



**COPPE/UFRJ**

CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE CONSUMIDORES INDUSTRIAIS  
EM PARALELO COM O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E DE TRANSMISSÃO DE  
CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Roberto Cunha de Carvalho

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  
Dezembro de 2009

CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE CONSUMIDORES  
INDUSTRIAIS EM PARALELO COM O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E DE  
TRANSMISSÃO DE CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Roberto Cunha de Carvalho

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

Examinada por:



---

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.



---

Prof. Sebastião Êrcules Melo de Oliveira, D.Sc.



---

Prof. Walmir de Freitas Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2009

Carvalho, Roberto Cunha de

Conexão da Geração Distribuída de Consumidores Industriais em Paralelo com o Sistema de Distribuição e de Transmissão de Concessionárias de Energia Elétrica / Roberto Cunha de Carvalho – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XXIV, 178 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 119-128.

1. Geração distribuída. 2. Sistemas industriais. 3. Simulação computacional. I. Taranto, Glauco Nery. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*À minha família,  
pelo carinho e compreensão,  
dedico este trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Benedito e Iraci, pelo afeto e pelos ensinamentos de toda a vida.

Agradeço à minha esposa, Ana Lúcia, pelo amor e estímulo, e aos meus filhos, Guilherme e Sofia, que cederam o tempo para que eu fizesse este Curso.

Agradeço ao meu orientador e amigo, Glauco, que me instigou a enfrentar este desafio e tanto me ajudou a enfrentá-lo.

Agradeço àqueles professores da COPPE que combinaram o ensinar com o estímulo para o progresso – os verdadeiros mestres.

Agradeço aos colegas de trabalho Fabio, Simone e Sebastião, pela compreensão e pelo apoio durante todo o Curso.

Agradeço aos engenheiros da AMPLA Marcelo e Murilo, pelas discussões e contribuições, essenciais para a viabilização deste trabalho.

Agradeço ao colega de curso João Silvério, pela convivência em geral e pelas horas divididas na superação de todas as dificuldades.

Agradeço, por fim, a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para viabilizar mais este importante passo na minha vida.

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

CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE CONSUMIDORES INDUSTRIAIS  
EM PARALELO COM O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E DE TRANSMISSÃO DE  
CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Roberto Cunha de Carvalho

Dezembro/2009

Orientador: Glauco Nery Taranto

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta uma avaliação dos requisitos técnicos para a conexão da geração distribuída baseada em instalações de co-geração de consumidores industriais. São apresentados dois estudos de caso de sistemas industriais típicos de pequeno e de grande porte, com simulação estática e dinâmica em programa de análise de sistemas elétricos. São abordados os problemas relacionados ao desempenho em regime permanente, incluindo a definição dos regimes de operação e despacho da geração distribuída, a especificação dos níveis de curto-circuito, o carregamento de linhas e transformadores, a regulação de tensão e a compensação de potência reativa, os problemas relacionados ao desempenho dinâmico, incluindo a estabilidade angular, a estabilidade de tensão, o ilhamento e a reconexão, e os problemas relacionados aos sistemas de proteção.

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

CONNECTION OF THE DISPERSED GENERATION OF INDUSTRIAL  
CONSUMERS IN PARALLEL WITH THE DISTRIBUTION AND TRANSMISSION  
SYSTEMS OF ELECTRICAL ENERGY UTILITIES

Roberto Cunha de Carvalho

December/2009

Advisor: Glauco Nery Taranto

Department: Electrical Engineering

This work presents an evaluation of the technical requirements for the connection of dispersed generation based on industrial consumer cogeneration facilities. Two case studies are presented, for typical small and large industrial systems, with steady-state and dynamic simulations using a power system analysis software. The problems related to the steady state performance, including the definition of operational schedule and dispersed generation dispatch, short-circuit specification, line feeders and transformers loading, voltage regulation and reactive power compensation are investigated. Problems related to dynamic performance, including angular and voltage stability, islanding and reclosing operations, and the protection systems are treated in detail, as well.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	7
<b>2</b>	<b>ASPECTOS INSTITUCIONAIS E REGULATÓRIOS.....</b>	<b>9</b>
2.1	PROCEDIMENTOS DE REDES – ONS .....	9
2.1.1	<i>Glossário de Termos Técnicos.....</i>	<i>10</i>
2.1.2	<i>Requisitos Mínimos para Instalações da Rede Básica e de seus Componentes .....</i>	<i>12</i>
2.1.3	<i>Indicadores de Desempenho da Rede Básica e de seus Componentes .....</i>	<i>13</i>
2.1.4	<i>Requisitos Técnicos Mínimos Para a Conexão à Rede Básica.....</i>	<i>14</i>
2.1.5	<i>Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos.....</i>	<i>18</i>
2.2	PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO – ANEEL .....	22
2.3	PADRÕES DAS CONCESSIONÁRIAS DE DISTRIBUIÇÃO .....	29
2.3.1	<i>Light Serviços de Eletricidade S.A. ....</i>	<i>29</i>
2.3.2	<i>Ampla Energia e Serviços S.A. ....</i>	<i>32</i>
<b>3</b>	<b>CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO - SIMULAÇÕES E ESTUDOS DE CASO .....</b>	<b>35</b>
3.1	DESCRIÇÃO E PARÂMETROS DO SISTEMA TESTE 1.....	35
3.2	METODOLOGIA E PREMISSAS PARA AS SIMULAÇÕES .....	42
3.3	SIMULAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	51
3.3.1	<i>Avaliações de Fluxo de Potência.....</i>	<i>51</i>
3.3.2	<i>Avaliações de Curto-circuito.....</i>	<i>63</i>
3.3.3	<i>Avaliações de Estabilidade.....</i>	<i>69</i>
3.3.4	<i>Avaliações de Proteção .....</i>	<i>79</i>
<b>4</b>	<b>CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO - SIMULAÇÕES E ESTUDOS DE CASO.....</b>	<b>82</b>
4.1	DESCRIÇÃO E PARÂMETROS DO SISTEMA TESTE 2.....	82
4.2	METODOLOGIA E PREMISSAS PARA AS SIMULAÇÕES .....	91
4.3	SIMULAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	95
4.3.1	<i>Avaliações de Fluxo de Potência.....</i>	<i>95</i>
4.3.2	<i>Avaliações de Curto-circuito.....</i>	<i>101</i>
4.3.3	<i>Avaliações de Estabilidade.....</i>	<i>104</i>
4.3.4	<i>Avaliações de Proteção .....</i>	<i>112</i>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>115</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>119</b>



<b>APÊNDICE A - O PROGRAMA POWER*TOOLS .....</b>	<b>129</b>
<b>APÊNDICE B - DADOS DE ENTRADA NO FORMATO PTW DO SISTEMA DE TESTE PARA A CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>134</b>
<b>APÊNDICE C – CIRCULAÇÃO DE CORRENTES PARA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NO LADO DO SISTEMA PARA O CASO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>148</b>
<b>APÊNDICE D - DADOS DE ENTRADA NO FORMATO PTW DO SISTEMA DE TESTE PARA A CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO.....</b>	<b>151</b>
<b>APÊNDICE E - INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DO AUTOPRODUTOR NAS PROTEÇÕES DE DISTÂNCIA DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA EXTERNO .....</b>	<b>175</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1 –DESEMPENHO DURANTE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO .....</b>	<b>15</b>
<b>FIGURA 2 – ESQUEMA DE PROTEÇÃO MÍNIMA A SER SEGUIDO PELOS AUTOPRODUTORES.....</b>	<b>31</b>
<b>FIGURA 3 – SISTEMA ELÉTRICO DE TESTE PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 4 – MODELO DO REGULADOR DE VELOCIDADE ISÓCRONO DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 5 – MODELO DO REGULADOR DE VELOCIDADE COM ESTATISMO DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 6 – MODELO E PARÂMETROS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 7 – ESQUEMA TÍPICO E AJUSTES DAS PRINCIPAIS PROTEÇÕES DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>FIGURA 8 – ESQUEMA TÍPICO E AJUSTES DAS PRINCIPAIS PROTEÇÕES DA INTERLIGAÇÃO DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>FIGURA 9 – CURVAS DE COORDENAÇÃO DAS PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE DE FASE E TERRA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E DA INTERLIGAÇÃO DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>FIGURA 10 – NÍVEIS DE CARREGAMENTO DO SISTEMA EXTERNO E DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 11 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 1 EM CARGA PESADA DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>52</b>

<b>FIGURA 12 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 2.1 EM CARGA PESADA DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 13 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 3.2 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA LEVE PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>FIGURA 14 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 4.2 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA LEVE PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 15 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 5.2 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA LEVE PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>56</b>
<b>FIGURA 16 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 6.1 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA LEVE PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>57</b>
<b>FIGURA 17 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 7.2 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA LEVE PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>58</b>
<b>FIGURA 18 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 8.2 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA MÉDIA PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>59</b>
<b>FIGURA 19 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 8.4 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA MÉDIA PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>FIGURA 20 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 8.4 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA MÉDIA PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO UTILIZANDO REGULADOR DE TENSÃO COM VERIFICAÇÃO DE FLUXO DE ENERGIA .....</b>	<b>61</b>
<b>FIGURA 21 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 9.3 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA MÉDIA PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 22 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 9.4 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA PESADA PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 23 – CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CALCULADAS PARA O CASO 1 EM CARGA PESADA DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>64</b>

<b>FIGURA 24 – CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CALCULADAS PARA O CASO 2.1 COM AUTOPRODUTOR EM MODO DE CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA PARA O ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURA 25 – CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CALCULADAS PARA O CASO 2.1 COM AUTOPRODUTOR EM MODO DE CONTROLE DA TENSÃO TERMINAL PARA O ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 26 – CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CALCULADAS PARA O CASO 3.1 COM AUTOPRODUTOR EM MODO DE CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA PARA O ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 27 – CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CALCULADAS PARA O CASO 4.3 COM AUTOPRODUTOR EM MODO DE CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA PARA O ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 28 – TENSÕES NOS TERMINAIS DO GERADOR DE ACORDO COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE FALTA NA BARRA BUS-APBT02 PARA O CASO 1.3 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>FIGURA 29 – TENSÕES NOS TERMINAIS DO GERADOR DE ACORDO COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE FALTA NA BARRA BUS-APMT02 PARA O CASO 1.4 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 30 – VELOCIDADES DO GERADOR DE ACORDO COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE FALTA NA BARRA BUS-APMT02 PARA O CASO 1.4 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 31 – ÂNGULOS DO GERADOR DE ACORDO COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE FALTA NA BARRA BUS-APMT01 PARA O CASO 2.2 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>71</b>
<b>FIGURA 32 – ÂNGULOS DO GERADOR DE ACORDO COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE FALTA NO PONTO 6 DO ALIMENTADOR 2 PARA O CASO 2.6 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>72</b>
<b>FIGURA 33 – ÂNGULOS DO GERADOR DE ACORDO COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE FALTA NA BARRA DA SUBESTAÇÃO PARA O CASO 3.5 DO ESTUDO DO</b>	

<b>AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>72</b>
<b>FIGURA 34 – VELOCIDADE, TENSÃO TERMINAL E POTÊNCIA ATIVA DO GERADOR PARA O CASO 4.4 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>FIGURA 35 – VELOCIDADE, TENSÃO TERMINAL E POTÊNCIA ATIVA DO GERADOR PARA O CASO 5.4 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>FIGURA 36 – VELOCIDADE, TENSÃO TERMINAL E POTÊNCIA ATIVA DO GERADOR E TENSÃO NA CARGA MAIS DISTANTE NO ALIMENTADOR PARA O CASO 6.3 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA LEVE PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>74</b>
<b>FIGURA 37 – VELOCIDADE, TENSÃO TERMINAL E POTÊNCIA ATIVA DO GERADOR E TENSÃO NA CARGA MAIS DISTANTE NO ALIMENTADOR PARA O CASO 8.3 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA MÉDIA PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 38 – TENSÕES E ÂNGULOS DE FASE NOS DOIS LADOS DO DISJUNTOR DO ALIMENTADOR NA SUBESTAÇÃO DISTRIBUIDORA MANOBRADO NO CASO 9.3 COM AUTOPRODUTOR EM CARGA MÉDIA PARA ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 39 – MODELO E PARÂMETROS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO PARA FATOR DE POTÊNCIA CONSTANTE DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 40 – MODELO DO REGULADOR DE VELOCIDADE PARA FATOR DE POTÊNCIA CONSTANTE DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 41 – VELOCIDADE, POTÊNCIA MECÂNICA, POTÊNCIA ATIVA, POTÊNCIA REATIVA E TENSÃO TERMINAL DO GERADOR PARA A PERDA DA INTERLIGAÇÃO EM MODO DE CONTROLE DE POTÊNCIA CONSTANTE NO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>77</b>
<b>FIGURA 42 – VELOCIDADE, POTÊNCIA MECÂNICA, POTÊNCIA ATIVA, POTÊNCIA REATIVA E TENSÃO TERMINAL DO GERADOR PARA A PERDA DA INTERLIGAÇÃO EM MODO DE CONTROLE DE FATOR DE POTÊNCIA CONSTANTE NO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>77</b>
<b>FIGURA 43 – VELOCIDADE, POTÊNCIA MECÂNICA, POTÊNCIA ATIVA, POTÊNCIA REATIVA E TENSÃO TERMINAL DO GERADOR PARA A PERDA DA INTERLIGAÇÃO EM</b>	

<b>MODO DE CONTROLE DE FATOR DE POTÊNCIA E POTÊNCIA CONSTANTES NO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>78</b>
<b>FIGURA 44 – COMPARATIVO DA VELOCIDADE E TENSÃO TERMINAL DO GERADOR PARA A PERDA DA INTERLIGAÇÃO EM MODO DE CONTROLE CONTÍNUO E CHAVEADO NO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>78</b>
<b>FIGURA 45 – SISTEMA ELÉTRICO DE TESTE PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>83</b>
<b>FIGURA 46 – MODELO DO REGULADOR DE VELOCIDADE DOS SISTEMAS EQUIVALENTES EXTERNOS PARA O ESTUDO DO CASO DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>87</b>
<b>FIGURA 47 – MODELO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO DOS SISTEMAS EQUIVALENTES EXTERNOS PARA O ESTUDO DO CASO DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>87</b>
<b>FIGURA 48 – MODELO DO REGULADOR DE VELOCIDADE COM ESTATISMO DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>88</b>
<b>FIGURA 49 – MODELO DO REGULADOR DE VELOCIDADE TIPO ISÓCRONO DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>88</b>
<b>FIGURA 50 – MODELO E PARÂMETROS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO DOS GERADORES DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>88</b>
<b>FIGURA 51 – MODELO E PARÂMETROS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO DOS MOTORES SÍNCRONOS PARA O ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>89</b>
<b>FIGURA 52 – ESQUEMA TÍPICO E AJUSTES DAS PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE NA SUBESTAÇÃO SUPRIDORA PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>90</b>
<b>FIGURA 53 – ESQUEMA TÍPICO E AJUSTES DAS PRINCIPAIS PROTEÇÕES DA INTERLIGAÇÃO E ENTRADA DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>90</b>
<b>FIGURA 54 – CURVAS DE COORDENAÇÃO DAS PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE DE FASE E TERRA DA SUBESTAÇÃO SUPRIDORA E DA ENTRADA E INTERLIGAÇÃO DO</b>	

<b>AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>91</b>
<b>FIGURA 55 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 1 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>96</b>
<b>FIGURA 56 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 2.1 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>97</b>
<b>FIGURA 57 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 2.4 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>97</b>
<b>FIGURA 58 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 3.1 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>98</b>
<b>FIGURA 59 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 3.2 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>99</b>
<b>FIGURA 60 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 4.1 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>100</b>
<b>FIGURA 61 – TENSÕES CALCULADAS PARA O CASO 5.1 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>101</b>
<b>FIGURA 62 – CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CALCULADAS PARA O CASO 1.1 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>102</b>
<b>FIGURA 63 – CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CALCULADAS PARA O CASO 2.1 COM AUTOPRODUTOR EM MODO DE CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA PARA O ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>103</b>
<b>FIGURA 64 – CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CALCULADAS PARA O CASO 3.1 COM AUTOPRODUTOR EM MODO DE CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>104</b>
<b>FIGURA 65 – TENSÕES NOS TERMINAIS DO GERADOR DE ACORDO COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE FALTA NA BARRA AP-MT-02 PARA O CASO 1.1 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>105</b>
<b>FIGURA 66 – VELOCIDADES NOS MOTORES PARA FALTA TRIFÁSICA NA BARRA AP-MT-02 COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE 100MS NO CASO 1.1 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>105</b>

<b>FIGURA 67 – TENSÕES NOS TERMINAIS DO GERADOR DE ACORDO COM A REPRESENTAÇÃO DAS CARGAS MOTÓRICAS PARA FALTA TRIFÁSICA NA BARRA AP-MT-02 COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE 100MS NO CASO 1.1 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO.....</b>	<b>106</b>
<b>FIGURA 68 – TENSÕES NOS TERMINAIS DO GERADOR DE ACORDO COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE FALTA NA BARRA AP-BT-01 PARA O CASO 1.3 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>107</b>
<b>FIGURA 69 – ÂNGULOS DOS GERADORES DO AUTOPRODUTOR DE ACORDO COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE FALTA NA BARRA AP-MT-02 PARA O CASO 2.1 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>108</b>
<b>FIGURA 70 – ÂNGULOS NOS MOTORES SÍNCRONOS PARA FALTAS TRIFÁSICAS NA BARRA AP-MT-02 NO CASO 2.1 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO.....</b>	<b>108</b>
<b>FIGURA 71 – ÂNGULOS DOS GERADORES DO AUTOPRODUTOR DE ACORDO COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE FALTA NA BARRA SE-AT3 PARA O CASO 2.6 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>109</b>
<b>FIGURA 72 – VELOCIDADES NOS MOTORES PARA FALTA TRIFÁSICA NA BARRA SE-AT3 COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE 400MS NO CASO 2.6 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>110</b>
<b>FIGURA 73 – ÂNGULOS DOS GERADORES DO AUTOPRODUTOR DE ACORDO COM O TEMPO DE ELIMINAÇÃO DE FALTA PARA O CASO 2.7 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>110</b>
<b>FIGURA 74 – VELOCIDADE E TENSÃO TERMINAL DO GERADOR PARA OS CASOS 3.2 E 4.2 DO ESTUDO DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>111</b>
<b>FIGURA 75 – RESPOSTAS DO GERADOR DO AUTOPRODUTOR PARA O CASO 5.2 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>111</b>
<b>FIGURA 76 – RESPOSTAS DO GERADOR DO AUTOPRODUTOR PARA O CASO 6.1 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>112</b>



<b>FIGURA 77 – RESPOSTAS DO GERADOR DO AUTOPRODUTOR PARA O CASO 6.3 DO AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>112</b>
<b>FIGURA 78 – EQUIVALENTE NORTON DA MÁQUINA ROTATIVA.....</b>	<b>132</b>
<b>FIGURA 79 – EQUIVALENTE NORTON DA MÁQUINA ROTATIVA IGNORANDO O EFEITO SUBTRANSITÓRIO DA SALIÊNCIA DOS PÓLOS .....</b>	<b>133</b>
<b>FIGURA 80 – SISTEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO PARA VERIFICAÇÃO CIRCULAÇÃO DAS CORRENTES PARA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA DO LADO DO SISTEMA.....</b>	<b>148</b>
<b>FIGURA 81 – DIAGRAMA UNIFILAR COM A CIRCULAÇÃO DAS CORRENTES NO SISTEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO PARA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA BARRA BUS-AL-1.1.....</b>	<b>148</b>
<b>FIGURA 82 – DIAGRAMA COM AS REDES DE SEQUÊNCIA POSITIVA, NEGATIVA E ZERO PARA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA BARRA BUS-AL-1.1 NO SISTEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO .....</b>	<b>149</b>
<b>FIGURA 83 – CIRCULAÇÃO DAS COMPONENTES DE SEQUÊNCIA POSITIVA, NEGATIVA E ZERO DAS CORRENTES PARA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA BARRA BUS-AL-1.1 NO SISTEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO .....</b>	<b>149</b>
<b>FIGURA 84 – CIRCULAÇÃO DAS CORRENTES NAS FASES A, B E C PARA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA BARRA BUS-AL1.1NO SISTEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO .....</b>	<b>150</b>
<b>FIGURA 85 – SISTEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO AUTOPRODUTOR NO DESEMPENHO DAS PROTEÇÕES DE DISTÂNCIA DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO .....</b>	<b>175</b>
<b>FIGURA 86 – EFEITO DA FONTE INTERMEDIÁRIA – <i>INFEED</i> – NO DESEMPENHO DO RELÉ DE DISTÂNCIA .....</b>	<b>176</b>
<b>FIGURA 87 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO PARA FALTA A 20% NA LINHA ENTRE AS SUBESTAÇÕES SE-AT3 E SE-AT2 .....</b>	<b>176</b>
<b>FIGURA 88 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO PARA FALTA A 20% NA LINHA ENTRE AS SUBESTAÇÕES SE-AT3 E SE-AT2 COM AS LINHAS PARALELAS E O AUTOPRODUTOR DESLIGADOS.....</b>	<b>177</b>
<b>FIGURA 89 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO PARA FALTA A 20% NA LINHA ENTRE AS SUBESTAÇÕES SE-AT3 E SE-AT2 COM AS LINHAS PARALELAS DESLIGADAS.....</b>	<b>177</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – LIMITES PARA AVALIAÇÃO QUALITATIVA DO DESEMPENHO DA FREQUÊNCIA DURANTE DISTÚRBIOS .....	14
TABELA 2 – FATOR DE POTÊNCIA OPERACIONAL NOS PONTOS DE CONEXÃO .....	18
TABELA 3 – TENSÕES ENTRE FASES ADMISSÍVEIS A 60HZ .....	19
TABELA 4 – TEMPOS INDICATIVOS DE ELIMINAÇÃO DE DEFEITOS .....	21
TABELA 5 – AJUSTES TÍPICOS PARA AS PROTEÇÕES DE TENSÃO E FREQUÊNCIA DO AUTOPRODUTOR.....	32
TABELA 6 – PARÂMETROS DO SISTEMA EXTERNO EQUIVALENTE DE 138KV PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....	37
TABELA 7 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS TRANSFORMADORES PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....	37
TABELA 8 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS BANCOS DE CAPACITORES PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....	37
TABELA 9 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS ALIMENTADORES PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....	38
TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS CARGAS DO AUTOPRODUTOR PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....	38
TABELA 11 – PARÂMETROS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS DOS GERADORES PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....	39
TABELA 12 – PARÂMETROS DOS MOTORES DE INDUÇÃO PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....	40
TABELA 13 – PARÂMETROS DOS SISTEMAS EXTERNOS EQUIVALENTES DE 230KV E 345KV PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....	84

<b>TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS TRANSFORMADORES PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>84</b>
<b>TABELA 15 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS BANCOS DE CAPACITORES PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>84</b>
<b>TABELA 16 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS LINHAS DE SUBTRANSMISSÃO PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>85</b>
<b>TABELA 17 – PARÂMETROS ELÉTRICOS DOS CABOS ISOLADOS DE MÉDIA TENSÃO PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>85</b>
<b>TABELA 18 – PARÂMETROS ELÉTRICOS DOS REATORES LIMITADORES DE CURTO-CIRCUITO DE MÉDIA TENSÃO PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>85</b>
<b>TABELA 19 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS CARGAS NÃO MOTÓRICAS PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO.....</b>	<b>85</b>
<b>TABELA 20 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS CARGAS MOTÓRICAS PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>86</b>
<b>TABELA 21 – PARÂMETROS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS DOS GERADORES PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>87</b>
<b>TABELA 22 – PARÂMETROS DOS MOTORES DE INDUÇÃO PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE PEQUENO PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>89</b>
<b>TABELA 23 – PARÂMETROS DOS MOTORES SÍNCRONOS PARA O ESTUDO DO CASO DE AUTOPRODUTOR DE GRANDE PORTE LIGADO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO .....</b>	<b>89</b>
<b>TABELA 24 – VARIÁVEIS INDEPENDENTES E DEPENDENTES DE ACORDO COM CADA TIPO DE BARRA .....</b>	<b>130</b>

## PRINCIPAIS SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

<i>ANSI</i>	- American National Standards Institute
<i>ANEEL</i>	- Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>c</i>	- tempo em ciclos após a aplicação da falta
<i>CAG</i>	- Controle Automático de Geração
$\delta$	- ângulo de carga interno da máquina
<i>D</i>	- coeficiente de amortecimento
$\vec{E}_n''$	- tensão induzida atrás da reatância subtransitória da máquina
$\hat{E}_n''$ máquina	- conjugado da tensão induzida atrás da reatância subtransitória da máquina
<i>FACTS</i>	- Flexible AC Transmission Systems
$G_{tap}$	- ajuste do tap do transformador elevador da máquina
<i>H</i>	- constante de inércia
<i>HVDC</i>	- High-Voltage Direct Current
$\vec{i}_1$	- parcela da corrente da máquina decorrente da saliência dos pólos
$I_{dc}$	- componente contínua da corrente de curto-circuito
<i>IEEE</i>	- Institute of Electrical and Electronics Engineers
$I_k''$	- corrente de curto-circuito inicial simétrica
$\vec{i}_n$	- corrente terminal da máquina
$\vec{i}_s$ subtransitória	- parcela da corrente da máquina função da tensão atrás da reatância subtransitória
$L_d''$	- indutância de eixo direto da máquina
$L_q''$	- indutância de eixo em quadratura da máquina
<i>n</i>	- desvio em por unidade da velocidade da máquina
<i>OLTC</i>	- comutador de taps sob carga
<i>ONS</i>	- Operador Nacional do Sistema
$P_e$	- potência elétrica da máquina

$P_{mec}$	- potência mecânica da máquina
<i>PRODIST</i> Nacional	- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
$P_t$	- potência de saída da turbina
$p.u.$	- quantidade em valores por unidade
$r_s$	- resistência da armadura da máquina
$R_a$	- resistência da armadura
$R_r$	- resistência do rotor
$R_s$	- resistência do estator
<i>SAE</i>	- sinal adicional estabilizante (ou PSS, na sigla em inglês)
<i>SDAT</i>	- Sistema de Distribuição de Alta Tensão
<i>SDMT</i>	- Sistema de Distribuição de Média Tensão
<i>SIN</i>	- Sistema Interligado Nacional
$T_e$	- torque elétrico
$T'_{do}$	- constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto
$T''_{do}$	- constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto
$T'_{qo}$	- constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo em quadratura
$T''_{qo}$ quadratura	- constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo em quadratura
$X_2$	- reatância de sequência negativa
$X_0$	- reatância de sequência zero
$X''$	- reatância subtransitória
$X_d$	- reatância síncrona de eixo direto
$X'_d$	- reatância transitória de eixo direto
$X''_d$	- reatância subtransitória de eixo direto
$X_l$	- reatância de dispersão da armadura
$X_q$	- reatância síncrona de eixo em quadratura;
$X'_q$	- reatância transitória de eixo em quadratura

$X''_q$	- reatância subtransitória de eixo em quadratura
$X_m$	- reatância de magnetização
$X_r$	- reatância do rotor
$X_s$	- reatância do estator
$\bar{v}_n$	- tensão terminal da máquina
$\hat{v}_n$	- conjugado da tensão terminal da máquina
VSC	- Voltage Source Converter
$\omega$	- velocidade angular da máquina
$W_k$	- momento de inércia
$\bar{y}_1$	- susceptância da armadura da máquina como diferença de $L''_d$ e $L''_q$
$\bar{y}_s$	- susceptância da armadura da máquina como média de $L''_d$ e $L''_q$
$\bar{Z}_{tran}$	- impedância do transformador elevador da máquina

#### Funções de Proteção

21	- distância
21N	- distância de terra
25	- verificação de sincronismo
26	- temperatura do óleo
27	- subtensão
27TN	- subtensão de neutro de terceiro harmônico
32	- direcional de potência
37	- subcorrente ou perda de carga
38	- temperatura de mancal
39	- vibração do mancal
40	- perda de excitação
46	- desbalanço de corrente
47	- desbalanço de tensão

- 48 - partida prolongada
- 49 - sobrecarga
- 49T - sobretemperatura do enrolamento
- 50 - sobrecorrente instantâneo de fase
- 50BF - falha de disjuntor
- 50G - sobrecorrente instantâneo de terra
- 50GS - sobrecorrente instantâneo de terra (ground sensor)
- 50N - sobrecorrente instantâneo de neutro
- 50V - sobrecorrente instantâneo de fase com restrição de tensão
- 51 - sobrecorrente temporizado de fase
- 51G - sobrecorrente temporizado de terra
- 51GS - sobrecorrente temporizado de terra (ground sensor)
- 51N - sobrecorrente temporizado de neutro
- 51V - sobrecorrente temporizado de fase com restrição de tensão
- 59 - sobretensão
- 59G - sobretensão residual de terra
- 59N - sobretensão residual de neutro
- 60 - supervisão de transformador de potencial
- 63 - pressão e/ou vazão de gás (Buchholz)
- 64TN - desbalanço de terceiro harmônico ou proteção de 100% do estator para terra
- 66 - supervisão ou controle de número de partidas
- 67 - sobrecorrente direcional de fase
- 67G - sobrecorrente direcional de terra
- 67N - sobrecorrente direcional de neutro
- 68 - seletividade lógica / oscilação de potência
- 71 - nível do óleo
- 79 - religamento

- 81 - frequência
- 81-U - subfrequência
- 81-O - sobrefrequência
- 81  $\frac{df}{dt}$  - variação de frequência
- 85 - auxiliar de comunicação (do Carrier) ou fio piloto
- 86 - bloqueio
- 87 - diferencial



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A proliferação de instalações de geração distribuída nos sistemas de energia elétrica impõe crescentes desafios para o setor elétrico brasileiro. De fato, a cultura tradicional do nosso sistema elétrico sempre foi baseada em gerações de grande porte, principalmente hidroelétricas e longe dos centros de carga, com redes de distribuição caracterizadas por sistemas radiais com fonte apenas do lado das subestações de interligação com o sistema de transmissão.

Todo o acúmulo tecnológico e todo o ferramental de análise consolidado ao longo de anos neste formato vem sendo progressivamente superado, com surgimento de novos paradigmas e a necessidade de se criar – ou atualizar – as bases tecnológicas para os novos tempos.

Esta é uma tendência não só do sistema elétrico brasileiro, mas internacional, com perspectiva de se intensificar no futuro próximo, com a introdução de micro-redes tecnologicamente avançadas, incluindo fontes de energia baseadas em geração térmica, eólica, solar e com célula a combustível.

A ligação de geradores em paralelo no sistema de distribuição requer a avaliação detalhada de regime permanente e de regime dinâmico do comportamento destas redes, de forma a definir com clareza os requisitos para a operação segura destes geradores e dos consumidores adjacentes.

Neste sentido, especial atenção deve ser dedicada à avaliação dos reflexos da entrada da geração em paralelo na confiabilidade e no controle dos níveis de tensão e frequência da energia entregue aos demais consumidores do sistema local, principalmente considerando os limites impostos pela nova regulamentação do setor elétrico às concessionárias distribuidoras, inclusive com pesadas penalizações no caso de descumprimento.

O caso da co-geração de consumidores industriais operando em paralelo com as concessionárias de distribuição é uma realidade já posta no cenário elétrico nacional da geração distribuída, com potências variando de algumas centenas de quilowatts, ligados nas redes de média tensão, a centenas de megawatts, ligados nas redes de alta tensão ou mesmo de extra-alta tensão.

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As referências [1] a [8] apresentam a base bibliográfica de natureza geral para as avaliações estáticas e dinâmicas de sistemas elétricos de potência tratadas nesta dissertação e as referências [9] e [10] apresentam uma abordagem mais particularizada para o caso das instalações industriais.

Vários trabalhos específicos sobre a integração da geração distribuída vêm sendo publicados nos últimos anos, dentre os quais, por abordarem aspectos mais diretamente relacionados com o objeto desta dissertação, destacamos os listados a seguir.

Hsu *et al.* [11] apresentaram um estudo para determinação de um esquema de descarte automático de cargas para uma grande indústria com diversos geradores internos funcionando em cogeração. São discutidas as várias etapas do processo, incluindo as definições sobre o número de degraus e os correspondentes ajustes dos relés de frequência que comandam o esquema. Foram apresentadas as simulações dinâmicas do sistema para confirmar a eficácia do esquema.

Pontes [12] apresentou um trabalho detalhando as experiências da COSERN na interligação de autoprodutores e produtores independentes de energia elétrica, descrevendo os aspectos legais, comerciais, operativos e técnicos envolvidos. Apresentou as interligações existentes e projetadas no sistema da concessionária e destacou o problema do religamento automático pelo lado da concessionária, implementado com supervisão por relé de subtensão.

Spier *et al.* [13] apresentaram um estudo sobre o comportamento dinâmico da geração distribuída conectada a um sistema de distribuição real, simulando perturbações tais como curto-circuitos, manobras de bancos de capacitores e variações de carga para as condições de funcionamento em paralelo e em ilha. Destacada como vantajosa para a continuidade no suprimento aos consumidores adjacentes a possibilidade da operação em ilha.

Gómez e Morcos [14] apresentaram um estudo sobre o efeito da presença da geração distribuída em sistemas fracos com consumidores sensíveis a quedas de tensão temporárias. Discutido o problema da coordenação dos tempos da atuação da proteção e a suportabilidade dos equipamentos sensíveis e apresentado estudo de caso descrevendo as situações discutidas.

Katiraei *et al.* [15] apresentaram uma investigação sobre chaveamentos e faltas levando ao ilhamento de um sistema de distribuição e à formação de uma micro-rede. Apresentado estudo de caso com geração síncrona e geração conectada por conversores VSC. Apresentadas simulações dinâmicas para condição de funcionamento em paralelo e em ilha. Destacada a necessidade da rápida ação dos controles da geração baseada em conversores para a estabilidade angular do sistema após o ilhamento.

Das [16] apresentou um trabalho sobre geração distribuída com geradores de pequeno porte conectados através de uma grande impedância a um sistema externo fraco. Discutida a vulnerabilidade desta geração distribuída para perda de sincronismo e apresentado estudo de caso com simulações de eliminação de faltas, demonstrando a necessidade de rápida abertura da interligação e descarte automático de cargas.

Freitas *et al.* [17] apresentaram um trabalho investigando o impacto de diferentes sistemas de excitação na definição do nível máximo de penetração da geração distribuída baseada em geradores síncronos. Discutida a aplicação dos sistemas de excitação para controle de tensão e para controle do fator de potência. Apresentado estudo de caso para avaliação da tensão de regime permanente, elevação do nível de curto-circuito, estabilidade angular e estabilidade de tensão, demonstrando que o modo de controle de tensão para o sistema de excitação é o que permite maior nível de penetração da geração distribuída.

Kashem e Ledwich [18] apresentaram um trabalho demonstrando como a interligação da geração distribuída como suporte de tensão nos alimentadores das redes de distribuição, especialmente em áreas rurais e remotas. Apresentada discussão sobre o problema da sensibilidade da tensão de acordo com as injeções de potência ativa e reativa para a otimização de múltiplas unidades de geração distribuída.

Arcon e Pinto [19] apresentaram um trabalho mostrando a aplicação do dispositivo para limitação de corrente de curto-circuito Is-Limiter como alternativa para evitar a superação de equipamentos em instalações com geração distribuída baseada em cogeração. Discutidas as soluções convencionais para a limitação do nível de curto-circuito e apresentadas características técnicas e de desempenho do equipamento proposto.

Vieira Jr *et al.* [20] apresentaram um trabalho com um conjunto de fórmulas para determinação direta do comportamento dinâmico de relés de taxa de variação de frequência empregados em esquemas de detecção de ilhamento de geradores síncronos distribuídos. Apresentadas simulações dinâmicas de um sistema de teste para a validação das fórmulas.

Salles *et al.* [21] apresentaram um estudo de um caso real com proposição de critérios de análise e de soluções adotadas para minimizar o impacto da geração distribuída no desempenho das proteções das linhas de transmissão. Discutido o problema do efeito denominado “infeed” caracterizado pela redução do alcance da proteção de distância ou subalcance. Apresentadas simulações para a avaliação das excursões das impedâncias medidas pelos relés de distância para vários tipos de faltas com e sem a presença dos geradores. Destacada a forte influência da geração distribuída no esquema convencional de proteção de distância e proposta a utilização de esquema com teleproteção para resolver o problema.

Malmedal *et al.* [22] apresentaram um trabalho examinando a aplicação de relés de perda de sincronismo para conexões de geração distribuída com geradores de pequeno porte. Apresentada discussão sobre a estabilidade do sistema e a operação do relé de perda de sincronismo e apresentados critérios para cálculo dos seus ajustes.

Abreu *et al.* [23] apresentaram um estudo sobre o desempenho dinâmico de geradores síncronos conectados em redes de distribuição de energia elétrica frente a grandes

perturbações, incluindo as análises de tempo de eliminação da falta, carregamento do sistema, níveis de curto-circuito no ponto de conexão entre o sistema de distribuição e a rede de subtransmissão, relação X/R dos alimentadores de distribuição e da constante de inércia dos geradores. Apresentada discussão sobre os índices de desempenho do sistema.

Faria e Fassheber [24] apresentaram um estudo discutindo o controle dos reguladores de tensão instalados em alimentadores de distribuição com presença de geração distribuída. Discutido o problema da inversão de fluxo da potência nos alimentadores e no modo de funcionamento dos controles dos reguladores de tensão e suas limitações, indicando a necessidade de ajuste dos respectivos softwares.

Uemura *et al.* [25] apresentaram um trabalho analisando o impacto da geração em redes de distribuição com presença de reguladores de tensão e bancos de capacitores chaveáveis. Apresentados estudos de casos com simulações de fluxo de potência e destacados os ganhos quanto à redução de perdas, redução de carregamento e melhora dos perfis de tensão do sistema.

Mozina [26] apresentou um trabalho discutindo os requisitos técnicos para a conexão da geração distribuída aos sistemas das concessionárias. Discutida a aplicação da Norma IEEE 1547 [27] e suas limitações. Discutidos também os métodos de proteção, incluindo a detecção de perda de paralelismo com a concessionária, a proteção de retaguarda para faltas externas, a detecção de condições prejudiciais do sistema, a proteção para fluxo de potência anormal e o desligamento e recomposição do sistema.

Campitelli *et al.* [28] apresentaram um algoritmo computacional para alocação e cálculo de ajustes de dispositivos de proteção em redes aéreas de distribuição com geração distribuída. Apresentado um estudo de caso com um alimentador real, para a qual a metodologia proposta permitiu a obtenção das propostas de alocação e as condições de seletividade e coordenação de proteção.

Vieira Jr *et al.* [29] apresentaram um trabalho com uma abordagem gráfica para avaliar e ajustar relés baseados em medidas de frequência empregados na proteção da conexão de geradores síncronos distribuídos com a rede elétrica. Utilizadas simulações dinâmicas para a discussão do método de acordo com seus modos de aplicação e as zonas de detecção de ilhamento.

Holsbach *et al.* [30] apresentaram um estudo sobre o impacto da geração distribuída no sistema elétrico da RGE. Apresentado o desenvolvimento da modelagem para simulação dinâmica do sistema com geração distribuída de tipo pequena central hidrelétrica. Apresentadas simulações para definição dos parâmetros para a proteção e controle do conjunto gerador/turbina e para a avaliação de regime permanente e dinâmica do sistema.

Collins e Jiang [31] apresentaram estudo de comportamento dinâmico de uma geração distribuída baseada em gerador síncrono durante faltas no sistema de distribuição. Demonstraram que dependendo da potência reativa absorvido durante a falta e das características do gerador, quedas de tensão relativamente prolongadas podem ocorrer após a eliminação da falta, especialmente no caso de expressiva participação de motores de indução na carga.

Chen *et al.* [32] apresentaram uma investigação sobre a influência das caldeiras a vapor na resposta transitória de turbogeradores funcionando em cogeração em uma indústria de incineração. Foram discutidos os aspectos relacionados à modelagem completa do sistema de vapor e de controle de velocidade dos geradores. Apresentados estudos de caso com simulações dinâmicas para várias condições de eliminação de falta, mostrando a necessidade de esquema automático de descarte de cargas para as condições de ilhamento pós-abertura da interligação com o sistema externo.

Hiscock [33] et al discutiram o problema do controle da tensão juntamente com o controle do fator de potência em sistemas industriais com presença de geração distribuída. Mostrada a utilização conjunta do comutador sob carga dos transformadores de interligação com o sistema elétrico externo no sistema automático de controle de carga (PMS, na sigla em inglês).

Vieira *et al.* [34] apresentaram avaliação das condições onde os esquemas baseados em tensão e frequência falham na detecção do ilhamento em sistemas de geração distribuída baseada em geradores síncronos. Apresentaram simulações de sistema de teste mostrando as zonas onde falha o esquema de detecção de ilhamento.

Viawan e Karlsson [35] apresentaram uma avaliação do controle da tensão e da potência reativa em sistemas de distribuição e de como a presença da geração distribuída baseada em geradores síncronos afeta estes controles, incluindo os bancos de capacitores e os comutadores sob carga dos transformadores. Apresentados estudos de caso com simulação dinâmica para um sistema de subtransmissão/distribuição mostrando que com os ajustes adequados, mesmo sem comunicação entre os diversos controles, é possível reduzir as perdas, as flutuações de tensão e o número de operações dos comutadores sob carga dos transformadores,

Walling *et al.* [36] apresentaram uma discussão sobre aspectos diversos relacionados aos impactos decorrentes da integração da geração distribuída nos sistemas de distribuição. Foram discutidos os aspectos relacionados ao controle da tensão, à proteção, ao ilhamento, e ao religamento do sistema.

Chen *et al.* [37] mostraram como a escolha adequada dos ajustes dos relés de subtensão principais de uma grande indústria com co-geração pode melhorar a qualidade do suprimento da energia para cargas críticas internas. A técnica mostrada consistiu em identificar com maior eficácia e rapidez a necessidade de ilhamento, preservando a estabilidade do sistema industrial e a continuidade do funcionamento das cargas críticas.

Fuangfoo *et al.* [38] mostraram trabalho descrevendo experiência regulatória para estudos de impacto e operação em ilha da geração distribuída, com apresentação de estudo de caso com simulações de regime permanente e dinâmicas de rede de subtransmissão e distribuição com geração distribuída baseada em geradores síncronos. Foi demonstrado que apesar da condição mais frágil na operação em ilha, o sistema se manteve estável e com seus parâmetros de desempenho aceitáveis.

Mozina [39] apresentou um trabalho discutindo as causas dos colapsos de tensão e a definição dos requisitos para um sistema de desconexão baseado em subtensão. Discutidos os problemas da estabilidade de tensão e da estabilidade angular e os principais blecautes. Proposto um esquema de detecção da degradação do sistema

externo baseado na proteção de subtensão e desbalanço de tensão e abertura da interligação da geração distribuída.

Senne *et al.* [40] apresentaram um trabalho descrevendo os métodos utilizados para a conexão de autoprodutores e produtores independentes em paralelo com o sistema da CPFL, destacando os aspectos relacionados à proteção, qualidade de fornecimento e operação. Apresentada discussão sobre novos recursos na engenharia de distribuição e aplicações práticas.

Perera *et al.* [41] apresentaram um esquema de proteção baseado em relés direcionais com recurso de comunicação para proteção de sistemas de distribuição com presença de geração distribuída. Apresentados estudos de caso com geração baseada em geradores de indução e síncronos mostrando que o esquema é capaz de localizar o segmento em falta adequadamente tanto para sistemas radiais quanto para sistemas malhados.

Smith e Ran [42] apresentaram um estudo para uma indústria com geração baseada em turbinas a gás operando em ilha e com grandes conversores de frequência para acionamento de motores. Discutido o problema da ressonância entre os modos de vibração dos eixos das turbinas e as inter-harmônicas de corrente geradas pelos conversores e apresentados estudos de caso com simulação dinâmica para diferentes arranjos com conversores tipo fonte de corrente.

Calderaro *et al.* [43] apresentaram estudos de casos mostrando o impacto da geração distribuída de geradores síncronos na qualidade do suprimento de energia elétrica na estabilidade transitória de uma rede de distribuição. Foram mostradas simulações de regime permanente e dinâmicas para diferentes níveis de penetração de geração distribuída em diferentes condições de carregamento do sistema, considerando a representação dos reguladores de tensão e de velocidade dos geradores e das proteções de sobrecorrente para o secundário do transformador principal e para os alimentadores de distribuição. Foi demonstrado que a presença da geração distribuída na rede de distribuição influencia a estabilidade transitória e a resposta da proteção do sistema e que, com um esquema adequado de descarte de cargas, a operação em ilha pós-distúrbio poderia propiciar maior continuidade de suprimento aos consumidores adjacentes.

Pham *et al.* [44] apresentaram uma discussão sobre a possibilidade de utilização da geração distribuída na recomposição dos sistemas, com a proposição de uma metodologia para otimização dos volumes de carga e dos tempos requeridos para restabelecimento do suprimento. Apresentado estudo de caso mostrando a viabilidade do método proposto.

Wang e Lin [45] apresentaram um estudo comparativo de resultados obtidos em campo e por simulações dinâmicas para uma instalação com geração distribuída baseada em gerador de indução acionado por motor a gás. Discutida a modelagem do sistema e apresentados os resultados para várias condições de tensão e carga e de partida de motores.

Mahat *et al.* [46] apresentaram uma discussão sobre as dificuldades para a rápida detecção da condição de ilhamento nos sistemas com geração distribuída quando a carga corresponde à disponibilidade da geração disponível. Foram discutidas as vantagens e desvantagens dos métodos ativos e passivos e proposto um método híbrido, combinando a avaliação da taxa de variação da tensão (método passivo) com mudança

da geração de potência ativa (método ativo). Apresentados estudos de caso com simulação dinâmica de sistema teste para vários cenários de carga confirmando a detecção do ilhamento de forma eficiente para todas as situações.

Zeineldin e Kirtley Jr [47] apresentaram uma avaliação da influência das características de variação das cargas com tensão e a frequência na dificuldade para funcionamento dos esquemas de proteção contra ilhamento baseados em tensão e frequência nas instalações com geração distribuída. Apresentaram estudos de casos para cargas com características diversas, mostrando a dependência do esquema de detecção de ilhamento do tipo de carga.

Xingi *et al.* [48] apresentaram um estudo de estabilidade transitória para um sistema de distribuição com presença de gerações distribuídas de diferentes tipos. Apresentaram estudo de caso para várias condições de eliminação de faltas e mostraram que para níveis elevados de penetração de geração distribuída problemas de estabilidade podem ocorrer, requerendo eventualmente o ajuste das proteções do sistema.

Pontes *et al.* [49] apresentaram um trabalho sobre a avaliação do desempenho dinâmico da geração distribuída frente a perturbações no Sistema Interligado Nacional e de manobras na rede de distribuição da LIGHT. Apresentadas simulações de casos reais usando software de simulação desenvolvido especificamente para este propósito, com a modelagem de relés de proteção, simulações de múltiplas ilhas elétricas e avaliação de esforços torcionais nos eixos dos pequenos geradores.

Du *et al.* [50] propuseram a utilização de um sistema HVDC-VSC para a conexão ao sistema externo de grandes indústrias com geração local de energia como forma de aumentar a qualidade da sua energia. Apresentado estudo de casos para um sistema teste com simulações dinâmicas de partida de motores, faltas do lado da rede externa e perda de geração interna, demonstrando a melhora da qualidade da energia.

Trindade [51] apresentou uma investigação com proposição de metodologias de análise para a operação de sistemas elétricos industriais após o ilhamento dos sistemas externos. Abordou a mudança do modo de operação do regulador de velocidade e do sistema de excitação dos geradores síncronos, a implementação do sistema de rejeição de carga e a alteração dos ajustes dos relés de sobrecorrente do sistema de proteção da rede industrial.

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação está organizada em seis capítulos, conforme descrito a seguir.

No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução sobre a presença da geração distribuída nos sistemas elétricos e dos requisitos técnicos para o melhor tratamento dos problemas técnicos decorrentes. Apresentada também uma revisão da bibliografia sobre os aspectos tratados nesta dissertação.

No Capítulo 2 são apresentados elementos regulatórios do setor elétrico brasileiro relacionados ao objeto desta dissertação, com aspectos principais da regulamentação técnica estabelecida pela ANEEL, pelo ONS e pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica, aqui ilustrativamente representadas pela Light e pela Ampla.

No Capítulo 3 é apresentado o estudo do caso típico de consumidor industrial de pequeno porte, ligado no sistema de distribuição de média tensão, com as simulações de regime permanente e dinâmica e a discussão dos resultados.

No Capítulo 4 é apresentado o estudo do caso típico de grande porte, ligado no sistema de distribuição de alta tensão, com as simulações de regime permanente e dinâmica e a discussão dos resultados.

No Capítulo 5 são sintetizados os elementos abordados no trabalho e apresentadas as conclusões finais, bem como, as sugestões de temas para trabalhos futuros.

Por fim, no Apêndice A é feita uma breve apresentação sobre o software de simulação de sistemas elétricos PTW - Power\*Tools for Windows, desenvolvido pela SKM Systems Analysis, Inc, que será utilizado para as simulações nos estudos de caso.



## **2 ASPECTOS INSTITUCIONAIS E REGULATÓRIOS**

No setor elétrico brasileiro a regulamentação sobre os requisitos para a conexão dos acessantes ao sistema de transmissão em geral, incluindo os co-geradores, está concentrada nos Procedimentos de Redes, estabelecidos pelo ONS – Operador Nacional do Sistema [52], e para a conexão no sistema de distribuição, está concentrada nos Procedimentos de Distribuição, estabelecidos pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica [60].

Adicionalmente, as concessionárias de distribuição de energia elétrica definem em seus padrões técnicos os critérios e procedimentos a serem observados pelos autoprodutores em paralelo com seus sistemas.

### **2.1 PROCEDIMENTOS DE REDES – ONS**

Os Procedimentos de Rede [52] que são documentos elaborados pelo ONS com a participação dos agentes e aprovação pela ANEEL, estabelecem as sistemáticas e os requisitos técnicos necessários ao exercício, no âmbito do SIN, das atribuições de planejamento e programação da operação; de supervisão, coordenação e controle da operação; de administração de serviços de transmissão de energia elétrica; de garantia do livre acesso à rede básica; de proposição de ampliações e reforços para a rede básica e para as demais instalações de transmissão. Estes documentos estabelecem também as responsabilidades do ONS e dos agentes.

Os Procedimentos de Rede têm como principais objetivos legitimar, garantir e demonstrar a transparência, integridade, equanimidade, reprodutibilidade e excelência da operação do SIN e estabelecer, com base legal e contratual, as responsabilidades do ONS e dos agentes, no que se refere a atividades, insumos, produtos e prazos para executar a operação integrada dos recursos de geração e transmissão do SIN.

### 2.1.1 Glossário de Termos Técnicos

No Submódulo 20.1 [53] são definidos os termos técnicos e expressões utilizadas no ONS com as respectivas definições e/ou remissões destinadas a evitar ambigüidades no entendimento de tais termos e expressões descritos nos Procedimentos de Rede. Dentre os diversos termos apresentados, considerando sua aplicação neste trabalho, destacam-se os a seguir listados.

Autoprodutor – Pessoa física, pessoa jurídica ou consórcio de empresas que receba a concessão ou autorização com as seguintes finalidades: explorar aproveitamento hidroelétrico ou central geradora termoelétrica e respectivo sistema de transmissão associado; utilizar a energia produzida exclusivamente, a energia necessária para uso exclusivo em suas instalações industriais, e, mediante autorização da ANEEL, comercializar eventual e temporariamente seus excedentes de energia.

Colapso de Tensão – Fenômeno resultante de uma instabilidade de tensão, num sistema de potência, que consiste em o ponto de equilíbrio pós perturbação apresentar níveis de tensão abaixo dos limites aceitáveis. Um colapso de tensão pode ser total ou parcial.

Contingência – Perda de equipamentos ou instalações que provoca ou não violação dos limites operativos ou corte de carga.

Controle Automático de Geração - CAG – Processo sistêmico que viabiliza a manutenção da frequência e/ou do intercâmbio entre áreas do sistema elétrico, através de recursos de controle que atuam em usinas ou unidades geradoras. Esse termo também é aplicado para se referir ao conjunto de equipamentos e/ou dispositivos responsáveis por essa ação.

Controle Primário de Frequência – Ação realizada por reguladores automáticos de velocidade das unidades geradoras com o objetivo de limitar a variação da frequência quando ocorre desequilíbrio entre a carga e a geração.

Controle Secundário de Frequência – Ação realizada pelas unidades geradoras participantes do CAG, com o objetivo de restabelecer a frequência do sistema em relação ao valor programado e manter os valores de potência ativa dos intercâmbios nos valores programados e/ou restabelecê-los.

Critério "n-1" – Critério determinístico pelo qual o sistema deve ser capaz de suportar qualquer contingência simples, ou seja, a perda de qualquer um de seus elementos.

Estabilidade de um Sistema de Potência – Capacidade de um sistema elétrico de potência, em dada condição operativa, retornar a um estado de equilíbrio após ser submetido a um distúrbio.

Estabilidade Transitória – Capacidade de um sistema elétrico de potência, em dada condição operativa, retornar a um estado de equilíbrio quando submetido a grandes distúrbios.

Flexible AC Transmission Systems – FACTS – Equipamentos que utilizam eletrônica de potência e atuam como elementos adicionais de controle em nível sistêmico.

Instabilidade de Tensão – Situação em que o sistema elétrico de potência não é capaz de manter em equilíbrio as tensões em todas as suas barras depois de distúrbio causado por alguma condição operativa.

Operação do Sistema – Programação, normatização, coordenação, supervisão, controle, apuração e triagem dos dados da operação; acompanhamento, análise e divulgação de informações e resultados; e tratamento estatístico dos resultados da operação do sistema e da operação integrada do sistema eletroenergético, com a finalidade de garantir seu funcionamento de forma otimizada, confiável e segura.

Perturbação – Ocorrência no SIN caracterizada pelo desligamento forçado de um ou mais de seus componentes, que acarreta quaisquer das seguintes consequências: corte de carga, desligamento de outros componentes do sistema, danos em equipamentos ou violação de limites operativos.

Proteção Alternada – Esquema de proteção composto por um sistema de proteção unitária ou restrita e um sistema de proteção gradativa ou irrestrita, funcionalmente idêntico à proteção principal e completamente independente desta.

Proteção de Retaguarda – Sistema de proteção destinado a atuar quando ocorre falha eventual de um outro sistema de proteção. É denominada retaguarda local quando está instalado no mesmo local do sistema de proteção a que se destina cobrir. É denominada retaguarda remota quando está instalado em local diferente daquele onde está o sistema de proteção a que se destina cobrir.

Proteção Gradativa ou Irrestrita – Sistema de proteção destinado a detectar e eliminar falhas que ocorram no componente protegido e fornecer proteção adicional para os componentes adjacentes. Sua atuação é normalmente coordenada com a atuação das proteções dos equipamentos adjacentes por meio de retardo de tempo intencional. São exemplos de proteção gradativa ou irrestrita as proteções de sobrecorrente e as proteções de distância.

Proteção Intrínseca – Dispositivos de proteção integrados aos equipamentos, tais como relés de gás, válvulas de alívio de pressão, sensores de temperatura, sensores de nível etc.

Proteção Principal – Esquema de proteção composto por um sistema de proteção unitária ou restrita e um sistema de proteção gradativa ou irrestrita.

Proteção Unitária ou Restrita – Sistema de proteção destinado a detectar e eliminar, seletivamente e sem retardo de tempo intencional, falhas que ocorram apenas no componente protegido. São exemplos de proteção unitária ou restrita os esquemas com comunicação direta relé a relé, os esquemas de teleproteção, as proteções diferenciais, os esquemas de comparação de fase etc.

Recomposição do Sistema – Conjunto de ações que objetivam restabelecer a topologia do sistema ou a entrega da energia elétrica que tenha sido interrompida por desligamentos imprevistos de equipamentos ou linhas de transmissão.

Rede Básica – Rede definida e regulamentada pela ANEEL.

Rede Completa – Rede com todos os elementos fundamentais, que afetam o desempenho do SIN, em operação.

Regime Permanente – Condição em que se encontra um sistema quando não há variações transitórias nas grandezas elétricas que o caracterizam.

Reserva Girante – Diferença entre a potência total efetiva das unidades geradoras que já se encontram sincronizadas no sistema e a demanda total do sistema, num dado momento.

Sistema Interligado Nacional - SIN – Instalações responsáveis pelo suprimento de energia elétrica a todas as regiões do país, interligadas eletricamente.

Sistema de Transmissão – Instalações e equipamentos de transmissão considerados integrantes da rede básica, bem como as conexões e demais instalações de transmissão pertencentes a uma concessionária de transmissão.

### **2.1.2 Requisitos Mínimos para Instalações da Rede Básica e de seus Componentes**

No Submódulo 2.3 [54] são definidos os requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos. Para os disjuntores aplicados em tensões de 800, 550, 460 e 362kV o tempo máximo de interrupção deve ser de 2 ciclos e para os disjuntores aplicados em tensões de 242kV o tempo máximo de interrupção deve ser de 3 ciclos.

No Submódulo 2.6 [55] são definidos os requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações. O tempo total de eliminação de faltas pela proteção deve ser limitado conforme a seguir indicado:

- nas linhas de transmissão com tensão nominal igual ou superior a 345kV o tempo total de eliminação de faltas, incluindo o tempo de abertura dos disjuntores de todos os terminais da LT, não deve exceder a 100ms;
- nas linhas de transmissão com tensão nominal inferior a 345kV o tempo total de eliminação de faltas pela proteção unitária ou restrita não deve exceder a 150ms e nas linhas de interligação entre sistemas este tempo não deve exceder 100ms;
- nos transformadores ou autotransformadores cujo mais alto nível de tensão nominal é igual ou superior a 345kV o tempo total de eliminação de faltas, incluindo o tempo de operação do relé de proteção, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores do transformador, pelas proteções unitárias ou restritas não deve exceder a 120ms;
- nos transformadores ou autotransformadores cujo mais alto nível de tensão nominal é inferior a 345kV o tempo total de eliminação de faltas, incluindo o tempo de operação do relé de proteção, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores do transformador, pelas proteções unitárias ou restritas não deve exceder a 150ms;
- nos reatores em derivação o tempo total de eliminação de faltas, incluindo o tempo de operação do relé de proteção, dos relés auxiliares e o tempo de abertura

dos disjuntores pela proteção restrita, não deve exceder a 100ms para reatores de tensões nominais iguais ou superiores a 345kV e 150ms para reatores de tensões nominais inferiores a 345kV;

- nos barramentos de tensões nominais iguais ou superiores a 345kV o tempo total de eliminação de faltas, incluindo o tempo de operação da proteção do barramento, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores, não deve ser superior a 100ms e, no caso de falha da proteção unitária ou restrita do barramento, o tempo total para que as proteções de retaguarda remota eliminem faltas no barramento não deve ser superior a 500ms;
- nos barramentos de tensões nominais inferiores a 345kV o tempo total de eliminação de faltas, incluindo o tempo de operação da proteção do barramento, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores, não deve ser superior a 150ms e, no caso de falha da proteção unitária ou restrita do barramento, o tempo total para que as proteções de retaguarda remota eliminem faltas no barramento não deve ser superior a 600ms;
- nos bancos de capacitores o tempo total de eliminação de faltas no circuito entre o barramento e o banco, incluindo o tempo de operação dos relés de proteção, dos relés auxiliares e o tempo de abertura do disjuntor, não deve exceder a 150ms;
- O tempo total de eliminação de faltas pelo esquema de falha de disjuntores, incluindo o tempo de operação do relé de proteção, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores, não deve exceder a 250ms, para os níveis de tensão nominal igual ou superior a 345kV, e a 300ms para os níveis de tensão nominal inferiores a 345kV.

### 2.1.3 Indicadores de Desempenho da Rede Básica e de seus Componentes

No Submódulo 2.8 [56] são apresentados os indicadores de desempenho da rede básica relacionados à qualidade de energia elétrica e os valores limites de referência, dentre os quais destacam-se os a seguir listados.

- os desvios da frequência instantânea (valores absolutos sem integralização) em relação ao valor nominal, em condições normais de variação de carga, em regime permanente, não podem exceder a  $\pm 0,1\text{Hz}$ ;
- o indicador Desempenho de Frequência durante Distúrbios – DFP, que representa o percentual de intervalos de dez minutos durante o dia em que a integral do módulo do desvio da frequência do sistema foi inferior a  $0,4\text{Hz}\cdot\text{min}$ , não deve apresentar mais que oito valores da integral do desvio de frequência superior a  $0,4\text{Hz}\cdot\text{min}$  a cada dia e, no período de um ano, o tempo acumulado máximo de exposição a desvios de frequência deve observar os limites indicados na Tabela 1;
- no que se refere aos valores de tensão em regime permanente, o limite de desempenho da rede básica deve atender aos requisitos que constam na Resolução ANEEL nº 505/2001 [57], que estabelece que as tensões de regime permanente para os pontos de conexão em tensão nominal igual ou superior a 230kV devem observar as faixas de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão contratada (TC) de  $0,95TC \leq TL \leq 1,05TC$  para tensão de atendimento adequada,  $0,93TC \leq TL \leq 0,95TC$  ou  $1,05TC \leq TL \leq 1,07TC$  para tensão de atendimento precária e  $TL < 0,93TC$  ou  $TL > 1,07TC$  para tensão de atendimento crítica;

Tabela 1 – Limites para avaliação qualitativa do desempenho da frequência durante distúrbios

<b>Desempenho</b>	<b>Tempo acumulado máximo de exposição a desvios de frequência (segundos)</b>
$f > 66,0\text{Hz}$	0
$63,5\text{Hz} < f \leq 66,0\text{Hz}$	30,0
$62,0\text{Hz} < f \leq 63,5\text{Hz}$	150,0
$60,5\text{Hz} < f \leq 62,0\text{Hz}$	270,0
$58,5\text{Hz} \leq f < 59,5\text{Hz}$	390,0
$57,5\text{Hz} \leq f < 58,5\text{Hz}$	45,0
$56,5\text{Hz} \leq f < 57,5\text{Hz}$	15,0
$f < 56,5\text{Hz}$	0

Nota: Valores em p.u. indicados na base das máquinas.

- ainda segundo a Resolução ANEEL nº 505/2001 [57], o conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deverá compreender o registro de leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, e devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e o índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica (DRC), que não devem exceder respectivamente 3% e 0,5%;
- em qualquer condição de carga, os níveis de tensão nos barramentos que não atendam diretamente a consumidores e que não sejam pontos de fronteira, podem ser inferiores ou superiores aos valores estabelecidos na Resolução ANEEL nº 505/2001 [57], respeitadas as limitações dos equipamentos;
- com relação ao desequilíbrio de tensão, calculado pela relação entre as componentes de seqüência negativa e seqüência positiva da tensão e expresso em termos percentuais da componente de seqüência positiva, o limite global nos barramentos da rede básica é de 2% e o limite individual nos pontos de conexão à rede básica é de 1,5%, sendo que caso as tensões de seqüência negativa variem de forma intermitente e repetitiva, é permitido ultrapassar os limites especificados em até o dobro, desde que a duração cumulativa das tensões de seqüência negativa, acima dos limites contínuos estabelecidos, não ultrapasse 5%.

