UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IMPACTO DO PRODUTOR INDEPENDENTE DE ENERGIA ELÉTRICA EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO - UMA ANÁLISE ATRAVÉS DO ATP-EMTP

FABRÍCIO AUGUSTO MATHEUS MOURA

Uberlândia, 02 de setembro de 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IMPACTO DO PRODUTOR INDEPENDENTE DE ENERGIA ELÉTRICA EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO - UMA ANÁLISE ATRAVÉS DO ATP-EMTP

Dissertação apresentada por Fabrício Augusto Matheus Moura à Universidade Federal de Uberlândia para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

Prof. José Wilson Resende, Ph.D. - UFU (Orientador)
Prof. José Roberto Camacho, Ph.D. - UFU
Prof. Kleiber David Rodrigues, Dr. - UFU
Prof. Selênio Rocha Silva, Dr. - UFMG

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M929i Moura, Fabrício Augusto Matheus, 1983-
Impacto do produtor independente de energia elétrica em rede de distribuição – uma análise através do ATP-EMTP / Fabrício Augusto Matheus Moura. - 2008.
176 f. : il.

Orientador: José Wilson Resende.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Sistemas de energia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Produção - Teses. I. Resende, José Wilson. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.311

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

IMPACTO DO PRODUTOR INDEPENDENTE DE ENERGIA ELÉTRICA EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO - UMA ANÁLISE ATRAVÉS DO ATP-EMTP

Dissertação apresentada por Fabrício Augusto Matheus Moura à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Wilson Resende, Ph.D. Orientador	Prof. Darizon Alves de Andrade, Ph.D. Coordenador do Curso de Pós-Graduação

A Jesus Cristo, meu Senhor, aos meus pais, Antônio Carlos de Moura e Eliana Matheus Moura, meus grandes mestres na vida e a minha irmã Líbina Matheus Moura. Por estes terem sido fontes de força e inspiração essenciais para o cumprimento de mais esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pela realização de mais um sonho.

Ao professor José Wilson Resende, que prontamente me acolheu e acreditou neste trabalho.

A toda a minha família e amigos por sempre acreditarem no meu potencial.

Ao colega Willians Ribeiro Mendes, pelo apoio e incentivo.

Aos colegas Elise Saraiva, Rogério Pinto do Nascimento, Fernanda Hein da Costa, Marcus Vinícius Borges Mendonça e Paulo Henrique Barbosa Naves, pelo apoio e companheirismo.

Aos professores Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, José Roberto Camacho e Geraldo Caixeta Guimarães, da Universidade Federal de Uberlândia – UFU – Faculdade de Engenharia Elétrica, sem os quais esse trabalho não teria se desenvolvido.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFU, em especial à Sra. Marli Junqueira Buzzi, secretária da pós-graduação, pelo auxílio e esclarecimento.

Aos demais professores e colegas da pós-graduação, pelo apoio e amizade.

A WEG pelo fornecimento de dados indispensáveis para as simulações.

A CAPES, pelo apoio financeiro durante todo o período do mestrado.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma análise de desempenho de um gerador síncrono, com seus respectivos reguladores de tensão e velocidade, em paralelo com um sistema de distribuição, para estudos de geração distribuída. Ressalta-se que este gerador é acionado por uma turbina a vapor e seus reguladores foram modelados no "ATP-Alternative Transient Program", utilizando TACS subroutines. Os impactos desses geradores em redes de distribuição são determinados e comparados utilizando-se de um modelo de uma rede de distribuição, modelada também no ATP. As questões técnicas aqui estudadas se referem ao perfil de tensão em regime permanente, estabilidade da tensão, afundamento de tensão devido a falta trifásica equilibrada, rejeição de carga, saída de linha de distribuição e as respostas dos reguladores das máquinas perante as contingências aplicadas. Os resultados mostram que, em determinados casos, a geração independente pode ameaçar a integridade do sistema e em outros é benéfica para o sistema de distribuição ao qual ela está conectada.

Palavras-Chave: Geração distribuída, gerador síncrono, perfil de tensão, regulador de tensão, regulador de velocidade.

ABSTRACT

This work presents a performance analysis of an Independent Producer synchronous generator, with its voltage and speed governors, running connected in parallel with a power authority distribution system. This synchronous generator is driven by a steam turbine and the whole system has been modeled in ATP-EMTP (Alternative Transients Program) through the use of TACS routines. The technical questions studied are the steady-state voltage profile, voltage stability, voltage sags and load rejection, partial loss of the distribution line in the interconnection as well as excitation and speed control performance to contingencies in the interconnected system. Results show that, in some cases, the independent generation can be a menace to the physical integrity of the system and in other cases can be very beneficial to the distribution system in the point of connection.

Key Words*: Distributed generation, synchronous generator, voltage profile, voltage governor, speed governor.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo simplificado da máquina síncrona **21**

Figura 2.2 – Carta de capabilidade de uma máquina síncrona **24**

Figura 2.3 – Diagrama unifilar de sistema elétrico radial **27**

Figura 2.4 – Critério de igualdade de áreas **27**

Figura 2.5 – Circuito equivalente da máquina síncrona em paralelo com um barramento infinito **28**

Figura 2.6 – Diagrama fasorial da máquina síncrona da figura 2.4 em sua condição inicial **29**

Figura 2.7 – Diagrama fasorial para um aumento na tensão de excitação, mantendo-se (P) e (V) constantes **30**

Figura 2.8 – Esquema básico de um sistema de controle de excitação (*AVR*) **32**

Figura 2.9 – Arranjo típico de um sistema de controle da excitação (*AVR*) **33**

Figura 2.10 – Modelo geral de um regulador de tensão **33**

Figura 2.11 – Modelo simples de regulador de tensão **34**

Figura 2.12 – Modelo de regulador de tensão mais avançado **34**

Figura 2.13 – Modelo de regulador de tensão tipo I do IEEE **35**

Figura 2.14 – Modelo de regulador de tensão do tipo II do IEEE **37**

Figura 2.15 – Atraso de tempo na transferência de sinais da *TACS* **43**

Figura 3.1 – Exemplo ilustrativo de sistema de regulação de velocidade de uma turbina a vapor **45**

Figura 3.2 – Arranjo típico de uma turbina com reaquecimento **46**

Figura 3.3 – Principais itens de uma usina hidroelétrica **47**

Figura 3.4 – Arranjo típico de uma turbina a gás **48**

Figura 3.5 – Arranjo típico de um motor diesel **49**

Figura 3.6 – Comportamento típico de queda de velocidade com o aumento da potência gerada por um gerador operando em um sistema elétrico **50**

Figura 3.7 – Diagrama esquemático de 2 máquinas operando em paralelo com característica tipo “inclinação” distintas suprindo uma carga comum **51**

Figura 3.8 – Característica isócrona de um gerador

Figura 3.9 – Diagrama representativo para dois geradores operando em paralelo, uma com característica de tipo "inclinação" e outra isócrona **51**

Figura 3.10 – Arranjo básico de um regulador de velocidade **53**

Figura 3.11 – Função de transferência genérica **55**

Figura 3.12 – Arranjo de função de transferência comumente empregada **55**

Figura 3.13 – Modelo de um regulador de velocidade de turbina térmica/hidráulica **56**

Figura 4.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico simulado **63**

Figura 4.2 – Tensão na barra 3 em regime permanente **68**

Figura 4.3 – Tensão na barra 3 após a rejeição da carga 2 **69**

Figura 4.4 – Tensão na barra 3 após a aplicação de curto-circuito trifásico **70**

Figura 4.5 – Tensão na barra 3 mediante a abertura da linha **71**

Figura 4.6 – Tensão na barra 3 em regime permanente **74**

Figura 4.7 – Tensão na barra da geração independente **75**

Figura 4.8 – Resposta do regulador de tensão em regime permanente **76**

Figura 4.9 – Velocidade da máquina síncrona da geração independente **76**

Figura 4.10 – Tensão na barra 3 após a rejeição da carga 2. (a): sem geração independente; (b) U_{fmin} = 0,8pu ; (c) U_{fmin} = 0,9pu **78**

Figura 4.11 – Tensão na barra da geração independente mediante a rejeição da carga 2. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b) U_{fmin} = 0,9pu **80**

Figura 4.12 – Resposta do regulador de tensão mediante a rejeição de carga da concessionária. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b): U_{fmin} = 0,9pu **81**

Figura 4.13 – Velocidade da máquina síncrona da geração independente, mediante uma rejeição de carga na concessionária. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b): U_{fmin} = 0,9pu **82**

Figura 4.14 – Resposta do regulador de velocidade mediante rejeição da carga 2. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b): U_{fmin} = 0,9pu **84**

Figura 4.15 – Tensão na barra 3 mediante a perca de carga da geração independente. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b): U_{fmin} = 0,9pu **86**

Figura 4.16 – Tensão na barra da geração independente mediante a rejeição de sua carga. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b): U_{fmin} = 0,9pu **88**

Figura 4.17 – Resposta do regulador de tensão mediante a rejeição de carga da geração independente. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b): U_{fmin} = 0,9pu **89**

Figura 4.18 – Velocidade da máquina síncrona mediante uma rejeição de carga na geração independente. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b): U_{fmin} = 0,9pu **90**

Figura 4.19 – Resposta do regulador de velocidade mediante rejeição da carga interna da geração independente. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b): U_{fmin} = 0,9pu **91**

Figura 4.20 – Tensão na barra 3 após a aplicação de curto-circuito trifásico na mesma. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b): U_{fmin} = 0,9pu **93**

Figura 4.21 – Tensão na barra 4 após a aplicação de curto-circuito trifásico na barra3. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b): U_{fmin} = 0,9pu **94**

Figura 4.22 – Resposta do regulador de tensão mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico no PAC. (a): U_{fmin} = 0,8pu ; (c) U_{fmin} = 0,9pu **95**

Figura 4.23 – Velocidade da máquina síncrona da geração independente mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico no PAC. (a): U_{fmin} = 0,8pu; (b) U_{fmin} = 0,9pu **96**

Figura 4.24 – Tensão na barra 3 após a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu **99**

Figura 4.25 – Tensão na barra 4 após a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu **99**

Figura 4.26 – Resposta do regulador de tensão, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu **100**

Figura 4.27 – Velocidade da máquina síncrona da geração independente, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu **101**

Figura 4.28 – Tensão na barra 3 mediante a abertura da linha. (a): Sem geração independente; (b): U_{fmin} = 0,8 pu, com geração independente; (c): U_{fmin} = 0,9 pu, com geração independente **103**

Figura 4.29 – Tensão na barra 4 mediante a abertura da linha. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu **105**

Figura 4.30 – Resposta do regulador de tensão, mediante a abertura da LD 2. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu **105**

Figura 4.31 – Velocidade da máquina síncrona da geração independente, mediante a abertura da linha LD 2. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu **106**

Figura 4.32 - Arranjo típico de um compensador estático tipo reator a núcleo saturado **108**

Figura 4.33 - O CERNS como fonte e consumo de reativo **110**

Figura 4.34 – Tensão na barra 3 mediante a perda de carga da geração independente. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado **111**

Figura 4.35 – Tensão na barra da geração independente mediante a rejeição de sua carga. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado **112**

Figura 4.36 – Resposta do regulador de tensão mediante a rejeição de carga da geração independente. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado **113**

Figura 4.37 – Velocidade da máquina síncrona, mediante uma rejeição de carga no produtor independente. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado **114**

Figura 4.38 – Tensão na barra 3 após a aplicação de curto-circuito trifásico na mesma. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado **116**

