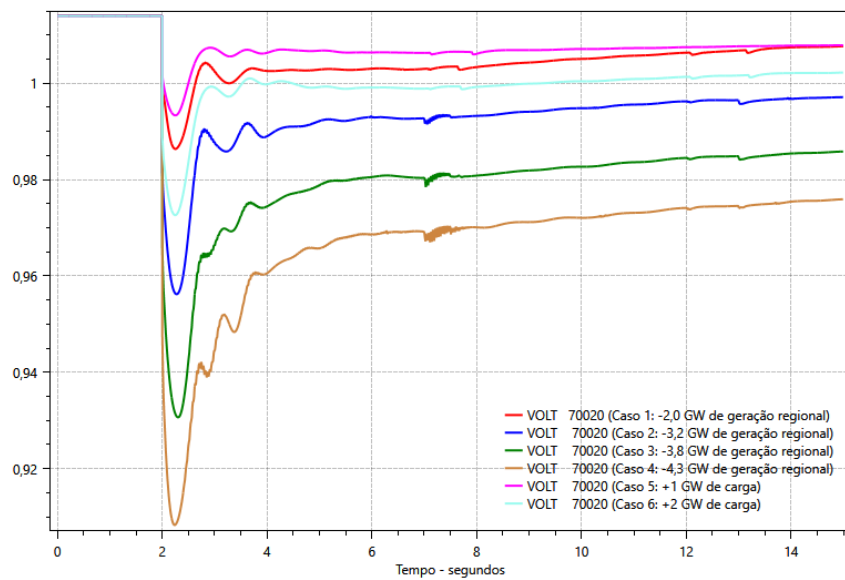


Figura 37: Tensão [pu] na barra da indústria – comparação dos casos de Afundamentos de frequência.

Observa-se que o cenário mais severo de afundamentos de frequência (caso 4) foi obtido com a perda de 4,3 GW de geração da região geográfica próxima. A frequência chegou a 59,7 Hz e a tensão 0,91 pu, mas com tendência de recuperação.

Para comparação dos afundamentos por perturbações regionais (figuras 36 e 37) com os afundamentos por perturbações sistêmicas reais (item 4.51), a figura 38 apresenta o caso mais severo das simulações de perturbações locais (caso 4) no mesmo gráfico com os casos das perturbações reais do SIN. Observa-se que o afundamento que esta perturbação local causou fez com que a frequência caísse abaixo de $59,6 \text{ Hz}$, enquanto que as perturbações sistêmicas no SIN produziram afundamentos mais severos, onde o valor da frequência caiu para $58,4 \text{ Hz}$, com uma taxa de variação aproximada de $0,2 \text{ Hz/s}$.

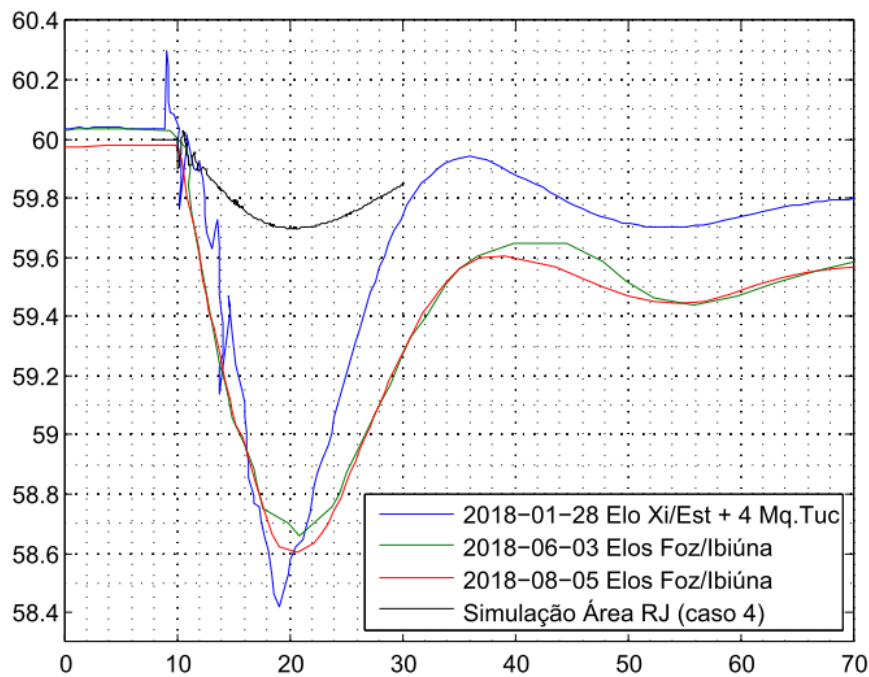


Figura 38: Comportamento da frequência [Hz] no caso simulado (caso 4: mais severo para perturbações locais) e nas perturbações reais do SIN.

4.5.3 Colapsos de Frequência

Para gerar situações de **colapso de frequência**, foram simulados vários eventos simultâneos, conforme a tabela 21, que relaciona cada caso das figuras 39 e 40 com os equipamentos retirados de operação.

Tabela 21: Equipamentos desligados para as simulações de colapso de frequência.

EQUIPAMENTO	DESCRIÇÃO	Nº Caso				
		1	2	3	4	5
LT	140 - ADRIAN-RJ345 / 138 - ITUTIN - C.1	x	x	x	x	x
LT	140 - ADRIAN-RJ345 / 138 - ITUTIN - C.2	x	x	x	x	x
LT	106 - ADRIAN-RJ500 / 104 - C.PAUL-SP500	x	x	x	x	x
LT	105 - ANGRA--RJ500 / 104 - C.PAUL-SP500	x	x	x	x	x
LT	105 - ANGRA--RJ500 / 9601 - Z.OESTE	x	x			
LT	105 - ANGRA--RJ500 / 9608 - N.IGUA	x	x	x	x	x
LT	104 - C.PAUL-SP500 / 87 - RESEND - C.2	x	x	x	x	x
LT	140 - ADRIAN-RJ345 / 1781 - _V.PEDR		x			
LT	140 - ADRIAN-RJ345 / 3966 - MACAE		x			
LT	104 - C.PAUL-SP500 / 9626 - BF----RJ500 - C.3	x	x	x	x	x
LT	169 - SJOSE2-RJ138 / 4202 - GLB-2			x	x	x
LT	106 - ADRIAN-RJ500 / 109 - BYPSAD-RJ500			x	x	x
LT	10 - ANGRA1UNE001 / 105 - ANGRA--RJ500					
LT	11 - ANGRA2UNE001 / 105 - ANGRA--RJ500					
Pólo de Elo CC	1001 - ELO SANT-ARA	x	x	x		
Pólo de Elo CC	1002 - ELO SANT-ARA	x	x	x		
Pólo de Elo CC	1003 - ELO SANT-ARA				x	
Pólo de Elo CC	1004 - ELO SANT-ARA				x	
Pólo de Elo CC	3001 - ELO XIN-EST P.1				x	x
Pólo de Elo CC	3002 - ELO XIN-EST P.2				x	x
Pólo de Elo CC	1 - ELO FOZ-IBUI P.1			x		x
Pólo de Elo CC	2 - ELO FOZ-IBUI P.2			x		x
Barra Geração	14 - FUNIL1UHE002			x	x	x
Barra Geração	32 - SCRU16UTE002			x	x	x
Barra Geração	250 - NPECANUHE006			x	x	x
Barra Geração	9603 - CSA-V-UTE001			x	x	x
Barra Geração	10 - ANGRA1UNE001			x	x	x
Unidade Geração	4205 - TV (2un)			x	x	x

Os casos de colapso de frequência, como a própria expressão sugere, leva o sistema a um estado operacional onde não há recuperação das condições operativas. As condições peculiares desses eventos são difíceis de se reproduzir no software utilizado, devido às limitações dos modelos dos diversos componentes utilizados pelo programa, quando o sistema entra em condições anormais de operação.

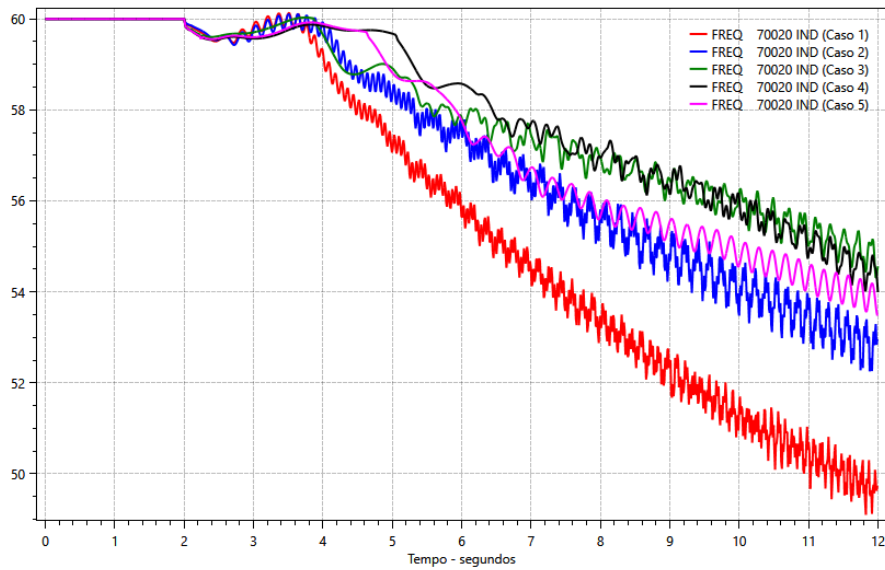


Figura 39: Colapsos de frequência (Comportamento da FREQUÊNCIA [Hz] em diferentes simulações).

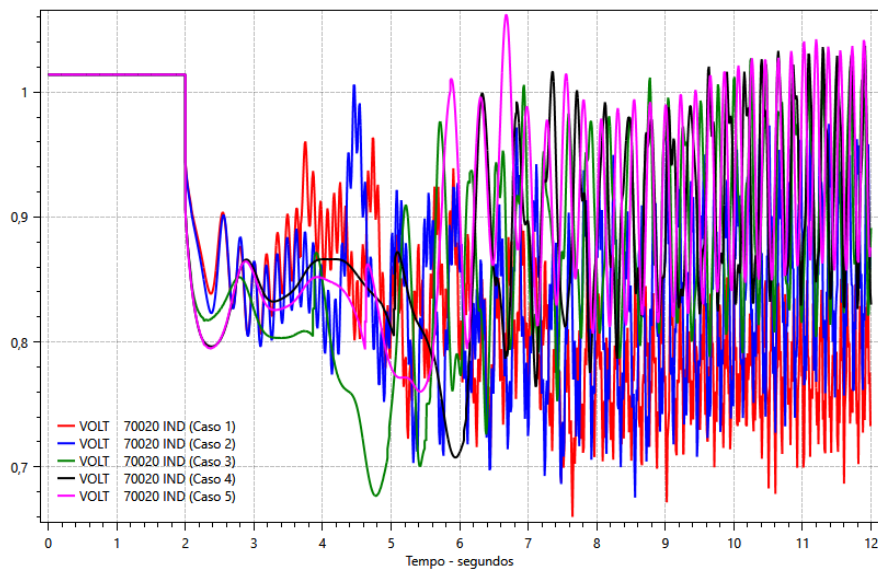


Figura 40: Colapsos de frequência (Comportamento da TENSÃO [pu] em diferentes simulações).

Os colapsos de frequência foram obtidos nas simulações forçando-se contingências múltiplas no sistema. Conforme a combinação das contingências aplicadas, o comportamento das grandezas (no caso, frequência e tensão) varia muito de um caso para outro.

4.5.4 Resumo dos Cenários de Subfrequência

A figura 41 apresenta uma comparação do comportamento da frequência, considerando os resultados mais relevantes relacionados à subfrequência. Para não poluir muito a figura 41, nela são apresentados somente os dois casos mais extremos das simulações de colapso de frequência (figura 39): caso 1 e caso 4.

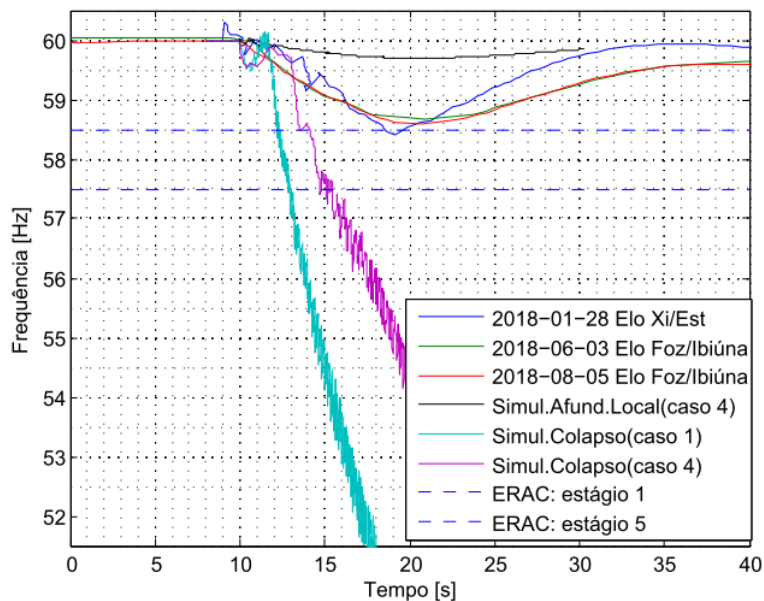


Figura 41: Resumo dos cenários de subfrequência.

Todos os casos serão executados novamente considerando a presença do sistema de proteção de Ilhamento Nível 1 e Nível 2 apresentados no item 3.4.11, com os ajustes informados no item 4.4.7, para verificar o desempenho do sistema de proteção (ver item 4.10 e ANEXO I).

4.5.5 Abertura da Interconexão Indústria-UTE

Qualquer abertura da interconexão indústria-UTE, proposital ou não, culminará em imediato ilhamento da indústria. É um cenário que provoca subfrequência na indústria, já que sua geração interna não é suficiente para suprir toda sua carga. A partir da abertura da interconexão, as proteções de ilhamento aqui propostas não têm mais função, pois nesse momento já foi executado o ilhamento nível 2 e os disjuntores nos quais atuam já se encontrarão abertos. A estabilidade elétrica da ilha passará a depender principalmente do desempenho do sistema de **descarte de cargas** da indústria para manter o balanço carga-geração adequado.

As simulações de descarte de cargas serão analisadas num item específico mais a frente (item 4.9).

4.6 Cenários de Sobrefrequência

Nos estudos de sobrefrequência, serão considerados os seguintes cenários:

- Degrau de perda de bloco de carga;
- Aplicação de curto-circuito;
- Abertura da interconexão UTE-SIN;

4.6.1 Perda de Blocos de Carga e Curto-Circuito

Para gerar situações de **sobrefrequência** foram considerados degraus de **perda de bloco de carga** (desligamento de 1 GW e 2 GW) nos casos de barra de carga, ou **aplicação de curto-circuito**, numa linha de transmissão de vizinhança (caso 3 da tabela 22) e numa barra 500 kV (caso 4 da tabela 22) numa subestação próxima. Os eventos simulados são todos na mesma região geográfica da indústria e da UTE, conforme apresentado na tabela 22.

Tabela 22: Perda de blocos de carga ou aplicação de curto-circuito para as simulações de sobrefrequência.

EQUIPAMENTO	DESCRIÇÃO	P	Q	Nº Caso			
		[MW]	[Mvar]	1	2	3	4
Barra Carga	1673 - CSN----RJ138	340	76	x	x		
Barra Carga	1745 - R-LEAO-RJ138	264,7	132,3	x	x		
Barra Carga	277 - ZIN----RJ138	145	49,2	x	x		
Barra Carga	9637 - CSA-2--RJ138	132,5	5,9	x	x		
Barra Carga	3972 - CSNINT-RJ138	120	51,1	x	x		
Barra Carga	87 - RESEND-RJ500	114	23,1		x		
Barra Carga	1780 - RESEND-RJ138	103,2	46,9		x		
Barra Carga	1736 - V.PEDR-RJ138	92,7	51		x		
Barra Carga	284 - F.CANE-RJ138	92,5	-9,4		x		
Barra Carga	1645 - PDAGUA-RJ138	78,1	-11,4		x		
Barra Carga	1684 - S.ANTO-RJ138	76,2	-5,2		x		
Barra Carga	1737 - Z.SUL--RJ138	66,9	26,9		x		
Barra Carga	1628 - CAMERI-RJ138	64	-4,2		x		
Barra Carga	9602 - CSA----RJ138	59,4	2,7		x		
Barra Carga	289 - CAMARA-RJ138	59	-1,7		x		
Barra Carga	261 - VIGARI-RJ013	58,9			x		
Barra Carga	1629 - NIGUAC-RJ138	57,5	2,2		x		
Barra Carga	1725 - S.LOUR-RJ069	56,5	28,1		x		
LT	1451 - WLSTN--RJ138 / 4200 - SJOSE1-RJ138	-	-			x	
Barra 500kV	108 - S.JOSE-RJ500	-	-				x

O comportamento da frequência e da tensão durante os eventos são apresentados nas figuras 42 e 43.

Observa-se que os resultados das simulações apresentaram dois comportamentos bem distintos da frequência. Para os casos de degrau negativo (desligamento) de carga, ocorrem na frequência variações lentas e com baixa amplitude, enquanto na tensão ocorre pequeno aumento. Para os casos de curto-circuito ocorrem variações bruscas e de alta amplitude na frequência, acompanhadas de severa queda de tensão, tendendo a zero quanto mais próxima eletricamente for a falta. Porém com a devida atuação da proteção primária, os equipamentos com defeito são isolados e o sistema volta à estabilidade.

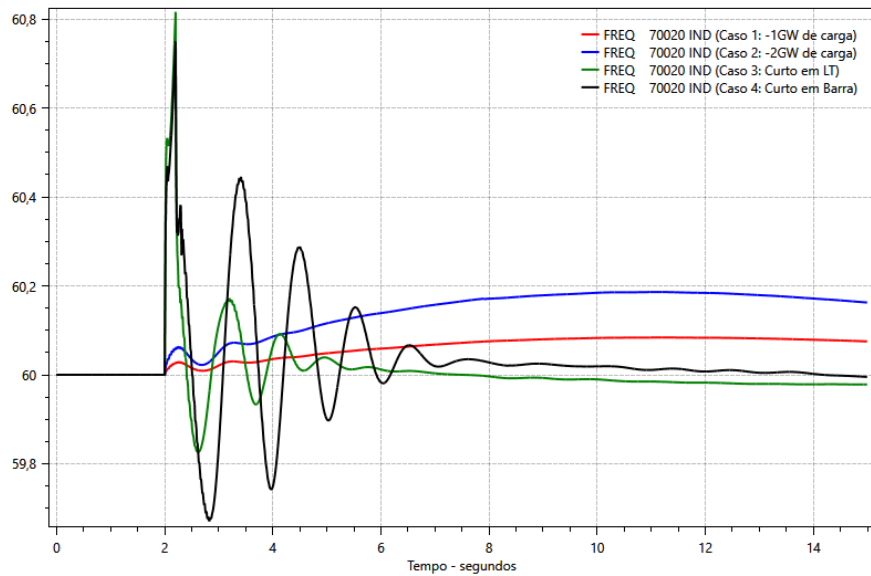


Figura 42: Frequência [Hz] na barra da indústria – comparação dos casos de sobrefrequência.

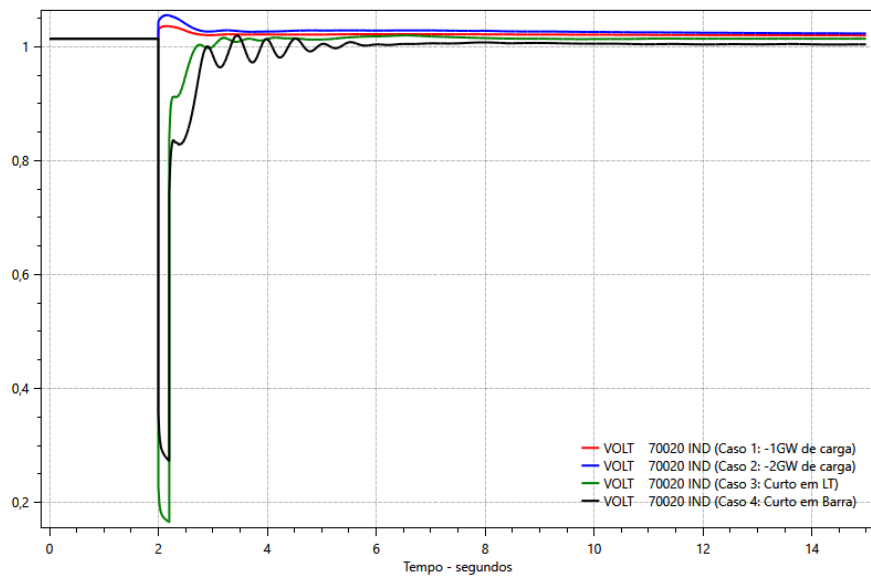


Figura 43: Tensão [pu] na barra da indústria – comparação dos casos de sobrefrequência.