#### **2.1.4 Requisitos Técnicos Mínimos Para a Conexão à Rede Básica**

No Submódulo 3.6 [58] são apresentados os requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica, dentre os quais, para a conexão dos geradores, destacam-se os a seguir listados.

Com relação aos requisitos técnicos gerais:

- para operação em regime de frequência não nominal para unidades geradoras termoeletricas, requerida a operação entre 57 e 63Hz sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência instantâneos, a operação abaixo de 57,5Hz por até 5s, a operação abaixo de 58,5Hz por até 10s, a operação entre 58,5 e 61,5Hz

sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência temporizados e a operação acima de 61,5Hz por até 10s;

- para participação em Sistemas Especiais de Proteção — SEP, requerida a possibilidade de desconexão automática de geração, para atender a esquemas de ilhamento da usina;
- para geração/absorção de potência reativa, requerido que em potência ativa nominal a unidade geradora deve ser capaz de operar com fator de potência mínimo de 0,90 sobreexcitado e fator de potência mínimo de 0,95 subexcitado;
- para operação em regime de tensão não nominal, requerido no ponto de conexão da central geradora à rede básica, operação entre 0,90 e 1,05p.u. da tensão nominal, sem atuação dos relés de subtensão e sobretensão temporizados da usina;
- como desempenho durante curto-circuito trifásico, requerido que cada unidade geradora e seus serviços auxiliares devem suportar durante defeitos na rede, sem serem desligados, redução instantânea para até 25% da tensão nominal de geração com duração de 0,20s, seguida de um aumento linear para 95% da tensão nominal de geração em 0,55s, conforme indicado na Figura 1;

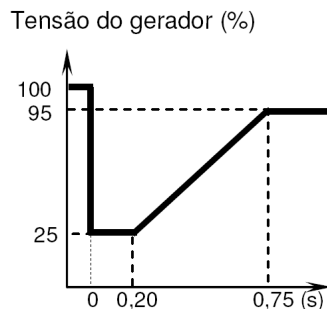


Figura 1 –Desempenho durante curto-circuito trifásico

- como desempenho durante curto-circuito assimétrico (corrente de seqüência inversa), requerido que cada unidade geradora deve suportar a circulação da corrente de seqüência inversa correspondente a uma falta assimétrica, próxima à usina, durante o tempo decorrido desde o início da falta até a atuação da última proteção de retaguarda;
- para operação ilhada com seus serviços auxiliares, requerido que quando as variações de tensão e/ou frequência na rede excederem os seus limites, a usina deve passar com segurança para a operação ilhada com seus serviços auxiliares e nela permanecer por pelo menos uma hora.

Com relação aos requisitos técnicos para o sistema de excitação:

- a capacidade de condução de corrente contínua não deve ser inferior a 110% da corrente de excitação necessária para manter o gerador operando com potência máxima e 105% de tensão nominal;
- a tensão de teto positivo não deve ser menor que 5,0pu. e a de teto negativo não deve ser menor que 4,0pu., sendo que 1,0pu de tensão corresponde à tensão de campo necessária para gerar a tensão nominal na linha do entreferro a vazio;

- o tempo de resposta de tensão de campo - o tempo em segundos após uma perturbação, para um degrau na referência do regulador de tensão com a máquina em vazio, para a tensão de campo atingir 95% da diferença entre a tensão de teto e a tensão de campo a plena carga - deve ser menor ou igual a 0,1s;
- o máximo valor da curva de resposta da tensão de campo (overshoot) deve ser menor ou igual a 10%;
- o tempo de estabilização da tensão de campo - tempo necessário para que a resposta da tensão de campo ao ensaio de degrau na referência do regulador de tensão com a máquina em vazio alcance e permaneça dentro da faixa de  $\pm 2\%$  do valor final - deve ser menor ou igual a 2s;
- a capacidade contínua do transformador de excitação não deve ser menor que o requerido quando a excitatriz estiver operando continuamente;
- o sistema de excitação de cada gerador deve ser totalmente independente, ou seja, não deve depender de outro gerador nem de alimentação auxiliar externa em corrente alternada, exceto para a excitação inicial do campo; os serviços auxiliares que sejam essenciais à partida do gerador ou não a limitem e os ensaios;
- o sistema de excitação deve ter recursos mínimos tais como controle automático da tensão terminal no gerador ou da tensão da barra de alta da usina mediante controle conjunto das unidades, controle manual da excitação do gerador, a compensação de corrente reativa; estabilizador de sistemas de potência (sinal adicional estabilizante), limitação automática da relação Volt/Hertz, limitação automática da excitação em valores máximo e mínimo ( $E_{fdm\acute{a}x}$  e  $E_{fdm\acute{i}n}$ , capacidade transitória da tensão negativa, etc.

Com relação aos requisitos técnicos para o desempenho do regulador de tensão:

- a tensão nas 3 fases do gerador, quando da operação em regime estável de carga e frequência, deve ser mantida na faixa de  $\pm 0,5\%$  do valor ajustado para qualquer valor de corrente de carga e de excitação dentro da faixa de operação do gerador, para qualquer valor de tensão terminal do gerador compreendida na faixa de 90 a 110% da tensão nominal quando o gerador estiver sem carga e para qualquer frequência na faixa de  $\pm 5\%$  do valor nominal;
- em caso de rejeição de carga nos terminais do gerador que estiver operando dentro de sua curva de capacidade, a tensão terminal não deve exceder o valor máximo de 120% do valor ajustado; deve ser rapidamente restabelecida para um valor compreendido entre  $\pm 5\%$  do valor ajustado num tempo inferior a 0,5s após a ocorrência da rejeição, ao atingir o regime permanente, deve estabilizar-se dentro da faixa de  $\pm 0,5\%$ , mantendo-se nessa faixa durante todo o período de sobrevelocidade, com a velocidade máxima igual à sobrevelocidade admissível do conjunto gerador;
- a tensão terminal nas 3 fases do gerador deve ser mantida na faixa de  $\pm 0,5\%$  do valor ajustado quando em operação em vazio e velocidade constante, para qualquer valor de velocidade;
- a tensão de campo de excitatriz estática deve ser mantida em valor superior à tensão de campo à carga nominal, durante defeitos do lado de alta tensão do



transformador elevador, supondo-se que a tensão terminal tenha sido reduzida a 35% da tensão nominal, por um período de 9 ciclos;

- com o gerador operando à frequência, tensão e corrente nominais, o regulador de tensão de excitatriz estática deve permitir ajuste que faça a tensão de teto ser atingida quando de variação em degrau de 2% na tensão de referência do regulador;
- o regulador automático de tensão deve ser equipado, no mínimo, com limitadores de ação contínua de excitação mínima, de excitação máxima e de Volt/Hertz, cuja atuação deve ser estável, instantânea, normalmente com faixa ajustável entre 1,0 e 1,3p.u., com um bom amortecimento e pequeno tempo de estabilização, e deve ser coordenada dinamicamente com a atuação do sistema de proteção;
- deve haver uma função de compensação de potência reativa com o objetivo de melhorar a regulação do barramento de alta tensão da usina, cujo grau de compensação deve ser de 0 a 10%, positiva ou negativa;
- a estrutura ideal para o Sinal Adicional Estabilizante – SAE deve ser baseada na integral de potência acelerante, com rastreador de rampa capaz de propiciar um bom amortecimento na faixa de 0,2 a 2,0Hz, e deve-se também prever um algoritmo de bloqueio automático por nível de potência, desvio de frequência, estado do disjuntor da máquina e sobretensão.

Com relação aos requisitos técnicos relativos à regulação primária de frequência:

- o estatismo permanente deve ser ajustável entre 2 e 8%, o estatismo transitório deve ser ajustável entre 10 e 500% e a banda morta deve ser menor ou igual a  $\pm 0,05\text{Hz}$ ;
- o tempo de estabilização na operação em rede isolada das unidades deve ser menor que 120s e o tempo de resposta na operação em rede isolada, que é o tempo necessário para a geração da unidade atingir 90% do valor final quando sujeita a um degrau de variação de frequência na referência do regulador de velocidade, deve ser menor que 9s;
- o ajuste do regulador de velocidade para a condição de operação interligada deve satisfazer também a condição de operação isolada, mas admite-se um ajuste diferenciado para a operação em vazio, uma vez que é possível determinar tal condição através da posição de chaves e disjuntores;
- o controle conjunto de potência, caso exista, deve ter a capacidade de equalizar a geração entre as unidades sob controle;
- o regulador de velocidade deve ser capaz de controlar a velocidade da unidade geradora em caso de rejeição total de carga para evitar seu desligamento por sobrevelocidade.

Com relação aos requisitos técnicos específicos relativos ao sistema de proteção do gerador:

- as unidades geradoras devem dispor de dois conjuntos de proteção, além dos conjuntos de proteção intrínseca recomendados pelo fabricante, proteção unitária e proteção de retaguarda;

- o tempo total de eliminação de todos os tipos de faltas pela proteção unitária, incluindo o tempo de abertura de todos os disjuntores da unidade geradora, não deve exceder a 100ms para unidades geradoras que acessem a rede básica em nível de tensão superior a 230kV e 150ms para unidades geradoras cujo acesso seja realizado em nível de tensão igual ou inferior a 230kV.

No Submódulo 3.6 [58] são também apresentados os requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica de consumidores livres e de agentes de distribuição, dentre os quais destacam-se os a seguir listados.

- nos pontos de conexão à rede básica, os acessantes devem manter o fator de potência nas faixas especificadas na Tabela 2;

Tabela 2 – Fator de potência operacional nos pontos de conexão

<b>Tensão do ponto de conexão</b>	<b>Faixa de fator de potência</b>
$V_n \geq 345\text{kV}$	0,98 indutivo a 1,0
$69\text{kV} \leq V_n < 345\text{kV}$	0,95 indutivo a 1,0
$V_n < 69\text{kV}$	0,92 indutivo a 0,92 capacitivo

- nos pontos de conexão com tensão igual ou superior a 69kV, admite-se fator de potência indutivo ou capacitivo inferior aos valores anteriores se a rede básica não for onerada por reforços necessários à manutenção dos padrões de desempenho, se a segurança operativa da rede básica não ficar comprometida quando da adoção de medidas operativas necessárias à manutenção dos padrões de desempenho, se não comprometer a otimização eletro-energética do SIN e se os valores de fator de potência não forem inferiores a 0,92.

### 2.1.5 Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos

No Submódulo 23.3 [59] são apresentadas diretrizes e critérios para estudos elétricos, dentre os quais destacam-se os a seguir listados.

Com relação aos estudos de fluxo de potência:

- o sistema deve ser analisado para as condições de carga e de geração que são pertinentes ao objetivo da avaliação, entre as quais, carga pesada, média, leve e mínima;
- as cargas devem ser representadas, em regra geral, com 100% de potência constante para a parte ativa e reativa, mas, podem ser representadas com percentuais variáveis de potência, impedância e corrente constantes, de acordo com os objetivos específicos de cada estudo;
- os estudos de fluxo de potência devem abranger, além da condição operativa normal, análise de contingências de linhas, transformadores e outros equipamentos do sistema elétrico, com o objetivo de se definirem ações para que o SIN opere sem perda de carga e sem violações inadmissíveis dos limites de tensão e de carregamento;

- devem ser simuladas contingências simples, ou seja, a perda de um único elemento do sistema elétrico, seja linha de transmissão, transformador, banco de transformador, unidade geradora, elo de corrente contínua ou equipamento de controle de tensão, tal como reator, capacitor, compensador síncrono ou compensador estático;
- na análise de contingências devem ser consideradas também as saídas de linhas de transmissão de circuito duplo e as saídas simultâneas de linhas de transmissão de circuito simples que compartilhem a mesma faixa de passagem, ou que atravessem regiões onde há ocorrência de fenômenos naturais e/ou queimadas que possam atingi-las, ou ainda por perdas de seções de barras em subestações;
- os limites de tensão a serem observados nos estudos elétricos para a condição operativa normal e para condição operativa de emergência são os indicados na Tabela 3;

Tabela 3 – Tensões entre fases admissíveis a 60Hz

Tensão nominal de operação	Condição operativa normal		Condição operativa de emergência	
	(kV)	(p.u.)	(kV)	(p.u.)
≤138	-	0,95 a 1,05	-	0,90 a 1,05
230	218 a 242	0,95 a 1,05	207 a 242	0,90 a 1,05
345	328 a 362	0,95 a 1,05	311 a 362	0,90 a 1,05
440	418 a 460	0,95 a 1,046	396 a 460	0,90 a 1,046
500	500 a 550	1,00 a 1,10	475 a 550	0,95 a 1,10
525	500 a 550	0,95 a 1,05	475 a 550	0,90 a 1,05
765	690 a 800	0,90 a 1,046	690 a 800	0,90 a 1,046

- em estudos para dimensionamento de equipamentos de compensação reativa, o chaveamento de reatores ou capacitores não deve provocar variações de tensão superiores a 5% da tensão nominal de operação, no momento imediatamente posterior ao chaveamento;
- nos estudos de ampliações e reforços, a simulação de contingências não deve provocar variações de tensão superiores a 10% da tensão nominal de operação nas barras de conexão à rede básica de agentes de distribuição e de consumidores livres ou potencialmente livres, no momento imediatamente posterior à contingência.

Com relação aos estudos de curto-circuito:

- a fim de que sejam obtidas as correntes máximas de curto-circuito, considera-se o sistema em regime subtransitário ( $X''d$ ), na configuração estabelecida para o horizonte do estudo, com todos os componentes em operação;
- as reatâncias de seqüência positiva e zero das unidades geradoras e dos compensadores síncronos devem ser representadas pelos seus valores subtransitórios saturados.

- compara-se o nível de curto-circuito na barra, tanto para curto monofásico quanto para curto trifásico, com o menor valor da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores do barramento;
- quando esse nível atinge o valor de 100%, deve ser efetuado um estudo mais detalhado, definido como line-out, em que se busca identificar a efetiva corrente passante pelo disjuntor;
- caso essa corrente atinja um valor de 100%, o disjuntor correspondente deve ser considerado em estado “superado” por capacidade de interrupção simétrica e, se a corrente passante estiver entre 90 e 100%, o disjuntor é considerado em estado de “alerta”.

Com relação aos estudos de estabilidade eletromecânica:

- as condições de carga, geração e configuração do sistema a serem utilizadas como condições iniciais nos casos de análise de estabilidade eletromecânica devem ser aquelas que caracterizem condições normais e de rede incompleta em regime permanente para carga pesada, média, leve e mínima;
- devem ser feitas simulações para abertura intempestiva de elementos do sistema sem curto-circuito prévio e/ou com a aplicação de curto-circuito monofásico;
- com relação aos tipos de contingências a serem simuladas, aplicam-se os elementos indicados anteriormente para os estudos de fluxo de potência;
- os geradores termoelétricos devem ser representados pelo modelo de máquina de pólos lisos, com saturação e enrolamentos amortecedores, os geradores hidroelétricos devem ser representados pelo modelo de máquina de pólos salientes, com saturação e enrolamentos amortecedores, as usinas de pequeno porte podem ser representadas pelo modelo clássico ou, simplesmente, não serem representadas, e na representação de novas usinas para as quais não se dispõe de dados, devem ser utilizados valores típicos de máquinas similares;
- os reguladores de tensão e de velocidade e os sinais adicionais estabilizantes de todas as máquinas representadas devem estar modelados, com exceção dos reguladores de velocidade de máquinas térmicas que apresentem constantes de tempo superiores ao tempo de simulação definido no escopo do estudo específico;
- os limitadores de reguladores que possuam constantes de tempo inferiores ao tempo de simulação devem ser representados, bem como os dispositivos que ativam e desativam os sinais adicionais estabilizadores;
- os sistemas de excitação devem ser normalmente representados com suas limitações relevantes;
- nos estudos de estabilidade, a carga deve ser representada da maneira mais realista possível; nessa representação, devem-se incluir, dependendo dos dados disponíveis, os modelos estáticos e dinâmicos, lineares ou não;
- se não houver informações para representação da carga em função da tensão, deve-se representá-la como 50% de potência constante e 50% de impedância constante para a parte ativa, e como 100% de impedância constante para a parte reativa;

- na ausência de valores de amortecimento da carga com a frequência, utiliza-se uma constante de 1,0p.u./p.u. na modelagem dos reguladores de velocidade e turbina.
- os tempos de isolamento dos defeitos, devem ser obtidos com base nos tempos de manobra de elementos que dependem do arranjo físico da subestação e do tempo de atuação da própria proteção, e quando não houver informações disponíveis nos bancos de dados ou quando não forem fornecidas pelos agentes, podem ser usados os tempos indicados na Tabela 4;

Tabela 4 – Tempos indicativos de eliminação de defeitos

Tensão nominal de operação (kV)	Tempo de eliminação (milissegundos) (operação dos relés e a abertura do disjuntor)	
	Sem falha do disjuntor	Com falha do disjuntor
765	80	200
525 e 500	100	250
440	100	250
345	100	400
230	150	500
138	150	500
138 (1)	450	750
88 (1)	450	750
69 (1)	800	1000

Nota 1: Sem teleproteção.

- em qualquer condição de carga, o sistema deve permanecer estável para aberturas intempestivas com ou sem a aplicação de curtos-circuitos monofásicos, sem religamento, ainda que haja a perda de algum dos elementos do sistema de transmissão, até mesmo de transformadores, sendo o curto monofásico usado por ser, entre os defeitos, o de mais alta probabilidade de ocorrência;
- para a determinação do limite de estabilidade eletromecânica, constatado coeficiente de amortecimento positivo, a tensão mínima para situação pós-distúrbio no SIN, na primeira oscilação, não pode ser inferior a 60% da tensão nominal de operação (63% para 500kV) e, nas demais oscilações, deve ser superior a 80% da tensão nominal de operação (84% para 500kV); a máxima variação de tensão admitida entre o instante inicial e o final da simulação dinâmica deve ser de 10% da tensão nominal de operação, ou seja,  $V_{final} \geq [V_{inicial} - 10\% V_{nop}]$ , e a amplitude máxima de oscilações de tensão eficaz pico a pico deve ser de 2%, em valor absoluto, 10 segundos após a eliminação do distúrbio;
- nos estudos de fechamento de paralelo os estudos dinâmicos devem determinar os valores máximos permitidos para a diferença de tensão, ângulo e frequência entre as barras envolvidas no fechamento de paralelo, de modo a se evitarem esforços superiores aos permitidos nas unidades geradoras, observadas a máxima diferença de frequência igual a 0,2Hz, a máxima diferença de tensão igual a 10% da tensão nominal de operação e a máxima defasagem angular de 10graus;

- nos estudos de rejeição de carga, são consideradas as configurações resultantes de contingências que sejam visualizadas como as mais severas para o sistema em estudo, simulando-se um tempo da ordem de meio segundo, e para o estabelecimento de níveis aceitáveis de sobretensões dinâmicas, o principal critério é que tais valores não prejudiquem a integridade de qualquer equipamento do sistema;
- nos estudos de religamento automático de linhas de transmissão para o tempo morto, deve ser utilizada a avaliação obtida de simulações de estudos de transitórios eletromagnéticos e, na falta desses estudos, podem ser utilizados valores de 500ms e 800ms para religamentos tripolares e monopolares, respectivamente, para o tempo de transferência de disparo pode ser adotado o valor de 20ms e para o tempo de verificação de sincronismo poder ser adotado um valor de 300ms.

Ainda com relação aos estudos de estabilidade eletromecânica, nos estudos de fechamento de anel e de religamento automático de linhas de transmissão:

- para unidades termoelétricas o fator relevante é a fadiga cíclica a que o material do eixo do turbogerador – bem mais longo que o eixo de um hidrôgerador – é submetido, decorrente de oscilações torcionais;
- a avaliação desse tipo de solicitação é feita com base na variação percentual instantânea da potência ativa gerada pela unidade, que corresponde à diferença entre a potência ativa gerada imediatamente antes do religamento automático e a potência ativa gerada imediatamente após o religamento automático;
- se a variação instantânea da potência ativa da unidade geradora é igual ou inferior a 50% da sua potência nominal aparente, o fechamento de anel ou o religamento automático da linha de transmissão é permitido tanto para unidades hidroelétricas quanto para unidades termoelétricas;
- caso o valor da variação instantânea da potência ativa da unidade geradora seja superior a 50% da sua potência nominal aparente, o agente deve ser consultado sobre a possibilidade de haver danos em componentes da máquina, em decorrência do impacto mecânico a que esses componentes são submetidos;
- no caso de máquinas hidráulicas, não havendo outras restrições por parte do agente, o valor da variação instantânea da potência ativa pode ser superior a 50%;
- no caso de máquinas térmicas, se o valor da variação instantânea da potência ativa dessas máquinas for superior a 50%, só será permitido o fechamento do anel se a perda de vida causada pela fadiga cíclica do material do eixo for inferior a 0,01%, ou a outro limite informado pelo agente.

## **2.2 PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO – ANEEL**

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST são documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica e seus principais objetivos são [60]:

- garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade;
- propiciar o acesso aos sistemas de distribuição, assegurando tratamento não discriminatório entre agentes;
- disciplinar os procedimentos técnicos para as atividades relacionadas ao planejamento da expansão, à operação dos sistemas de distribuição, à medição e à qualidade da energia elétrica;
- estabelecer requisitos para os intercâmbios de informações entre os agentes setoriais;
- assegurar o fluxo de informações adequadas à ANEEL;
- disciplinar os requisitos técnicos na interface com a Rede Básica, complementando de forma harmônica os Procedimentos de Rede.

No Módulo 1 [60] são definidos os termos técnicos e expressões utilizadas nas várias atividades vinculadas à distribuição de energia elétrica, de maneira a uniformizar o seu entendimento, dirimindo dúvidas e ambigüidades. Dentre os diversos termos apresentados, considerando sua aplicação neste trabalho, destacam-se os a seguir listados.

Acessantes – Consumidor, central geradora, distribuidora ou agente importador ou exportador de energia, com instalações que se conectam ao sistema elétrico de distribuição, individualmente ou associados.

Acesso – Disponibilização do sistema elétrico de distribuição para a conexão de instalações de unidade consumidora, central geradora, distribuidora, ou agente importador ou exportador de energia, individualmente ou associados, mediante o ressarcimento dos custos de uso e, quando aplicável conexão.

Cogeração de Energia – Processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária.

Cogerador – Planta industrial com base no processo de cogeração de energia. Constitui-se na forma de autoprodutor ou de produtor independente de energia elétrica.

Condições de Acesso – Condições gerais de acesso que compreendem ampliações, reforços e/ou melhorias necessários às redes ou linhas de distribuição da acessada, bem como os requisitos técnicos e de projeto, procedimentos de solicitação e prazos, estabelecidos nos Procedimentos de Distribuição para que se possa efetivar o acesso.

Consumidor – Pessoa física ou jurídica, ou comunhão de fato ou de direito, legalmente representada, que solicite o fornecimento de energia elétrica e/ou o uso do sistema elétrico à distribuidora e assume a responsabilidade pelo pagamento das faturas e pelas demais obrigações fixadas em normas e regulamentos da ANEEL, assim vinculando-se aos contratos de fornecimento, de uso e de conexão ou de adesão.

Distribuidora – agente titular de concessão ou permissão federal para prestar o serviço público de distribuição de energia elétrica.

Geração Distribuída – Centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas ou não pelo ONS.

Ilhamento – Operação em que a central geradora supre uma porção eletricamente isolada do sistema de distribuição da acessada. O mesmo que operação ilhada.

Micro-rede – Rede de distribuição de energia elétrica que pode operar isoladamente do sistema de distribuição, atendida diretamente por uma unidade de geração distribuída.

Normas e Padrões da Distribuidora – Normas, padrões e procedimentos técnicos praticados pela distribuidora, que apresentam as especificações de materiais e equipamentos, e estabelecem os requisitos e critérios de projeto, montagem, construção, operação e manutenção dos sistemas de distribuição, específicos às peculiaridades do respectivo sistema.

Paralelismo – Operação dos geradores das centrais geradoras em paralelo com o sistema elétrico da distribuidora.

Perturbação no Sistema Elétrico – Ocorrência no sistema elétrico caracterizada pelo mau funcionamento ou desligamento forçado de um ou mais de seus componentes, acarretando quaisquer das seguintes consequências: corte de carga, desligamento de outros componentes do sistema, danos em equipamentos ou violação de limites operativos.

Reconexão – Procedimento efetuado pela distribuidora com o objetivo de restabelecer a conexão de instalações do acessante.

Sistema de Distribuição – Conjunto de instalações e equipamentos elétricos existentes na área de atuação de uma distribuidora. Para efeitos do PRODIST, o sistema de distribuição compreende apenas as instalações de propriedade de distribuidora, não alcançando as Demais Instalações de Transmissão – DIT, exceto quando expressamente citado.

Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT) – Conjunto de linhas e subestações que conectam as barras da rede básica ou de centrais geradoras às subestações de distribuição em tensões típicas iguais ou superiores a 69kV e inferiores a 230kV, ou instalações em tensão igual ou superior a 230kV quando especificamente definidas pela ANEEL.

Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) – Conjunto de linhas de distribuição e de equipamentos associados em tensões típicas superiores a 1kV e inferiores a 69kV, na maioria das vezes com função primordial de atendimento a unidades consumidoras, podendo conter geração distribuída.

No Módulo 2 [61] são estabelecidas as diretrizes para estudos de planejamento de curto e médio prazo para o SDAT, que têm como objetivo detalhar a expansão, ampliação e reforços para o horizonte de cinco anos, de modo a atender os critérios técnicos e econômicos, resultando no Plano de Obras. Contemplam os Estudos de: Fluxo de Potência; Curto-Circuito; Estabilidade de Tensão e de Compensação de Potência



Reativa, quando necessário; Transitórios Eletromecânicos, quando necessário; Transitórios Eletromagnéticos, quando necessário.

Estes estudos devem contemplar a análise de desempenho do SDAT em condição normal de operação, avaliando as situações de operação previstas para as diversas condições de carga e configuração do sistema e resguardando as premissas de manutenção e reserva operativa no sistema, evidenciando eventuais dificuldades operativas a que o sistema possa ser submetido e propondo soluções, e em condições de emergência, avaliando o seu comportamento quando da saída forçada de elementos previamente selecionados.

Para os estudos de fluxo de potência, que consistem essencialmente na determinação do estado de operação da rede, dada sua topologia e certa condição de geração e carga, são definidos os seguintes critérios e diretrizes:

- o sistema deve ser analisado para condições de carga pesada, média e leve, e, quando necessário, para outros patamares de carga, bem como para condições de despachos alternativos, considerando a diversidade energética;
- o nível de detalhamento do SDAT deve ser compatível com o escopo dos estudos;
- devem ser observados os limites operativos de tensão nas barras do SDAT;
- devem ser observados os valores limites de geração e absorção de potência reativa e tensão terminal dos equipamentos;
- devem ser observados os critérios de carregamentos dos equipamentos do SDAT;
- devem ser considerados os critérios de despacho da geração distribuída.

Para os estudos de curto-circuito, que visam, basicamente, à verificação da evolução dos níveis de curto-circuito nas barras do SDAT, à verificação da adequação dos disjuntores quanto à sua capacidade de interrupção de corrente, dimensionamento de novos equipamentos, escolha e ajuste de proteção, bem como subsidiar estudos dinâmicos e de transitórios, são definidos os seguintes critérios e diretrizes:

- devem ser realizados com o SDAT na configuração estabelecida considerando os piores cenários;
- devem verificar os efeitos da entrada de geração no SDAT.

Para os estudos de estabilidade de tensão e de compensação de potência reativa, que visam a determinar a capacidade da rede manter tensões adequadas, em todos os seus barramentos, após ter sido submetida a um dado distúrbio, são definidos os seguintes critérios e diretrizes:

- a estabilidade de tensão está associada à capacidade em se manter e restaurar o equilíbrio entre a demanda da carga e o suprimento feito pela rede;
- é necessário cobrir as mais variadas condições da rede para que o estudo de estabilidade de tensão seja abrangente;
- devem ser realizadas análises estática, e eventualmente, modal e dinâmica para as condições normais do SDAT, e para as condições de indisponibilidades de equipamentos, também em todos os patamares de carga.

Para os estudos de transitórios eletromecânicos, que compreendem o período durante e imediatamente após a ocorrência de alterações na configuração da rede, oriundas de variações súbitas de geração ou carga, faltas ou manobras, são definidos os seguintes critérios e diretrizes:

- este período se caracteriza por oscilações de tensão em módulo e ângulo nos barramentos e por flutuações de potência nas linhas, transformadores e geradores;
- os estudos de estabilidade para pequenas perturbações dependem do estado da rede, e para grandes perturbações, além deste, dependem do local, tipo e duração da perturbação;
- os sistemas resultantes, em casos de interligações através de elos singelos, em que a abertura da conexão implicar separação dos sistemas, devem se manter estáveis para curtos-circuitos monofásicos.

Para os estudos de estabilidade angular são definidos os seguintes critérios e diretrizes:

- o sistema deve ser estável para pequenas variações de carga ou de geração; em qualquer condição de carga;
- o sistema deve ser estável para curtos-circuitos monofásicos, sem religamento, considerada a perda de um de seus elementos (carga, gerador, linha de transmissão ou transformador);
- o desempenho do sistema não deve implicar riscos de sobrecarga inadmissíveis em equipamentos nem tampouco desligamentos adicionais incontrolláveis e indesejáveis (deve ser avaliado o carregamento dos equipamentos principais de transmissão em função de suas características e também de equipamentos terminais).

Os estudos de planejamento de curto e médio prazo devem contemplar, quando necessário, análises de transitórios eletromagnéticos, com o objetivo de recomendar os equipamentos para redução dos surtos de manobra (sobretensões ou sobrecorrentes).

No Módulo 3 [62] são definidos os critérios técnicos e operacionais para a conexão de unidades da categoria de produção ao sistema de distribuição, dentre os quais destacam-se os a seguir listados.

- o acessante que conecta suas instalações ao sistema de distribuição não pode reduzir a flexibilidade de recomposição do mesmo, seja em função de limitações dos equipamentos ou por tempo de recomposição;
- o paralelismo das instalações do acessante com o sistema da acessada não pode causar problemas técnicos ou de segurança aos demais acessantes, ao sistema de distribuição acessado e ao pessoal envolvido com a sua operação e manutenção;
- o acessante é o único responsável pela sincronização adequada de suas instalações com o sistema de distribuição acessado, deve ajustar suas proteções de maneira a desfazer o paralelismo caso ocorra desligamento, antes da subsequente tentativa de religamento, cujo tempo de religamento é definido no acordo operativo;

- no caso de paralelismo permanente, o acessante deve atender aos requisitos técnicos de operação da acessada, observando os procedimentos operacionais do Módulo 4 - Procedimentos Operativos;
- os estudos básicos, de responsabilidade do acessante, devem avaliar tanto no ponto de conexão como na sua área de influência no sistema elétrico acessado os aspectos relacionados ao nível de curto-circuito, à capacidade de disjuntores, barramentos, transformadores de instrumento e malhas de terra, à adequação do sistema de proteção envolvido na integração das instalações do acessante e aos ajustes dos parâmetros dos sistemas de controle de tensão e de frequência e, para conexões em alta tensão, dos sinais estabilizadores.
- as tensões de conexão padronizadas para MT e AT são 13,8kV (MT), 34,5kV (MT), 69kV (AT) e 138kV (AT).

No Módulo 3 [62] são também definidos os requisitos de projeto de instalações de conexão, que devem ser projetadas observando as características técnicas, normas, padrões e procedimentos específicos do sistema de distribuição da acessada. Para os sistemas de proteção e controle para conexão de centrais geradoras, dentre os quais destacam-se os a seguir listados.

- o nível de tensão na conexão deve ser de baixa ou média tensão para potência instalada entre 151 e 500kW, de média ou alta tensão para potência instalada entre 501kW e 30MW e de alta tensão para potência instalada maior que 30MW;
- o ponto de conexão de centrais geradoras com potência instalada maior que 500kW deve prever, no mínimo, elemento de desconexão (chave seccionadora isoladora para manutenção), elemento de interrupção (disjuntor), transformador de acoplamento, proteção de sub e sobretensão, proteção de sub e sobrefrequência, proteção contra desequilíbrio de corrente, proteção contra desbalanço de tensão, sobrecorrente direcional, sobrecorrente com restrição de tensão e, e se o lado da acessada do transformador de acoplamento não for aterrado, proteção de sobretensão nos secundários de um conjunto de transformadores de potencial em delta aberto;
- nas conexões de centrais geradoras acima de 10MW as proteções de subtensão/sobretensão e subfrequência/sobrefrequência devem prever as operações instantânea e temporizada, levando em consideração o esquema de proteção informado pela acessada;
- centrais geradoras com potência instalada acima de 300kW devem possuir sistemas de controle automático de tensão e de frequência;
- para o paralelismo das centrais geradoras com o sistema de distribuição um ou mais disjuntores podem ser usados, desde que supervisionados por relé de verificação de sincronismo, os relés de proteção da interligação devem operar na ocorrência de sobretensão/subtensão, sobrecorrentes de fase e de neutro e sobrefrequência/subfrequência, e deve ser instalada proteção de retaguarda, composta de relés para detecção de faltas entre fases e entre fases e terra, atuando na abertura do paralelismo;
- para as centrais geradoras com potência instalada acima de 300kW, deve ser feita uma avaliação técnica da possibilidade de operação ilhada envolvendo as unidades consumidoras atendíveis, cuja decisão pela operação ilhada deve ser

precedida de estudos que avaliem a qualidade da energia na micro rede associada e quando a operação ilhada não for permitida, deve ser utilizado sistema automático de abertura do disjuntor de paralelismo;

- a acessada deve implementar medidas preventivas que impeçam a ocorrência de sobretensões e subtensões sustentadas em seu sistema de distribuição, decorrentes da inserção e retirada de centrais geradoras, até a atuação dos reguladores de tensão em operação.

No Módulo 4 [63], além dos procedimentos de operação em geral dos sistemas de distribuição de energia elétrica, são definidas as condições para a operação ilhada, quais sejam:

- a operação de central geradora alimentando uma parcela eletricamente isolada do sistema de distribuição, e as condições em que esta é permitida pela distribuidora, devem constar de Acordo Operativo estabelecido com a central geradora, e/ou transmissora envolvida, quando for o caso;
- a central geradora, responsável pelo controle de frequência da parcela eletricamente isolada do sistema de distribuição, deve ser dotada de controle automático de geração (CAG), ou qualquer outra tecnologia que seja capaz de desempenhar a mesma função, caso a operação ilhada seja utilizada de forma permanente;
- a distribuidora deve realizar estudos e instruções operativas e de segurança específicos para a operação ilhada.
- a central geradora deverá fornecer as informações necessárias para a elaboração dos estudos de regime permanente e dinâmico e, quando solicitado pela distribuidora, adequar os parâmetros dos sistemas de controle de forma a garantir o desempenho adequado do sistema.

No Módulo 8 [64] são estabelecidos os critérios e procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, dentre os quais destacam-se os a seguir listados.

- as tensões de regime permanente para os pontos de conexão em tensão nominal igual ou superior a 230kV devem observar as faixas de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão contratada (TC) de  $0,95TC \leq TL \leq 1,05TC$  para tensão de atendimento adequada,  $0,93TC \leq TL \leq 0,95TC$  ou  $1,05TC \leq TL \leq 1,07TC$  para tensão de atendimento precária e  $TL < 0,93TC$  ou  $TL > 1,07TC$  para tensão de atendimento crítica;
- as tensões de regime permanente para os pontos de conexão em tensão nominal igual ou superior a 69kV e inferior a 230kV devem observar as faixas de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão contratada (TC) de  $0,95TC \leq TL \leq 1,05TC$  para tensão de atendimento adequada,  $0,90TC \leq TL \leq 0,95TC$  ou  $1,05TC \leq TL \leq 1,07TC$  para tensão de atendimento precária e  $TL < 0,90TC$  ou  $TL > 1,07TC$  para tensão de atendimento crítica;
- as tensões de regime permanente para os pontos de conexão em tensão nominal igual ou superior a 1kV e inferior a 69kV devem observar as faixas de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão contratada (TC) de  $0,93TC \leq TL \leq 1,05TC$  para tensão de atendimento adequada,  $0,90TC \leq TL \leq 0,93TC$  para tensão

de atendimento precária e  $TL < 0,90TC$  ou  $TL > 1,05TC$  para tensão de atendimento crítica;

- o conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deverá compreender o registro de leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, salvo as que eventualmente sejam expurgadas no caso de ocorrência de interrupções de energia, quando as leituras devem ser expurgadas e substituídas por igual número de leituras válidas;
- após a obtenção do conjunto de leituras válidas, devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e o índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica (DRC), que não devem exceder respectivamente 3% e 0,5%;
- para unidade consumidora com tensão inferior a 230kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com regulamentação vigente e para unidade produtora de energia, o fator de potência deve estar compreendido entre os valores estabelecidos nos Procedimentos de Rede (vide a Tabela 2);
- o desequilíbrio de tensão nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da BT, definido como a relação entre o valor eficaz da magnitude da tensão de seqüência negativa e o valor eficaz da magnitude da tensão de seqüência positiva, deverá ser igual ou inferior a 2%, valor para referência do planejamento elétrico e que, regulamentariamente, será estabelecido em resolução específica, após período experimental de coleta de dados;
- o sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9Hz e 60,1Hz;
- as instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição devem garantir que a frequência retorne para a faixa de 59,5Hz a 60,5Hz, no prazo de 30 segundos após sair desta faixa, quando de distúrbios no sistema de distribuição, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração;
- havendo necessidade de corte de geração ou de carga para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência não pode exceder 66Hz ou ser inferior a 56,5Hz em condições extremas, pode permanecer acima de 62Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5Hz por no máximo 10 segundos e pode permanecer abaixo de 58,5Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5Hz por no máximo 05 segundos.

## **2.3 PADRÕES DAS CONCESSIONÁRIAS DE DISTRIBUIÇÃO**

### **2.3.1 Light Serviços de Eletricidade S.A.**

Na área da Light o assunto é tratado no documento “Interligação de Autoprodutores de Energia Elétrica em Paralelo com o Sistema da LIGHT SESA, em Baixa e Média Tensão” [65]. Os principais tópicos são descritos a seguir.

Com relação às condições básicas do paralelismo:

- a Light só permitirá o paralelismo do autoprodutor com o seu sistema, caso a interligação não resulte em problemas técnicos ou de segurança para outros consumidores, para o próprio sistema em geral ou para o pessoal de operação e manutenção;
- a conexão do paralelismo do grupo gerador do autoprodutor com o sistema elétrico da Light, somente poderá ser realizada através do disjuntor de acoplamento, com verificação do sincronismo (função 25), bem como as demais funções de proteção inerentes a cada tipo de Autoprodutor;
- especificamente nas interligações em média tensão, o acoplamento em paralelo do sistema de geração do autoprodutor com o sistema elétrico da Light requer o uso de um transformador de isolação estrela-triângulo, conectado em triângulo no lado da Light e em estrela aterrado no lado da geração do autoprodutor, e no caso do autoprodutor gerar no mesmo nível de tensão do alimentador de interligação, deverá ser usado transformador de isolação de relação 1:1;
- a Light não permitirá o paralelismo de autoprodutores em regime permanente em suas redes do sistema reticulado;
- não será permitido em hipótese alguma, ao autoprodutor, energizar o circuito da Light que estiver desenergizado;
- o Autoprodutor deverá disponibilizar as proteções necessárias que promovam o imediato desacoplamento do seu grupo gerador do sistema da Light, quando da desenergização ou qualquer anomalia no sistema da Light, evitando a alimentação isolada de circuitos da Light por sua geração própria (ilhamento), de forma a permitir que a Light restabeleça, com segurança, a alimentação dos seus circuitos através de religamento manual ou automático, cujo ciclo normalmente praticado tem duas operações, com o primeiro religamento ocorrendo em 3 segundos e o segundo em 15 segundos após o primeiro.

Com relação às condições de proteção:

- sugestivamente, a Light apresenta, o esquema de proteção mínima a ser seguido pelos Autoprodutores, conforme indicado na Figura 2;
- é obrigatória a existência de um único disjuntor de acoplamento, responsável pelo paralelismo entre a geração do autoprodutor e a alimentação da Light, não sendo permitida a utilização do disjuntor de entrada como disjuntor de acoplamento;
- o disjuntor de acoplamento deve ser acionado por relés secundários, inerentes a proteção de interligação, que promovam a sua abertura, sempre que ocorrer qualquer tipo de anomalia (curtos-circuitos monofásicos, bifásicos ou trifásicos, súbita variação de frequência e/ou tensão, falta de fase ou fases etc.), tanto no sistema da Light quanto no do autoprodutor, e todas as funções de proteção relativas à interligação do autoprodutor deverão atuar no disjuntor de acoplamento, de forma direta, através de alimentação auxiliar ininterrupta (corrente contínua);
- o Autoprodutor será o único responsável pela sincronização apropriada do seu sistema gerador com o sistema elétrico da Light, exclusivamente através do disjuntor de acoplamento, não sendo permitido o religamento automático do disjuntor de acoplamento;

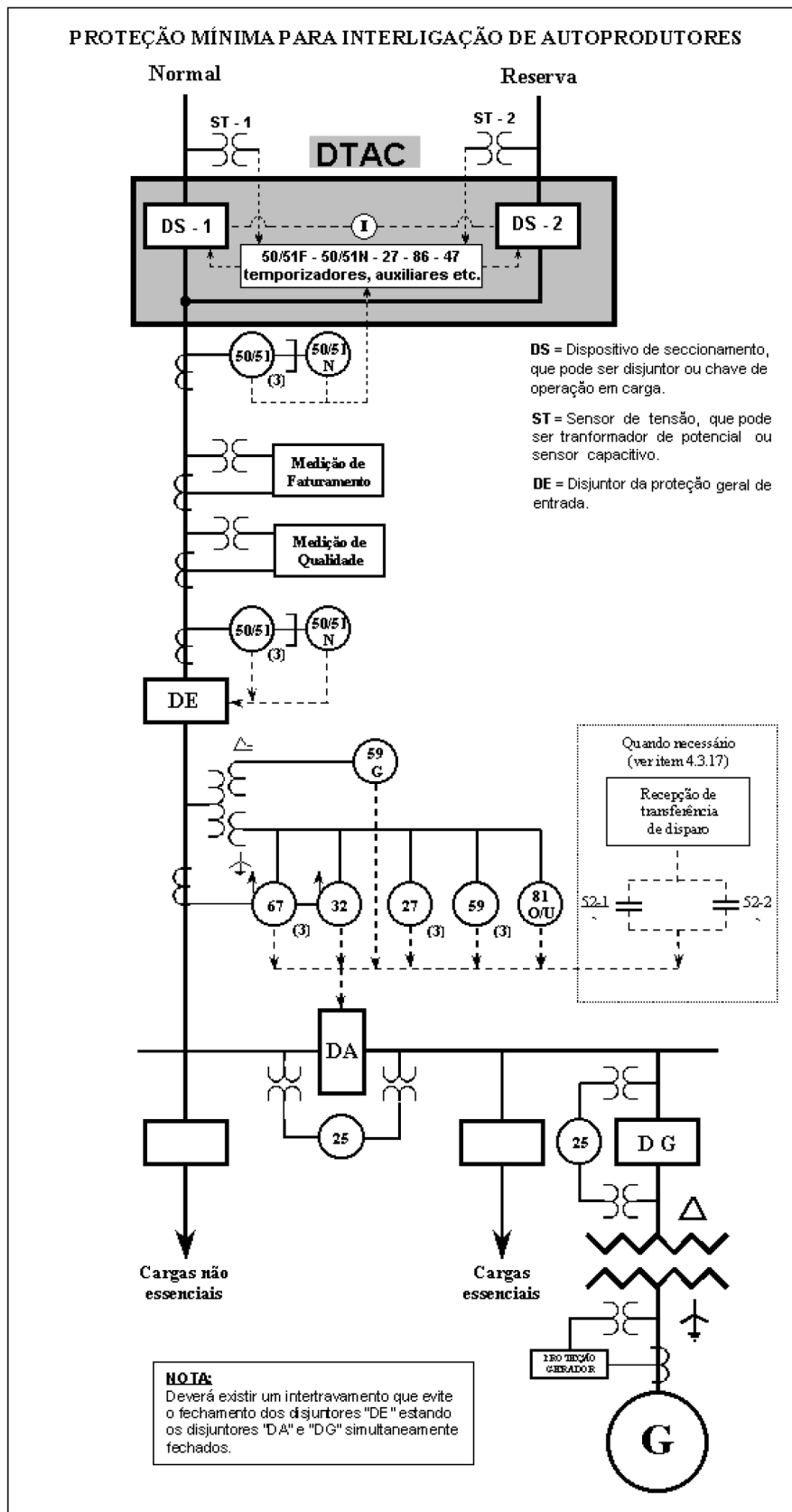


Figura 2 – Esquema de proteção mínima a ser seguido pelos autoprodutores

- estando o gerador em funcionamento, o fechamento do paralelismo somente poderá ser feito através do disjuntor de acoplamento e supervisionado pelo relé de verificação de sincronismo (função 25) e o estabelecimento do paralelismo por

qualquer outro disjuntor, inclusive o disjuntor de entrada, deve ser evitado através de dispositivo de intertravamento que evite o seu fechamento, estando os disjuntores de acoplamento e do gerador fechados;

- a proteção de interligação inerente ao disjuntor de acoplamento deverá ser independente da proteção do gerador e possuir, no mínimo, as funções de proteção 67 (proteção para sobrecorrente direcional de fases, tempo inverso) 59G (proteção para sobretensão residual, temporizada), 27 (proteção para subtensão de fases, temporizada, ligação fase-neutro), 59 (proteção para sobretensão de fases, temporizada, ligação fase-neutro), 32 (proteção para reversão de potência de fases, temporizada), 81O/U (proteção de frequência, com níveis de ajustes independentes e simultâneos para sobre e subfrequência) e 25 (proteção de verificação de sincronismo);
- em autoprodutores do tipo com venda de excedente de energia, o relé função 32 poderá ser dispensado e os relés funções 27 e 59 deverão possuir dois estágios de ajustes, independentes, para cada função;
- os ajustes típicos, normalmente praticados, para as graduações das proteções de tensão e frequência inerentes ao disjuntor de acoplamento do autoprodutor (funções 27, 59 e 81) são os indicados na Tabela 5;

Tabela 5 – Ajustes típicos para as proteções de tensão e frequência do autoprodutor

<b>Sistema de 13,8kV</b>	<b>Sistema de 25kV</b>	<b>Tempos de atuação</b>
$V \leq 8,00\text{kV}$	$V \leq 15,00\text{kV}$	1 segundo
$8,0\text{kV} < V < 13,2\text{kV}$	$15,0\text{kV} < V < 25,5\text{kV}$	30 segundos
$13,2\text{kV} < V < 13,8\text{kV}$	$25,5\text{kV} < V < 27,0\text{kV}$	condição normal
$13,8\text{kV} < V < 15,0\text{kV}$	$27,0\text{kV} < V < 29,0\text{kV}$	30 segundos
$V \geq 15,0\text{kV}$	$V \geq 29,0\text{kV}$	1 segundo
$f \leq 59,7\text{Hz}$	$f \leq 59,7\text{Hz}$	0,1 segundos
$59,7\text{Hz} < f < 60,3\text{Hz}$	$59,7\text{Hz} < f < 60,3\text{Hz}$	condição normal
$f \geq 60,3\text{Hz}$	$f \geq 60,3\text{Hz}$	0,1 segundos

Nota 1: Uma faixa de ajuste de frequência mais tolerante poderá ser aceita, desde que o autoprodutor a justifique através de estudos de estabilidade do seu sistema.

- após avaliação com análise de fluxo de potência no circuito em questão, a Light poderá concluir pela necessidade da utilização de um dispositivo de transferência de disparo, como opção técnica para garantir a imediata abertura do disjuntor de acoplamento do autoprodutor, quando da abertura do citado disjuntor do alimentador de interligação.

### 2.3.2 Ampla Energia e Serviços S.A.

Na área da Ampla o assunto é tratado no documento “Consumidor Autoprodutor de Energia (Paralelismo entre sistemas)” [66], cujos principais tópicos são descritos a seguir.



Com relação aos requisitos gerais para o paralelismo:

- o paralelismo não deverá causar problemas técnicos ou de segurança para outros consumidores, à Ampla, ao próprio sistema elétrico e ao pessoal de operação e manutenção;
- todos os geradores do consumidor autoprodutor deverão estar ligados ao sistema da Ampla por meio de um ou mais transformadores de potência e não será permitido o paralelismo através de transformadores de potência protegidos por meio de fusíveis;
- não será permitido o paralelismo se, nas condições mínimas de geração do consumidor autoprodutor com as condições elétricas mais desfavoráveis, as tensões e correntes de curto-circuito de contribuição, tanto do consumidor como da Ampla, não atingirem o mínimo requerido para que as proteções de retaguarda instaladas nos pontos de interligação possam operar com segurança;
- o consumidor autoprodutor será o único responsável pela correta sincronização de seus geradores com o sistema da Ampla e deverá existir nas instalações do consumidor um disjuntor próprio, supervisionado por relé de verificação de sincronismo (função 25), o qual somente permitirá o fechamento no caso de haver tensão em ambos os lados com valores fasoriais compatíveis e adequados entre si, de forma a permitir a manobra de paralelismo correta e segura;
- o consumidor autoprodutor não poderá de forma alguma energizar circuitos desligados da Ampla, para o que é imprescindível a instalação de relés de tensão que inibam o fechamento dos disjuntores de paralelismo no caso em que o circuito da Ampla esteja desenergizado.

Com relação ao comando, controle e proteção dos terminais da Ampla:

- para 138kV, os terminais da Ampla são normalmente dotados de relés de distância de fase e terra (função 21), sobrecorrente direcional de terra temporizado e instantâneo (função 67) e direcional de sobrecorrente terra carrier (função 67NC);
- para 69kV e 15kV, os terminais da Ampla são normalmente dotados de relés de sobrecorrente direcional de fase e terra temporizado e instantâneo (função 67) e relés de sobrecorrente de fase e terra temporizado e instantâneo (função 51).

Com relação ao comando, controle e proteção dos terminais do consumidor autoprodutor, o consumidor autoprodutor deverá instalar um relé de frequência (função 81), o qual abrirá o paralelismo em 0,2s no caso de uma variação de  $\pm 1,5$  ciclos na base de 60 Hz (58,5 a 61,5Hz), ou para uma variação menor, a critério do consumidor autoprodutor. Deverá ainda instalar no ponto de interligação:

- relé de sobrecorrente direcional instantâneo e temporizado de fase (função 67) para disparar o disjuntor de paralelismo do consumidor autoprodutor para faltas localizadas na rede da Ampla, com contribuição do consumidor autoprodutor;
- relé de subtensão (função 27) ligado entre fases, para disparar o disjuntor de paralelismo do consumidor para faltas localizadas na rede da Ampla, com contribuição do consumidor autoprodutor;

- relé de sobretensão residual (função 59G) para disparar o disjuntor de paralelismo do consumidor autoprodutor para faltas à terra localizadas na rede da Ampla;
- relé de subtensão instantâneo (função 27) para bloquear o fechamento manual do disjuntor de paralelismo do consumidor na condição de circuito da Ampla desenergizado;
- relés de potência (função 32), os quais primeiramente dispararão um alarme e após um determinado tempo abrirão o disjuntor de paralelismo, caso o consumidor autoprodutor em paralelo não deseje que haja inversão de potência do consumidor para a Ampla.

### **3 CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO - SIMULAÇÕES E ESTUDOS DE CASO**

#### **3.1 DESCRIÇÃO E PARÂMETROS DO SISTEMA TESTE 1**

O diagrama unifilar mostrando a composição do sistema elétrico de distribuição de média tensão típico adotado para avaliação do comportamento de um autoprodutor de menor porte está mostrado na Figura 3.

Trata-se de uma rede de distribuição de 13,8kV constituída de quatro alimentadores ligados a uma subestação equipada com transformador abaixador de 20/25MVA e um banco de capacitores de 2,4Mvar.

Os alimentadores apresentam comprimentos diferentes, representativos das categorias curto, médio, longo e muito longo e, como suas cargas foram consideradas idênticas, incluem equipamentos de controle de tensão de acordo com cada caso, quais sejam bancos de capacitores e um regulador de tensão.

O autoprodutor, equipado com geração total de 5MVA, consiste de uma unidade industrial com suas cargas distribuídas de forma homogênea entre a barra do lado da rede e a barra do lado da geração. As cargas foram consideradas como majoritariamente do tipo motóricas.

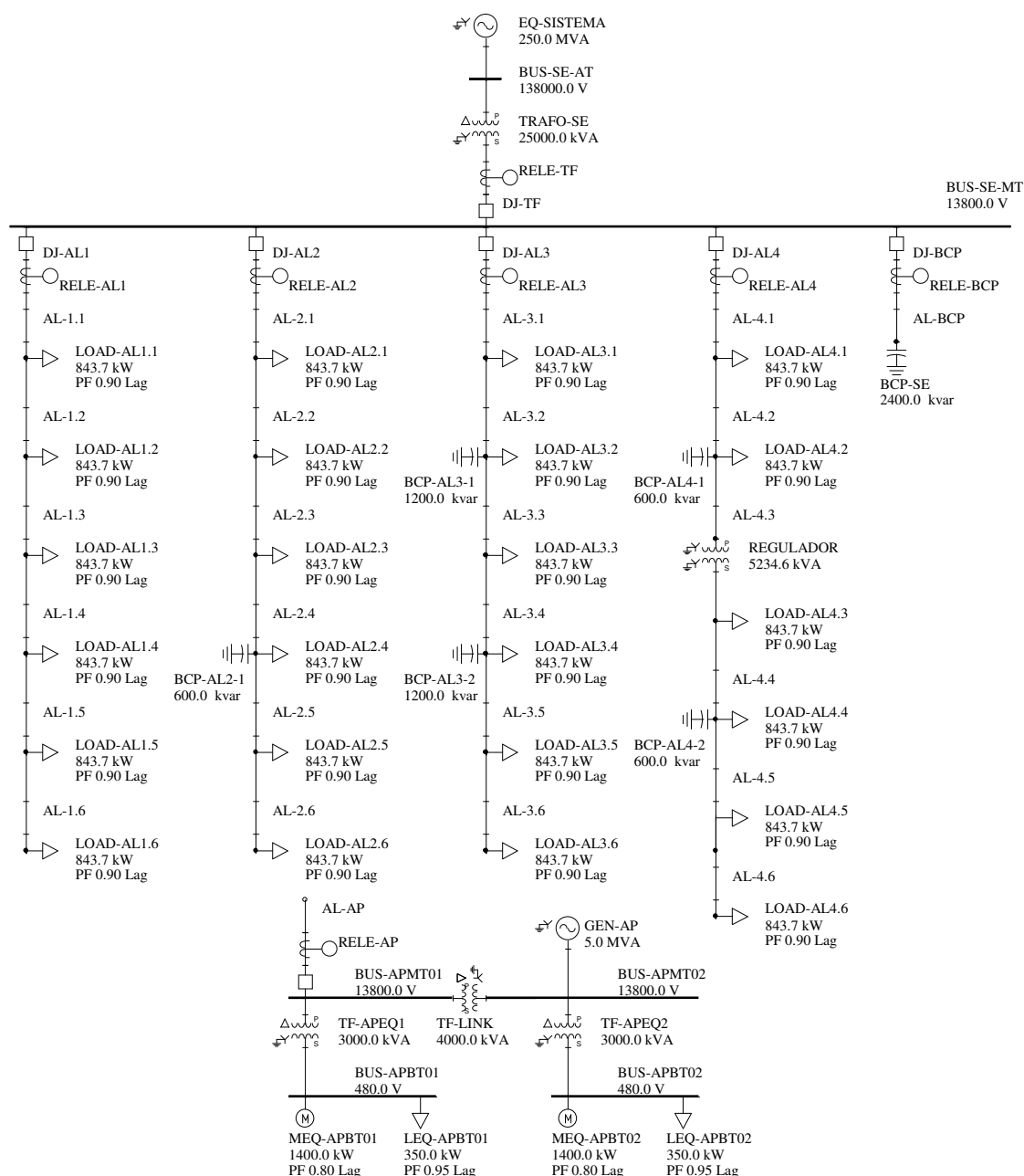


Figura 3 – Sistema elétrico de teste para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

As características técnicas e os parâmetros dos componentes do sistema elétrico estudado estão indicados nas tabelas a seguir. Os dados de entrada no formato do software PTW estão apresentados no Apêndice B.

Tabela 6 – Parâmetros do sistema externo equivalente de 138kV para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

Vn (kV)	138,0
Sn (MVA)	250,0
X " (p.u.) / X/R	0,10 / 10
X2 (p.u.) / X/R	0,10 / 10
X0 (p.u.) / X/R	0,30 / 10

Nota: Valores em p.u. indicados na base do sistema.

Tabela 7 – Características técnicas dos transformadores para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

Descrição	Trafo-SE	Regulador de Tensão	TF-Link	TF-APEQ1 TF-APEQ2
Sn (MVA)	20,0 / 25,0	5,23	3,0 / 4,0	3,0
Vn primário (kV)	138,0	13,8	13,8	13,8
Vn secundário (kV)	13,8	13,8	13,8	0,48
Ligação	delta/estrela	autotrafo	delta/estrela	delta/estrela
Impedância (% / X/R)	8,0 / 22,0	1,5 / 12,8	5,0 / 10,8	5,5 / 6,0
OLTC	sim	sim	não	não
Faixa de ajuste	± 10%	± 10%	-	-
Taps (qdade / %)	± 16 / 0,625%	± 16 / 0,625%	-	-
Banda morta (%)	1,0	1,0	-	-
Tempo (s)	30	30	-	-

Notas:

- 1) O enrolamento delta do transformador de acoplamento (TF-Link) fica do lado da rede externa.
- 2) As impedâncias dos transformadores, quando com dois estágios de ventilação, estão referidas ao estágio inicial (menor potência).

Tabela 8 – Características técnicas dos bancos de capacitores para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

Descrição	BCP-SE	BCP-AL2-1	BCP-AL3-1 BCP-AL3-2	BCP-AL4-1 BCP-AL4-2
Qn (kvar)	2.400	600	1.200	600
Vn (kV)	13,8	13,8	13,8	13,8
Ligação	estrela aterrada	estrela isolada	estrela isolada	estrela isolada
Controle automático	sim	sim	sim	sim
Tipo de controle	por tensão	por horário	por horário	por horário
Tempo (s)	10	-	-	-

Tabela 9 – Características técnicas dos alimentadores para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

Descrição	AL-1	AL-2	AL-3	AL-4
Cabo	4/0 CA	4/0 CA	4/0 CA	4/0 CA
Limite térmico (A)	380	380	380	380
Comprimento total do alimentador (km)	3,0	6,0	8,0	12,0
Parâmetros ( $\Omega/\text{km}$ )				
Rpos.	0,3021	0,3021	0,3021	0,3021
Xpos	0,4091	0,4091	0,4091	0,4091
Rzero	0,4799	0,4799	0,4799	0,4799
Xzero	1,9157	1,9157	1,9157	1,9157

Tabela 10 – Características técnicas das cargas do autoprodutor para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

Cargas não motóricas	
Pn (kW)	350,0
FP	0,95
Cargas motóricas	
Pn (kW)	2.100,0
Vn (V)	480
FP	0,80
EF	90%
FD	60%
X " d	0,1633
X/R	4,9

Nota: Para as cargas motóricas Pn é a potência nominal de saída mecânica, EF é o rendimento e FD é o carregamento do motor.

O sistema elétrico externo, por apresentar potência equivalente bastante superior ao sistema estudado, foi representado como barra infinita, consideradas a reatância e a resistência de curto-circuito correspondentes, e utilizado o modelo *Infinite Bus* da Biblioteca do Software [79].

A geração do autoprodutor foi considerada baseada em geradores síncronos tipo rotor cilíndrico acionados por motores de combustão a gás, solução bastante comum nas instalações de co-geração com menor requisito térmico.

Para a máquina síncrona foi utilizado o modelo *Round Rotor General* da Biblioteca do Software, baseado no Modelo IEEE Tipo 2.2 [67][79], e para o sistema de excitação foi utilizado o modelo *IEEE 1992 Type AC5A* da Biblioteca do Software [68][79], recomendado para aplicações tipo *brushless* onde não são conhecidos os parâmetros de forma detalhada [68].

Para os motores a combustão, quando na operação em ilha, foi usado o modelo *Isochronous Diesel*, da Biblioteca do Software [79], ajustado conforme indicado na

referência [69]. Na operação em paralelo com o sistema externo o modelo isócrono anterior foi acrescido de um *droop* de 0,05.

As cargas em geral foram inicialmente consideradas como tipo potência constante. Os motores equivalentes do autoprodutor, quando representados por modelos dinâmicos, foram considerados do tipo de indução e foi usado o modelo tipo gaiola simples para os acionamentos, com os parâmetros típicos sugeridos na referência [70], e tipo exponencial quadrático para as cargas mecânicas, ambos conforme a Biblioteca do Software [79].

Nas tabelas e figuras a seguir estão descritos os parâmetros e os modelos utilizados para simulação dinâmica do sistema.

Tabela 11 – Parâmetros das máquinas síncronas dos geradores para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

Parâmetro	Sistema Externo	Auto-produtor	Parâmetro	Sistema Externo	Auto-produtor
Ra (p.u.)	0,0100	0,0090	D	-	0,0000
Xd (p.u.)	-	1,4700	T ' d0 (s)	-	2,7000
Xq (p.u.)	-	0,7300	T " d0 (s)	-	0,0140
X ' d (p.u.)	-	0,3030	T ' q0 (s)	-	1,0000
X ' q (p.u.)	-	0,4500	T " q0 (s)	-	0,0600
X " (p.u.)	0,1000	0,2290	S 1.0	-	0,1000
Xl (p.u.)	-	0,1260	S 1.2	-	0,4000
H (s)	-	0,9960			

Nota: Valores em p.u. indicados na base das máquinas.