Figura 4.39 – Tensão na barra 4 após a aplicação de curto-circuito trifásico na barra 3. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado **116**

Figura 4.40 – Resposta do regulador de tensão, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico no PAC. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado. **117**

Figura 4.41 – Velocidade da máquina síncrona da geração independente, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico no PAC. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado **118**

Figura 4.42 – Tensão na barra 3 após a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado. **120**

Figura 4.43 – Tensão na barra 4 após a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado. **121**

Figura 4.44 – Resposta do regulador de tensão, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado. **122**

Figura 4.45 – Velocidade da máquina síncrona da geração independente, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado. **123**

Figura A.1 – Limite de aquecimento da armadura (corrente de armadura) **140**

Figura A.2 – Limite de aquecimento do enrolamento de campo **142**

Figura A.3 – Limite de potência mecânica da turbina **143**

Figura A.4 – Limite de estabilidade devido ao máximo valor do ângulo de potência (δ_{max}) **144**

Figura A.5 – Efeito da margem de estabilidade em potência no valor de δ_{max} **144**

Figura A.6 – Limite mínimo de excitação do gerador síncrono **145**

Figura A.7 – Carta de capabilidade do gerador síncrono **146**

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Limites de variações de tensão em regime permanente para tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV. **60**

Tabela 4.2 – Limites de variações de tensão em regime permanente para tensão nominal igual ou inferior a 1 kV. **61**

Tabela 4.3 – Parâmetros gerais dos geradores. **64**

Tabela 4.4 – Parâmetros dos transformadores de potência. **64**

Tabela 4.5 – Parâmetros dos bancos de capacitores. **64**

Tabela 4.6 – Parâmetros das cargas do sistema. **65**

Tabela 4.7 – Parâmetros das linhas de distribuição. **65**

Tabela 4.8 – Potências ativa e reativa gerada pelas fontes do sistema. **73**

SUMÁRIO

Lista de Figuras **vii**

Lista de Tabelas **xi**

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO **1**

1.1 – Considerações iniciais. **1**

1.2 – Contextualização do tema **2**

1.2.1 – Norma técnica da CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) **4**

1.2.2 – Norma técnica da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) **6**

1.2.3 – Norma técnica da COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica) **7**

1.2.4 – Norma técnica da Bandeirante Energia S/A **8**

1.2.5 – Norma técnica da CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina) **9**

1.2.6 – Norma técnica da COELCE (Companhia Energética do Ceará) **9**

1.2.7 – Norma técnica da Long Island Power Authority **10**

1.3 – Análise comparativa entre as normas comentadas **13**

1.4 – Contribuições desta dissertação **15**

1.5 – Estrutura da dissertação **16**

CAPÍTULO 2 – SISTEMAS DE CONTROLE DE EXCITAÇÃO **19**

2.1 – Considerações iniciais **19**

2.2 – Justificativas para o uso do regulador automático de tensão **20**

2.2.1 – Manutenção de tensão constante sob carga **21**

2.2.2 – Prevenção de sobretensão após rejeição de carga **22**
2.2.3 – Melhoramento da estabilidade sob carga **24**
2.2.4 – Melhoramento da estabilidade transitória **25**
2.3 – Atuação de um sistema de excitação **27**
2.4 – Modelo simplificado do sistema de controle de excitação **30**
2.5 – Tipos de sistemas de excitação **31**
2.6 – Modelagem computacional do regulador de tensão **32**
2.6.1 – Modelagem computacional do regulador de tensão no ATP **36**
2.7 – Considerações finais **39**

CAPÍTULO 3 – SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE E MÁQUINAS PRIMÁRIAS 41

3.1 – Considerações iniciais **41**
3.2 – Funções da máquina primária e do regulador de velocidade **41**
3.3 – Mecanismo de atuação do regulador de velocidade **42**
3.4 – Tipos de máquinas primárias **44**
3.4.1 – Turbinas a vapor **44**
3.4.2 – Turbinas hidráulicas **45**
3.4.3 – Turbinas a gás **46**
3.4.4 – Motores a diesel **47**
3.5 – Tipos de reguladores de velocidade **48**
3.6 – Arranjo típico de um sistema de regulação de velocidade **52**
3.7 – Considerações gerais sobre modelagem computacional de máquinas primárias **53**
3.8 – Modelagem computacional do regulador de velocidade no ATP **54**
3.9 – Considerações finais **57**

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS EFEITOS DA PRESENÇA DE GERAÇÃO INDEPENDENTE EM UM SISTEMA ELÉTRICO 59

4.1 – Considerações iniciais **59**

4.2 – Limites de referência para os níveis de tensão em regime permanente **59**

4.3 – Descrição do sistema elétrico simulado **62**

4.4 – Estudos de casos **66**

4.4.1 – Condição "A": Sistema sem a geração independente **68**

4.4.2 – Condição "B": Sistema com a geração independente (U_{fmin} = 0,8 pu e U_{fmin} = 0,9 pu) **73**

4.4.3 – Condição "C": Sistema com a geração independente (U_{fmin} = 0,9 pu) e com um reator de núcleo saturado instalado no PAC **108**

4.5 – Considerações finais **122**

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES GERAIS **127**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **133**

ANEXO 1 – CURVA DE CAPABILIDADE DA MÁQUINA SÍNCRONA **137**

A.1 – Carta de capabilidade do gerador **137**

A.1.1 – Limite de aquecimento da armadura **137**

A.1.2 – Limite de aquecimento do enrolamento de campo **139**

A.1.3 – Limite de potência da turbina **140**

A.1.4 – Limite de estabilidade **141**

A.1.5 – Limite de excitação mínima da máquina **143**

A.1.6 – Curva final de operação da máquina **143**

A.2 – Considerações finais **144**

ANEXO II – DADOS DO REGULADOR DE TENSÃO E DA MÁQUINA SÍNCRONA DO PRODUTOR INDEPENDENTE DE ENERGIA ELÉTRICA **147**

ANEXO III – DADOS DO REGULADOR DE VELOCIDADE **151**

ANEXO IV – ALGORITMO IMPLEMENTADO NO ATP 153

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O interesse por geração distribuída tem aumentado consideravelmente em razão de uma reestruturação do setor energético brasileiro. Isso aliado à necessidade de aproveitamento de diferentes formas de energia primária, avanços tecnológicos e a uma maior conscientização sobre conservação ambiental, vêm fomentar e contribuir para a difusão da geração independente de energia elétrica.

Com vistas a aumentar a eficiência do setor sucroalcooleiro, reduzindo os custos de produção, há um subproduto interessante: o bagaço da cana, que pode render cerca de 250-300 kg por tonelada de cana. Além de poder ser empregado como matéria-prima na produção de papel, celulose, aglomerado e compensado e, como volumoso, na alimentação animal, o bagaço de cana também pode ser utilizado como combustível para geração de energia elétrica [1], [2] e [3].

Em São Paulo, em 1995, 10 milhões de toneladas de bagaço foram obtidas. Isso equivaleria a 6 milhões de MWh na geração independente de energia [1].

Com a geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana, as usinas de açúcar passariam, de grandes consumidores de energia elétrica, a auto-suficientes e ainda gerariam excedentes, o qual poderia ser vendido para as concessionárias de energia [2].

Por outro lado, em 1999, o mercado de co-geração passou por um aquecimento, pois o Mercado Atacadista de Energia (MAE), atualmente denominado CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica –

firmou o compromisso de impulsionar a co-geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar [3].

Nos dias atuais muito se fala em preservação ambiental, e em formas de geração de energia limpa. Novamente o álcool ganha uma expressão maior no cenário mundial, sendo sua aplicação amplamente discutida pelos líderes mundiais em diversos fóruns. Dessa forma, há um novo ânimo para a usina de álcool, e isso se refletirá na geração de energia através do bagaço da cana oriundo do processo de moagem.

Os aspectos anteriormente relatados contribuem para o aumento do número de geradores independentes ligados ao sistema interligado. Dessa forma, a máquina do produtor independente e seu sistema elétrico, se tornam objeto de questionamentos para o funcionamento do sistema como um todo, seja do ponto de vista de dinâmica de sistemas elétricos, ou mesmo, do ponto de vista de qualidade de energia elétrica.

1.2- CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A principal contribuição dessa dissertação consiste em realizar estudos, em um *software*, no domínio do tempo, que possam beneficiar tanto concessionárias de energia, quanto produtores independentes. Tais estudos visam analisar os impactos tanto do sistema da geração independente no sistema maior, no qual aquele está inserido, quanto no sentido oposto (impacto do grande sistema na geração independente). Para tal, foi necessário modelar adequadamente os reguladores de tensão e de velocidade para operarem em conjunto com a máquina síncrona. Nestas modelagens, a máquina primária é uma turbina a vapor.

As concessionárias de energia brasileiras apresentam, através de normas específicas, os requisitos técnicos mínimos para a ligação de autoprodutores de energia elétrica, produtores independentes de energia e quaisquer outros acessantes ou usuários que possuam geradores elétricos, em seus sistemas. Algumas destas normas serão, em seguida, descritas resumidamente e comentadas.

Para o melhor entendimento destas normas, é recomendável se conhecer a definição de alguns termos específicos, conforme se segue:

- **Acessante:** Pessoa jurídica com permissão para conexão ao sistema elétrico da concessionária, atendendo a regras pactuadas entre as duas partes;
- **Autoprodutor com venda de excedentes:** são consumidores que têm geração própria em paralelo com a concessionária e que vendem o excedente de sua geração para a mesma ou a terceiros, usando a rede desta;
- **Autoprodutor sem venda de excedentes:** são consumidores com geração própria em paralelo com o sistema da concessionária e que não possuem excedente para venda;
- **Produtores independentes de energia:** são pessoas jurídicas ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco, utilizando a rede da concessionária para tanto.

Cabe aqui ressaltar que “paralelismo” também se refere a situações que prevejam as manobras necessárias às transferências de fonte da

concessionária para outra qualquer, sem ocorrência de interrupção de energia elétrica nas instalações do acessante ou usuário, e vice-versa.

Com vistas a familiarizar o leitor com algumas normas nacionais utilizadas para reger a entrada de novos acessantes no sistema interligado, mais especificamente ao sistema elétrico de distribuição de energia, nos próximos itens são discutidas normalizações técnicas para interconexão de sistemas de geração independente de energia elétrica.

1.2.1- NORMA TÉCNICA DA CPFL (COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ)

A norma técnica da CPFL [4] estabelece que seja de inteira responsabilidade do acessante do paralelismo a proteção e operação do sistema elétrico particular. Além disso, esta referência apresenta os requisitos necessários aos aspectos de projeto elétrico, de proteção contra faltas na rede da concessionária, de operação do paralelismo e da qualidade do fornecimento de eletricidade por quaisquer das partes. Fica evidente nesta última frase, a preocupação com um dos itens que fazem parte da qualidade da energia elétrica, mais especificamente com a qualidade do fornecimento dessa energia, quão eficazmente a energia elétrica está sendo entregue ao consumidor.

Observa-se que não há um conjunto de medidas aplicáveis para mitigar os efeitos de prováveis contingências comuns aos sistemas de distribuição e assegurar a continuidade do paralelismo [4].

Quanto aos aspectos técnicos de conexão do gerador do acessante, o mesmo deverá ser conectado por meio de um transformador de separação dos sistemas, o denominado transformador isolador. No caso específico da CPFL, este transformador deve ter seus enrolamentos conectados em triângulo no lado da CPFL e em estrela com neutro acessível no lado do usuário.