Em todos os casos de sobrefrequência simulados, do ponto de vista da UTE e da indústria, não é desejável a desconexão com o SIN, pois são eventos transitórios, sem grandes problemas até o retorno à estabilidade.

4.6.2 Abertura da Interconexão UTE-SIN

Para evitar superação do nível de curto-circuito, a configuração operacional da indústria é sempre com um dos três disjuntores abertos: uma das entradas de linha ou a interligação. Na figura 17, que mostra a configuração operacional preferencial da indústria, está aberto o disjuntor de interligação, entre as barras de entrada da indústria, simbolizado pela linha cinza claro. Nessa topologia, qualquer abertura da interconexão UTE-SIN, no lado onde a indústria possui geração, seja esta abertura proposital ou não, provocará imediato ilhamento do subsistema indústria-UTE. A partir da abertura da interconexão, o sucesso do ilhamento dependerá principalmente do controle de velocidade das máquinas.

A UTE opera atualmente com o regulador de velocidade das máquinas no modo “Regulação de Emissões” para atender requisitos legais, controlando a temperatura de exausto e mantendo máxima potência. Em outras palavras, o presente sistema teste não foi concebido para operar de forma “ilhada”, e num eventual ilhamento, as máquinas da UTE tendem a acelerar como se não houvesse regulador de velocidade. Esse comportamento foi confirmado em ocorrências reais, nas quais foi possível inclusive validar o modelo das simulações (item 4.3.2). O resultado é uma sobrefrequência na ilha, cujo comportamento dependerá da quantidade de máquinas em operação na indústria e na UTE, principalmente nesta última, que tem potência instalada muito maior que a indústria.

Foram considerados três cenários de balanço carga-geração. A indústria possui uma condição de carga bastante estável, sem variação sazonal significativa, o que justifica a utilização de um único cenário de carga típica. Para os geradores, da UTE e da indústria, foram consideradas três configurações operacionais diferentes para o ilhamento:

- **Cenário Otimista:** UTE com sua capacidade mínima de geração na barra conectada à indústria (apenas 1 gerador). Indústria operando com sua capacidade total de geração (3 geradores no bloco 1, mais 2 geradores no bloco 2) e sua carga típica.

- Cenário **Intermediário**: UTE com 2 geradores na barra conectada à indústria. Indústria operando com 2 geradores no bloco 1, mais 1 gerador no bloco 2 e sua carga típica.
- Cenário **Pessimista**: UTE com 5 geradores na barra conectada à indústria, que é o máximo de máquinas esperado nessa barra. Indústria operando com sua capacidade mínima de geração (1 gerador em cada bloco) e sua carga típica.

A figura 44 apresenta três cenários de abertura da interconexão UTE-SIN, considerando as máquinas na UTE com o modo de regulação de velocidade atual, ou seja, “sem regulação”.

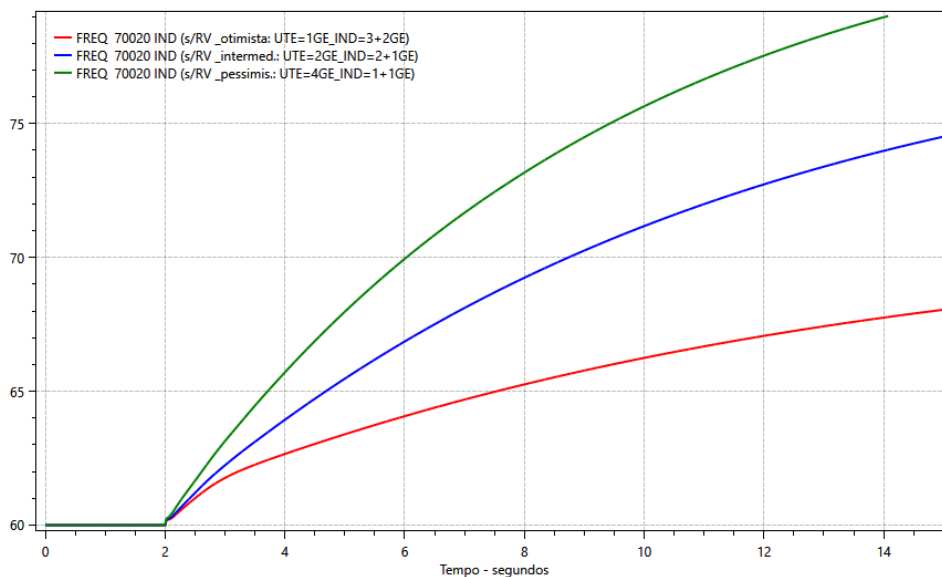


Figura 44: Frequência [Hz] na barra da indústria, em três cenários de abertura da interconexão UTE-SIN (UTE sem RV).

Para um ilhamento com sucesso nesse sistema teste, apenas 01 (uma) máquina da UTE deverá permanecer em operação no modo ilhado, todos os demais geradores da barra devem ser desconectados. Essa máquina, sozinha, tem potência suficiente para suprir toda a carga da indústria, mesmo com todos os geradores da indústria indisponíveis, e ainda sobra potência. Ou seja, o regulador de velocidade deve reduzir a potência gerada na máquina da UTE para evitar sobrefrequência na ilha. O controle de velocidade dessa

máquina deve ser alterado do modo *droop* para modo isócrono na ocorrência de ilhamento, pois será a barra de referência da ilha.

Nas simulações foi considerado um atraso de 50 ms entre a abertura da *LT UTE-SIN* e a desconexão das máquinas excedentes na barra da UTE, referente ao tempo do comando de *transfer-trip* e abertura dos disjuntores das máquinas. Esse tempo foi estimado com base no tempo de interrupção de disjuntores classe 145 kV (CELG, 2014).

Nas simulações, utilizou-se no gerador escolhido na UTE para ilhamento um regulador de velocidade modelo *built-in*, porém com estatismo muito baixo para se aproximar da frequência nominal. O sistema real não opera dessa forma, portanto, devido à falta de dados, não foi possível validar a resposta do regulador. Por isso optou-se pela simulação de três cenários de ajustes diferentes nos parâmetros das constantes de tempo do regulador de velocidade “*Modelo 02 Predefinido de Regulador de Velocidade (DRGV MD02)*” do ANATEM (CEPEL, 2019), cujos resultados podem ser vistos graficamente na figura 45, onde foram utilizados os seguintes valores:

- Ajustes “A”: $T = 0,25$; $T_1 = 0,12$; $T_2 = 0,3$.
- Ajustes “B”: $T = 5$; $T_1 = 1$; $T_2 = 2$.
- Ajustes “C”: $T = 1$; $T_1 = 1$; $T_2 = 10$.

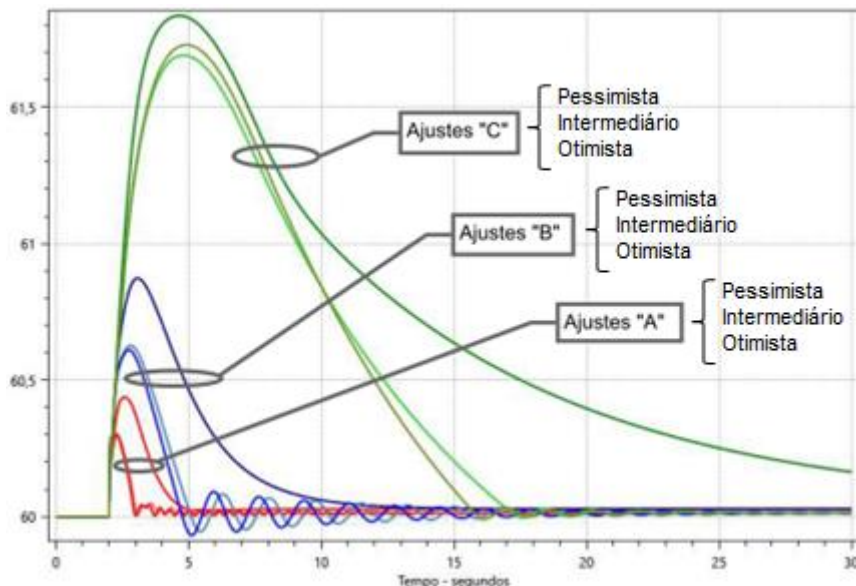


Figura 45: Frequência [Hz] na barra da indústria, resposta do sistema com regulador de velocidade da UTE em três cenários diferentes de ajustes (A, B, C), e em três situações operacionais dos geradores (otimista, intermediária, pessimista).

A comparação da resposta do sistema com os quatro cenários de controle de velocidade (sem regulador, com regulador “ajuste A”, com regulador “ajuste B” e com regulador “ajuste C”) é mostrado para cada configuração operacional dos geradores: otimista (figura 46), intermediária (figura 47) e pessimista (figura 48).

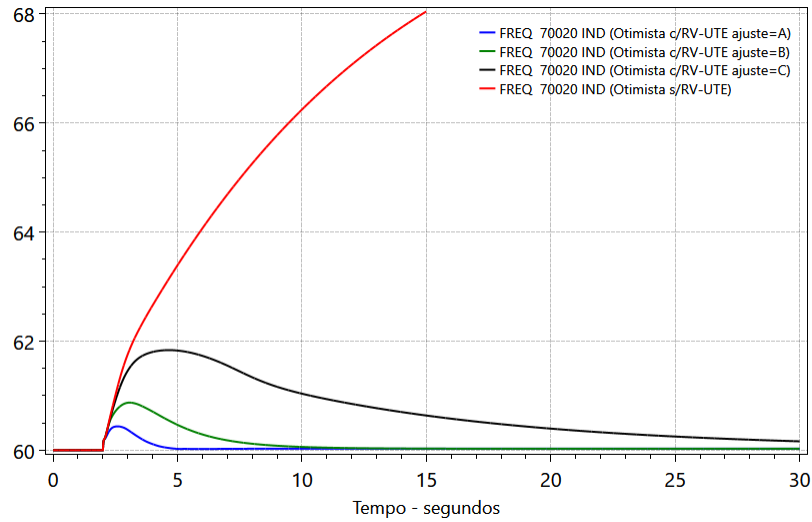


Figura 46: Frequência [Hz] na barra da indústria, no cenário “otimista”, durante a abertura da interconexão UTE-SIN (ilhamento). Resposta do sistema para quatro cenários de ajustes do regulador de velocidade da UTE.

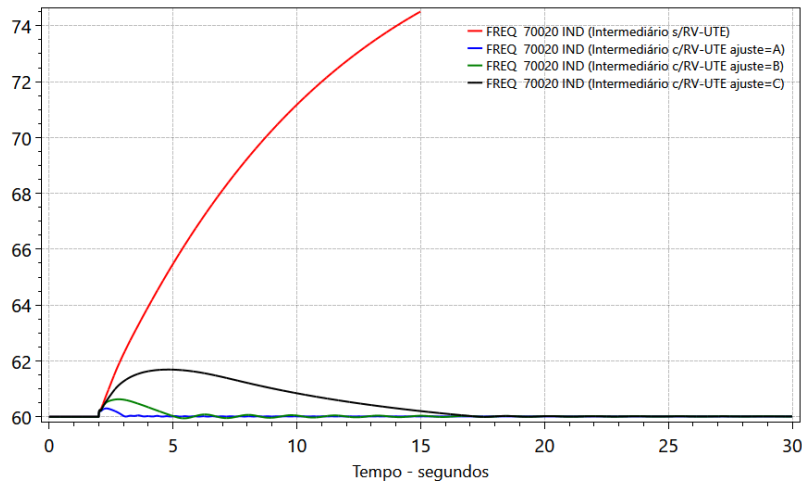


Figura 47: Frequência [Hz] na barra da indústria, no cenário “intermediário”, durante a abertura da interconexão UTE-SIN (ilhamento). Resposta do sistema para quatro cenários de ajustes do regulador de velocidade da UTE.

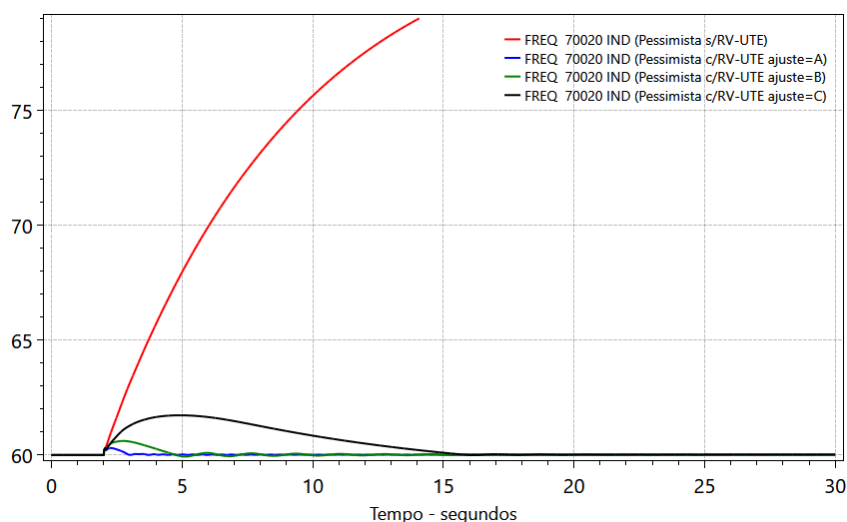


Figura 48: Frequência [Hz] na barra da indústria, no cenário “pessimista”, durante a abertura da interconexão UTE-SIN (ilhamento). Resposta do sistema para quatro cenários de ajustes do regulador de velocidade da UTE.

4.6.3 Resumo dos Cenários de Sobrefrequência

Ao longo do item 4.6 foram apresentados os cenários de sobrefrequência, por enquanto **desconsiderando-se** as proteções de ilhamento. Foram simulados os cenários de: degrau de perda de bloco de carga; aplicação de curto-circuito; e abertura da interconexão UTE-SIN.

Todos esses casos serão executados novamente considerando a presença do sistema de proteção de Ilhamento Nível 1 e Nível 2 apresentado no item 3.4.11, com os ajustes informados no item 4.4.7, para verificar o desempenho do sistema de proteção. No item **4.10** são apresentados os resultados **com as proteções atuando**, cujos gráficos, para todos os casos em que houve atuação de uma ou mais proteções, encontram-se no **ANEXO I**.

O caso de abertura da interconexão UTE-SIN será executado para verificação do desempenho do sistema de proteção de Ilhamento Nível 2.

4.7 Cenários de Subtensão

Nos estudos de subtensão, serão considerados os seguintes cenários:

- Curto-circuito em linha de transmissão ou barra eletricamente próximas;
- Afundamentos de tensão, provocados por contingências na região da indústria;
- Perda de uma subestação relevante na região da indústria;
- Colapso de tensão, provocados por contingências no SIN;

4.7.1 Curto-Circuito

Para os casos de afundamento de tensão devido a curto-circuito, as análises serão feitas utilizando-se as mesmas simulações dos casos de curto-circuito do item 4.6.1 (casos 3 e 4).

4.7.2 Afundamentos de Tensão

Para os casos de afundamento de tensão devido a perda de geração ou acréscimo de carga, as análises serão feitas utilizando-se as mesmas simulações dos casos de afundamento de frequência do item 4.5.2.

4.7.3 Perda de uma Subestação Relevante

Simulação de um caso adicional de **afundamento de tensão**, referente à perda súbita e simultânea de todos os barramentos de uma importante subestação de 500 kV na região geográfica da indústria e da UTE. Utilizou-se a SE Cachoeira Paulista, produzindo o comportamento da frequência e da tensão conforme mostrado nas figuras 49 e 50.

Observa-se nas figuras 49 e 50 que apesar de passar por um transitório consideravelmente severo, principalmente no comportamento da tensão, o sistema tende a retornar à estabilidade.

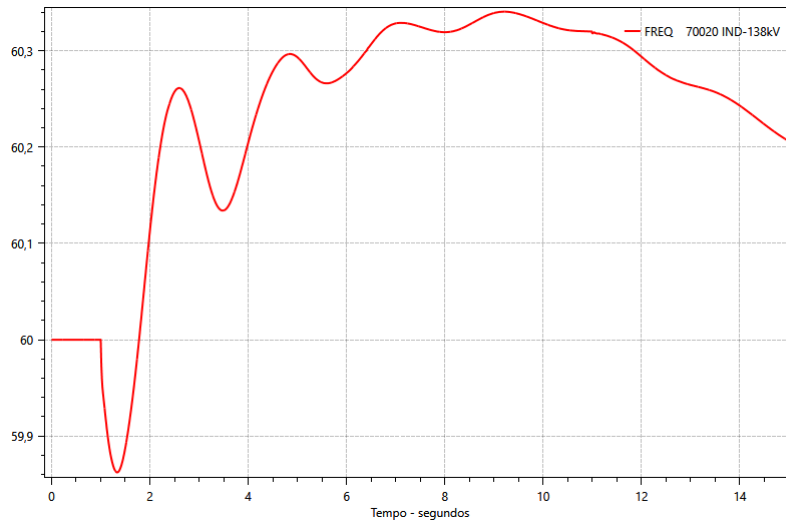


Figura 49: FREQUÊNCIA [Hz] na barra da indústria, durante perda da SE Cachoeira Paulista.

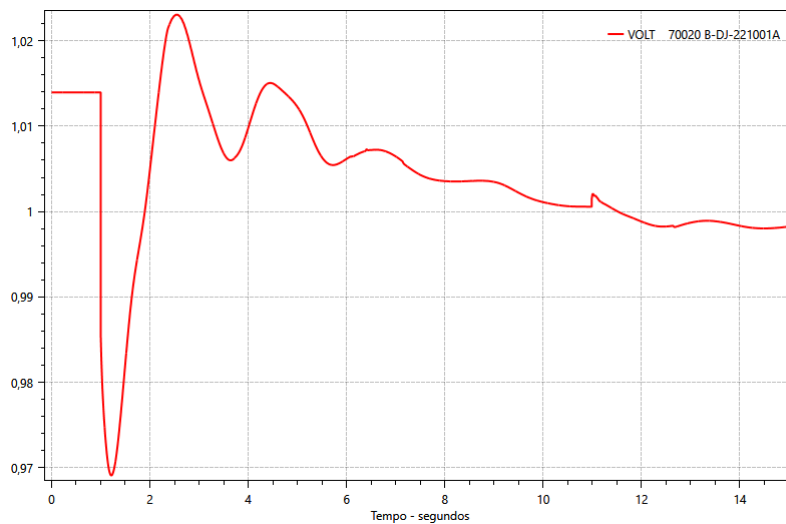


Figura 50: TENSÃO [pu] na barra da indústria, durante perda da SE Cachoeira Paulista.

Observa-se na figura 50 que há uma descontinuidade na tensão em aproximadamente 11s. Isso se deve à atuações automáticas de um controlador de Belo Monte (*CDU 9220 - BM-ACFC-E - BLOCO: 3 - VARIÁVEL: NFC*) e de banco shunt na SE Estreito (“*ligou 1 unidade de Banco Shunt Individualizado do grupo 30 da barra*”), enquanto o sistema tenta recuperar a estabilidade e as condições nominais.

4.7.4 Colapso de Tensão

Para gerar situações de **colapso de tensão**, foram simulados vários eventos simultâneos, conforme a tabela 23 que relaciona cada caso das figuras 51 e 52 com os equipamentos retirados de operação.

Tabela 23: Equipamentos desligados para as simulações de colapso de tensão.