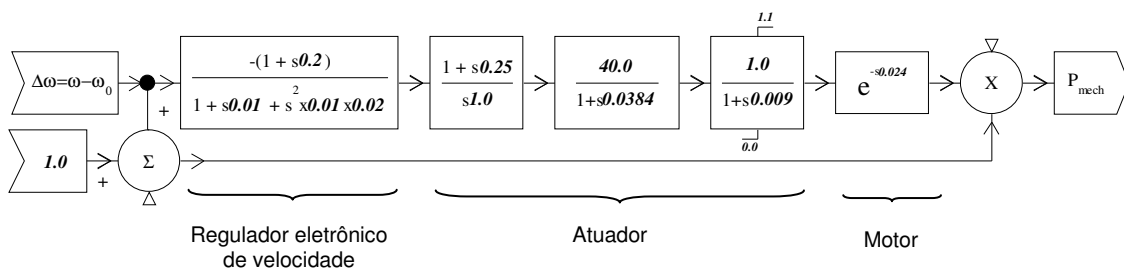


Figura 4 – Modelo do regulador de velocidade isócrono do autoprodutor para o estudo do caso de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

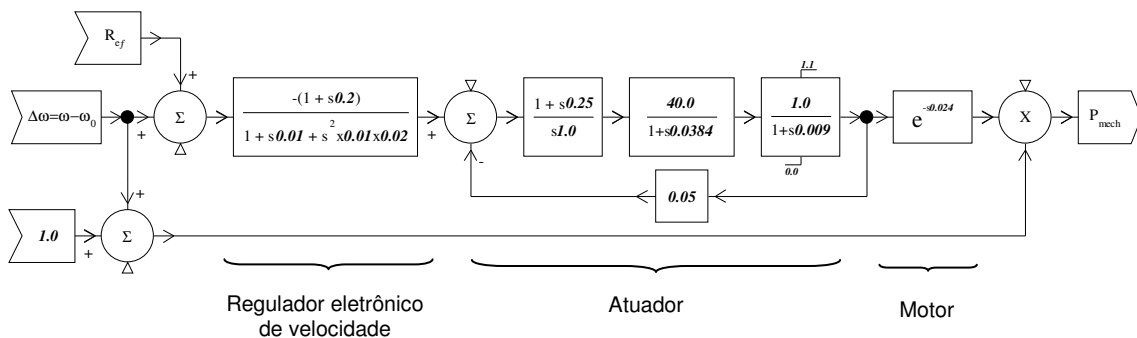


Figura 5 – Modelo do regulador de velocidade com estatismo do autoprodutor para o estudo do caso de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

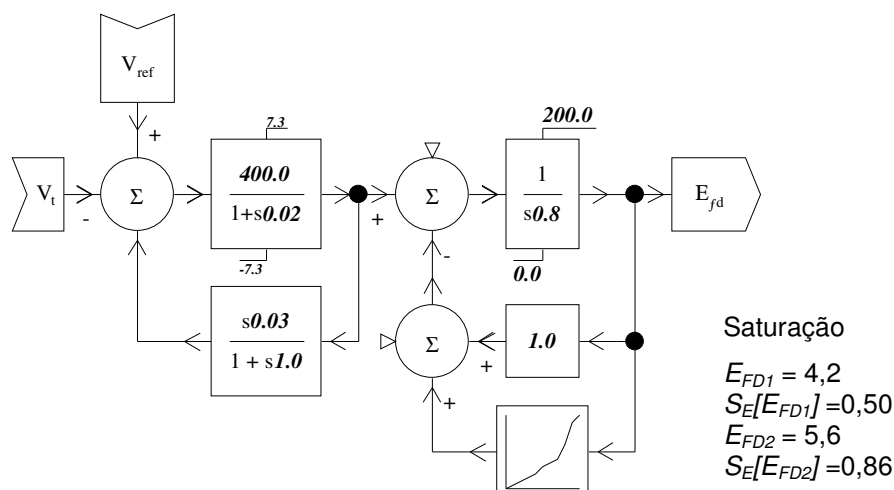


Figura 6 – Modelo e parâmetros do sistema de excitação do autoprodutor para o estudo do caso de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

Tabela 12 – Parâmetros dos motores de indução para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

$R_s$ (p.u.)	0,0310
$X_s$ (p.u.)	0,1000
$R_r$ (p.u.)	0,0180
$X_r$ (p.u.)	0,1800
$X_m$ (p.u.)	3,2000
$H$ (s)	0,7

Nota: Valores em p.u. indicados na base das máquinas.

Para avaliação das respostas do sistema às perturbações simuladas são consideradas as atuações das proteções do sistema de distribuição e da interligação do autoprodutor, cuja descrição é mostrada na Figura 7 e na Figura 8, observadas as definições das funções de proteção conforme a referência [71].

Os ajustes das proteções de sobrecorrente (funções 50, 50GS, 50N, 51, 51GS, 51N, 67 e 67N) estão indicados com os valores de *pickup* de corrente e os tempos ou curvas de tempo de atuação, conforme cada caso. Os ajustes das proteções de tensão (funções 27, 59 e 59N) estão indicados com os valores de *pickup* de tensão e os tempos de atuação. Os ajustes das proteções de frequência (funções 81.U e 81.O) estão indicados com os valores de *pickup* de frequência e os tempos de atuação. Os ajustes da proteção direcional de potência (função 32) estão indicados com os valores de *pickup* de potência e os tempos de atuação. Os ajustes da proteção de verificação de sincronismo (função 25) estão indicados com os valores máximos de diferença de módulo e ângulo das tensões.

As curvas de coordenação com os ajustes das proteções de sobrecorrente de fase e terra correspondentes estão mostradas na Figura 9.



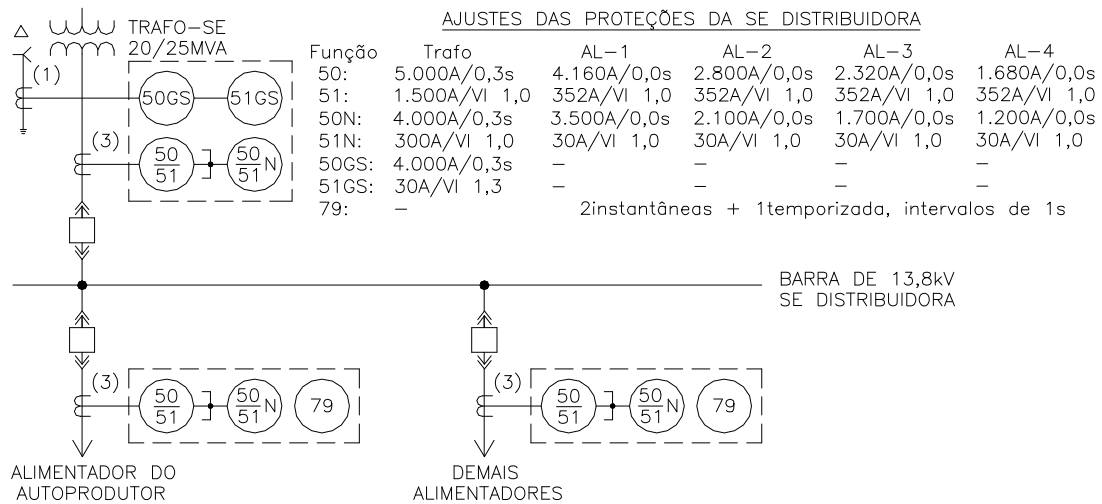


Figura 7 – Esquema típico e ajustes das principais proteções do sistema de distribuição para o estudo do caso de autoproductor de pequeno porte ligado no sistema de média tensão

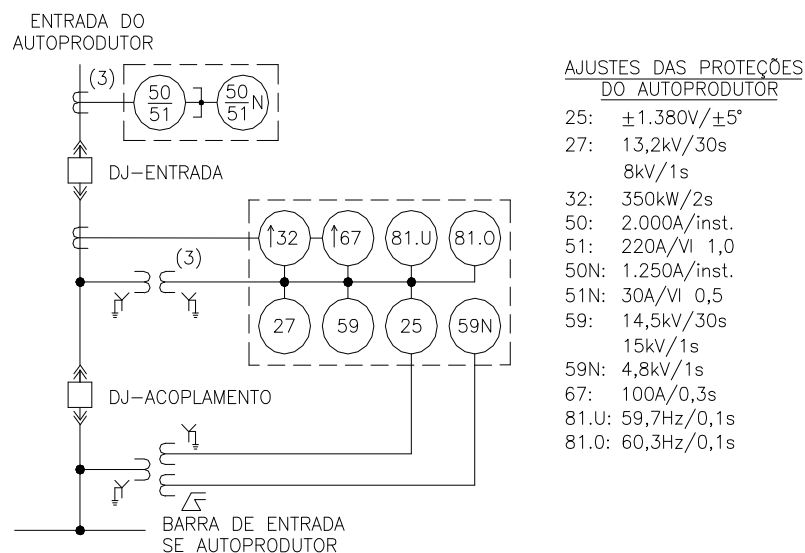


Figura 8 – Esquema típico e ajustes das principais proteções da interligação do autoproductor para o estudo do caso de autoproductor de pequeno porte ligado no sistema de média tensão

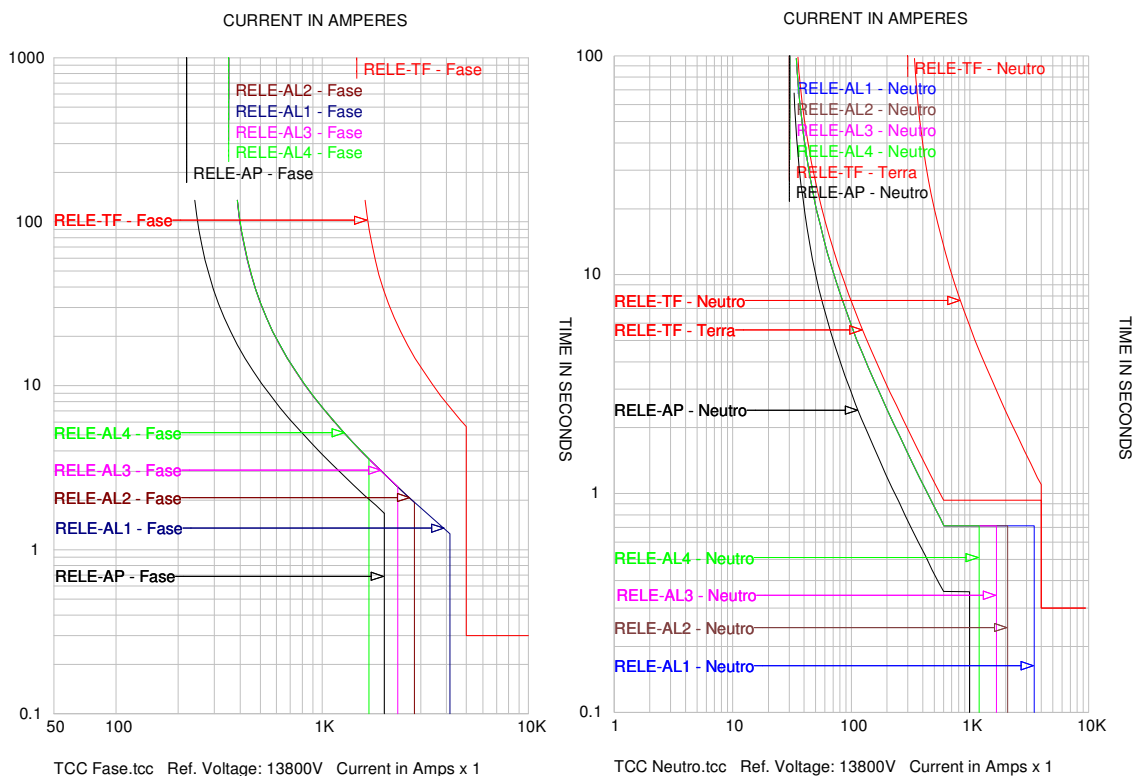


Figura 9 – Curvas de coordenação das proteções de sobrecorrente de fase e terra do sistema de distribuição e da interligação do autoprodutor para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de média tensão

### 3.2 METODOLOGIA E PREMISSAS PARA AS SIMULAÇÕES

Para a simulação e avaliação do sistema serão adotadas as premissas a seguir listadas.

Para o regime de funcionamento do sistema externo ao autoprodutor, serão consideradas as seguintes condições operativas:

- carga pesada como informado no caso base, carga média como 50% das cargas informadas no caso base e carga leve como 25% das cargas informadas no caso base;
- tensão no sistema equivalente de 138kV de 0,97p.u. em carga pesada, 1,0p.u. em carga média e 1,02p.u. em carga leve;
- comutadores de taps do transformador na subestação e do regulador de tensão ajustados automaticamente nas simulações de fluxo de potência e de curto-circuito;
- banco de capacitores da subestação ligado apenas se excedido o limite de controle de tensão da barra pelo OLTC do transformador;
- bancos de capacitores das rede de distribuição ligados apenas no horário de carga pesada.

Para o regime de funcionamento do autoprodutor, serão consideradas as seguintes condições operativas:

- carga pesada como informado no caso base, carga média como 60% das cargas informadas no caso base e carga leve como 40% das cargas informadas no caso base;
- condições de carregamento do autoprodutor não necessariamente coincidentes com as condições de carregamento do sistema externo;
- controle automático de tensão dos geradores quando funcionando em paralelo com o sistema externo, para controle do fator de potência na interligação (fator de potência unitário, sem intercâmbio de energia reativa) ou para controle da tensão terminal (1,0pu), conforme definido para cada caso;
- quando exportando energia, considerada a capacidade nominal da geração do autoprodutor;
- para os limites de potência ativa e reativa da máquina consideradas as potências equivalentes para o fator de potência nominal de 0,8;
- os taps primários dos transformadores abaixadores (TF-APEQ1 e TF-APEQ2) ajustados para -2,5%.

As diferentes condições de funcionamento do sistema, de acordo com o nível de carga consumida no sistema externo e de carga consumida internamente no autoprodutor, estão indicadas na Figura 10.

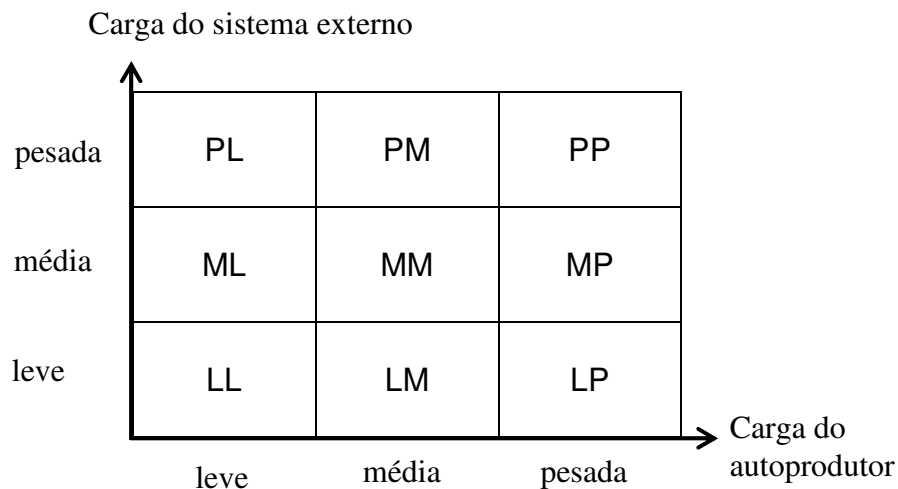


Figura 10 – Níveis de carregamento do sistema externo e do autoprodutor para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de média tensão

Nos estudos de fluxo potência serão consideradas como adequadas para regime contínuo as tensões calculadas na faixa entre 95% e 105% e para regime temporário de emergência as tensões calculadas na faixa entre 90% e 105%. Estas tensões seguem os limites estabelecidos nos Procedimentos de Redes, conforme a Tabela 3, bem como refletem a prática adotada por concessionárias de distribuição para avaliação de seus sistemas de média tensão.

Nos cálculos de curto-circuito será considerada a tensão pré-falta no ponto calculada no fluxo de potência do caso correspondente, incluindo os efeitos dos taps dos transformadores. Serão calculados os valores simétricos subtransitórios das correntes de curto-circuito trifásico e monofásico.

Nas simulações de estabilidade será utilizado o modelo com estatismo para os casos com funcionamento em paralelo com o sistema externo, mesmo que com a abertura da interligação durante a simulação. O modelo isócrono será usado nas simulações com funcionamento em ilha desde seu início.

### **Serão simulados os seguintes casos de fluxo de potência:**

#### Autoprodutor desconectado do sistema externo

Caso 1 – Condição normal de funcionamento do sistema e do autoprodutor, com a interligação entre eles aberta

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de carga leve, média e pesada.

Caso 2 – Condição de funcionamento do sistema em contingência, sem o autoprodutor

Caso 2.1 – OLTC do trafo bloqueado na posição central

Caso 2.2 – Banco de capacitores BCP-AL2-1 indisponível

Caso 2.3 – Banco de capacitores BCP-AL3-1 indisponível

Caso 2.4 – Banco de capacitores BCP-AL3-2 indisponível

Caso 2.5 – Banco de capacitores BCP-AL4-1 indisponível

Caso 2.6 – Banco de capacitores BCP-AL4-2 indisponível

Caso 2.7 – Regulador de tensão no Alimentador 4 indisponível

Nota: Simuladas para os Casos 2.1 e 2.7 as condições de carga média e pesada e para os demais Casos apenas a condição de carga pesada.

#### Autoprodutor em paralelo com o sistema externo

Caso 3 – Condição normal de funcionamento do sistema em regime de carga pesada, com o autoprodutor em paralelo, sem exportação de energia e funcionando no modo de controle da tensão terminal

Caso 3.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 3.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 3.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 3.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga leve, média e pesada.

Caso 4 – Condição normal de funcionamento do sistema em regime de carga pesada, com o autoprodutor em paralelo, sem exportação do excedente de energia e funcionando no modo de controle do fator de potência

Caso 4.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 4.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 4.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 4.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga leve, média e pesada.

Caso 5 – Condição normal de funcionamento do sistema em regime de carga pesada, com o autoprodutor em paralelo, com exportação do excedente de energia e funcionando no modo de controle da tensão terminal

Caso 5.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 5.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 5.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 5.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga leve, média e pesada.

Caso 6 – Condição de funcionamento do sistema em contingência em regime de carga pesada, com o autoprodutor em paralelo e, com exportação do excedente de energia e funcionando no modo de controle da tensão terminal

Caso 6.1 – OLTC do trafo bloqueado na posição central e o autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 6.2 – OLTC do trafo bloqueado na posição central e o autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 6.3 – OLTC do trafo bloqueado na posição central e o autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 6.4 – OLTC do trafo bloqueado na posição central e o autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Caso 6.5 – Banco de capacitores BCP-AL2-1 indisponível e o autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 6.6 – Banco de capacitores BCP-AL3-1 indisponível e o autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 6.7 – Banco de capacitores BCP-AL3-2 indisponível e o autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 6.8 – Banco de capacitores BCP-AL4-1 indisponível e o autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Caso 6.9 – Banco de capacitores BCP-AL4-2 indisponível e o autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 6.10 – Regulador de tensão no Alimentador 4 indisponível e o autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga leve, média e pesada.

#### Autoprodutor desconectado do sistema externo mas suprindo o alimentador onde ligado

Caso 7 – Condição de funcionamento do autoprodutor em ilha suprindo o alimentador onde ligado em regime de carga média

Caso 7.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 7.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 7.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 7.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga leve e média.

Caso 8 – Condição de funcionamento do autoprodutor em ilha suprindo o alimentador onde ligado em regime de carga leve

Caso 8.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 8.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 8.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 8.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga média e leve

#### Autoprodutor conectado ao sistema externo, mas sem geração local

Caso 9 – Condição normal de funcionamento do sistema em regime de carga leve, suprindo o autoprodutor em condição de perda de geração local

Caso 9.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 9.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 9.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 9.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga média e pesada.

#### **Serão simulados os seguintes casos de curto-circuito:**

Caso 1 – Curto-circuito em todas as barras para a condição normal de funcionamento do sistema e do autoprodutor, com a interligação entre eles aberta

Nota: Simuladas para cada Caso as condições em carga leve, média e pesada.

Caso 2 – Curto-circuito em todas as barras para a condição normal de funcionamento do sistema em regime de carga pesada, com o autoprodutor em paralelo, também em regime de carga pesada e sem exportação de energia

Caso 2.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 1

Caso 2.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 1

Caso 2.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 1

Caso 2.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 1

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor no modo de controle do fator de potência e da tensão terminal.

Caso 3 – Correntes de curto-circuito no alimentador do autoprodutor para defeito na saída de alimentador adjacente para a condição normal de funcionamento do sistema

em regime de carga pesada, com o autoprodutor em paralelo, também em regime de carga pesada e sem exportação de energia

Caso 3.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 1

Caso 3.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 1

Caso 3.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 1

Caso 3.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 1

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor no modo de controle do fator de potência e da tensão terminal.

Caso 4 – Correntes de curto-circuito no alimentador do autoprodutor para defeito na extremidade do alimentador adjacente para a condição normal de funcionamento do sistema em regime de carga pesada, com o autoprodutor em paralelo, também em regime de carga pesada e sem exportação de energia

Caso 4.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 4.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 4.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 4.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor no modo de controle do fator de potência e da tensão terminal.

### **Serão simulados os seguintes casos de estabilidade transitória:**

#### Autoprodutor desconectado do sistema externo

Caso 1 – Eliminação de falta trifásica e monofásica para o autoprodutor funcionando desconectado do sistema externo, regime de carga pesada

Caso 1.1 – Falta na barra de 480V do lado da rede do transformador de acoplamento (BUS-APBT01)

Caso 1.2 – Falta na barra de 13,8kV do lado da rede do transformador de acoplamento (BUS-APMT01)

Caso 1.3 – Falta na barra de 480V do lado do gerador do transformador de acoplamento (BUS-APBT02)

Caso 1.4 – Falta na barra de 13,8kV do lado do gerador do transformador de acoplamento (BUS-APMT02)

Nota: Simulados para cada Caso os tempos de eliminação da falta de 150ms, 400ms e 800ms.

#### Autoprodutor em paralelo com o sistema externo

Caso 2 – Eliminação de falta trifásica e monofásica para o autoprodutor em paralelo com o sistema externo, ambos em regime de carga pesada, sem exportação de energia, previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência, ligado no alimentador 1, posição 1

Caso 2.1 – Falta na barra de 480V do lado da rede do transformador de acoplamento (BUS-APBT01)

Caso 2.2 – Falta na barra de 13,8kV do lado da rede do transformador de acoplamento (BUS-APMT01)

Caso 2.3 – Falta na barra de 480V do lado do gerador do transformador de acoplamento (BUS-APBT02)

Caso 2.4 – Falta na barra de 13,8kV do lado do gerador do transformador de acoplamento (BUS-APMT02)

Caso 2.5 – Falta na barra de 13,8kV da subestação distribuidora

Caso 2.6 – Falta no alimentador 2, na posição 6

Nota: Simulados para cada Caso os tempos de eliminação da falta de 150ms, 400ms e 800ms.

Caso 3 – Eliminação de falta trifásica e monofásica para o autoprodutor em paralelo com o sistema externo, ambos em regime de carga pesada, sem exportação de energia, previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência, ligado no alimentador 4, posição 6

Caso 3.1 – Falta na barra de 480V do lado da rede do transformador de acoplamento (BUS-APBT01)

Caso 3.2 – Falta na barra de 13,8kV do lado da rede do transformador de acoplamento (BUS-APMT01)

Caso 3.3 – Falta na barra de 480V do lado do gerador do transformador de acoplamento (BUS-APBT02)

Caso 3.4 – Falta na barra de 13,8kV do lado do gerador do transformador de acoplamento (BUS-APMT02)

Caso 3.5 – Falta na barra de 13,8kV da subestação distribuidora

Caso 3.6 – Falta no alimentador 2, na posição 6

Nota: Simulados para cada Caso os tempos de eliminação da falta de 150ms, 400ms e 800ms.

#### Autoprodutor desconectado do sistema externo

Caso 4 – Variação da carga para o autoprodutor funcionando desconectado do sistema externo

Caso 4.1 – regime de carga média e entrada de bloco de carga de 50% da carga total da barra de 480V do lado da rede do transformador de acoplamento (BUS-APBT01)

Caso 4.2 – regime de carga média e entrada de bloco de carga de 50% da carga total da barra de 480V do lado do gerador do transformador de acoplamento (BUS-APBT02)

Caso 4.3 – regime de carga pesada e perda da carga total da barra de 480V do lado da rede do transformador de acoplamento (BUS-APBT01)

Caso 4.4 – regime de carga pesada e perda total da carga motórica da unidade



### Autoprodutor em paralelo com o sistema externo

Caso 5 – Variação da carga para o autoprodutor em paralelo com o sistema externo em regime de carga pesada, sem exportação de energia, previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência, ligado no alimentador 4, posição 6

Caso 5.1 – regime de carga média e entrada de bloco de carga de 50% da carga total da barra de 480V do lado da rede do transformador de acoplamento (BUS-APBT01)

Caso 5.2 – regime de carga média e entrada de bloco de carga de 50% da carga total da barra de 480V do lado do gerador do transformador de acoplamento (BUS-APBT02)

Caso 5.3 – regime de carga pesada e perda da carga total da barra de 480V do lado da rede do transformador de acoplamento (BUS-APBT01)

Caso 5.4 – regime de carga pesada e perda total da carga motórica da unidade

### Autoprodutor desconectado do sistema externo mas suprindo o alimentador onde ligado

Caso 6 – Perda da interligação com o sistema externo em regime de carga pesada e funcionamento do autoprodutor em ilha suprindo o alimentador onde ligado

Caso 6.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 6.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 6.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 6.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Considerado antes da abertura da interligação o funcionamento do autoprodutor sem exportação de energia e previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência e simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga leve, média e pesada.

Caso 7 – Perda da interligação com o sistema externo em regime de carga pesada e funcionamento do autoprodutor em ilha suprindo o alimentador onde ligado, com religamento automático em 1s

Caso 7.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 7.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 7.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 7.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Considerado antes da abertura da interligação o funcionamento do autoprodutor sem exportação de energia e previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência e simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga leve, média e pesada.

Caso 8 – Perda da interligação com o sistema externo em regime de carga média e funcionamento do autoprodutor em ilha suprindo o alimentador onde ligado

Caso 8.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 8.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 8.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 8.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Considerado antes da abertura da interligação o funcionamento do autoprodutor sem exportação de energia e previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência e simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga leve, média e pesada.

Caso 9 – Perda da interligação com o sistema externo em regime de carga média e funcionamento do autoprodutor em ilha suprindo o alimentador onde ligado, com religamento automático em 1s

Caso 9.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 9.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 9.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 9.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Considerado antes da abertura da interligação o funcionamento do autoprodutor sem exportação de energia e previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência e simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga leve, média e pesada.

Caso 10 – Perda da interligação com o sistema externo em regime de carga leve e funcionamento do autoprodutor em ilha suprindo o alimentador onde ligado

Caso 10.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 10.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 10.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 10.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

Nota: Considerado antes da abertura da interligação o funcionamento do autoprodutor sem exportação de energia e previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência e simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga leve, média e pesada.

Caso 11 – Perda da interligação com o sistema externo em regime de carga leve e funcionamento do autoprodutor em ilha suprindo o alimentador onde ligado, com religamento automático em 1s

Caso 11.1 – Autoprodutor ligado no alimentador 1, posição 6

Caso 11.2 – Autoprodutor ligado no alimentador 2, posição 6

Caso 11.3 – Autoprodutor ligado no alimentador 3, posição 6

Caso 11.4 – Autoprodutor ligado no alimentador 4, posição 6

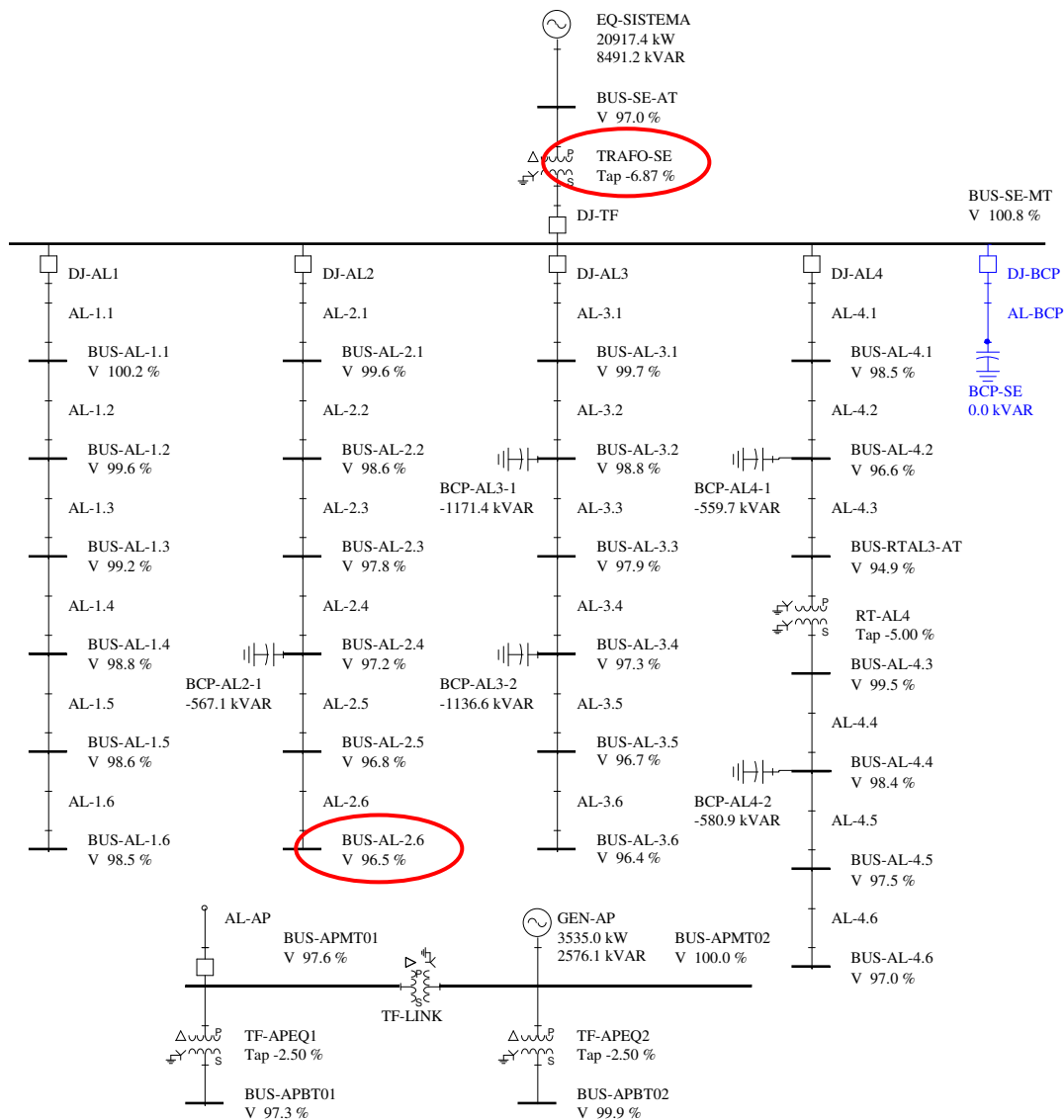
Nota: Considerado antes da abertura da interligação o funcionamento do autoprodutor sem exportação de energia e previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência e simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor em carga leve, média e pesada.

### **3.3 SIMULAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Na sequência são apresentados e discutidos os principais resultados das simulações de fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade desenvolvidas em conformidade com o descrito no subitem 3.2. Para evitar sobrecarregar o texto, serão apresentados os resultados mais significativos de cada Caso, tornando desta forma a discussão mais fluida.

#### **3.3.1 Avaliações de Fluxo de Potência**

O sistema em condição normal de funcionamento antes da conexão do autoprodutor, conforme mostrado para o regime de carga pesada na Figura 11, apresenta níveis adequados de tensão em todas as barras, mostrando que os equipamentos de controle de tensão instalados na rede de distribuição estão funcionando de modo satisfatório. Com relação ao autoprodutor, os taps primários dos transformadores abaixadores TF-APEQ1 e TF-APEQ1 foram ajustados para -2,5% para garantir tensão mais adequada para os respectivos sistemas de baixa tensão, uma vez que haverá sempre uma das barras de 480V alimentada pelo transformador de link em série com o transformador abaixador.



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 11 – Tensões calculadas para o Caso 1 em carga pesada do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

O sistema em condição de contingência de funcionamento antes da conexão do autoprodutor tem o seu desempenho fortemente influenciado pelo regime de carga. Para o regime de carga leve os níveis de tensão resultaram adequados para todas as contingências estudadas e para o regime de carga média, mesmo a contingência mais crítica, a indisponibilidade do OLTC do transformador da subestação distribuidora, foi adequadamente contornada com a entrada do banco de capacitores da subestação. Para o regime de carga pesada, com exceção da indisponibilidade do banco de capacitores BCP-AL4-1, as contingências estudadas comprometeram os níveis de tensão do sistema, sendo a indisponibilidade do OLTC do transformador da subestação distribuidora, mostrada na Figura 12, a contingência mais crítica.

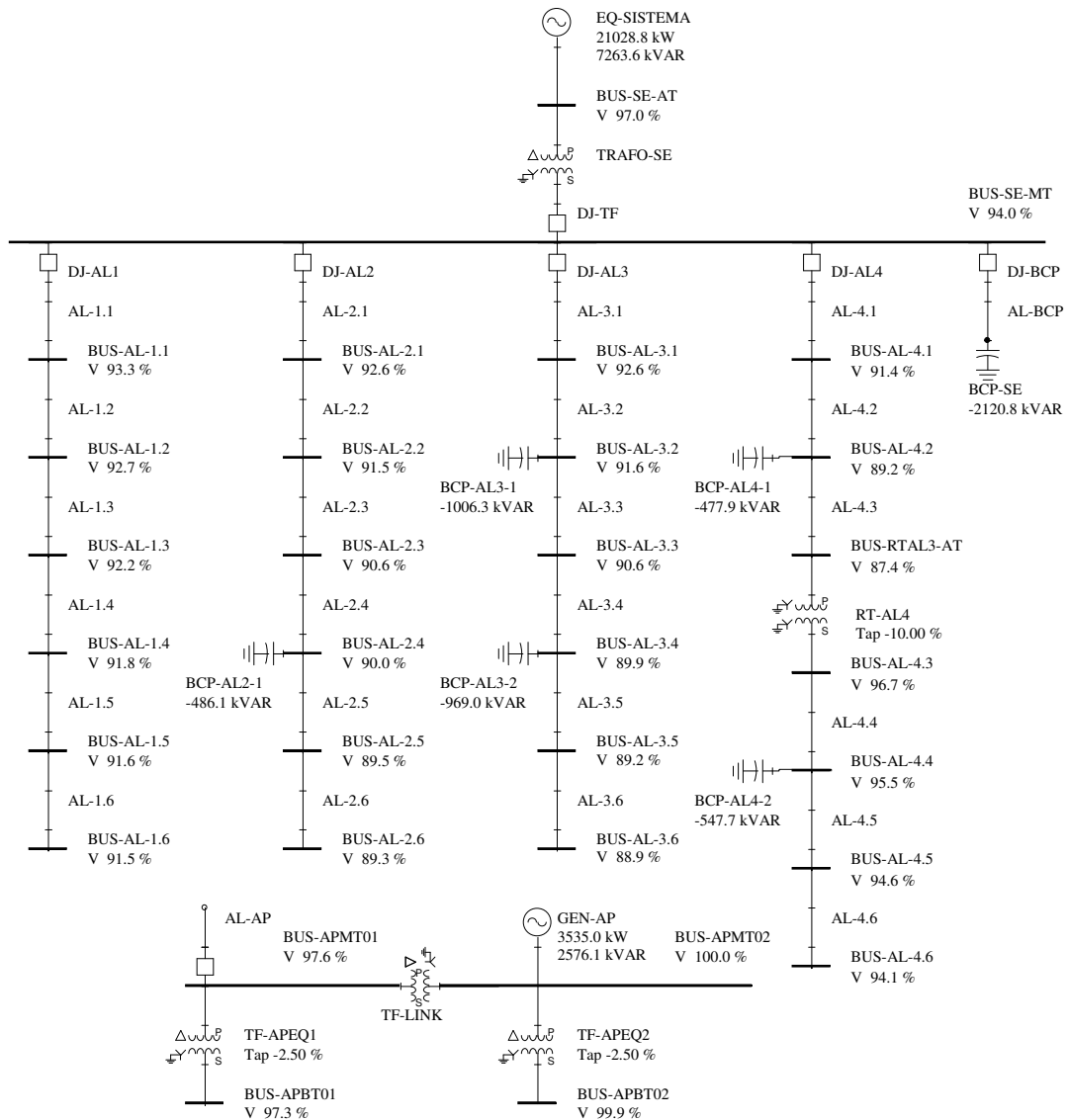
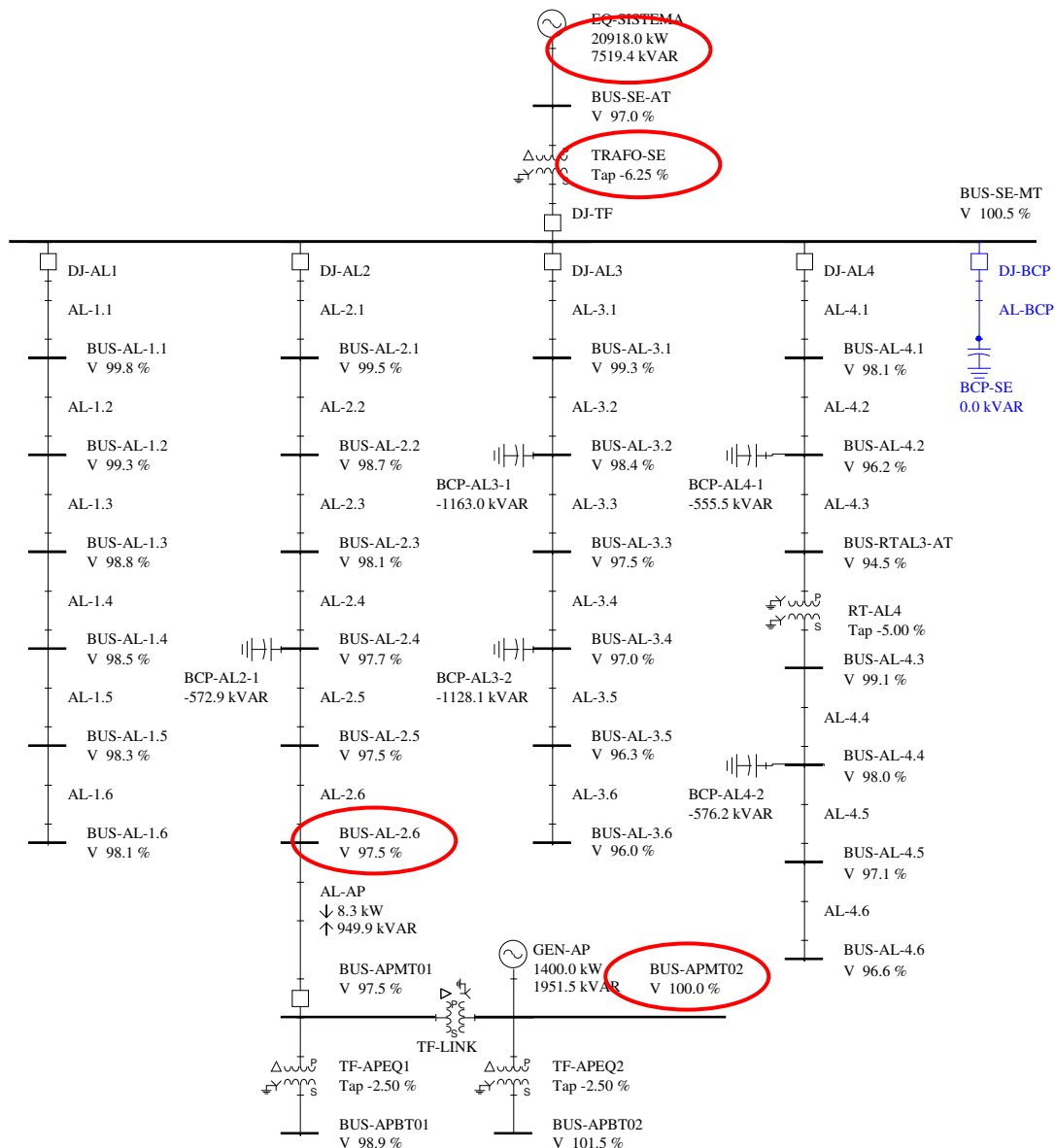


Figura 12 – Tensões calculadas para o Caso 2.1 em carga pesada do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

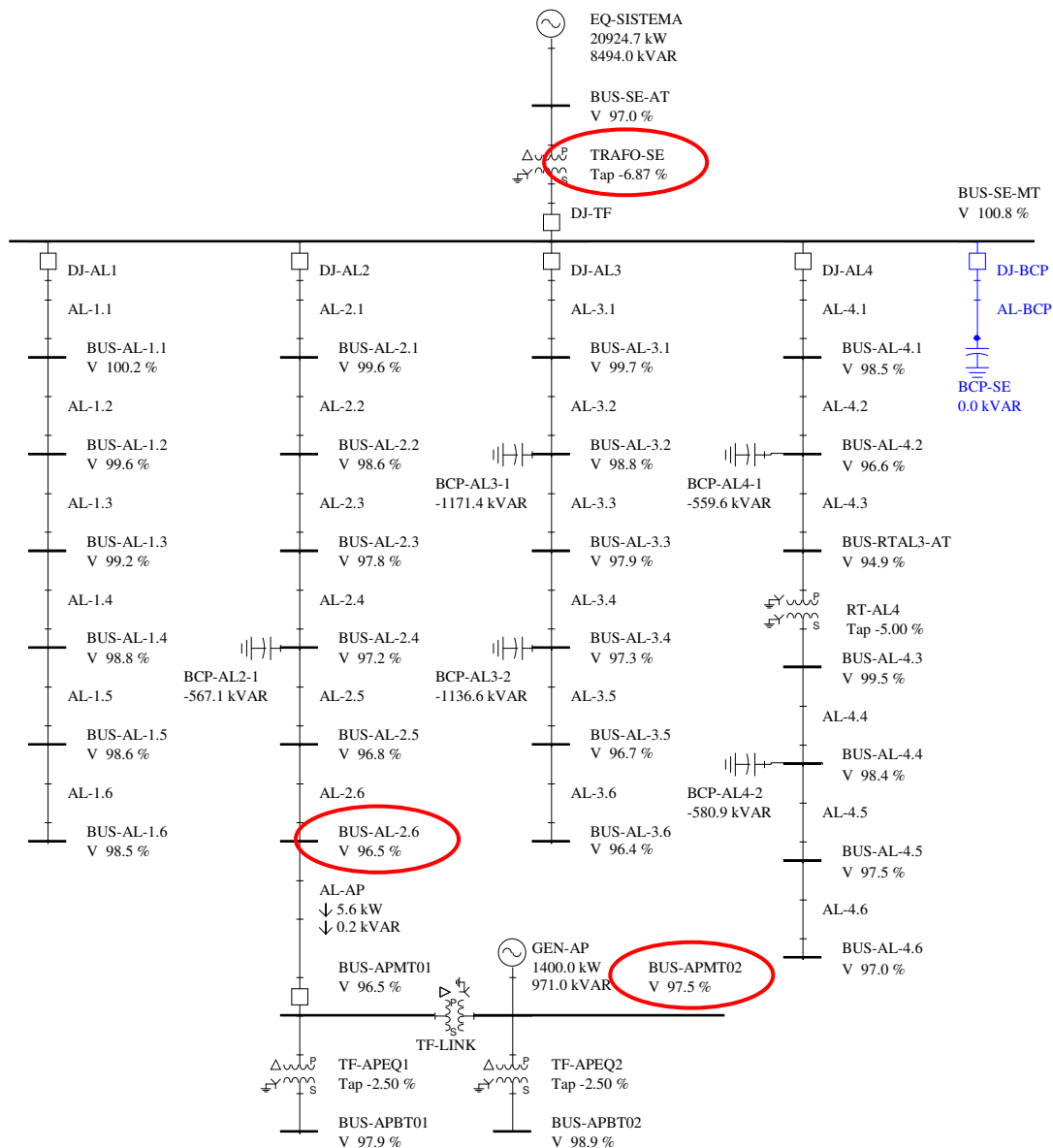
A interligação do autoprodutor em paralelo com o sistema externo de distribuição sem exportação de energia excedente e funcionamento no modo de controle da tensão terminal, faz com que haja injeção ou absorção de potência reativa do sistema. Se a tensão da barra onde o autoprodutor for conectado for menor do que a tensão da barra de entrada do autoprodutor, haverá injeção de potência reativa no sistema e, conseqüentemente, se a tensão da barra onde o autoprodutor, BUS-APMT01, for conectado for maior do que a tensão da barra de entrada do autoprodutor haverá absorção de potência reativa do sistema. Os efeitos destas injeções ou absorções de potência reativa, porém, podem ser eventualmente mascarados pela ação dos comutadores sob carga dos transformadores, de acordo com os limites das bandas mortas conforme cada caso. A Figura 13 mostra estes efeitos para a conexão do autoprodutor funcionando em carga leve na posição 6 do alimentador 2 com o sistema funcionando em carga pesada. Houve melhoria da tensão na barra local do sistema (de 96,5% antes para 97,5% depois da conexão do autoprodutor), apesar da mudança do tap do transformador da subestação (de -6,87% para -6,25%).



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 13 – Tensões calculadas para o Caso 3.2 com autoprodutor em carga leve para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

A interligação do autoprodutor em paralelo com o sistema externo de distribuição sem exportação de energia excedente e funcionamento no modo de controle do fator de potência na interligação, faz com que haja alteração na tensão terminal do gerador. Se a tensão da barra onde o autoprodutor for conectado for menor do que a tensão da barra de entrada do autoprodutor, BUS-APMT01, haverá redução da tensão terminal do gerador e, conseqüentemente, se a tensão da barra onde o autoprodutor for conectado for maior do que a tensão da barra de entrada do autoprodutor, haverá elevação da tensão terminal do gerador. Desta forma não há influência do autoprodutor no sistema de distribuição externo. A Figura 14 mostra estes efeitos para a conexão do autoprodutor funcionando em carga leve na posição 6 do alimentador 2 com o sistema funcionando em carga pesada. Não houve variação da tensão na barra local do sistema, BUS-AL-2.6, mas a tensão terminal do gerador foi reduzida (de 100% antes para 97,5% depois da conexão do autoprodutor).



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 14 – Tensões calculadas para o Caso 4.2 com autoprodutor em carga leve para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

A interligação do autoprodutor em paralelo com o sistema externo de distribuição com exportação de energia excedente possibilita melhoria geral do sistema, com melhoria dos níveis de tensão e redução das perdas. O funcionamento no modo de controle da tensão terminal faz com que haja injeção ou absorção de potência reativa do sistema. Os efeitos sobre a tensão do sistema, porém, podem ser eventualmente “mascarados” pela ação dos comutadores sob carga dos transformadores, de acordo com os limites das bandas mortas conforme cada caso. A Figura 15 mostra estes efeitos para a conexão do autoprodutor funcionando em carga leve na posição 6 do alimentador 2 com o sistema funcionando em carga pesada. Houve melhoria da tensão na barra local do sistema (de 96,5% antes para 98,5% depois da conexão do autoprodutor), apesar da mudança do tap do transformador da subestação (de -6,87% para -6,25%). Houve também redução das perdas no sistema em 77,2kW, valor obtido da comparação da soma da potência total injetada pelo sistema externo e pelo autoprodutor neste Caso 5.2 (18.240,8kW +





inadequados. A Figura 16 mostra estes efeitos para a conexão do autoprodutor funcionando em carga leve na posição 6 do alimentador 2 com o sistema funcionando em carga pesada e sem o OLTC no transformador da subestação. Houve melhoria em geral da tensão do sistema, mas insuficiente para caracterizar a condição de funcionamento como adequada.

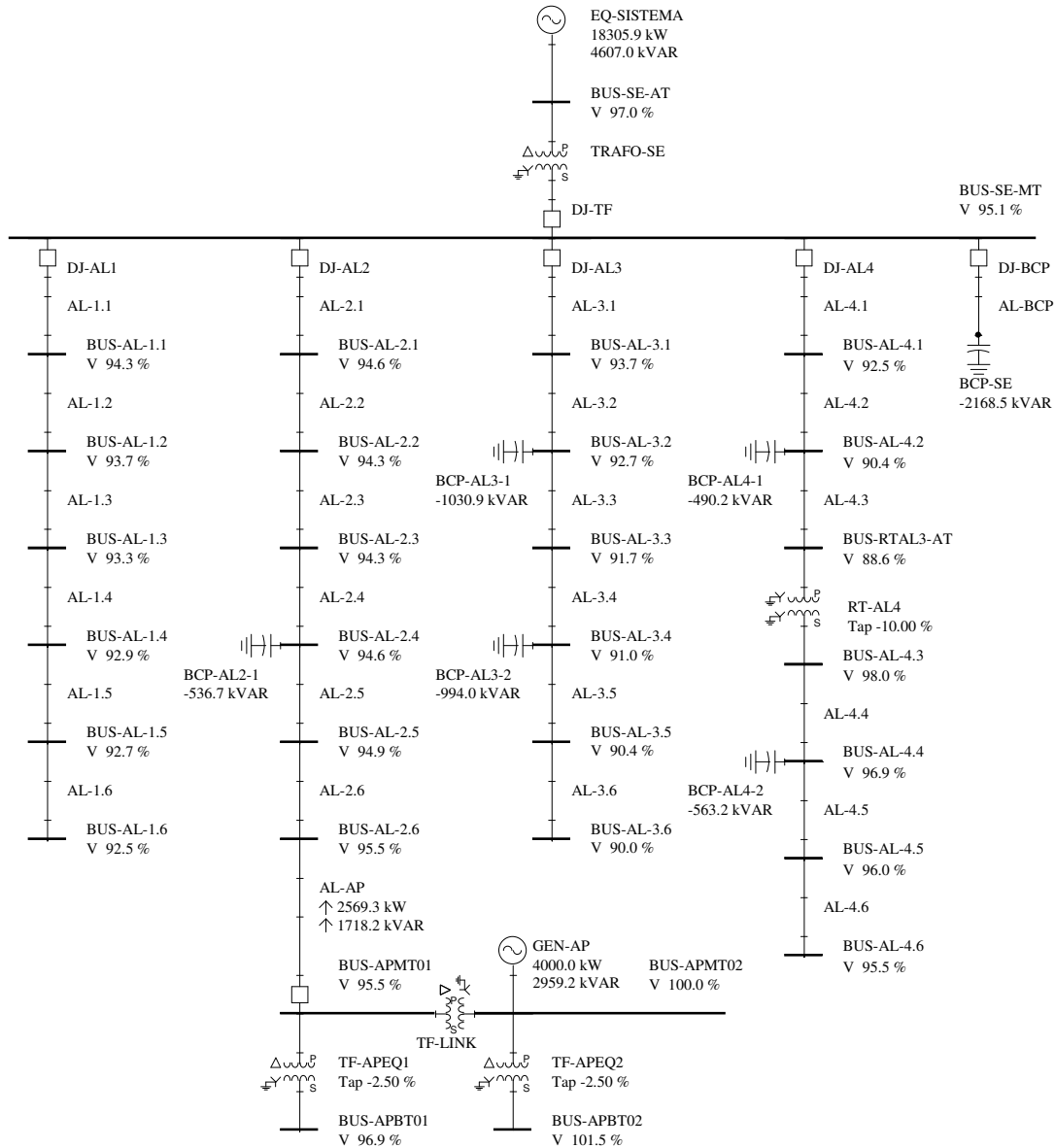
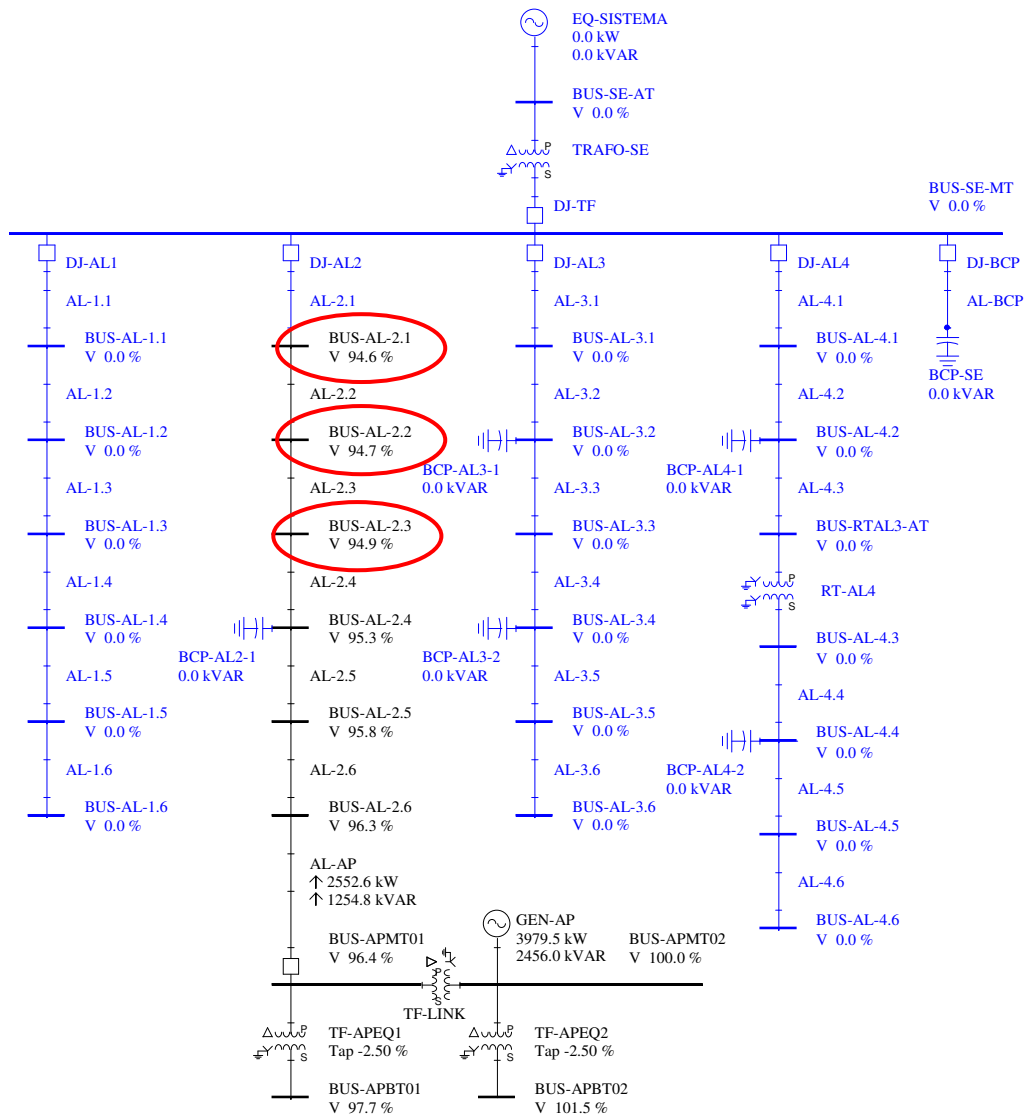


Figura 16 – Tensões calculadas para o Caso 6.1 com autoprodutor em carga leve para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

Para o sistema de distribuição externo em regime de carga média o suprimento em modo ilha ao alimentador onde conectado o autoprodutor, desde que este esteja funcionando em regime de carga leve, revela-se viável, apesar de ligeiro comprometimento dos níveis mais adequados de tensão, mas mantidos o limite para condição emergencial de 93%. Se o autoprodutor estiver funcionando em regime de carga média não é viável suprir o alimentador onde conectado também em regime de carga média, porque isto implicaria em sobrecarga do gerador em cerca de 12%. A

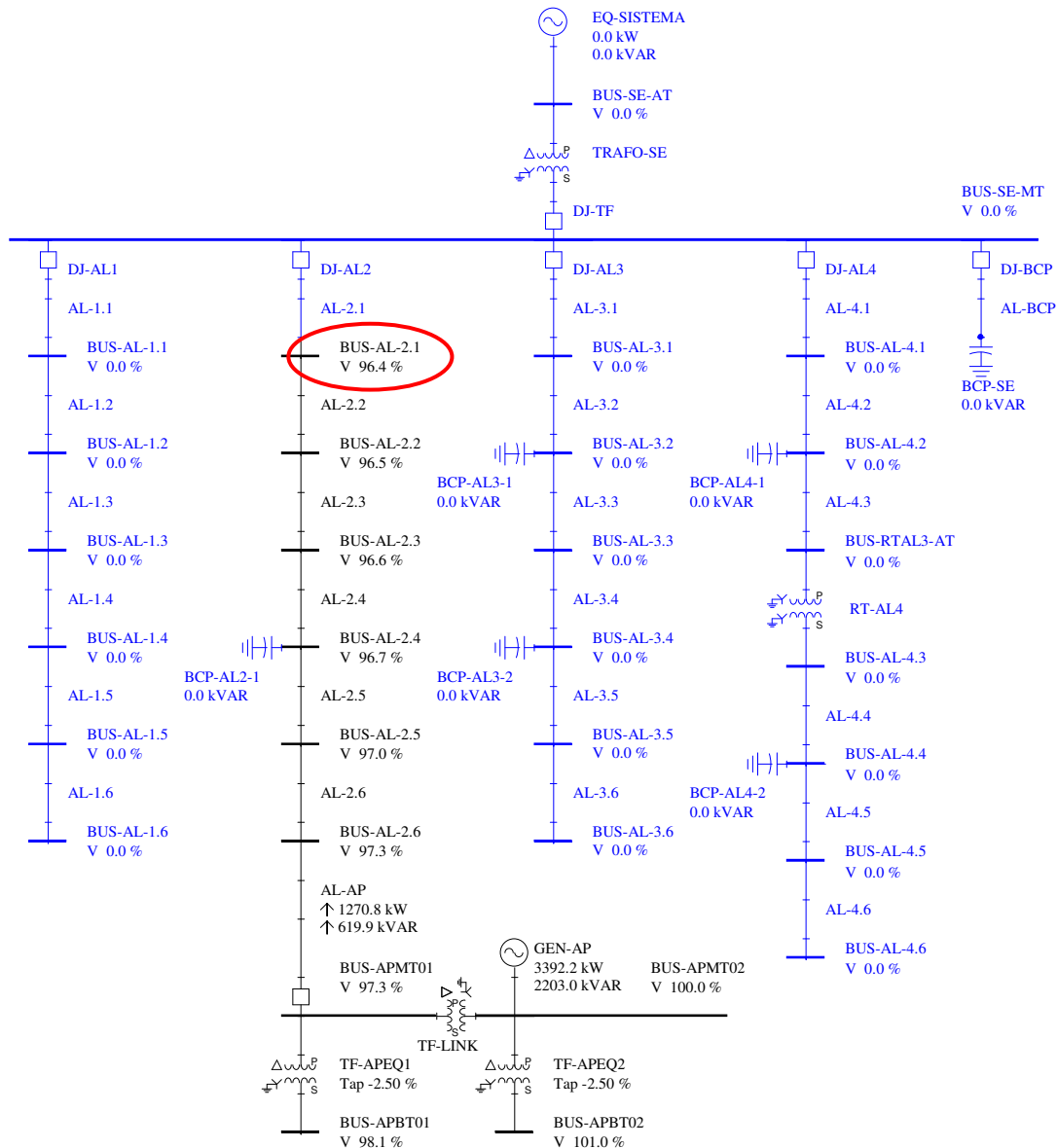
Figura 17 mostra o autoprodutor funcionando em carga leve e suprindo em modo ilha o alimentador 2, este por sua vez em regime de carga média.



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 17 – Tensões calculadas para o Caso 7.2 com autoprodutor em carga leve para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

Para o sistema de distribuição externo em regime de carga leve o suprimento em modo ilha ao alimentador onde conectado o autoprodutor, mesmo que este esteja funcionando em regime de carga média, revela-se viável, mantidos de modo geral os níveis adequados de tensão e com o carregamento do gerador em cerca de 81%. A Figura 18 mostra o autoprodutor funcionando em carga média e suprindo em modo ilha o alimentador 2, este por sua vez em regime de carga leve.



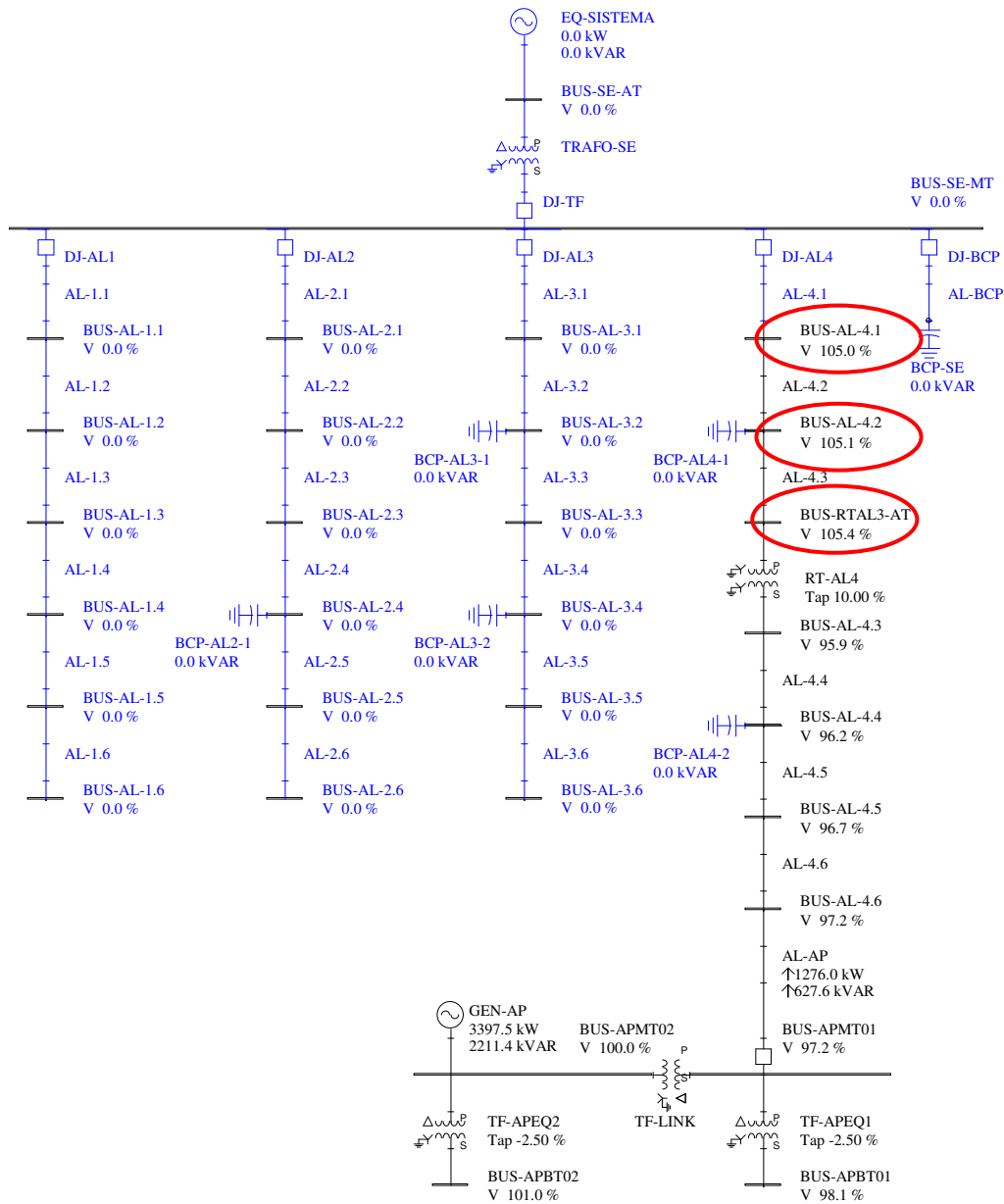
Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 18 – Tensões calculadas para o Caso 8.2 com autoprodutor em carga média para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

Ainda para o sistema de distribuição externo em regime de carga leve e o suprimento em modo ilha ao alimentador onde conectado o autoprodutor, este último funcionando em regime de carga média e ligado no alimentador 4, foram observadas sobretensões no trecho entre o regulador de tensão e a subestação.