É obrigatória a existência de um disjuntor de interligação de tal forma que separe a instalação particular do acessante da rede de distribuição primária da CPFL, denominado de “disjuntor de entrada”.

A CPFL deixa claro que pretende monitorar, no futuro, os índices de qualidade da energia elétrica que está sendo comprada do autoprodutor. Dentre esses índices pode-se citar:

- Desequilíbrio de tensão;
- Distorção harmônica;
- Cintilação luminosa (flicker);
- Valor eficaz de tensão;
- Freqüência;
- Variação de tensão de curta duração.

Observa-se em [4] que a concessionária não cobra do acessante estudos técnicos que vislumbrem questões de dinâmica e qualidade de energia quando da inserção de seu sistema na rede.

Tais estudos deveriam ainda aplicar as principais contingências comuns às redes de distribuição para analisar a viabilidade da interligação e propor soluções factíveis para a permanência do paralelismo.

Verifica-se que não há limites para variações de tensão no ponto de acoplamento e nem mesmo limites para variações freqüência. Também não se observa referência ao tempo necessário para a atuação da proteção que atuará no disjuntor de entrada, mediante a não observância dos limites a serem definidos como padrões tanto para a tensão quanto para a freqüência de operação do acessante.

1.2.2- NORMA TÉCNICA DA CEMIG (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS)

Na norma desta companhia para fins de geração independente, [5], se verifica, de forma similar ao especificado em [4], a utilização do disjuntor de interligação ou de paralelismo, anteriormente denominado de "disjuntor de entrada". Este deve prover a separação (desinterligação) da instalação geradora particular do sistema de distribuição da CEMIG. O disjuntor de entrada é o dispositivo em média tensão que interliga o sistema elétrico primário da concessionária e o sistema elétrico do consumidor.

A exemplo do que ocorre em [4], a norma técnica aqui discutida, [5], também solicita os mesmos dados para uma análise prévia de viabilidade da conexão de paralelismo. Dados estes que abrange desde o diagrama unifilar completo da interligação até os dados técnicos da máquina, reatâncias de eixo direto e quadratura, momento de inércia, funções matemáticas dos reguladores de tensão e velocidade, etc. Porém, nesta norma há também a necessidade de se efetuar estudos de curto-circuito e ajustes de proteção.

Após a realização da consulta de acesso, segue-se a fase de "Solicitação de Acesso". Nesta fase deverá ser observado às recomendações previstas no módulo 3 dos sub-módulos 3.4 e 3.5, Operador Nacional do Sistema (ONS), dos Procedimentos de Rede, [6, 7] e a resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL -, 281/99, [8].

Em [5], o transformador que separa a planta do acessante da concessionária de energia, deve ser ligado em estrela aterrada do lado da CEMIG e delta do lado do acessante, diferindo assim, do esquema adotado em [4].

1.2.3- NORMA TÉCNICA DA COPEL (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA)

Em seu parágrafo introdutório, a norma técnica da Companhia Paranaense de Energia Elétrica (Copel) [9], estabelece que a conexão de um novo acessante de geração não deverá causar prejuízo à qualidade da energia fornecida aos outros agentes conectados à rede elétrica da concessionária. O termo Rede Elétrica da Copel se refere a um conjunto integrado pelos sistemas de transmissão, subtransmissão e distribuição daquela concessionária.

Observa-se, desde já, a preocupação dessa concessionária no que tange à manutenção da qualidade com que a energia é entregue ao consumidor final, mais especificamente aos usuários do sistema Copel de energia elétrica.

Nesta mesma referência estão relacionados os dados a serem fornecidos pelo acessante para a elaboração dos estudos de viabilidade técnica de conexão à Rede Elétrica da Copel.

Ressalta-se que as condições de acesso aos sistemas elétricos de transmissão e distribuição são regidas pela Resolução ANEEL 281/99, *Agência Nacional de Engenharia Elétrica*, e demais regulamentações e legislações pertinentes, [8].

Quanto as dados técnicos a serem enviados pelo acessante à Copel, constata-se que os mesmos são similares aos solicitados pelas referências [4,5].

Os estudos de proteção deverão ser completos, contando com os cálculos de curtos-circuitos, coordenação e seletividade das proteções envolvidas, dimensionamento e parametrização de todos os equipamentos.

1.2.4- NORMA TÉCNICA DA BANDEIRANTE ENERGIA S/A

A recomendação técnica da Bandeirante Energia S/A [10], se aproxima muito do que é apresentado em [9]. Dessa forma, ressaltam-se apenas alguns pontos de maior expressão.

Esta norma técnica relata que o intercâmbio máximo de energia entre o acessante e a Bandeirante, através da rede de distribuição primária, fica limitado a corrente máxima de 300 A. Além disso, utiliza-se um critério de 5%. Isto é: para garantir variações de tensão aceitáveis, a potência injetada em qualquer ponto da rede não poderá ultrapassar o valor de 5% da potência de curto-circuito mínima nesse ponto. Esta referência será apresentada novamente no capítulo 4 desta dissertação.

1.2.5- NORMA TÉCNICA DA CELESC (CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA)

As Centrais Elétricas de Santa Catarina, Celesc, em sua recomendação técnica [11] para a conexão de autoprodutores em seu sistema de distribuição, apresenta os requisitos mínimos necessários para uma interligação eficaz.

Nesta recomendação, a exemplo das anteriormente discutidas, a concessionária se guarda o direito de definir o ponto de conexão com base em critérios técnicos, Além de deixar sumariamente claro que a conexão do acessante, em nada deve afetar a proteção do sistema elétrico, a qualidade do fornecimento de energia aos consumidores em geral e nem a segurança do pessoal da manutenção da Celesc. A soma das potências das máquinas da usina do acessante, em MVA, poderá ser, no máximo, igual a 10% do valor da potência de curto-circuito trifásico do ponto de conexão, onde o curto é calculado sem a presença da usina. No caso de uma ampliação da usina que venha a violar o critério anterior, um novo ponto de conexão será definido. O

objetivo disso consiste em reduzir as variações de tensão no ponto de conexão dos sistemas.

Quanto aos requisitos de proteção, as recomendações técnicas estabelecidas em [11] em muito se assemelham as comentadas anteriormente para as demais referências técnicas.

Quanto aos dados técnicos a serem fornecidos na solicitação de acesso em [11], os mesmos são semelhantes aos requeridos pelas referências citadas anteriormente, porém informações técnicas quanto aos reguladores de tensão e velocidade da máquina não são solicitadas. Não há uma ficha técnica orientada apenas para dados desses reguladores e dados referentes à máquina motriz.

1.2.6- NORMA TÉCNICA DA COELCE (COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ)

Essa norma técnica [12] apresenta uma série de referências técnicas, decretos e resoluções os quais auxiliam na elaboração dos projetos das instalações de conexão.

Nesta referência, as etapas da solicitação de acesso são descritas de forma clara. Ficam evidentes ao leitor os procedimentos necessários para dar início ao processo conexão ao sistema de distribuição.

No que tange aos dados necessários a serem fornecidos pelo acessante para a concessionária para a realização dos estudos técnicos, esta referência se assemelha as demais citadas e comentadas anteriormente. Os estudos técnicos realizados se referem a:

- Estudo do fluxo de potência;
- Níveis de curto-circuito;
- Análise de sobretensões;

- Desequilíbrios no sistema elétrico;
- Análise da estabilidade;
- Análise dos limites mecânicos e elétricos;
- Estudos dos reguladores dos geradores;
- Coordenação da proteção;
- Falhas nas proteções.

1.2.7- NORMA TÉCNICA DA LONG ISLAND POWER AUTHORITY

A recomendação técnica para a interligação de produtores independentes de energia da *Long Island Power Authority* – LIPA – , aqui referenciada como [13], apresenta os requisitos mínimos de controle e proteção para uma interligação segura e eficaz de novos acessantes ao seu sistema elétrico de distribuição e subtransmissão.

Nessa norma técnica, a concessionária deixa evidenciada que a mesma deve avaliar cada instalação para determinar a máxima potência em MVA que poderá ser conectada ao seu sistema sem exceder o nível de carregamento, falta, e capacidade de interrupção dos seus equipamentos.

A exemplo das normas comentadas anteriormente, a LIPA relata, em sua norma técnica, que toda a responsabilidade da proteção dos equipamentos e geradores do acessante contra possíveis danos, devem ficar a cargo dele mesmo, ou seja, do próprio acessante.

Quanto aos critérios técnicos estabelecidos para minimizar interferências no sistema elétrico da concessionária, o produtor independente, ou autoprodutor, deve atender as seguintes recomendações:

a) Tensão

O gerador do acessante deve gerar tensão dentro de uma faixa de +5%, ou -5%, da tensão nominal quando em paralelo com o sistema da LIPA. O produtor deve desconectar de forma automática seu gerador dentro de 1s se a tensão não se mantiver dentro de uma faixa de variação +10%, ou -10% da tensão nominal.

b) Flicker

O produtor, acessante, não deve causar flutuações na tensão do sistema da LIPA de tal forma a provocar o fenômeno da cintilação luminosa.

c) Freqüência

O acessante deve prover meios automáticos de desconectar seu gerador do sistema da LIPA dentro de 0,5s para uma freqüência de 60,5 Hz e dentro de 1s para uma freqüência de 58,0 Hz. Sendo permitida a operação dentro da faixa compreendida entre 60 - 58,0 Hz.

d) Harmônicas

A distorção harmônica total de tensão criada pelo acessante não deve exceder 5% da fundamental (60 Hz). Apesar de estranho, esta norma também requer que a distorção harmônica de corrente criada pelo acessante também não deve exceder 5% do valor da corrente fundamental. Nenhuma componente harmônica individual deve exceder 3% da fundamental.

e) Fator de potência

A máquina síncrona do acessante deve atender ao fator de potência do sistema LIPA, que permanece em torno de 0,9 (capacitivo ou indutivo) e 1,0.

f) Faltas externas e tempo de retirada

O acessante deve retirar seu gerador do sistema, através da abertura do disjuntor de interligação, dentro de 6 ciclos após a ocorrência de uma falta no sistema elétrico da LIPA. O relé de retaguarda deve dar seu trip dentro de 18 ciclos. Já para a ocorrência de uma falta no sistema de transmissão da LIPA, 138 kV, o acessante deve retirar seu gerador dentro de 4 ciclos após a ocorrência da falta.

Os estudos de engenharia requeridos nesta norma têm a finalidade de determinar a configuração elétrica exata da instalação de conexão e identificar quaisquer requerimentos adicionais, mudanças, ou modificações no sistema da LIPA. Dentre os estudos de engenharia realizados pela LIPA, destacam-se:

- Estudos de suportabilidade de curto-circuito dos equipamentos;
- Impactos na estabilidade do sistema elétrico;
- Falhas no disjuntor de interligação;
- Restrição de operação de linha morta;
- Requerimentos de VAR para geradores de indução;
- Limite de geração de MVA devido a localização no sistema da LIPA;
- Coordenação dos relés para a proteção contra faltas trifásicas e fase-terra no sistema da LIPA e nas instalações internas do acessante.

Para se realizar a conexão ao sistema elétrico da LIPA torna-se necessário a instalação de um transformador de isolação. Este deve ser conectado em estrela- aterrado /delta ou estrela- aterrado/delta/estrela, com o lado em estrela- aterrado voltado para o sistema elétrico da LIPA.

Os dados requeridos à concessionária, LIPA, referentes à máquina síncrona e seus respectivos reguladores de tensão e velocidade, são

discriminados de forma clara e objetiva. Em seu apêndice, a referência [13] especifica cada variável necessária à máquina síncrona, e apresenta os quatro modelos básicos para reguladores de tensão do IEEE, bem como as variáveis necessárias para a utilização desses modelos e as respectivas funções de transferência de cada modelo. De forma recíproca são apresentados modelos para reguladores de velocidade comuns para geradores síncronos cuja máquina primária é uma turbina a vapor.