EQUIPAMENTO	DESCRIÇÃO	Nº Caso				
		1	2	3	4	5
LT	140 - ADRIAN-RJ345 / 138 - ITUTIN - C.1	x	x	x	x	x
LT	140 - ADRIAN-RJ345 / 138 - ITUTIN - C.2	x	x	x	x	x
LT	106 - ADRIAN-RJ500 / 104 - C.PAUL-SP500	x	x	x	x	x
LT	105 - ANGRA--RJ500 / 104 - C.PAUL-SP500	x	x	x	x	x
LT	105 - ANGRA--RJ500 / 9601 - Z.OESTE					
LT	105 - ANGRA--RJ500 / 9608 - N.IGUA	x	x	x	x	x
LT	104 - C.PAUL-SP500 / 87 - RESEND - C.2	x	x	x	x	x
LT	140 - ADRIAN-RJ345 / 1781 - _V.PEDR					
LT	140 - ADRIAN-RJ345 / 3966 - MACAE					
LT	104 - C.PAUL-SP500 / 9626 - BF----RJ500 - C.3	x	x	x	x	x
LT	169 - SJOSE2-RJ138 / 4202 - GLB-2	x	x	x	x	x
LT	106 - ADRIAN-RJ500 / 109 - BYPSAD-RJ500	x	x	x	x	x
LT	10 - ANGRA1UNE001 / 105 - ANGRA--RJ500		x			
LT	11 - ANGRA2UNE001 / 105 - ANGRA--RJ500		x			
Pólo de Elo CC	1001 - ELO SANT-ARA	x	x	x	x	
Pólo de Elo CC	1002 - ELO SANT-ARA	x	x	x	x	
Pólo de Elo CC	1003 - ELO SANT-ARA	x				x
Pólo de Elo CC	1004 - ELO SANT-ARA					x
Pólo de Elo CC	3001 - ELO XIN-EST P.1					
Pólo de Elo CC	3002 - ELO XIN-EST P.2					
Pólo de Elo CC	1 - ELO FOZ-IBUI P.1					x
Pólo de Elo CC	2 - ELO FOZ-IBUI P.2					x
Barra Geração	14 - FUNIL1UHE002			x	x	x
Barra Geração	32 - SCRUI6UTE002			x	x	x
Barra Geração	250 - NPECANUHE006			x	x	x
Barra Geração	9603 - CSA-V-UTE001			x	x	x
Barra Geração	10 - ANGRA1UNE001				x	x
Unidade Geração	4205 - TV (2un)	x	x		x	x

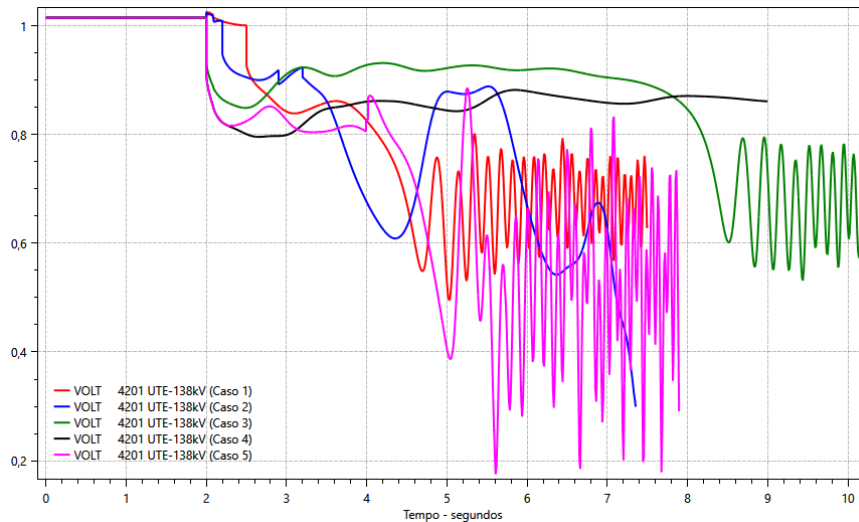


Figura 51: Colapsos de tensão (Comportamento da TENSÃO [pu] em diferentes simulações).

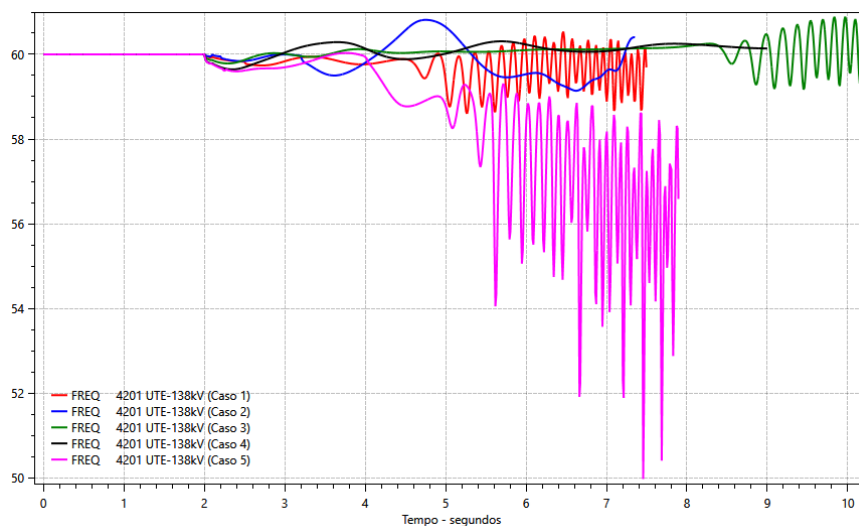


Figura 52: Colapsos de tensão (Comportamento da FREQUÊNCIA [Hz] em diferentes simulações).

4.7.5 Resumo dos Cenários de Subtensão

Ao longo do item 4.7 foram apresentados os cenários de subtensão, por enquanto **desconsiderando-se** as proteções de ilhamento. Esses cenários são: curto-circuito em linha de transmissão ou barra; afundamentos de tensão; perda de uma subestação relevante; e colapso de tensão.

As análises também serão feitas aproveitando-se os casos anteriores de: afundamento de frequência, colapsos de frequência e curto-circuito, respectivamente os itens 4.5.2, 4.5.3 e as curvas 3 e 4 do item 4.6.1.

Todos esses casos serão executados novamente considerando a presença do sistema de proteção de Ilhamento Nível 1 e Nível 2 apresentado no item 3.4.11, com os ajustes informados no item 4.4.7, para verificar o desempenho do sistema de proteção. No item **4.10** são apresentados os resultados **com as proteções atuando**, cujos gráficos, para todos os casos em que houve atuação de uma ou mais proteções, encontram-se no **ANEXO I**.

4.8 Cenários de Sobretensão

Para os casos de sobretensão, as análises serão feitas utilizando-se as mesmas simulações dos casos de perda de blocos de carga as curvas 1 e 2 do item 4.6.1.

4.9 Cenários de Descarte de Cargas na Indústria

A desconexão da indústria com a UTE, mesmo não sendo por atuação do esquema de Ilhamento Nível 2, fará com que a indústria dependa do descarte de cargas para manter a estabilidade do sistema. Podem ser citadas como causas da desconexão: um comando de abertura involuntário, um *transfer-trip* do terminal remoto, a atuação da proteção primária contra curto-circuitos da linha de transmissão (87L), ou a proteção diferencial de barras (87B).

Uma vez que a indústria fique ilhada, os relés dos esquemas de Ilhamento Nível 1 e Ilhamento Nível 2 não tem mais função efetiva. A única ação esperada é a atuação do **descarte de cargas**, uma vez que a indústria deste estudo de caso não possui capacidade de geração para suprir toda sua carga. No caso desta indústria específica, o descarte de cargas é executado pelo sistema de automação. Nesta simulação é usada uma lista de

grupos de cargas para descarte, que foi pré-configurada caso a caso no programa, de forma que o valor de potência a descartar seja igual ou um pouco superior ao déficit de potência. Os eventos simulados para forçar o descarte de cargas são apresentados na tabela 24. Destaca-se que o bloco 3 da indústria não tem geração interna, portanto não é controlado pelo sistema de descarte por automação, ou seja, em caso de falta de suprimento no bloco 3, ocorre desligamento automático de todas as cargas desse bloco (em torno de 15kW).

Tabela 24: Circuitos pré-definidos para atuação no Descarte de Cargas.

DLOC	CIRCUITOS ABERTOS	Otimista	Intermediário	Pessimista
#LOC3	70360-70365 1 (Descarte BI-1 TF-1B)	x	x	x
#LOC4	70356-70359 1 (Descarte BI-1 B-400)			x
#LOC6	70366-70369 1 (Descarte BI-1 B600)			x
#LOC7	70366-70368 1 (Descarte BI-1 B-700)		x	x
#LOC11	70120-70060 1 (Descarte BI-2 Synch-B-70)	x		
#LOC12	70140-70060 1 (Descarte BI-2 Synch-B-80)	x		
#LOC13	70180-70080 1 (Descarte BI-2 B-200-RLC)		x	x
Total Descartado [MW]		18	34	40

Para o propósito deste trabalho, foi simulada a abertura da interconexão Indústria-UTE, em três cenários de geração na indústria:

- **Cenário Otimista:** Indústria operando com sua capacidade total de geração (3 geradores no bloco 1, mais 2 geradores no bloco 2) e sua carga típica;
- **Cenário Pessimista:** Indústria operando com sua capacidade mínima de geração (1 gerador em cada bloco) e sua carga típica.
- **Cenário Intermediário:** Indústria operando com 2 geradores no bloco 1, mais 1 gerador no bloco 2 e sua carga típica.

Na ausência do descarte de cargas, o comportamento da frequência e da tensão na barra da indústria é apresentado nas figuras 53 e 54, respectivamente.

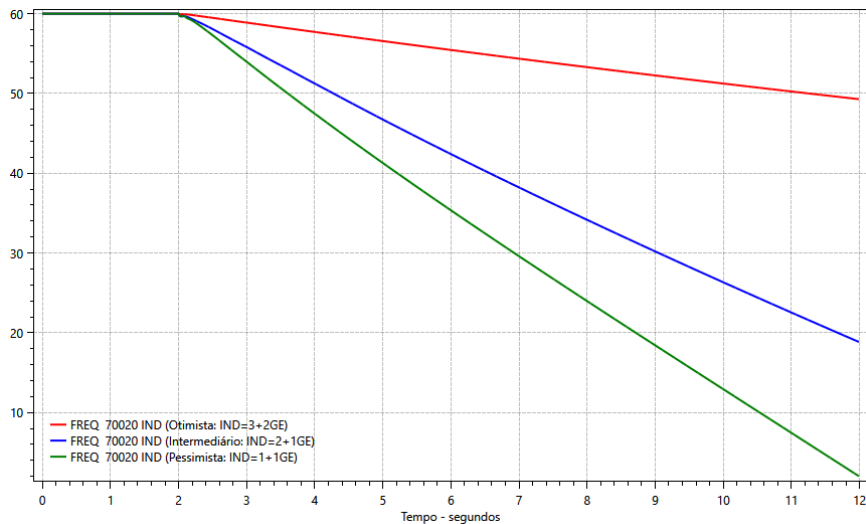


Figura 53: Frequência [Hz] na barra da indústria durante a abertura da interconexão Indústria-UTE, sem descarte de cargas. Comportamento em três cenários operacionais.

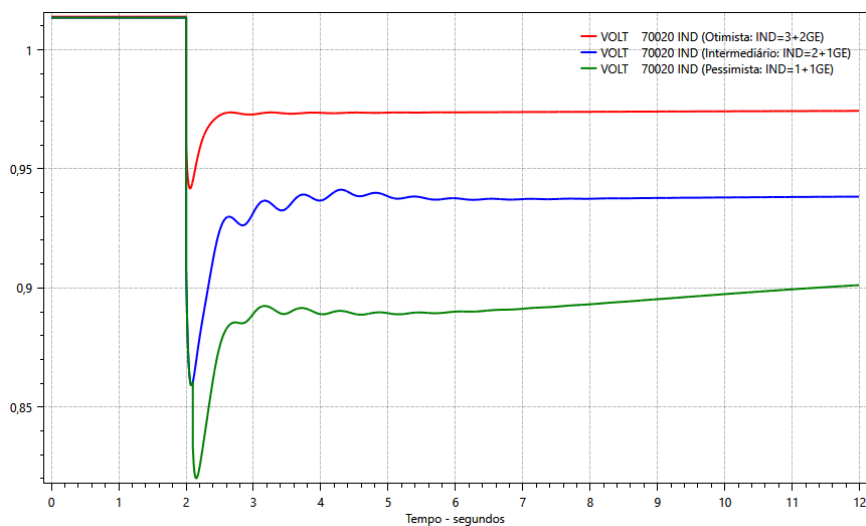


Figura 54: Tensão [p.u.] na barra da indústria durante a abertura da interconexão Indústria-UTE, sem descarte de cargas. Comportamento em três cenários operacionais.

As simulações foram realizadas novamente, agora considerando a atuação do sistema de descarte automático de cargas. Como o fabricante do sistema de descarte de cargas real instalado na indústria estima entre 250 a 300 ms o tempo de atraso de seu sistema, de forma conservadora, foi considerado um atraso total de 500 ms entre a

abertura da *LT IND-UTE* e o desligamento das cargas a descartar, referente aos tempos de processamento do sistema de automação, comunicação e abertura dos disjuntores.

O comportamento do sistema para os cenários otimista, intermediário e pessimista são apresentados respectivamente nas figuras 55, 56 e 57.

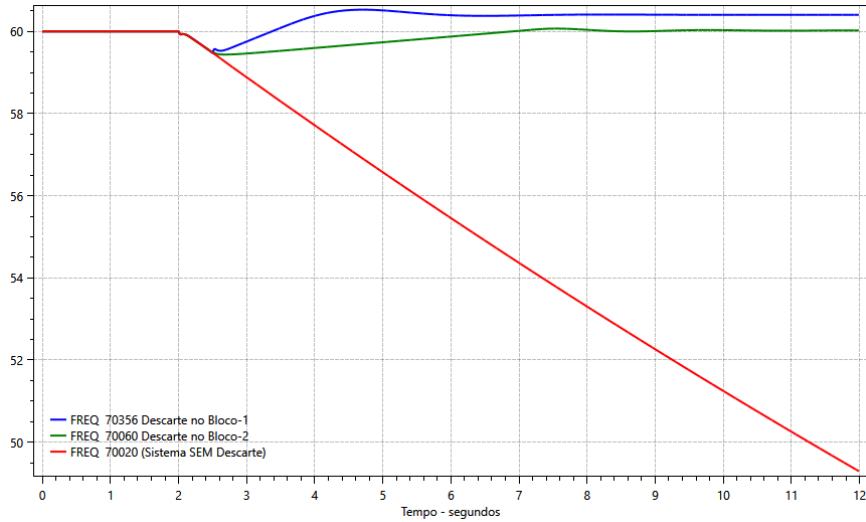


Figura 55: Abertura da interconexão Indústria-UTE no cenário “Otimista”. Comparação da frequência [Hz] com e sem descarte de cargas.

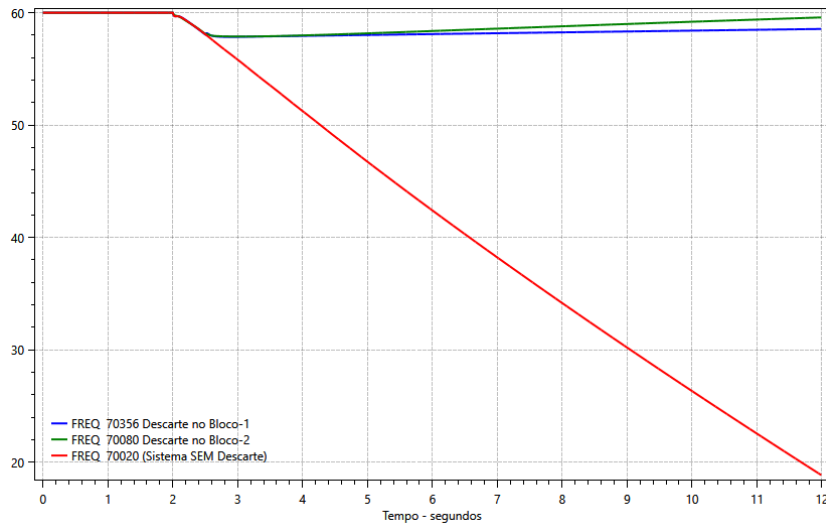


Figura 56: Abertura da interconexão Indústria-UTE no cenário “Intermediário”. Comparação da frequência [Hz] com e sem descarte de cargas.

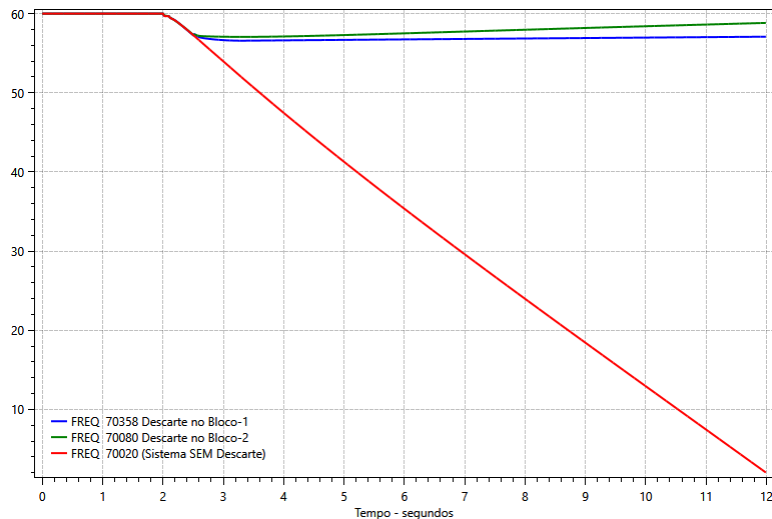


Figura 57: Abertura da interconexão Indústria-UTE no cenário “Pessimista”. Comparação da frequência [Hz] com e sem descarte de cargas.

Observa-se que na ausência do sistema de descarte automático de cargas ocorre colapso de frequência nos três cenários. Esse resultado era esperado já que a indústria ilhada isoladamente fica com déficit de potência ativa. Nos casos em que o descarte de cargas atua, ocorre uma subfrequência inicial (quase $56,5 \text{ Hz}$ no pior caso), porém o sistema vai gradativamente recuperando as condições operacionais. Esse valor mínimo de frequência ($56,5 \text{ Hz}$) é bastante desfavorável para o sistema em regime permanente, mas é aceitável para um transitório em que a indústria fica ilhada, principalmente se comparado a um possível *blackout* não-programado.

4.10 Comparação dos Resultados

4.10.1 Desempenho com Ajustes Propostos

A tabela 24 resume os resultados obtidos em todas as simulações do trabalho, contendo os tempos das proteções que atuaram, utilizando os ajustes propostos no item 4.4.7. As células com caractere “-” indicam que a proteção não atuou durante a simulação.

Tabela 25: Desempenho do Sistema de Proteção Proposto: Tempos de disparo das proteções que atuaram nas simulações.

CENÁRIO	ITEM	SIMULAÇÃO	CASO	ILHAMENTO NÍVEL 2										ILHAM. NÍVEL-1				
				67/27	32P/81U	27	59	81U	81O	81R_U	81R_O	81RF_U	81RF_O					
SUBFREQ.	4.5.1	Perturb. Real Elos Foz-Ibiuna	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		Perturb. Real Elos Xingu--Estreito	2	-	-	-	-	-	-	-	-	2,26	-	-	-	-		
SUBFREQ. / SUBTENSÃO	4.5.2 / 4.7.2	Afundamentos de FREQUÊNCIA / e Afundamento de TENSÃO	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
SOBREFREQ. / SOBRETENSÃO	4.5.3	Colapso de FREQUÊNCIA	1	-	-	-	-	-	-	-	2,21	-	0,42	-	-	-		
			2	-	-	-	-	-	-	2,52	-	0,44	-	-	-			
			3	-	3,37	-	-	7,21	-	-	-	2,3	-	-	-			
			4	-	4,37	-	-	7,43	-	-	3,5	-	3,21	-	-			
			5	-	-	-	-	6,9	-	-	3,11	-	2,86	-	-			
SOBREFREQ. / SOBRETENSÃO	4.6.1 / 4.8	Perda de Blocos de Carga	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
			4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
SOBREFREQ.	4.6.2	Abertura da Interconexão UTE-SIN	Sem RV	otm	-	-	-	-	-	4,21	-	-	-	-	0,41	-		
				int	-	-	-	-	-	3,87	-	-	0,61	-	0,41	-		
				psm	-	-	-	-	-	3,61	-	-	0,48	-	0,41	-		
				otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			c/RV-A	int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			c/RV-B	psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
c/RV-C	otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
SUBTENSÃO	4.7.3	Perda SE Cachoeira Pasulista	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			1	-	-	-	-	-	-	-	3,22	-	3,01	-	-			
			2	2,43	-	-	-	-	-	-	-	-	4,45	2,62	1,21			
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,85			
			4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
DESCARTE DE CARGAS	4.9	Abertura da Interconexão INDÚSTRIA-UTE	otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
			psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
			otm	3,12	-	-	-	-	-	-	-	2,99	-	2,42	-			
			int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			

NÃO SE APLICA

As células destacadas em amarelo indicam que a proteção teve comportamento inadequado, que são comentados a seguir. Ressalta-se que os tempos mostrados na tabela 25 consideram a atuação de cada proteção (coluna da tabela) como se fosse a única a atuar na simulação, ou seja, desconsiderando a presença das outras proteções, para que se possa visualizar "em que ponto" da contingência cada proteção atuaria.