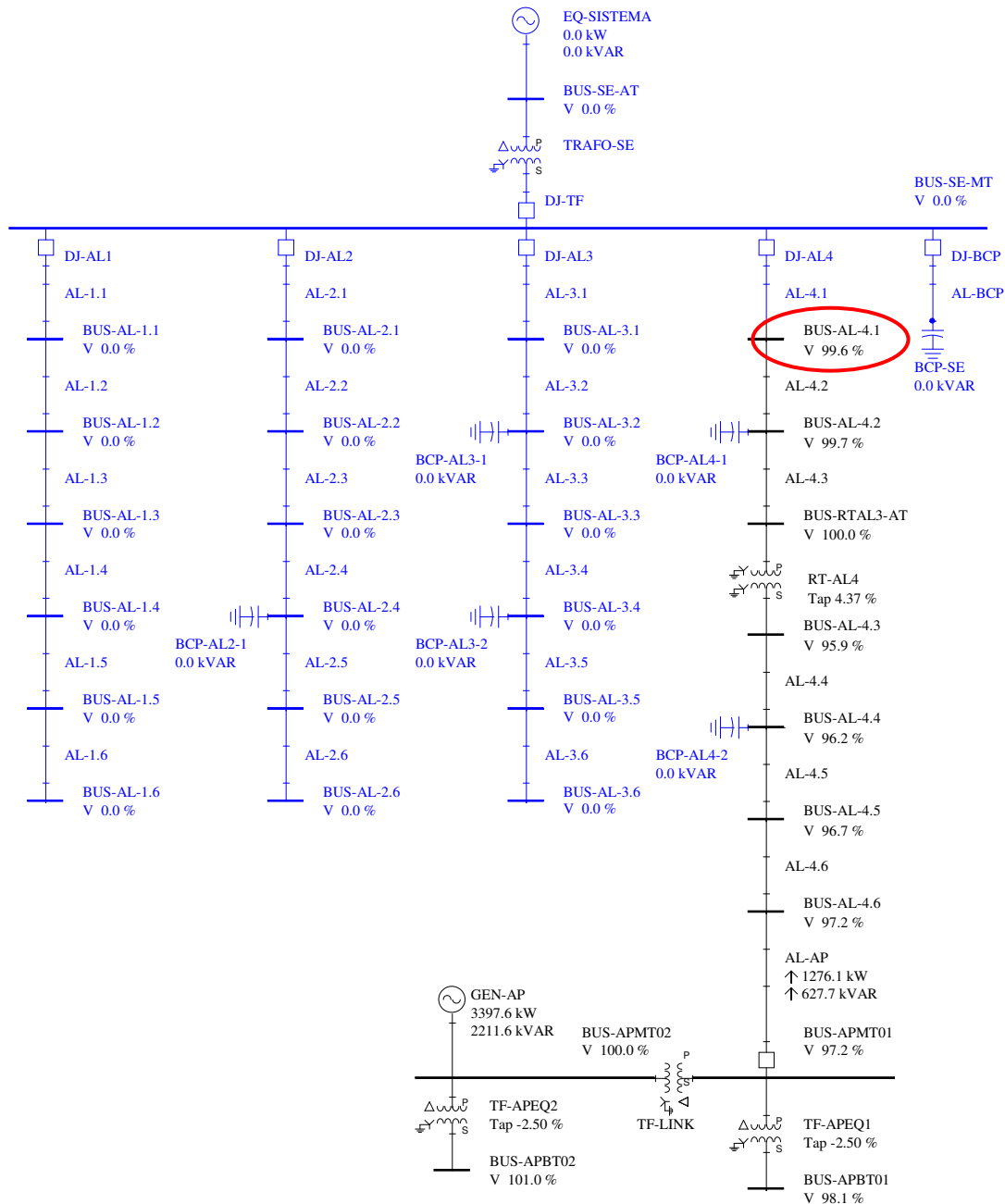
Tal problema decorre da característica considerada para o controle de taps do regulador, com controle da tensão para fluxo de energia apenas no sentido da subestação para o alimentador, regulando a tensão na barra para o lado da ponta do alimentador (BUS-AL-4.3). Neste caso, já que há a possibilidade de inversão de fluxo, deverá ser escolhido um regulador com controle capaz de identificar esta condição e passar a controlar a tensão na barra do lado da subestação (BUS-RTAL3-AT).

A Figura 19 mostra o autoprodutor funcionando em carga média e suprindo em modo ilha o alimentador 4, este por sua vez em regime de carga leve. A Figura 20 mostra simulação análoga utilizando um regulador com controle capaz de identificar a inversão de fluxo e que controla a tensão na barra do lado da subestação (BUS-RTAL3-AT).



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

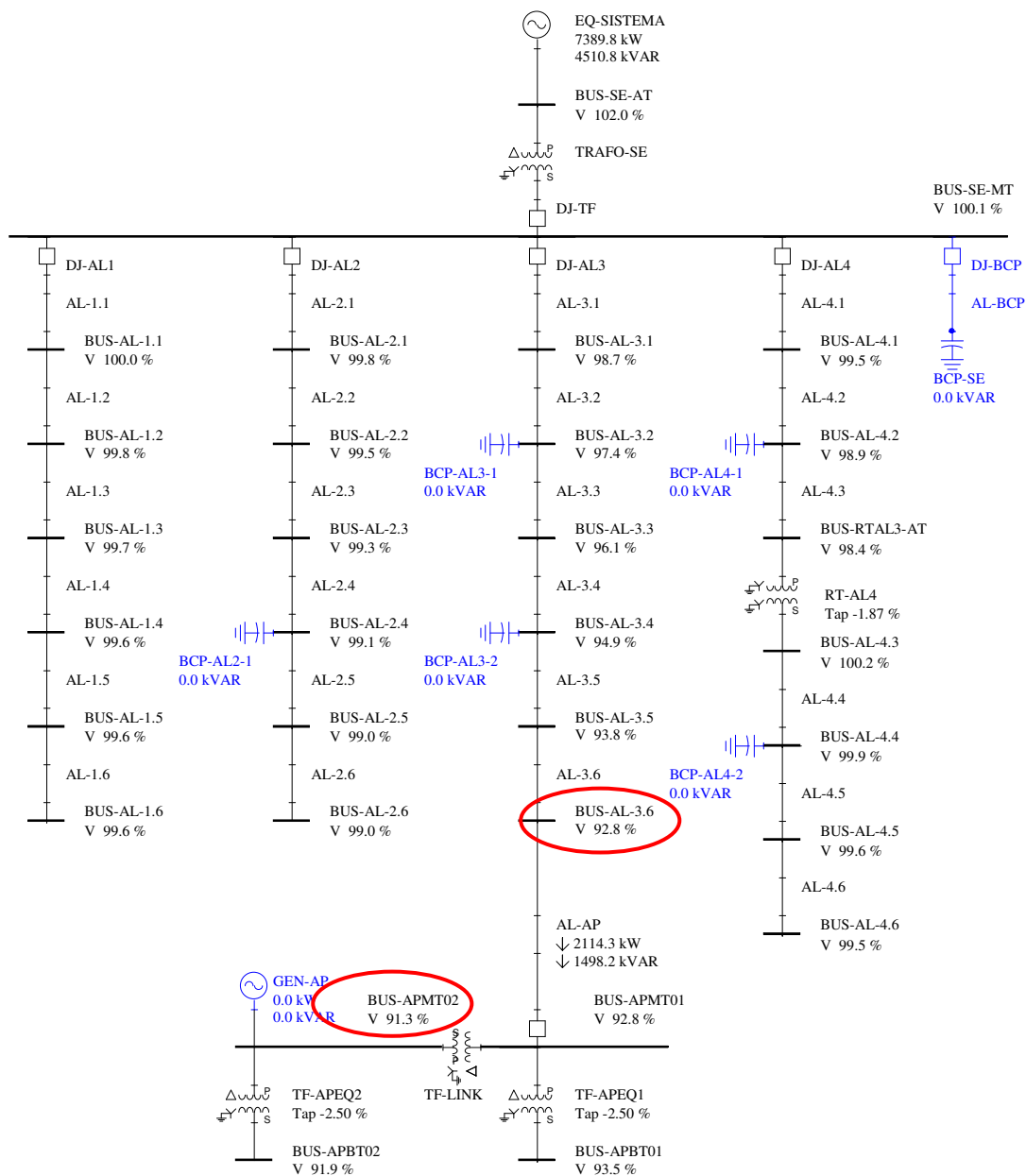
Figura 19 – Tensões calculadas para o Caso 8.4 com autoprodutor em carga média para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 20 – Tensões calculadas para o Caso 8.4 com autoprodutor em carga média para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão utilizando regulador de tensão com verificação de fluxo de energia

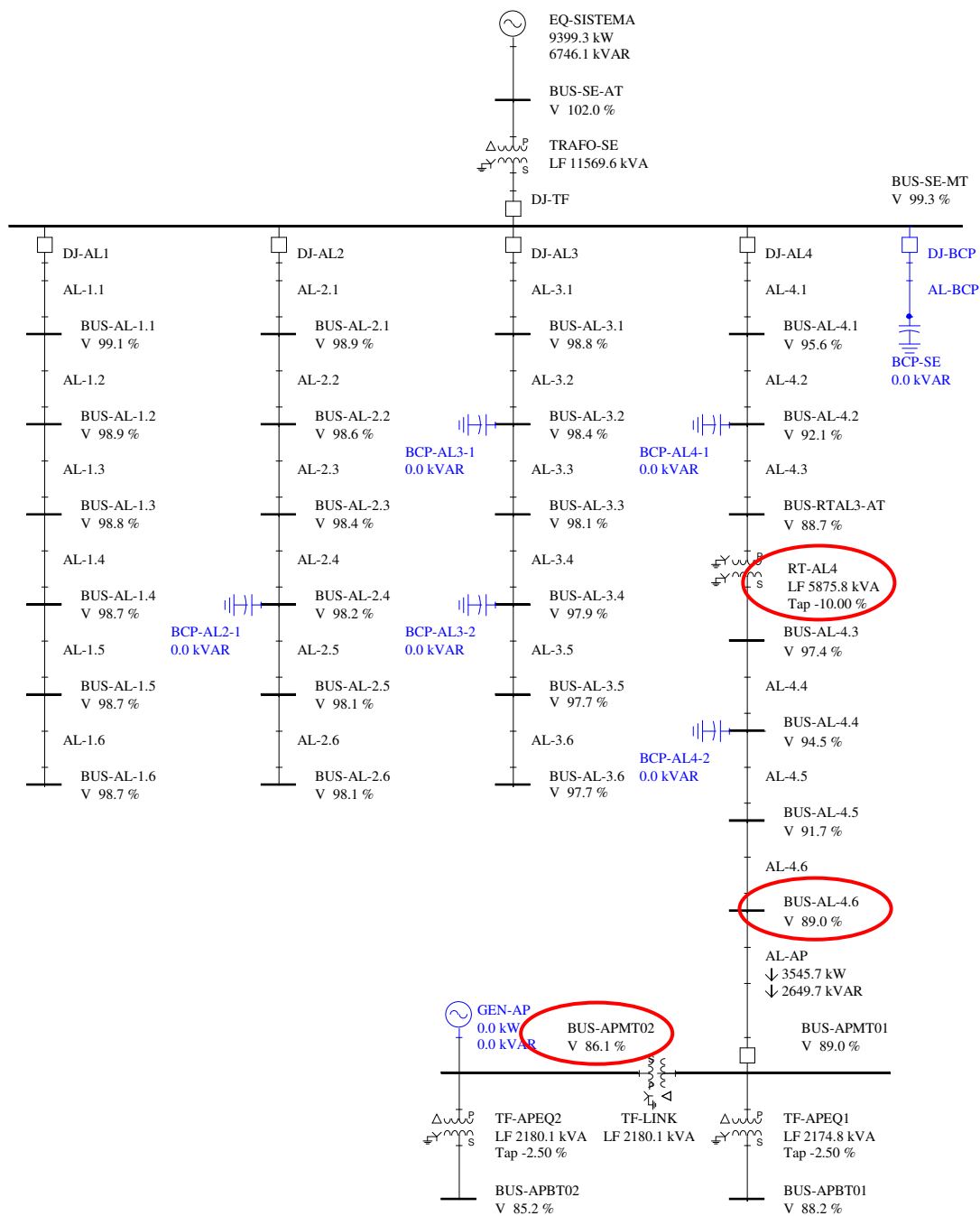
Para a condição de funcionamento do sistema de distribuição em regime de carga leve, a perda da geração local do autoprodutor, mesmo com este em regime de carga média, implica em comprometimento do desempenho do sistema. Ilustrativamente, para o autoprodutor ligado na posição 6 do alimentador 3, na condição de funcionamento do autoprodutor em carga média a tensão no ponto cairia a 92,8% e, em carga pesada, cairia a 87,3%. A Figura 21 mostra o autoprodutor funcionando em carga média sem geração local, ligado na posição 6 do alimentador 3 com o sistema de distribuição funcionando em regime de carga leve.



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação.

Figura 21 – Tensões calculadas para o Caso 9.3 com autoprodutor em carga média para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

Ainda sobre a perda de geração local no autoprodutor quando este se encontra em regime de carga pesada e está ligado na posição 6 do alimentador 4, além de severas quedas de tensão provocadas ao longo do alimentador, o regulador de tensão é submetido à sobrecarga de cerca de 12%. A Figura 22 mostra o autoprodutor funcionando em carga pesada sem geração local, ligado na posição 6 do alimentador 4 com o sistema de distribuição funcionando em regime de carga leve.



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 22 – Tensões calculadas para o Caso 9.4 com autoprodutor em carga pesada para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

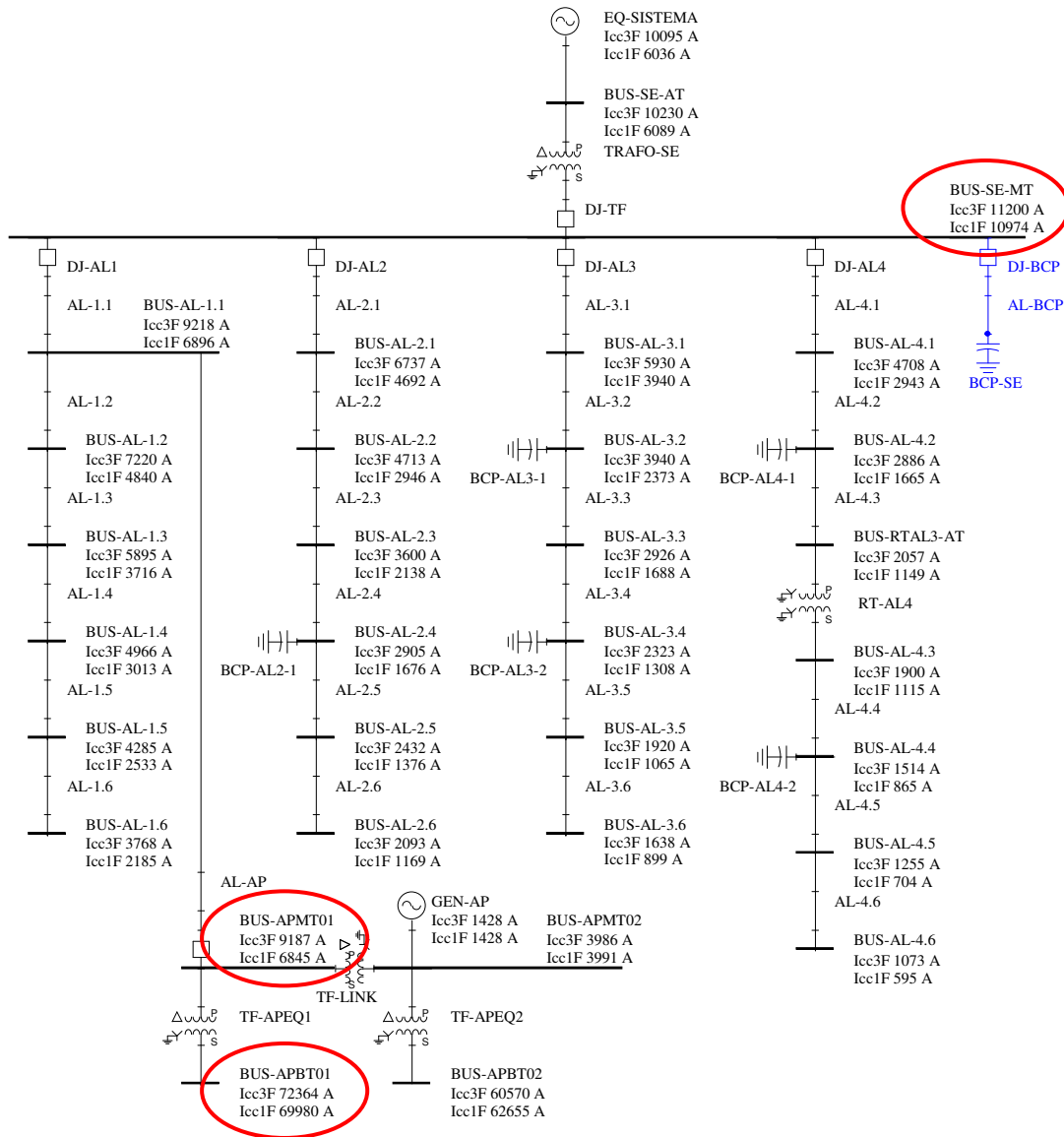
### 3.3.2 Avaliações de Curto-circuito.

O sistema e o autoprodutor antes da conexão em paralelo apresentam níveis de curto-circuito mais reduzidos. No sistema externo, na barra de 13,8kV da subestação de distribuição as correntes de curto-circuito máximas calculadas são da ordem de 9,9kA (237MVA). No sistema do autoprodutor, nas barras de 13,8kV as correntes de curto-





máximas calculadas passam a cerca de 9,2kA (220MVA), na barra do lado da rede, enquanto nas barras de 480V as correntes de curto-circuito máximas calculadas passam cerca de 72,4kA, também na barra do lado da rede. Destaque-se que passa a existir circulação de corrente para curto-circuito à terra na barra de 13,8kV no lado oposto ao gerador, mas apenas com contribuição vinda do sistema de distribuição externo. A Figura 24 mostra as correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas calculadas nas diversas barras do sistema para a condição de funcionamento do autoprodutor em carga pesada no modo de controle do fator de potência ligado em paralelo com o sistema externo também em carga pesada.

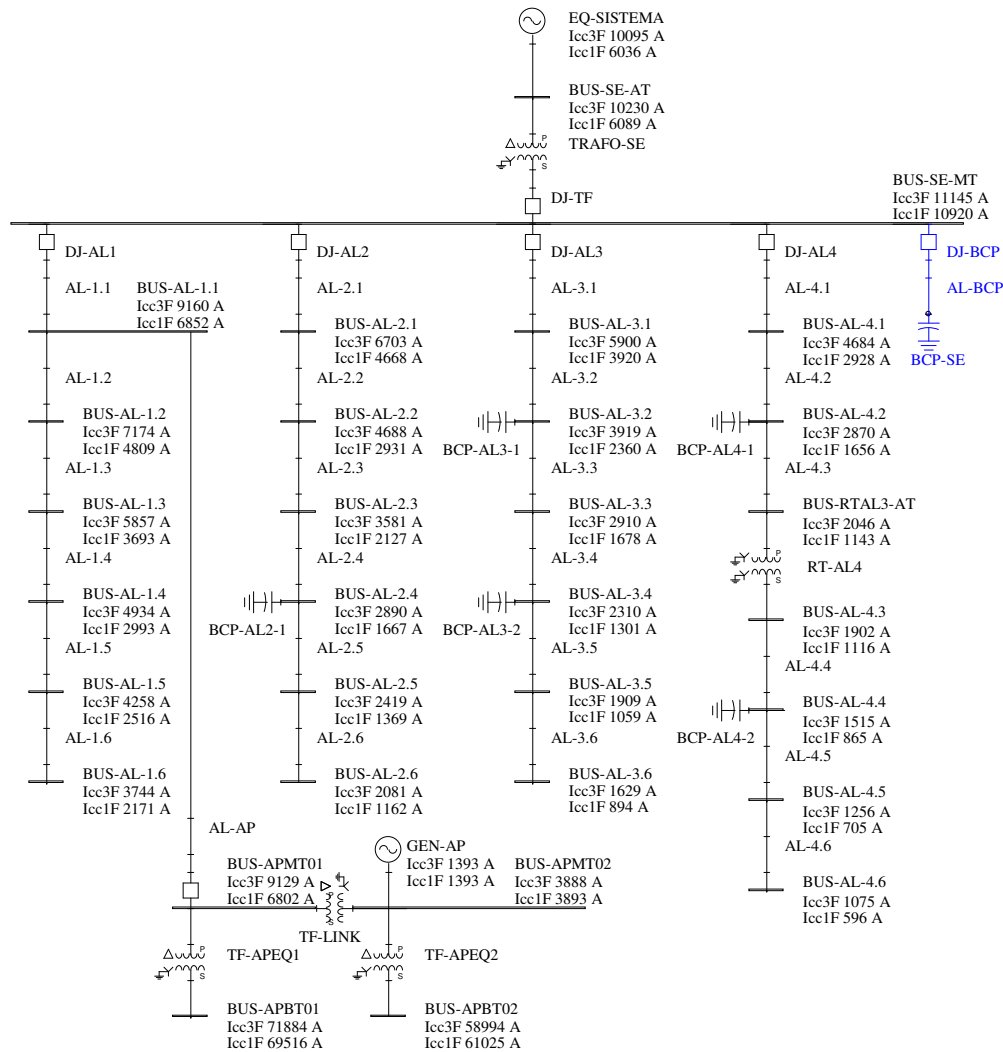


Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 24 – Correntes de curto-circuito calculadas para o Caso 2.1 com autoprodutor em modo de controle do fator de potência para o estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

A Figura 25 mostra as correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas calculadas nas diversas barras do sistema para a condição de funcionamento do autoprodutor em carga pesada no modo de controle da tensão terminal ligado em paralelo com o sistema

externo também em carga pesada. Comparando com os resultados mostrados na Figura 24 constatamos que os valores das correntes de curto-circuito resultaram mais elevadas para o autoprodutor no modo de controle do fator de potência, com as diferenças mais acentuadas no sistema interno do autoprodutor, por causa das tensões pré-falta mais elevadas nesta condição. As pequenas diferenças observadas mostram o papel secundário do modo de controle do sistema de excitação do autoprodutor nas correntes de curto-circuito.



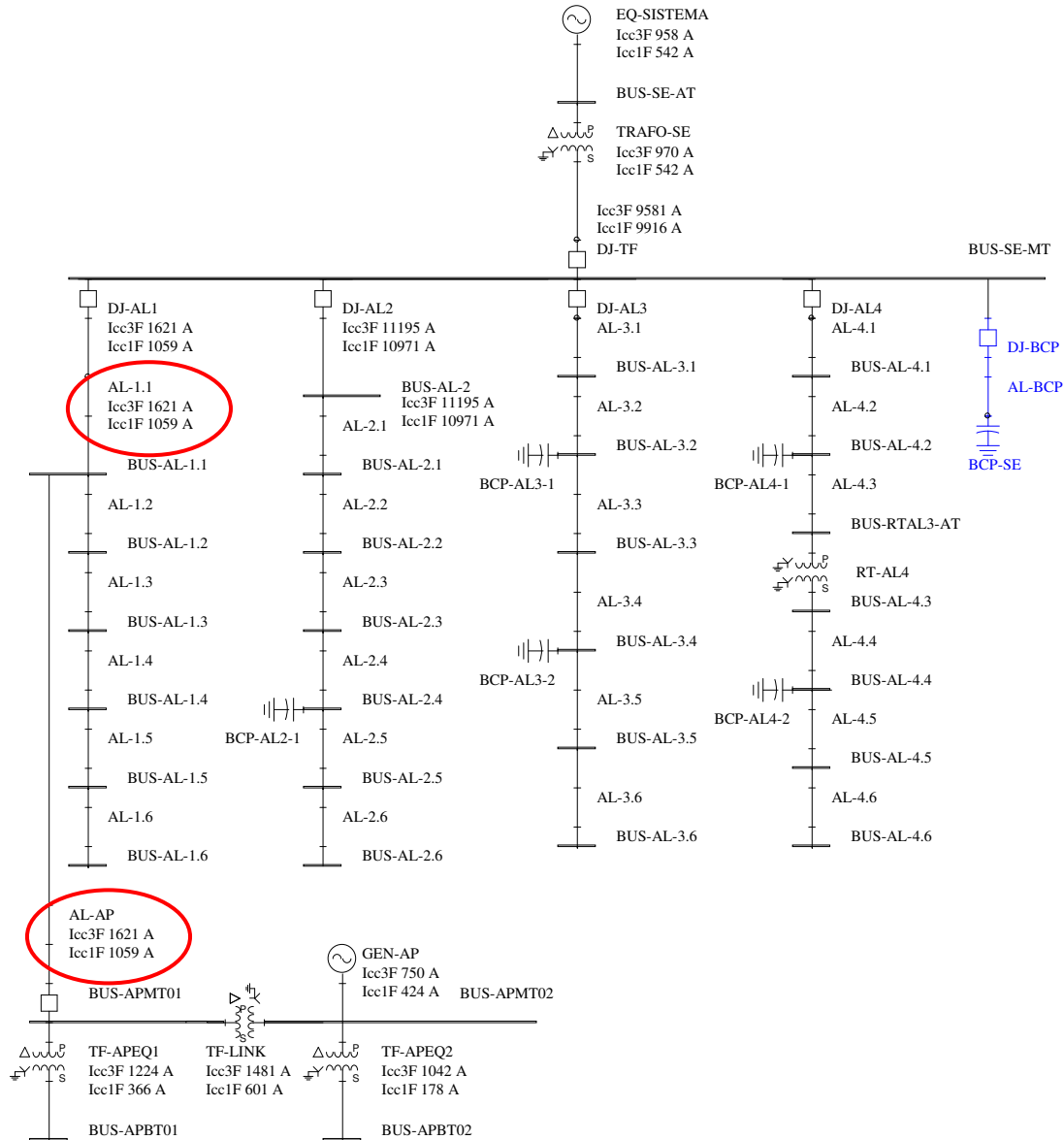
Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 25 – Correntes de curto-circuito calculadas para o Caso 2.1 com autoprodutor em modo de controle da tensão terminal para o estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

A Figura 26 mostra contribuições para as correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas calculadas para falta aplicada na saída do alimentador para a condição de funcionamento do autoprodutor em carga pesada no modo de controle do fator de potência em paralelo com o sistema externo também em carga pesada. Esta é a condição para a máxima contribuição do autoprodutor para um defeito nos alimentadores de distribuição. Neste caso a contribuição do autoprodutor para a corrente total de defeito atinge cerca de 1,6kA para defeito trifásico e para defeito monofásico, a contribuição do

autoprodutor atinge cerca de 1,1kA, correspondente às componentes de sequência positiva e negativa.

No Apêndice C é mostrada em detalhe a divisão das correntes de curto-circuito nas fases no sistema de distribuição em função das ligações trifásicas dos transformadores.

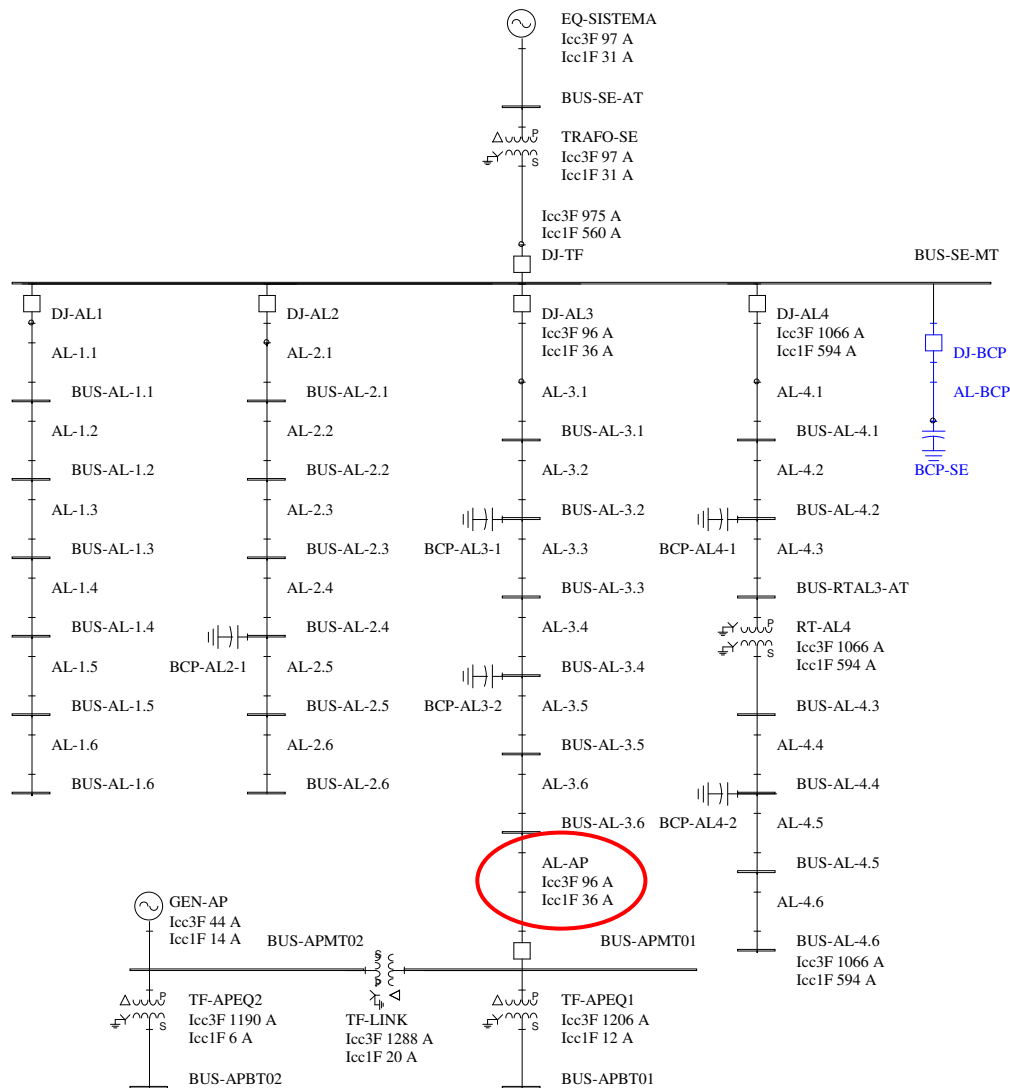


Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 26 – Correntes de curto-circuito calculadas para o Caso 3.1 com autoprodutor em modo de controle do fator de potência para o estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

A Figura 27 mostra contribuições para as correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas calculadas para falta aplicada na ponta do alimentador adjacente mais longo para a condição de funcionamento do autoprodutor em carga pesada no modo de controle do fator de potência em paralelo com o sistema externo também em carga pesada. Esta é a condição para a mínima contribuição do autoprodutor para um defeito nos alimentadores de distribuição. Neste caso a contribuição do autoprodutor para a

corrente total de defeito reduz-se a cerca de 96A para defeito trifásico e para defeito monofásico, a contribuição do autoprodutor reduz-se a cerca de 36A, correspondente às componentes de sequência positiva e negativa.



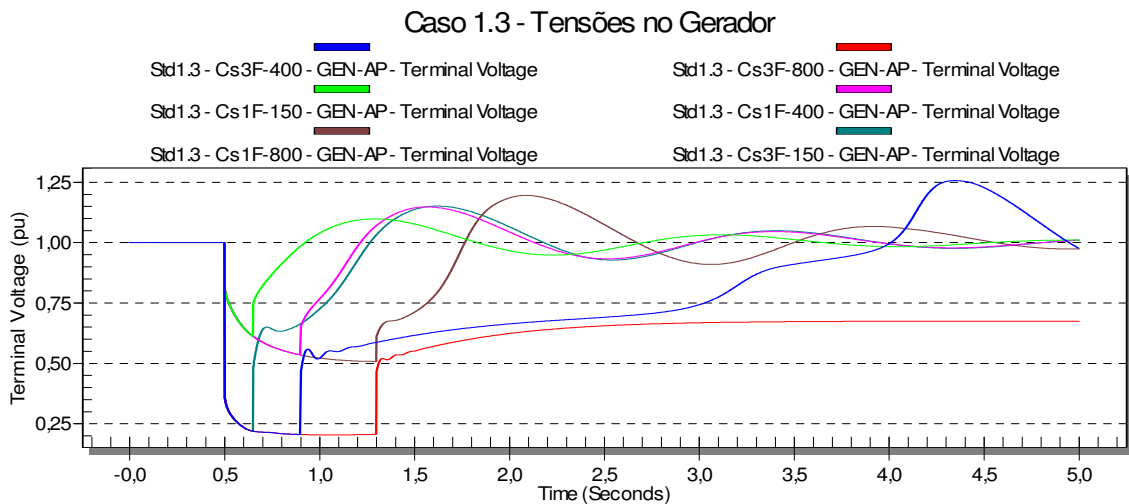
Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 27 – Correntes de curto-circuito calculadas para o Caso 4.3 com autoprodutor em modo de controle do fator de potência para o estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

Não foram apresentadas simulações de curto-circuito para a condição de funcionamento do autoprodutor desconectado do sistema externo e suprindo o alimentador onde ligado, porque não há outros autoprodutores no mesmo alimentador. Se houvesse, esta condição de funcionamento precisaria ser avaliada de forma independente.

### 3.3.3 Avaliações de Estabilidade

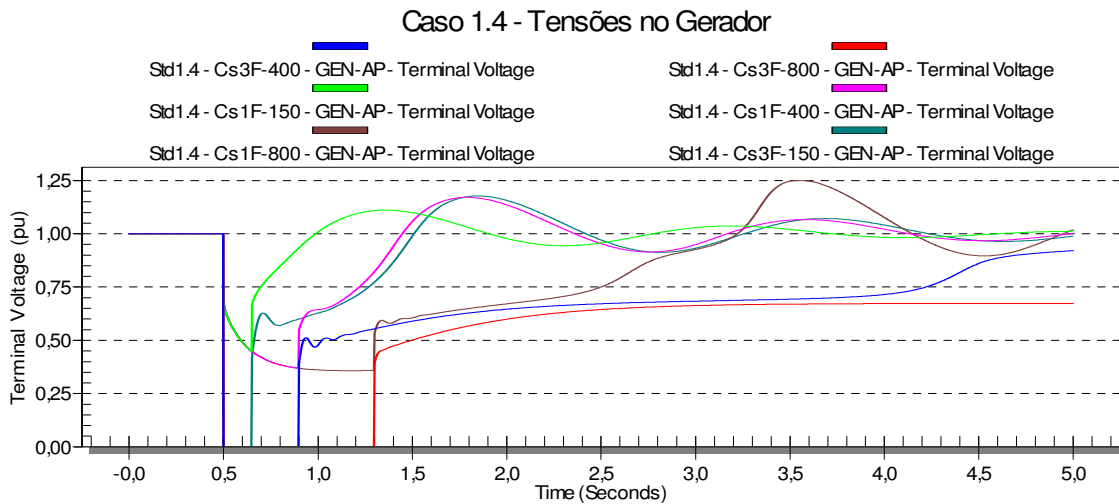
Quando o autoprodutor está operando separado do sistema externo, o gerador é mais vulnerável quanto às perturbações decorrentes de curto-circuitos, mas a natureza do problema é determinada pelo controle da tensão do sistema e a eventual reaceleração dos motores. As condições mais severas estudadas correspondem à ocorrência de faltas trifásicas nas barras de baixa tensão e de média tensão do lado do gerador do transformador de acoplamento, BUS-APBT02 e BUS-APMT02, respectivamente. Na Figura 28 e na Figura 29 são mostradas as tensões terminais do gerador para as faltas anteriormente mencionadas e na Figura 30 são mostradas as velocidades do gerador para o caso de falta na barra BUS-APMT02, confirmando que não há risco de perda de estabilidade por aceleração da máquina.



Legenda:

- Verde escuro – Falta trifásica com tempo de eliminação de 150ms.
- Azul – Falta trifásica com tempo de eliminação de 400ms.
- Vermelho – Falta trifásica com tempo de eliminação de 800ms.
- Verde claro – Falta monofásica com tempo de eliminação de 150ms.
- Violeta – Falta monofásica com tempo de eliminação de 400ms.
- Marrom – Falta monofásica com tempo de eliminação de 800ms.

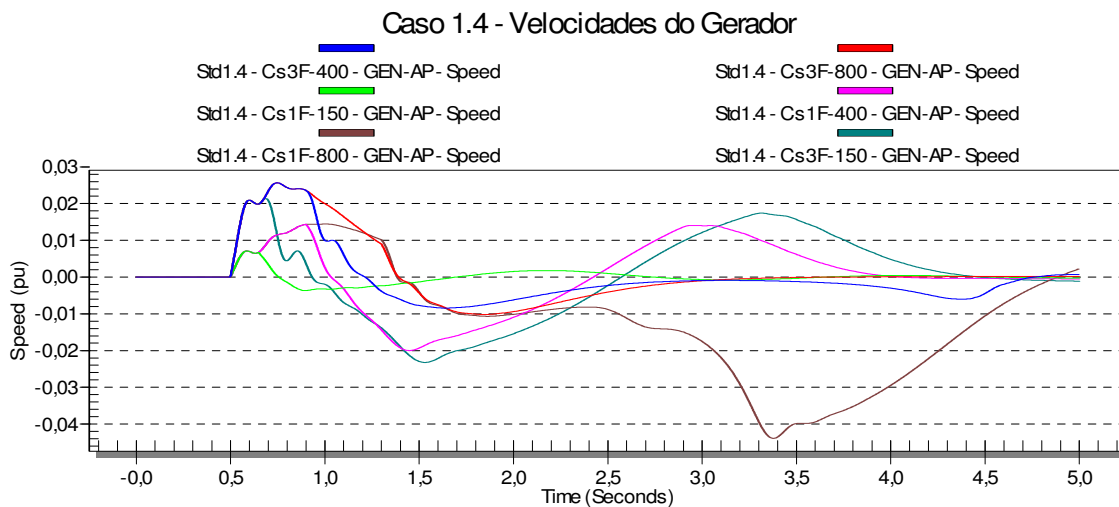
Figura 28 – Tensões nos terminais do gerador de acordo com o tempo de eliminação de falta na barra BUS-APBT02 para o Caso 1.3 do estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão



Legenda:

- Verde escuro – Falta trifásica com tempo de eliminação de 150ms.
- Azul – Falta trifásica com tempo de eliminação de 400ms.
- Vermelho – Falta trifásica com tempo de eliminação de 800ms.
- Verde claro – Falta monofásica com tempo de eliminação de 150ms.
- Violeta – Falta monofásica com tempo de eliminação de 400ms.
- Marrom – Falta monofásica com tempo de eliminação de 800ms.

Figura 29 – Tensões nos terminais do gerador de acordo com o tempo de eliminação de falta na barra BUS-APMT02 para o Caso 1.4 do estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

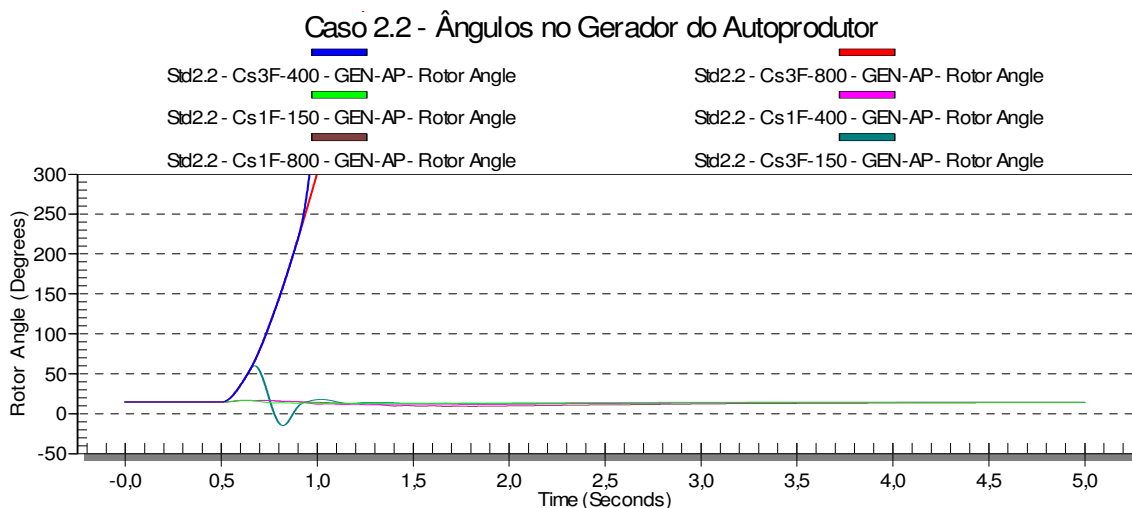


Legenda:

- Vermelho – Falta trifásica com tempo de eliminação de 150ms.
- Verde escuro – Falta trifásica com tempo de eliminação de 400ms.
- Violeta – Falta trifásica com tempo de eliminação de 800ms.
- Azul – Falta monofásica com tempo de eliminação de 150ms.
- Verde claro – Falta monofásica com tempo de eliminação de 400ms.
- Marrom – Falta monofásica com tempo de eliminação de 800ms.

Figura 30 – Velocidades do gerador de acordo com o tempo de eliminação de falta na barra BUS-APMT02 para o Caso 1.4 do estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

Quando o autoprodutor está operando em paralelo com o sistema externo, o gerador é menos vulnerável quanto ao controle da tensão nas perturbações decorrentes de curto-circuitos, mas a natureza do problema agora é determinada pelo ângulo de sincronismo com o sistema externo. As condições mais severas estudadas correspondem à ocorrência de faltas trifásicas nas barras de média tensão internas do autoprodutor ou próximas no sistema externo. Na Figura 31 são mostrados os ângulos do gerador, considerado ligado no ponto 1 do alimentador 1, para as faltas na barra de média tensão do lado da rede do transformador de acoplamento, BUS-APMT01, mostrando que o gerador perde estabilidade para as faltas trifásicas com eliminação em 400ms ou 800ms. Para faltas em pontos da rede de distribuição eletricamente mais afastados do autoprodutor, este é afetado de forma mais moderada, mesmo para tempos de eliminação de defeito mais longos. Na Figura 32 são mostrados os ângulos do gerador, também considerado ligado no ponto 1 do alimentador 1, para as faltas no ponto 6 do alimentador 2, mostrando que não há qualquer risco para sua estabilidade. Na Figura 33 são mostrados os ângulos do gerador, agora considerado ligado no ponto 6 do alimentador 4, para as faltas na barra da subestação distribuidora, mostrando que desta vez o gerador perde estabilidade para as faltas trifásicas com eliminação em 800ms.

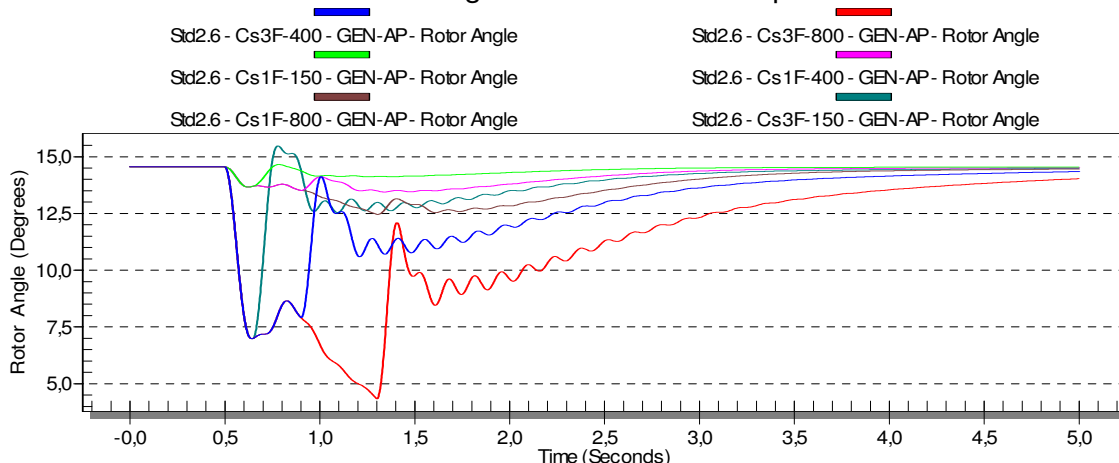


Legenda:

- Verde escuro – Falta trifásica com tempo de eliminação de 150ms.
- Azul – Falta trifásica com tempo de eliminação de 400ms.
- Vermelho – Falta trifásica com tempo de eliminação de 800ms.
- Verde claro – Falta monofásica com tempo de eliminação de 150ms.
- Violeta – Falta monofásica com tempo de eliminação de 400ms.
- Marrom – Falta monofásica com tempo de eliminação de 800ms.

Figura 31 – Ângulos do gerador de acordo com o tempo de eliminação de falta na barra BUS-APMT01 para o Caso 2.2 do estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

### Caso 2.6 - Ângulos no Gerador do Autoprodutor



Legenda:

Verde escuro – Falta trifásica com tempo de eliminação de 150ms.

Azul – Falta trifásica com tempo de eliminação de 400ms.

Vermelho – Falta trifásica com tempo de eliminação de 800ms.

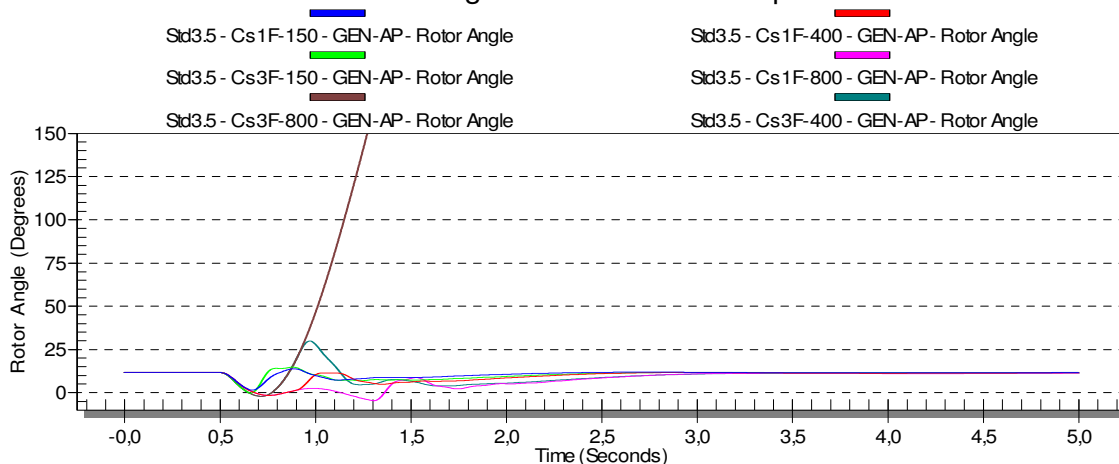
Verde claro – Falta monofásica com tempo de eliminação de 150ms.

Violeta – Falta monofásica com tempo de eliminação de 400ms.

Marrom – Falta monofásica com tempo de eliminação de 800ms.

Figura 32 – Ângulos do gerador de acordo com o tempo de eliminação de falta no ponto 6 do alimentador 2 para o Caso 2.6 do estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

### Caso 3.5 - Ângulos no Gerador do Autoprodutor



Legenda:

Verde claro – Falta trifásica com tempo de eliminação de 150ms.

Verde escuro – Falta trifásica com tempo de eliminação de 400ms.

Marrom – Falta trifásica com tempo de eliminação de 800ms.

Azul – Falta monofásica com tempo de eliminação de 150ms.

Vermelho – Falta monofásica com tempo de eliminação de 400ms.

Violeta – Falta monofásica com tempo de eliminação de 800ms.

Figura 33 – Ângulos do gerador de acordo com o tempo de eliminação de falta na barra da subestação para o Caso 3.5 do estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão



Quando o autoprodutor está operando em paralelo com o sistema externo, o gerador também é menos vulnerável quanto ao controle da tensão e da velocidade nas perturbações decorrentes de alterações de carga. Na Figura 34 são mostradas a velocidade, a tensão terminal e a potência ativa do gerador para a ocorrência de perda de toda a carga motórica da unidade na condição de funcionamento em ilha, mostrando o pico de 2,5% na velocidade e de cerca de 18% na tensão terminal.

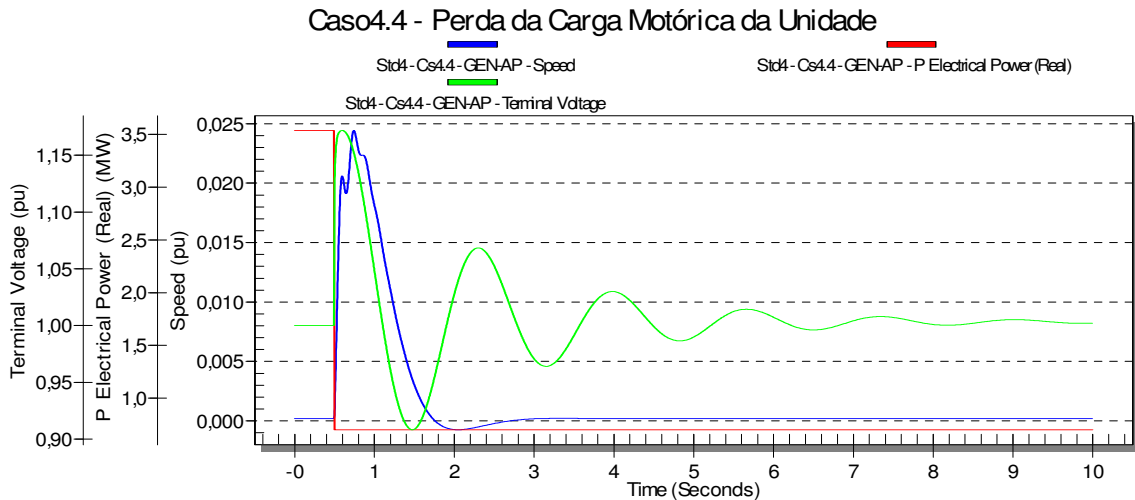


Figura 34 – Velocidade, tensão terminal e potência ativa do gerador para o Caso 4.4 do estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

Na Figura 35 são mostradas a velocidade, a tensão terminal e a potência ativa do gerador para a mesma ocorrência de perda de toda a carga motórica da unidade, mas desta vez para a condição de funcionamento em paralelo com o sistema externo, ligado no ponto 6 do alimentador 4, mostrando o pico de 0,4% na velocidade e de cerca de 8% na tensão.

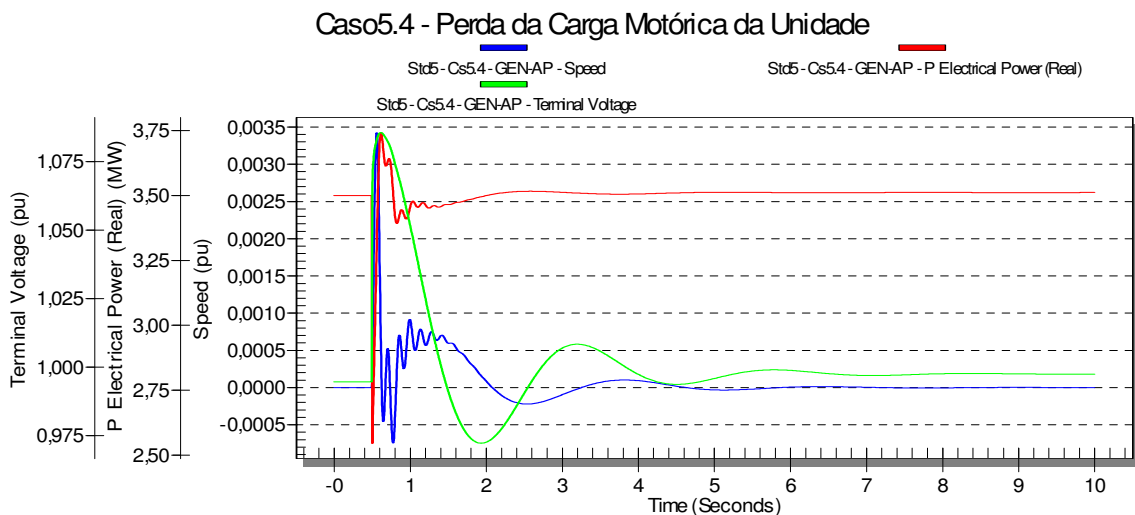


Figura 35 – Velocidade, tensão terminal e potência ativa do gerador para o Caso 5.4 do estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

Para as ocorrências de perda da interligação com o sistema externo, considerando que a abertura da interligação se dá no disjuntor de saída na subestação distribuidora, a possibilidade do autoprodutor suprir as cargas do alimentador onde ligado dependerá do nível da carga no sistema externo e no autoprodutor no momento da ocorrência. Basicamente, esta condição funcionará bem desde que nem o autoprodutor e nem o sistema externo se encontrem em regime de carga pesada. Na Figura 36 são mostradas a velocidade, a tensão terminal e a potência ativa do gerador e a tensão na carga mais distante no alimentador para a abertura da interligação com o sistema externo em regime de carga pesada e o autoprodutor em regime de carga leve, considerando o autoprodutor ligado no ponto 6 do alimentador 3, mostrando que neste caso, apesar da recuperação da tensão há a perda de controle da velocidade do gerador.

Na Figura 37 são mostradas a velocidade, a tensão terminal e a potência ativa do gerador e a tensão na carga mais distante no alimentador para a abertura da interligação com o sistema externo e o autoprodutor em regime de carga média, considerando o autoprodutor ligado no mesmo ponto 6 do alimentador 3, mostrando que neste caso, há controle da velocidade do gerador e recuperação da tensão, apesar da significativa queda na carga mais distante no alimentador.

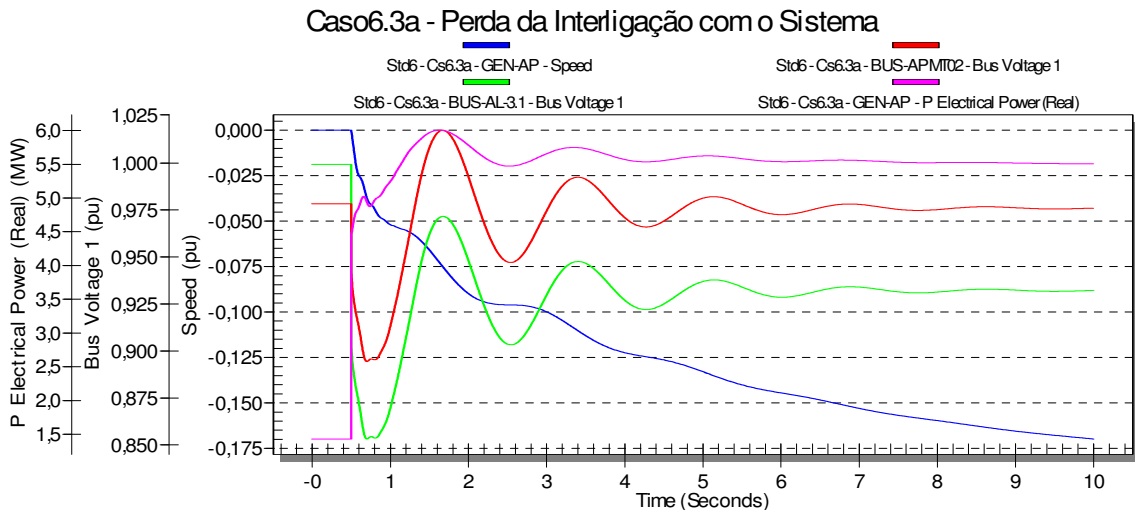


Figura 36 – Velocidade, tensão terminal e potência ativa do gerador e tensão na carga mais distante no alimentador para o Caso 6.3 com autoprodutor em carga leve para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

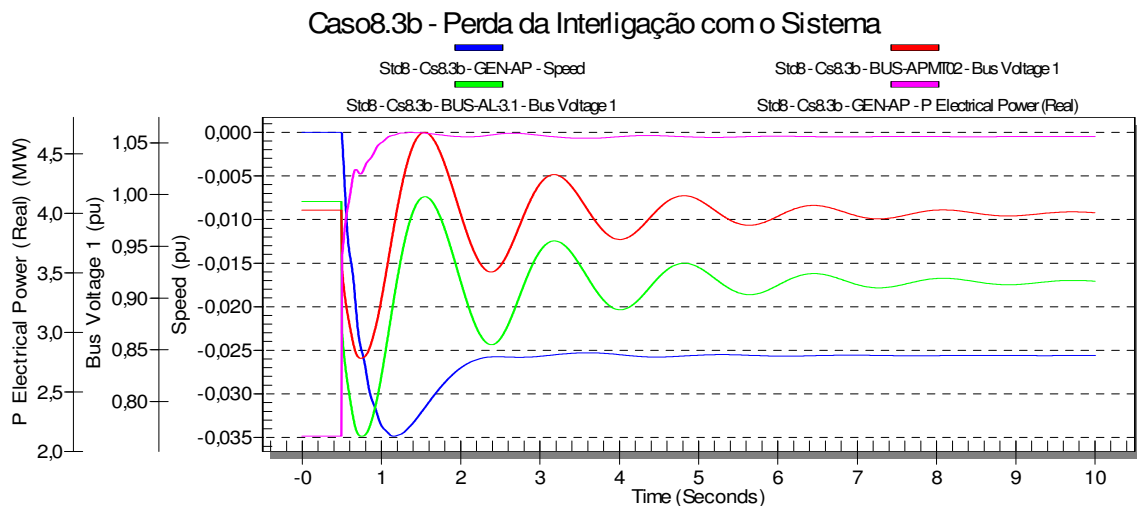
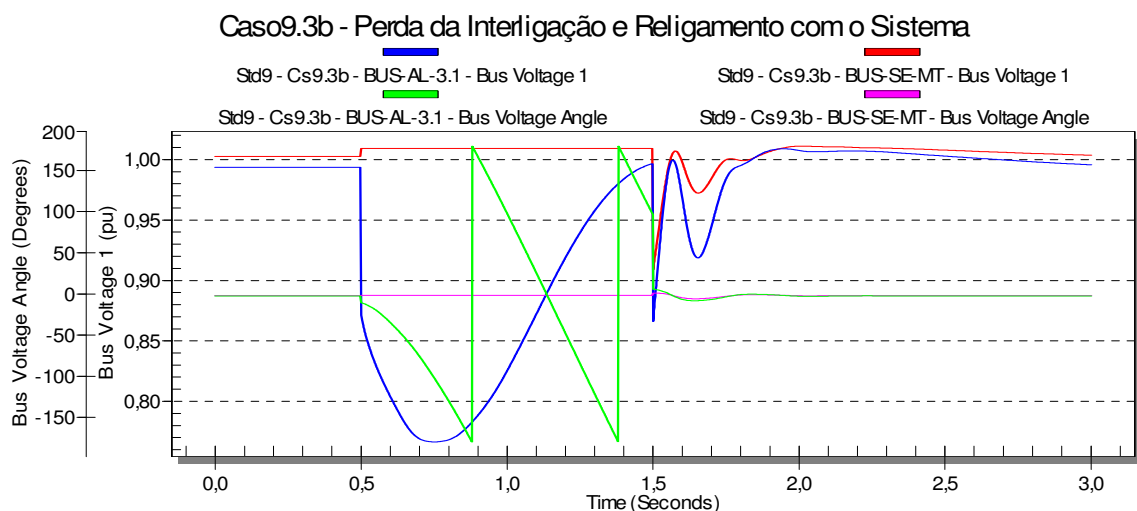


Figura 37 – Velocidade, tensão terminal e potência ativa do gerador e tensão na carga mais distante no alimentador para o Caso 8.3 com autoprodutor em carga média para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

Na Figura 38 são mostradas as tensões e ângulos nos lados do disjuntor do alimentador para a abertura da interligação com o sistema externo seguida do religamento em um segundo, para o sistema e o autoprodutor em regime de carga média, considerando o autoprodutor ligado no mesmo ponto 6 do alimentador 3, mostrando que, apesar da redução da defasagem das tensões, haveria elevada defasagem angular durante o religamento, com circulação de elevadas correntes entre o gerador e o sistema.



Nota: O software restringe o valor do ângulo nas barras ao intervalo  $\pm 180^\circ$ .

Figura 38 – Tensões e ângulos de fase nos dois lados do disjuntor do alimentador na subestação distribuidora manobrado no Caso 9.3 com autoprodutor em carga média para estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

Adicionalmente, foram feitas algumas simulações complementares objetivando investigar o comportamento do sistema para uma ocorrência de perda da interligação para o autoprodutor funcionando em modo de controle de potência ativa constante e de fator de potência constante, o que é bastante comum nos co-geradores para atendimento aos contratos de demanda com as concessionárias.

Para as simulações adicionais foi utilizado o modelo do sistema de excitação indicado na Figura 39 e o modelo de regulador de velocidade indicado na Figura 40.