1.3- ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS NORMAS COMENTADAS

Mediante as referências nacionais apresentadas e discutidas até o momento pode-se abstrair as seguintes conclusões:

- Todos os custos referentes a modificações no sistema elétrico da concessionária para a interligação devem ser pagos pelo acessante;
- O acessante é interinamente responsável pela proteção de seus equipamentos e geradores;
- Há um rigor quanto à proteção, pois a concessionária quer continuar a operar e atender a seus consumidores de forma harmoniosa independentemente da presença do produtor independente;
- Não há uma especificação mais abrangente quanto ao tempo de retirada das faltas, seja na rede da concessionária ou dentro das instalações do acessante;
- Não há limites claramente definidos para variações de freqüência mediante a aplicação de determinadas contingências comuns ao sistema elétrico de distribuição, no ponto de conexão;
- Não há limites claramente definidos para variações de tensão mediante a aplicação de contingências no ponto de conexão;

- A concessionária define o ponto de conexão;
- Todas apresentam os requisitos técnicos básicos exigidos para a conexão aos seus respectivos sistemas elétricos;
- Não se tem conhecimento pré-estabelecido das principais implicações que determinadas contingências poderiam causar ao sistema da concessionária e do acessante. Tampouco há alternativas pré-estabelecidas para mitigar tais efeitos;
- Os projetos das instalações do acessante devem ser submetidos à análise e aprovação da concessionária;
- As normas técnicas comentadas apresentam similaridades quanto ao sistema de medição de faturamento;
- Todas as concessionárias apresentam um acordo operativo;
- Perante qualquer anomalia no sistema, no ponto de conexão, o relé secundário deve abrir o disjuntor de interligação. Não há aqui, alternativas técnicas com vistas a manter a continuidade do paralelismo de forma segura, ou mesmo, de atenuar as aberturas da conexão.

Ao se realizar uma análise comparativa entre as normas brasileiras e a norma técnica da LIPA, nota-se que esta última apresenta maiores subsídios técnicos para a conexão de acessantes, principalmente no que tange as variações de tensão e freqüência quando da ocorrência de contingências, seja na rede da concessionária ou nas instalações elétricas do acessante. Além disso, em [13] há um rigor técnico maior quanto à especificação dos reguladores da máquina síncrona do acessante, sendo sugerido alguns modelos clássicos de regulador de tensão.

Ao término da análise das referências técnicas, observa-se nelas um grande receio quanto à conexão desses novos produtores de energia ao sistema.

Para analisar a operação em paralelo de uma rede da concessionária com o produtor independente, foram realizadas simulações computacionais.

Dentre os estudos, torna-se necessário o monitoramento dos níveis de tensão no *Ponto de Acoplamento Comum* (PAC), antes e após a entrada do produtor independente, bem como análises de rejeição de carga, abertura de linha de distribuição e curto-circuito para responder às principais perguntas referentes à operação de um sistema com geração independente.

Tais questionamentos apontam a necessidade de se encontrar técnicas e soluções factíveis para cada caso.

1.4- CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação visa desenvolver as modelagens necessárias para que se possa, em seguida, analisar os comportamentos do sistema elétrico de uma concessionária interagindo com o sistema elétrico do acessante, em condições não-ideais (como nas contingências).

Para implementar um sistema elétrico apto a representar de forma fiel um arranjo de geração distribuída de usinas de álcool, nos moldes do que é encontrado atualmente nos sistemas elétricos de potência, foi necessário modelar os reguladores de tensão e de velocidade da máquina síncrona, cuja máquina primária é uma turbina a vapor, bem como um sistema elétrico de distribuição em paralelo com o sistema de geração independente. Estes reguladores foram modelados no *Alternative Transient Program – ATP –*, utilizando a máquina síncrona controlável, disponível neste *software*.

Após a realização e validação da modelagem do sistema elétrico como um todo, foram realizados os seguintes estudos de casos:

- Análise de curto-circuito trifásico na rede da concessionária;
- Análise de curto-circuito trifásico na rede do acessante;
- Rejeição de carga na rede da concessionária;
- Rejeição de carga na rede do acessante;
- Abertura de linha de distribuição.

Dessa forma, baseado nos resultados encontrados para o sistema elétrico em questão, são apresentadas medidas para mitigar efeitos danosos ao sistema, bem como sugestões técnicas mais aplicáveis a reger a entrada de novos acessantes ao sistema.

1.5- ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Diante das questões técnicas aqui levantadas e discutidas, esta dissertação de mestrado está subdividida nos seguintes capítulos:

Capítulo 1

Este capítulo apresenta a evolução do mercado de comercialização de energia elétrica por autoprodutores e produtores independentes no Brasil, bem como apresentar os principais questionamentos técnicos da operação de sistemas de geração distribuída. Além disso, é realizada uma análise comparativa entre as principais normas técnicas existentes para a conexão de acessantes as redes de distribuição.

Capítulo 2

Este capítulo apresenta o sistema de excitação de uma unidade geradora, abordando os aspectos construtivos, teóricos, as modelagens e tipos mais utilizados. Além disso, são enfatizadas as contribuições desse regulador

nas respostas do sistema elétrico de potência. Os tipos de reguladores e tensão mais utilizados pelo IEEE também são apresentados. Por fim, a estratégia utilizada para modelar o regulador de tensão no *ATP*, utilizando *Transient Analysis of Control Systems – TACS –*, é demonstrada.

Capítulo 3

Neste capítulo é apresentado o regulador de velocidade da máquina síncrona. Vislumbram-se seus aspectos construtivos, teóricos, as modelagens e tipos mais utilizados. Por fim, a estratégia computacional para modelar o regulador de velocidade no *ATP*, partindo de um diagrama de blocos de uma função de controle, utilizando a *TACS subrotines*, é demonstrada.

Capítulo 4

O Capítulo 4 tem como enfoque principal os estudos de casos. Para isto, é feita a simulação de um sistema elétrico do produtor independente em paralelo com a concessionária de energia. O acessante, além de atender sua demanda interna de energia, vende um excedente para a rede da concessionária. Portanto, o sistema elétrico do acessante apesar de não comprar energia da concessionária, está em constante paralelismo com a mesma. A partir deste sistema, serão estudados casos nos quais contingências comuns ao sistema elétrico de distribuição serão aplicadas. Com isso, pretende-se analisar o desempenho do sistema mediante essas contingências. Posteriormente, com a inserção de uma medida mitigadora para os efeitos sofridos quando da aplicação da contingência, novas simulações serão realizadas.

Capítulo 5

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e também sugestões de novas pesquisas relacionadas com este trabalho.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE CONTROLE DE EXCITAÇÃO

2.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo principal deste capítulo consiste em justificar ao leitor as razões para a utilização dos sistemas de controle de excitação das máquinas síncronas, bem como apresentar os mecanismos e efeitos de sua atuação.

Inicialmente, são mostrados os benefícios obtidos pelo sistema elétrico de potência, na presença de determinadas contingências, devido à atuação destes sistemas, também conhecidos como *reguladores*. Posteriormente, são descritos os arranjos típicos e diversas configurações empregadas para os mesmos, bem como suas modelagens no programa *ATP*.

O sistema de excitação tem por finalidade fornecer corrente contínua ao enrolamento de campo da máquina síncrona. Aliado a este fato, através do ajuste da tensão de campo, esse sistema ainda realiza a função de *controle* e *proteção*, essenciais a um bom desempenho do sistema elétrico.

O *controle* realizado pelo sistema de excitação regula a tensão e o fluxo de potência reativa, o que conduz ao melhoramento da estabilidade do sistema elétrico de potência. Por outro lado, a função de *proteção* assegura que os limites de capacidade da máquina síncrona, sistema de excitação e outros equipamentos não sejam excedidos.

A tensão de saída e a freqüência dos geradores são controladas pelos seguintes dispositivos:

- Regulador automático de tensão (*AVR - Automatic Voltage Regulator)*;
- Regulador automático de velocidade (*GOV- Speed Governor)*;
- Estabilizador de sistema de potência (*PSS - Power System Stabilizer)*.

Pelo fato de envolver dispositivos mecânicos em sua atuação, o regulador de velocidade é mais lento que o de tensão [18]. Isto está associado fundamentalmente à questão da ação final sobre as turbinas.

As primeiras representações utilizadas para as máquinas síncronas em estudos de estabilidade transitória de sistemas, não levavam em consideração o conjunto gerador-turbina [17], ou então utilizavam um modelo bastante simplificado para os mesmos. Porém, com o desenvolvimento computacional bem como dos programas de estudos de estabilidade, grandes sistemas passaram a ser estudados com maior precisão em sua modelagem.

2.2- JUSTIFICATIVAS PARA USO DO REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

De acordo com [16], as razões básicas que justificam a necessidade de utilizar um *AVR* para controlar a tensão terminal de uma máquina síncrona são:

- Manutenção de tensão constante sob carga;
- Prevenção de sobretensão após a rejeição de carga;
- Melhoramento da estabilidade sob carga;
- Melhoramento da estabilidade transitória do sistema elétrico.

A seguir será realizada uma análise de cada item em separado.

2.2.1- MANUTENÇÃO DE TENSÃO CONSTANTE SOB CARGA

A princípio será analisado um modelo mais simples de uma máquina síncrona, funcionando como gerador, em regime permanente.

A figura 2.1 ilustra esta máquina, a qual corresponde à representação por tensão constante (**E**) atrás de uma reatância síncrona ($\mathbf{X_s}$). O gerador opera de forma isolada de qualquer sistema de potência alimentando uma carga local com uma tensão terminal ($\mathbf{V_t}$).

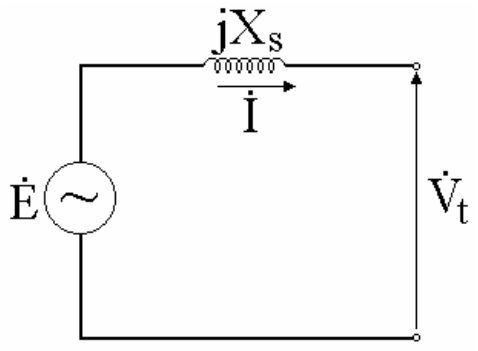


Figura 2.1- Modelo simplificado da máquina síncrona

Ao trabalhar a vazio com uma excitação constante e igual a 1,0 pu, obtém-se $\mathbf{V_t} = \mathbf{E} = 1{,}0$ pu.

A reatância síncrona, ($\mathbf{X_s}$)**,** do gerador se situa em uma faixa de 1,5 a 2,0 pu para turbinas térmicas e, de 0,5 a 1,2 pu para turbinas hidráulicas.

Quando é inserida uma carga no circuito da figura 2.1, surge uma corrente (**I**) fornecida pelo gerador à carga. Isto leva a uma redução da tensão terminal, ($\mathbf{V_t}$**)** obedecendo à equação 2.1 abaixo:

$$\dot{V}_t = \dot{\mathbf{E}} - \mathbf{jX_s}\,\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{E}} - \Delta\dot{\mathbf{V}} \qquad (2.1)$$

Esta queda de tensão $\left|\Delta\dot{V}\right|$ é uma quantidade escalar.