- Na simulação do caso “Perturb. Real Elos Xingu-Estreito”, a proteção **81RF_U atuou indevidamente**, pois apesar de o sistema ter chegado a 58,5 Hz, a frequência estabilizou posteriormente.
- Nas simulações de “Abertura da Interconexão UTE-SIN”, só deveria ocorrer *trip* nos casos “Sem RV”, onde a frequência tende a aumentar indefinidamente. Nos três casos “c/RV-C” e nos casos “c/RVB-Otimista”, houve **atuação indevida da proteção 81RF_O** (sobrefrequência). Nesses casos o regulador de velocidade da máquina da UTE controlou a frequência no ilhamento UTE-Indústria, sendo que no pior desempenho, apesar de a frequência ter chegado próximo a 62 Hz durante o transitório, o sistema retornaria à estabilidade. Portanto não deveriam atuar proteções do Ilhamento Nível 2.
- Nas simulações de “Colapso de Tensão”, era esperado que a **proteção do Ilhamento Nível 1** fosse a primeira a atuar, o que só aconteceu nos casos 2 e 3. Nos casos “Colapso de Tensão – caso 1, 4 e 5” a proteção de ilhamento nível 1 não atuou. O pior desempenho foi no “Caso 4”, em que não atuou nenhuma proteção. Ressalta-se o caráter aleatório e bastante improvável dos eventos aplicados para forçar os colapsos de tensão nas simulações, que produziram um comportamento das grandezas difícil de ocorrer no sistema real.

Comentário adicional:

- A proteção combinada **67 com 27 atuou** em alguns casos de colapso de tensão. A atuação não foi incorreta, mas seu propósito principal é proteger contra curto-circuito, o que não foi o caso. Observou-se graficamente, que durante essas perturbações ocorreu mudança drástica no fluxo de potência

reativa, apesar do balanço de potência ativa não ser tão significativo. Isso sugere que é preciso ter certo cuidado na utilização da proteção 67, e com o fluxo das potências ativa e reativa. Novamente, o caráter aleatório dos eventos aplicados na simulação e o comportamento improvável das grandezas pode ter levado a um resultado que não aconteceria em condições reais.

Para todos os casos em que houve atuação de uma ou mais proteções, os gráficos relacionados se encontram no ANEXO I (ver “Gráficos: Ajustes Propostos”).

4.10.2 Desempenho com Ajustes Modificados

A partir das operações indevidas de algumas proteções, discutidas no item 4.10.1, são propostas as modificações apresentadas nas tabelas 26 e 27.

Tabela 26: Ajuste modificado para o esquema de Ilhamento Nível 1.

Proteção	Descrição	Unidade	Ajuste	Observação
27B	pickup	[pu]	0,86	Valor anterior era 0,89 (4.4.7)

Tabela 27: Ajustes modificados para o esquema de Ilhamento Nível 2.

Proteção	Descrição	Unidade	Ajuste	Observação
81RF (U)	delta_f	[Hz]	2	Valor anterior era 1 (4.4.7)
81RF (O)	delta_f	[Hz]	2	Valor anterior era 1 (4.4.7)

Utilizando os ajustes modificados, obteve-se os resultados apresentados na tabela 28. As células com caractere “-” indicam que a proteção não atuou durante a simulação. As células destacadas em *amarelo* indicam que a proteção teve comportamento mais lento após a modificação dos ajustes. As células destacadas em *verde* indicam que a proteção teve comportamento mais rápido após a modificação dos ajustes. As células destacadas em *vermelho* indicam que a proteção continua com comportamento inadequado.

Tabela 28: Desempenho do Sistema de Proteção com os ajustes modificados: Tempos de disparo das proteções que atuaram nas simulações.

CENÁRIO	ITEM	SIMULAÇÃO	CASO	ILHAMENTO NÍVEL 2										ILHAM. NÍVEL-1					
				67/27	32P/81U	27	59	81U	81O	81R_U	81R_O	81RF_U	81RF_O						
SUBFREQ.	4.5.1	Perturb. Real Elos Foz-Ibiuna	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
		Perturb. Real Elos Xingu-Estreito	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
SUBFREQ. / SUBTENSÃO	4.5.2 / 4.7.2	Afundamentos de FREQUÊNCIA / e Afundamento de TENSÃO	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOBREFREQ. / SOBRETENSÃO	4.5.3	Colapso de FREQUÊNCIA	1	-	-	-	-	-	-	-	2,21	-	2,08	-	-	-	-		
			2	-	-	-	-	-	-	-	2,52	-	2,4	-	-	-	-		
			3	-	3,37	-	-	7,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			4	-	4,37	-	-	7,43	-	-	3,5	-	-	4,16	-	-	-	-	
			5	-	-	-	-	6,9	-	-	3,11	-	-	3,75	-	-	-	-	
SOBREFREQ. / SUBTENSÃO	4.6.1 / 4.7.1	Perda de Blocos de Carga	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SOBREFREQ.	4.6.2	Abertura da Interconexão UTE-SIN	Sem RV	otm	-	-	-	-	-	4,21	-	-	-	-	-	0,41	-		
				int	-	-	-	-	-	3,87	-	-	0,61	-	-	0,41	-		
				psm	-	-	-	-	-	3,61	-	-	0,48	-	-	0,41	-		
				otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			c/RV-A	int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			c/RV-B	psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,41	-
				int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,41	-	
				psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,41	-	
SUBTENSÃO	4.7.3	Perda SE Cachoeira Pasulista	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			2	2,43	-	-	-	-	-	-	3,22	-	-	-	-	-	-		
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,62	1,21		
			4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,65		
			5	3,12	-	-	-	-	-	-	2,99	-	-	-	-	-	4,46		
DESCARTE DE CARGAS	4.9	Abertura da Interconexão INDÚSTRIA-UTE	otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

NÃO SE APLICA

Observa-se que:

- Nas simulações do caso “Perturb. Real Elos Xingu-Estreito”, a proteção **81RF_U**, que antes atuava indevidamente, após o ajuste modificado **não atuou**, e corretamente permitiu que o sistema retornasse à normalidade.
- Nas simulações de “Colapso de Frequência”, a proteção **81RF_U** com ajuste modificado atrasou um pouco mais para atuar em todos os casos, exceto no caso 3, em que igualou o mesmo tempo do ajuste anterior. De qualquer forma, a função 81RF_U foi a primeira a atuar, e portanto executar o ilhamento, em três dos cinco casos de colapso de frequência.
- Nas simulações de “Abertura da Interconexão UTE-SIN”, no caso “c/RVB-Otimista”, o ajuste modificado da **proteção 81RF_O corrigiu as atuações indevidas** que ocorriam anteriormente. Porém nos três casos “c/RV-C” continuou havendo **atuação indevida da proteção 81RF_O**. Observa-se que 50% das situações em que a proteção 81RF_O operou, sua atuação foi indevida. Assim, **essa proteção 81RF será bloqueada para sobrefrequência** (ver item 4.10.3), mantendo-a ativa apenas para subfrequência.
- Nas simulações de “colapso de tensão”, a proteção **81RF_U** com ajuste modificado **não atuou nos casos 1 e 2, porém sem nenhum prejuízo** para o desempenho do sistema, já que nesses casos atuaram respectivamente a proteção 81R_U e o esquema Ilhamento Nível 1.
- Nas simulações de “Colapso de Tensão”, com ajuste modificado a **proteção do Ilhamento Nível 1 atuou em três dos cinco casos**, nos quais foi responsável pelo ilhamento, e operou inclusive no caso 4 salvando o sistema do colapso, pois com os ajustes anteriores nenhuma proteção atuava. Nos outros dois casos em que a proteção de ilhamento nível 1 não atuou, as proteções Ilhamento Nível 2 atuaram (81 e 81R), comportamento correto, mas que exige descarte de cargas. Novamente, há de se considerar o caráter aleatório e improvável dos eventos aplicados para forçar os colapsos de tensão nas simulações.

Para todos os casos em que houve atuação de uma ou mais proteções, onde os ajustes modificados causaram alteração no tempo de atuação com relação aos ajustes anteriores, os gráficos relacionados se encontram no capítulo ANEXO I (ver “Gráficos: Ajustes Modificados”). Por simplificação, serão suprimidos os gráficos onde a proteção não atuou.

4.10.3 Desempenho com os Ajustes Finais

A partir das operações indevidas da proteção 81RF_O, discutidas no item 4.10.2 propõe como modificação adicional desabilitar **proteção 81RF será bloqueada para sobrefrequência** (tabela 30), mantendo-a ativa apenas para subfrequência.

Para o estudo de caso do sistema teste apresentado neste trabalho, os **ajustes finais** a serem utilizados noilhamento nível 1 são aqueles apresentados na **tabela 29**, que é a mesma tabela 18, porém atualizada com a alteração informada na tabela 26. Analogamente, os ajustes finais a serem utilizados noilhamento nível 2 são aqueles apresentados na tabela 30, que é a mesma tabela 19, porém atualizada com as alterações informadas nas tabelas 27 e ainda a modificação adicional da função 81RF_O citada no parágrafo anterior.

Utilizando os **ajustes finais** apresentados nas tabelas 29 e 30, obteve-se os resultados apresentados na **tabela 31**. Para facilitar a identificação da proteção responsável pelo ilhamento em cada caso, as células destacadas **em verde indicam a proteção que atuou primeiro**.

Tabela 29: Ajustes propostos para o esquema de Ilhamento Nível 1, revisão final.

Proteção	Descrição	Unidade	Ajuste
27	pickup	[pu]	0,94
27B	pickup	[pu]	0,86
-	delay	[s]	1

Tabela 30: Ajustes propostos para o esquema de Ilhamento Nível 2, revisão final.

Proteção	Descrição	Unidade	Ajuste
67 (com 27)	pickup	[A]	100
	delay	[s]	0
	ângulo	[graus]	45
	sentido	[dir/rev]	direto
27 (com 67)	pickup	[pu]	0,7
	delay	[s]	0,5
32P (com 81U)	pickup	[MW]	5
	delay	[s]	0,5
	sentido	[dir/rev]	direto
81U (com 32P)	pickup	[Hz]	58,2
	delay	[s]	0
32Q (com 59)	pickup	[Mvar]	-
	delay	[s]	-
	sentido	[dir/rev]	-
59 (com 32Q)	pickup	[pu]	-
	delay	[s]	-
27	pickup	[pu]	0,6
	delay	[s]	4,5
51	pickup	[A]	-
	delay	[s]	2 a 3
59	pickup	[pu]	1,1
	delay	[s]	1
81U	pickup	[Hz]	58
	delay	[s]	3
81O	pickup	[Hz]	62
	delay	[s]	3
81R_U (df/dt)	pickup	[Hz/s]	2
	f _{superv}	[Hz]	59
	f _{corte}	[Hz]	58,8
	delay	[s]	0,2
81R_O (df/dt)	pickup	[Hz/s]	2
	f _{sup}	[Hz]	61
	f _{corte}	[Hz]	61,2
	delay	[s]	0,2
81RF (U)	X_offset	[Hz]	0,1
	Y_offset	[Hz/s]	0,2
	delta_f	[Hz]	2
	df/dt	[Hz/s]	2
	delay	[s]	0,2
81RF (U)	Bloqueado		

Tabela 31: Desempenho do Sistema de Proteção com os ajustes FINAIS: Tempos de disparo das proteções que atuaram nas simulações.

CENÁRIO	ITEM	SIMULAÇÃO	CASO	ILHAMAMENTO NÍVEL 2										ILHAM. NÍVEL-1				
				67/27	32P/81U	27	59	81U	81O	81R_U	81R_O	81RF_U	81RF_O					
SUBFREQ.	4.5.1	Perturb. Real Elos Foz-Ibiuna	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		Perturb. Real Elos Xingu-Estreito	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SUBFREQ. / SUBTENSÃO	4.5.2 / 4.7.2	Afundamentos de FREQUÊNCIA / e Afundamento de TENSÃO	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOBREFREQ. / SOBRETENSÃO	4.5.3	Colapso de FREQUÊNCIA	1	-	-	-	-	-	-	-	2,21	-	2,08	-	-	-	-	
			2	-	-	-	-	-	-	-	2,52	-	2,4	-	-	-	-	
			3	-	3,37	-	-	7,21	-	-	-	-	-	2,3	-	-	-	-
			4	-	4,37	-	-	7,43	-	-	3,5	-	-	4,16	-	-	-	-
			5	-	-	-	-	6,9	-	-	3,11	-	-	3,75	-	-	-	-
SOBREFREQ. / SOBRETENSÃO	4.6.1 / 4.7.1	Perda de Blocos de Carga	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			otm	-	-	-	-	-	-	-	4,21	-	-	-	-	-	-	-
			int	-	-	-	-	-	-	-	3,87	-	-	0,61	-	-	-	-
			psm	-	-	-	-	-	-	-	3,61	-	-	0,48	-	-	-	-
			otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOBREFREQ.	4.6.2	Abertura da Interconexão UTE-SIN	otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SUBTENSÃO	4.7.3	Perda SE Cachoeira Pasulista	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			1	-	-	-	-	-	-	-	3,22	-	-	-	-	-	-	
			2	2,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DESCARTE DE CARGAS	4.9	Abertura da Interconexão INDÚSTRIA-UTE	otm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			int	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			psm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

NÃO SE APLICA, pois estes cenários simulam a abertura do disjuntor de entrada da indústria, o mesmo onde atuam as proteções de Ilhamento Nivel 2, a atuação dessas proteções é indiferente).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 Conclusões Gerais

Este trabalho apresentou um caso particular de ilhamento e foi proposto um sistema de proteção para detectar condições elétricas desfavoráveis à indústria autoprodutora, decidir e executar o ilhamento da indústria e uma UTE interconectadas entre si, porém desconectadas do SIN.

Foram simuladas várias perturbações sistêmicas e regionais, passíveis de ocorrer no sistema real, e que demandariam o ilhamento. Levando-se em consideração a importância da UTE no controle da frequência para o SIN, para atender as solicitações do ONS, bem como os limites operacionais estabelecidos pela ANEEL, estabeleceu-se que somente nas perturbações de colapso de tensão o ilhamento conjunto (indústria-UTE) seria desejável. Em todos os demais distúrbios (subfrequência, sobrefrequência, sobretensão), caso atinjam valores críticos que sensibilizem a proteção, um ilhamento da indústria isoladamente é mais adequado.

Conforme já era esperado, as simulações confirmaram que no ilhamento, sempre quando não houver geração suficiente na indústria, é necessário descarte de cargas adequado para equilibrar o balanço carga-geração. Por outro lado, se a potência da UTE for maior que a carga da indústria deve ser analisada a opção de descarte de geração na UTE para diminuir o desbalanço de potência no momento do ilhamento.

Verificou-se que o sistema de proteção proposto, com dois níveis de ilhamento, é adequado para diversos sistemas onde se deseja ilhar uma indústria com uma UTE, e pode

ser adaptado para cada aplicação particular, podendo desabilitar algumas das proteções proposta que não sejam necessárias no sistema em estudo. Os ajustes das proteções, no entanto, devem sempre ser avaliados e calibrados sob medida para cada aplicação em particular.

No sistema teste estudado neste trabalho verificou-se que os ajustes iniciais apresentaram algumas respostas indesejáveis. Com a modificação adequada de alguns poucos parâmetros, todos os resultados foram satisfatórios.

Foi constatado nas simulações que as proteções de frequência, seja a função de frequência convencional (81), taxa de variação de frequência (81R ou df/dt) ou *Fast Rate of Change of Frequency* (81RF), juntas foram as grandes responsáveis pela ampla maioria das atuações de ilhamento. Conforme indicavam alguns trabalhos das referências, verificando-se que a função 81R (df/dt) tende a atuar mais rápido que a função de frequência convencional (81), e que a função 81RF (“*Fast Rate of Change of Frequency*”), por sua vez, tende a ser mais rápida das três. Adicionalmente, observa-se a necessidade de certo cuidado com a proteção 81RF, pois os ajustes da característica “*slope*” podem acelerar demasiadamente esta função a ponto de causar atuações indevidas, como foi o caso neste trabalho, onde acabou-se optando por desabilitar a função 81RF_O (sobrefrequência).

A decisão de um ilhamento envolvendo dois agentes diferentes traz algumas dificuldades e vários desafios. Ressalta-se a dificuldade de integração entre essas diferentes equipes, tendo em vista que é necessário um clima de boa colaboração para troca de informações e para execução dos serviços necessários. Como dificuldade técnica, para se obter bons ajustes das proteções são necessárias boas informações. Por mais que se tenham dados da indústria e da UTE individualmente, é bastante desejável que se disponha de dados históricos do sistema indústria-UTE operando em conjunto, tais como: oscilografias de eventos reais, ajustes das proteções, níveis de curto-circuito do sistema etc. Salienta-se ainda que possíveis trâmites legais de desembaraço com os órgãos reguladores podem ser necessários, por exemplo, se a UTE que é despachada pelo ONS, é necessário anuência deste órgão para autorizar o ilhamento. Para finalizar, conclui-se que, apesar das dificuldades, o ilhamento proposto é possível e tende a ter resultados positivos, principalmente para a indústria.

Conclui-se que o esquema proteção para ilhamento proposto traz seu maior ganho principalmente para a indústria, que possui capacidade de geração inferior à sua carga, e com a proposta, nos momentos de contingência pode ter sua geração totalmente complementada pela UTE através do Ilhamento Nível 1, evitando a necessidade de descarte de cargas, e conseqüentemente evitando também a perda de produção. Em um segundo cenário, o Ilhamento Nível 2 ainda consegue salvar as cargas mais prioritárias da indústria, independente da participação ou não da UTE. Do ponto de vista da UTE, o ilhamento não traz muito ganho, porém pode-se citar como fator positivo o fato de que, diante de um colapso de tensão sistêmico e irreversível, o Ilhamento Nível 1 fará com que pelo menos uma parte, mesmo que pequena, da UTE fique ilhada exportando potência para a indústria, em vez do *blackout* total da usina.

5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, propõem-se os tópicos:

- Modelagem da proteção de salto vetorial (função 78), o que não foi possível simular no *software* Anatem;
- Simulação do desempenho das proteções para faltas desequilibradas, o que não foi possível simular no *software* Anatem;
- Utilização do conceito de proteção adaptativa para corrigir os ajustes de acordo com as condições operacionais (desbalanço de potência carga-geração, topologia do sistema, número de geradores em operação etc.);
- Modelagem dos relés de sobrecorrente temporizada (funções 51) para as curvas de tempo inverso;
- Modelagem mais elaborada para o descarte de cargas, incluindo a decisão automática pelo programa de quanto e quais cargas descartar de acordo com a topologia do sistema, geração disponível etc.

5.3 Mensagem Final

Para finalizar este trabalho, citam-se as **cinco facetas da proteção**, de acordo com Blackburn (2007):

- **Confiabilidade:** Assegurar que a proteção tenha o desempenho correto;
- **Seletividade:** máxima continuidade de serviço com mínima desconexão do sistema;
- **Velocidade:** mínimo tempo de operação e conseqüente dano no equipamento;
- **Simplicidade:** mínimo equipamento de proteção e circuitos associado para atingir os objetivos da proteção;
- **Economia:** máxima proteção com o mínimo custo.

Por serem conflitantes entre si, esses cinco objetivos desafiam o engenheiro de proteção a equilibrar o compromisso entre eles, sabendo que, na vida real, é utopia acreditar que todos serão alcançados em seu nível máximo.