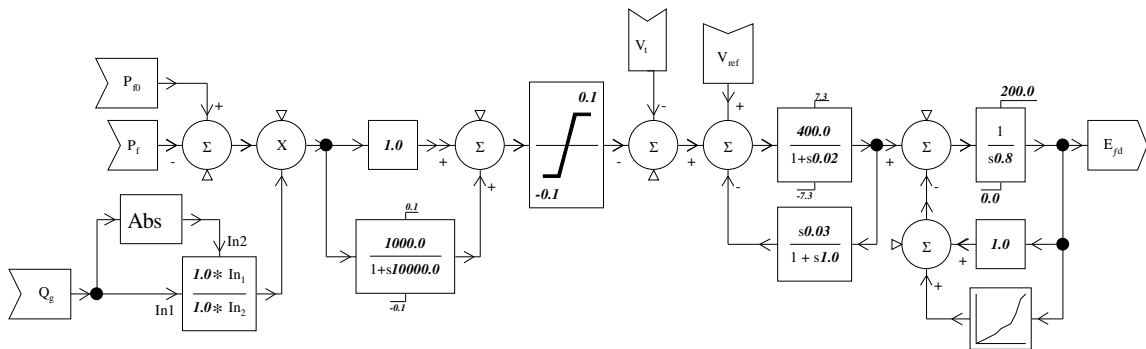


Figura 39 – Modelo e parâmetros do sistema de excitação para fator de potência constante do autoprodutor para o estudo do caso de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

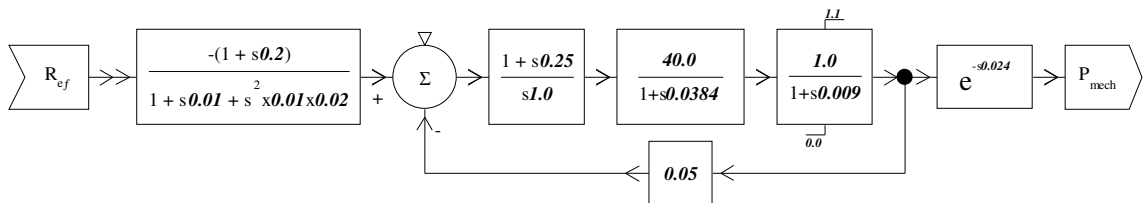


Figura 40 – Modelo do regulador de velocidade para fator de potência constante do autoprodutor para o estudo do caso de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

Para todos os casos complementares foi considerado o sistema externo e o autoprodutor em regime de carga média e o autoprodutor ligado no ponto 6 do alimentador 1.

Na Figura 41 são mostradas as respostas do gerador considerando a aplicação do controle de potência constante, mostrando o desvio de velocidade criado após a perda da interligação com o sistema externo. Na Figura 42 são mostradas as respostas do gerador considerando a aplicação do controle de fator de potência constante, mostrando o desvio de tensão criado após a perda da interligação com o sistema externo. Por fim, na Figura 43 são mostradas as respostas do gerador considerando a aplicação simultânea do controle de potência e de fator de potência constantes, mostrando o desvio de velocidade e de tensão criado após a perda da interligação com o sistema externo.

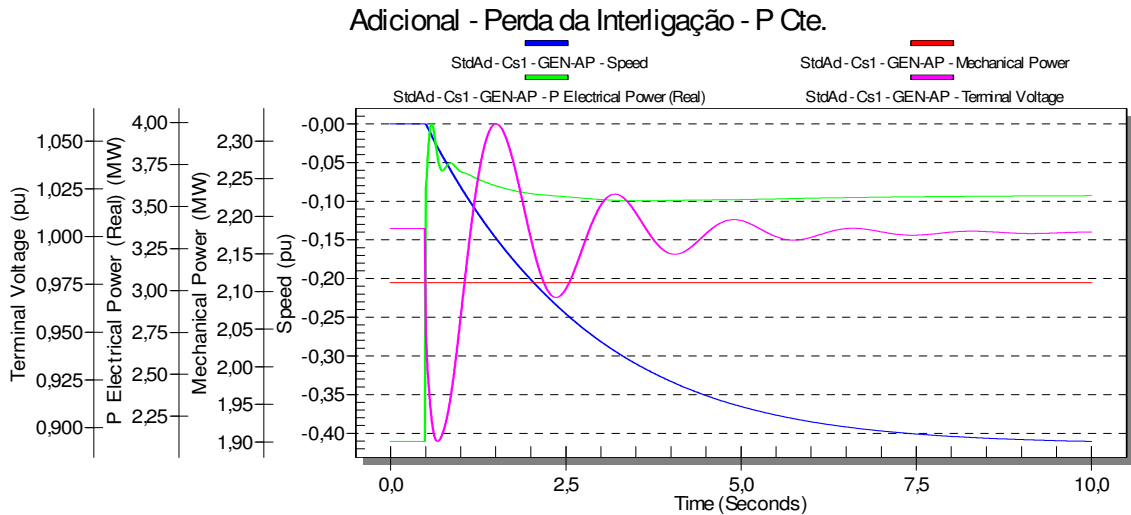


Figura 41 – Velocidade, potência mecânica, potência ativa, potência reativa e tensão terminal do gerador para a perda da interligação em modo de controle de potência constante no estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

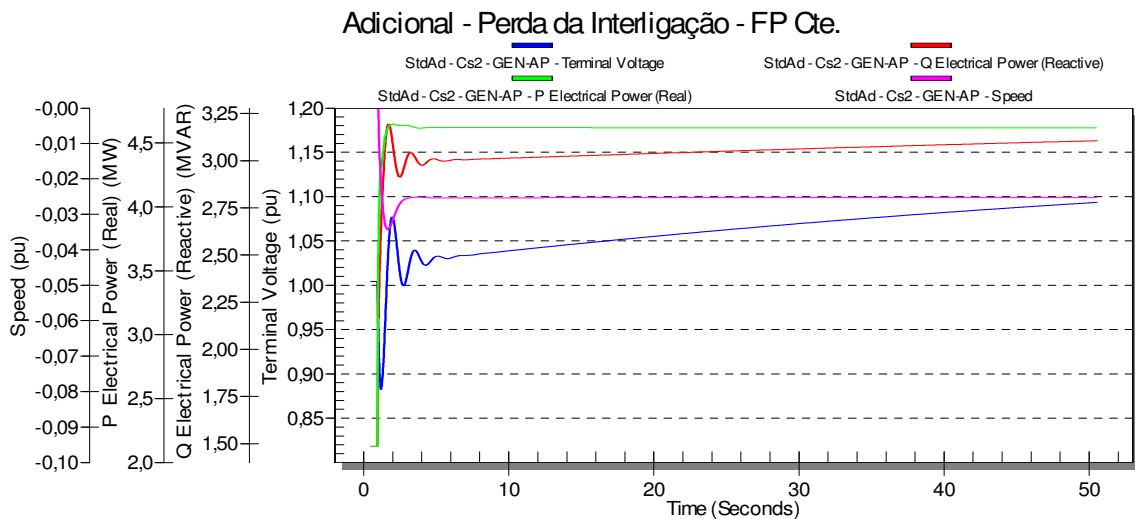


Figura 42 – Velocidade, potência mecânica, potência ativa, potência reativa e tensão terminal do gerador para a perda da interligação em modo de controle de fator de potência constante no estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

### Adicional - Perda da Interligação - P e FP Cte.

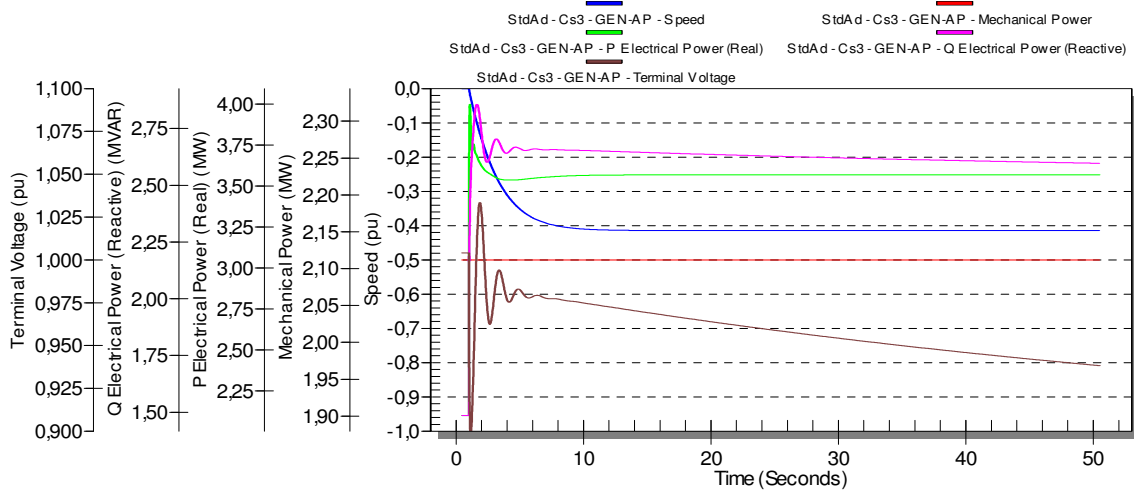
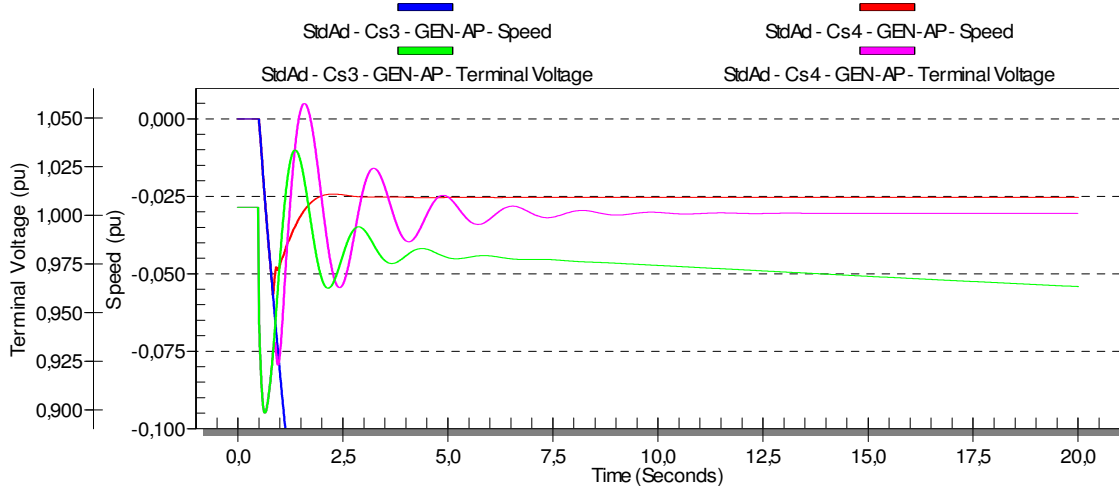


Figura 43 – Velocidade, potência mecânica, potência ativa, potência reativa e tensão terminal do gerador para a perda da interligação em modo de controle de fator de potência e potência constantes no estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

Fica evidente a necessidade de mudar o modo de controle dos geradores após a abertura da interligação, de forma a retomar o controle da tensão terminal e da velocidade do gerador. Na Figura 44 é mostrada a resposta comparativa do gerador para a abertura de carga com controle contínuo de potência constante e fator de potência e com controle chaveado para tensão terminal e velocidade transcorridos 0,3s.

### Adicional - Perda da Interligação - P e FP Cte. e Alteração



Legenda:

Azul e verde claro – Velocidade e tensão terminal do gerador no modo de controle pelo fator de potência e potência constante permanente

Vermelho e violeta – Velocidade e tensão terminal do gerador no modo de controle inicial pelo fator de potência e potência constante e chaveado em 0,3s para controle pela tensão terminal e pela velocidade

Figura 44 – Comparativo da velocidade e tensão terminal do gerador para a perda da interligação em modo de controle contínuo e chaveado no estudo do autoprodutor de pequeno porte no sistema de distribuição de média tensão

### 3.3.4 Avaliações de Proteção

Inicialmente, com relação às proteções de sobrecorrente na subestação distribuidora, alguns comentários devem ser feitos. A função 50 do relé no secundário do transformador está temporizada (0,3s) para coordenar com as funções 50 dos relés nas saídas dos alimentadores, ajustadas sem temporização (0,0s). A temporização no relé do transformador poderia ser eliminada se implementado um esquema com seletividade lógica.

No esquema de seletividade lógica todas as funções 50 podem ser habilitadas, sem necessidade de coordenação por tempo. Os relés à montante recebem sinal de bloqueio de relés à jusante que eventualmente também foram sensibilizados pela corrente de defeito, garantindo a atuação seletiva das proteções. Uma pequena temporização, geralmente da ordem de 50ms a 100ms, é utilizada para garantir os tempos de atuação e envio dos sinais de bloqueio pelos relés [72].

Com relação à coordenação das funções 50 dos relés nas saídas dos alimentadores, sem temporização, com funções 50 dos relés nas entradas dos consumidores, haverá atuação simultânea das proteções, permanecendo o consumidor em defeito desligado e o alimentador sendo religado na sequência pela função 79.

O ajuste típico adotado para a função 50 de fase na proteção de entrada do autoprodutor (2.000A) não é adequado para utilização em qualquer ponto da rede de distribuição. No alimentador 4, conforme indicado na Figura 9, há uma faixa de corrente onde o relé na saída do alimentador seria sensibilizado e o do autoprodutor não. Adicionalmente, quando ligado em pontos com nível de curto-circuito mais elevado, o autoprodutor pode ter dificuldade para energizar de forma simultânea todos seus transformadores, quando a corrente teórica de *inrush* poderia atingir valores da ordem de até dez vezes o valor nominal (4.183A, no caso).

Não foram avaliadas as proteções de sobrecorrente internas do autoprodutor, mas neste caso seria oportuno estudar o efeito sobre as respectivas coordenações da variação das correntes de curto-circuito para a condição de funcionamento em ilha ou em paralelo com o sistema externo e, conforme o caso, considerar a aplicação de ajustes adaptativos.

Com relação às proteções complementares de autoprodutor, destaque-se que foram inicialmente consideradas para funcionamento sem exportação de energia, com ajustes bastante sensíveis para comandar a abertura da interligação no caso de comprometimento das condições especificadas.

No Caso 6 de fluxo de potência, para a condição de funcionamento do sistema em contingência em regime de carga pesada, com o autoprodutor em paralelo e com exportação do excedente de energia, foi mostrada a conveniência do apoio do autoprodutor para garantir as condições operacionais do sistema.

Neste caso seria necessário compatibilizar as proteções complementares anteriormente mencionadas, ou seja, bloquear a função 32 e diminuir a sensibilidade da função 67, para permitir a inversão do fluxo de energia, e alterar as funções 27 e 59, para permitir a manutenção da interligação com níveis mais precários de tensão no ponto de conexão.

O raciocínio anterior também se aplica aos Casos 7 e 8 de fluxo de potência, para as condições de funcionamento do autoprodutor em ilha suprindo o alimentador onde ligado.

Para o Caso 9 de fluxo de potência, com funcionamento do sistema suprindo o autoprodutor em condição de perda de geração local, dependendo dos níveis de carga no sistema e no autoprodutor, haverá abertura da interligação por atuação da função 27 no autoprodutor e, se assim não fosse, poderia haver desligamento do relé do alimentador por atuação da função 51.

Neste caso, pelo lado do sistema local de distribuição, seria necessário dimensioná-lo e ajustar suas proteções para absorver a carga integral do autoprodutor na falta de sua geração, ou, pelo lado do autoprodutor, implantar um sistema de descarte automático de carga, de tal forma que se garanta a compatibilidade da carga interna com a disponibilidade de geração local.

Para o Caso 3 de curto-circuito, para verificação das correntes no alimentador do autoprodutor para defeito na saída de alimentador adjacente para a condição normal de funcionamento do sistema com o autoprodutor em paralelo, as funções 50 no relé do alimentador onde ligado o autoprodutor não seriam sensibilizadas para nenhuma condição simulada. No entanto, dependendo da potência da geração do autoprodutor e da contribuição da sua carga motórica, esta função 50 poderia atuar de forma indevida.

Para evitar este problema seria conveniente substituir as funções 50 no relé na saída do alimentador onde ligado o autoprodutor por funções 67, de forma a impedir sua atuação para defeitos em alimentadores adjacentes em função da contribuição do autoprodutor.

Para o Caso 4 de curto-circuito, para curto-circuito no ponto extremo do sistema local de distribuição a corrente calculada, de 96A, não sensibilizaria a função 67 no relé do autoprodutor. Nestes casos, a proteção precisaria ser garantida pela atuação do relé do alimentador com defeito.

Para faltas fase-terra no sistema de distribuição, a presença do enrolamento secundário do transformador da subestação distribuidora ligado em estrela aterrada permite a sensibilização da função 67 no relé do autoprodutor pelas correntes de sequência positiva e negativa. No entanto, após a abertura do disjuntor na saída do alimentador na subestação para o caso do autoprodutor ligado no alimentador em falta, estas correntes deixarão de circular. Neste caso e para o caso de faltas remotas, fora do alcance da função 67, a proteção no relé do autoprodutor deverá ser garantida pela função 59N.

Nestes casos a condição mais crítica seria para o autoprodutor ligado na posição 6 do alimentador 4, que é o mais longo, com uma falta fase-terra no extremo oposto, quando a tensão residual de neutro vista pelo relé é cerca de 8kV, valor superior ao ajuste adotado, de 4,8kV, ficando assim garantida sua atuação.

Para o Caso 5 de estabilidade, com variação da carga para o autoprodutor em paralelo com o sistema externo em regime de carga pesada ligado no alimentador 4, posição 6, onde a conexão com o sistema externo é mais frágil, as oscilações de tensão não levariam à atuação das funções 27 ou 59, ficando garantida a manutenção da interligação.



Para os Casos 6 a 10 de estabilidade, no entanto, que envolvem a perda da interligação com o sistema externo e funcionamento do autoprodutor em ilha suprindo o alimentador onde ligado, valem os comentários anteriormente apresentados para o Caso 6 de fluxo de potência, sobre a necessidade de compatibilizar as proteções complementares 27, 32, 59 e 67 do autoprodutor para permitir a inversão.

Adicionalmente, as simulações de estabilidade mostram a necessidade também de compatibilizar as funções 81-U e 81-O, para evitar sua atuação para as oscilações de frequência após abertura da interligação com o sistema externo. A utilização de relés de taxa de variação da frequência,  $df/dt$  ou ROCOF, permitiria diferenciar com maior acuidade um desvio de frequência potencialmente crítico do sistema de uma variação de frequência aceitável em situação de contingência.

Por fim, as simulações de estabilidade mostraram também a necessidade de compatibilizar a função 79 no relé da saída do alimentador onde ligado o autoprodutor, para impedir o religamento do alimentador com o circuito energizado pelo autoprodutor, visto que o gerador perde sincronismo com o sistema externo rapidamente. Neste caso poderia ser usada uma função 25 ou 27 para supervisionar o religamento.

## **4 CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO - SIMULAÇÕES E ESTUDOS DE CASO**

### **4.1 DESCRIÇÃO E PARÂMETROS DO SISTEMA TESTE 2**

O diagrama unifilar mostrando a composição do sistema elétrico de distribuição de alta tensão típico adotado para avaliação do comportamento de um autoprodutor de maior porte está mostrado na Figura 45.

Trata-se de uma rede de distribuição tipo subtransmissão de 138kV, constituída de cinco linhas de subtransmissão e de três subestações distribuidoras, duas com conexão ao sistema supridor de transmissão e uma exclusivamente de carga. O sistema supridor de transmissão é representado por um equivalente de 230kV/900MVA, com transformação local de 230-138kV, e um sistema equivalente de 345kV/2.200MVA, com transformação local de 345-138kV.

O autoprodutor, equipado com geração total de 28,75MVA, consiste de uma unidade industrial com suas cargas distribuídas em dois grupos principais. O primeiro, com cerca de 40% da carga e correspondente à área de produção onde estão localizados os geradores, e o segundo, com cerca de 60% da carga e correspondente às demais áreas da indústria. Em ambos os casos as cargas foram agrupadas em equivalentes correspondentes aos motores de indução de média tensão, aos motores síncronos de média tensão, aos motores de indução de baixa tensão e às cargas não motóricas de baixa tensão.

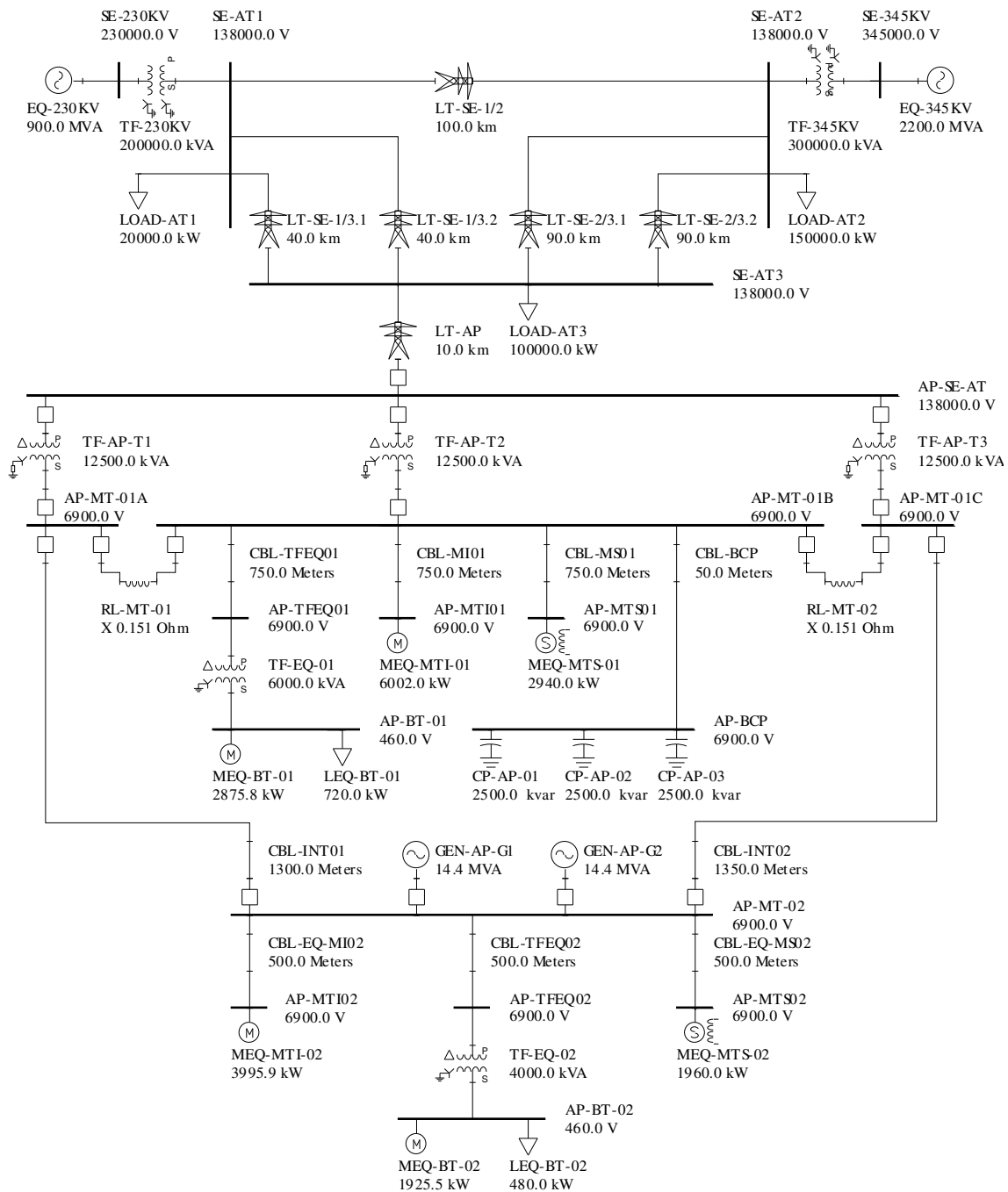


Figura 45 – Sistema elétrico de teste para o estudo do caso de autoprodutor de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

As características técnicas e os parâmetros dos componentes do sistema elétrico estudado estão indicados nas tabelas a seguir. Os dados de entrada no formato do software PTW estão apresentados no Apêndice D.

Tabela 13 – Parâmetros dos sistemas externos equivalentes de 230kV e 345kV para o estudo do caso de autoprodutor de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

Vn (kV)	345,0	230,0
Sn (MVA)	2.200,0	900,0
$\delta$ (graus)	-2,0	0,0
X “ (p.u.) / X/R	0,25 / 15	0,23 / 8
X2 (p.u.) / X/R	0,25 / 15	0,23 / 8
X0 (p.u.) / X/R	0,50 / 15	0,50 / 8

Tabela 14 – Características técnicas dos transformadores para o estudo do caso de autoprodutor de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

Descrição	TF-345KV	TF-230KV	TF-AP-T1/T2/T3	TF-EQ-01	TF-EQ-02
Sn (MVA)	225 / 300	150 / 200	10,0 / 12,5	5,0 / 6,0	3,0 / 4,0
Vn primário (kV)	345,0	230,0	138,0	6,9	6,9
Vn secundário (kV)	138,0	138,0	6,9	0,46	0,46
Ligação	estrela/ estrela	estrela/ estrela	delta/ estrela	delta/ estrela	delta/ estrela
Impedância (% / X/R)	11,25 / 47	9,0 / 43	9,0 / 16	5,5 / 7,0	5,5 / 7,0
OLTC	sim	sim	sim	não	não
Faixa de ajuste	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	-	-
Taps (qdade / %)	$\pm 16 /$ 0,625%	$\pm 16 /$ 0,625%	$\pm 16 /$ 0,625%	-	-
Banda morta (%)	1,0	1,0	1,0	-	-
Tempo (s)	30	30	20	-	-

Nota: As impedâncias dos transformadores estão referidas ao estágio inicial de ventilação (menor potência).

Tabela 15 – Características técnicas dos bancos de capacitores para o estudo do caso de autoprodutor de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

Descrição	BCP-AP
Qn (kvar)	3 x 2.500 (estágios independentes)
Vn (kV)	6,9
Ligação	estrela aterrada
Controle automático	sim
Tipo de controle	fator de potência da carga
Tempo (s)	20

Tabela 16 – Características técnicas das linhas de subtransmissão para o estudo do caso de autoprodutor de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

Descrição	LT-SE-1/2	LT-SE-1/3 1 e 2	LT-SE-2/3 1 e 2	LT-AP
Limite térmico (A)	300	300	300	200
Comprimento total (km)	100,0	40,0	90,0	10,0
Parâmetros				
Rpos. ( $\Omega/\text{km}$ )	0,1613	0,1613	0,1613	0,1906
Xpos ( $\Omega/\text{km}$ )	0,5003	0,5003	0,5003	0,4948
Rzero ( $\Omega/\text{km}$ )	0,4272	0,4272	0,4272	0,5048
Xzero ( $\Omega/\text{km}$ )	1,7584	1,7584	1,7584	1,7392
Xc pos ( $M\Omega.\text{km}$ )	0,3066	0,3066	0,3066	0,2992
Xc zero ( $M\Omega.\text{km}$ )	0,4471	0,4471	0,4471	0,4639

Tabela 17 – Parâmetros elétricos dos cabos isolados de média tensão para o estudo do caso de autoprodutor de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

Descrição	Bitola ( $\text{mm}^2$ )			
	25	35	300	400
Rpos ( $\Omega/\text{km}$ )	0,9272	0,6684	0,0802	0,1613
Xpos ( $\Omega/\text{km}$ )	0,1635	0,1559	0,1146	0,5003
Rzero ( $\Omega/\text{km}$ )	1,4737	1,0624	0,1276	0,4272
Xzero ( $\Omega/\text{km}$ )	0,4160	0,3964	0,2915	1,7584
Xc pos ( $\Omega.\text{km}$ )	10.204,1	9.259,3	4.273,5	3.787,9
Xc zero ( $\Omega.\text{km}$ )	10.204,1	9.259,3	4.273,5	3.787,9

Nota: Os comprimentos dos circuitos estão indicados na Figura 3.

Tabela 18 – Parâmetros elétricos dos reatores limitadores de curto-circuito de média tensão para o estudo do caso de autoprodutor de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

Parâmetro	RL-MT-01	RL-MT-02
Rpos ( $\Omega$ )	0,00800	0,00800
Xpos ( $\Omega$ )	0,15080	0,15080
Rzero ( $\Omega$ )	0,00800	0,00800
Xzero ( $\Omega$ )	0,15080	0,15080

Tabela 19 – Características técnicas das cargas não motóricas para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

Carga	Pn (kW)	FP
SE AT1	20.000	0,90
SE AT2	150.000	0,90
SE AT3	100.000	0,90
EQ BT-01	720	0,85
EQ BT-02	480	0,85

Tabela 20 – Características técnicas das cargas motóricas para o estudo do caso de autoprodutor de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

<b>Motor</b>	<b>MTS-01</b>	<b>MTS-02</b>	<b>MTI-01</b>	<b>MTI-02</b>	<b>BT-01</b>	<b>BT-02</b>
Tipo	síncrono	síncrono	indução	indução	indução	indução
Pn (kW)	2.940	1.960	7.360	4.900	4.630	3.100
Vn (V)	6.900	6.900	6.900	6.900	460	460
FP	1,00	1,00	0,883	0,883	0,808	0,808
EF	98%	98%	98,1%	98,1%	96,6%	96,6%
FD	80%	80%	80%	80%	60%	60%
X “ d	0,14	0,14	0,17	0,17	0,16	0,16
X/R	20	20	10	10	5	5

Nota: Pn é a potência nominal de saída mecânica, EF é o rendimento e FD é o carregamento do motor.

Os sistemas elétricos externos de transmissão foram representados por equivalentes dinâmicos. Para as máquinas síncronas foram utilizados os modelos da Biblioteca do Software *Round Rotor Steam Unit* [79] para o sistema de 230kV e *Salient Pole Hydro Unit* [79] para o sistema de 345kV. Para os sistemas de excitação foi usado o modelo *1979 IEEE Type 1* [68][79], e para os reguladores de velocidade o modelo *General Use* [79], ambos da Biblioteca do Software.

A geração do autoprodutor foi considerada baseada em geradores síncronos tipo rotor cilíndrico acionados por turbinas a vapor, solução bastante comum nas instalações de co-geração industriais com elevado requisito térmico.

Para a máquina síncrona foi utilizado o modelo *Round Rotor General* da Biblioteca do Software, baseado no Modelo IEEE Tipo 2.2 [67][79], e para o sistema de excitação foi utilizado o modelo *IEEE 1992 Type AC5A* da Biblioteca do Software [68][79], recomendado para aplicações tipo *brushless* onde não são conhecidos os parâmetros de forma detalhada [68].

Para as turbinas a vapor, consideradas do tipo sem reaquecimento e com estágio de baixa pressão [73][74], quando na operação em paralelo, foi usado o modelo *Standard Steam Turbine* [79], da Biblioteca do Software, corrigido para incluir o estágio de baixa pressão, e na operação isolada, foi usado um equivalente isócrono.

As cargas em geral foram inicialmente consideradas como tipo potência constante. Para os motores de indução equivalentes do autoprodutor foi usado o modelo tipo gaiola simples, com os parâmetros típicos sugeridos na referência [70] para motores industriais de grande e pequeno porte, e tipo exponencial quadrático para as cargas mecânicas, ambos conforme a Biblioteca do Software [79]. Para os motores síncronos equivalentes do autoprodutor foram usados o modelo de pólos salientes típico, *Synchronous Motor* [79], para os motores e o modelo *IEEE 1992 Type AC4A* [68][79] para o sistema de excitação, ambos também da Biblioteca do Software.

Nas tabelas e figuras a seguir estão descritos os parâmetros e os modelos utilizados para simulação dinâmica do sistema.

Tabela 21 – Parâmetros das máquinas síncronas dos geradores para o estudo do caso de autoprodutor de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

Parâmetro	Sistema de 345kV	Sistema de 230kV	Autoprodutor
Ra (p.u.)	0,0020	0,0030	0,0032
Xd (p.u.)	1,2500	1,8000	1,9470
Xq (p.u.)	0,7000	1,7500	1,9200
X' d (p.u.)	0,3000	0,3000	0,3460
X' q (p.u.)	-	0,4700	0,4000
X'' (p.u.)	0,2500	0,2300	0,2915
Xl (p.u.)	0,1500	0,1500	0,1500
H (s)	50,00	30,00	3,2000
D	0,00	0,00	0,0000
T' d0 (s)	4,0000	0,4800	2,0600
T'' d0 (s)	0,0400	0,0400	0,0260
T' q0 (s)	-	1,5000	1,0000
T'' q0 (s)	0,0600	0,0700	0,0700
S 1,0	0,1100	0,1000	0,1000
S 1,2	0,4800	0,4000	0,4000

Nota: Valores em p.u. indicados na base das máquinas.

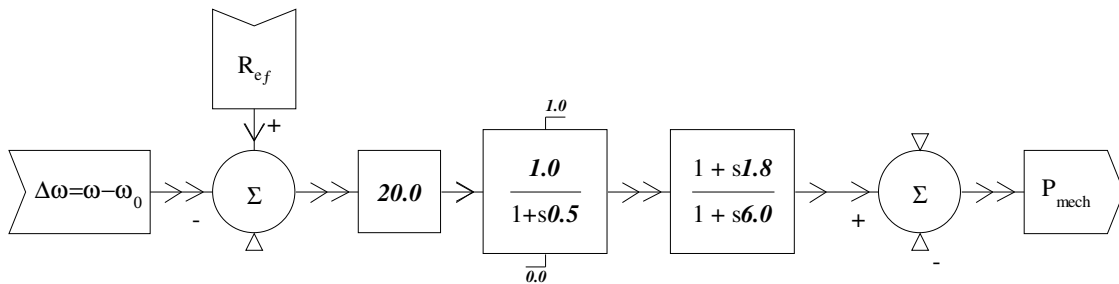


Figura 46 – Modelo do regulador de velocidade dos sistemas equivalentes externos para o estudo do caso de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

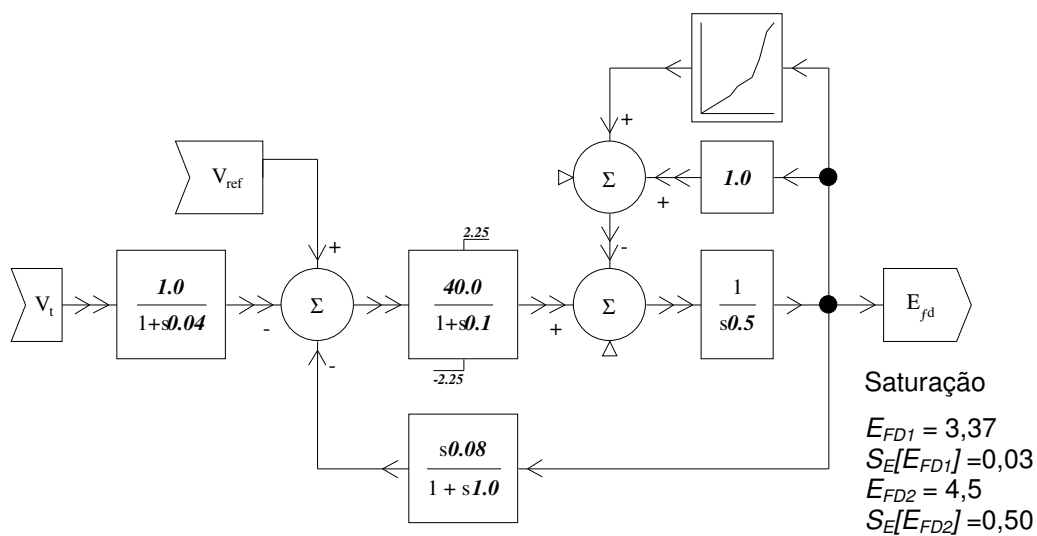


Figura 47 – Modelo do sistema de excitação dos sistemas equivalentes externos para o estudo do caso de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

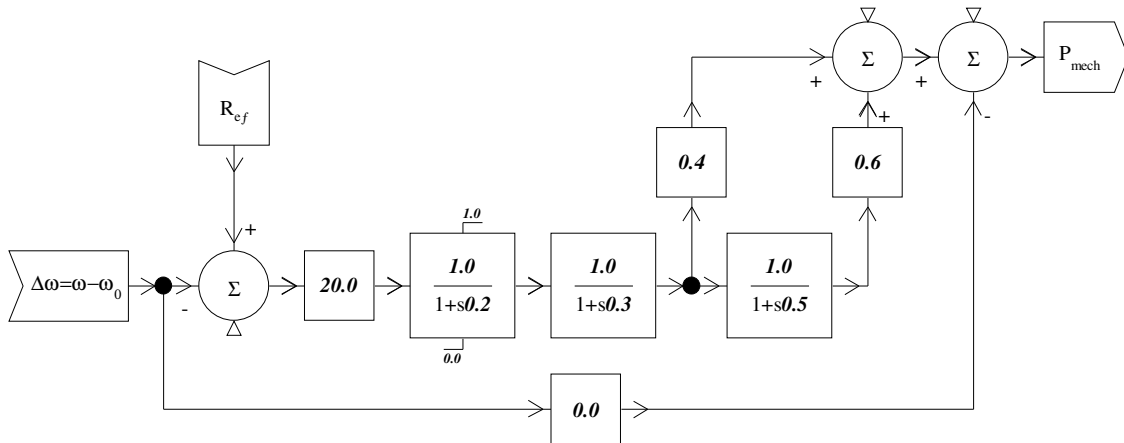


Figura 48 – Modelo do regulador de velocidade com estatismo do autoprodutor para o estudo do caso de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

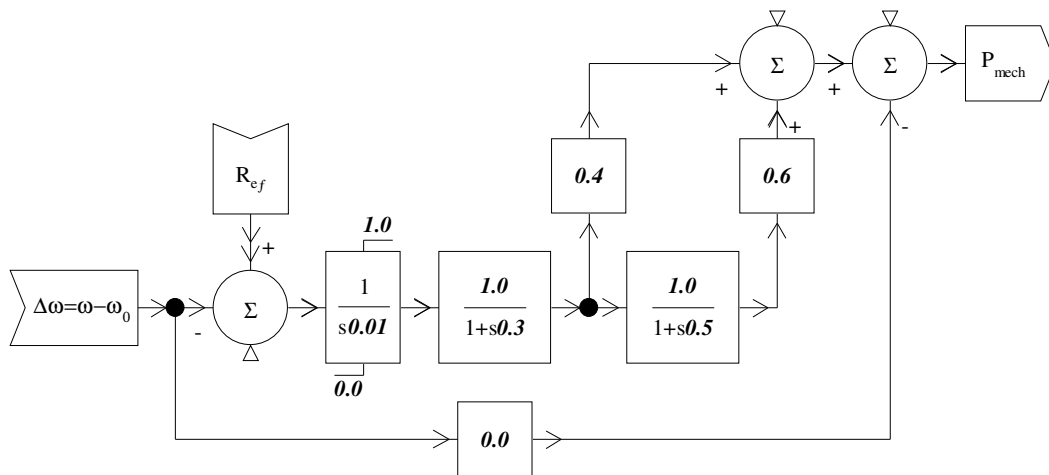


Figura 49 – Modelo do regulador de velocidade tipo isócrono do autoprodutor para o estudo do caso de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

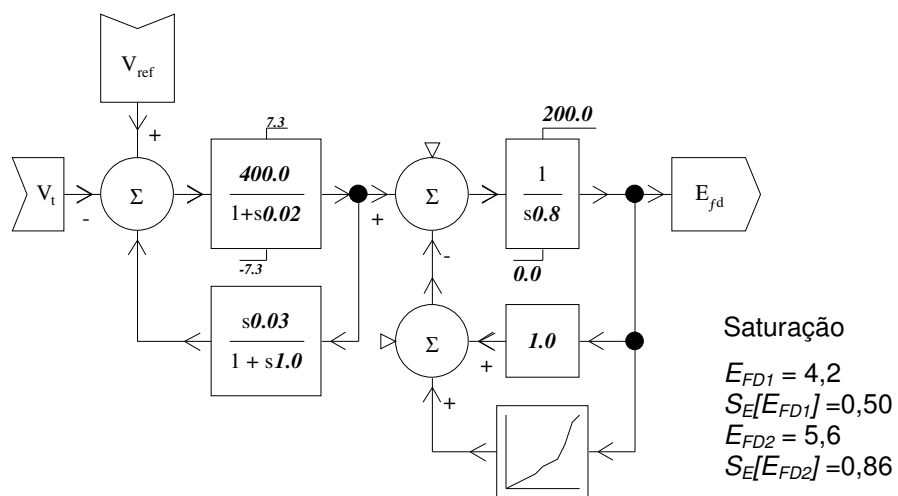


Figura 50 – Modelo e parâmetros do sistema de excitação dos geradores do autoprodutor para o estudo do caso de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão



Tabela 22 – Parâmetros dos motores de indução para o estudo do caso de autoprodutor de pequeno porte ligado no sistema de distribuição de média tensão

Parâmetro	MTI-01 e MTI-02	BT-01 e BT-02
Rs (p.u.)	0,0130	0,0310
Xs (p.u.)	0,0670	0,1000
Rr (p.u.)	0,0090	0,0180
Xr (p.u.)	0,1700	0,1800
Xm (p.u.)	3,8000	3,2000
H (s)	1,50	0,70

Nota: Valores em p.u. indicados na base das máquinas.

Tabela 23 – Parâmetros dos motores síncronos para o estudo do caso de autoprodutor de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

Parâmetro	MTS-01 e MTS-02	Parâmetro	MTS-01 e MTS-02
Ra (p.u.)	0,0020	D	0,00
Xd (p.u.)	0,1500	T ' d0 (s)	2,0000
Xq (p.u.)	0,9000	T " d0 (s)	0,2000
X ' d (p.u.)	0,2300	T " q0 (s)	0,0400
X " (p.u.)	0,1400	S1,0	0,1100
Xl (p.u.)	0,0900	S1,2	0,4800
H (s)	4,00		

Nota: Valores em p.u. indicados na base das máquinas.

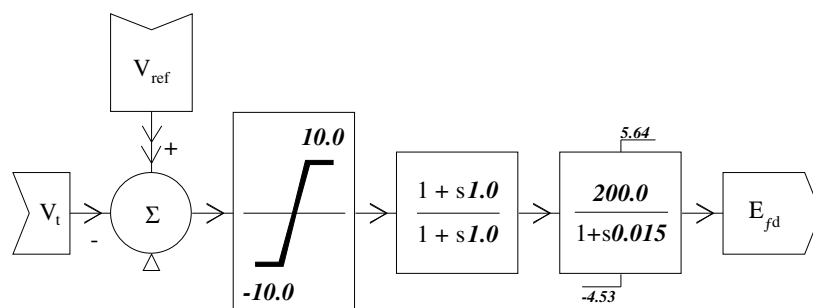


Figura 51 – Modelo e parâmetros do sistema de excitação dos motores síncronos para o estudo do autoprodutor de grande porte ligado no sistema de distribuição de alta tensão

Para avaliação das respostas do sistema às perturbações simuladas são consideradas as atuações das proteções do sistema de subtransmissão local de 138kV e da entrada e interligação do autoprodutor, cuja descrição é mostrada na Figura 52 e na Figura 53, observadas as definições das funções de proteção conforme a referência [71].

Os ajustes das proteções de sobrecorrente (funções 50, 50N, 51, 51N, 67 e 67N) estão indicados com os valores de *pickup* de corrente e os tempos ou curvas de tempo de atuação, conforme cada caso. Os ajustes das proteções de tensão (funções 27, 59 e 59N) estão indicados com os valores de *pickup* de tensão e os tempos de atuação. Os ajustes das proteções de frequência (funções 81.U e 81.O) estão indicados com os valores de *pickup* de frequência e os tempos de atuação. Os ajustes da proteção direcional de

potência (função 32) estão indicados com os valores de *pickup* de potência e os tempos de atuação. Os ajustes da proteção de verificação de sincronismo (função 25) estão indicados com os valores máximos de diferença de módulo e ângulo das tensões.

As curvas de coordenação com os ajustes das proteções de sobrecorrente de fase e terra correspondentes estão mostradas na Figura 54.

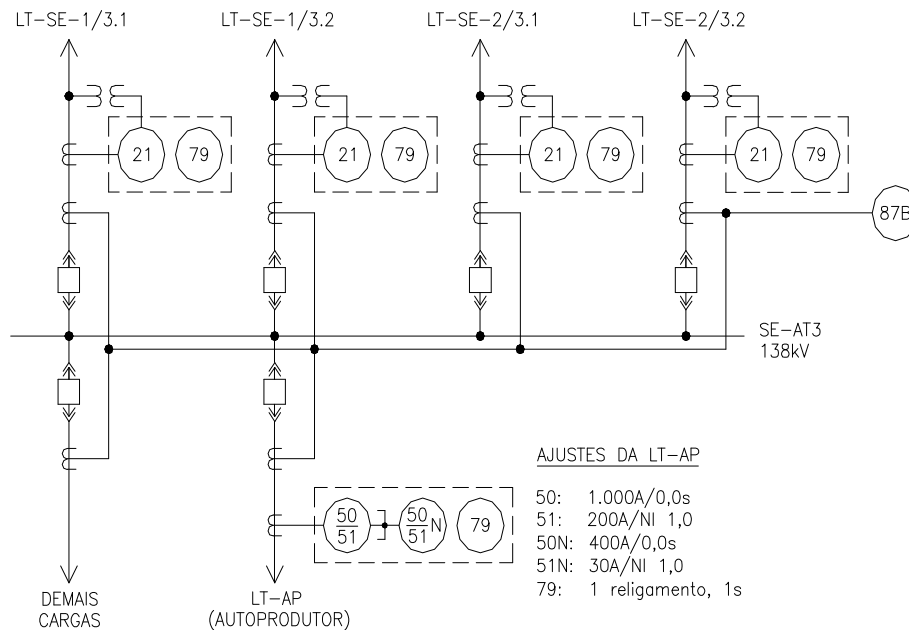


Figura 52 – Esquema típico e ajustes das proteções de sobrecorrente na subestação supridora para o estudo do caso de autoproductor de grande porte ligado no sistema de alta tensão

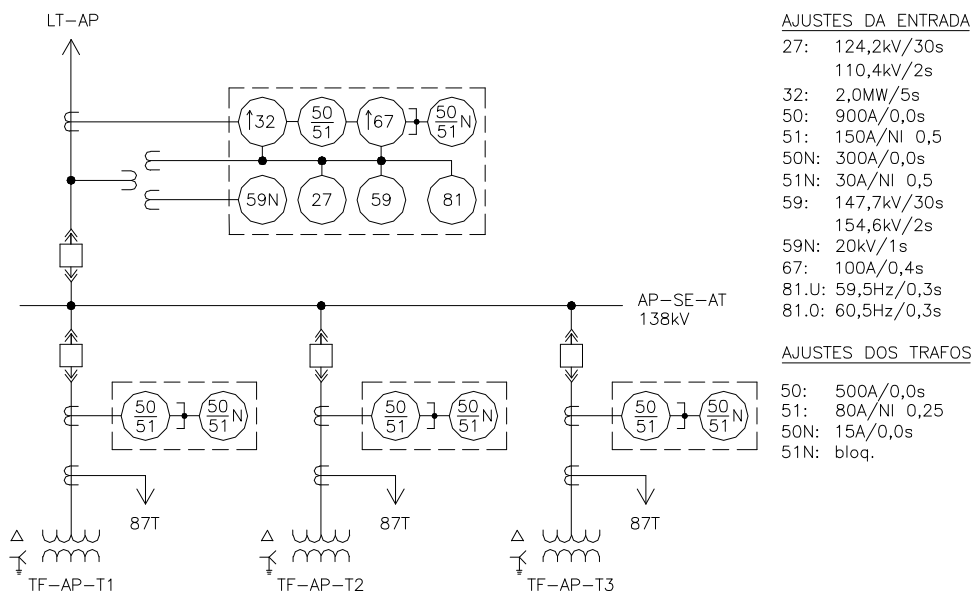


Figura 53 – Esquema típico e ajustes das principais proteções da interligação e entrada do autoproductor para o estudo do caso de grande porte ligado no sistema de alta tensão

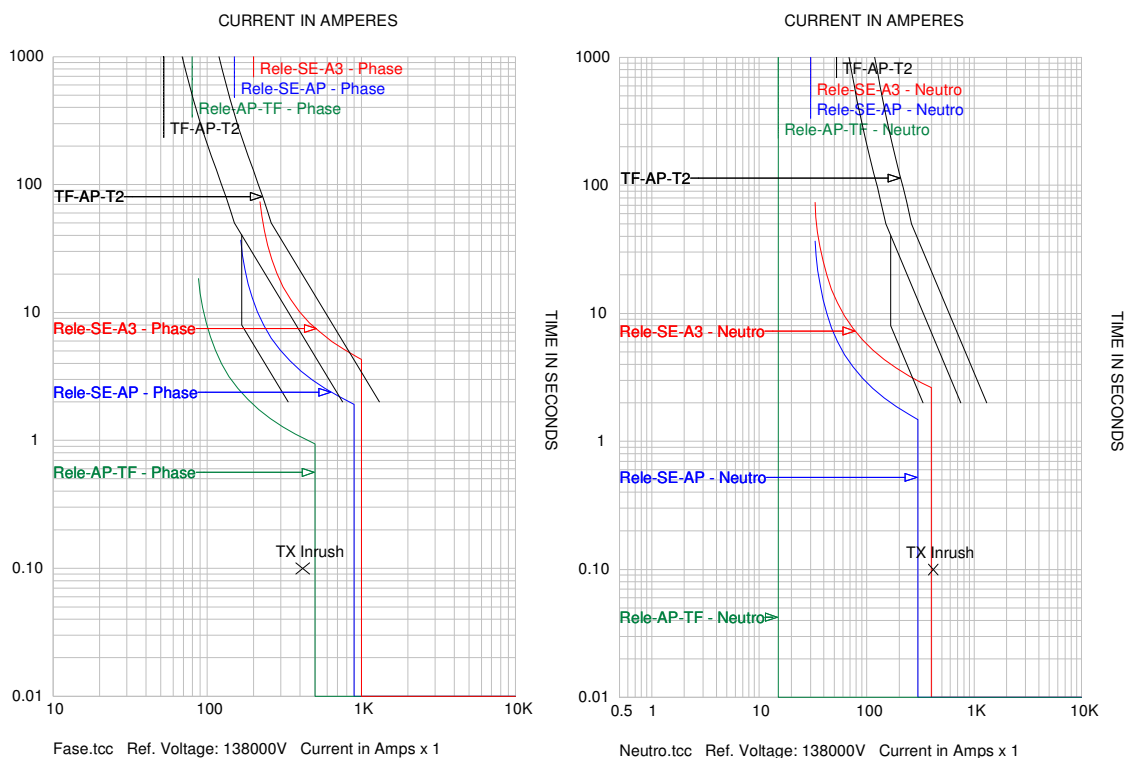


Figura 54 – Curvas de coordenação das proteções de sobrecorrente de fase e terra da subestação supridora e da entrada e interligação do autoprodutor para o estudo do caso de grande porte ligado no sistema de alta tensão

## 4.2 METODOLOGIA E PREMISSAS PARA AS SIMULAÇÕES

Para a simulação e avaliação do sistema serão adotadas as premissas a seguir listadas.

Para o regime de funcionamento do sistema de distribuição externo ao autoprodutor, serão consideradas as seguintes condições operativas:

- carga pesada como informado no caso base, carga média como 70% das cargas informadas no caso base e carga leve como 50% das cargas informadas no caso base;
- tensão no sistema equivalente de 138kV de 0,97p.u. em carga pesada, 1,0p.u. em carga média e 1,02p.u. em carga leve;
- comutadores de taps dos transformadores na subestação e do regulador de tensão ajustados automaticamente nas simulações de fluxo de potência e de curto-circuito.

Para o regime de funcionamento do autoprodutor, serão consideradas as seguintes condições operativas:

- funcionamento contínuo no regime de carga pesada como informado no caso base;
- controle automático de tensão dos geradores quando funcionando em paralelo com o sistema externo, para controle do fator de potência na interligação (fator de

potência unitário, sem intercâmbio de energia reativa) ou para controle da tensão terminal (1,0pu), conforme definido para cada caso;

- controle automático da geração quando funcionando em paralelo com o sistema externo de forma a cobrir toda a carga da unidade, sem compra ou exportação de energia;
- para os limites de potência ativa e reativa da máquina consideradas as potências equivalentes para o fator de potência nominal de 0,8;
- transformador TF-AP-T2 funcionando como reserva fria do autoprodutor, desligado na condição normal de funcionamento;
- taps primários dos transformadores abaixadores de 460V (TF-EQ-01 e TF-EQ-02) ajustados para -2,5%.

Nos estudos de fluxo potência serão consideradas como adequadas para regime contínuo as tensões calculadas na faixa entre 95% e 105% e para regime temporário de emergência as tensões calculadas na faixa entre 90% e 105%. Estas tensões seguem os limites estabelecidos nos Procedimentos de Redes, conforme a Tabela 3 bem como refletem a prática adotada por concessionárias de distribuição para avaliação de seus sistemas de alta tensão.

Nos cálculos de curto-circuito será considerada a tensão pré-falta no ponto calculada no fluxo de potência do caso correspondente, incluindo os efeitos dos taps dos transformadores. Serão calculados os valores simétricos subtransitórios das correntes de curto-circuito trifásico e monofásico.

Nas simulações de estabilidade será utilizado o modelo com estatismo para os casos com funcionamento em paralelo. O modelo isócrono será usado nas simulações com funcionamento do gerador isolado.

### **Serão simulados os seguintes casos de fluxo de potência:**

Caso 1 – Condição normal de funcionamento do sistema externo em regime de carga pesada, com o autoprodutor operando com a interligação aberta

Caso 2 – Condição de funcionamento do sistema em contingência, em regime de carga pesada e sem o autoprodutor em paralelo

Caso 2.1 – Uma das linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT1 indisponível

Caso 2.2 – Ambas as linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT1 indisponível

Caso 2.3 – Uma das linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT2 indisponível

Caso 2.4 – Ambas as linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT1 indisponível

Caso 3 – Condição normal de funcionamento do sistema externo em regime de carga pesada e com o autoprodutor em paralelo

Caso 3.1 – Autoprodutor funcionando no modo de controle da tensão terminal

Caso 3.2 – Autoprodutor funcionando no modo de controle do fator de potência

Caso 4 – Condição de funcionamento do sistema em contingência em regime de carga pesada, com o autoprodutor em paralelo e com exportação do excedente de energia ativa e reativa

Caso 4.1 – Uma das linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT1 indisponível

Caso 4.2 – Ambas as linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT1 indisponíveis

Caso 4.3 – Uma das linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT2 indisponível

Caso 4.4 – Ambas as linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT1 indisponíveis

Caso 5 – Condição de funcionamento do sistema em regime de carga pesada, suprindo o autoprodutor em condição de perda total da geração local

Caso 5.1 – Condição normal de funcionamento do sistema, com todas as linhas disponíveis

Caso 5.2 – Condição de funcionamento do sistema em contingência, com uma das linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT1 indisponível

Caso 5.3 – Condição de funcionamento do sistema em contingência, com ambas as linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT1 indisponíveis

Caso 5.4 – Condição de funcionamento do sistema em contingência, com uma das linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT2 indisponível

Caso 5.5 – Condição de funcionamento do sistema em contingência, com ambas as linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT2 indisponíveis

#### **Serão simulados os seguintes casos de curto-circuito:**

Caso 1 – Curto-circuito em todas as barras para a condição normal de funcionamento do sistema externo, com o autoprodutor operando com a interligação aberta

Caso 1.1 – Autoprodutor na condição típica de funcionamento

Caso 1.2 – Autoprodutor com as barras principais de 6,9kV AP-MT-01A/B/C interligadas diretamente, sem os reatores limitadores de curto-circuito

Caso 2 – Curto-circuito em todas as barras para a condição normal de funcionamento do sistema externo, com o autoprodutor em paralelo

Caso 2.1 – Autoprodutor na condição típica de funcionamento

Caso 2.2 – Autoprodutor com os três transformadores de 138kV ligados e em paralelo

Caso 2.3 – Autoprodutor com os três transformadores de 138kV ligados e com as barras principais de 6,9kV AP-MT-01A/B/C interligadas diretamente, sem os reatores limitadores de curto-circuito

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor no modo de controle do fator de potência e da tensão terminal.

Caso 3 – Curto-circuito nas linhas de transmissão em pontos localizados a 10% do comprimento a partir da SE-AT3 para a condição normal de funcionamento do sistema em regime de carga pesada, com o autoprodutor em paralelo e com os três transformadores de 138kV ligados em paralelo

Caso 3.1 – Curto-circuito em uma das linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT1

Caso 3.2 – Curto-circuito em uma das linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT2

Nota: Simuladas para cada Caso as condições de funcionamento do autoprodutor no modo de controle do fator de potência e da tensão terminal.

### **Serão simulados os seguintes casos de estabilidade transitória:**

Caso 1 – Eliminação de falta trifásica e monofásica para o autoprodutor funcionando desconectado do sistema externo

Caso 1.1 – Falta na barra de 6,9kV AP-MT-02

Caso 1.2 – Falta na barra de 6,9kV AP-MT-01B

Caso 1.3 – Falta na barra de 460V AP-BT-01

Caso 1.4 – Falta na barra de 460V AP-BT-02

Nota: Simulados para cada Caso os tempos de eliminação da falta de 100ms, 400ms e 800ms.

Caso 2 – Eliminação de falta trifásica e monofásica para o autoprodutor em paralelo com o sistema externo em regime de carga pesada, previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência

Caso 2.1 – Falta na barra de 6,9kV AP-MT-02

Caso 2.2 – Falta na barra de 6,9kV AP-MT-01B

Caso 2.3 – Falta na barra de 460V AP-BT-01

Caso 2.4 – Falta na barra de 460V AP-BT-02

Caso 2.5 – Falta na barra de 138kV AP-SE-AT

Caso 2.6 – Falta na barra de 138kV da SE-AT3

Caso 2.7 – Falta na linha entre a SE-AT1 e a SE-AT3 em ponto localizado a 20% da distância da SE-AT3

Caso 2.8 – Falta na linha entre a SE-AT2 e a SE-AT3 em ponto localizado a 20% da distância da SE-AT3

Nota: Simulados para cada Caso os tempos de eliminação da falta de 100ms, 400ms e 800ms.

Caso 3 – Variação da carga para o autoprodutor funcionando desconectado do sistema externo e previamente funcionando com 80% da sua carga típica

Caso 3.1 – Entrada de bloco de carga de 20% (3,2MW com fator de potência 0,85) na barra AP-MT-01B

Caso 3.2 – Entrada de bloco de carga de 40% (6,4MW com fator de potência 0,85) na barra AP-MT-01B

Caso 4 – Variação da carga para o autoprodutor em paralelo com o sistema externo em regime de carga pesada, previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência e funcionando com 80% da sua carga típica

Caso 4.1 – Entrada de bloco de carga de 20% (3,2MW com fator de potência 0,85) na barra AP-MT-01B

Caso 4.2 – Entrada de bloco de carga de 40% (6,4MW com fator de potência 0,85) na barra AP-MT-01B

Caso 5 – Perda de linhas de transmissão no sistema externo para o autoprodutor em paralelo e previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência

Caso 5.1 – Perda de uma das linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT1

Caso 5.2 – Perda de ambas as linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT1

Caso 5.3 – Perda de uma das linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT2

Caso 5.4 – Perda de ambas as linhas de transmissão entre a SE-AT3 e a SE-AT2

Caso 6 – Perda da interligação com o sistema externo em regime de carga pesada e funcionamento do autoprodutor previamente ajustado para o modo de controle do fator de potência em ilha suprindo o alimentador onde ligado,

Caso 6.1 – Autoprodutor funcionando com os dois geradores e religamento automático em 1s

Caso 6.2 – Autoprodutor funcionando com apenas um gerador e importando a energia complementar

Caso 6.3 – Autoprodutor funcionando com apenas um gerador e importando a energia complementar e descarte automático de carga transcorridos 0,4s, com desligamento de todos os motores de média tensão e do banco de capacitores.

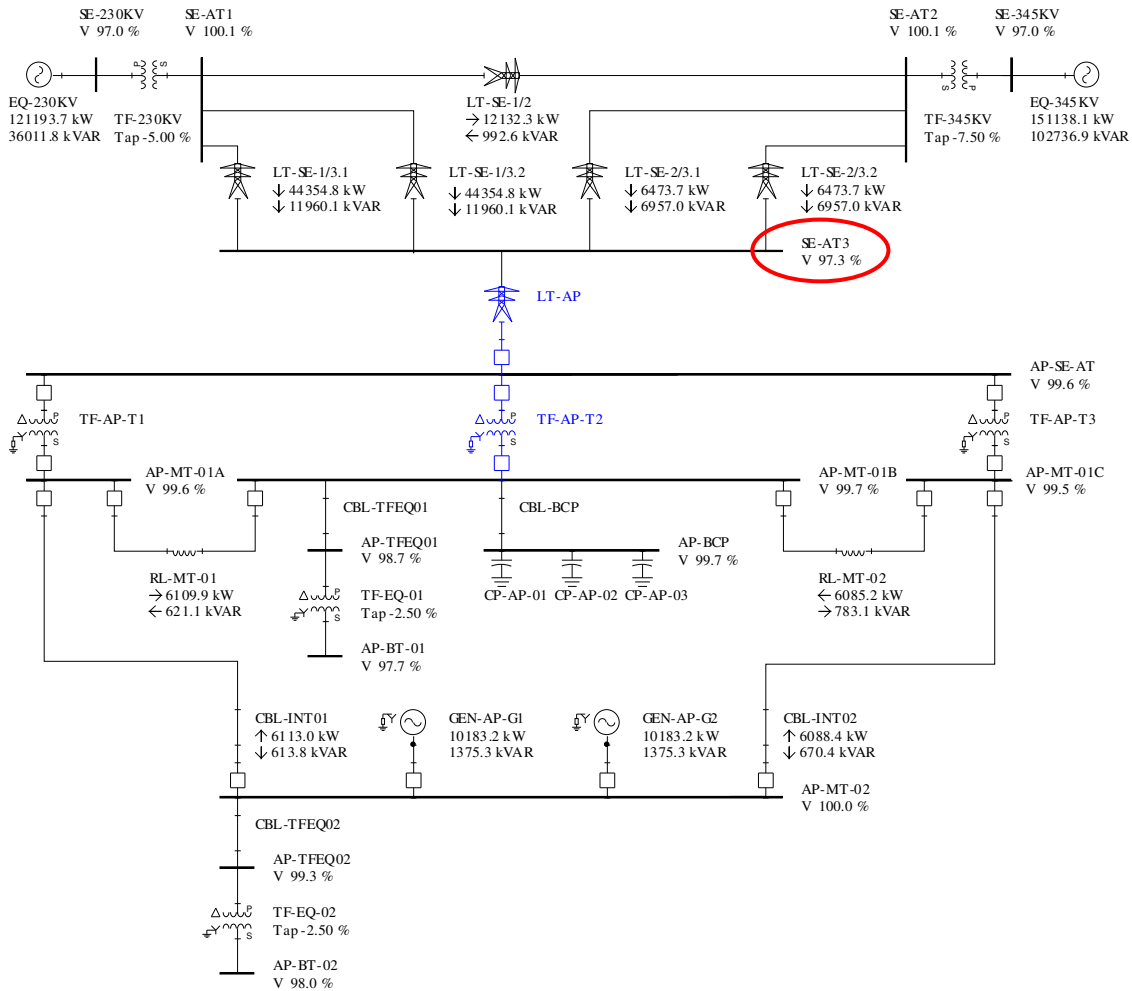
### **4.3 SIMULAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Na sequência são apresentados e discutidos os principais resultados das simulações de fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade desenvolvidas em conformidade com o descrito no subitem 4.2. Para evitar sobrecarregar o texto, serão apresentados apenas os resultados ilustrativos de cada Caso, tornando desta forma a discussão mais fluida.