Para uma reatância síncrona $\mathbf{X_s} = 1{,}5$ pu e uma corrente **I,** qualquer queda de tensão na carga será dada por $\Delta V = 1{,}5.\mathbf{I}$ pu. Portanto, para uma

corrente de 0,67 pu a tensão terminal da máquina terá caído à zero. Em outras palavras, nestas condições e com a excitação constante em 1,0 pu, este gerador nunca poderá fornecer sua corrente nominal, 1,0 pu, à carga passiva. Para atingir esse objetivo é necessário prover formas para elevar a tensão de excitação da máquina à medida que a carga aumenta.

Dessa forma, pode-se concluir que, ao trabalhar sob carga, é necessário acrescentar ao gerador algum mecanismo para se efetuar o controle da tensão terminal.

2.2.2- PREVENÇÃO DE SOBRETENSÃO APÓS REJEIÇÃO DE CARGA

Para a análise que se segue utiliza-se a figura 2.2. Nesta assume-se que o gerador da figura 2.1 está operando de forma estável com carga nominal, tendo sido ajustado adequadamente a sua excitação para retornar a tensão de terminal ao seu valor de circuito aberto (1 pu), ponto **K.** Para isso, sua excitação foi aumentada para 2,26 pu.

A maioria dos geradores trabalha com potência nominal e com o fator de potência em torno de 0,85 indutivo. Este será o valor a ser adotado nas análises relativas à *curva de capabilidade,* figura 2.2, que ilustra a região de operação de um gerador. Ressalta-se que no Anexo I desta dissertação é apresentada uma breve descrição teórica sobre a *curva de capabilidade* de um gerador síncrono.

Desta figura tem-se que, ao se desconectar a carga repentinamente, tendo como posição inicial o ponto **K,** mantendo a mesma excitação, 2,26 pu, e desprezando-se os efeitos de saturação, a tensão terminal da máquina irá aumentar para 2,26 pu, pois a tensão a vazio é igual à tensão de terminal da máquina. Porém, se a saturação for considerada, a tensão terminal poderá atingir de 1,3 a 1,4 pu.

Esses altos valores de tensão a vazio podem originar danos internos ao gerador, ao transformador do seu barramento bem como a demais cargas elétricas próximas ao mesmo.

Dessa forma, a tensão terminal deve ser controlada pelo ajuste rápido da excitação. A regulação de tensão da máquina síncrona pode ser definida (em pu) como sendo:

$$\mathrm{Re}\,g = \frac{\mathbf{E} - \mathbf{V_t}}{\mathbf{E}} \tag{2.2}$$

onde **E** é a tensão terminal a vazio (tensão em vazio = tensão de excitação) e $\mathbf{V_t}$ é a tensão de terminal com carga sob excitação constante.

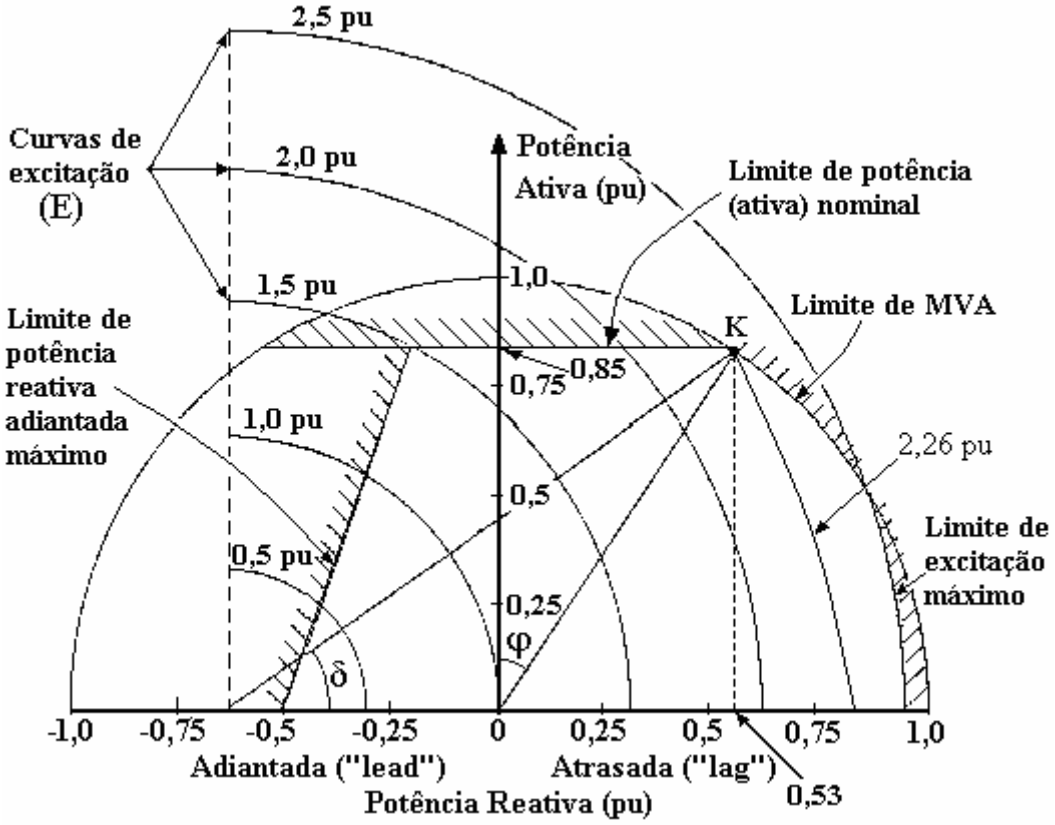


Figura 2.2- Curva de capabilidade de uma máquina síncrona.

2.2.3- MELHORAMENTO DA ESTABILIDADE SOB CARGA

Ainda de acordo com a figura 2.2, se a máquina é sincronizada sem carga, para trabalhar com uma tensão de excitação de 1,0 pu, a mesma operará com um fator de potência adiantado, basta observar que a curva de excitação de 1 pu, figura 2.2, se encontra do lado em que tal fator é adiantado. Consequentemente, com um aumento da demanda de potência de saída, o limite de estabilidade de potência reativa adiantado poderá ser violado antes que a potência de saída nominal tenha sido alcançada.

Portanto, ao se aumentar a excitação, alterando-se assim a tensão interna da máquina, torna-se possível operar a máquina em sua potência nominal com uma margem de estabilidade em regime permanente.

Tal fato pode ser observado na figura 2.2, basta comprovar que se houver um aumento da tensão de excitação para 1.5 pu a máquina ganhará uma margem maior de potência de saída a ser atingida sem exceder seu limite de estabilidade de potência reativa adiantada.

2.2.4- MELHORAMENTO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

A potência ativa fornecida pelo gerador síncrono, rotor cilíndrico, à carga, é expressa em regime permanente pela seguinte equação:

$$P = \frac{\mathbf{E\,V_t}}{\mathbf{X_s}}\,\mathbf{sen}\delta = \mathbf{P_{max}}\,\mathbf{sen}\delta \qquad (2.3)$$

Onde δ é o ângulo de torque, ou de carga da máquina.

Na ocorrência da uma falta, como um curto-circuito, no sistema, a tensão terminal cai. Nestas condições, se a máquina síncrona for desprovida de um *AVR*, a potência máxima, assim como o torque máximo, sofrerão uma queda. Para contrabalançar, o gerador tende a aumentar seu ângulo de torque, ficando vulnerável a perda de sincronismo. Porém, se o *AVR* estivesse presente, ele aumentaria a excitação do gerador, objetivando compensar a queda de tensão nos terminais da máquina. A ação do *AVR* praticamente não afetará a tensão de terminal, mas a tensão interna (**E**) será aumentada como resultado direto do aumento da corrente de excitação do gerador.

Consequentemente, a máxima potência de saída do gerador ($\mathbf{P_{max}}$), durante a falta, é aumentada após a ação do *AVR*, podendo-se afirmar, em decorrência desse fato, que a estabilidade transitória do gerador é então melhorada.

Para facilitar a compreensão ao leitor, procede-se à análise do sistema apresentado na figura 2.3 mediante a aplicação da falta indicada. A figura 2.4 ilustra a curva de variação da potência máxima com o ângulo de carga de um gerador síncrono (critério da igualdade de áreas). Pode se observar, figura 2.4, que antes da contingência, o gerador operava no ponto 1. Nesse ponto a potência mecânica da máquina é igual à elétrica. Porém, na aplicação da falta, curto-circuito, a potência elétrica do gerador cai em virtude da diminuição da tensão de terminal $\mathbf{V_t}$. Dessa forma, há uma nova curva para a potência elétrica fornecida pelo gerador durante o período de permanência da falta. A potência elétrica cai drasticamente, observe o ponto 2. Nesse ponto, acompanhando-se a curva durante a falta, ocorrerá a diminuição da potência elétrica. Assim, o gerador acelera até o ponto 3, atingindo assim o "ângulo crítico", ∂_c. Neste instante a falta é retirada, e surge uma nova curva de potência elétrica pelo ângulo de carga, denominada de "após falta", dessa forma o gerador passa do ponto 3 ao 4. A partir deste ângulo ∂_c há a

modificação na situação de aceleração para desaceleração do gerador. O gerador passa então a percorrer a nova curva estabelecida no pós-falta. A área $\mathbf{A_1}$, compreendida entre os pontos 1, 2, 3 e 4, é chamada de área de aceleração, pois na mesma o gerador adquire energia cinética devido ao fato da potência elétrica ser menor que a mecânica. Há a necessidade de se estabelecer um novo ponto de equilíbrio para o gerador. Para isso a máquina irá se deslocar na curva "pós-falta" do ponto 4 ao 5 para realizar a desaceleração da máquina, pois nesse intervalo a potência elétrica é superior a mecânica, dessa forma a área compreendida entre os pontos 4, 5 e o limite de potência mecânica da turbina, $\mathbf{A_2}$, é chamada de área de desaceleração. No ponto 5, o ângulo de carga é máximo. Se $\mathbf{A_1} = \mathbf{A_2}$, a estabilidade do sistema está assegurada.

Esta análise realizada anteriormente é denominada de critério de igualdade de áreas.

O *AVR* atua nesse processo de forma a se obter uma resposta de potência elétrica versus ângulo de carga mais elevada em magnitude. Isto se deve ao fato da excitatriz elevar a magnitude de **E** mesmo com a $\mathbf{V_t}$ muito baixa. Dessa forma, o ponto $\mathbf{P_{max}}$ da curva de potência ativa permanecerá acima do limite de potência mecânica da turbina, contribuindo assim para o retorno da estabilidade do sistema.