CAPÍTULO 6 REFERÊNCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABB, **SPAF 140 C Frequency Relay - User's manual and Technical description**. Code 1MRS 750135-MUM EN. Version C. Finland, abr.2002.
- [2] ALMEIDA, W. G.; FREITAS, W. D. **Circuitos Polifásicos**. Brasília: FinaTec, 1995.
- [3] ANEEL, PRODIST - **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 1 – Introdução**, 2018.
- [4] ANEEL, PRODIST - **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, 2021.
- [5] ANNE, R.; BASHA, F. K.; PALANIAPPAN, R.; OLIVER, K. L.; THOMPSON, M. J. **Reliable Generator Islanding Detection for Industrial Power Consumers with On-Site Generation**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 52, n. 1, 2016. (07185404 -81RF).
- [6] AUDRING D.; LERCH E. **Determination of Islanding Performance of Industrial Plants**. IEEE Trondheim PowerTech, 2011. (06019426)
- [7] BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective Relaying: Principles and Applications**. 3. ed. Taylor & Francis Group, 2007.
- [8] CELG DISTRIBUIÇÃO. **NTC-45 Disjuntor de Alta Tensão: Especificação**. Revisão 4. out. 2014.
- [9] CEPEL, ELETROBRAS. **Programa Anatem - Análise de Transitórios Eletromecânicos: Manual do Usuário**. 11.8.0. dez. 2019.

- [10] CEPEL, ELETROBRAS. **Análise de Redes Elétricas**. Disponível em: <http://www.cepel.br/pt_br/produtos/programas-computacionais-por-categoria/analise-de-redes-eletricas.htm>. Acesso em: 27 set. 2021.
- [11] IEEE Std C37.2-2008, IEEE: **Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations**. New York, USA, 2008.
- [12] IEEE Std 1547.2-2009, IEEE: **Application Guide for IEEE Std 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**. New York, USA, 2009.
- [13] IEEE Std C37.95-2014, IEEE: **Guide for Protective Relaying of Utility-Consumer Interconnections**. New York, USA, 2014.
- [14] KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. McGraw-Hill, 1994.
- [15] MARCHESAN, G. **Deteção de Ilhamento em Sistemas de Distribuição com Geração Síncrona Distribuída**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, 2016.
- [16] MARDEGAN, C. **Capítulo III: Dispositivos de proteção – Parte 1**, Revista O Setor Elétrico. p. 28-39, mar.2010.
- [17] MARDEGAN, C. **Capítulo VIII: Proteção de motores**. Revista O Setor Elétrico. p. 28-37, ago.2010.
- [18] MORAIS, M. F. **Avaliação da Proteção de Interconexão entre Concessionária e Sistema de Cogeração Utilizando o RTDS**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), MG, 2014.
- [19] MOZINA, C. J. **Power System Blackouts - Minimizing Their Impact on Industrial Co-Generation Facilities**. IEEE, Conference Record of 2007 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2007.
- [20] MOZINA, C.J.; REICHARD, M.; BUKHALA, Z.; CONRAD, S.; CRAWLEY, T.; GARDELL, J.; HAMILTON, R.; HASENWINKLE, I.; HERBST, D.; HENRIKSEN, L.; JOHNSON, G.; KERRIGAN, P.; KHAN, S.; KOBET, G.;

- KUMAR, P.; PATEL, S.; NELSON, B.; SEVCIK, D.; THOMPSON, M.; UCHIYAMA, J.; USMAN, S.; WAUDBY, P.; YALLA, M. **Coordination of Generator Protection with Generator Excitation Control and Generator Capability**. IEEE/IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2008.
- [21] MOZINA, C. J. **Protection of Utility-Refinery Interconnection**. IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2014.
- [22] NOCON, A.; PASZEK, S. **Transient States and Island Mode Operation of Industrial Electricity Networks**. IEEE, 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), 2016.
- [23] OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3. ed. LTC Editora, 2000.
- [24] ONS. **DPL-REL-0064/2019 Relatório Anual de Acompanhamento do Esquema Regional de Alívio de Carga – ERAC: Leituras de 2018**. Rio de Janeiro, 2019.
- [25] ONS. **DPL-REL-0066/2020 Relatório Anual de Acompanhamento do Esquema Regional de Alívio de Carga – ERAC: Leituras de 2019**. Rio de Janeiro, 2020.
- [26] ONS. **Procedimentos de Rede: Módulo 9 – Submódulo 9.7 - Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica**. Revisão dez, 2020.
- [27] RAJAMANI, K.; HAMPARDE, U. K. **Islanding and Load Shedding Schemes for Captive Power Plants**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, issue 3, 1999.
- [28] ROHATGI, A. **WebPlotDigitizer**: Version 4.4, Pacifica, California, USA. Nov. 2020. Disponível em: <<https://automeris.io/WebPlotDigitizer>>. Acesso em: 27 fev. 2021.
- [29] SCHIEFEN M.; SCHAUERMAN, G.; ADAMIAK, M.;CABLE, B. **Design & Implementation of an Industrial Facility Islanding and Load Shed System**. IEEE, 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2006.

- [30] SEL – Schweitzer Engineering Laboratories. **SEL-751 Feeder Protection Relay - Instruction Manual**. Date Code 20210104. 2021.
- [31] SIQUEIRA, M. C. **Desempenho Da Proteção de Distância sob Diferentes Formas de Polarização**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), RJ, 2007.
- [32] SCUTARIU, M.; MACDONALD, M. **Industrial Power System Protection against Transmission System Blackouts**. IEEE, 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009.
- [33] VIEIRA JR, J. C. M.; FREITAS, W.; FRANÇA, A. L. M. **Análise comparativa sobre a eficácia de relés baseados em medidas de frequência para detecção de ilhamento de geradores distribuídos**. SBA Controle & Automação, v.16, n. 2, p. 251-261, abr./jun. 2005.
- [34] VIEIRA, J. C. M.; FREITAS, W.; HUANG, Z; XU, W.; MORELATO, A. **Formulas for predicting the dynamic performance of ROCOF relays for embedded generation applications**. IET Proceedings - Generation Transmission and Distribution, v.153, n.4, jul. 2006.
- [35] VIEIRA, J. C. M.; FREITAS, W.; SALLES, D.; FRANÇA, A. L. M. **Um Método Prático para a Definição dos Ajustes de Relés Baseados em Medidas de Frequência Usados para Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída**. SBA Controle & Automação, v.19, n. 2, p. 199-213, abr./jun. 2008.
- [36] VASCONCELOS, F.; GRINBAUM, R. Empresas de produtos químicos foram as mais prejudicadas. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 13 Mar. 1999. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/fsp/especial/fj13039918.htm>>. Acesso em: 19 set. 2021.

ANEXOS

ANEXO I – Graficos das Atuações

A seguir são apresentadas graficamente todas as atuações de proteção que ocorreram, nos cenários das tabelas 25 e 28. Apenas os casos em que houve atuação de uma ou mais proteções são apresentados. Na ausência de atuação, os gráficos são os mesmos vistos anteriormente, itens 4.5 a 4.9.

Gráficos: Ajustes Propostos – Perturbação Real

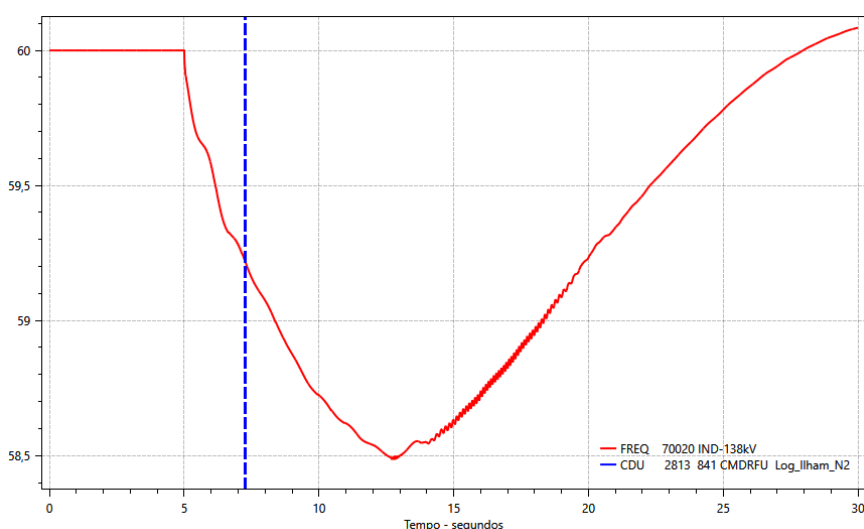


Figura 58: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBFREQ., item 4.5.1, caso “Perturbação Real SIN Elos Xingu-Estreito”. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $8IRF_U$ em 2,26 s (curva azul).

Gráficos: Ajustes Propostos – Colapso de Frequência

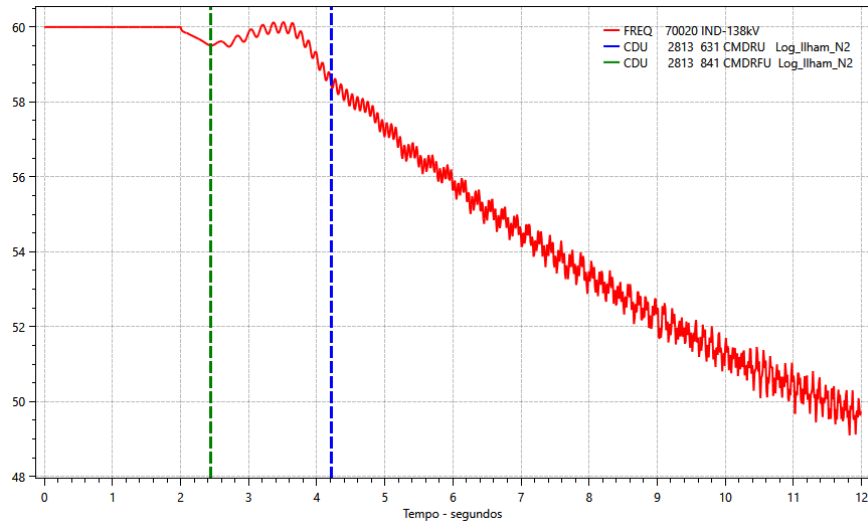


Figura 59: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBFREQ. / SUBTENSÃO, item 4.5.3, Colapso de Frequência, Caso 1. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $8IRF_U$ em 0,42 s (curva verde). Em seguida atuou função $8IR_U$ em 2,21 s (curva azul).

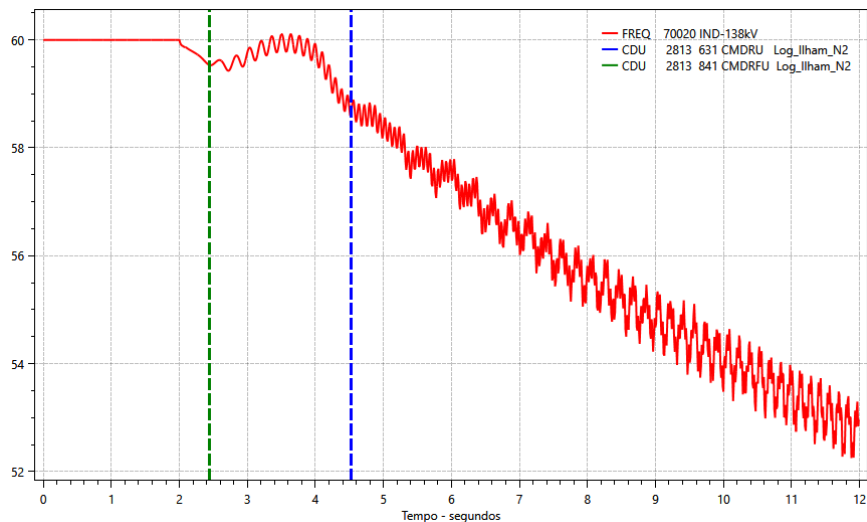


Figura 60: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBFREQ. / SUBTENSÃO, item 4.5.3, Colapso de Frequência, Caso 2. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $8IRF_U$ em 0,44 s (curva verde). Em seguida atuou função $8IR_U$ em 2,52 s (curva azul).

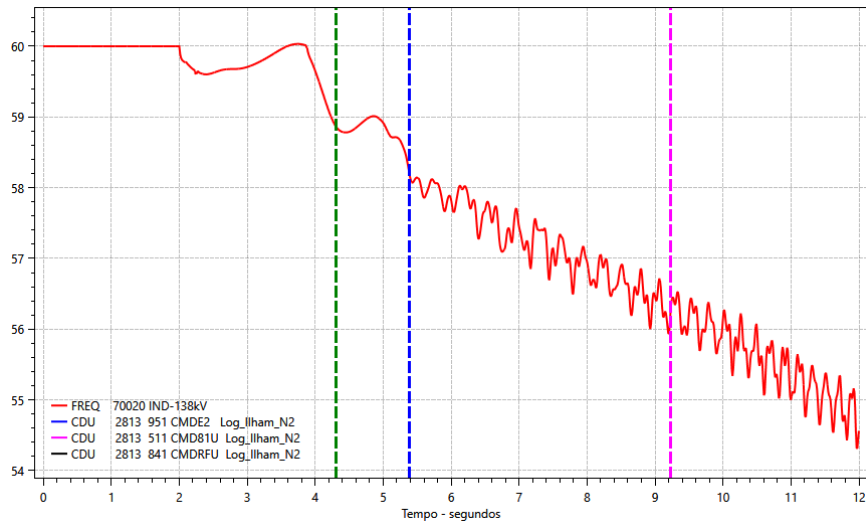


Figura 61: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBFREQ. / SUBTENSÃO, item 4.5.3, Colapso de Frequência, Caso 3. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $8IRF_U$ em 2,3 s (curva verde). Em seguida atuaram: esquema $32P/8IU$ em 3,37 s (curva azul), e função $8IU$ em 7,21 s (curva rosa).

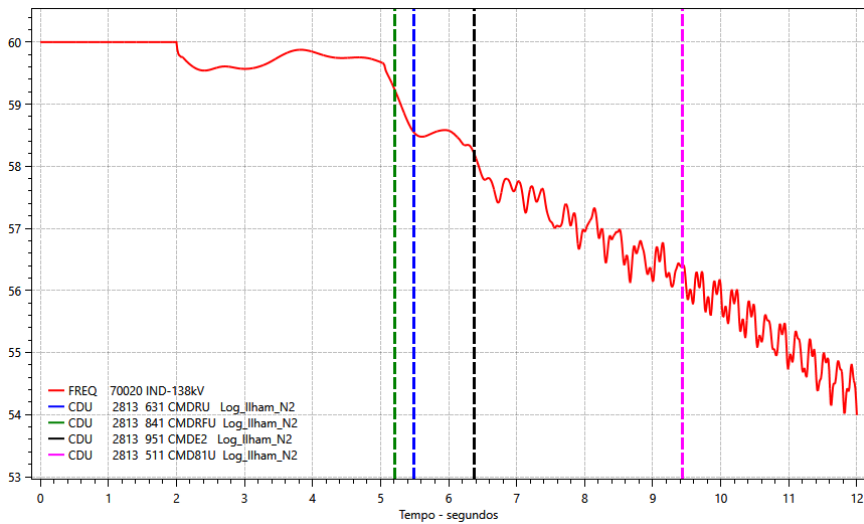


Figura 62: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBFREQ. / SUBTENSÃO, item 4.5.3, Colapso de Frequência, Caso 4. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $8IRF_U$ em 3,21 s (curva verde). Em seguida atuaram: proteção $8IR_U$ em 3,5 s (curva azul), esquema $32P/8IU$ em 4,37 s (curva azul), e função $8IU$ em 7,43 s (curva rosa).

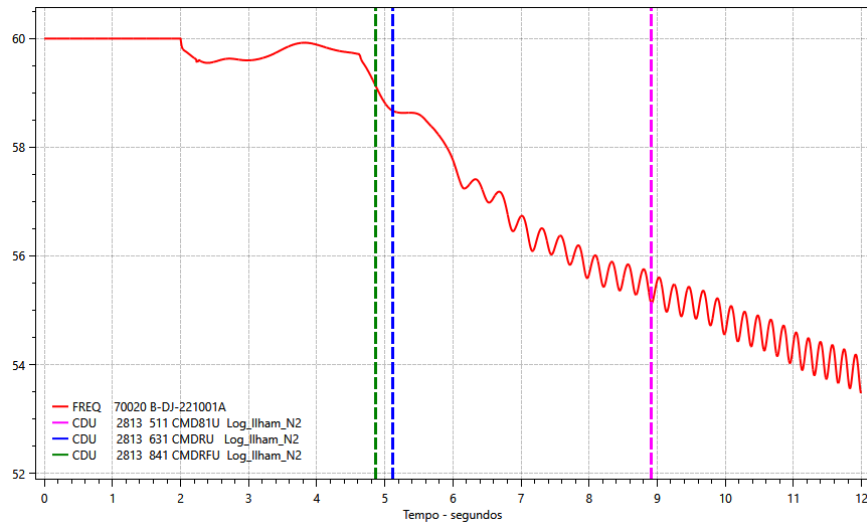


Figura 63: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBFREQ. / SUBTENSÃO, item 4.5.3, Colapso de Frequência, Caso 5. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função 81RF_U em 2,86 s (curva verde). Em seguida atuaram: proteção 81R_U em 3,11 s (curva azul), e função 81U em 6,9 s (curva rosa);

Gráficos: Ajustes Propostos – Abertura LT UTE-SIN

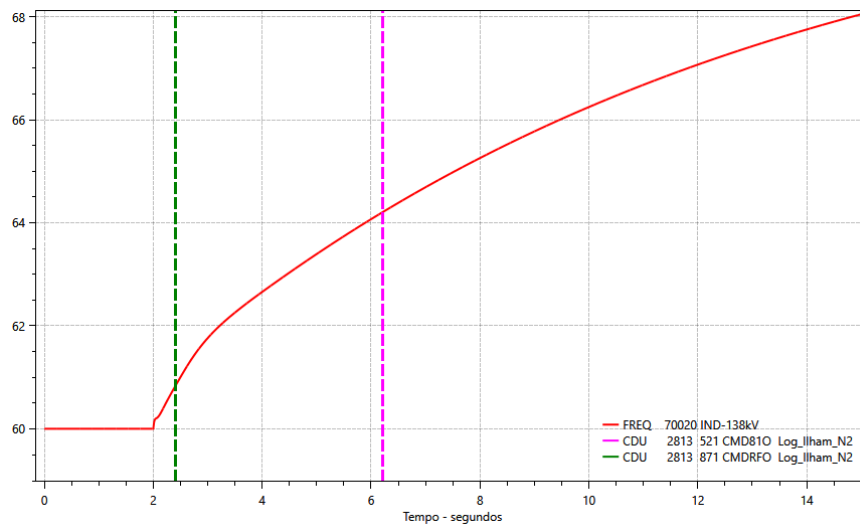


Figura 64: Resultado gráfico da simulação do cenário SOBREFREQ, item 4.6.2, Abertura da Interconexão UTE-SIN, Caso “sem RV/Otimista”. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $81RF_O$ em $0,41\text{ s}$ (curva verde). Em seguida atuou o função 81_U em $4,21\text{ s}$ (curva rosa).

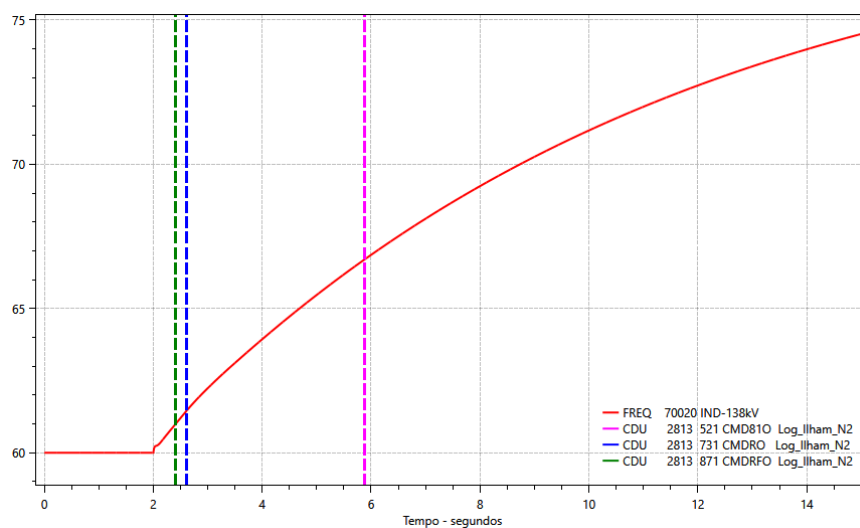


Figura 65: Resultado gráfico da simulação do cenário SOBREFREQ, item 4.6.2, Abertura da Interconexão UTE-SIN, Caso “sem RV/Intermediário”. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $81RF_O$ em $0,41\text{ s}$ (curva verde). Em seguida atuaram: função $81R_O$ em $0,61\text{ s}$ (curva azul), e função 81_U em $3,87\text{ s}$ (curva rosa).