#### **4.3.1 Avaliações de Fluxo de Potência**

O sistema em condição normal de funcionamento antes da conexão do autoprodutor, conforme mostrado para o regime de carga pesada na Figura 55, apresenta níveis adequados de tensão em todas as barras, mostrando que os equipamentos de controle da tensão instalados na rede de distribuição estão funcionando de modo satisfatório. Com relação ao autoprodutor, os taps primários dos transformadores abaixadores de 460V TF-EQ01 e TF-EQ02 foram considerados previamente ajustados para -2,5% para garantir tensão mais adequada para os respectivos sistemas de baixa tensão. O banco de

capacitores foi considerado ligado, já que a unidade está funcionando a plena carga, o que reduz a necessidade de geração de energia reativa nos geradores, reduzindo seus carregamentos totais em MVA.

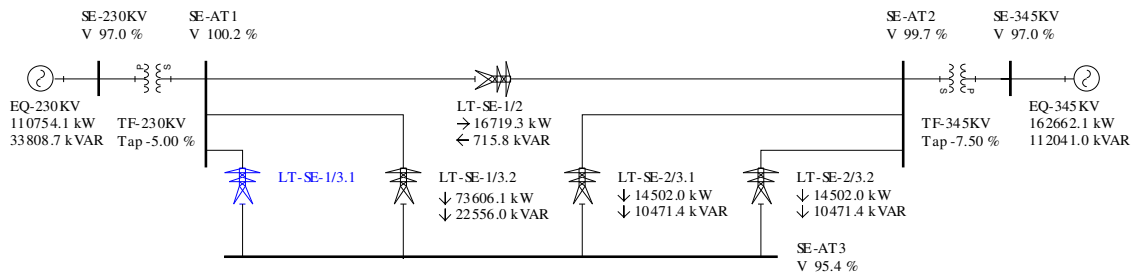


Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 55 – Tensões calculadas para o Caso 1 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

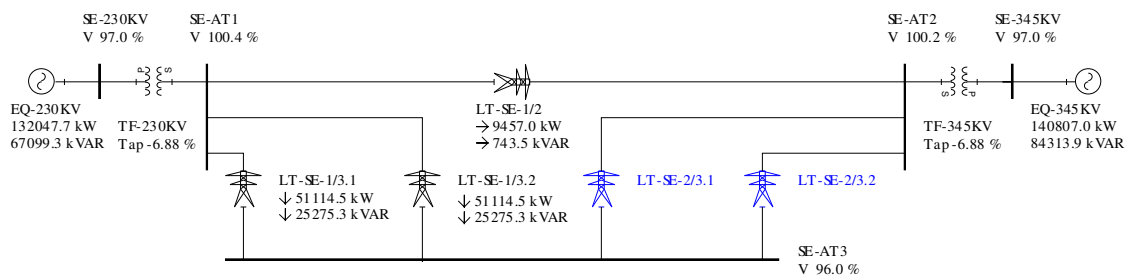
O sistema em condição de contingência de funcionamento antes da conexão do autoprodutor, em regime de carga pesada, tem o seu desempenho fortemente influenciado pela disponibilidade da interligação entre as subestações SE-AT1 e SE-AT3. Com a perda de uma das linhas de interligação entre as subestações SE-AT1 e SE-AT3, o sistema ainda apresenta condições satisfatórias de tensão, conforme mostrado na Figura 56, mas a corrente na linha remanescente atingiria 321,5A e o seu limite térmico, de 300A, conforme indicado na Tabela 16 seria excedido. Com a perda de ambas as linhas de interligação entre as subestações SE-AT1 e SE-AT3, o sistema teria suas condições operacionais comprometidas. Mesmo com a perda das duas linhas de interligação entre as subestações SE-AT2 e SE-AT3, o sistema apresenta condições satisfatórias de funcionamento, conforme mostrado na Figura 57.





Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

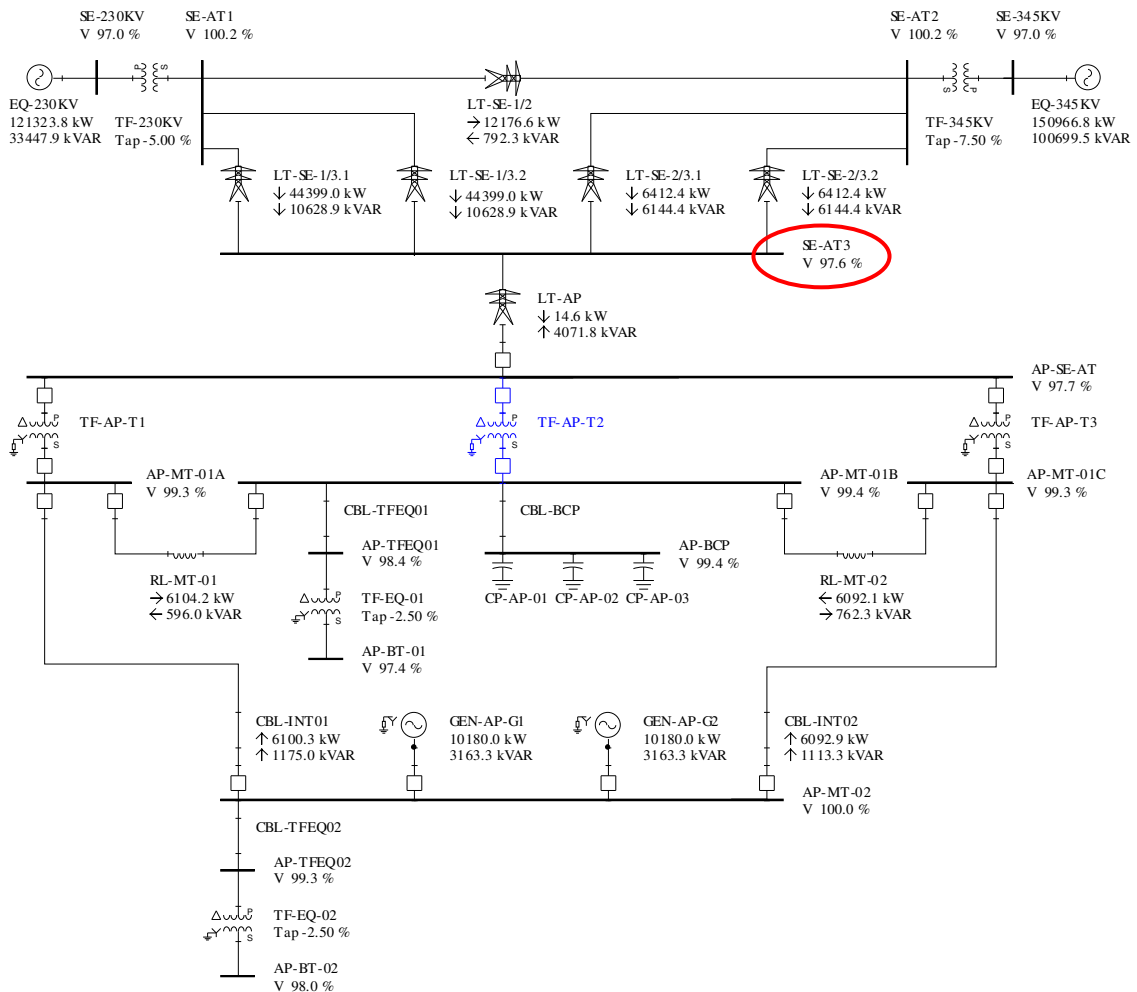
Figura 56 – Tensões calculadas para o Caso 2.1 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 57 – Tensões calculadas para o Caso 2.4 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

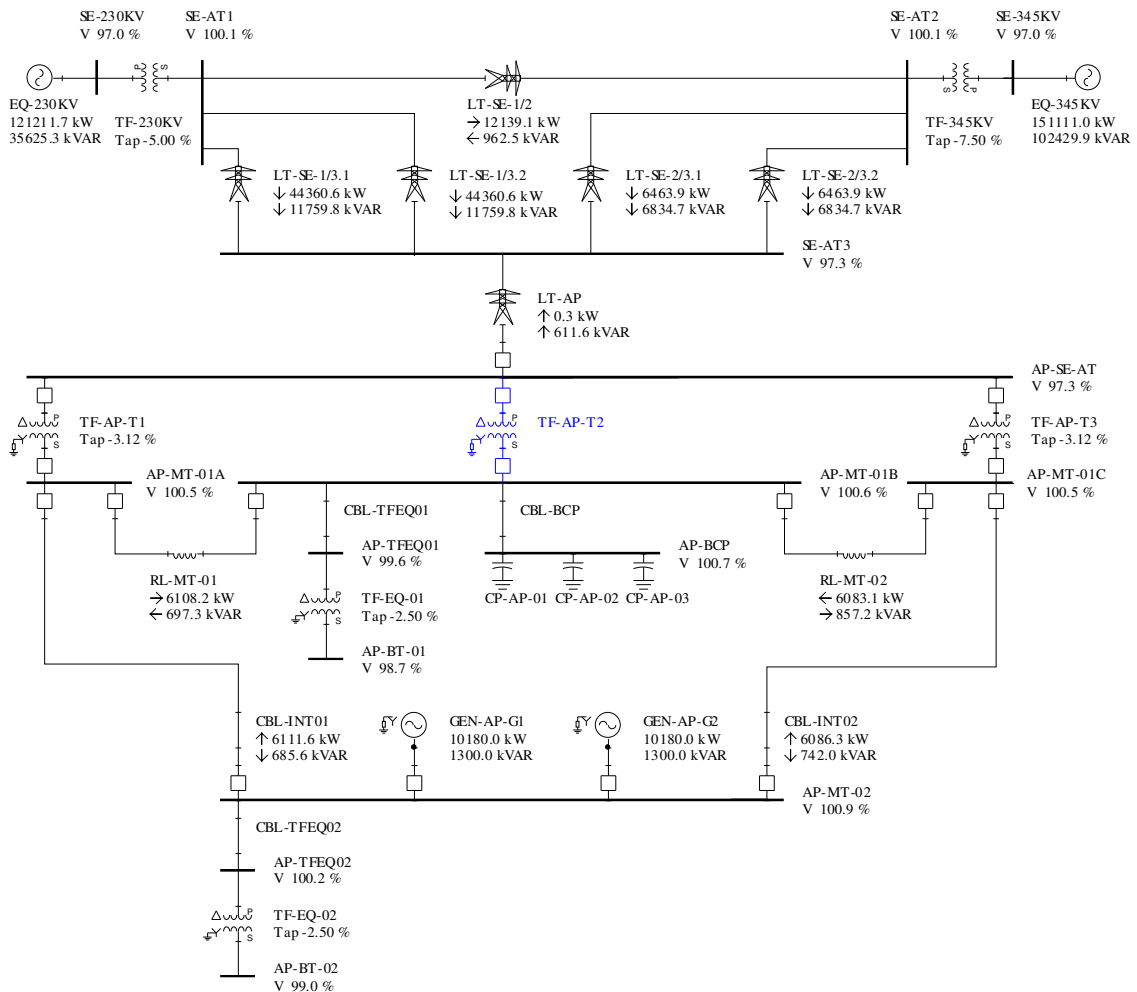
A interligação do autoprodutor em paralelo com o sistema externo de distribuição sem exportação de energia excedente e funcionamento no modo de controle da tensão terminal, faz com que haja injeção ou absorção de potência reativa do sistema. Como a tensão da barra onde o autoprodutor está conectado era menor do que a tensão da barra de entrada do autoprodutor, haverá injeção de potência reativa no sistema. Os efeitos destas injeções ou absorções de potência reativa, porém, podem ser eventualmente mascarados pela ação dos comutadores sob carga dos transformadores, de acordo com os limites das bandas mortas conforme cada caso. A Figura 58 apresenta estes efeitos para a conexão do autoprodutor mostrando a ligeira melhoria da tensão na barra local do sistema (de 97,3% antes para 97,6% depois da conexão do autoprodutor).



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 58 – Tensões calculadas para o Caso 3.1 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

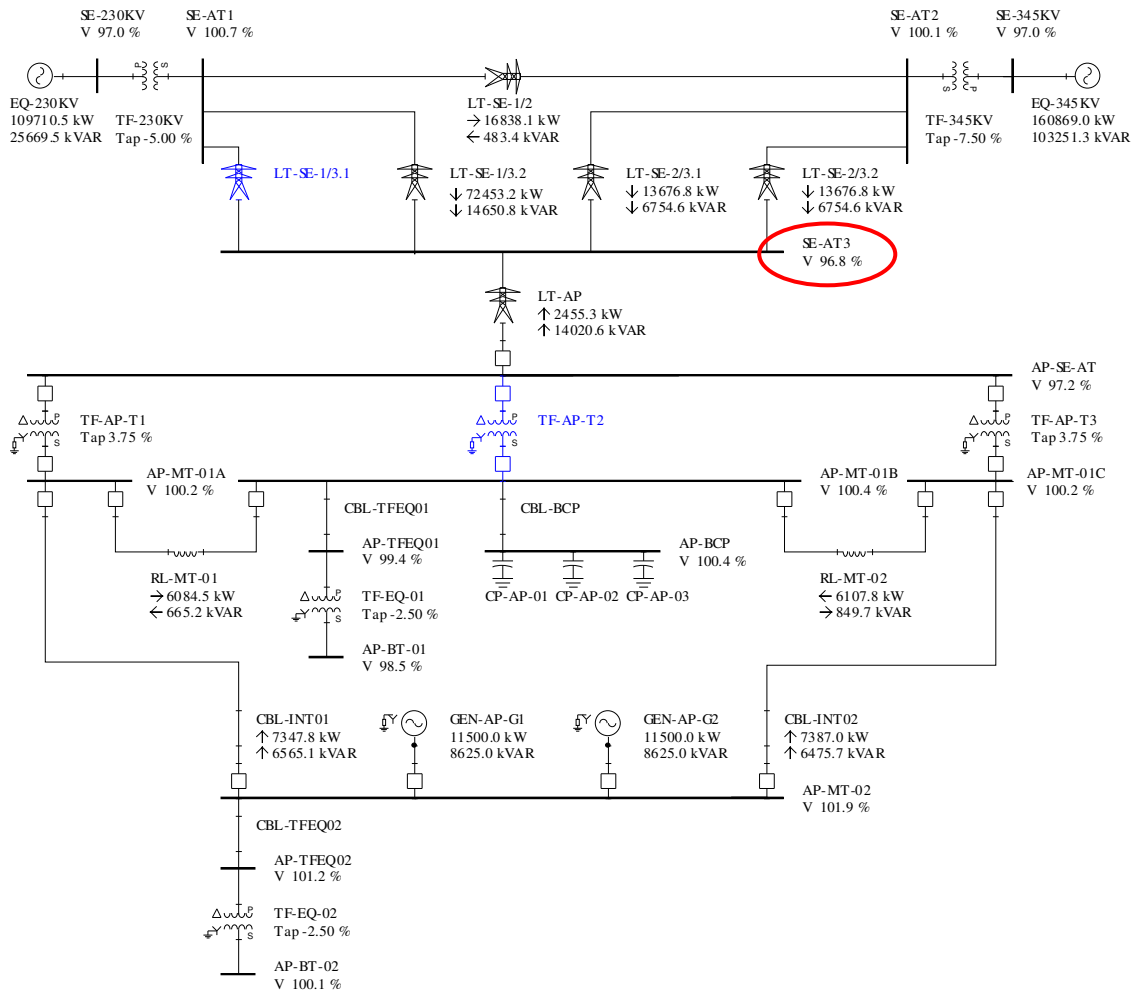
A interligação do autoprodutor em paralelo com o sistema externo de distribuição sem exportação de energia excedente e funcionamento no modo de controle do fator de potência na interligação, faz com que haja alteração na tensão terminal do gerador. Com a ação dos comutadores sob carga dos transformadores na entrada do autoprodutor, mesmo a tensão da barra onde o autoprodutor está conectada sendo menor do que a tensão da barra de entrada do autoprodutor, não há redução da tensão terminal do gerador. Desta forma não há influência do autoprodutor no sistema de distribuição externo. A Figura 59 apresenta estes efeitos para a conexão do autoprodutor, mostrando que não houve variação da tensão na barra local do sistema.



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 59 – Tensões calculadas para o Caso 3.2 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

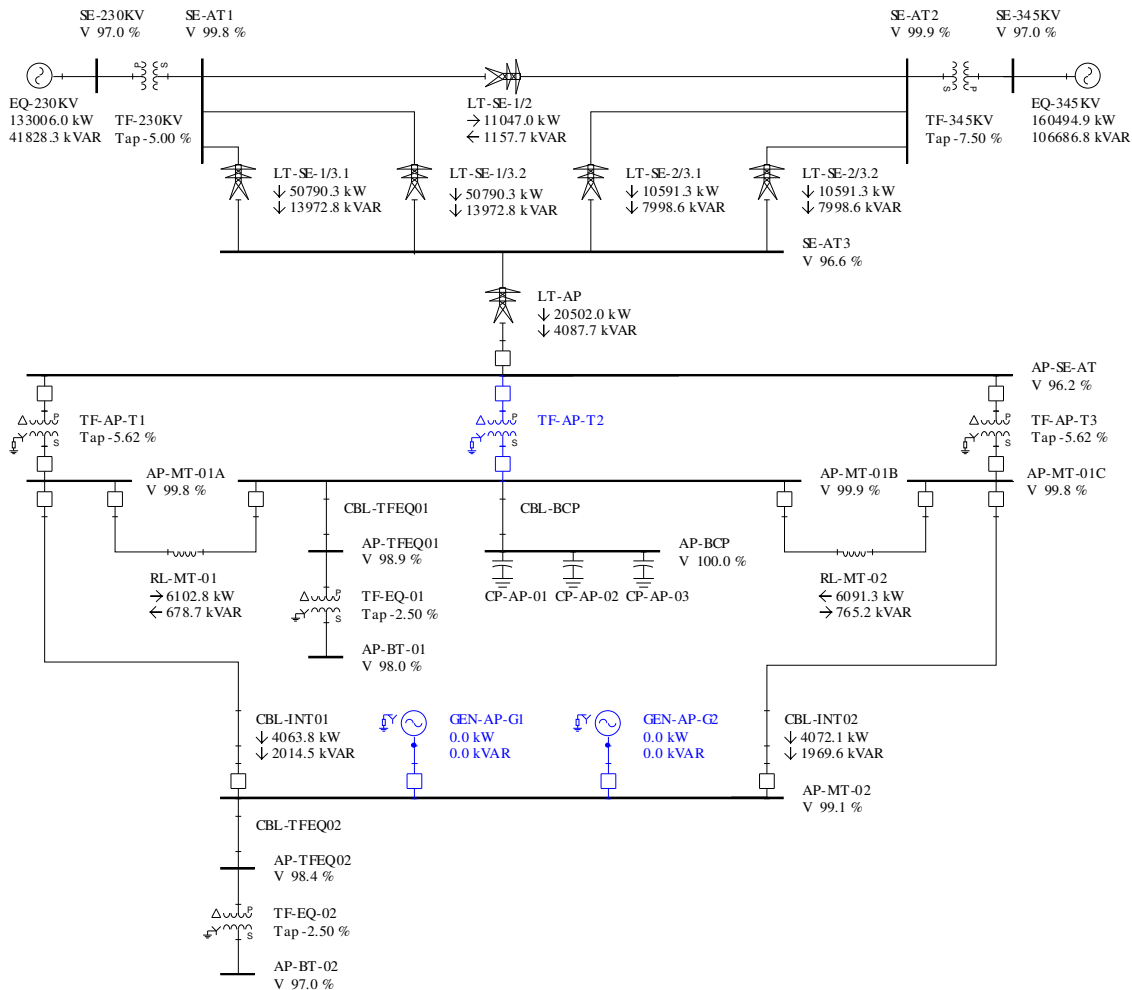
A interligação do autoprodutor em paralelo com o sistema externo de distribuição com exportação de energia excedente, além de possibilitar a melhoria dos níveis de tensão e redução das perdas, melhora seu desempenho em face das contingências. A Figura 60 apresenta estes efeitos para a conexão do autoprodutor com o sistema externo funcionando sem uma das linhas de interligação entre as subestações SE-AT1 e SE-AT3, mostrando a melhoria da tensão na barra local do sistema (de 95,4% antes para 96,8% depois da conexão do autoprodutor). Adicionalmente, a corrente na linha remanescente se reduziu de 321,5A para 307,3A.



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 60 – Tensões calculadas para o Caso 4.1 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

Para a condição normal de funcionamento do sistema de distribuição, com todas as linhas disponíveis, a perda da geração local do autoprodutor não implica em restrição operacional, conforme indicado na Figura 61. Na perda de uma das linhas de interligação entre as subestações SE-AT1 e SE-AT3, a condição de carregamento da linha remanescente que já era crítica com a presença da geração local no autoprodutor, conforme mostrado para o Caso 2.1, torna-se ainda mais grave sem a presença da geração local, com a corrente na linha atingindo 370,9A, além de que desta vez a tensão na barra da subestação SE-AT3 resulta inferior ao limite de 0,95p.u. A perda das duas linhas de interligação entre as subestações SE-AT2 e SE-AT3, apesar da forte elevação do carregamento imposto às linhas de interligação entre as subestações SE-AT1 e SE-AT3, não implica em comprometimento do desempenho do sistema.

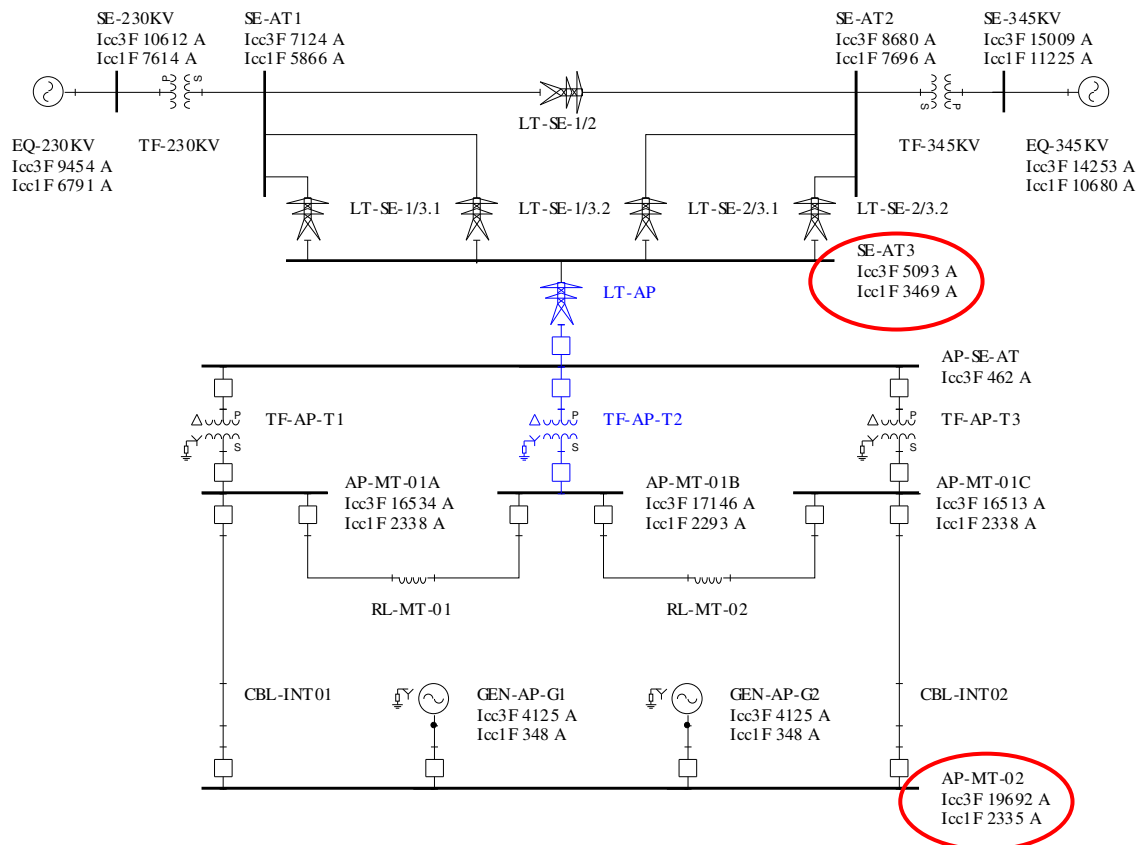


Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação.

Figura 61 – Tensões calculadas para o Caso 5.1 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

### 4.3.2 Avaliações de Curto-circuito

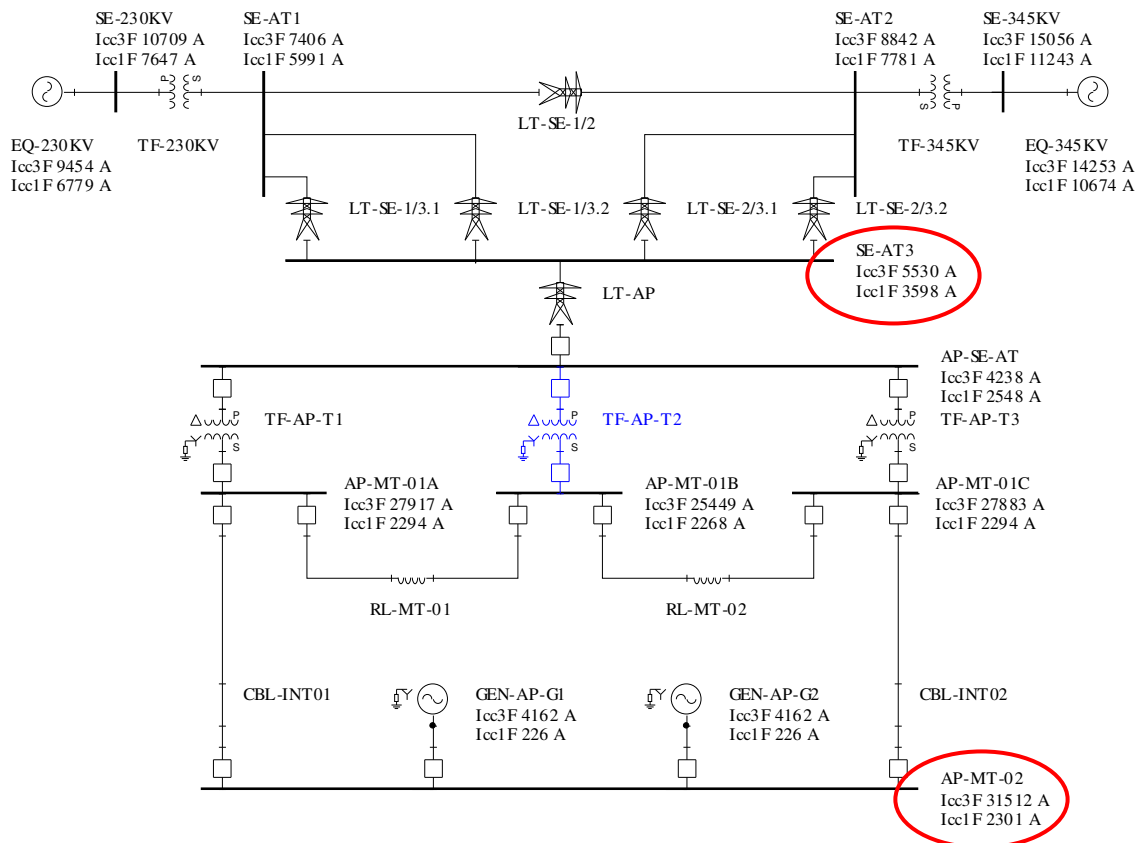
O sistema e o autoprodutor antes da conexão em paralelo apresentam níveis de curto-circuito mais reduzidos. No sistema externo, na barra de 138kV da subestação SE-AT3 as correntes de curto-circuito máximas calculadas são da ordem de 5,1kA (1.220MVA). No sistema do autoprodutor, nas barras de 6,9kV as correntes de curto-circuito máximas calculadas são da ordem de 19,7kA (235MVA), na barra onde ligados os geradores. A Figura 62 mostra as correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas calculadas nas principais barras do sistema para esta condição de funcionamento. Se não houvessem sido utilizados os reatores limitadores entre as barras principais de 6,9kV do autoprodutor, conforme investigado no Caso 1.2, as correntes de curto-circuito máximas calculadas no sistema de 6,9kV do autoprodutor seriam da ordem de 20,5kA (245MVA), na barra onde ligados os geradores.



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 62 – Correntes de curto-circuito calculadas para o Caso 1.1 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

Com a conexão do autoprodutor paralelo com o sistema externo de distribuição, os níveis de curto-circuito são majorados, principalmente no sistema interno do autoprodutor. No sistema externo, na barra de 138kV da subestação SE-AT3 as correntes de curto-circuito máximas calculadas passam a cerca de 5,5kA (1.315MVA). No sistema do autoprodutor, nas barras de 6,9kV as correntes de curto-circuito máximas calculadas passam a cerca de 31,5kA (376MVA), na barra onde ligados os geradores. A Figura 63 mostra as correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas calculadas nas principais barras do sistema para esta condição de funcionamento, com os geradores no modo de controle do fator de potência. Caso o terceiro transformador de entrada de 138kV do autoprodutor opere em paralelo com os demais, as correntes de curto-circuito máximas no sistema de 6,9kV atingiriam cerca de 33,5kA (400MVA). Se adicionalmente não houvessem sido utilizados os reatores limitadores entre as barras principais de 6,9kV, as correntes de curto-circuito máximas no sistema de 6,9kV atingiriam cerca de 35,4kA (423MVA).



Nota: Componentes representados em azul considerados desligados na simulação

Figura 63 – Correntes de curto-circuito calculadas para o Caso 2.1 com autoprodutor em modo de controle do fator de potência para o estudo do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

A Figura 64 mostra as contribuições para as correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas calculadas para falta na linha de interligação entre as subestações SE-AT1 e SE-AT3, em ponto localizado a 10% do comprimento do lado da SE-AT3, para a condição de funcionamento do autoprodutor em paralelo com o sistema externo e no modo de controle do fator de potência. Esta é uma condição de contribuição elevada do autoprodutor para um defeito nas linhas do sistema externo. Neste caso a contribuição do autoprodutor para a corrente total de defeito atinge cerca de 0,5kA para defeito trifásico. Para defeito monofásico, a contribuição do autoprodutor atinge cerca de 0,2kA, correspondente às componentes de sequência positiva e negativa, analogamente ao ocorrido no Capítulo 3 e detalhado no Apêndice C.

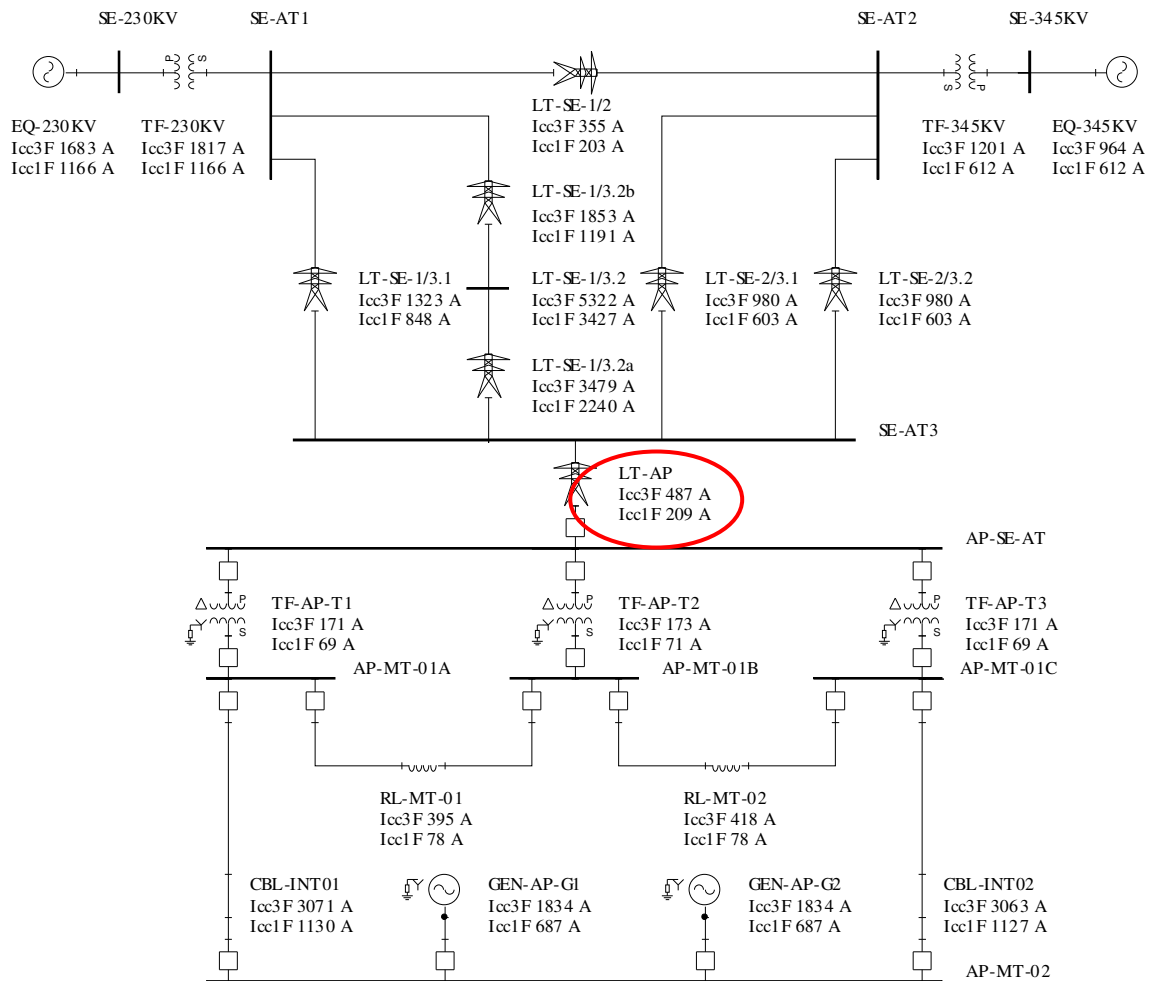


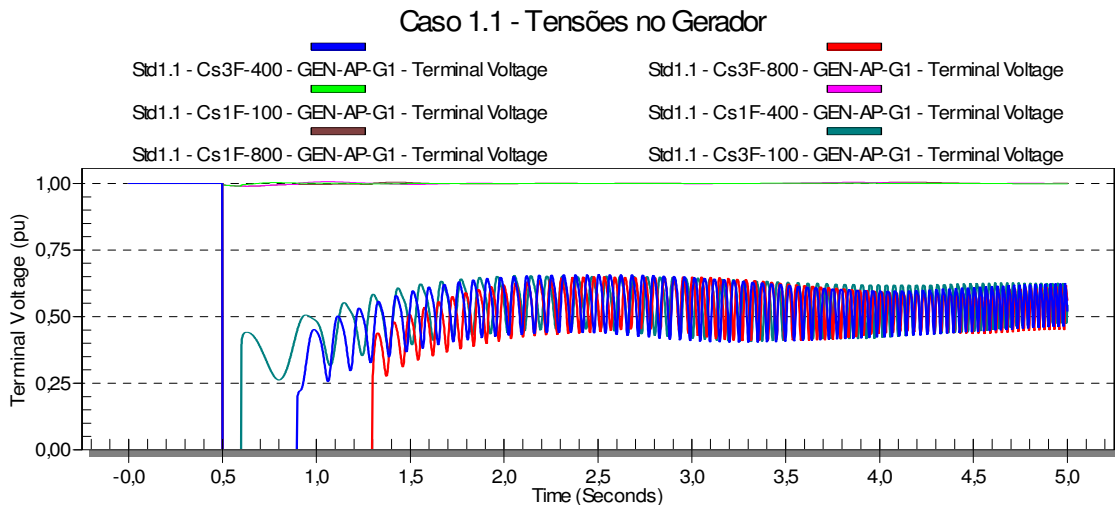
Figura 64 – Correntes de curto-circuito calculadas para o Caso 3.1 com autoprodutor em modo de controle do fator de potência do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

### 4.3.3 Avaliações de Estabilidade

Quando o autoprodutor está operando separado do sistema externo, o gerador é mais vulnerável quanto às perturbações decorrentes de curto-circuitos, mas a natureza do problema é determinada pelo controle da tensão do sistema e a eventual reaceleração dos motores. As condições mais severas estudadas correspondem à ocorrência de faltas trifásicas nas barras principais de 6,9kV.

Na Figura 65 são mostradas as tensões terminais de um dos geradores para faltas trifásicas e monofásicas na barra AP-MT-02, mostrando que mesmo para tempo de eliminação de 100ms os geradores não conseguem recuperar a tensão do sistema e que, como o sistema de 6,9kV não é solidamente aterrado, as faltas monofásicas não o afetam de forma significativa.





Nota: Cargas não motóricas simuladas como impedância constante.

Legenda:

Verde escuro – Falta trifásica e 100ms

Vermelho – Falta trifásica e 800ms

Violeta – Falta monofásica e 400ms

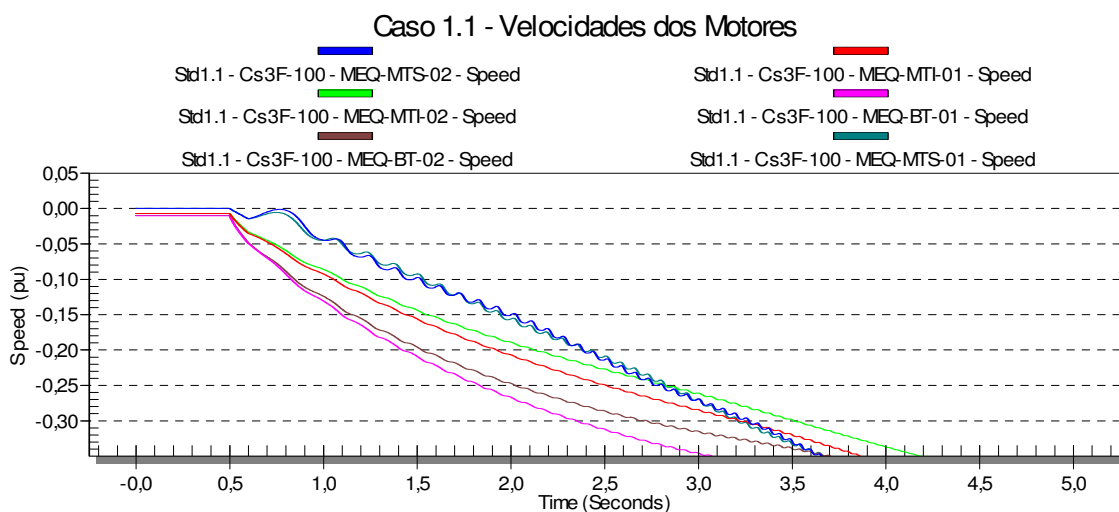
Azul – Falta trifásica e 400ms

Verde claro – Falta monofásica e 100ms

Marrom – Falta monofásica e 800ms

Figura 65 – Tensões nos terminais do gerador de acordo com o tempo de eliminação de falta na barra AP-MT-02 para o Caso 1.1 do estudo do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

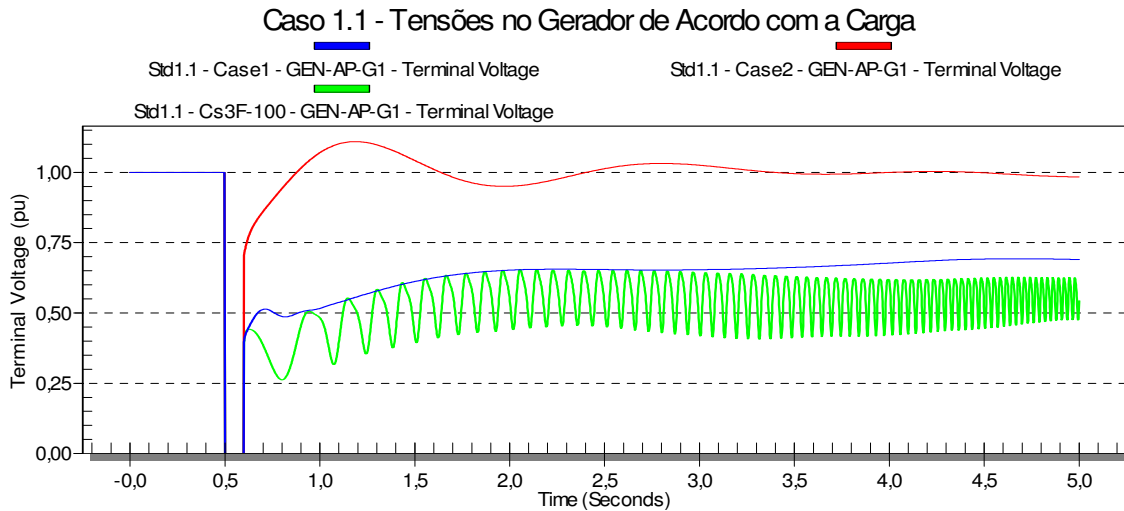
Na Figura 66 são mostradas as velocidades dos motores síncronos e de indução para a falta trifásica na barra AP-MT-02 com eliminação em 100ms, confirmando que todos os motores estão tentando reacelerar, o que provoca um forte desbalanço de potência reativa no sistema, comprometendo sua estabilidade de tensão.



Nota: Cargas não motóricas simuladas como impedância constante.

Figura 66 – Velocidades nos motores para falta trifásica na barra AP-MT-02 com o tempo de eliminação de 100ms no Caso 1.1 do estudo do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

Para avaliar a influência dos motores síncronos e de indução no problema do controle da tensão do autoprodutor operando separado do sistema externo para a falta trifásica nas barras de 6,9kV foram feitas simulações adicionais representando estas cargas apenas como cargas estáticas. Na Figura 67 são mostrados os resultados destas simulações, confirmando que a causa do problema é a forte participação dos motores no sistema do autoprodutor.



Legenda:

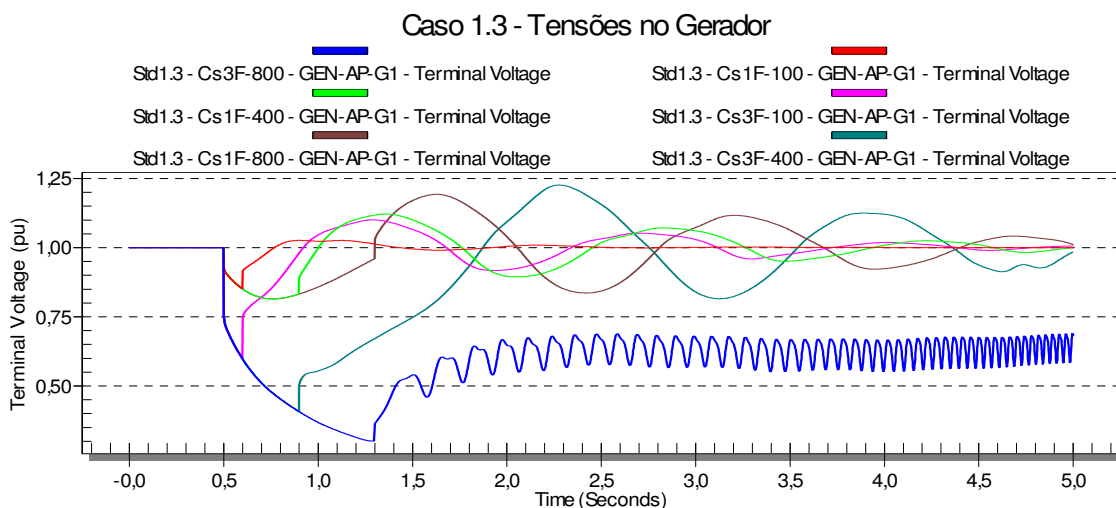
Verde claro – Todos os motores síncronos e de indução simulados com os seus modelos dinâmicos.

Azul – Apenas os motores de indução simulados com os seus modelos dinâmicos.

Vermelho – Todos os motores síncronos e de indução simulados como cargas estáticas.

Figura 67 – Tensões nos terminais do gerador de acordo com a representação das cargas motóricas para falta trifásica na barra AP-MT-02 com o tempo de eliminação de 100ms no Caso 1.1 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

Ainda sobre o problema da eliminação de faltas para operação do autoprodutor separado do sistema externo, a ocorrência de defeitos no sistema de baixa tensão requer tempos de eliminação de defeitos menos rigorosos. Na Figura 68 são mostradas as tensões terminais de um dos geradores para faltas trifásicas e monofásicas na barra AP-BT-01, considerando a condição pessimizada de um transformador de baixa tensão único do tamanho do equivalente.



Legenda:

Verde escuro – Falta trifásica e 100ms

Vermelho – Falta trifásica e 800ms

Violeta – Falta monofásica e 400ms

Azul – Falta trifásica e 400ms

Verde claro – Falta monofásica e 100ms

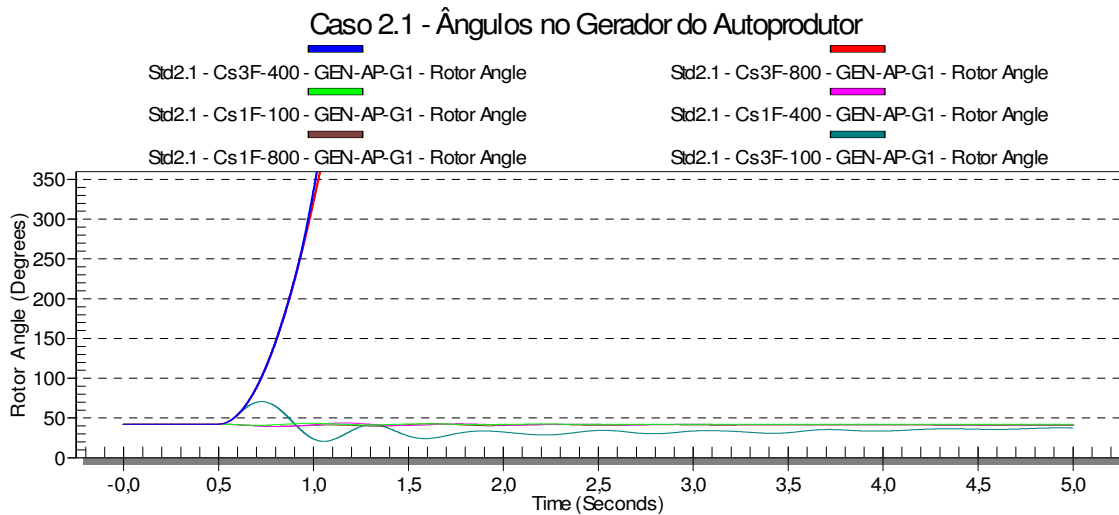
Marrom – Falta monofásica e 800ms

Figura 68 – Tensões nos terminais do gerador de acordo com o tempo de eliminação de falta na barra AP-BT-01 para o Caso 1.3 do estudo do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

Quando o autoprodutor está operando em paralelo com o sistema externo, o gerador é menos vulnerável quanto ao controle da tensão nas perturbações decorrentes de curto-circuitos, mas a natureza do problema agora é determinada pelo ângulo de sincronismo dos geradores com o sistema externo. As condições mais severas estudadas correspondem à ocorrência de faltas trifásicas nas barras de média tensão internas do autoprodutor.

Na Figura 69 são mostrados os ângulos dos geradores para faltas trifásicas e monofásicas na barra AP-MT-02, mostrando que o gerador perde estabilidade para as faltas trifásicas com eliminação em 400ms ou 800ms.

Na Figura 70 são mostrados os ângulos dos motores síncronos para faltas trifásicas na mesma barra AP-MT-02, mostrando que o conjunto MEQ-MTS-02, ligado na barra em falta, perde sincronismo com o sistema mesmo para tempo de eliminação de defeito de 100ms, enquanto o conjunto MEQ-MTS-01, ligado na barra AP-MT-01B mantém sincronismo mesmo para tempo de eliminação de defeitos de 400ms.



Nota: Cargas não motóricas simuladas como impedância constante.

Legenda:

Verde escuro – Falta trifásica e 100ms

Vermelho – Falta trifásica e 800ms

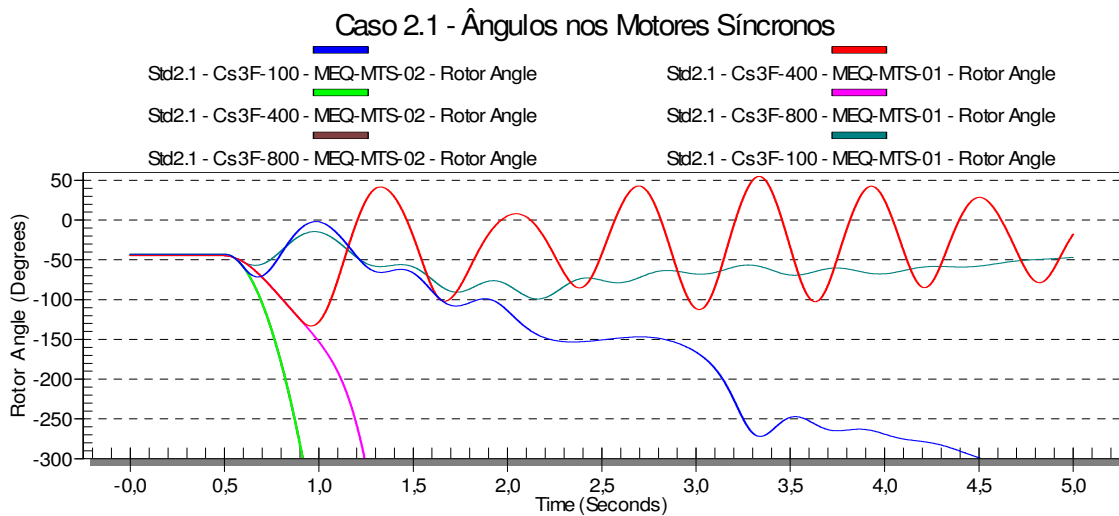
Violeta – Falta monofásica e 400ms

Azul – Falta trifásica e 400ms

Verde claro – Falta monofásica e 100ms

Marrom – Falta monofásica e 800ms

Figura 69 – Ângulos dos geradores do autoprodutor de acordo com o tempo de eliminação de falta na barra AP-MT-02 para o Caso 2.1 do estudo do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão



Nota: Cargas não motóricas simuladas como impedância constante.

Legenda:

Motor MEQ-MTS-02

Azul – Falta trifásica e 100ms

Verde claro – Falta trifásica e 400ms

Marrom – Falta trifásica e 800ms

Motor MEQ-MTS-01

Verde escuro – Falta trifásica e 100ms

Vermelho – Falta trifásica e 400ms

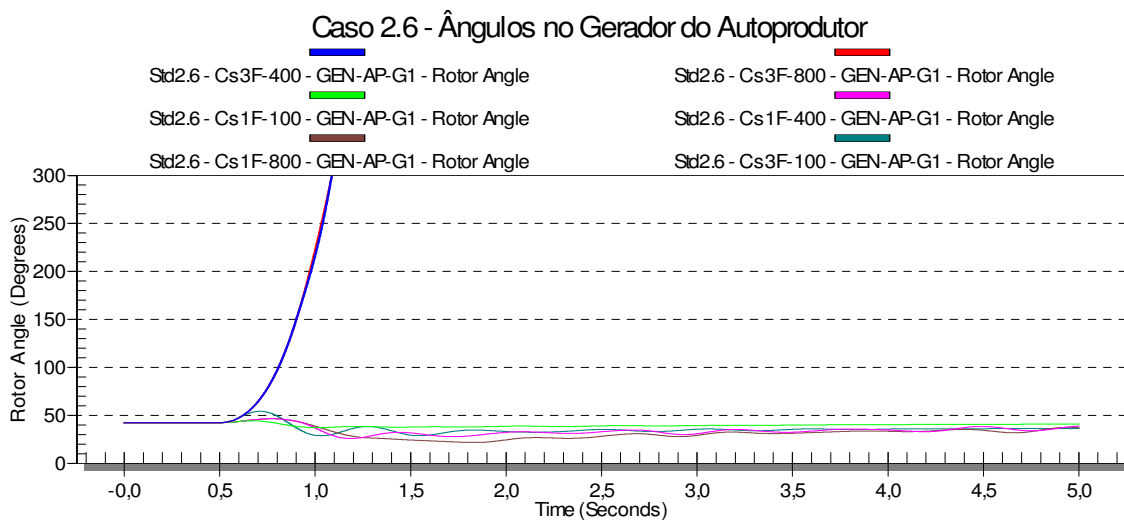
Violeta – Falta trifásica e 800ms

Figura 70 – Ângulos nos motores síncronos para faltas trifásicas na barra AP-MT-02 no Caso 2.1 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

Para faltas em pontos do sistema externo de subtransmissão o autoprodutor será afetado de forma mais moderada.

Para faltas trifásicas próximas da subestação SE-AT3 com tempo de abertura de 400ms, o sistema do autoprodutor ainda é comprometido, com a perda de sincronismo dos geradores, conforme mostrado na Figura 71, e com a perda de sincronismo dos motores síncronos e a reaceleração dos motores de indução, conforme mostrado na Figura 72.

Já para faltas mais afastadas da subestação SE-AT3 o sistema passa a ser estável mesmo para o tempo de abertura de 400ms, conforme mostrado na Figura 73 para falta na linha de interligação entre a SE-AT1 e a SE-AT3 em ponto a partir de 20% do lado da SE-AT3.



Nota: Cargas não motóricas simuladas como impedância constante.

Legenda:

Verde escuro – Falta trifásica e 100ms

Vermelho – Falta trifásica e 800ms

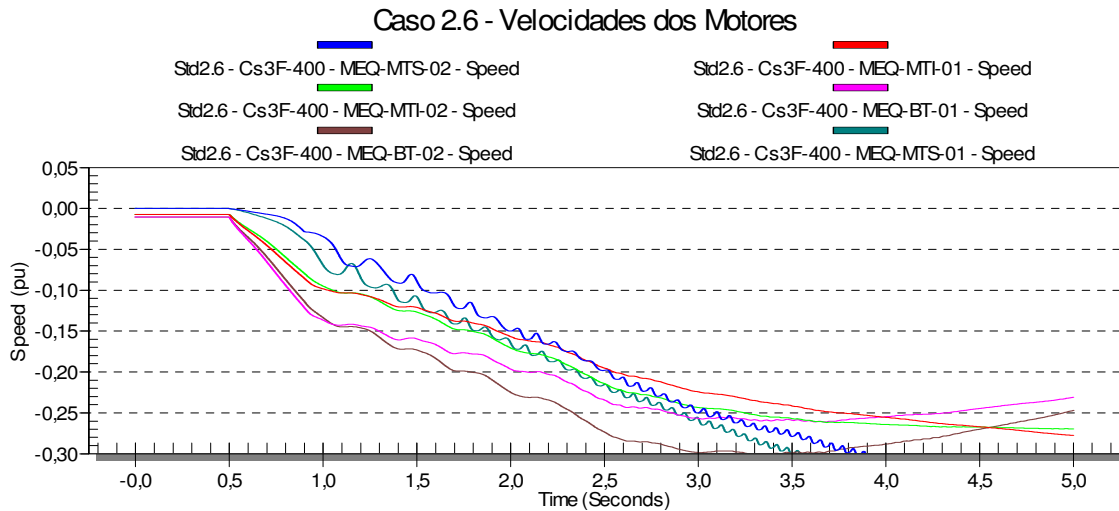
Violeta – Falta monofásica e 400ms

Azul – Falta trifásica e 400ms

Verde claro – Falta monofásica e 100ms

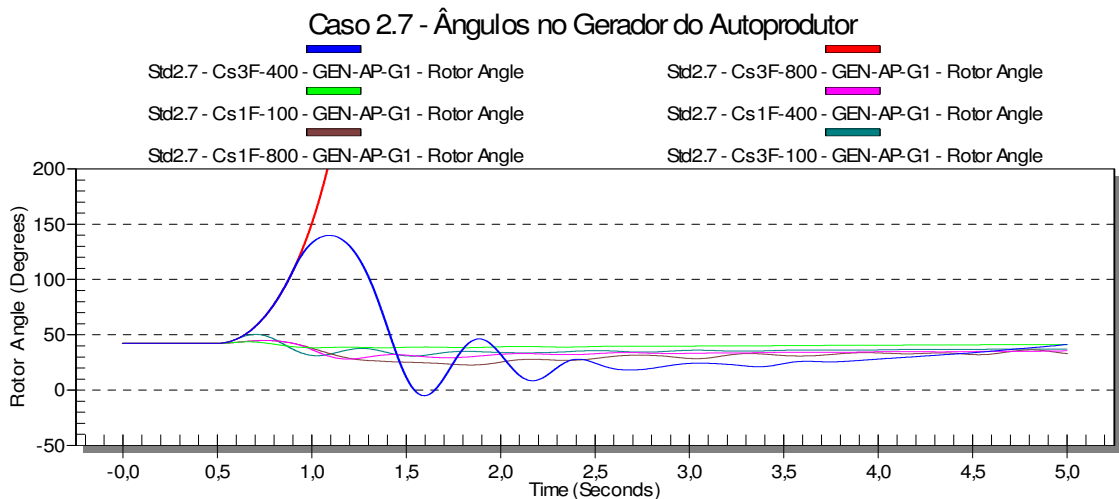
Marrom – Falta monofásica e 800ms

Figura 71 – Ângulos dos geradores do autoprodutor de acordo com o tempo de eliminação de falta na barra SE-AT3 para o Caso 2.6 do estudo do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão



Nota: Cargas não motóricas simuladas como impedância constante.

Figura 72 – Velocidades nos motores para falta trifásica na barra SE-AT3 com o tempo de eliminação de 400ms no Caso 2.6 do estudo do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão



Nota: Cargas não motóricas simuladas como impedância constante.

Legenda:

Verde escuro – Falta trifásica e 100ms

Vermelho – Falta trifásica e 800ms

Violeta – Falta monofásica e 400ms

Azul – Falta trifásica e 400ms

Verde claro – Falta monofásica e 100ms

Marrom – Falta monofásica e 800ms

Figura 73 – Ângulos dos geradores do autoprodutor de acordo com o tempo de eliminação de falta para o Caso 2.7 do estudo do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

Quando o autoprodutor está operando em paralelo com o sistema externo, os seus geradores também são menos vulneráveis quanto ao controle da tensão e da velocidade nas perturbações decorrentes de alterações de carga. Na Figura 74 são mostradas, para as condições de funcionamento em paralelo e separado do sistema externo, a velocidade e a tensão terminal dos geradores para a ocorrência de entrada de carga de 6,4MW com o sistema do autoprodutor anteriormente carregado em 80% da sua carga.

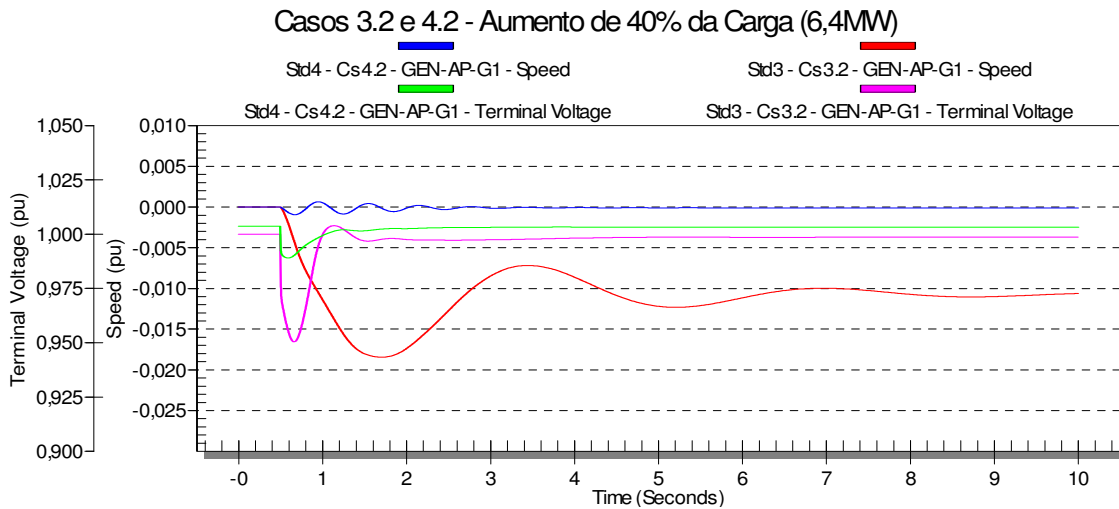


Figura 74 – Velocidade e tensão terminal do gerador para os Casos 3.2 e 4.2 do estudo do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

As ocorrências de perda de linhas de interligação no sistema externo, uma vez que a potência dos geradores do autoprodutor é compatível com sua carga, não afetam de forma significativa o autoprodutor. A condição mais severa estudada foi a perda das duas linhas de interligação entre as subestações SE-AT1 e SE-AT3. Na Figura 75 são mostradas a velocidade, a tensão terminal, a potência ativa e a potência reativa de um dos geradores do autoprodutor para esta contingência no sistema externo.

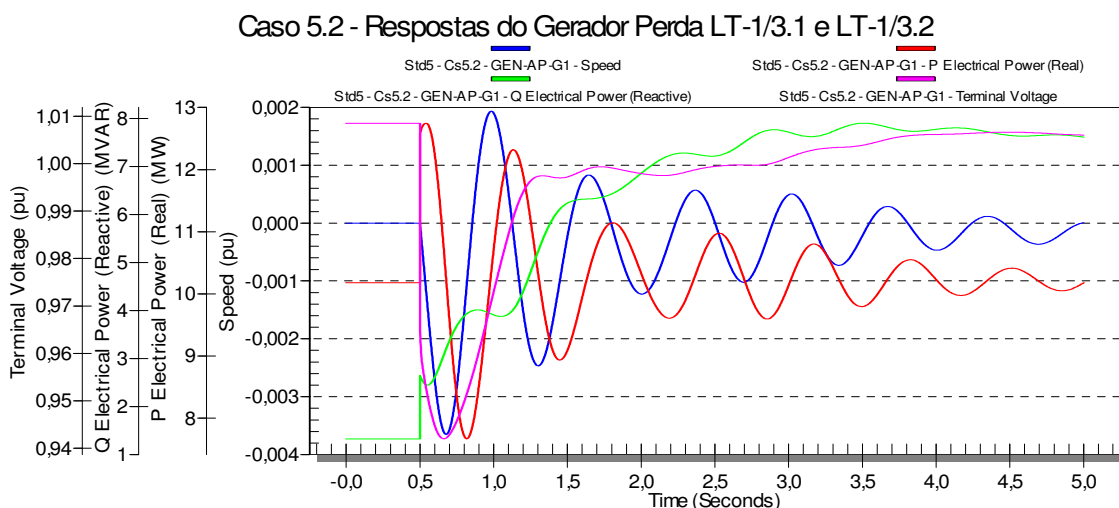


Figura 75 – Respostas do gerador do autoprodutor para o Caso 5.2 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

A perda da interligação com o sistema externo seguida do religamento automático para o autoprodutor funcionando com seus dois geradores não implica em perturbação significativa imposta ao seu sistema, uma vez que a potência dos geradores do autoprodutor é compatível com sua carga, conforme mostrado na Figura 76. No entanto, a perda da interligação com o sistema externo para o autoprodutor funcionando com apenas um gerador e importando a energia complementar é crítica, requerendo um rápido sistema de descarte automático de cargas, conforme mostrado na Figura 77.