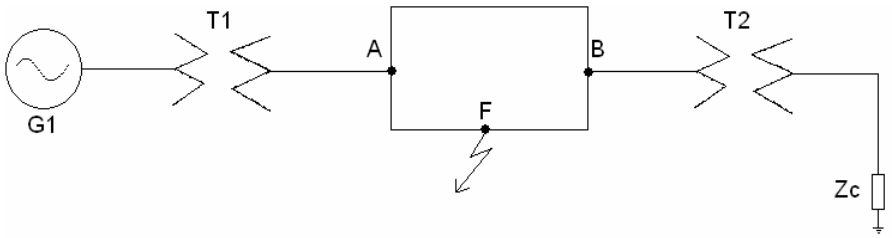


Figura 2.3- Diagrama unifilar de sistema elétrico radial

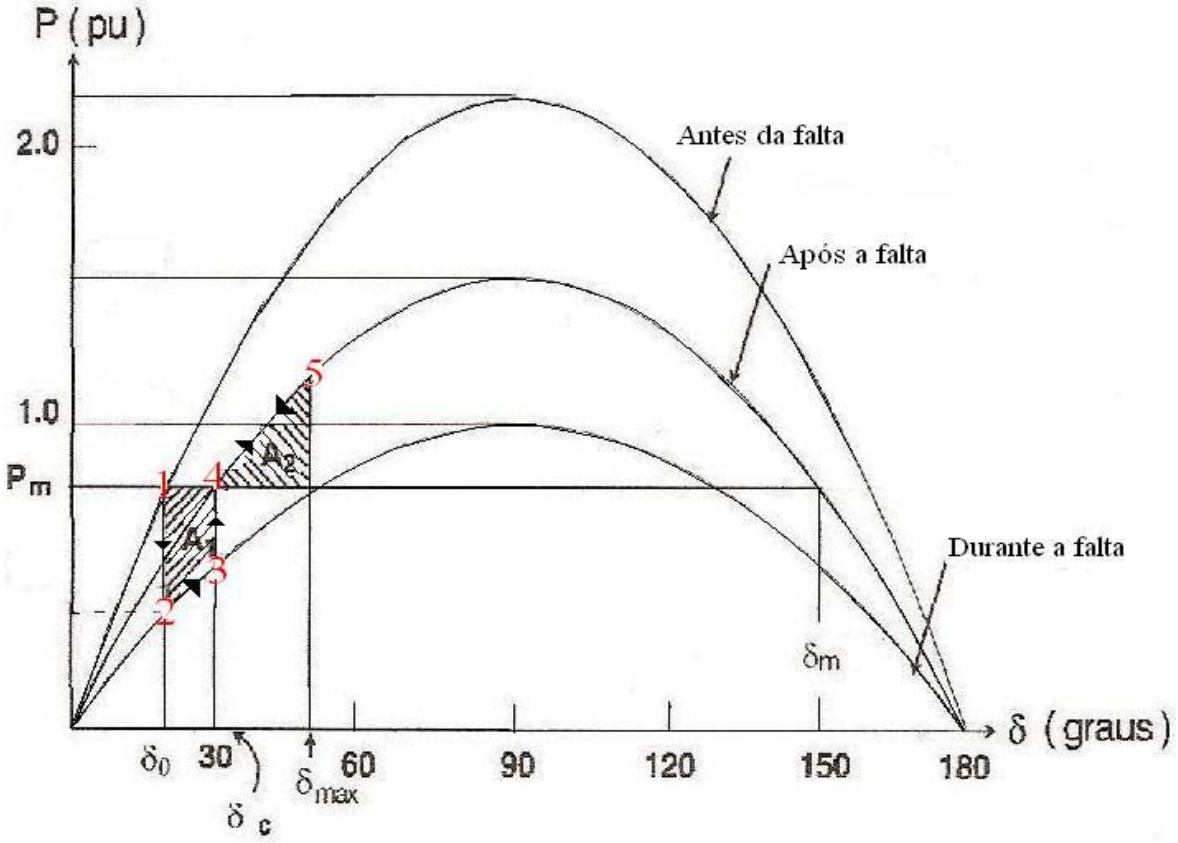


Figura 2.4- Critério da igualdade de áreas.

2.3- ATUAÇÃO DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO

O *AVR* deve monitorar a tensão do gerador e, em qualquer condição de carga, agir no sentido de manter a tensão de terminal do gerador, dentro de limites pré-estabelecidos. Dessa forma, o *AVR* também controla a potência reativa gerada e o fator de potência da máquina, uma vez que estes fatores são dependentes do nível de excitação do gerador. Além disso, o *AVR* auxilia a minimizar as variações de tensão durante períodos transitórios, contribuindo assim, para uma melhora da estabilidade do sistema.

A figura 2.5 ilustra o circuito equivalente de uma máquina síncrona. Nesta, o gerador está com um fator de potência inicial, $(\cos\theta)$, atrasado, uma

corrente **I**, tensão interna $\mathbf{E_g}$ e tensão de terminal $\mathbf{V_t}$ mantida constante (barramento infinito), por outras máquinas em paralelo com essa máquina.

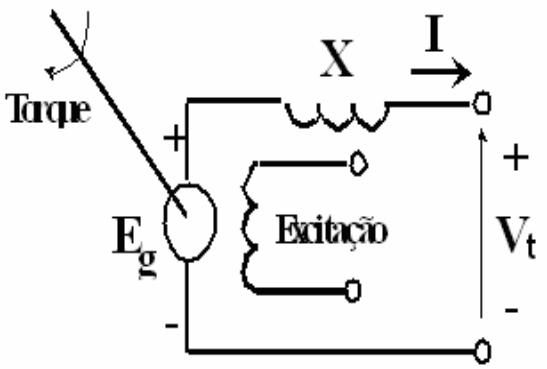


Figura 2.5- Circuito equivalente da máquina síncrona em paralelo com um barramento infinito

A figura 2.6 retrata a condição inicial de operação dessa máquina síncrona.

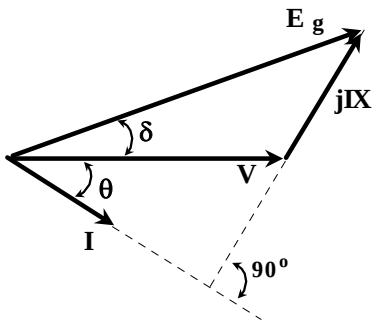


Figura 2.6- Diagrama fasorial da máquina síncrona da figura 2.4 em sua condição inicial

Admitindo-se que a potência mecânica aplicada ao eixo da máquina seja mantida constante pela ação do regulador de velocidade e que a tensão de excitação seja aumentada para um novo valor $E_g{}'$, determinam-se os novos valores relativos para a corrente I′, fator de potência $\cos\theta'$ e ângulo de torque δ'.

Dessa forma, a potência de saída, por fase, pode ser expressa de duas formas:

I. em termos das condições terminais do gerador

$$P = VI\cos\theta \tag{2.4}$$

II. em termos do ângulo de potência, com os efeitos de saliência e resistência do estator desprezados:

$$P = \frac{\mathbf{E_g\ V}}{\mathbf{X}}\ \mathbf{sen}\delta \tag{2.5}$$

Sabe-se que o fasor **IX** se mantém sempre perpendicular ao fasor I. Dessa forma, pode-se construir um novo diagrama fasorial, figura 2.7, que mostra as situações, inicial e final, após o acréscimo a $\mathbf{E_g}$. Observa-se que a nova condição de equilíbrio (com **P** e **V** mantidos constantes) exigiu que:

I. o ângulo de torque sofresse uma diminuição (de δ para δ');
II. a corrente fosse aumentada de **I** para **I'** ;
III. o fator de potência fosse mais atrasado (de $\cos\theta$ para $\cos\theta'$)

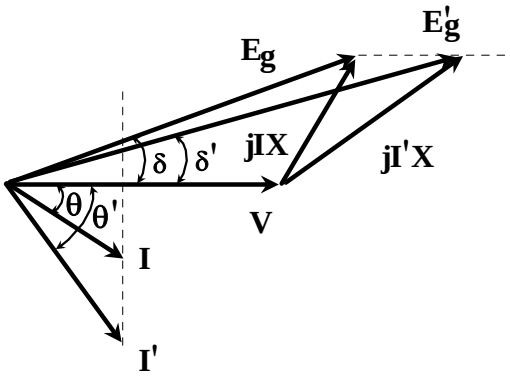


Figura 2.7- Diagrama fasorial para um aumento na tensão de excitação, mantendo-se (**P**) e (**V**) constantes.

Observa-se que um aumento na tensão de excitação resulta num acréscimo de potência reativa gerada, dada por:

$$Q' = VI\,\mathrm{sen}\,\theta' \tag{2.6}$$

pois $I'\,\mathrm{sen}\,\theta' > I\,\mathrm{sen}\,\theta$.

Portanto, conclui-se que o sistema de excitação atua diretamente na geração de potência reativa da máquina síncrona, de forma a atender a demanda de reativo do sistema para manter a tensão de terminal constante.

2.4- MODELO SIMPLIFICADO DO SISTEMA DE CONTROLE DE EXCITAÇÃO.

A figura 2.8 ilustra o arranjo simplificado dos principais itens que compõem qualquer sistema de excitação [19].

A fonte de toda ou parte da corrente de excitação da máquina síncrona se deve à excitatriz. Já o regulador de tensão é a "inteligência" do sistema de excitação. Ele é responsável por controlar a saída da excitatriz de modo que a tensão gerada e a potência se alterem da forma desejada.

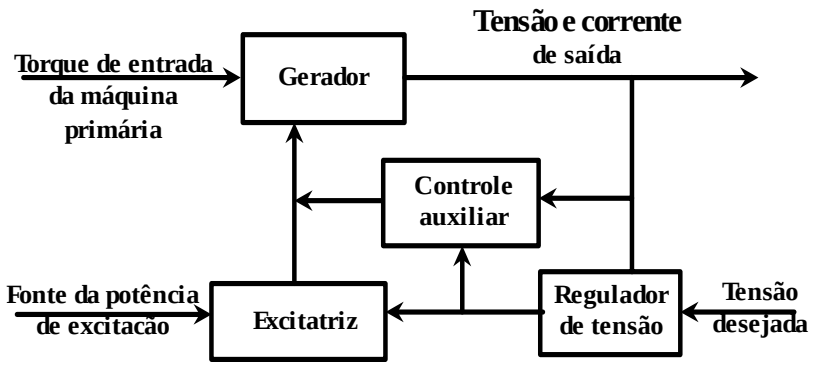


Figura 2.8- Esquema básico de um sistema de controle de excitação (*AVR*).

Na figura 2.8, o bloco chamado de controle auxiliar pode apresentar várias características somadas. Como exemplo, o amortecimento é algumas vezes introduzido com o objetivo de reduzir picos de tensões. Um comparador pode ser utilizado para estabelecer um limite mínimo de excitação, prevenindo assim, contra instabilidade. Em suma, o controle auxiliar realiza a proteção do sistema elétrico.

Devido à alta indutância do enrolamento de campo do gerador, torna-se difícil realizar rápidas alterações na magnitude da corrente de campo. Isto

introduz um atraso considerável na resposta do controle, sendo um dos principais obstáculos a ser superado ao se projetar um sistema de regulação de tensão.

2.5- TIPOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Com o decorrer dos anos, os sistemas de excitação têm evoluído continuamente, tomando várias formas. Conforme a fonte de potência utilizada, estes podem ser classificados em três tipos dispostos a seguir:

- Sistema de excitação CC;
- Sistemas de excitação CA;
- Sistemas de excitação estáticos.

Para os dois primeiros sistemas de excitação, as potências elétricas requeridas são derivadas de máquinas girantes, sendo usados o gerador CC com comutador (e escovas) e o gerador CA com retificador. Os sistemas de excitação estáticos, sem máquinas girantes, são empregados nos modelos mais modernos e atuais de *AVR(s)*. Maiores detalhes sobre outros tipos de *AVR* podem ser encontrados nas referências [19], [20], [21] e [22].

2.6- MODELAGEM COMPUTACIONAL DO REGULADOR DE TENSÃO.

O objetivo dessa seção consiste em obter um modelo de *AVR* que possa ser implementado computacionalmente no *ATP*. A figura 2.9 apresenta um arranjo típico, em forma de diagrama de blocos, dos três principais

componentes de um sistema de controle da excitação (*AVR*): regulador de tensão, a excitatriz e o estabilizador.