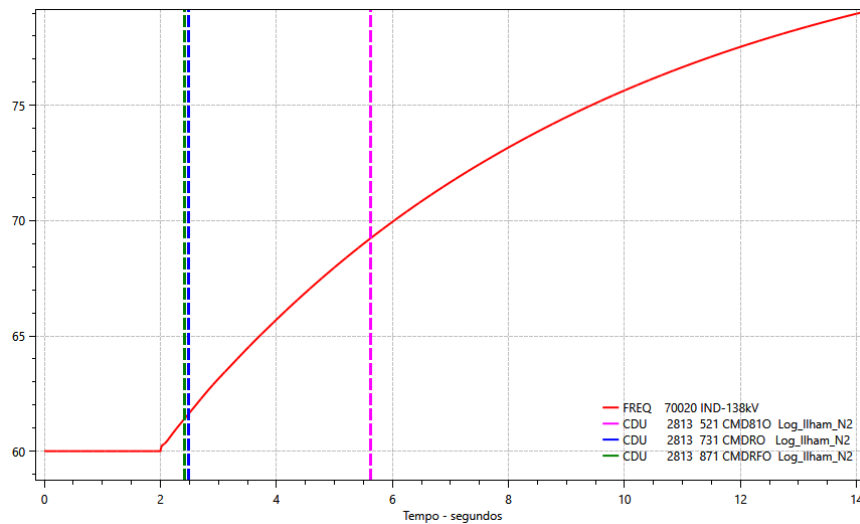


Figura 66: Resultado gráfico da simulação do cenário SOBREFREQ, item 4.6.2, Abertura da Interconexão UTE-SIN, Caso “sem RV/Pessimista”. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função δIRF_O em 0,41 s (curva verde). Em seguida atuaram: função δIR_O em 0,48 s (curva azul), e função δI_U em 3,61 s (curva rosa).

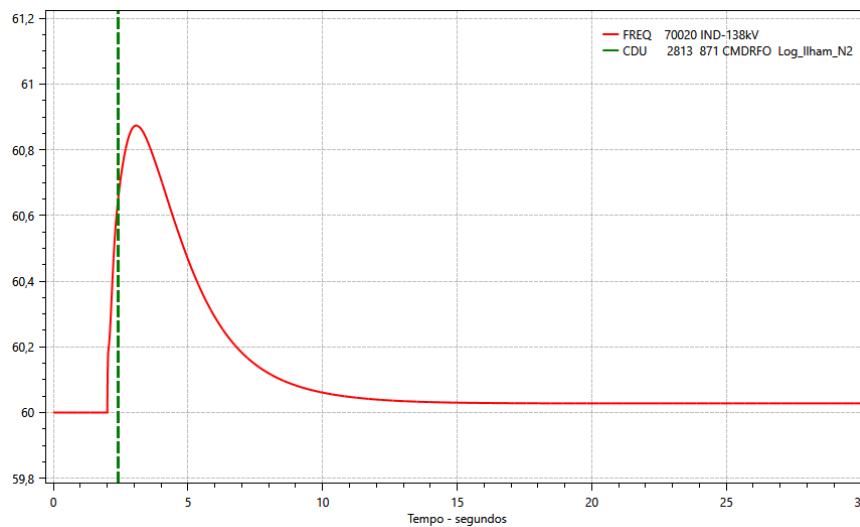


Figura 67: Resultado gráfico da simulação do cenário SOBREFREQ, item 4.6.2, Abertura da Interconexão UTE-SIN, Caso “com Regulador de Velocidade / ajuste-B / Otimista”. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função δIRF_O em 0,41 s (curva verde).

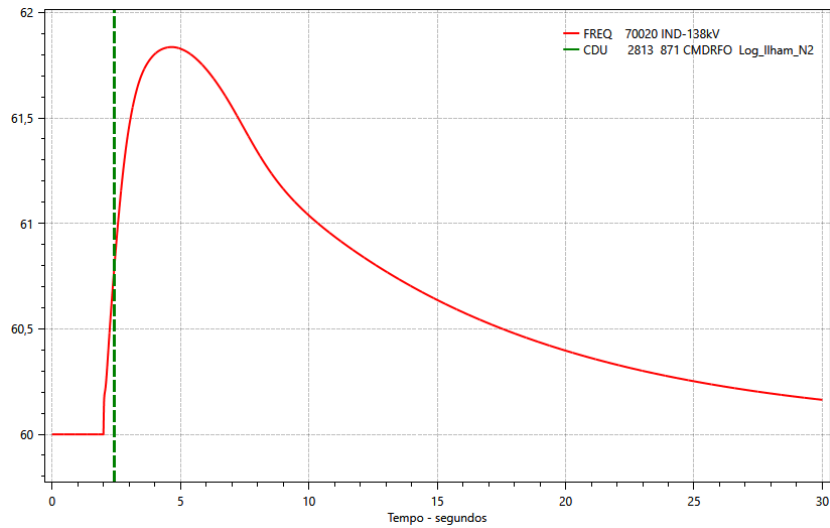


Figura 68: Resultado gráfico da simulação do cenário SOBREFREQ, item 4.6.2, Abertura da Interconexão UTE-SIN, Caso “com Regulador de Velocidade / ajuste-C / Otimista”. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $81RF_O$ em 0,41 s (curva verde).

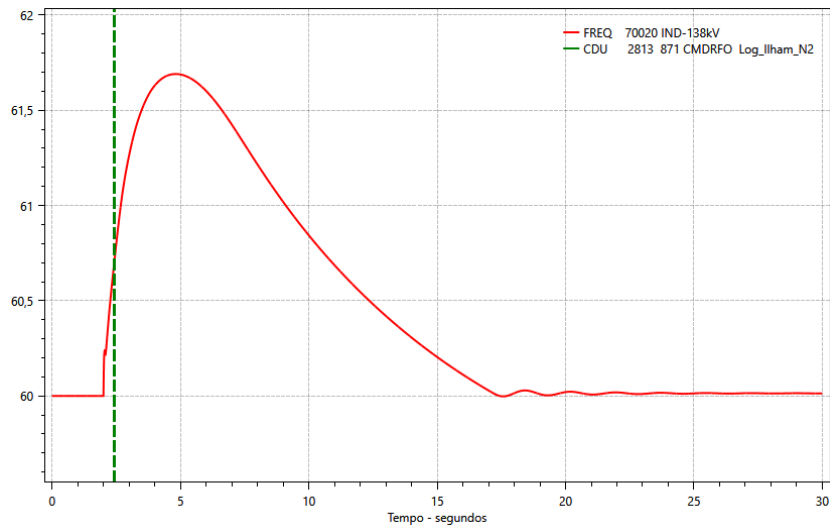


Figura 69: Resultado gráfico da simulação do cenário SOBREFREQ, item 4.6.2, Abertura da Interconexão UTE-SIN, Caso “com Regulador de Velocidade / ajuste-C / Intermediário”. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $81RF_O$ em 0,41 s (curva verde).

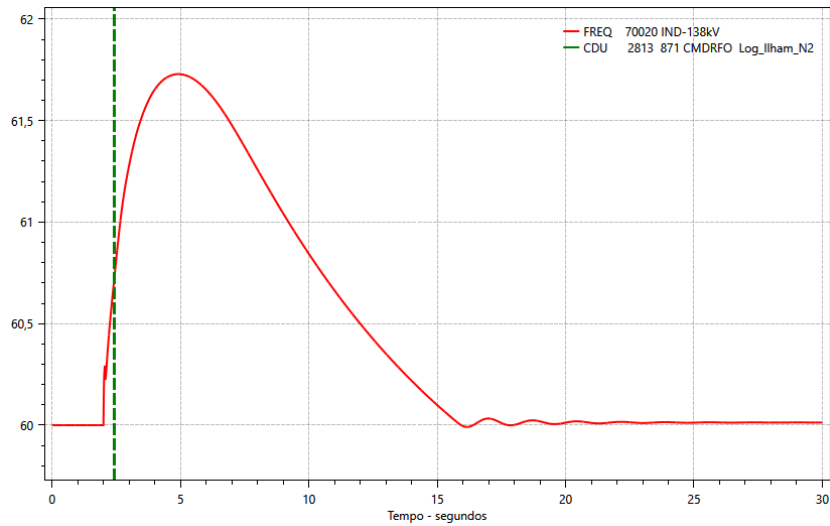


Figura 70: Resultado gráfico da simulação do cenário SOBREFREQ, item 4.6.2, Abertura da Interconexão UTE-SIN, Caso “com Regulador de Velocidade / ajuste-C / Pessimista”. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $8IRF_O$ em 0,41 s (curva verde).

Gráficos: Ajustes Propostos – Colapso de Tensão

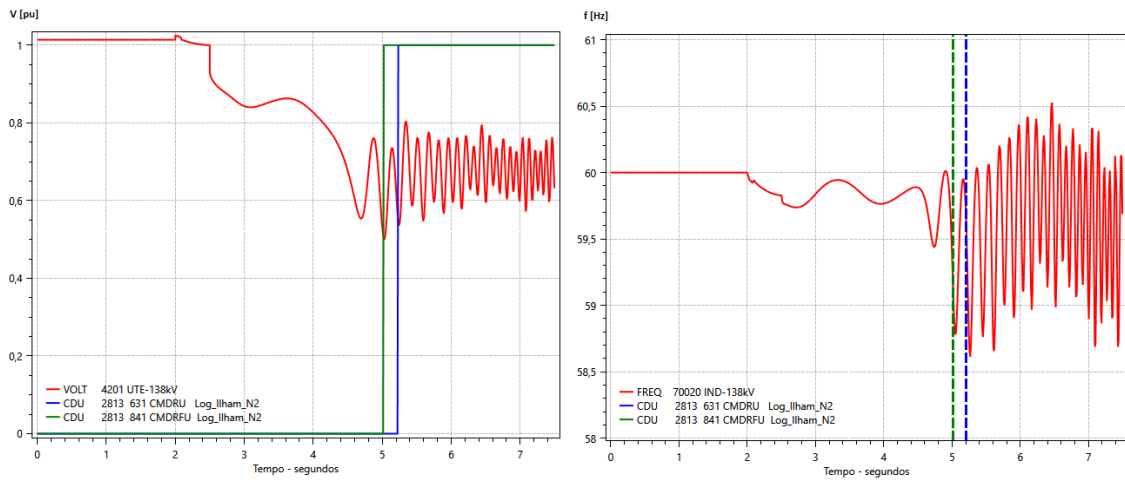


Figura 71: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBTENSÃO, item 4.7.4, Colapso de Tensão, Caso 1. Tensão na UTE, à esquerda, e Frequência na indústria, à direita (curvas vermelhas). Ilhamento pela função $81RF_U$ em 3,01 s (curva verde). Em seguida atuou função $81R_U$ em 3,22 s (curva azul).

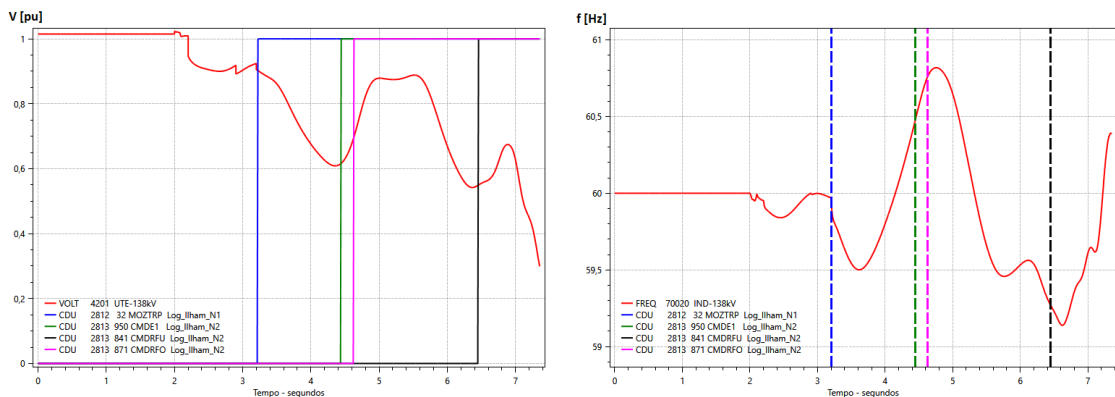


Figura 72: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBTENSÃO, item 4.7.4, Colapso de Tensão, Caso 2. Tensão na UTE, à esquerda, e Frequência na indústria, à direita (curvas vermelhas). Ilhamento pelo esquema *Nível 1* em 1,21 s (curva azul). Em seguida atuaram: esquema 67/27 em 2,43 s (curva verde), função $81RF_O$ em 2,62 s (curva rosa), e função $81RF_U$ em 4,45 s (curva preta).

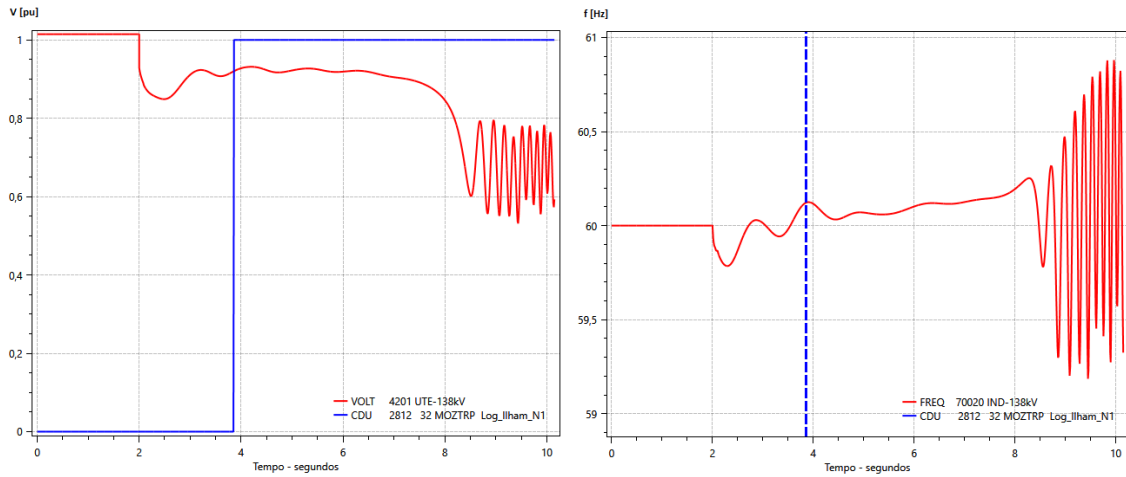


Figura 73: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBTENSÃO, item 4.7.4, Colapso de Tensão, Caso 3. Tensão na UTE, à esquerda, e Frequência na indústria, à direita (curvas vermelhas). Ilhamento pelo esquema *Nível 1* em 1,85 s (curva azul).

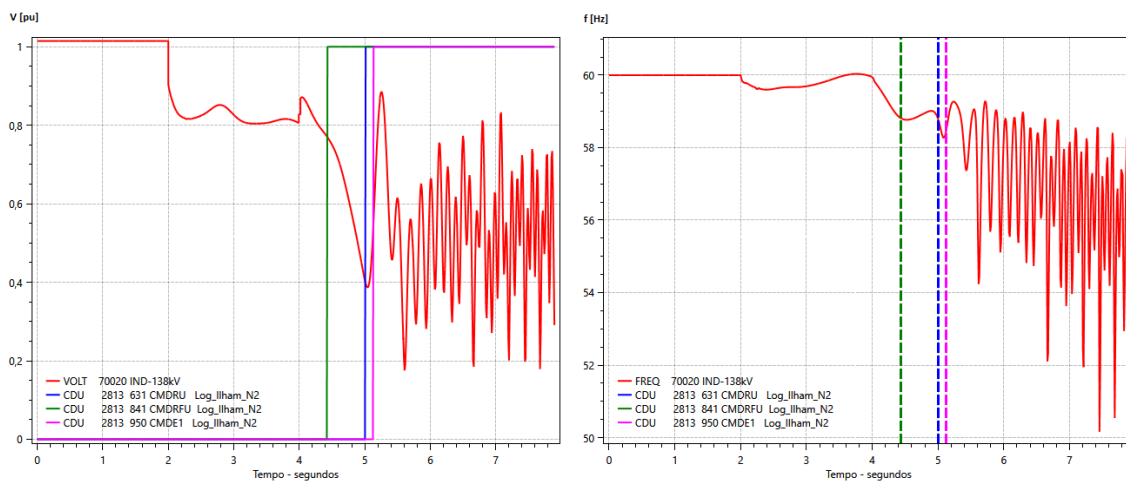


Figura 74: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBTENSÃO, item 4.7.4, Colapso de Tensão, Caso 5. Tensão na UTE, à esquerda, e Frequência na indústria, à direita (curvas vermelhas). Ilhamento pela função *8IRF_U* em 2,42 s (curva verde). Em seguida atuaram: função *8IRF_U* em 2,99 s (curva azul), e esquema *67/27* em 3,12 s (curva rosa).

Gráficos: Ajustes Modificados – Colapso de Frequência

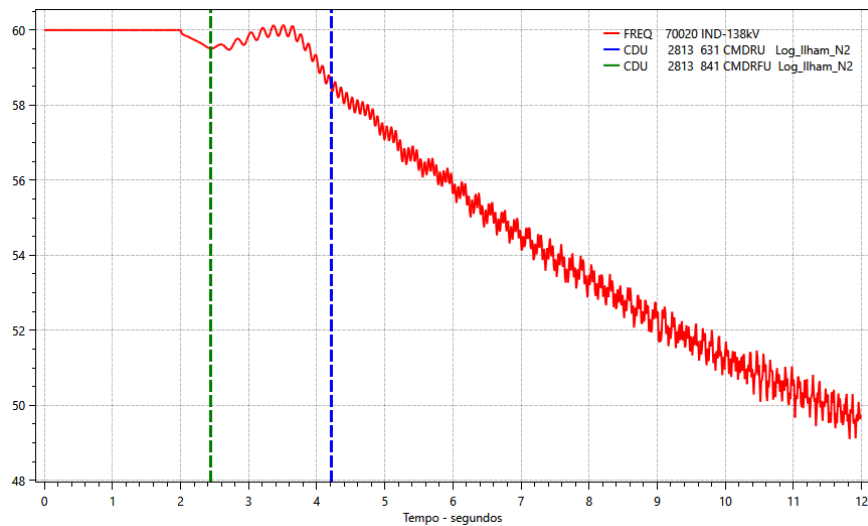


Figura 75: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBFREQ. / SUBTENSÃO, item 4.5.3, Colapso de Frequência, Caso 1. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $8IRF_U$ em 0,42 s (curva verde). Em seguida atuou função $8IR_U$ em 2,21 s (curva azul),

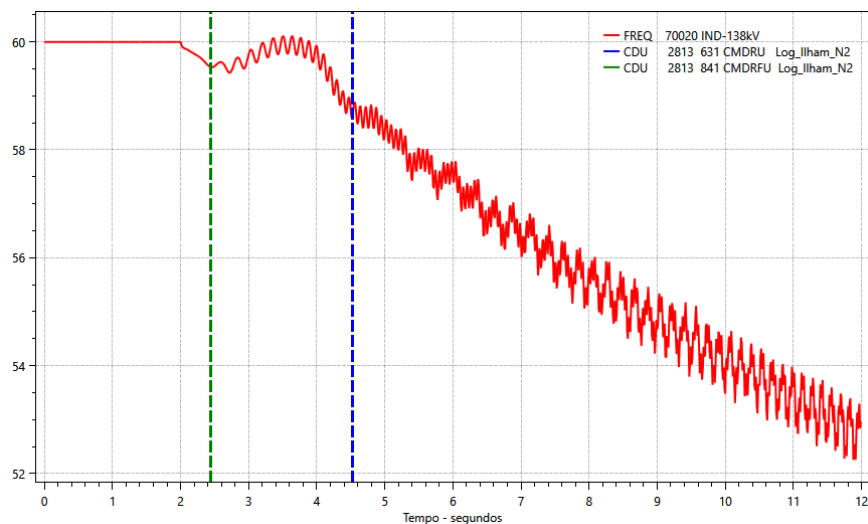


Figura 76: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBFREQ. / SUBTENSÃO, item 4.5.3, Colapso de Frequência, Caso 2. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $8IRF_U$ em 0,44 s (curva verde). Em seguida atuou função $8IR_U$ em 2,52 s (curva azul).