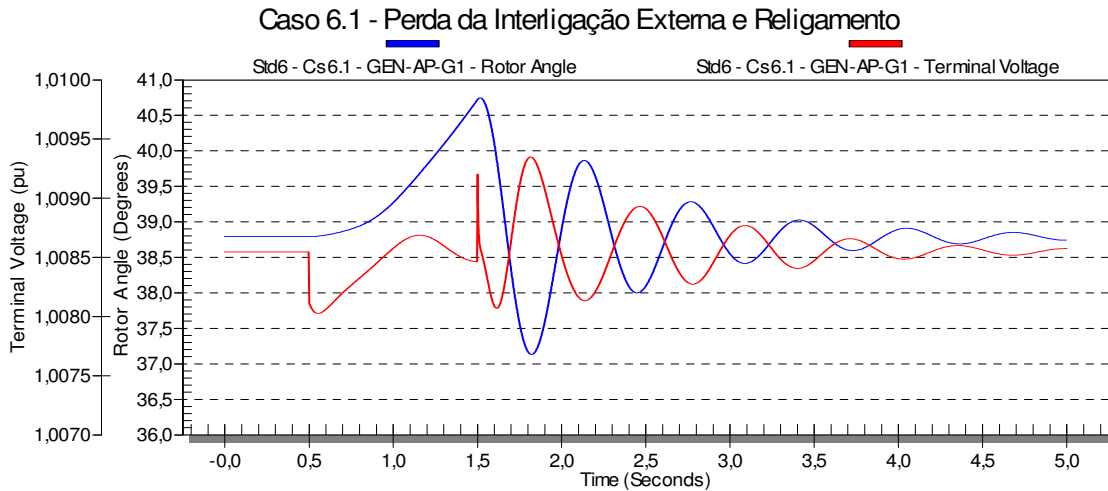


Figura 76 – Respostas do gerador do autoprodutor para o Caso 6.1 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

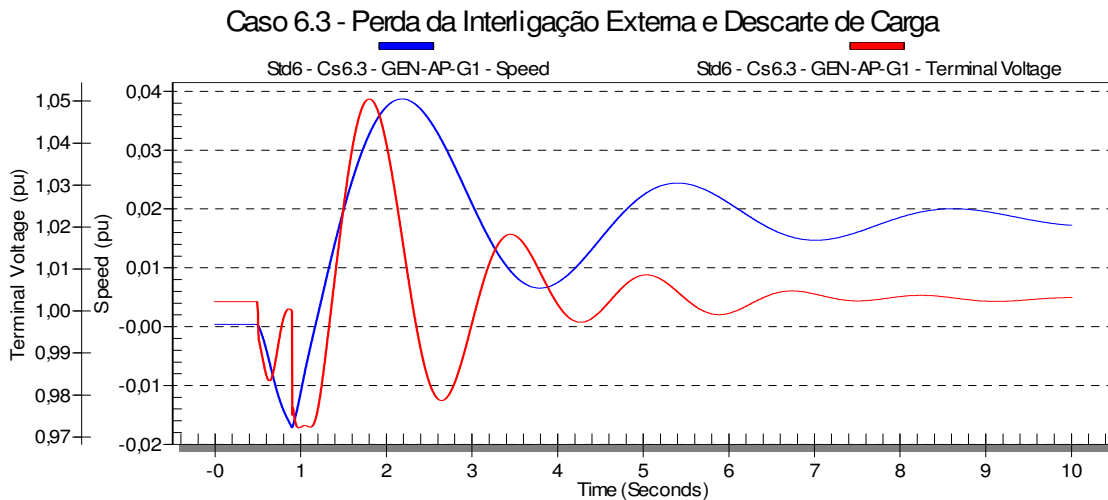


Figura 77 – Respostas do gerador do autoprodutor para o Caso 6.3 do autoprodutor de grande porte no sistema de distribuição de alta tensão

#### 4.3.4 Avaliações de Proteção

Inicialmente, com relação às proteções de sobrecorrente da saída da linha que atende o autoprodutor na subestação distribuidora, alguns comentários devem ser feitos. A existência de proteção diferencial na barra da subestação e a utilização de proteção de distância nas linhas de interligação do sistema externo, permite maior flexibilidade na



coordenação da proteção de saída da linha do autoprodutor com as proteções à montante, restando apenas o cuidado de garantir com o ajuste de sobrecorrente temporizado o limite térmico do cabo e com o ajuste de sobrecorrente instantâneo a atuação para o curto mínimo.

Com relação à coordenação das funções 50 dos relés na saída da linha do autoprodutor na subestação distribuidora, sem temporização, com as funções 50 dos relés de entrada e dos transformadores na subestação do autoprodutor, haverá atuação simultânea das proteções para defeitos internos na alta tensão do autoprodutor, permanecendo o circuito em defeito desligado e a linha sendo religada na sequência pela função 79.

Com relação às proteções complementares de autoprodutor, destaque-se que foram inicialmente consideradas para funcionamento sem exportação de energia, com ajustes bastante sensíveis para comandar a abertura da interligação no caso de comprometimento das condições especificadas.

No Caso 4 de fluxo de potência, para a condição de funcionamento do sistema em contingência em regime de carga pesada, com o autoprodutor em paralelo e com exportação do excedente de energia, foi mostrada a conveniência do apoio do autoprodutor para garantir as condições operacionais do sistema.

Neste caso seria necessário compatibilizar as proteções complementares anteriormente mencionadas, ou seja, bloquear a função 32 e diminuir a sensibilidade da função 67, para permitir a inversão do fluxo de energia, e alterar as funções 27 e 59, para permitir a manutenção da interligação com níveis mais precários de tensão no ponto de conexão.

Para o Caso 9 de fluxo de potência, com funcionamento do sistema suprindo o autoprodutor em condição de perda de geração local, dependendo dos níveis de carga no sistema e no autoprodutor, haverá abertura da interligação por atuação da função 27 no autoprodutor.

Neste caso, pelo lado do sistema local de distribuição, seria necessário dimensioná-lo e ajustar suas proteções para absorver a carga integral do autoprodutor na falta de sua geração, ou, pelo lado do autoprodutor, implantar um sistema de descarte automático de carga, de tal forma que se garanta a compatibilidade da carga interna com a disponibilidade de geração local.

Para o Caso 3 de curto-circuito, para verificação das correntes na linha do autoprodutor para defeito na saída de uma linha de interligação adjacente para a condição normal de funcionamento do sistema com o autoprodutor em paralelo, as funções 50 no relé da linha onde ligado o autoprodutor não seriam sensibilizadas para nenhuma condição simulada. No entanto, dependendo da potência da geração do autoprodutor e da contribuição da sua carga motórica, esta função 50 teoricamente poderia atuar de forma indevida.

Para evitar este problema seria conveniente substituir as funções 50 no relé na proteção da linha onde ligado o autoprodutor por funções 87L, diferencial de linha, de forma a impedir sua atuação para defeitos externos e garantir a atuação mais rápida e seletiva para defeitos de valor bastante reduzidos.

Simulação adicional para calcular a contribuição mínima do autoprodutor para curto-circuito no sistema externo de subtransmissão, considerando falta na barra da subestação SE-AT2 com apenas uma das linhas de interligação com a subestação SE-AT3 em funcionamento, resultou na corrente de 191A, garantindo desta forma que seria sensibilizada a função 67 no relé do autoprodutor.

Para faltas envolvendo a terra no sistema de subtransmissão, a presença dos enrolamentos secundários dos transformadores das subestações de interligação SE-AT1 e SE-AT2 ligados em estrela aterrada permite a sensibilização da função 67 no relé do autoprodutor pelas correntes de sequência positiva e negativa. No entanto, após a abertura do disjuntor nas saídas das linhas de interligação estas correntes deixarão de circular, passando a proteção no relé do autoprodutor a ser garantida pela função 59N.

Para os Casos 4 e 5 de estabilidade, de variação da carga para o autoprodutor em paralelo com o sistema externo e de perda de linhas de interligação no sistema externo, respectivamente, as oscilações de tensão não levariam à atuação das funções 27 ou 59, ficando garantida a manutenção da interligação.

As simulações de estabilidade mostraram também a necessidade de compatibilizar a função 79 no relé da saída da linha que alimenta o autoprodutor, para impedir o religamento do alimentador com o circuito energizado pelo autoprodutor, visto que o gerador perde sincronismo com o sistema externo rapidamente. Neste caso poderia ser usada uma função 27 para supervisionar o religamento em linha morta.

Por fim, apesar de não detalhados neste trabalho os esquemas de proteção de distância nas linhas de interligação, convém destacar que a introdução da geração do autoprodutor em subestações distribuidoras pode em certos casos afetar o funcionamento dos relés de distância empregados, em função do *infeed* – fontes intermediárias. No caso estudado, com o autoprodutor ligado na barra da subestação distribuidora e com duas linhas em cada interligação com as subestações supridoras, este efeito não é significativo. O assunto está tratado com mais detalhe no Apêndice E.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho mostrou por meio da análise de dois casos práticos a necessidade do estudo detalhado dos requisitos técnicos para a conexão segura da geração distribuída nos sistemas de distribuição. As principais conclusões observadas foram as seguintes:

- a presença da geração pelo lado dos consumidores em paralelo ao sistema de distribuição, principalmente se acompanhada da exportação da energia excedente, pode introduzir ganhos operacionais, tais como, a redução de perdas, o suporte de potência reativa e controle da tensão, o aumento da margem de segurança do sistema funcionando em contingência, a possibilidade de atendimento de cargas locais quando na operação em ilha;
- do ponto de vista técnico, sempre que garantida a viabilidade técnica para a conexão, seria oportuno estabelecer condições contratuais entre concessionários de distribuição e autoprodutores para a maior participação destes consumidores no suprimento e controle da energia elétrica;
- nos alimentadores de distribuição com reguladores automáticos de tensão a conexão da geração distribuída com possibilidade de exportação de energia excedente requer a verificação do funcionamento do controle do regulador, de forma a garantir a sua operação adequada com fluxo inverso, sem o que poderão ser comprometidos os níveis de tensão à montante quando percorridos pela energia oriunda do autoprodutor;
- a condição de funcionamento do autoprodutor em contingência de perda da geração local deve ser claramente definida, de forma a garantir que, quando vier a ocorrer, o sistema de distribuição local possa absorver a nova carga sem comprometer suas características operacionais ou que esta carga seja descartada de forma automática no autoprodutor;
- a elevação dos níveis de curto-circuito no sistema elétrico interno do autoprodutor e no sistema de distribuição local precisa ser claramente identificada, inclusive

para as condições mais críticas de funcionamento, de forma a garantir a compatibilidade de todos os equipamentos envolvidos;

- as contribuições do autoprodutor para as correntes de curto-circuito envolvendo a terra no sistema externo, considerando a ligação delta dos enrolamentos primários dos transformadores de entrada do autoprodutor, precisam ser corretamente determinadas para o funcionamento dos esquemas de proteção correspondentes;
- durante a operação em ilha, do ponto de vista dinâmico, o sistema do autoprodutor é mais vulnerável às variações da carga, mas o problema da eliminação de falta se restringe ao controle da tensão após a eliminação do defeito em face da possibilidade de reaceleração dos motores, mas se o sistema do autoprodutor tiver mais de uma unidade geradora, localizadas não eletricamente próximas, a manutenção do sincronismo (estabilidade transitória) passa a ser também de interesse;
- durante a operação em paralelo com o sistema externo, do ponto de vista dinâmico, o sistema do autoprodutor é menos vulnerável às variações da carga, mas o problema da eliminação de falta, apesar de ainda envolver o controle da tensão após a eliminação do defeito em face da possibilidade de reaceleração dos motores, agora é dominado pelo risco da perda da estabilidade angular e aceleração dos geradores;
- as proteções contra curto-circuito do sistema elétrico industrial devem atuar de forma instantânea para garantir os limites de estabilidade angular dos geradores e, principalmente, de estabilidade da tensão na presença dos motores de indução;
- a presença de motores síncronos no sistema do autoprodutor complica os seus limites operacionais, requerendo tempos de eliminação de defeito e margens de controle de tensão mais estreitos;
- a presença de bancos de capacitores no sistema interno do autoprodutor aumenta as margens de controle para recuperação da tensão pelos geradores na sequência de eventos de curto-circuito ou de aumento brusco de carga, mas seu desligamento precisa ser feito com rapidez nas contingências de perda acentuada de carga quando em operação isolada;
- o problema da operação em ilha do autoprodutor é em boa medida determinado pela compatibilidade da potência de geração disponível com a carga absorvida no momento da perda da interligação com o sistema externo, requerendo um sistema eficiente de detecção de ilhamento e de controle automático da carga ou seu descarte (caso que a geração própria é menor que a carga) ou de corte de geração ou atuação rápida dos reguladores de velocidade (caso em que a geração própria é maior que a carga), para a garantia da segurança operacional do sistema;
- a definição do modo de controle dos reguladores de velocidade e de tensão dos geradores é importante para a melhor operação do sistema e, se adotado o modo mais usual de controle do intercâmbio de potência ativa e reativa com o sistema externo, este deve mudar rapidamente após o ilhamento para o modo de controle da tensão terminal e da frequência;
- a utilização de religamento automático nos sistemas com presença de geradores distribuídos requer a disponibilidade de supervisão por relés de verificação de sincronismo (função 25) ou por relés de subtensão (função 27) para verificação de linha morta;

- a contribuição do autoprodutor para curto-circuitos em linhas ou alimentadores adjacentes no sistema externo pode levar as proteções de sobrecorrente (funções 50/51) no seu próprio circuito na subestação distribuidora a atuarem indevidamente, requerendo a utilização de proteções direcionais de sobrecorrente (função 67), caso típico dos sistemas de média tensão, ou diferenciais de linha (função 87L), caso típico dos sistemas de alta tensão, de forma a garantir a rápida e seletiva atuação das proteções envolvidas;
- as proteções direcionais de sobrecorrente de fase (função 67) do autoprodutor, dependendo dos tempos de coordenação utilizados, podem prover proteção para defeitos à terra no sistema externo, mas como *back-up* ou após a abertura da interligação com os transformadores supridores, esta proteção para defeitos à terra requererá a utilização de proteções de sobretensão residual de neutro (função 59N);
- as proteções de controle da interligação no autoprodutor – subtensão (função 27), direcional de potência (função 32), sobretensão (função 59), sobrecorrente direcional (função 67) e frequência (81) – precisam considerar adequadamente a possibilidade de exportação de energia pelo autoprodutor, ainda que apenas em contingência, sob pena de comprometerem seu desempenho operacional nestas condições e levarem à abertura da interligação com o sistema externo indevidamente;
- especial atenção precisa ser dedicada às proteções de frequência nas condições de ilhamento, com ou sem exportação de energia, requerendo em alguns casos a utilização de relés de taxa de variação da frequência ( $df/dt$ ) de forma a antecipar a atuação da proteção na presença de oscilações potencialmente perigosas antes que os desvios de frequência críticos efetivamente ocorram;
- a coordenação e seletividade das proteções de sobrecorrente internas do autoprodutor é prejudicada pela variação das correntes de curto-circuito para a condição de funcionamento em ilha ou em paralelo com o sistema externo e, conforme o caso, torna-se oportuna a aplicação de ajustes adaptativos;
- nos sistemas de transmissão ou subtransmissão com proteções por relés de distância (função 21), o problema do *infeed* introduzido pela geração do autoprodutor precisa ser cuidadosamente avaliado de forma a evitar o subbalcance dos relés para primeira zona, caso mais crítico e que pode ocorrer quando o autoprodutor é ligado em derivação no meio da linha, ou o subbalcance dos relés para segunda ou terceira zona, caso geral e que pode ocorrer quando o autoprodutor é ligado com ramal derivado da barra da subestação distribuidora.

## **Trabalhos Futuros**

O problema da conexão dos co-geradores em paralelo com os sistemas de distribuição é um assunto muito amplo e que tem ainda múltiplos aspectos a aprofundar, principalmente considerando as particularidades de cada sistema industrial. Como sugestões para desenvolvimento de futuros trabalhos recomendamos:

- a utilização de fontes não convencionais nos autoprodutores, incluindo geradores de indução, máquinas rotativas acopladas com a rede através de inversores de frequência, sistemas fotovoltaicos, etc;

- a utilização de cargas não lineares no autoprodutor, incluindo acionamentos eletrônicos de motores ou grandes retificadores industriais;
- a determinação das margens de controle e de operação de motores síncronos quando utilizados para acionamento das cargas industriais;
- a resposta das proteções de distância de fase e de terra das linhas de transmissão e de subtransmissão do sistema externo em face da presença da geração do autoprodutor;
- a utilização de esquemas especiais para melhorar a recuperação da tensão no sistema interno do autoprodutor em face da reaceleração de motores, principalmente na operação em ilha;
- a utilização de esquemas especiais para detecção de ilhamento e controle do sistema de descarte automático de cargas;
- a análise econômica da operação em ilha suprindo cargas adjacentes do sistema externo e a avaliação do seu impacto nos índices de confiabilidade.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GRAINGER, J. J, STEVENSON JR, W. D., *Power System Analysis*, IEEE Press, 1995.
- [2] ANDERSON, P. M., *Analysis of Faulted Power System*, IEEE Press, 1995.
- [3] KUNDUR, P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [4] ANDERSON, P. M., FOUAD, A. A., *Power System Control and Stability*, IEEE Press, 2003.
- [5] MACHOWSKI, J., BIALEK, J. W, BUMBY, J. R, *Power System Dynamics: Stability and Control*, John Willey & Sons, Ltd, 2008.
- [6] ARRILLAGA, J., WATSON, N. R.; *Computer Modeling of Electrical Power Systems*, John Willey & Sons, Ltd, 2001.
- [7] ELMORE, W. A., *Protective Relaying: Theory and Applications*, Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [8] HOROWITZ, S. H., PHADKE, A. G., *Power System Relaying*, John Willey & Sons, Ltd, 2008.

- [9] IEEE STD 399/1997 – *Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis*;
- [10] IEEE STD 242/2001 – *Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*;
- [11] HSU, C. T., CHEN, C. S., CHEN, J. K., *The Load-Shedding Scheme Design for an Integrated Steelmaking Cogeneration Facility*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 33, No. 3, 1.997.
- [12] PONTES, J. R. M., *Experiência com a interligação de Autoprodutores e Produtores Independentes de Energia Elétrica ao Sistema Elétrico Interligado*, Anais do XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Uberlândia, MG, Outubro de 2003.
- [13] SPIER, E. B., LEMOS, F. A. B., BAZANELLA, et al., *Análise do Comportamento Dinâmico de Geração Distribuída Conectada em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, Anais do XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Uberlândia, MG, Outubro de 2003.
- [14] GÓMEZ, J. C., MORCOS, M. M., *Coordination of Voltage Sag and Overcurrent Protection in DG Systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 20, No. 1, 2.005.
- [15] KATIRAEI, F., IRAVANI, M. R., LEHN, P. W., *Micro-Grid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 20, No 1, 2.005.
- [16] DAS, J. C., *Transient Stability of Small Plant Generators Connected to a Weak Utility System - A Case Study*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 41, No. 1, 2.005.
- [17] FREITAS, W., VIEIRA, J. C. M., MORELATO, A., et al., *Influence of Excitation System Control Modes on the Allowable Penetration Level of Distributed*



- Synchronous Generators*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 20, No. 2, 2.005.
- [18] KASHEM, M. A., LEDWICH, G., *Multiple Distributed Generators for Distribution Feeder Voltage Support*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 20, No. 3, 2.005.
- [19] ARCON, A. B., PINTO, L. C., *Limitação dos Níveis de Curto-Circuito em uma Usina de Cogeração Utilizando o Equipamento Is-Limiter – Estudo de Caso*, Anais do XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Curitiba, PR, Outubro de 2005.
- [20] VIEIRA JR, J.C., FILHO, W. F., MORELATO, A., et al., *Um Método Prático Para a Definição dos Ajustes de Relés de Taxa de Variação de Frequência Usados Para Detecção de Ilhamento em Geração Distribuída*, Anais do XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Curitiba, PR, Outubro de 2005.
- [21] SALLES, N. J., SCARASSATI, P. C., ABOUD, R. L., *O Impacto da Conexão de Geração Distribuída no Desempenho das Proteções de Linhas de Transmissão*, Anais do XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Curitiba, PR, Outubro de 2005.
- [22] MALMEDAL, K., SEN, P. K., NELSON, J. P., *Application of Out-of-Step Relaying for Small Generators in Distributed Generation*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 41, No. 6, 2.005.
- [23] ABREU, L.V.L., FREITAS, W., SILVA, et al., *Análise do Desempenho Dinâmico de Geradores Síncronos Conectados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*, Anais do X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - SEPOPE, Florianópolis, SC, Maio de 2006.
- [24] FARIA, A. S., FASSHEBER, C. F., *Utilização e Cuidados na Aplicação de Reguladores de Tensão em Sistemas de Co-Geração*, Anais do XVII Seminário

Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI, Belo Horizonte, MG, Agosto de 2006

- [25] UEMURA, A. O., C. PAIVA, R. R., ZÜRN, H. H., *Estudo de Casos Aplicados às Redes de Distribuição com a Inserção de Geração Distribuída via Produtores Independentes*, Anais do XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI, Belo Horizonte, MG, Agosto de 2006
- [26] MOZINA, C. J., *Distributed Generator Interconnect Protection Practices*, IEEE, 2.006, Disponível em <http://ieeexplore.ieee.org>. Acesso em 23 de agosto de 2009, 08:42.
- [27] IEEE STD 1.547/2003 – *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System*.
- [28] CAMPITELLI, E. M., PEREIRA, R.A.F., SILVA, L. G. W., et al., *Sistema Inteligente Para Ajuste dos Dispositivos de Proteção em Sistemas de Distribuição com Geração Distribuída*, Anais do XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Rio de Janeiro, RJ, Outubro de 2007.
- [29] VIEIRA JR, J. C. M., CORREA, D. S., FREITAS, et al., *Metodologia Para Análise e Avaliação dos Ajustes e das Limitações da Proteção Anti-ilhamento de Geradores Síncronos*, Anais do XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Rio de Janeiro, RJ, Outubro de 2007.
- [30] HOLSBACH, I. L., RUARO, R. D., LIMA, D. O., et al., *Impacto da Geração Distribuída no Sistema Elétrico de Distribuição da RGE*, Anais do IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL, Araxá, MG, Novembro de 2007.
- [31] COLLINS, E., JIANG, J., *Voltage Sags and the Response of a Synchronous Distributed Generator: A Case Study*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 23, No. 1, 2.008.

- [32] CHEN, C. S., LEE, Y. D., HSU, et al., *Transient Response of an Incinerator Plant by Considering Boiler Model With Dynamic Steam Variation*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 23, No. 1, 2.008.
- [33] HISCOCK, N., HAZEL, T. G., HISCOCK, J., *Voltage Regulation at Sites With Distributed Generation*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 44, No. 2, 2.008.
- [34] VIEIRA, J. C. M., FREITAS, W., XU, W., et al., *An Investigation on the Nondetection Zones of Synchronous Distributed Generation Anti-Islanding Protection*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 23, No. 2, 2.008.
- [35] VIAWAN, F.A., KARLSSON, D., *Voltage and Reactive Power Control in Systems With Synchronous Machine-Based Distributed Generation*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 23, No. 2, 2.008.
- [36] WALLING, R. A., SAINT, R., DUGAN, R. C., et al., Working Group on Distributed Generation Integration, *Summary of Distributed Resources Impact on Power Delivery Systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 23, No. 3, 2.008.
- [37] CHEN, C. S., LEE, Y. D., HSU, et al., *Design of Undervoltage Relay Setting for an Industrial Plant With Cogeneration Units to Enhance Power Quality of Critical*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 44, No. 4, 2.008.
- [38] FUANGFOO, P., MEENUAL, T., LEE, W.J., et al., *PEA Guidelines for Impact Study and Operation of DG for Islanding Operation*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 44, No. 5, 2.008.
- [39] MOZINA, C. J., *A Shot in The Dark - Minimizing the Impact of Blackouts*, IEEE Industry Applications Magazine, Vol 14, No. 5, 2.008.
- [40] SENNE E. F., SCARASSATI, P. C., DIAS, E. B., *Proteção da Interconexão de Cogeneradores em Paralelo com o Sistema de Distribuição da CPFL*, Anais do XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI, Olinda, PE, Outubro 2008

- [41] PERERA, N., RAJAPAKSE, A. D., BUCHHOLZER, T. E., *Isolation of Faults in Distribution Networks With Distributed Generators*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 23, No. 4, 2.008.
- [42] SMITH, K. S., RAN, L., *Torsional Resonance Risk Management in Islanded Industrial Power Systems Supplying Large VFDs*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 44, No. 6, 2.008.
- [43] CALDERARO, V., MILANOVIC, J.V., KAYIKCI, et al., *The Impact of Distributed Synchronous Generators on Quality of Electricity Supply and Transient Stability of Real Distribution Network*, Electric Power Systems Research, Vol 79, No. 1, 2.009.
- [44] PHAM, T. T. H., BÉSANGER, Y., HADJSAID, N., *New Challenges in Power System Restoration With Large Scale of Dispersed Generation Insertion*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 24, No. 1, 2.009.
- [45] WANG, L., LIN, P., *Analysis of a Commercial Biogas Generation System Using a Gas Engine–Induction Generator Set*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 24, No. 1, 2.009.
- [46] MAHAT, P., CHEN,Z., BAK-JENSEN, B., *A Hybrid Islanding Detection Technique Using Average Rate of Voltage Change and Real Power Shift*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 24, No. 2, 2.009.
- [47] ZEINELDIN, H. H., KIRTLEY JR, J. L., *Performance of the OVP/UVP and OFP/UFP Method With Voltage and Frequency Dependent Loads*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 24, No. 2, 2.009.
- [48] XYNGI, IO., ISHCENKO, A., POPOV, M., et al., *Transient Stability Analysis of a Distribution Network With Distributed Generators*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 24, No. 2, 2.009.
- [49] PONTES, C. E. V., TARANTO, G. N., MANZONI, A., et al., *Desempenho Dinâmico da Geração Distribuída frente a Perturbações no SIN e de Manobras na*

*Rede de Distribuição*, Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL, Belém, PA, Junho de 2009.

- [50] DU, C., AGNEHOLM, E., OLSSON, G., *VSC-HVDC System for Industrial Plants With Onsite Generators*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 24, No. 3, 2.009.
- [51] TRINDADE, F. C. L., *Análise dos Sistemas de Proteção e Controle de Instalações Industriais com Geradores Síncronos Durante Operação Ilhada*. Dissertação de Mestrado, FEEC/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2009.
- [52] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, *O Operador Nacional do Sistema Elétrico e os Procedimentos de Rede: Visão Geral, Procedimentos de Rede*, Submódulo 1.1, Outubro de 2005.
- [53] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, *Glossário de termos técnicos, Procedimentos de Rede*, Submódulo 20.1, Outubro de 2005.
- [54] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, *Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos, Procedimentos de Rede*, Submódulo 2.3, Outubro de 2005.
- [55] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, *Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, Procedimentos de Rede*, Submódulo 2.6, Outubro de 2005.
- [56] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, *Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes, Procedimentos de Rede*, Submódulo 2.8, Outubro de 2005.
- [57] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, *Resolução N<sup>o</sup> 505, de 26 de Novembro de 2001*, Disponível em <http://www3.aneel.gov.br>. Acesso em 03 de agosto de 2009, 12:25.
- [58] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, *Requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica, Procedimentos de Rede*, Submódulo 3.6, Maio de 2008.

- [59] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, *Diretrizes e critérios para estudos elétricos, Procedimentos de Rede*, Submódulo 23.3, Janeiro de 2007.
- [60] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, *Introdução, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*, Módulo 1, Dezembro de 2008.
- [61] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, *Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*, Módulo 2, Dezembro de 2008.
- [62] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, *Acesso ao Sistema de Distribuição, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*, Módulo 3, Dezembro de 2008.
- [63] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, *Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*, Módulo 4, Dezembro de 2008.
- [64] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, *Qualidade da Energia Elétrica, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*, Módulo 8, Dezembro de 2008.
- [65] LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S.A., *Interligação de Autoprodutores de Energia Elétrica em Paralelo com o Sistema da Light SESA, em Baixa e Média Tensão*, Informação Técnica DAP – 001/04, Junho de 2004.
- [66] AMPLA ENERGIA E SERVIÇOS S.A., *Consumidor Autoprodutor de Energia (Paralelismo entre Sistemas)*, ETA-010, Março de 2003.
- [67] IEEE STD 1.110/2002, *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analysis*.
- [68] IEEE STD 421.5-1992, *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*.

- [69] YEAGER, K.E., WILLIS, J.R., *Modeling of Emergency Diesel Generators in an 800 Megawatt Nuclear Power Plant*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 8, No. 3, 1.993.
- [70] IEEE TASK FORCE ON LOAD REPRESENTATION FOR DYNAMIC PERFORMANCE; *Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 10, no 3, 1995.
- [71] IEEE STD C37.2-1996 *IEEE Standard Electrical Power System - Device Function Numbers and Contact Designations*.
- [72] BAILEY, B., JAKOMINICH, D., *Static Relays Permit Enhanced Protection*, IEEE Industry Applications Magazine, Vol 5, No. 2, 1.999.
- [73] LORA, E. E. S., NASCIMENTO, M. A. R. (COORDENADORES); *Geração Termelétrica – Planejamento, Projeto e Operação*, Vol 2, Editora Interciência, 2000.
- [74] IEEE COMMITTEE REPORT, *Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies*, IEEE Transactions on Power and System Apparatus, Nov/Dez 1973.
- [75] SKM SYSTEM ANALYSIS, INC., *The History of SKM Systems Analysis, Inc.* Disponível em <http://www.skm.com/history.shtml>. Acesso em 17 de junho de 2009, 22:25.
- [76] SKM SYSTEM ANALYSIS, INC., *DAPPER® Studies*. Disponível em [http://www.skm.com/products\\_dapper.shtml](http://www.skm.com/products_dapper.shtml). Acesso em 17 de junho de 2009, 22:10.
- [77] SKM SYSTEM ANALYSIS, INC., *Power\*Tools for Windows, Electrical Engineering Analysis Software for Windows, DAPPER Reference Manual*, 2008.
- [78] SKM SYSTEM ANALYSIS, INC., *I\*SIM - Transient Stability Analysis*. Disponível em [http://www.skm.com/products\\_isim.shtml](http://www.skm.com/products_isim.shtml). Acesso em 17 de junho de 2009, 22:12.

[79] SKM SYSTEM ANALYSIS, INC., *Power\*Tools for Windows, Electrical Engineering Analysis Software for Windows, I\*SIM Reference Manual*, 2008.



## APÊNDICE A

### O PROGRAMA POWER\*TOOLS

Para permitir a avaliação quantitativa dos elementos diversos relacionados à conexão dos cogeneradores foram estudados dois casos típicos. O primeiro, contemplando uma instalação de cogeração industrial de pequeno porte, ligada no sistema de distribuição de média tensão, e o segundo, uma instalação de cogeração industrial de grande porte, ligada no sistema de distribuição de média tensão.

Os sistemas foram modelados e simulados por meio dos módulos DAPPER (Distribution Analysis for Power Planning Evaluation and Reporting) e I\*SIM (Industrial Simulation and Transient Stability), ambos do pacote computacional Power\*Tools, versão 6.5/2009, desenvolvido pela SKM Systems Analysis, Inc.

A SKM Systems Analysis, Inc é uma empresa californiana fundada em 1972 para automação de cálculos elétricos. Ela desenvolveu originalmente o software DAPPER em um *mainframe* do UCLA Computer Center. A primeira versão para computador pessoal do DAPPER foi lançada em 1981 e do I\*SIM, em 1992. Em 1995 a SKM lançou o pacote computacional Power\*Tools for Windows [75].

O pacote computacional Power\*Tools for Windows destina-se ao projeto e análise de sistemas elétricos, principalmente industriais, com recurso de interfaces gráficas, bibliotecas, relatórios, etc. Permite desenvolver simulações de sistemas tais como confiabilidade, curto-circuito, energia incidente de arco elétrico, estabilidade transitória, fluxo de potência, harmônicos, partidas de motores, etc.

#### O MÓDULO DAPPER

O módulo base do pacote, DAPPER, destina-se a estudos de fluxo de potência, de demanda e de curto-circuito convencional e ao dimensionamento de alimentadores, painéis e transformadores [76]. Para cálculos de curto-circuito utilizando metodologias específicas, caso das Normas IEC 60363 e 60909 e ANSI C37.10 / IEEE 141, existem outros módulos.

Na versão original do DAPPER os cálculos de fluxo de potência eram feitos usando um método iterativo conhecido como injeção de corrente, que usa uma metodologia tipo Gauss aplicada a uma formulação baseada na matriz admitância, conforme a seguir descrito [77]. Nas versões mais recentes foi incorporada a opção de solução usando o método de Newton-Raphson.

A formulação do problema do fluxo de potência adotada é descrita nas equações a seguir.

$$[I] = [Y][V] \quad (A.1)$$

$$I_i = \frac{(P_i + jQ_i)^*}{V_i^*} \quad (A.2)$$

$$\left[ \frac{(P - jQ)}{V^*} \right] = [Y][V] \quad (A.3)$$

A equação (A.3) não é linear e não pode ser resolvida de forma direta. Então é usada uma solução numérica, que refaz o cálculo de forma iterativa até que seja atingido um valor de convergência pré-estabelecido, fixado de acordo com um nível de exatidão aceitável, por exemplo, a maior carga do sistema dividida por 20.000.

As variáveis para as equações (A.3) são organizadas de acordo com cada tipo de barra, conforme indicado na Tabela 24. Pelo menos uma das barras do sistema precisa ser definida como Tipo I – Barra *Swing*.

Tabela 24 – Variáveis independentes e dependentes de acordo com cada tipo de barra

Barra Tipo	Nome	Variável	
		Independente	Dependente
I	Barra de carga	P, jQ	V, $\theta$
II	Barra de geração classe A Barra de geração classe B	-P, $\pm jQ$ -P, V	V, $\theta$ $\pm jQ$ , $\theta$
III	Barra <i>swing</i> (ou de referência)	V, $\theta$	$\pm P$ , $\pm jQ$

A solução da equação (A.3) depende da topologia do sistema, incluindo as impedâncias dos ramos e as injeções de potência nas barras. O programa monta as matrizes correspondentes e, usando técnicas de otimização em álgebra linear, calcula as variáveis dependentes.

A primeira estimativa despreza as perdas e quedas de tensão e calcula as correntes nos ramos para as cargas e tensões nominais dadas. Então as perdas e quedas de tensão são calculadas e, dados os novos valores para as cargas e tensões nas barras, as correntes nos ramos são recalculadas. As novas correntes permitem calcular novas perdas nos ramos e novas tensões nas barras. As iterações continuam até que haja pequena variação da injeção de potência de cada barra entre uma iteração e outra e a convergência seja atingida.

O programa usa para os transformadores modelagens com taps primários ou secundários e para as cargas, representação tipo impedância constante, corrente constante ou potência constante.

Os cálculos de curto-circuito são feitos a partir dos equivalentes de Thevenin e das tensões nos pontos de defeito, aplicada formulação baseada na matriz impedância de barra, obtida por meio da inversão da matriz admitância, conforme descrito a seguir [77].

$$[E] = [Z][I] \quad (A.4)$$

$$[Z] = [Y]^{-1} \quad (A.5)$$

$$I = \frac{V}{Z_{Thevenin}} \quad (A.6)$$

Para faltas desequilibradas as correntes de curto-circuito são calculadas usando o recurso de componentes simétricos, para o que são incorporadas as impedâncias de sequencia negativa e de sequencia zero. Para as redes de sequencia zero as ligações trifásicas dos transformadores são verificadas para ajustar os circuitos abertos ou fechados, conforme cada caso.

Para avaliação das correntes assimétricas de curto-circuito, de acordo com o decaimento da componente de corrente contínua, são utilizadas as relações  $X/R$  no ponto de defeito e aplicadas as equações a seguir, considerando  $I_k''$  o valor rms (eficaz) simétrico da corrente de curto-circuito, calculada conforme indicado na equação (A.6), e 1/2ciclo o tempo para o valor instantâneo máximo.

$$I_{dc} = \sqrt{2} I_k'' e^{-2\pi\left(\frac{R}{X}\right)c} \quad (\text{A.7})$$

$$I_{\text{assimétrico}} = \sqrt{2} I_k'' \left( 1 + e^{-2\pi\left(\frac{R}{X}\right)c} \right) \quad (\text{A.8})$$

$$I_{\text{assimétrico rms}} = I_k'' \sqrt{1 + 2e^{-4\pi\left(\frac{R}{X}\right)c}} \quad (\text{A.9})$$

$$I_{\text{assimétrico pico}} = \sqrt{2} I_k'' \left( 1 + e^{-\pi\left(\frac{R}{X}\right)c} \right) \quad (\text{A.10})$$

O programa considera o efeito dos taps primários e secundários dos transformadores. Permite também considerar a defasagem angular dos transformadores e calcular os ângulos das contribuições das correntes de curto-circuito nos ramos e as tensões nas barras em geral durante o defeito. O programa permite ainda usar as tensões pré-falta calculadas no fluxo de potência ou especificar diretamente as tensões pré-falta nas barras.

## O MÓDULO I\*SIM

O módulo I\*SIM destina-se a estudos de estabilidade transitória. Foi projetado para simular a resposta dos sistemas elétricos durante e após perturbações tais como faltas, alterações de carga, chaveamentos, partidas de motores, perdas de concessionária ou de geração local e perdas de excitação e de governadores de geradores [78][79].

O programa usa modelagem dinâmica para os geradores (máquina, sistema de excitação e governador), motores síncronos (máquina e sistema de excitação), motores de indução, relés e barras de carga, para o que vários modelos típicos de referência são disponíveis na sua biblioteca, modelos que podem ser copiados e alterados. Nas últimas versões foram acrescentadas as opções de modelagem de compensadores estáticos e de geradores eólicos.

O programa permite definir qualquer fonte como referência angular para simulação dinâmica. Também é possível definir o passo de integração (1/64 a 1ciclo).

Antes da simulação dinâmica o programa calcula as condições iniciais através do fluxo de potência, usando o mesmo método de injeção de corrente usado no DAPPER.

Todas as máquinas rotativas são tratadas como fontes de corrente. Os valores instantâneos da magnitude e do ângulo de fase das fontes de corrente são determinados a partir dos fluxos, velocidades e ângulos de cada máquina. As impedâncias das máquinas são tratadas como parte da matriz admitância da rede. O circuito equivalente que representa a máquina rotativa como uma fonte de corrente e uma impedância, chamado Equivalente de Norton da Máquina, é mostrado na Figura 78.

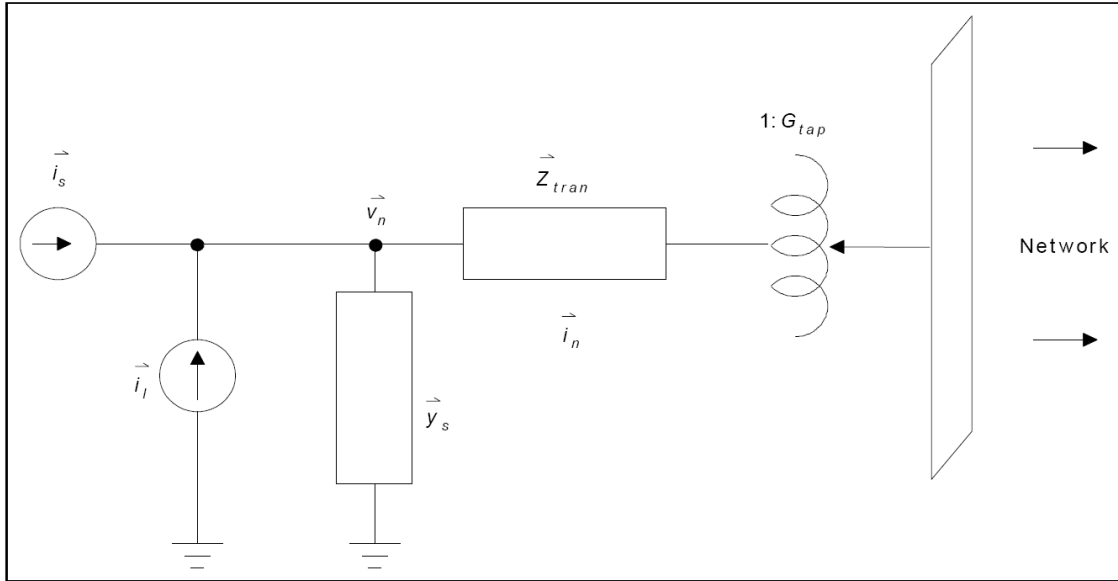


Figura 78 – Equivalente Norton da Máquina Rotativa

As equações a seguir são usadas para a definição do Equivalente de Norton da Máquina.

$$\bar{y}_1 = \frac{-\frac{1}{2} j \omega (L''_d - L''_q)}{r_s^2 + \omega^2 L''_d L''_q} \quad (\text{A.11})$$

$$\bar{y}_s = \frac{r_s - \frac{1}{2} j \omega (L''_d + L''_q)}{r_s^2 + \omega^2 L''_d L''_q} \quad (\text{A.12})$$

$$\bar{i}_s = \bar{y}_s \bar{E}_n'' - \bar{y}_1 e^{j2\delta} \hat{E}_n'' \quad (\text{A.13})$$

$$\bar{i}_l = \bar{y}_1 e^{j2\delta} \hat{v}_n \quad (\text{A.14})$$

Na sua implementação o programa ignora o efeito subtransitório da saliência dos pólos, fazendo  $L''_d = L''_q = L''$ , com o que o equivalente Norton se reduz ao indicado na Figura 79.

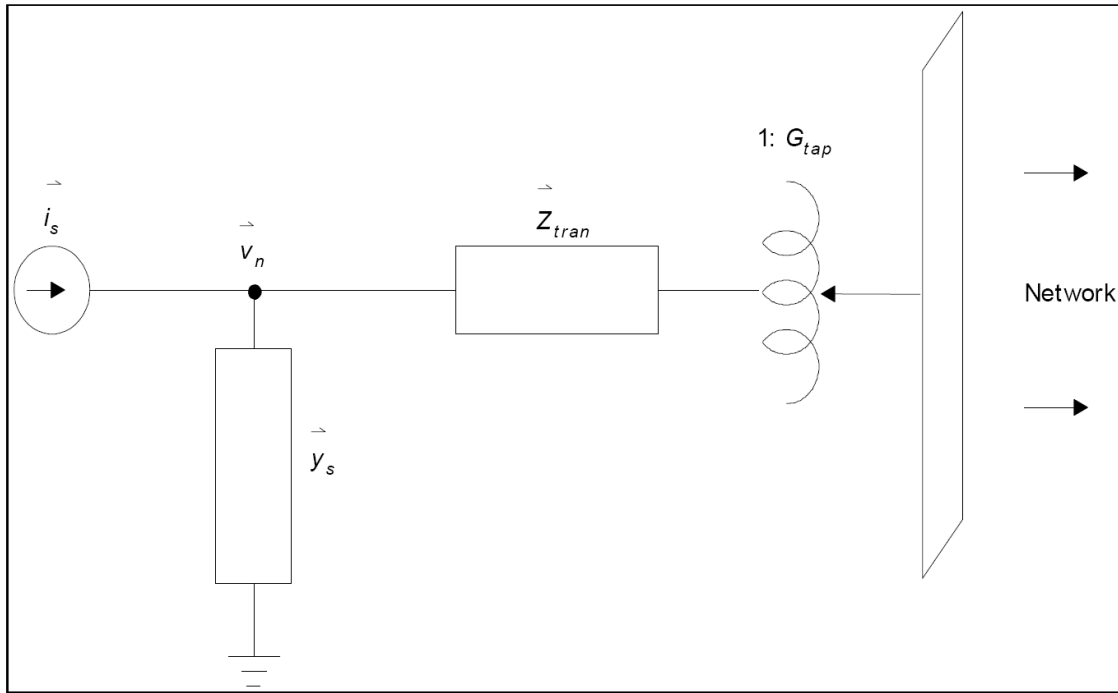


Figura 79 – Equivalente Norton da Máquina Rotativa ignorando o efeito subtransitório da saliência dos pólos

Neste caso as equações (A.11) a (A.14) se reduzem a:

$$\vec{y}_s = \frac{r_s - j\omega L''}{r_s^2 + \omega^2 L''^2} \quad (\text{A.15})$$

$$\vec{i}_s = \vec{y}_s \vec{E}_n'' \quad (\text{A.16})$$

O programa calcula a aceleração do rotor através da equação de oscilação baseada no torque, conforme indicado a seguir.

$$2H \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{P_{mec} - D_e n}{1+n} - T_e \quad (\text{A.17})$$

$$P_{mec} = P_{mec} \Big|_{n=0} - D_t n \quad (\text{A.18})$$

$$H = \frac{0,231 \times 10^{-6} \text{ Wk}^2 (\text{rpm})^2}{\text{kVA}} \quad (\text{A.19})$$

$$D_e = \frac{\partial P_e}{\partial n} \quad (\text{A.20})$$

$$D_t = \frac{\partial P_t}{\partial n} \quad (\text{A.21})$$

## APÊNDICE B

# DADOS DE ENTRADA NO FORMATO PTW DO SISTEMA DE TESTE PARA A CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO

-----  
 ALL INFORMATION PRESENTED IS FOR REVIEW, APPROVAL  
 INTERPRETATION AND APPLICATION BY A REGISTERED ENGINEER ONLY  
 SKM DISCLAIMS ANY RESPONSIBILITY AND LIABILITY RESULTING  
 FROM THE USE AND INTERPRETATION OF THIS SOFTWARE.  
 -----

SKM POWER\*TOOLS FOR WINDOWS  
 INPUT DATA REPORT  
 COPYRIGHT SKM SYSTEMS ANALYSIS, INC. 1995-2009  
 -----

ALL PU VALUES ARE EXPRESSED ON A 100 MVA BASE.

### FEEDER INPUT DATA

CABLE NAME	FEEDER FROM NAME	FEEDER TO NAME	QTY /PH	VOLTS L-L	LENGTH	FEEDER SIZE	FEEDER TYPE
AL-1.1	BUS-SE-MT	BUS-AL-1.1	1	13800	500.0 METER	4/0	
	Duct Material:				Insulation Type:		Insulation Class:
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m		0.0793 + J	0.1074 PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m		0.1260 + J	0.5030 PU
AL-1.2	BUS-AL-1.1	BUS-AL-1.2	1	13800	500.0 METER	4/0	
	Duct Material:				Insulation Type:		Insulation Class:
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m		0.0793 + J	0.1074 PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m		0.1260 + J	0.5030 PU
AL-1.3	BUS-AL-1.2	BUS-AL-1.3	1	13800	500.0 METER	4/0	
	Duct Material:				Insulation Type:		Insulation Class:
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m		0.0793 + J	0.1074 PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m		0.1260 + J	0.5030 PU

CABLE NAME	FEEDER FROM NAME	FEEDER TO NAME	QTY /PH	VOLTS L-L	LENGTH	FEEDER SIZE	FEEDER TYPE
AL-1.4	BUS-AL-1.3	BUS-AL-1.4	1	13800	500.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.0793 + J	0.1074	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.1260 + J	0.5030	PU
AL-1.5	BUS-AL-1.4	BUS-AL-1.5	1	13800	500.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.0793 + J	0.1074	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.1260 + J	0.5030	PU
AL-1.6	BUS-AL-1.5	BUS-AL-1.6	1	13800	500.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.0793 + J	0.1074	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.1260 + J	0.5030	PU
AL-2.1	BUS-SE-MT	BUS-AL-2.1	1	13800	1000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.1586 + J	0.2148	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.2520 + J	1.01	PU
AL-2.2	BUS-AL-2.1	BUS-AL-2.2	1	13800	1000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.1586 + J	0.2148	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.2520 + J	1.01	PU
AL-2.3	BUS-AL-2.2	BUS-AL-2.3	1	13800	1000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.1586 + J	0.2148	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.2520 + J	1.01	PU
AL-2.4	BUS-AL-2.3	BUS-AL-2.4	1	13800	1000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.1586 + J	0.2148	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.2520 + J	1.01	PU
AL-2.5	BUS-AL-2.4	BUS-AL-2.5	1	13800	1000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.1586 + J	0.2148	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.2520 + J	1.01	PU

CABLE NAME	FEEDER FROM NAME	FEEDER TO NAME	QTY /PH	VOLTS L-L	LENGTH	FEEDER SIZE	FEEDER TYPE
AL-2.6	BUS-AL-2.5	BUS-AL-2.6	1	13800	1000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.1586 + J	0.2148	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.2520 + J	1.01	PU
AL-3.1	BUS-SE-MT	BUS-AL-3.1	1	13800	1333.3 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.2115 + J	0.2864	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.3360 + J	1.34	PU
AL-3.2	BUS-AL-3.1	BUS-AL-3.2	1	13800	1333.3 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.2115 + J	0.2864	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.3360 + J	1.34	PU
AL-3.3	BUS-AL-3.2	BUS-AL-3.3	1	13800	1333.3 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.2115 + J	0.2864	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.3360 + J	1.34	PU
AL-3.4	BUS-AL-3.3	BUS-AL-3.4	1	13800	1333.3 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.2115 + J	0.2864	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.3360 + J	1.34	PU
AL-3.5	BUS-AL-3.4	BUS-AL-3.5	1	13800	1333.3 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.2115 + J	0.2864	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.3360 + J	1.34	PU
AL-3.6	BUS-AL-3.5	BUS-AL-3.6	1	13800	1333.3 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.2115 + J	0.2864	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.3360 + J	1.34	PU
AL-4.1	BUS-SE-MT	BUS-AL-4.1	1	13800	2000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.3173 + J	0.4296	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.5040 + J	2.01	PU



CABLE NAME	FEEDER FROM NAME	FEEDER TO NAME	QTY /PH	VOLTS L-L	LENGTH	FEEDER SIZE	FEEDER TYPE
AL-4.2	BUS-AL-4.1	BUS-AL-4.2	1	13800	2000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.3173 + J	0.4296	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.5040 + J	2.01	PU
AL-4.3	BUS-AL-4.2	BUS-RTAL3-AT	1	13800	2000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.3173 + J	0.4296	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.5040 + J	2.01	PU
AL-4.4	BUS-AL-4.3	BUS-AL-4.4	1	13800	2000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.3173 + J	0.4296	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.5040 + J	2.01	PU
AL-4.5	BUS-AL-4.4	BUS-AL-4.5	1	13800	2000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.3173 + J	0.4296	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.5040 + J	2.01	PU
AL-4.6	BUS-AL-4.5	BUS-AL-4.6	1	13800	2000.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.3173 + J	0.4296	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.5040 + J	2.01	PU
AL-BCP	BUS-SE-MT	BUS-BCP-SE	1	13800	5.0 METER	4/0	
	Duct Material:		Insulation Type:		Insulation Class:		
	+/- Impedance:	0.3021 + J	0.4091	Ohms/1000 m	0.00079 + J	0.0011	PU
	Z0 Impedance:	0.4799 + J	1.92	Ohms/1000 m	0.0013 + J	0.0050	PU

TRANSFORMER INPUT DATA

```

=====
TRANSFORMER PRIMARY RECORD VOLTS * SECONDARY RECORD VOLTS FULL-LOAD NOMINAL
NAME NO NAME L-L NO NAME L-L KVA KVA
=====
RT-AL4 BUS-RTAL3-AT YG 13800.0 BUS-AL-4.3 YG 13800.0 5234.60 5234.60
Pos. Seq. Z%: 0.116 + J 1.50 (Zpu 0.022 + j 0.285 ) Shell Type
Zero Seq. Z%: 0.116 + J 1.50 ( Pri - Sec: 0.022 + j 0.285 )
Taps Pri. 0.000 % Sec. 0.000 % Phase Shift (Pri. Leading Sec.): 0.000 Deg.

TF-APEQ1 BUS-APMT01 D 13800.0 BUS-APBT01 YG 480.00 3000.00 3000.00
Pos. Seq. Z%: 0.904 + J 5.43 (Zpu 0.301 + j 1.81 ) Shell Type
Zero Seq. Z%: 0.904 + J 5.43 (Sec 0.301 + j 1.81 Pri Open)
Taps Pri. -2.50 % Sec. 0.000 % Phase Shift (Pri. Leading Sec.): 30.00 Deg.

TF-APEQ2 BUS-APMT02 D 13800.0 BUS-APBT02 YG 480.00 3000.00 3000.00
Pos. Seq. Z%: 0.904 + J 5.43 (Zpu 0.301 + j 1.81 ) Shell Type
Zero Seq. Z%: 0.904 + J 5.43 (Sec 0.301 + j 1.81 Pri Open)
Taps Pri. -2.50 % Sec. 0.000 % Phase Shift (Pri. Leading Sec.): 30.00 Deg.

TF-LINK BUS-APMT02 YG 13800.0 BUS-APMT01 D 13800.0 4000.00 3000.00
Pos. Seq. Z%: 0.461 + J 4.98 (Zpu 0.153 + j 1.66 ) Shell Type
Zero Seq. Z%: 0.461 + J 4.98 (Pri 0.153 + j 1.66 Sec Open)
Taps Pri. 0.000 % Sec. 0.000 % Phase Shift (Pri. Leading Sec.): -30.0 Deg.

TRAFO-SE BUS-SE-AT D 13800.0 BUS-SE-MT YG 13800.0 25000.0 20000.0
Pos. Seq. Z%: 0.363 + J 7.99 (Zpu 0.018 + j 0.399 ) Shell Type
Zero Seq. Z%: 0.363 + J 7.99 (Sec 0.018 + j 0.399 Pri Open)
Taps Pri. 0.000 % Sec. 0.000 % Phase Shift (Pri. Leading Sec.): 30.00 Deg.

```

GENERATION DATA

BUS NAME	GENERATION	VOLT	SIZE	InitKW	MaxKVAR	TYPE
BUS-SE-AT	EQ-SISTEMA	1 pu	250.00 MVA	0.00000	0.00000	SB
BUS-APMT02	GEN-AP	1 pu	5000.00 kVA	0.00000	0.00000	SB

GENERATION CONTRIBUTION DATA

BUS NAME	CONTRIBUTION NAME	VOLTAGE L-L	MVA	X"d	X/R	
BUS-APMT02	GEN-AP	13800.0	5.00	0.2020	22.50	
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.1796 + J		4.04 PU
	Neg Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.2036 + J		4.58 PU
	Zero Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.1031 + J		2.32 PU
BUS-SE-AT	EQ-SISTEMA	138000.	250.0	0.1000	10.00	
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.0040 + J		0.0400 PU
	Neg Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.0040 + J		0.0400 PU
	Zero Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.0120 + J		0.1200 PU

MOTOR CONTRIBUTION DATA

BUS NAME	CONTRIBUTION NAME	VOLTAGE L-L	BASE kVA	X"d	X/R	Motor Number
BUS-APBT01	MEQ-APBT01	480	2916.67	0.1633	4.90	1.00
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)				1.14 + j	5.60 PU
BUS-APBT02	MEQ-APBT02	480	2916.67	0.1633	4.90	1.00
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)				1.14 + j	5.60 PU

P A S S I V E F I L T E R D A T A

Filter Name	Bus Name	Bus Voltage	Rated Voltage	Connect	Filter Type	Capacitor KVAR	Tuned Order	Q	M	R ( $\Omega$ )	L (H)	C ( $\mu$ F)
BCP-SE	BUS-BCP-SE	13800	13800	WYE_G	Capacitor	2400.0				0.0000	0.0000	33.4289
										0.0000	0.0000	33.4289
BCP-AL3-2	BUS-AL-3.4	13800	13800	WYE	Capacitor	1200.0				0.0000	0.0000	16.7144
										0.0000	0.0000	16.7144
BCP-AL3-1	BUS-AL-3.2	13800	13800	WYE	Capacitor	1200.0				0.0000	0.0000	16.7144
										0.0000	0.0000	16.7144
BCP-AL2-1	BUS-AL-2.4	13800	13800	WYE	Capacitor	600.0				0.0000	0.0000	8.3572
										0.0000	0.0000	8.3572
BCP-AL4-1	BUS-AL-4.2	13800	13800	WYE	Capacitor	600.0				0.0000	0.0000	8.3572
										0.0000	0.0000	8.3572
BCP-AL4-2	BUS-AL-4.4	13800	13800	WYE	Capacitor	600.0				0.0000	0.0000	8.3572
										0.0000	0.0000	8.3572

## ENERGY AUDIT LOADS

BUS	NAME	LOAD NAME	VOLTS	SIZE	LOADTYPE	PF	LAG/LEAD
BUS-AL-1.1		LOAD-AL1.1	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-1.2		LOAD-AL1.2	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-1.3		LOAD-AL1.3	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-1.4		LOAD-AL1.4	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-1.5		LOAD-AL1.5	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-1.6		LOAD-AL1.6	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-2.1		LOAD-AL2.1	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-2.2		LOAD-AL2.2	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-2.3		LOAD-AL2.3	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-2.4		LOAD-AL2.4	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-2.5		LOAD-AL2.5	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-2.6		LOAD-AL2.6	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-3.1		LOAD-AL3.1	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-3.2		LOAD-AL3.2	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-3.3		LOAD-AL3.3	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-3.4		LOAD-AL3.4	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-3.5		LOAD-AL3.5	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-3.6		LOAD-AL3.6	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-4.1		LOAD-AL4.1	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-4.2		LOAD-AL4.2	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-4.3		LOAD-AL4.3	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-4.4		LOAD-AL4.4	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-4.5		LOAD-AL4.5	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-AL-4.6		LOAD-AL4.6	13800.0	843.70*1.00	KW KVA	0.90	LAG
BUS-APBT01		LEQ-APBT01	480.00	350.00*1.00	KW KVA	0.95	LAG
BUS-APBT02		LEQ-APBT02	480.00	350.00*1.00	KW KVA	0.95	LAG

## MOTOR LOAD DATA

BUS	NAME	LOAD NAME	VOLT	SIZE	#	TYPE	EFF	PF
BUS-APBT01		MEQ-APBT01	480	2100.0*	1	KW KVA	0.90	0.80 LAG
BUS-APBT02		MEQ-APBT02	480	2100.0*	1	KW KVA	0.90	0.80 LAG

```

EQ-SISTEMA      BUS-SE-AT
Library Model Name: !Coppe_Tese_CasoMT_Infinite Bus
Machine Modal Data::
0.000000
0.000000
0.010000 Ra Armature resistance
0.100000 Xa Armature reactance

```

```

Component Name: GEN-AP
Bus Connected: BUS-APMT02

```

```

Library Model Name: !Coppe_Tese_CasoMT_Gerador
Machine Modal Data:
2.700000 Td0' D-axis transient time constant
0.014000 Td0" D-axis sub-transient time constant
1.000000 Tq0' Q-axis transient time constant
0.060000 Tq0" Q-axis sub-transient time constant
0.996000 H Inertia constant
0.000000 D Load damping coefficient
1.470000 Xd D-axis armature reactance
0.730000 Xq Q-axis armature reactance
0.303000 Xd' D-axis transient reactance
0.450000 Xq' Q-axis transient reactance
0.229000 X" Machine sub-transient reactance
0.126000 Xl Leakage reactance
0.100000 S10 Saturation factor at V=1.0 PU
0.400000 S12 Saturation factor at V=1.2 PU
0.009000 Ra Armature resistance
0.229000 X" Machine sub-transient reactance

```

```

Library Model Name: !Coppe_Tese_CasoMT
Exciter Modal Data:

```

```

-----
Regulator
G: Steady State Gain

```

T: Voltage regulator Time Constant  
Min: Voltage regulator Minimum Voltage  
Max: Voltage regulator Maximum Voltage  
Parameter T 0.020000  
Parameter G 400.000000  
Parameter minLimit -7.300000  
Parameter maxLimit 7.300000

-----  
K:  
Exciter Constant Ke  
Parameter T1 1.000000

-----  
Saturation:  
X1: First Sample Voltage  
Y1: Saturation Factor at X1  
X2: Second sample Voltage  
Y2: Saturation factor at X2  
Parameter X1 4.200000  
Parameter Y1 0.500000  
Parameter X2 5.600000  
Parameter Y2 0.860000

-----  
Parameter T 0.800000  
Parameter minLimit 0.000000  
Parameter maxLimit 200.000000

Parameter T1 0.030000  
Parameter T2 1.000000

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoMT\_Isochronous  
Turbine/Governor Modal Data:

-----  
T1,T2,T3 are electric control box constant  
Parameter T1 0.010000  
Parameter T2 0.020000  
Parameter T3 0.200000

-----  
T1: Actuator constant T4  
T2: constant 1.0  
Parameter T1 0.250000  
Parameter T2 1.000000

-----  
G: Steady Gain  
T: Actuator constant T5  
Parameter T 0.038400  
Parameter G 40.000000

-----  
T: Actuator constant T6  
G: constant 1.0  
max: maximum actuator torque  
min: minimum actuator torque  
Parameter T 0.009000  
Parameter G 1.000000  
Parameter minLimit 0.000000  
Parameter maxLimit 0.800000

-----  
T: Engine dead time  
Parameter T 0.024000

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoMT\_Droop  
Turbine/Governor Modal Data:

-----  
T1,T2,T3 are electric control box constant



Parameter T1 0.010000  
Parameter T2 0.020000  
Parameter T3 0.200000

-----  
T1: Actuator constant T4  
T2: constant 1.0  
Parameter T1 0.250000  
Parameter T2 1.000000

-----  
G: Steady Gain  
T: Actuator constant T5  
Parameter T 0.038400  
Parameter G 40.000000

-----  
T: Actuator constant T6  
G: constant 1.0  
max: maximum actuator torque  
min: minimum actuator torque  
Parameter T 0.009000  
Parameter G 1.000000  
Parameter minLimit 0.000000  
Parameter maxLimit 0.800000

-----  
T: Engine dead time  
Parameter T 0.024000

-----  
K: Permanent droop  
Parameter T1 0.050000

Component Name: MEQ-APBT01  
Bus Connected: BUS-APBT01

```

Library Model Name: !Coppe_Tese_CasoMT_MEQ F
Machine Modal Data:
    0.498100 T' Transient time constant
    0.000000
    0.700000 H Inertia constant
    3.300000 X Steady-state armature reactance
    0.270400 X' Transient motor reactance
    0.000000
    0.100000 Xl Leakage reactance
    1.000000 E1 First sample voltage
    0.030000 Se(E1) Saturation factor at E1
    1.200000 E2 Second sample voltage
    0.120000 Se(E2) Saturation factor at E2
    2.000000 D Load damping factor
    -0.999990 Tnominal pu on motor Torque Base
    0.031000 Ra Armature resistance
    0.270400 X' Transient motor reactance

```

```

MOTOR NAME      MODEL DESCRIPTION      KVA      KV      SYNC. RPM
BUS NAME        INITIAL STATUS
MEQ-APBT01      QTY= 1 FLUX MDL          2916.7   0.48    1800
BUS-APBT01      ON LINE  Wk**2(Kg-M2):    118.000 2H:    1.437
MOTOR SWITCHING DATA=====
  PUT ON LINE AT TIME:
CONTROLLER TYPE: FULL VOLTAGE CONTROL FUNCTION: NONE
LOAD DATA=====
LOAD MODEL: POLYNOMIAL MODEL
LOAD BREAK-A-WAY TORQUE (NM ):          1
LOAD(NM ) =          1 + 0.0000E+000 * ( RPM ** 1.00)
                  + 0.0000E+000 * ( RPM ** 2.00)
                  + 2.2836E-003 * ( RPM ** 2.00)

```

```

Component Name: MEQ-APBT02
Bus Connected:  BUS-APBT02

```

```

Library Model Name: !Coppe_Tese_CasoMT_MEQ F
Machine Modal Data:
0.498100 T' Transient time constant
0.000000
0.700000 H Inertia constant
3.300000 X Steady-state armature reactance
0.270400 X' Transient motor reactance
0.000000
0.100000 Xl Leakage reactance
1.000000 E1 First sample voltage
0.030000 Se(E1) Saturation factor at E1
1.200000 E2 Second sample voltage
0.120000 Se(E2) Saturation factor at E2
2.000000 D Load damping factor
-0.999990 Tnominal pu on motor Torque Base
0.031000 Ra Armature resistance
0.270400 X' Transient motor reactance

```

```

MOTOR NAME      MODEL DESCRIPTION      KVA      KV      SYNC. RPM
BUS NAME        INITIAL STATUS
MEQ-APBT02      QTY= 1 FLUX MDL          2916.7   0.48    1800
BUS-APBT02      On LINE Wk**2(Kg-M2):    118.000 2H:    1.437
MOTOR SWITCHING DATA=====
PUT ON LINE AT TIME:
CONTROLLER TYPE: FULL VOLTAGE CONTROL FUNCTION: NONE
LOAD DATA=====
LOAD MODEL: POLYNOMIAL MODEL
LOAD BREAK-A-WAY TORQUE (NM ):          1
LOAD(NM ) =          1 + 0.0000E+000 * ( RPM ** 1.00)
                  + 0.0000E+000 * ( RPM ** 2.00)
                  + 2.2836E-003 * ( RPM ** 2.00)

```

## APÊNDICE C

### CIRCULAÇÃO DE CORRENTES NAS FASES PARA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NO LADO DO SISTEMA PARA O CASO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO

Para avaliação do problema da circulação das correntes nas fases do sistema para um curto-circuito fase-terra no lado de 13,8kV será considerado de forma simplificada o autoprodutor ligado na posição 2 do alimentador 1, conforme indicado na Figura 80.