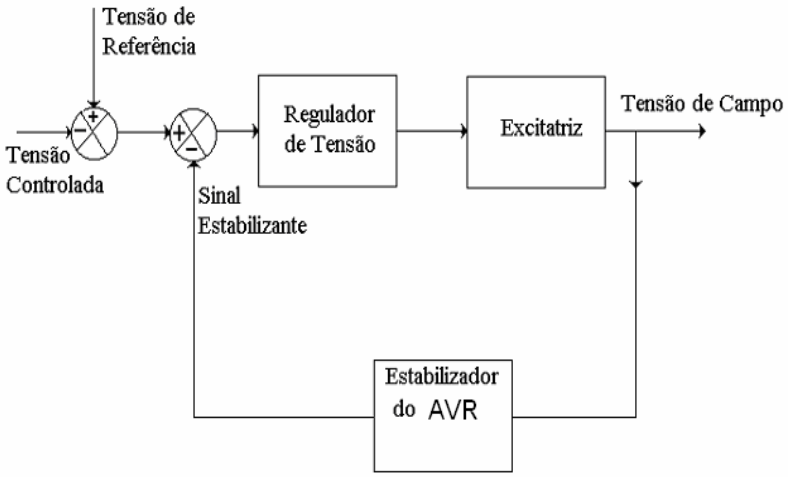


Figura 2.9- Arranjo típico de um regulador de tensão (*AVR).*

Na figura 2.10 é apresentado um modelo mais detalhado para o regulador de tensão, em diagrama de blocos. Esse regulador, de acordo com os dados disponíveis, pode ser reduzido a modelos mais simplificados [22]. As figuras seguintes ilustram modelos de reguladores de tensão, derivados da figura 2.10, pela seleção apropriada de dados.

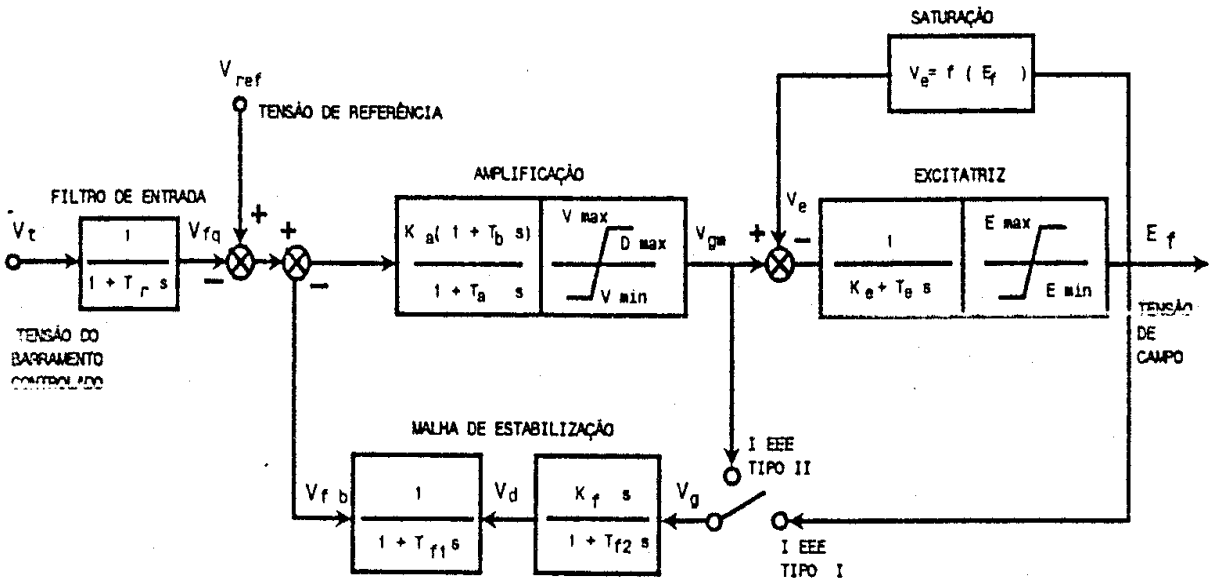


Figura 2.10- Modelo geral de um regulador de tensão.

A figura 2.11 ilustra o modelo mais simples do sistema de excitação, o qual é baseado no modelo geral, figura 2.10. Observa-se que há um caminho principal na função de transferência, com ganho **Ka** e constante de tempo **Ta**, além dos limites máximo e mínimo de excitação do regulador.

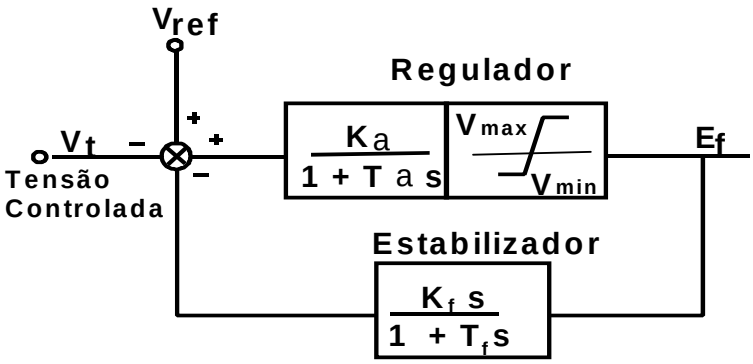


Figura 2.11- Modelo simples de regulador de tensão.

O sinal proveniente da tensão de saída da excitatriz, $\mathbf{E_f}$, sinal estabilizante (de amortecimento), é fornecido na malha de realimentação. Esta apresenta uma função de transferência com ganho $\mathbf{K_f}$ e constante de tempo $\mathbf{T_f}$.

A figura 2.12 apresenta um modelo de regulador de tensão mais avançado do que o anteriormente apresentado na figura 2.11.

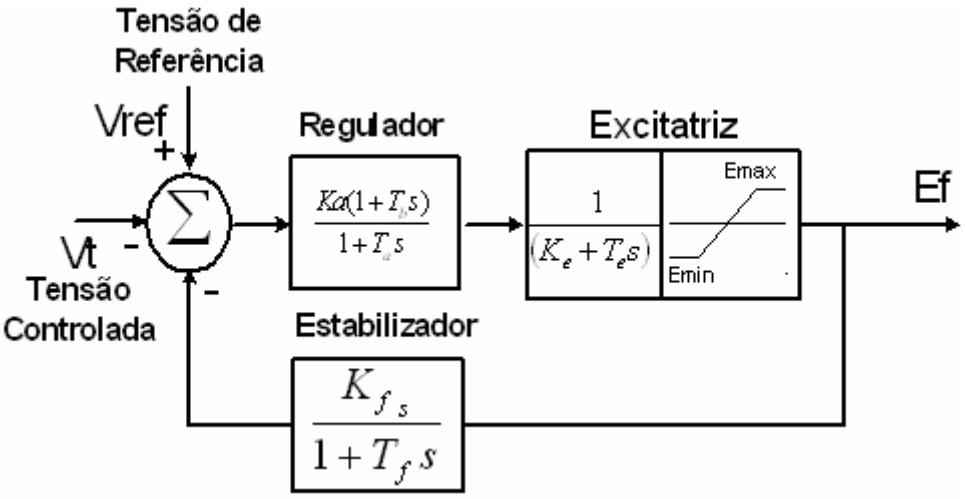


Figura 2.12- Modelo de regulador de tensão mais avançado.

Como função adicional, este modelo apresenta as funções de transferência da excitatriz $\mathbf{1}/(K_e + \mathbf{sT_e})$ seguida pelos seus respectivos limites e por outra constante de tempo $\mathbf{T_b}$ para a representação do regulador.

Os modelos originados pelas recomendações do IEEE Committee Report, [22], são apresentados nas figuras 2.13 e 2.14. Estes são usualmente referenciados como IEEE tipo I e IEEE tipo II, respectivamente.

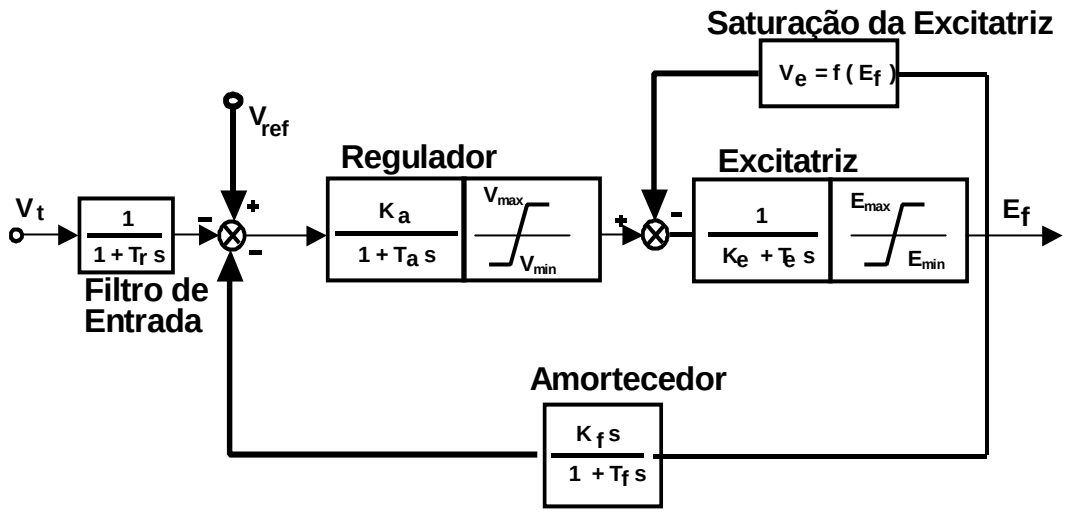


Figura 2.13- Modelo de regulador de tensão do tipo I do IEEE.

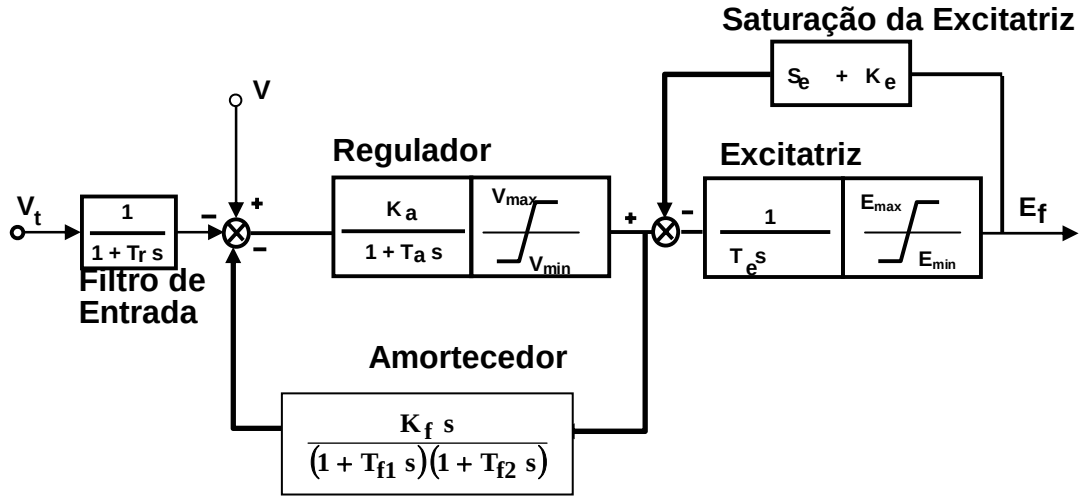


Figura 2.14- Modelo de regulador de tensão do tipo II do IEEE.