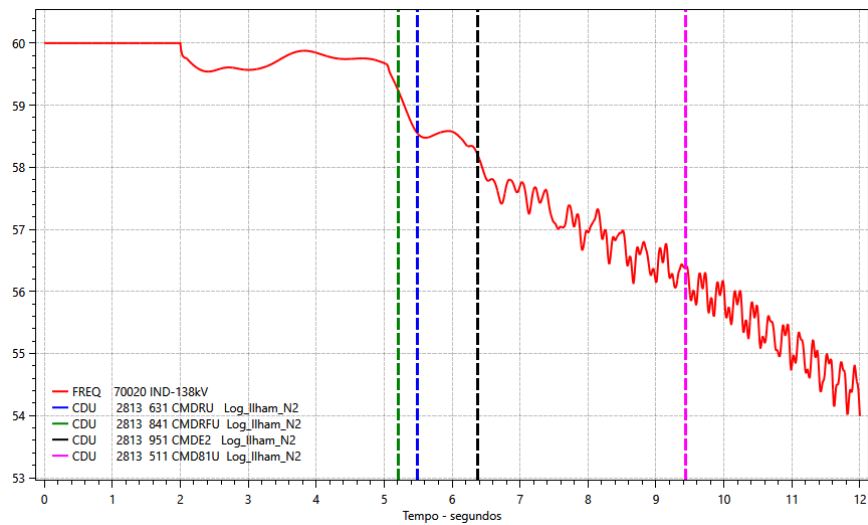


Figura 77: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBFREQ. / SUBTENSÃO, item 4.5.3, Colapso de Frequência, Caso 4. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $8IRF_U$ em 3,21 s (curva verde). Em seguida atuaram: função $8IR_U$ em 3,5 s (curva azul), esquema $32P/81U$ em 4,37 s (curva azul), e função $8IU$ em 7,43 s (curva rosa);

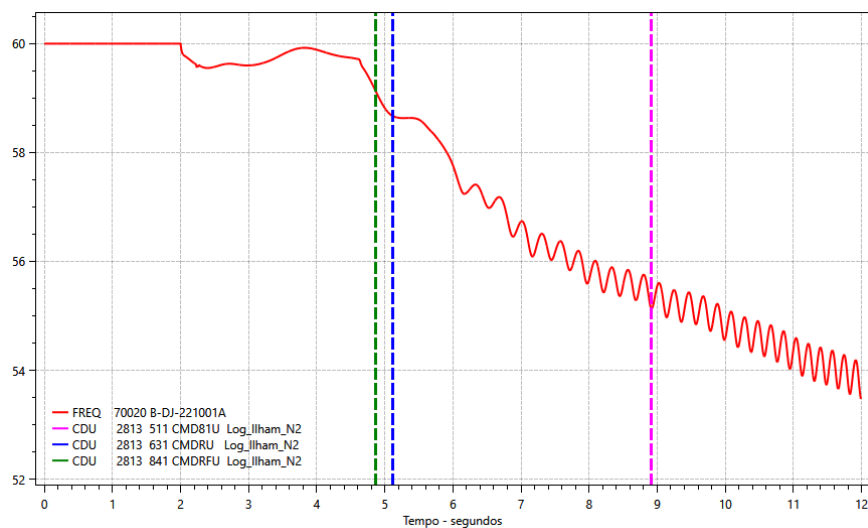


Figura 78: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBFREQ. / SUBTENSÃO, item 4.5.3, Colapso de Frequência, Caso 5. Frequência [Hz] na indústria (curva vermelha). Ilhamento pela função $8IRF_U$ em 2,86 s (curva verde). Em seguida atuaram: função $81R_U$ em 3,11 s (curva azul), e função $8IU$ em 6,9 s (curva rosa);

Gráficos: Ajustes Modificados – Colapso de Tensão

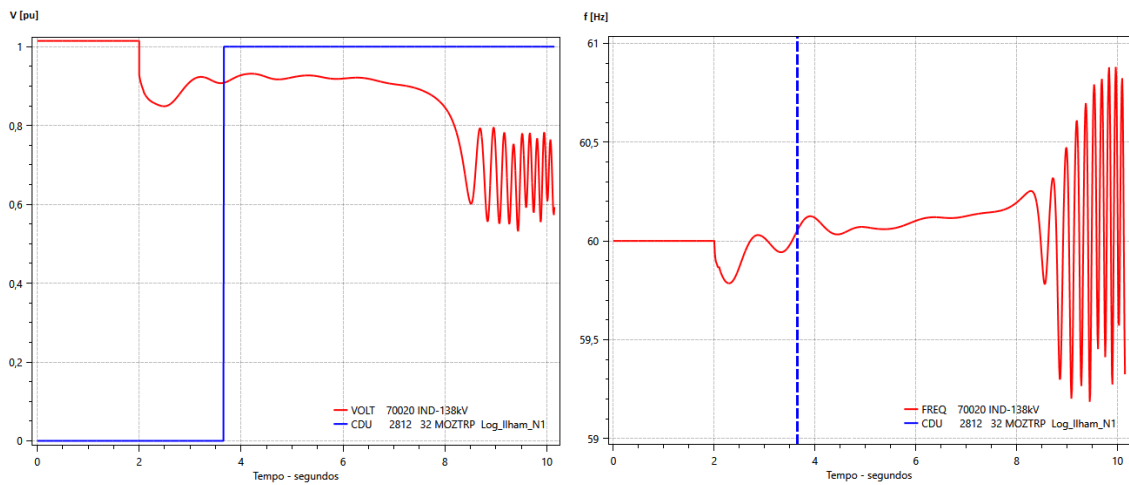


Figura 79: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBTENSÃO, item 4.7.4, Colapso de Tensão, Caso 3. Tensão na UTE, à esquerda, e Frequência na indústria, à direita (curvas vermelhas). Ilhamento pelo esquema *Nível 1* em 1,65 s (curva azul).

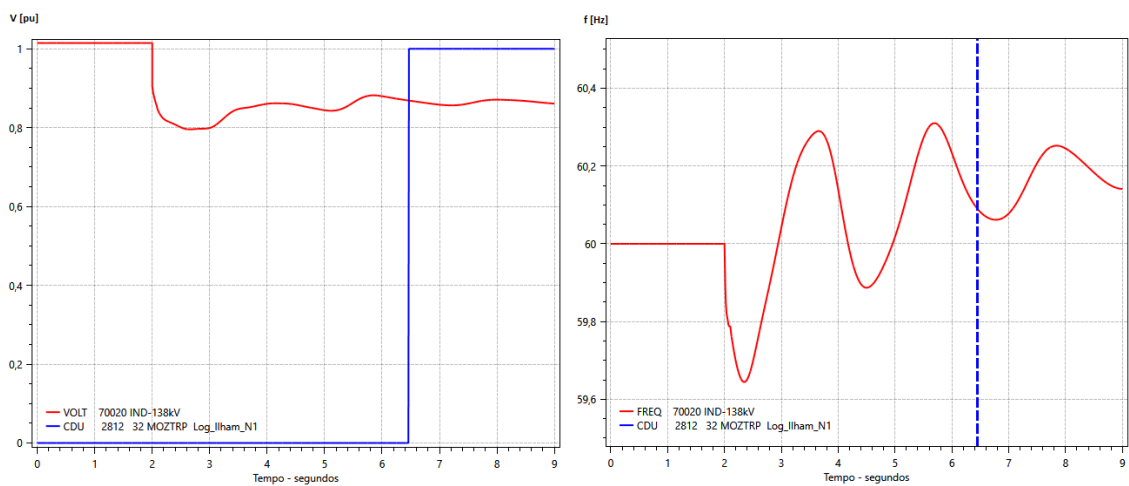


Figura 80: Resultado gráfico da simulação do cenário SUBTENSÃO, item 4.7.4, Colapso de Tensão, Caso 4. Tensão na UTE, à esquerda, e Frequência na indústria, à direita (curvas vermelhas). Ilhamento pelo esquema *Nível 1* em 4,46 s (curva azul).

ANEXO II – Códigos no ANATEM

Código CDU (ANATEM): Esquema de Proteção de Ilhamento Nível 1

```
DCDU
(=====
(ncdu) ( nome cdu )
2812 Log_Ilham_N1
(-----
(EFPAR (nome) ( valor )
defpar #Loc14 14 (** Localização da TENSÃO de referência **)
defpar #Loc15 15 (** Localização de destino para o TRIP **)

DEFPAR #pu27 .94 (***** 27 Tensão de pick-up [pu] *****)
DEFPAR #pu27B .79 (***** 27_Bloqueio Tensão de pick-up [pu] *****)
DEFPAR #dlyMZ 1. (***** 27 Delay [s] *****)

DEFPAR #Tdo 50. (Temporização de Drop-Out para todos os trips [s].)
DEFPAR #MEIO .5 (#MEIO = variável auxiliar, valor 0.5)

(-----
0001 import VOLT voltBu #Loc14
0002 ENTRAD pu27
0003 ENTRAD pu27B
(== FUNÇÃO 27 ==
(nb)i(tipo)(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
0011 COMPAR .LE. voltBu Cmd27 (Cmd27: tensão ficou menor que o nível de pick-up 27.
pu27 Cmd27

(== FUNÇÃO 27 de BLOQUEIO ==
(nb)i(tipo)(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
0021 COMPAR .LE. voltBu Bloq27 (Bloq27: tensão ficou menor que o nível de pick-up 27_Bloqueio.
pu27B Bloq27

(===== ESQUEMA ILHAMENTO MOZINA =====
(nb)i(tipo)(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
0030 LOGIC .NOT. Bloq27 Not27B
0031 LOGIC .AND. Cmd27 CmdMOZ
Not27B CmdMOZ
0032 DISMAX CmdMOZ MOZtrp #MEIO#dlyMZ#Tdo

0039 saida MOZtrp
(===== Lógica para abertura do circuito =====
(nb)i(tipo)o(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
(0040 LOGIC .NOT. MOZtrp Commd
(0041 IMPORT STCIRC SLIN #Loc15
(0042 LOGIC .AND. SLIN EstL
( Commd EstL
(0043 EXPORT STLIND EstL #Loc15
(
(-----
(nb)i(tipo)o(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
defval pu27 #pu27
defval pu27B #pu27B
(
FIMCDU
(
999999
(
FIM
```

Código CDU (ANATEM): Esquema de Proteção de Ilhamento Nível 2

```

DCDU
(-----)
(ncdu) ( nome cdu )
2813 Log_Ilham_N2
(-----)
(EFPAR (nome) ( valor )
( --- Para monitorar FREQUÊNCIA
defpar #fhz 60
defpar #w0 376.99111843077515
defpar #PFFB 0.02
defpar #Loc01 1 (***) Localização da TENSÃO de referência (***)
defpar #Loc02 2 (***) Localização da CORRENTE de referência (***)
defpar #LocTR 2 (***) Localização de destino para o TRIP (***)

(--- Para função 27, do Esquema "27 AND 67"
DEFPAR #pu27e .7 (***** 27 Tensão de pick-up [pu] *****)
DEFPAR #d27e 0.5 (***** 27 Delay [s] *****)
(--- Para função 27
DEFPAR #pu27 .6 (***** 27 Tensão de pick-up [pu] *****)
DEFPAR #dly27 4.5 (***** 27 Delay [s] *****)
(--- Para função 32_P
DEFPAR #pu32P 5. (***** 32_P Potência Ativa Reversa - pick-up [MW] *****)
DEFPAR #dy32P .5 (***** 32_P Delay [s] *****)
(--- Para função 32_Q
DEFPAR #pu32Q 5. (***** 32_Q Potência Reativa Reversa - pick-up [Mvar] *****)
DEFPAR #dy32Q 0.1 (***** 32_Q Delay [s] *****)
(--- Para função 51
DEFPAR #pu51 6. (***** 51 Corrente de pick-up [pu] *****)
DEFPAR #dly51 50. (***** 51 Delay [s] *****)
(--- Para função 59, do Esquema "32Q AND 59"
DEFPAR #pu59e 1.02 (***** 59 Tensão de pick-up [pu] *****)
DEFPAR #d59e 50. (***** 59 Delay [s] *****)
(--- Para função 59
DEFPAR #pu59 1.1 (***** 59 Tensão de pick-up [pu] *****)
DEFPAR #dly59 1. (***** 59 Delay [s] *****)
(--- Para função 67
DEFPAR #pu67 1.1 (***** 67 Corrente de pick-up [pu] *****)
DEFPAR #dly67 0. (***** 67 Delay [s] *****)
(--- Para função 81U, do Esquema "32P AND 81U"
DEFPAR #pu81e 58.2 (***** 81U Frequência de pick-up [Hz] *****)
DEFPAR #d81e 0. (***** 81U delay [s] *****)
(--- Para função 81U
DEFPAR #pu81U 58. (***** 81U Frequência de pick-up [Hz] *****)
DEFPAR #d81U 3. (***** 81U delay [s] *****)
(--- Para função 81O
DEFPAR #pu81O 62. (***** 81O Frequência de pick-up [Hz] *****)
DEFPAR #d81O 3. (***** 81O delay [s] *****)
(--- Para função 81R_U
DEFPAR #d81Ru 0.2 (***** 81R_U Delay mínimo para o trip [s], não depende do tempo de
corte *****)
(--- Para função 81R_O
DEFPAR #d81Ro 0.2
(--- Para função 81RF
DEFPAR #Xofst 0.1 (off-set EIXO-X: banda morta do SEL751: 0.1Hz
DEFPAR #d81RF 0.2 (t pickup: 100ms - mínimo do SEL751
DEFPAR #Tpers 0.001 (t dropout

DEFPAR #Tdo 50. (Temporização de Drop-Out para todos os trips [s].
DEFPAR #MEIO .5 (#MEIO = variável auxiliar, valor 0.5

(-----)
(
101 ENTRAD rd2dg
102 ENTRAD Sbase
103 ENTRAD ang67
104 ENTRAD dg90

```

```

105 ENTRAD      dir67
106 ENTRAD      pu67
107 ENTRAD      dir32P
108 ENTRAD      dir32Q
120 ENTRAD      pu81Ru
121 ENTRAD      pufsu
122 ENTRAD      pufcu
130 ENTRAD      pu81Ro
131 ENTRAD      pufso
132 ENTRAD      pufco
140 ENTRAD      Xset
141 ENTRAD      Yset
142 ENTRAD      Yofst
143 ENTRAD      fnom
144 ENTRAD      INF
145 ENTRAD      ZERO
150 IMPORT TEMPO  t
(
(===== MONITORAÇÃO DE GRANDEZAS =====)
(
(-- FREQUÊNCIA --
(
(nb)i(tipo)o(stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
1  import freq      freqpu #Loc01
2  ganho      freqpu freq #fhz
3  saida      freq
(
10 import voltr      vr #Loc01
11 import volti      vi #Loc01
12 delay      vr vrz1
13 delay      vi viz1
(
( tan(b-a) = ( tg(b) - tg(a) ) / ( 1 + tg(b)tg(a)
(      = ( vrz1.vi - viz1.vr ) / ( vrz1.vr + viz1.vi )
(  b-a = atg( ( vrz1.vi - viz1.vr ) / ( vrz1.vr + viz1.vi ) )
(OBS:
(  b = v
(  a = vz^-1 = vz1
(  vr = real(v)
(  vi = imag(v)
14 multpl      vrz1 Vrz1Vi
      vi Vrz1Vi
15 multpl      vr Viz1Vr
      viz1 Viz1Vr
16 multpl      vr Vrz1Vr
      vrz1 Vrz1Vr
17 multpl      vi Viz1Vi
      viz1 Viz1Vi
18 soma      Vrz1Vi num
      -Viz1Vr num
19 soma      Vrz1Vr den
      Viz1Vi den
20 divsao      num tgbma
      den tgbma
9998 ratelm      tgbma tglim          Lmin Lmax
21 funcao atan      tglim dang
22 import dt      step
23 divsao      dang dadtx
      step dadtx
24 fracao      dadtx dfpu      1      #w0
25 funcao offset dfpu fpu      1
26 ord(1)      fpu ffilter      1 0.00      1 #PFFB
27 ganho      ffilter fHz      #fhz
28 saida      fHz

(-- COREENTE --
(
40 import ILINR      Ir #Loc02
41 import ILINI      Ii #Loc02
42 funcao X**2      Ir Ir2
43 funcao X**2      Ii Ii2
44 soma      Ir2 Isum2

```

```

        Ii2 Isum2
45 funcao SQRT Isum2 Imod          (Imod = sqrt (Ir^2 + Ii^2).
46 funcao atan2 Ii Iang           (Iang = atan (Ii/Ir); [rad].
        Ir Iang
47 multpl Iang IangD             (IangD = Iang [°].
        rd2dg IangD
48 import ILIN CurLin #Loc02

(-- TENSÃO --
(
50 funcao X**2 vr vr2
51 funcao X**2 vi vi2
52 soma vr2 vsum2
    vi2 vsum2
53 funcao SQRT vsum2 Vmod          (Vmod = sqrt (Vr^2 + Vi^2).
54 funcao atan2 vi Vang           (Vang = atan (Vi/Vr); [rad].
    vr Vang
55 multpl Vang VangD             (VangD = Vang [°].
    rd2dg VangD
56 import VOLT voltBu #Loc01

(-- IMPEDÂNCIA --
(
60 import RESI Rap #Loc02
61 import REAT Xap #Loc02
62 funcao X**2 Rap Rap2
63 funcao X**2 Xap Xap2
64 soma Rap2 Zsum2
    Xap2 Zsum2
65 funcao SQRT Zsum2 Zmod          (Vmod = sqrt (Vr^2 + Vi^2).
66 funcao atan2 Xap Zang          (Zang = atan (Xap/Rap); [rad]
    Rap Zang
67 multpl Zang ZangD             (ZangD = Zang [°]
    rd2dg ZangD

(-- POTÊNCIA --
(
(nb)i(tipo)o(stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
70 import FLXA P1 #Loc02
71 import FLXR Q1 #Loc02
72 multpl P1 PMW                  (PMW = P_ativa [MW].
    Sbase PMW
73 multpl Q1 QMvar                (QMvar = Q_reativa [Mvar].
    Sbase QMvar

(
(===== FUNÇÕES DE PROTEÇÃO =====
(

(=== FUNÇÃO 27e (Esquema "67/27") ===
(
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----)
0201 DISMIN voltBu Cmd27e #pu27e#d27e #Tdo

(=== FUNÇÃO 27 ===
(
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----)
0211 DISMIN voltBu Cmd27 #pu27 #dly27 #Tdo

(=== FUNÇÃO 32_P ===
(
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----)
0240 funcao INVRS fnom tciclo
0241 COMPAR .GE. t Tini
    tciclo Tini

0242 SELET2 ZERO Pval            (P_válido somente após o primeiro ciclo, para evitar erro de inicialização;
    PMW Pval
    Tini Pval
0243 FUNCAO MENOS Pval NGPval