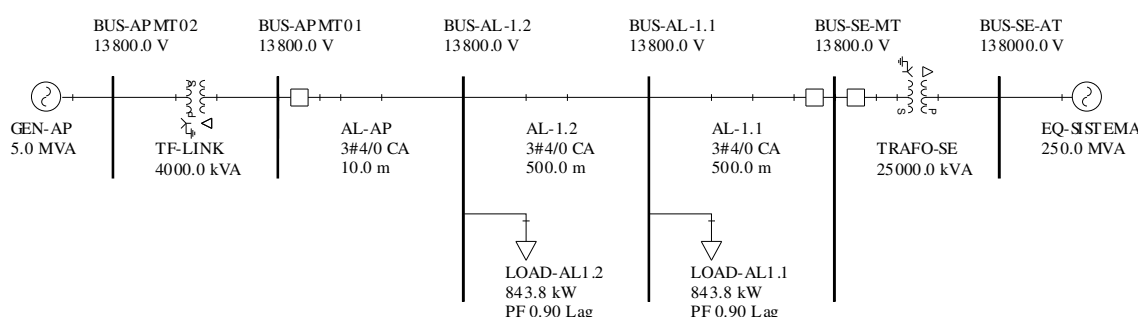


Figura 80 – Sistema elétrico simplificado para verificação circulação das correntes para curto-circuito fase-terra do lado do sistema

Simulando a ocorrência de um curto-circuito fase terra na barra BUS-AL-1.1 são obtidos os resultados indicados na Figura 81, mostrando que apesar da ligação delta para o lado da rede no transformador TF-LINK este contribui para o curto-circuito total na barra.

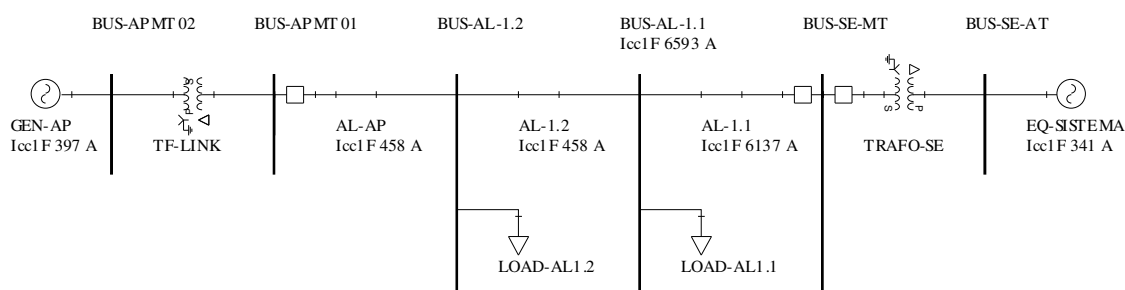


Figura 81 – Diagrama unifilar com a circulação das correntes no sistema elétrico simplificado para curto-circuito fase-terra na barra BUS-AL-1.1

De fato, com a ligação delta no lado da rede externa no transformador TF-LINK o gerador não poderá contribuir com correntes de sequência zero para o defeito, mas

haverá a circulação das correntes de seqüência positiva e negativa, conforme mostrado no diagrama com as redes de seqüência mostrado na Figura 83 e nos resultados obtidos pela simulação apresentados na Figura 83.

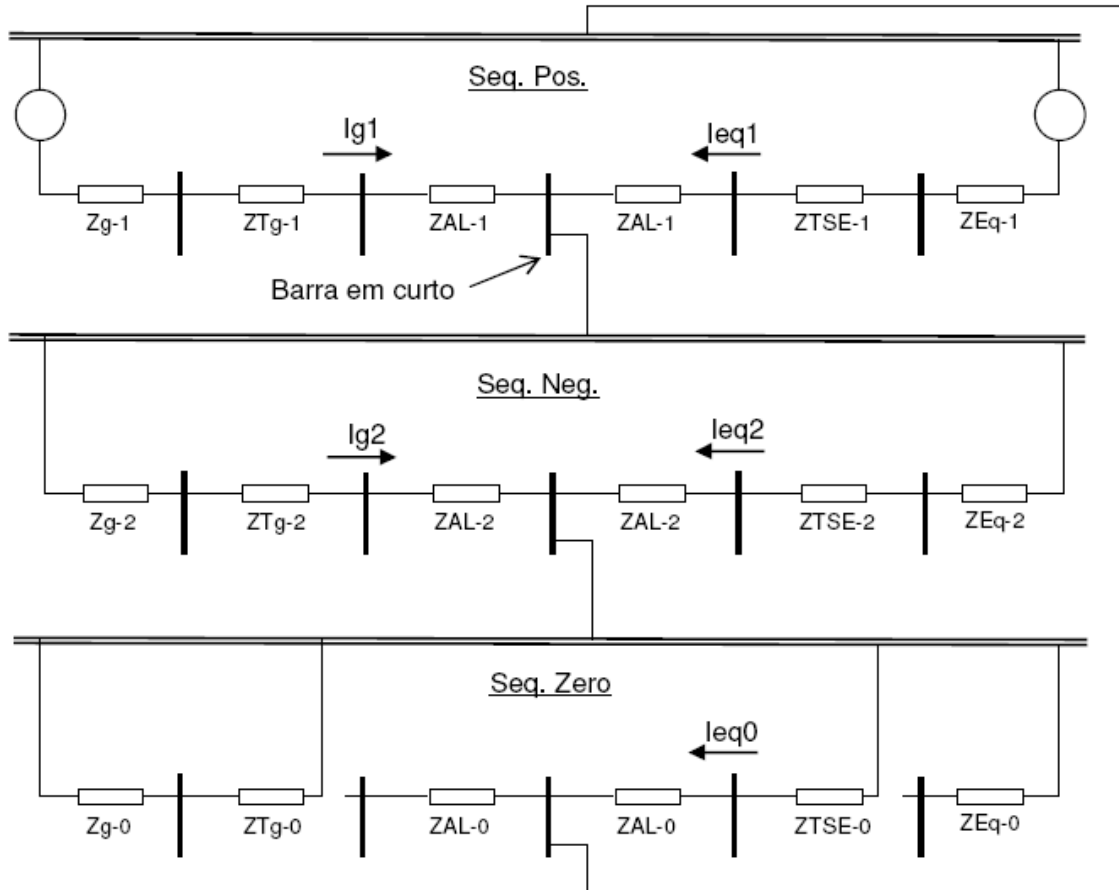


Figura 82 – Diagrama com as redes de seqüência positiva, negativa e zero para curto-circuito fase-terra na barra BUS-AL-1.1 no sistema elétrico simplificado

```

BUS-AL-1.1  ===== INI.   RMS   SYSTEM BRANCH FLOWS ( AMPS/DEG ) =====
              ALL BRANCHES REPORTED   AT TIME =   0.5 CYCLES
              BRANCH NAME              VOLTS     -POS SEQ-   -NEG SEQ-   -ZER SEQ-
EQ-SISTEMA  BUS-SE-AT                  138000.    197.0/ -79.  197.0/-139.  0.0/  0.
GEN-AP      BUS-APMT02                  13800.    229.0/-145.  229.0/ -85.  0.0/  0.
BUS-SE-AT   BUS-SE-MT   TRAF0-SE      13800.    1969.7/-109. 1969.7/-109. 2197.7/-110.
BUS-SE-MT   BUS-AL-1.1  AL-1.1      13800.    1969.7/-109. 1969.7/-109. 2197.7/-110.
BUS-AL-1.1  BUS-AL-1.2  AL-1.2      13800.    229.0/  65.  229.0/  65.  0.0/  0.
BUS-AL-1.2  BUS-APMT01  AL-AP       13800.    229.0/  65.  229.0/  65.  0.0/  0.
BUS-APMT02  BUS-APMT01  TF-LINK     13800.    229.0/-115.  229.0/-115.  0.0/  0.
    
```

Figura 83 – Circulação das componentes de seqüência positiva, negativa e zero das correntes para curto-circuito fase-terra na barra BUS-AL-1.1 no sistema elétrico simplificado

A contribuição com correntes de seqüência positiva e negativa do autoprodutor faz com que haja circulação de correntes do lado do gerador e do lado da rede no autoprodutor.

Com a defasagem de 30°, criada pela ligação delta-estrela do transformador TF-LINK nas componentes de sequência, no lado do gerador existe apenas correntes nas fases A e B e no lado da rede existe correntes nas três fases, conforme indicado na Figura 84.

```

BUS-AL-1.1  ===== INI.      RMS    SYSTEM BRANCH FLOWS ( AMPS ) =====
                ALL BRANCHES REPORTED  AT TIME =      0.5 CYCLES
                BRANCH NAME  VBASE LL  -PHASE A-    -PHASE B-    -PHASE C-
EQ-SISTEMA  BUS-SE-AT          138000.    341.2/-109.    0.0/  0.    341.2/  71.
GEN-AP      BUS-APMT02        13800.     396.7/-115.   396.7/  65.    0.0/  0.
BUS-SE-AT   BUS-SE-MT   TRAFO-SE    13800.     6137.0/-110.  229.0/-115.   229.0/-115.
BUS-SE-MT   BUS-AL-1.1  AL-1.1     13800.     6137.0/-110.  229.0/-115.   229.0/-115.
BUS-AL-1.1  BUS-AL-1.2  AL-1.2     13800.     458.1/  65.   229.0/-115.   229.0/-115.
BUS-AL-1.2  BUS-APMT01  AL-AP      13800.     458.1/  65.   229.0/-115.   229.0/-115.
BUS-APMT02  BUS-APMT01  TF-LINK    13800.     458.1/-115.   229.0/  65.   229.0/  65.

```

Figura 84 – Circulação das correntes nas fases A, B e C para curto-circuito fase-terra na barra BUS-AL1.1 no sistema elétrico simplificado

Desta forma, as proteções de sobrecorrente instaladas na entrada do autoprodutor (função 67), se adequadamente ajustadas, poderão atuar para abrir a interligação e interromper a contribuição do gerador para defeitos fase-terra no sistema externo.

Destaque-se, todavia, que esta circulação de correntes somente ocorre por causa da referência para terra mantida pelo enrolamento secundário ligado em estrela aterrada no transformador da subestação distribuidora. Sem esta referência não poderia circular qualquer corrente para o defeito e a detecção da falta à terra pelo lado do autoprodutor precisaria ser feita pela proteção de tensão residual de neutro na interligação (função 59N).

## APÊNDICE D

### DADOS DE ENTRADA NO FORMATO PTW DO SISTEMA DE TESTE PARA A CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO

-----  
 ALL INFORMATION PRESENTED IS FOR REVIEW, APPROVAL  
 INTERPRETATION AND APPLICATION BY A REGISTERED ENGINEER ONLY  
 SKM DISCLAIMS ANY RESPONSIBILITY AND LIABILITY RESULTING  
 FROM THE USE AND INTERPRETATION OF THIS SOFTWARE.  
 -----

SKM POWER\*TOOLS FOR WINDOWS  
 INPUT DATA REPORT  
 COPYRIGHT SKM SYSTEMS ANALYSIS, INC. 1995-2009  
 -----

ALL PU VALUES ARE EXPRESSED ON A 100 MVA BASE.  
 -----

#### FEEDER INPUT DATA

CABLE NAME	FEEDER FROM NAME	FEEDER TO NAME	QTY /PH	VOLTS L-L	LENGTH	FEEDER SIZE	FEEDER TYPE	
CBL-BCP	AP-MT-01B	AP-BCP	2	6900	50.0 METER	300	Copper	
	Duct Material: Non-Magnetic		Insulation Type:			PLC	Insulation Class:	MV
	+/-	Impedance:	0.0802 + J	0.1146	Ohms/1000 m	0.0042 + J	0.0060 PU	
	Z0	Impedance:	0.1276 + J	0.2915	Ohms/1000 m	0.0067 + J	0.0153 PU	
CBL-EQ-MI02	AP-MT-02	AP-MTI02	4	6900	500.0 METER	35	Copper	
	Duct Material: Non-Magnetic		Insulation Type:			PLC	Insulation Class:	MV
	+/-	Impedance:	0.6684 + J	0.1559	Ohms/1000 m	0.1755 + J	0.0409 PU	
	Z0	Impedance:	1.06 + J	0.3964	Ohms/1000 m	0.2789 + J	0.1041 PU	
CBL-EQ-MS02	AP-MT-02	AP-MTS02	2	6900	500.0 METER	25	Copper	
	Duct Material: Non-Magnetic		Insulation Type:			PLC	Insulation Class:	MV
	+/-	Impedance:	0.9272 + J	0.1635	Ohms/1000 m	0.4869 + J	0.0858 PU	
	Z0	Impedance:	1.47 + J	0.4160	Ohms/1000 m	0.7738 + J	0.2184 PU	

CBL-INT01	AP-MT-01A	AP-MT-02	2	6900	1300.0	METER	400	Copper	
	Duct Material: Non-Magnetic		Insulation Type:			PLC	Insulation Class:		MV
	+/- Impedance: 0.0640 + J		0.1159	Ohms/1000 m		0.0874 + J	0.1583 PU		
	Z0 Impedance: 0.0640 + J		0.1159	Ohms/1000 m		0.0874 + J	0.1583 PU		
CBL-INT02	AP-MT-01C	AP-MT-02	2	6900	1350.0	METER	400	Copper	
	Duct Material: Non-Magnetic		Insulation Type:			PLC	Insulation Class:		MV
	+/- Impedance: 0.0645 + J		0.1117	Ohms/1000 m		0.0914 + J	0.1584 PU		
	Z0 Impedance: 0.1025 + J		0.2842	Ohms/1000 m		0.1453 + J	0.4029 PU		
CBL-MI01	AP-MT-01B	AP-MTI01	6	6900	750.0	METER	35	Copper	
	Duct Material: Non-Magnetic		Insulation Type:			PLC	Insulation Class:		MV
	+/- Impedance: 0.6684 + J		0.1559	Ohms/1000 m		0.1755 + J	0.0409 PU		
	Z0 Impedance: 1.06 + J		0.3964	Ohms/1000 m		0.2789 + J	0.1041 PU		
CBL-MS01	AP-MT-01B	AP-MTS01	4	6900	750.0	METER	25	Copper	
	Duct Material: Non-Magnetic		Insulation Type:			PLC	Insulation Class:		MV
	+/- Impedance: 0.9272 + J		0.1635	Ohms/1000 m		0.3652 + J	0.0644 PU		
	Z0 Impedance: 1.47 + J		0.4160	Ohms/1000 m		0.5804 + J	0.1638 PU		
CBL-TFEQ01	AP-MT-01B	AP-TFEQ01	6	6900	750.0	METER	25	Copper	
	Duct Material: Non-Magnetic		Insulation Type:			PLC	Insulation Class:		MV
	+/- Impedance: 0.9272 + J		0.1635	Ohms/1000 m		0.2434 + J	0.0429 PU		
	Z0 Impedance: 1.47 + J		0.4160	Ohms/1000 m		0.3869 + J	0.1092 PU		
CBL-TFEQ02	AP-MT-02	AP-TFEQ02	4	6900	500.0	METER	25	Copper	
	Duct Material: Non-Magnetic		Insulation Type:			PLC	Insulation Class:		MV
	+/- Impedance: 0.9272 + J		0.1635	Ohms/1000 m		0.2434 + J	0.0429 PU		
	Z0 Impedance: 1.47 + J		0.4160	Ohms/1000 m		0.3869 + J	0.1092 PU		

T R A N S M I S S I O N   L I N E

```

=====
TRANSMISSION FROM TO QTY VOLTS LENGTH
LINE NAME BUS NAME BUS NAME /PH L-L
=====
LT-AP SE-AT3 AP-SE-AT 1 138000.0 10.00 KM
+ Seq Impedance: 0.0100084 + J 0.0259819 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.00318249
0 Seq Impedance: 0.026507 + J 0.0913254 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.00205304
% SERIES COMP: 0 From Shunt (MVA): 0.0000 To Shunt (MVA): 0.0000

```



TRANSMISSION LINE NAME	FROM BUS NAME	TO BUS NAME	QTY /PH	VOLTS L-L	LENGTH
LT-SE-1/2	SE-AT2	SE-AT1	1	138000.0	100.00 KM
	+ Seq Impedance: 0.0842379 + J 0.262067 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.031099				
	0 Seq Impedance: 0.221382 + J 0.91764 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.0213673				
	% SERIES COMP: 0 From Shunt (MVA): 0.0000 To Shunt (MVA): 0.0000				
LT-SE-1/3.1	SE-AT1	SE-AT3	1	138000.0	40.00 KM
	+ Seq Impedance: 0.0338794 + J 0.105083 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.0124227				
	0 Seq Impedance: 0.0897291 + J 0.369334 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.0085189				
	% SERIES COMP: 0 From Shunt (MVA): 0.0000 To Shunt (MVA): 0.0000				
LT-SE-1/3.2	SE-AT1	SE-AT3	1	138000.0	40.00 KM
	+ Seq Impedance: 0.0338794 + J 0.105083 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.0124227				
	0 Seq Impedance: 0.0897291 + J 0.369334 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.0085189				
	% SERIES COMP: 0 From Shunt (MVA): 0.0000 To Shunt (MVA): 0.0000				
LT-SE-2/3.1	SE-AT2	SE-AT3	1	138000.0	90.00 KM
	+ Seq Impedance: 0.0758929 + J 0.23597 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.0279819				
	0 Seq Impedance: 0.199747 + J 0.82685 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.0192185				
	% SERIES COMP: 0 From Shunt (MVA): 0.0000 To Shunt (MVA): 0.0000				
LT-SE-2/3.2	SE-AT2	SE-AT3	1	138000.0	90.00 KM
	+ Seq Impedance: 0.0758929 + J 0.23597 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.0279819				
	0 Seq Impedance: 0.199747 + J 0.82685 Per Unit; Equi. Shunt B/2: 0.0192185				
	% SERIES COMP: 0 From Shunt (MVA): 0.0000 To Shunt (MVA): 0.0000				

EQUIVALENT PI DATA

PI NAME	FROM NAME	TO NAME	VOLTS
RL-MT-01	AP-MT-01A	AP-MT-01B	6900.0
	Pos. Seq. Z: 0.0168+J 0.3167 PU ; Zero Seq. Z: 0.0168+J 0.3167 PU		
	From Shunt Y: 0.00000+J 0.00000 PU ;		
RL-MT-02	AP-MT-01B	AP-MT-01C	6900.0
	Pos. Seq. Z: 0.0168+J 0.3167 PU ; Zero Seq. Z: 0.0168+J 0.3167 PU		
	From Shunt Y: 0.00000+J 0.00000 PU ;		

TRANSFORMER INPUT DATA

TRANSFORMER NAME	PRIMARY RECORD NO	RECORD NAME	VOLTS L-L	* SECONDARY RECORD NO	RECORD NAME	VOLTS L-L	FULL-LOAD KVA	NOMINAL KVA
TF-230KV	SE-230KV	YG	230000.	SE-AT1	YG	138000.	200000.	150000.
	Pos. Seq. Z%:		0.209 + J 9.00	(Zpu	0.001 + j 0.060 )			Shell Type
	Zero Seq. Z%:		0.209 + J 9.00	(	Pri - Sec: 0.001 + j 0.060 )			
	Taps Pri.	-5.00 %	Sec. 0.000 %	Phase Shift	(Pri. Leading Sec.):	0.000	Deg.	
TF-345KV	SE-345KV	YG	345000.	SE-AT2	YG	138000.	300000.	225000.
	Pos. Seq. Z%:		0.239 + J 11.25	(Zpu	0.001 + j 0.050 )			Shell Type
	Zero Seq. Z%:		0.239 + J 11.25	(	Pri - Sec: 0.001 + j 0.050 )			
	Taps Pri.	-7.50 %	Sec. 0.000 %	Phase Shift	(Pri. Leading Sec.):	0.000	Deg.	
TF-AP-T1	AP-SE-AT	D	138000.	AP-MT-01A	YG	6900.00	12500.0	10000.0
	Pos. Seq. Z%:		0.561 + J 8.98	(Zpu	0.056 + j 0.898 )			Core Type
	Zero Seq. Z%:		0.561 + J 8.98	(Sec	62.75 + j 0.898 Pri	Open)		
	Taps Pri.	-2.50 %	Sec. 0.000 %	Phase Shift	(Pri. Leading Sec.):	30.00	Deg.	
Secondary Neutral Z:			9.95 + J 0.000	Ohms				
TF-AP-T2	AP-SE-AT	D	138000.	AP-MT-01B	YG	6900.00	12500.0	10000.0
	Pos. Seq. Z%:		0.561 + J 8.98	(Zpu	0.056 + j 0.898 )			Core Type
	Zero Seq. Z%:		0.561 + J 8.98	(Sec	62.75 + j 0.898 Pri	Open)		
	Taps Pri.	-2.50 %	Sec. 0.000 %	Phase Shift	(Pri. Leading Sec.):	30.00	Deg.	
Secondary Neutral Z:			9.95 + J 0.000	Ohms				
TF-AP-T3	AP-SE-AT	D	138000.	AP-MT-01C	YG	6900.00	12500.0	10000.0
	Pos. Seq. Z%:		0.561 + J 8.98	(Zpu	0.056 + j 0.898 )			Core Type
	Zero Seq. Z%:		0.561 + J 8.98	(Sec	62.75 + j 0.898 Pri	Open)		
	Taps Pri.	-2.50 %	Sec. 0.000 %	Phase Shift	(Pri. Leading Sec.):	30.00	Deg.	
Secondary Neutral Z:			9.95 + J 0.000	Ohms				
TF-EQ-01	AP-TFEQ01	D	6900.00	AP-BT-01	YG	460.00	6000.00	5000.00
	Pos. Seq. Z%:		0.777 + J 5.44	(Zpu	0.155 + j 1.09 )			Core Type
	Zero Seq. Z%:		0.777 + J 5.44	(Sec	0.155 + j 1.09 Pri	Open)		
	Taps Pri.	-2.50 %	Sec. 0.000 %	Phase Shift	(Pri. Leading Sec.):	30.00	Deg.	
TF-EQ-02	AP-TFEQ02	D	6900.00	AP-BT-02	YG	460.00	4000.00	3000.00
	Pos. Seq. Z%:		0.777 + J 5.44	(Zpu	0.259 + j 1.81 )			Core Type
	Zero Seq. Z%:		0.777 + J 5.44	(Sec	0.259 + j 1.81 Pri	Open)		
	Taps Pri.	-2.50 %	Sec. 0.000 %	Phase Shift	(Pri. Leading Sec.):	30.00	Deg.	

GENERATION DATA

BUS NAME	GENERATION	VOLT	SIZE	InitKW	MaxKVAR	TYPE
AP-MT-02	GEN-AP-G1	1 pu	14375.0 kVA	10150.0	8625.00	PQ
AP-MT-02	GEN-AP-G2	1 pu	14375.0 kVA	10150.0	8625.00	PQ
SE-230KV	EQ-230KV	0.97 pu	900.00 MVA	0.00000	0.00000	SB
SE-345KV	EQ-345KV	0.97 pu	2200.00 MVA	0.00000	0.00000	SB

ENERGY AUDIT LOADS

BUS NAME	LOAD NAME	VOLTS	SIZE	LOADTYPE	PF	LAG/LEAD
AP-BT-01	LEQ-BT-01	460.00	720.00*1.00 KW	KVA	0.85	LAG
AP-BT-02	LEQ-BT-02	460.00	480.00*1.00 KW	KVA	0.85	LAG
SE-AT1	LOAD-AT1	138000.	20000.*1.00 KW	KVA	0.90	LAG
SE-AT2	LOAD-AT2	138000.	150000*1.00 KW	KVA	0.90	LAG
SE-AT3	LOAD-AT3	138000.	100000*1.00 KW	KVA	0.90	LAG

P A S S I V E F I L T E R D A T A

Filter Name	Bus Name	Bus Voltage	Rated Voltage	Connect	Filter Type	Capacitor KVAR	Tuned Order	Q	M	R (Ω)	L (H)	C (μF)
CP-AP-01	AP-BCP	6900	6900	WYE_G	Capacitor	2500.0				0.0000	0.0000	139.2870
CP-AP-02	AP-BCP	6900	6900	WYE_G	Capacitor	2500.0				0.0000	0.0000	139.2870
CP-AP-03	AP-BCP	6900	6900	WYE_G	Capacitor	2500.0				0.0000	0.0000	139.2870

MOTOR LOAD DATA

BUS NAME	LOAD NAME	VOLT	SIZE	#	TYPE	EFF	PF
AP-BT-01	MEQ-BT-01	460	4630.0*	1	KW	0.96	0.80 LAG
AP-BT-02	MEQ-BT-02	460	3100.0*	1	KW	0.96	0.80 LAG
AP-MTI01	MEQ-MTI-01	6900	7360.0*	1	KW	0.98	0.88 LAG
AP-MTI02	MEQ-MTI-02	6900	4905.0*	1	KW	0.98	0.88 LAG
AP-MTS01	MEQ-MTS-01	6900	2940.0*	1	KW	0.98	1.00 UNIT
AP-MTS02	MEQ-MTS-02	6900	1960.0*	1	KW	0.98	1.00 UNIT

GENERATION CONTRIBUTION DATA

BUS NAME	CONTRIBUTION NAME	VOLTAGE L-L	MVA	X"d	X/R
AP-MT-02	GEN-AP-G1	6900.00	14.38	0.2915	35.00
	Neutral impedance	40.00 + J	0.00000	Ohms	
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)	0.0579 + J			2.03 PU
	Neg Sequence Impedance (100 MVA Base)	0.0568 + J			1.99 PU
	Zero Sequence Impedance (100 MVA Base)	252.07 + J			0.5843 PU
AP-MT-02	GEN-AP-G2	6900.00	14.38	0.2915	35.00
	Neutral impedance	40.00 + J	0.00000	Ohms	
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)	0.0579 + J			2.03 PU
	Neg Sequence Impedance (100 MVA Base)	0.0568 + J			1.99 PU
	Zero Sequence Impedance (100 MVA Base)	252.07 + J			0.5843 PU
SE-230KV	EQ-230KV	230000.	900.0	0.2300	8.00
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)	0.0032 + J			0.0256 PU
	Neg Sequence Impedance (100 MVA Base)	0.0032 + J			0.0256 PU
	Zero Sequence Impedance (100 MVA Base)	0.0069 + J			0.0556 PU
SE-345KV	EQ-345KV	345000.	2200.	0.2500	15.00
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)	0.00076 + J			0.0114 PU
	Neg Sequence Impedance (100 MVA Base)	0.00076 + J			0.0114 PU
	Zero Sequence Impedance (100 MVA Base)	0.0015 + J			0.0227 PU

MOTOR CONTRIBUTION DATA

BUS NAME	CONTRIBUTION NAME	VOLTAGE L-L	BASE kVA	X"d	X/R	Motor Number
AP-BT-01	MEQ-BT-01	460	5931.88	0.1634	5.00	1.00
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.5509 + j		2.75 PU
AP-BT-02	MEQ-BT-02	460	3971.67	0.1634	5.00	1.00
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.8228 + j		4.11 PU
AP-MTI01	MEQ-MTI-01	6900	8496.66	0.1658	10.0	1.00
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.1951 + j		1.95 PU
AP-MTI02	MEQ-MTI-02	6900	5662.51	0.1658	10.0	1.00
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.2928 + j		2.93 PU
AP-MTS01	MEQ-MTS-01	6900	3000	0.1400	20.00	
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.2333 + j		4.67 PU
	Neg Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.2333 + j		4.67 PU
	Zero Sequence Impedance (100 MVA Base)			5000000 + j		5000000 PU
AP-MTS02	MEQ-MTS-02	6900	2000	0.1400	20.00	
	Neutral impedance			999999. + j 999999. Ohms		
	Pos Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.3500 + j		7.00 PU
	Neg Sequence Impedance (100 MVA Base)			0.3500 + j		7.00 PU
	Zero Sequence Impedance (100 MVA Base)			6301191 + j		6301198 PU

Component Name: EQ-230KV  
Bus Connected: SE-230KV

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_Eq230kV  
Machine Modal Data:

4.800000	Td0'	D-axis transient time constant
0.040000	Td0"	D-axis sub-transient time constant
1.500000	Tq0'	Q-axis transient time constant
0.070000	Tq0"	Q-axis sub-transient time constant
30.000000	H	Inertia constant
0.000000	D	Load damping coefficient
1.800000	Xd	D-axis armature reactance
1.750000	Xq	Q-axis armature reactance
0.300000	Xd'	D-axis transient reactance
0.470000	Xq'	Q-axis transient reactance
0.230000	X"	Machine sub-transient reactance
0.150000	Xl	Leakage reactance
0.100000	S10	Saturation factor at V=1.0 PU
0.400000	S12	Saturation factor at V=1.2 PU
0.003000	Ra	Armature resistance
0.230000	X"	Machine sub-transient reactance

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_Eq230kV  
Exciter Modal Data:

-----  
Filter Block

G: Constant 1.0  
T: he filter time constant  
Parameter T 0.040000  
Parameter G 1.000000

-----  
Regulator

G: Steady State Gain  
T: Voltage regulator Time Constant  
Min: Voltage regulator Minimum Voltage  
Max: Voltage regulator Maximum Voltage

Parameter T 0.100000  
Parameter G 40.000000  
Parameter minLimit -2.250000  
Parameter maxLimit 2.250000

-----  
Exciter  
T: Exciter Time Constant  
Parameter T 0.500000

-----  
Saturation:  
X1: First Sample Voltage  
Y1: Saturation Factor at X1  
X2: Second sample Voltage  
Y2: Saturation factor at X2  
Parameter X1 3.370000  
Parameter Y1 0.030000  
Parameter X2 4.500000  
Parameter Y2 0.500000

-----  
Damping  
T1: Rate Feedback Controller Constant  
T2: Rate Feedback Controller Time Constant  
Parameter T1 0.080000  
Parameter T2 1.000000

-----  
K: Exciter Constant Ke  
Parameter T1 1.000000

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_Eq230kV  
Turbine/Governor Modal Data:

-----  
K: 1.0/Permanent droop  
Parameter T1 20.000000

-----  
G: Constant 1.0  
T: Governor Time Constant  
max: Maximum Governor output  
min: Minimum Governor output  
Parameter T 0.500000  
Parameter G 1.000000  
Parameter minLimit 0.000000  
Parameter maxLimit 1.000000

-----  
T1: High-pressure turbine power constant (T2)  
T2: Reheater time constant (T3)  
Parameter T1 1.800000  
Parameter T2 6.000000

-----  
K: Turbine damping coefficient  
Parameter T1 0.000000

Component Name: EQ-345KV  
Bus Connected: SE-345KV

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_Eq345kV

Machine Modal Data:

4.000000	Td0'	D-axis transient time constant
0.040000	Td0''	D-axis sub-transient time constant
0.060000	Tq0''	Q-axis sub-transient time constant
50.000000	H	Inertia constant
0.000000	D	Load damping coefficient
1.250000	Xd	D-axis armature reactance
0.700000	Xq	Q-axis armature reactance
0.300000	Xd'	D-axis transient reactance
0.250000	X''	Machine sub-transient reactance
0.150000	Xl	Leakage reactance



0.110000 S10 Saturation factor at V=1.0 PU  
0.480000 S12 Saturation factor at V=1.2 PU  
0.002000 Ra Armature resistance  
0.250000 X" Machine sub-transient reactance

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_Eq345kV

Exciter Modal Data:

-----  
Filter Block

G: Constant 1.0  
T: he filter time constant  
Parameter T 0.040000  
Parameter G 1.000000

-----  
Regulator

G: Steady State Gain  
T: Voltage regulator Time Constant  
Min: Voltage regulator Minimum Voltage  
Max: Voltage regulator Maximum Voltage  
Parameter T 0.100000  
Parameter G 40.000000  
Parameter minLimit -2.250000  
Parameter maxLimit 2.250000

-----  
Exciter

T: Exciter Time Constant  
Parameter T 0.500000

-----  
Saturation:

X1: First Sample Voltage  
Y1: Saturation Factor at X1  
X2: Second sample Voltage  
Y2: Saturation factor at X2  
Parameter X1 3.370000

Parameter Y1 0.030000  
Parameter X2 4.500000  
Parameter Y2 0.500000

-----

Damping  
T1: Rate Feedback Controller Constant  
T2: Rate Feedback Controller Time Constant  
Parameter T1 0.080000  
Parameter T2 1.000000

-----

K: Exciter Constant Ke  
Parameter T1 1.000000

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_Eq345kV  
Turbine/Governor Modal Data:

-----

K: 1.0/Permanent droop  
Parameter T1 20.000000

-----

G: Constant 1.0  
T: Governor Time Constant  
max: Maximum Governor output  
min: Minimum Governor output  
Parameter T 0.500000  
Parameter G 1.000000  
Parameter minLimit 0.000000  
Parameter maxLimit 1.000000

-----

T1: High-pressure turbine power constant (T2)  
T2: Reheater time constant (T3)  
Parameter T1 1.800000  
Parameter T2 6.000000

-----  
K: Turbine damping coefficient  
Parameter T1 0.000000

Component Name: GEN-AP-G1  
Bus Connected: AP-MT-02

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_AP

Machine Modal Data:

2.060000	Td0'	D-axis transient time constant
0.026000	Td0"	D-axis sub-transient time constant
1.000000	Tq0'	Q-axis transient time constant
0.070000	Tq0"	Q-axis sub-transient time constant
3.200000	H	Inertia constant
0.000000	D	Load damping coefficient
1.947000	Xd	D-axis armature reactance
1.920000	Xq	Q-axis armature reactance
0.346000	Xd'	D-axis transient reactance
0.400000	Xq'	Q-axis transient reactance
0.291500	X"	Machine sub-transient reactance
0.150000	Xl	Leakage reactance
0.100000	S10	Saturation factor at V=1.0 PU
0.400000	S12	Saturation factor at V=1.2 PU
0.003200	Ra	Armature resistance
0.291500	X"	Machine sub-transient reactance

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_AP

Exciter Modal Data:

-----  
Regulator  
G: Steady State Gain  
T: Voltage regulator Time Constant  
Min: Voltage regulator Minimum Voltage  
Max: Voltage regulator Maximum Voltage

Parameter T 0.020000  
Parameter G 400.000000  
Parameter minLimit -7.300000  
Parameter maxLimit 7.300000

-----  
K:  
Exciter Constant Ke  
Parameter T1 1.000000

-----  
Saturation:  
X1: First Sample Voltage  
Y1: Saturation Factor at X1  
X2: Second sample Voltage  
Y2: Saturation factor at X2  
Parameter X1 4.200000  
Parameter Y1 0.500000  
Parameter X2 5.600000  
Parameter Y2 0.860000

-----  
Parameter T 0.800000  
Parameter minLimit 0.000000  
Parameter maxLimit 200.000000

Parameter T1 0.030000  
Parameter T2 1.000000

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_AP-Droop  
Turbine/Governor Modal Data:

-----  
K: 1.0/Permanent droop  
Parameter T1 20.000000

-----  
G: Constant 1.0  
T: Governor Time Constant  
max: Maximum Governor output  
min: Minimum Governor output  
Parameter T 0.200000  
Parameter G 1.000000  
Parameter minLimit 0.000000  
Parameter maxLimit 1.000000

-----  
K: Turbine damping coefficient  
Parameter T1 0.000000

-----  
G: Constant 1.0  
T: Steam Chest and Inlet Piping Time Constant  
Parameter T 0.300000  
Parameter G 1.000000

-----  
G: Constant 1.0  
T: Crossover Piping Time Constant  
Parameter T 0.500000  
Parameter G 1.000000

-----  
K: HP Section Portion of Power  
Parameter T1 0.400000

-----  
K: LP Section Portion of Power  
Parameter T1 0.600000

Component Name: GEN-AP-G2

Bus Connected: AP-MT-02

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_AP

Machine Modal Data:

2.060000	Td0'	D-axis transient time constant
0.026000	Td0''	D-axis sub-transient time constant
1.000000	Tq0'	Q-axis transient time constant
0.070000	Tq0''	Q-axis sub-transient time constant
3.200000	H	Inertia constant
0.000000	D	Load damping coefficient
1.947000	Xd	D-axis armature reactance
1.920000	Xq	Q-axis armature reactance
0.346000	Xd'	D-axis transient reactance
0.400000	Xq'	Q-axis transient reactance
0.291500	X''	Machine sub-transient reactance
0.150000	Xl	Leakage reactance
0.100000	S10	Saturation factor at V=1.0 PU
0.400000	S12	Saturation factor at V=1.2 PU
0.003200	Ra	Armature resistance
0.291500	X''	Machine sub-transient reactance

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_AP

Exciter Modal Data:

-----  
Regulator

G: Steady State Gain

T: Voltage regulator Time Constant

Min: Voltage regulator Minimum Voltage

Max: Voltage regulator Maximum Voltage

Parameter T 0.020000

Parameter G 400.000000

Parameter minLimit -7.300000

Parameter maxLimit 7.300000

-----  
K:

Exciter Constant Ke

Parameter T1 1.000000

-----  
Saturation:  
X1: First Sample Voltage  
Y1: Saturation Factor at X1  
X2: Second sample Voltage  
Y2: Saturation factor at X2  
Parameter X1 4.200000  
Parameter Y1 0.500000  
Parameter X2 5.600000  
Parameter Y2 0.860000

-----  
Parameter T 0.800000  
Parameter minLimit 0.000000  
Parameter maxLimit 200.000000

-----  
Parameter T1 0.030000  
Parameter T2 1.000000

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_AP-Droop  
Turbine/Governor Modal Data:

-----  
K: 1.0/Permanent droop  
Parameter T1 20.000000

-----  
G: Constant 1.0  
T: Governor Time Constant  
max: Maximum Governor output  
min: Minimum Governor output  
Parameter T 0.200000  
Parameter G 1.000000  
Parameter minLimit 0.000000

Parameter maxLimit 1.000000

-----  
K: Turbine damping coefficient  
Parameter T1 0.000000

-----  
G: Constant 1.0  
T: Stean Chest and Inlet Piping Time Constant  
Parameter T 0.300000  
Parameter G 1.000000

-----  
G: Constant 1.0  
T: Crossover Piping Time Constant  
Parameter T 0.500000  
Parameter G 1.000000

-----  
K: HP Section Portion of Power  
Parameter T1 0.400000

-----  
K: LP Section Portion of Power  
Parameter T1 0.600000

Component Name: MEQ-MTS-01  
Bus Connected: AP-MTS01

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_Synchronous Motor

Machine Modal Data:

2.000000	Td0'	D-axis transient time constant
0.200000	Td0"	D-axis sub-transient time constant
0.040000	Tq0"	Q-axis sub-transient time constant
4.000000	H	Inertia constant



```
0.000000 D Load damping coefficient
1.500000 Xd D-axis armature reactance
0.900000 Xq Q-axis armature reactance
0.230000 Xd' D-axis transient reactance
0.140000 X" Machine sub-transient reactance
0.090000 Xl Leakage reactance
0.110000 S10 Saturation factor at V=1.0 PU
0.480000 S12 Saturation factor at V=1.2 PU
0.002000 Ra Armature resistance
0.140000 X" Machine sub-transient reactance
```

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_MotorSincrono

Exciter Modal Data:

```
-----
Regulator
G: Steady State Gain
T: Voltage regulator Time Constant
Min: Voltage regulator Minimum Voltage
Max: Voltage regulator Maximum Voltage
Parameter T 0.015000
Parameter G 200.000000
Parameter minLimit -4.530000
Parameter maxLimit 5.640000
```

```
-----
Tb and TC
Parameter T1 1.000000
Parameter T2 1.000000
```

```
-----
VIMAX and VImin
Parameter Min -10.000000
Parameter Max 10.000000
```

Component Name: MEQ-MTS-02  
Bus Connected: AP-MTS02

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_Synchronous Motor  
Machine Modal Data:

2.000000	Td0'	D-axis transient time constant
0.200000	Td0"	D-axis sub-transient time constant
0.040000	Tq0"	Q-axis sub-transient time constant
4.000000	H	Inertia constant
0.000000	D	Load damping coefficient
1.500000	Xd	D-axis armature reactance
0.900000	Xq	Q-axis armature reactance
0.230000	Xd'	D-axis transient reactance
0.140000	X"	Machine sub-transient reactance
0.090000	Xl	Leakage reactance
0.110000	S10	Saturation factor at V=1.0 PU
0.480000	S12	Saturation factor at V=1.2 PU
0.002000	Ra	Armature resistance
0.140000	X"	Machine sub-transient reactance

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_MotorSincrono  
Exciter Modal Data:

-----  
Regulator  
G: Steady State Gain  
T: Voltage regulator Time Constant  
Min: Voltage regulator Minimum Voltage  
Max: Voltage regulator Maximum Voltage  
Parameter T 0.015000  
Parameter G 200.000000  
Parameter minLimit -4.530000  
Parameter maxLimit 5.640000  
-----

Tb and TC  
Parameter T1 1.000000  
Parameter T2 1.000000

```

-----
VIMAX and VImIn
Parameter Min -10.000000
Parameter Max 10.000000

```

```

Component Name: MEQ-MTI-01
Bus Connected: AP-MTI01

```

```

Library Model Name: !Coppe_Tese_CasoAT_MEQ-AT

```

```

Machine Modal Data:

```

```

1.170100 T' Transient time constant
0.000000
1.500000 H Inertia constant
3.867000 X Steady-state armature reactance
0.229700 X' Transient motor reactance
0.000000
0.067000 Xl Leakage reactance
1.000000 E1 First sample voltage
0.030000 Se(E1) Saturation factor at E1
1.200000 E2 Second sample voltage
0.120000 Se(E2) Saturation factor at E2
2.000000 D Load damping factor
-0.999990 Tnominal pu on motor Torque Base
0.013000 Ra Armature resistance
0.229700 X' Transient motor reactance

```

MOTOR NAME	MODEL DESCRIPTION	KVA	KV	SYNC. RPM
MEQ-MTI-01	QTY= 1 FLUX MDL	8496.7	6.90	1800
AP-MTI01	OFFLINE Wk**2(Kg-M2):	737.000	2H:	3.082

MOTOR SWITCHING DATA=====
  
PUT ON LINE AT TIME:
  
CONTROLLER TYPE: FULL VOLTAGE CONTROL FUNCTION: NONE
  
LOAD DATA=====
  
LOAD MODEL: POLYNOMIAL MODEL
  
LOAD BREAK-A-WAY TORQUE (NM ): 1
  
LOAD(NM ) = 1 + 0.0000E+000 \* ( RPM \*\* 1.00)

```

+ 0.0000E+000 * ( RPM ** 2.00)
+ 9.7836E-003 * ( RPM ** 2.00)

```

Component Name: MEQ-MTI-02  
 Bus Connected: AP-MTI02

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_MEQ-AT  
 Machine Modal Data:

```

1.170100 T' Transient time constant
0.000000
1.500000 H Inertia constant
3.867000 X Steady-state armature reactance
0.229700 X' Transient motor reactance
0.000000
0.067000 Xl Leakage reactance
1.000000 E1 First sample voltage
0.030000 Se(E1) Saturation factor at E1
1.200000 E2 Second sample voltage
0.120000 Se(E2) Saturation factor at E2
2.000000 D Load damping factor
-0.999990 Tnominal pu on motor Torque Base
0.013000 Ra Armature resistance
0.229700 X' Transient motor reactance

```

MOTOR NAME	MODEL DESCRIPTION	KVA	KV	SYNC. RPM
BUS NAME	INITIAL STATUS			
MEQ-MTI-02	QTY= 1 FLUX MDL	5662.5	6.90	1800
AP-MTI02	OFFLINE Wk**2(Kg-M2):		491.000 2H:	3.081

MOTOR SWITCHING DATA=====

PUT ON LINE AT TIME:

CONTROLLER TYPE: FULL VOLTAGE CONTROL FUNCTION: NONE

LOAD DATA=====

LOAD MODEL: POLYNOMIAL MODEL

LOAD BREAK-A-WAY TORQUE (NM ): 1

LOAD(NM ) = 1 + 0.0000E+000 \* ( RPM \*\* 1.00)  
 + 0.0000E+000 \* ( RPM \*\* 2.00)  
 + 6.5120E-003 \* ( RPM \*\* 2.00)

Component Name: MEQ-BT-01  
 Bus Connected: AP-BT-01

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_MEQ-BT  
 Machine Modal Data:

0.498100 T' Transient time constant  
 0.000000  
 0.700000 H Inertia constant  
 3.300000 X Steady-state armature reactance  
 0.270400 X' Transient motor reactance  
 0.000000  
 0.100000 Xl Leakage reactance  
 1.000000 E1 First sample voltage  
 0.030000 Se(E1) Saturation factor at E1  
 1.200000 E2 Second sample voltage  
 0.120000 Se(E2) Saturation factor at E2  
 2.000000 D Load damping factor  
 -0.999990 Tnominal pu on motor Torque Base  
 0.031000 Ra Armature resistance  
 0.270400 X' Transient motor reactance

MOTOR NAME	MODEL DESCRIPTION	KVA	KV	SYNC. RPM
MEQ-BT-01	QTY= 1 FLUX MDL	5931.9	0.46	1800
AP-BT-01	ON LINE Wk**2(Kg-M2):	240.000	2H:	1.438

MOTOR SWITCHING DATA=====

PUT ON LINE AT TIME:

CONTROLLER TYPE: FULL VOLTAGE CONTROL FUNCTION: NONE

LOAD DATA=====

LOAD MODEL: POLYNOMIAL MODEL

LOAD BREAK-A-WAY TORQUE (NM ): 1

LOAD(NM ) = 1 + 0.0000E+000 \* ( RPM \*\* 1.00)  
 + 0.0000E+000 \* ( RPM \*\* 2.00)  
 + 4.6910E-003 \* ( RPM \*\* 2.00)

Component Name: MEQ-BT-02

Bus Connected: AP-BT-02

Library Model Name: !Coppe\_Tese\_CasoAT\_MEQ-BT

Machine Modal Data:

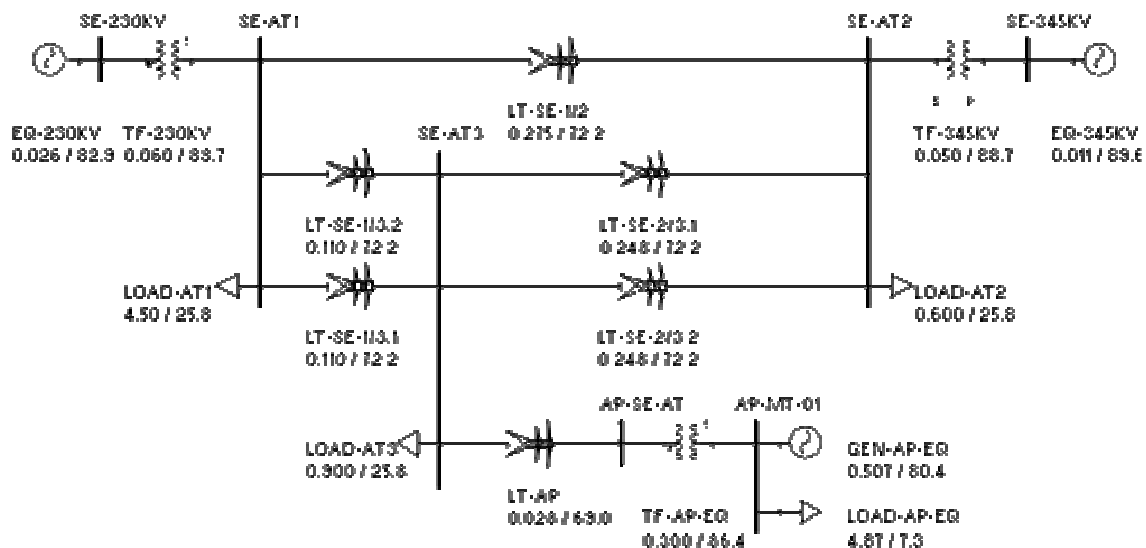
0.498100 T' Transient time constant  
0.000000  
0.700000 H Inertia constant  
3.300000 X Steady-state armature reactance  
0.270400 X' Transient motor reactance  
0.000000  
0.100000 Xl Leakage reactance  
1.000000 E1 First sample voltage  
0.030000 Se(E1) Saturation factor at E1  
1.200000 E2 Second sample voltage  
0.120000 Se(E2) Saturation factor at E2  
2.000000 D Load damping factor  
-0.999990 Tnominal pu on motor Torque Base  
0.031000 Ra Armature resistance  
0.270400 X' Transient motor reactance

MOTOR NAME	MODEL DESCRIPTION	KVA	KV	SYNC. RPM
	BUS NAME INITIAL STATUS			
MEQ-BT-02	QTY= 1 FLUX MDL	3971.7	0.46	1800
AP-BT-02	ON LINE Wk**2(Kg-M2):	161.000	2H:	1.440
MOTOR SWITCHING DATA=====				
PUT ON LINE AT TIME:				
CONTROLLER TYPE: FULL VOLTAGE CONTROL FUNCTION: NONE				
LOAD DATA=====				
LOAD MODEL: POLYNOMIAL MODEL				
LOAD BREAK-A-WAY TORQUE (NM ): 1				
LOAD(NM ) = 1 + 0.0000E+000 * ( RPM ** 1.00)				
+ 0.0000E+000 * ( RPM ** 2.00)				
+ 3.1324E-003 * ( RPM ** 2.00)				

## APÊNDICE E

### INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DO AUTOPRODUTOR NAS PROTEÇÕES DE DISTÂNCIA DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA EXTERNO

Para avaliação do problema da influência da geração do autoprodutor no desempenho das proteções de distâncias das linhas de transmissão do sistema externo será adotado um sistema simplificado baseado naquele estudado no Capítulo 5, substituindo o sistema elétrico industrial por um sistema simplificado equivalente, conforme indicado na Figura 85.



Nota: Indicados para cada componente os valores das impedâncias de sequência positiva (módulo em p.u. na base de 100MVA / ângulo)

Figura 85 – Sistema elétrico simplificado para avaliação da influência do autoprodutor no desempenho das proteções de distância das linhas de transmissão

A presença de uma fonte intermediária no trecho coberto por um relé de distância faz com que o valor da impedância medido pelo relé seja distorcido do valor real, já que neste caso o relé medirá apenas uma parte da corrente do defeito. Este efeito é chamado *infeed* e está caracterizado na Figura 86, onde está demonstrado que o valor medido pelo relé será diferente do real, sendo tanto maior quanto maior a contribuição da fonte intermediária para o curto-circuito. Este tipo de erro, que provoca o sublance do relé de distância, é mais crítico no caso da fonte estar ligada no trecho coberto pela primeira zona, onde o relé precisa atuar mais rapidamente, geralmente instantaneamente.

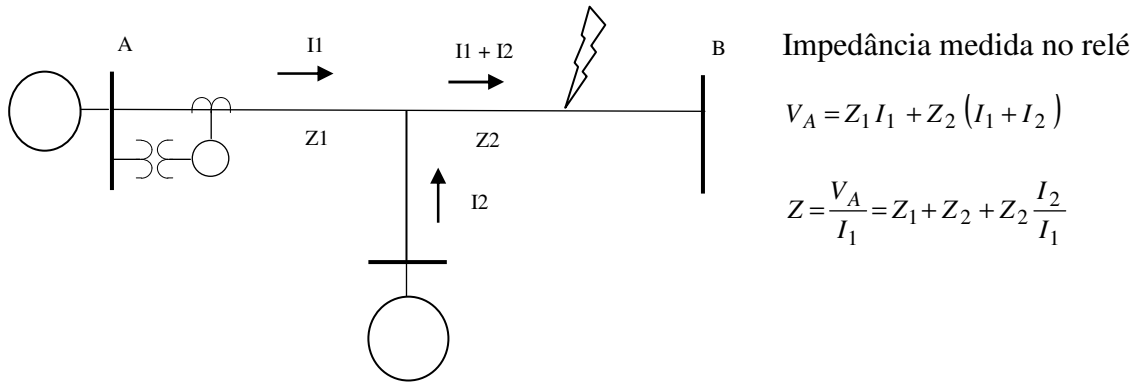


Figura 86 – Efeito da fonte intermediária – *infeed* – no desempenho do relé de distância

No sistema indicado na Figura 85 o autoprodutor não está conectado no meio da linha, mas sim na barra da subestação. Neste caso, para os relés de distância na SE-AT1, por exemplo, o problema vai acontecer para faltas em uma das linhas entre a SE-AT3 e a SE-AT2.

Para verificar este efeito será simulada uma falta trifásica na linha LT-SE-2/3.1, de interligação entre as subestações SE-AT3 e SE-AT2, num ponto localizado a 20% da distância da SE-AT3, considerado o limiar de alcance da 2ª zona do relé de distância instalado na SE-AT1. Os resultados da simulação estão mostrados na Figura 87.

```

BUS-LTSE2/3. ==== INI. SYM. RMS SYSTEM BUS VOLTAGES ( PU / DEG ) =====
                ALL BUSES REPORTED      AT TIME =      0.5 CYCLES
                ---PHASE A---          ---PHASE B---      ---PHASE C---
.....
SE-AT1          138000.0  0.6027 /  -5.  0.6027 /-125.  0.6027 / 115.
.....

BUS-LTSE2/3  ===== INI.      RMS      SYSTEM BRANCH FLOWS ( AMPS ) =====
                ALL BRANCHES REPORTED  AT TIME =      0.5 CYCLES
                BRANCH NAME      VBASE LL  -PHASE A-      -PHASE B-      -PHASE C-
.....
AP-SE-AT      SE-AT3      LT-AP          138000.    354.9/ -37.    354.9/-157.    354.9/  83.
SE-AT2        SE-AT1      LT-SE-1/2     138000.    138.6/ -89.    138.6/ 151.    138.6/  31.
SE-AT3        SE-AT1      LT-SE-1/3.2   138000.    996.1/ 100.    996.1/ -20.    996.1/-140.
SE-AT3        SE-AT1      LT-SE-1/3.1   138000.    996.1/ 100.    996.1/ -20.    996.1/-140.
SE-AT2        SE-AT3      LT-SE-2/3.2   138000.    596.0/ -82.    596.0/ 158.    596.0/  38.
BUS-LTSE2/3   SE-AT3      LT-SE-2/3.1a  138000.    2864.6/ 105.   2864.6/ -15.   2864.6/-135.
SE-AT2        BUS-LTSE2/3  LT-SE-2/3.1b  138000.    1456.9/ -79.   1456.9/ 161.   1456.9/  41.
.....

```

Figura 87 – Resultados da simulação de curto-circuito para falta a 20% na linha entre as subestações SE-AT3 e SE-AT2

Para uma falta num ponto localizado na linha LT-SE-2/3.1 a 20% da distância da SE-AT3, usando as impedâncias indicadas na Figura 85, pode ser determinado o valor real da impedância vista pelo relé localizado na SE-AT1, e usando os resultados da simulação de curto-circuito mostrada na Figura 87, pode ser determinado o valor da impedância medida pelo relé.

$$Z_{real} = 0,110 + (0,2 \times 0,248) = 0,16p.u.$$

$$Z_{medido} = 0,6027 / (996,1 / 418,4) = 0,25p.u \text{ (418,4 é a corrente base em 100MVA)}$$



Constata-se que o valor medido pelo relé é superior ao valor real, o que faria o relé deixar de atuar por subalcançe. Este efeito, porém, não se deve apenas ao autoprodutor, mas também às contribuições vindas das linhas paralelas. Para eliminar todos estes efeitos o sistema será novamente simulado, desta vez com as linhas LT-AP, LT-SE-1/3.2 e LT-SE-2/3.2 desligadas. Os resultados da simulação estão mostrados na Figura 88.

```

BUS-LTSE2/3  ==== INI. SYM. RMS SYSTEM BUS VOLTAGES ( PU / DEG ) =====
                ALL BUSES REPORTED      AT TIME =      0.5 CYCLES
                ---PHASE A---          ---PHASE B---          ---PHASE C---
.....
SE-AT1        138000.0  0.6562 / -5.  0.6562 /-125.  0.6562 / 115.
.....

BUS-LTSE2/3  ===== INI.      RMS      SYSTEM BRANCH FLOWS ( AMPS ) =====
                ALL BRANCHES REPORTED    AT TIME =      0.5 CYCLES
                BRANCH NAME      VBASE LL  -PHASE A-    -PHASE B-    -PHASE C-
.....
SE-AT2        SE-AT1        LT-SE-1/2    138000.    146.6/ -84.    146.6/ 156.    146.6/ 36.
SE-AT3        SE-AT1        LT-SE-1/3.1 138000.    1714.5/ 103.    1714.5/ -17.    1714.5/-137.
BUS-LTSE2/3   SE-AT3        LT-SE-2/3.1a 138000.    1716.0/ 103.    1716.0/ -17.    1716.0/-137.
SE-AT2        BUS-LTSE2/3  LT-SE-2/3.1b 138000.    1583.3/ -78.    1583.3/ 162.    1583.3/ 42.
.....

```

Figura 88 – Resultados da simulação de curto-circuito para falta a 20% na linha entre as subestações SE-AT3 e SE-AT2 com as linhas paralelas e o autoprodutor desligados

Recalculando o valor medido pelo relé obtém-se:

$$Z_{medido} = 0,6562 / (1714,5 / 418,4) = 0,16p.u \text{ (418,4 é a corrente base em 100MVA)}$$

Constata-se que o valor medido pelo relé agora é igual ao valor real, confirmando que o erro era devido à influência do *infeed* provocado pelas linhas paralelas e pela geração do autoprodutor.

Fazendo nova simulação, religando o autoprodutor e deixando as linhas LT-SE-1/3.2 e LT-SE-2/3.2 desligadas, são obtidos os resultados mostrados na Figura 89.

```

BUS-LTSE2/3.  ==== INI. SYM. RMS SYSTEM BUS VOLTAGES ( PU / DEG ) =====
                ALL BUSES REPORTED      AT TIME =      0.5 CYCLES
                ---PHASE A---          ---PHASE B---          ---PHASE C---
.....
SE-AT1        138000.0  0.6758 / -4.  0.6758 /-124.  0.6758 / 116.
.....

BUS-LTSE2/3  ===== INI.      RMS      SYSTEM BRANCH FLOWS ( AMPS ) =====
                ALL BRANCHES REPORTED    AT TIME =      0.5 CYCLES
                BRANCH NAME      VBASE LL  -PHASE A-    -PHASE B-    -PHASE C-
.....
AP-SE-AT      SE-AT3        LT-AP        138000.    389.2/ -43.    389.2/-163.    389.2/ 77.
SE-AT2        SE-AT1        LT-SE-1/2    138000.    136.8/ -90.    136.8/ 150.    136.8/ 30.
SE-AT3        SE-AT1        LT-SE-1/3.1 138000.    1665.5/ 101.    1665.5/ -19.    1665.5/-139.
BUS-LTSE2/3   SE-AT3        LT-SE-2/3.1a 138000.    1997.6/ 108.    1997.6/ -12.    1997.6/-132.
SE-AT2        BUS-LTSE2/3  LT-SE-2/3.1b 138000.    1607.6/ -78.    1607.6/ 162.    1607.6/ 42.
.....

```

Figura 89 – Resultados da simulação de curto-circuito para falta a 20% na linha entre as subestações SE-AT3 e SE-AT2 com as linhas paralelas desligadas

Recalculando o valor medido pelo relé obtém-se:

$$Z_{medido} = 0,6758 / (1665,5 / 418,4) = 0,17p.u \text{ (418,4 é a corrente base em 100MVA)}$$

Constata-se que o valor medido pelo relé agora é ligeiramente diferente do valor real, confirmando que o erro devido à influência do *infeed* provocado autoprodutor é bastante reduzido, o que decorre do fato de sua potência ser relativamente pequena em relação ao sistema externo no caso estudado.

No caso do sistema estudado, conforme anteriormente mostrado, o problema do *infeed* provocado pelo autoprodutor afetava apenas a medição de segunda zona do relé de distância, o que é um problema menos crítico, referido à proteção de *back-up*, já que há proteções de primeira zona da linha em falta que devem desligá-la. O problema mais crítico seria se o autoprodutor estivesse instalado numa derivação na linha, no trecho coberto pela primeira zona dos relés de distância da linha.

Excluída esta hipótese, o problema do *infeed* ainda seria mais significativo em circuitos radiais, onde apenas o autoprodutor contribuiu para curto-circuitos a partir do terminal remoto da linha.