```

```

0244 SELET2    Pval absP                (Se IN3<=0 então OUT=IN1. Se IN3>0 então OUT=IN2.
      NGPval absP
      dir32P absP
0251 DISMAX    absP  Cmd32P #pu32P#dy32P #Tdo

(=== FUNÇÃO 32_Q ===
(
(nb)i(tipo)(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
-----
0255 SELET2    ZERO  Qval                (Q_válido somente após o primeiro ciclo, para evitar erro de inicialização;
      QMvar Qval
      Tini Qval
0256 FUNCAO MENOS Qval NGQval
0257 SELET2    Qval absQ                (Se IN3<=0 então OUT=IN1. Se IN3>0 então OUT=IN2.
      NGQval absQ
      dir32Q absQ
0261 DISMAX    absQ  Cmd32Q #pu32Q#dy32Q #Tdo

(=== FUNÇÃO 51 ===
(
(nb)i(tipo)(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
-----
0271 DISMAX    CurLin Cmd51 #pu51 #dly51 #Tdo

(=== FUNÇÃO 59e (Esquema "32Q/597") ===
(
(nb)i(tipo)(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
-----
0301 DISMAX    voltBu Cmd59e #pu59e #d59e #Tdo

(=== FUNÇÃO 59 ===
(
(nb)i(tipo)(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
-----
0311 DISMAX    voltBu Cmd59 #pu59 #dly59 #Tdo

(=== FUNÇÃO 67 ===
(--- Pelo fasor da IMPEDÂNCIA aparente do circuito, vista do terminal especificado.
(
(nb)i(tipo)o(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
400 soma      dg90 Ls67                (Ls67 = 90° + ângulo do elemento direcional. Limite superior do 67;
      ang67 Ls67
401 soma      dg90 Li67                (Li67 = 90° - ângulo do elemento direcional. Limite inferior do 67;
      -ang67 Li67
402 FUNCAO MENOS ZangD NGaZD
403 SELET2    ZangD absZD                (Se IN3<=0 então OUT=IN1. Se IN3>0 então OUT=IN2. Desconsidera
"dt" negativo;
      NGaZD absZD
      dir67 absZD
404 COMPAR .GE. absZD cd67a
      Li67 cd67a
405 COMPAR .LE. absZD cd67b
      Ls67 cd67b
406 LOGIC .AND. cd67a reg67                (reg67 = ângulo está entre Li e Ls, ou seja, na região de atuação do 67;
      cd67b reg67
407 COMPAR .GE. Imod Ipckp                (Ipckp: corrente excedeu nível de pick-up.
      pu67 Ipckp
408 LOGIC .AND. Ipckp lib67                (lib67 = libera contagem de tempo para 67: I_pick-up e na região direcional
programada;
      reg67 lib67
411 DISMAX    lib67 Cmd67 #MEIO #dly67#Tdo

(=== FUNÇÃO 81Ue (Esquema "32P/81U")===
(
(nb)i(tipo)o(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
501 DISMIN    fHz  Cmd81e #pu81e #d81e #Tdo

(=== FUNÇÃO 81U ===
(
(nb)i(tipo)o(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)
511 DISMIN    fHz  Cmd81U #pu81U #d81U #Tdo

(nb)i(tipo)o(stip)s(vent)(vsai)(p1)(p2)(p3)(p4)(vmin)(vmax)

```

521 DISMAX fHz Cmd81O #pu81O #d81O #Tdo

(=== FUNÇÃO 81R_U ===
 (
 (nb)i(tipo)o(stip)s(vent) (vsai) (p1)(p2)(p3)(p4) (vmin) (vmax)
 610 COMPAR .LE. fHz LsRu
 pufsu LsRu
 611 COMPAR .LE. fHz LcfRu
 pufcu LcfRu
 612 S/HOLD fHz splFSu (splFSu = amostra frequência de supervisão para 81R_U.
 LsRu splFSu
 613 S/HOLD t splTSu (splTSu = amostra tempo de supervisão para 81R_U.
 LsRu splTSu
 614 S/HOLD fHz splFCu (splFCu = amostra frequência de corte para 81R_U.
 LcfRu splFCu
 615 S/HOLD t splTCu (splTCu = amostra tempo de corte para 81R_U.
 LcfRu splTCu
 620 SOMA -splFCu Ftotu (Ftotu = delta_f para 81R_U.
 splFSu Ftotu
 621 SOMA splTCu Ttotu (Ttotu = delta_t para 81R_U.
 -splTSu Ttotu
 622 FUNCAO SINAL Ttotu Ttot0u (corrige sinal negativo devido inicialização.
 623 SELET2 INF Tfunu (Se IN3<=0 então OUT=IN1. Se IN3>0 então OUT=IN2. Desconsidera
 "dt" negativo
 Ttotu Tfunu
 Ttot0u Tfunu
 624 DIVSAO Ftotu dfdtu (dfdtu = df/dt para 81R_U.
 Tfunu dfdtu
 625 COMPAR .GE. dfdtu dftONu
 pu81Ru dftONu
 626 DLAYON splTSu d81Ru #d81Ru (Delay mínimo para o trip 81R_U.
 627 LOGIC .AND. dftONu libRu
 d81Ru libRu
 631 DISMAX libRu CmdRu #MEIO #Tpers#Tdo
 (=== FUNÇÃO 81R_O ===
 (
 (nb)i(tipo)o(stip)s(vent) (vsai) (p1)(p2)(p3)(p4) (vmin) (vmax)
 710 COMPAR .GE. fHz LsRo
 pufso LsRo
 711 COMPAR .GE. fHz LcfRo
 pufco LcfRo
 712 S/HOLD fHz splFSO (splFSO = amostra frequência de supervisão para 81R_O.
 LsRo splFSO
 713 S/HOLD t splTSO (splTSO = amostra tempo de supervisão para 81R_O.
 LsRo splTSO
 714 S/HOLD fHz splFCO (splFCO = amostra frequência de corte para 81R_O.
 LcfRo splFCO
 715 S/HOLD t splTCO (splTCO = amostra tempo de corte para 81R_O.
 LcfRo splTCO
 720 SOMA splFCO Ftoto (Ftoto = delta_f para 81R_O.
 -splFSO Ftoto
 721 SOMA splTCO Ttoto (Ttoto = delta_t para 81R_O.
 -splTSO Ttoto
 722 FUNCAO SINAL Ttoto Ttot0o (corrige sinal negativo devido inicialização.
 723 SELET2 INF Tfuno (Se IN3<=0 então OUT=IN1. Se IN3>0 então OUT=IN2. Desconsidera
 "dt" negativo
 Ttoto Tfuno
 Ttot0o Tfuno
 724 DIVSAO Ftoto dfdto (dfdto = df/dt para 81R_O.
 Tfuno dfdto
 725 COMPAR .GE. dfdto dftONo
 pu81Ro dftONo
 726 DLAYON splTSO d81Ro #d81Ro (Delay mínimo para o trip 81R_U.
 727 LOGIC .AND. dftONo libRo
 d81Ro libRo
 731 DISMAX libRo CmdRo #MEIO #Tpers#Tdo
 (=== FUNÇÃO 81RF ===
 (
 (--- Geral 81RF
 (nb)i(tipo)o(stip)s(vent) (vsai) (p1)(p2)(p3)(p4) (vmin) (vmax)
 810 SOMA fHz fdif (fdif = desvio na frequência [Hz]
 -fnom fdif
 811 DIVSAO Yset slope (A = slope da curva = dfdt_setpoint / fdif_setpoint

Xset slope	
812 MULTPL -slope Ax	(Ax = - slope * fdif
fdif Ax	
(--- Especifico para 81RF_U	
815 SOMA Ax Yminu	(Ax+B
-Yset Yminu	
819 FUNCAO MENOS fdif NGdfid	(Inverte sinal de "fdif";
820 DISMAX NGdfid LsRFu #Xofst#d81RF#Tpers	(Limite de Supervisão = "fdif" ultrapassou #Xofst
durante #delay	
821 DLAYON LsRFu LcRFu #d81RF	(Limite de Corte = atraso #delay depois de LsRFu
822 S/HOLD fHz spFFSu	(Amostra frequência de supervisão
LsRFu spFFSu	
823 S/HOLD t spFTSu	(Amostra tempo de supervisão
LsRFu spFTSu	
824 S/HOLD fHz spFFCu	(Amostra frequência de corte
LcRFu spFFCu	
825 S/HOLD t spFTCu	(Amostra tempo de corte
LcRFu spFTCu	
826 SOMA spFFCu FtRFu	
-spFFSu FtRFu	
827 SOMA spFTCu TtRFu	
-spFTSu TtRFu	
828 FUNCAO SINAL TtRFu Tt0RFu	(Verifica sinal de "dt";
829 SELET2 INF TfnRFu	(Se IN3<=0 então OUT=IN1. Se IN3>0 então OUT=IN2.
Desconsidera "dt" negativo	
TtRFu TfnRFu	
Tt0RFu TfnRFu	
835 DIVSAO FtRFu dfdtFu	(dfdt [Hz/s]
TfnRFu dfdtFu	
836 FUNCAO MENOS Yofst NGYofs	
837 COMPAR .LE. dfdtFu cond1	(Condição 1: dfdt (negativo) está abaixo do off-set (negativo)
do relé (81FRP_mínimo)	
NGYofs cond1	
838 COMPAR .LE. dfdtFu cond2	(Condição 2: dfdt (negativo) está abaixo do SLOPE
Yminu cond2	
839 LOGIC .AND. cond1 libRFu	(dfdt está na região de Trip
cond2 libRFu	
841 DISMAX libRFu CmdRFu #MEIO #Tpers#Tdo	
(--- Especifico para 81RF_O	
(0063 MULTPL -slope Ax	(Ax = - slope * fdif
(fdif Ax	
845 SOMA Ax Ymino	(Ax+B
Yset Ymino	
850 DISMAX fdif LsRFo #Xofst#d81RF#Tpers	(Limite de Supervisão = "fdif" ultrapassou #Xofst
durante #delay	
851 DLAYON LsRFo LcRFo #d81RF	(Limite de Corte = atraso #delay depois de LsRFo
852 S/HOLD fHz spFFSo	(Amostra frequência de supervisão
LsRFo spFFSo	
853 S/HOLD t spFTSo	(Amostra tempo de supervisão
LsRFo spFTSo	
854 S/HOLD fHz spFFCo	(Amostra frequência de corte
LcRFo spFFCo	
855 S/HOLD t spFTCo	(Amostra tempo de corte
LcRFo spFTCo	
856 SOMA spFFCo FtRFo	
-spFFSo FtRFo	
857 SOMA spFTCo TtRFo	
-spFTSo TtRFo	
858 FUNCAO SINAL TtRFo Tt0RFo	(Verifica sinal de "dt";
859 SELET2 INF TfnRFo	(Se IN3<=0 então OUT=IN1. Se IN3>0 então OUT=IN2.
Desconsidera "dt" negativo	
TtRFo TfnRFo	
Tt0RFo TfnRFo	
865 DIVSAO FtRFo dfdtFo	(dfdt [Hz/s]
TfnRFo dfdtFo	
866 COMPAR .GE. dfdtFo cond3	(Condição 1: dfdt está acima do off-set do relé (81FRP_mínimo)
Yofst cond3	
867 COMPAR .GE. dfdtFo cond4	(Condição 2: dfdt está acima do SLOPE
Ymino cond4	
868 LOGIC .AND. cond3 libRFo	(dfdt está na região de Trip
cond4 libRFo	
871 DISMAX libRFo CmdRFo #MEIO #Tpers#Tdo	
(

```

(===== ESQUEMA ILHAMENTO RAJAMANI =====
(
950 LOGIC .AND. Cmd27e CmdE1
      Cmd67 CmdE1
951 LOGIC .AND. Cmd32P CmdE2
      Cmd81e CmdE2
952 LOGIC .AND. Cmd32Q CmdE3
      Cmd59e CmdE3
953 LOGIC .OR. Cmd27 part1
      Cmd59 part1
954 LOGIC .OR. Cmd81U part2
      Cmd81O part2
955 LOGIC .OR. CmdRu part3
      CmdRo part3
956 LOGIC .OR. CmdRFu part4
      CmdRFo part4
957 LOGIC .OR. Cmd51 part5
      CmdE1 part5
958 LOGIC .OR. CmdE2 part6
      CmdE3 part6
959 LOGIC .OR. part1 part7
      part2 part7
960 LOGIC .OR. part3 part8
      part4 part8
961 LOGIC .OR. part5 part9
      part6 part9
962 LOGIC .OR. part7 part10
      part8 part10
963 LOGIC .OR. part9 TripN2
      part10 TripN2
(
(===== Lógica para abertura do circuito =====
(
(980 LOGIC .NOT. TripN2 Commd
(981 IMPORT STCIRC SLIN #LocTR
(982 LOGIC .AND. SLIN EstL
      Commd EstL
(983 EXPORT STLIND EstL #LocTR
(
(===== SAÍDAS =====
(
900 saida Vmod
901 saida Vang
902 saida VangD
903 saida Imod
904 saida Iang
905 saida IangD
906 saida Rap
907 saida Xap

910 saida PMW
911 saida QMvar
912 saida Zmod
913 saida ZangD
914 saida TripN2
(
(-----)
(nb)i(tipo)o(stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
DEFVAL INF 9999.
DEFVAL ZERO 0.
defval rd2dg 57.296 (rd2dg = 180 /pi; fator de conversão de ângulo [rad] para [deg].
defval Sbase 100. (Sbase = 100MVA.
DEFVAL fnom 60. (fnom = 60Hz.
(--- Para função 32P
defval dir32P 0. (***** 32P direcionalidade: 0="DIRETO" / 1="REVERSO" *****
(--- Para função 32Q
defval dir32Q 1. (***** 32P direcionalidade: 0="DIRETO" / 1="REVERSO" *****
(--- Para função 67
defval dg90 90. (dg90 = ângulo de 90°.
defval pu67 #pu67
defval ang67 45. (***** 67 ângulo do elemento direcional [s] *****
defval dir67 0. (***** 67 direcionalidade: 0="DIRETO" / 1="REVERSO" *****
(--- Para monitoração da FREQUÊNCIA

```

```

defval Lmin -0.5
defval Lmax 0.5
(--- Para função 81R_U ---
DEFVAL pu81Ru 2.
DEFVAL pufsu 59.
DEFVAL pufcu 58.8
DEFVAL splFSu 0.0
DEFVAL splTSu 0.0
DEFVAL splFCu 0.0
DEFVAL splTCu 0.0
(--- Para função 81R_O ---
DEFVAL pu81Ro 2.
DEFVAL pufso 61.
DEFVAL pufco 61.2
DEFVAL splFSO 0.0
DEFVAL splTSo 0.0
DEFVAL splFCO 0.0
DEFVAL splTCO 0.0
(--- Para função 81RF---
DEFVAL Xset 1.
DEFVAL Yset 2.
DEFVAL Yofst 0.2
DEFVAL spFFSu 0.0
DEFVAL spFTSu 0.0
DEFVAL spFFCu 0.0
DEFVAL spFTCu 0.0
DEFVAL spFFSo 0.0
DEFVAL spFTSo 0.0
DEFVAL spFFCo 0.0
DEFVAL spFTCo 0.0
(
FIMCDU
(
999999
(
FIM

```

```

(**** Pick-up df/dt [Hz/s] ****
(**** Freq. supervisão [Hz] ****
(**** Freq. corte [Hz] ****

(**** 81R_O frequência de pick-up df/dt [Hz/s] ****
(**** 81R_O frequência de supervisão [Hz] ****
(**** 81R_O frequência de corte [Hz] ****

(**** Pick-up delta_f para y=0 [Hz] ****
(**** Pick-up df/dt para x=0 [Hz/s] ****
(off-set EIXO-Y: banda morta do SEL751: 0.2Hz/s

```

ANEXO III – Diagrama de Blocos 81RF

Apresenta-se a seguir o diagrama de blocos da função “Rápida Taxa de Variação de Frequência” (81RF), cujo código CDU faz parte do item “Código CDU (ANATEM): Esquema de Proteção de Ilhamento Nível 2”, no ANEXO II. Para melhor visualização, o diagrama é dividido em duas partes, onde a **Parte 1** monitora em frequência dentro do programa, a partir da amostragem das componentes real e imaginária da tensão. Essa frequência monitorada na parte 1 é utilizada para todas as funções de frequência programadas neste trabalho (81, 81 ou 81RF) dentro do Anatem; e a **Parte 2**, a partir da frequência monitorada, calcula a df/dt e compara com o *slope* da função 81RF de acordo com os parâmetros.

Diagrama Parte 1 – Monitoração da Frequência

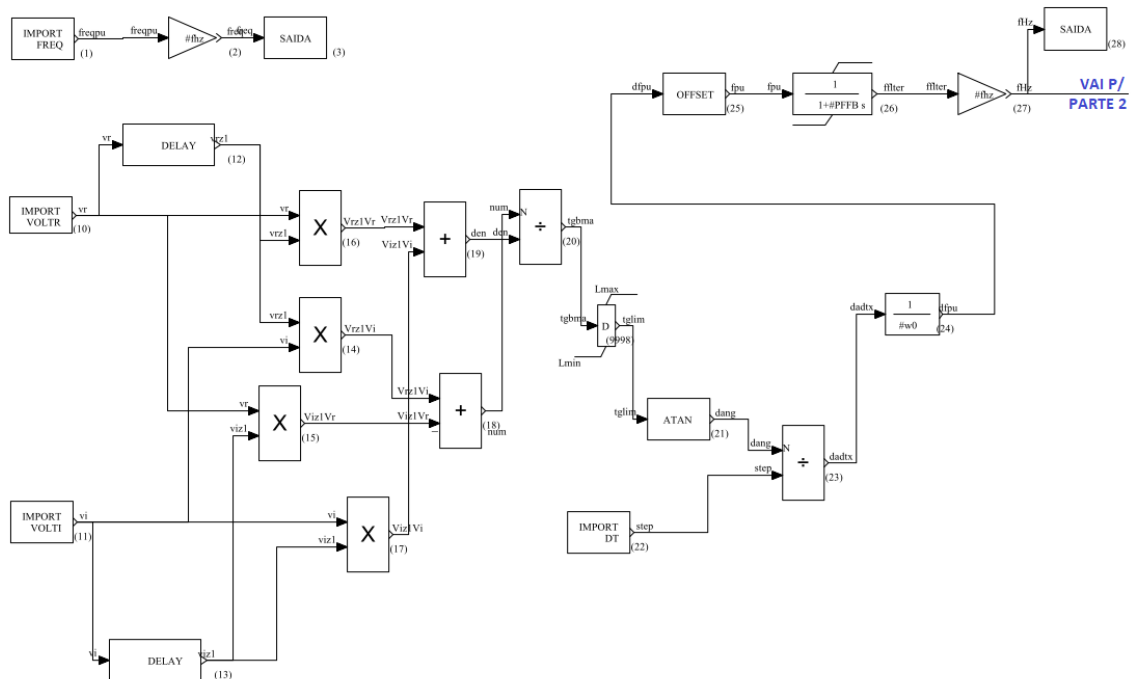


Figura 81: Diagrama de blocos da função 81RF. PARTE 1: Monitoração da frequência.

Diagrama Parte 2 – Lógica 81RF

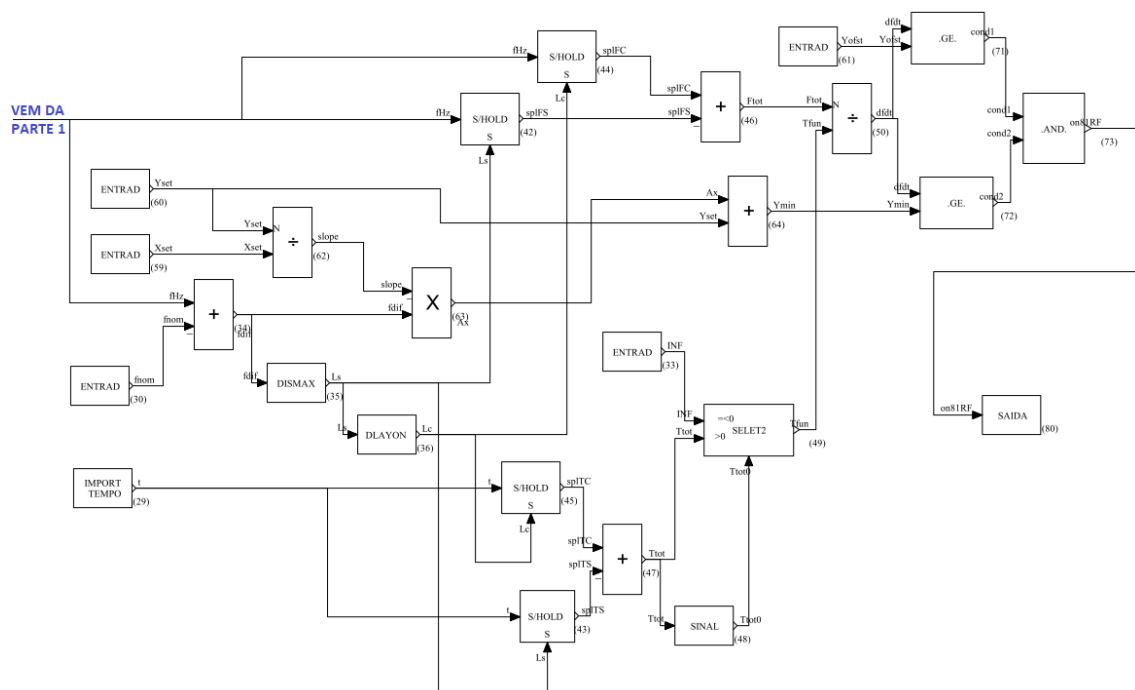


Figura 82: Diagrama de blocos da função 81RF. PARTE 2: Lógica 81RF.