Comparando-se, por exemplo, os modelos ilustrados pelas figuras 2.11 e 2.13, observa-se diferenças significantes. Uma primeira diferença a ser destacada consiste na inclusão em separado da função de transferência para o filtro de entrada do regulador, usando uma constante de tempo T_r (embora esta seja geralmente bem pequena). A segunda diferença consiste na inclusão da função de transferência da excitatriz e de seus limites, $\mathbf{1}/(K_e + \mathbf{sT_e})$, a exemplo do que ocorre no regulador da figura 2.12. Entretanto, a diferença principal entre o modelo apresentado pela figura 2.11 e o apresentado pela figura 2.13, consiste na provisão para a representação da saturação da excitatriz pela seguinte função:

$$V_{\mathbf{e}} = f(\mathbf{E_f}) \tag{2.7}$$

Ao se comparar a figuras 2.13 e 2.14, modelos tipo I e tipo II do IEEE, verifica-se que, no modelo do tipo II (figura 2.14), o sinal de entrada do laço de realimentação é tomado na saída do regulador. Para o modelo do tipo I este sinal é tomado na saída da excitatriz. Outro fato a ser observado no modelo do tipo II do IEEE: para compensar a exclusão da excitatriz nesta malha, é inserida uma constante de tempo adicional, $\mathbf{T_{f2}}$.

2.6.1- MODELAGEM COMPUTACIONAL DO REGULADOR DE TENSÃO NO ATP.

Este item trata da modelagem computacional do regulador de tensão no *software ATP*.

Para realizar tal modelagem, utilizou-se dos recursos oferecidos pela *TACS* a qual possui uma regra própria de programação possibilitando a representação de funções de lógica, funções de transferência e outros

dispositivos específicos para o controle de sistemas elétricos. Além disso, ainda permite a realização de operações matemáticas.

Em virtude da dificuldade encontrada para sintonizar o regulador de tensão do tipo I do IEEE, devido à falta de alguns dados, o modelo de regulador de tensão adotado nesta dissertação se trata do apresentado na figura 2.11.

No Anexo II são apresentados os dados das constantes de tempo e dos ganhos, gentilmente fornecidos pela WEG, para o regulador de tensão aqui empregado. Além disso, no mesmo anexo são apresentados os dados referentes à máquina síncrona empregada nesta dissertação. Essa máquina possui uma potência aparente de 5 MVA, a exemplo do que é empregado nos pequenos sistemas de geração independente de energia.

O *ATP* não dispõe de modelos para todos os componentes do sistema elétrico, porém possui ferramentas para elaborar modelos específicos quando os mesmos não estiverem disponíveis.

A rotina *TACS* foi desenvolvida para simular interações dinâmicas entre a rede elétrica e os sistemas de controle. Além disso, a *TACS* possui um processamento independente do processamento do *ATP* durante a execução do programa.

A cada passo de integração o *ATP* processa as grandezas do sistema elétrico e repassa os dados de tensão ou corrente para a *TACS*. Por sua vez, a *TACS* processa esses dados algebricamente e os repassa ao sistema elétrico através de fontes de corrente ou tensão. As saídas da *TACS* no instante t, foram calculadas no instante t-Δt. Portanto, a transferência de sinais de controle da *TACS* para o sistema elétrico, ocorre com um retardo de tempo de um passo de integração, como é mostrado na figura 2.15.

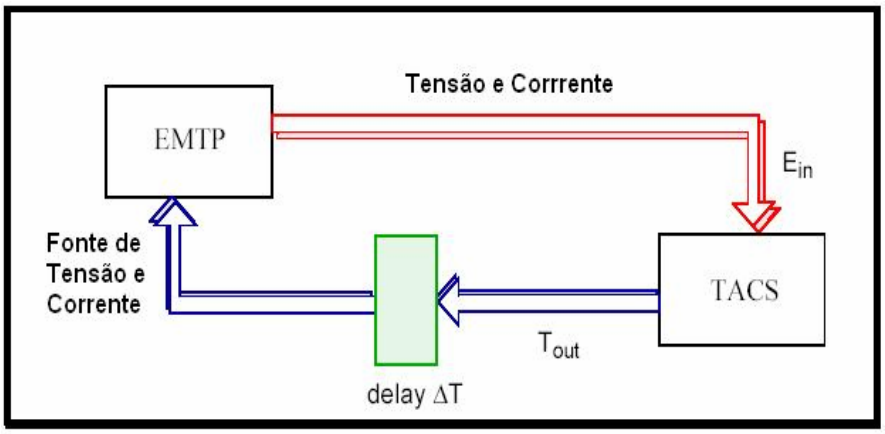


Figura 2.15- Atraso de tempo na transferência de sinais da TACS

A rotina *TACS* é uma ferramenta capaz de representar as mais complexas técnicas de controle de um sistema elétrico modelado para uma simulação.

Nas rotinas *TACS* é possível representar funções dos mais variados tipos, tais como funções de transferência, somadores, multiplicadores, limitadores estáticos e dinâmicos, funções algébricas e lógicas, fontes de sinal, chaves controladas, funções definidas pelo usuário, detectores de sinais, etc.

A seguir são apresentadas as regras necessárias para a utilização de *TACS* :

- O primeiro passo para a utilização de *TACS* no *ATP* é a obtenção do diagrama de blocos do sistema de controle. Esse procedimento facilitará a modelagem e utilização da *TACS*;

- O segundo passo é reproduzir cada um dos blocos do sistema de controle na *TACS*, tomando-se o cuidado de nomear as entradas e saídas de forma a não repetir nenhum nome de variável;

- O terceiro passo consiste em introduzir esses blocos ou expressões na ordem natural de sua execução.

Diante das premissas apresentadas anteriormente, procedeu-se à implementação do regulador de tensão da figura 2.11.

A tensão da barra do produtor independente, barra 4, é transferida para a *TACS*. Após realizar o cálculo de seu valor *rms*, essa tensão é então inserida em um somador, com sinal negativo, no qual o valor da tensão de referência e uma tensão de realimentação, esta negativa, são também adicionados. O sinal proveniente dessa soma passa pelo caminho principal na função de transferência, com ganho **Ka** e constante de tempo **Ta**, além de passar também pelos limites máximo e mínimo de excitação do regulador, pois a máquina apresenta uma máxima capacidade de sobreexcitação e subexcitação de forma a garantir a integridade física da mesma e sua estabilidade.

Após passar pelo caminho principal da função de transferência, figura 2.11, o sinal obtido é aplicado ao campo da máquina síncrona. Trata-se da tensão de campo $\mathbf{E_f}$ a ser aplicada no enrolamento de campo da máquina síncrona. Este mesmo sinal é inserido por realimentação no somador como descrito anteriormente.

Dessa forma, o ciclo se repete durante o tempo estipulado para a realização da simulação computacional. Ressalta-se que no ANEXO IV é apresentado o algoritmo do regulador de tensão utilizado.

Maiores informações sobre TACS podem ser encontradas na referência [23].

2.7- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a influência do regulador de tensão no comportamento dinâmico do sistema elétrico de potência. Para isso, foi analisado o seu papel na melhoria da qualidade da tensão do sistema quando da operação com carga: nesse caso observou-se como o acréscimo na tensão

gerada é necessário para contrabalancear às quedas na reatância síncrona da máquina, objetivando assim manter a tensão de terminal constante.

Quanto à prevenção de sobretensão devido a uma rejeição de carga, vislumbrou-se que a atuação do regulador no sentido de reduzir a tensão gerada (**E**) se faz necessária com o fim de minimizar a tensão de terminal da máquina. Isto é necessário para assegurar a integridade da mesma e dos demais equipamentos do sistema elétrico de potência.

O regulador de tensão também auxilia na manutenção da estabilidade da máquina, pois ao aumentar sua excitação, esta poderá atender a uma maior demanda de potência ativa sem exceder seu limite de estabilidade de potência reativa, tal como foi apresentado no item 2.2.5.

Outro fato relevante consiste no melhoramento da estabilidade transitória da máquina quando da ocorrência de transitórios, pois mediante a ocorrência de uma falta nos terminais do gerador, a excitação atua aumentando ao máximo sua excitação, **E**. Isto contribui para uma melhora na $\mathbf{P_{max}}$ entregue pelo gerador, tal como foi apresentado no item 2.2.6.

Foi apresentada de forma sucinta a atuação do mecanismo de regulação de excitação, podendo-se concluir que esse regulador atua diretamente na geração de potência reativa da máquina síncrona, de forma a atender a demanda de reativo do sistema para manter a tensão de terminal constante.

Os principais arranjos típicos de reguladores de tensão utilizados em estudos de dinâmica de sistemas elétricos também foram apresentados. Sendo apresentadas suas particularidades e comentadas suas principais diferenças uns com os outros.

A modelagem do sistema de controle de excitação da máquina síncrona no *ATP* foi apresentada, bem como as principais rotinas utilizadas na *TACS*.

A utilização de *TACS* se mostra eficiente e eficaz para a modelagem de funções de transferência, pois permite a fiel representação do sistema de

controle utilizado nas máquinas síncronas, mais especificamente o sistema de controle de excitação.

Conclui-se desse capítulo que o sistema de controle de excitação é extremamente necessário para uma melhor resposta do sistema elétrico de potência a situações de variação de carga, rejeição de carga, manutenção de estabilidade e melhoramento de estabilidade transitória.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS DE CONTROLE DE VELOCIDADE E MÁQUINAS PRIMÁRIAS

3.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta aspectos referentes à dinâmica da máquina primária, mais precisamente do seu dispositivo de controle de velocidade. São descritas as principais características do mecanismo de atuação desse regulador. Além disso, os principais tipos de máquinas primárias são comentadas e suas singularidades ressaltadas.

Também é descrita a distribuição de potência entre geradores a fim de garantir um funcionamento harmonioso do sistema interligado.

Por fim, é apresentada a estratégia utilizada para a modelagem computacional desse regulador, bem como o diagrama de blocos utilizado na modelagem.

3.2- FUNÇÕES DA MÁQUINA PRIMÁRIA E DO REGULADOR DE VELOCIDADE

De acordo com [15], denomina-se por máquina primária, qualquer unidade responsável pelo acionamento de um gerador de energia elétrica. Essa máquina geralmente vem associada com uma unidade de controle, o regulador de velocidade, responsável pelo ajuste do suprimento de potência mecânica ao eixo do grupo gerador-máquina primária, de acordo com a necessidade da potência ativa demandada nos terminais do gerador.

Este mecanismo de regulação automática de velocidade atua no sentido de elevar ou reduzir a potência do grupo de geração, quando sua velocidade (ou freqüência) se afasta da velocidade de referência.

Outra atribuição do regulador de velocidade consiste em realizar a correta distribuição de potência entre as máquinas de um sistema multi-máquinas.

3.3- O MECANISMO DE ATUAÇÃO DO REGULADOR DE VELOCIDADE

O sistema de regulação de velocidade constitui a malha de controle primário do Controle Automático de Geração (CAG) de um sistema elétrico. O controle de potência ativa em um sistema de potência é realizado, basicamente, pelo controle dos torques de acionamento das máquinas primárias do sistema.

A figura 3.1 ilustra um exemplo de um sistema de regulação de velocidade de uma turbina a vapor. Ao se controlar a posição $\mathbf{x_E}$ da válvula de controle (ou registro, no caso de turbinas hidráulicas), pode-se exercer controle sobre a admissão de vapor (ou água) a alta pressão através da turbina, e , portanto, sobre o conjugado da turbina. Para um amplificador hidráulico, a entrada é a posição $\mathbf{x_D}$ da válvula piloto e a saída é a posição $\mathbf{x_E}$ do pistão principal. Um pequeno movimento para baixo do ponto **E**, aumenta o fluxo de vapor por uma quantidade que, se medida em potência de válvula, representa um incremento ΔP_v. Este aumento de fluxo é traduzido pelo incremento de potência na turbina, ΔP_T .

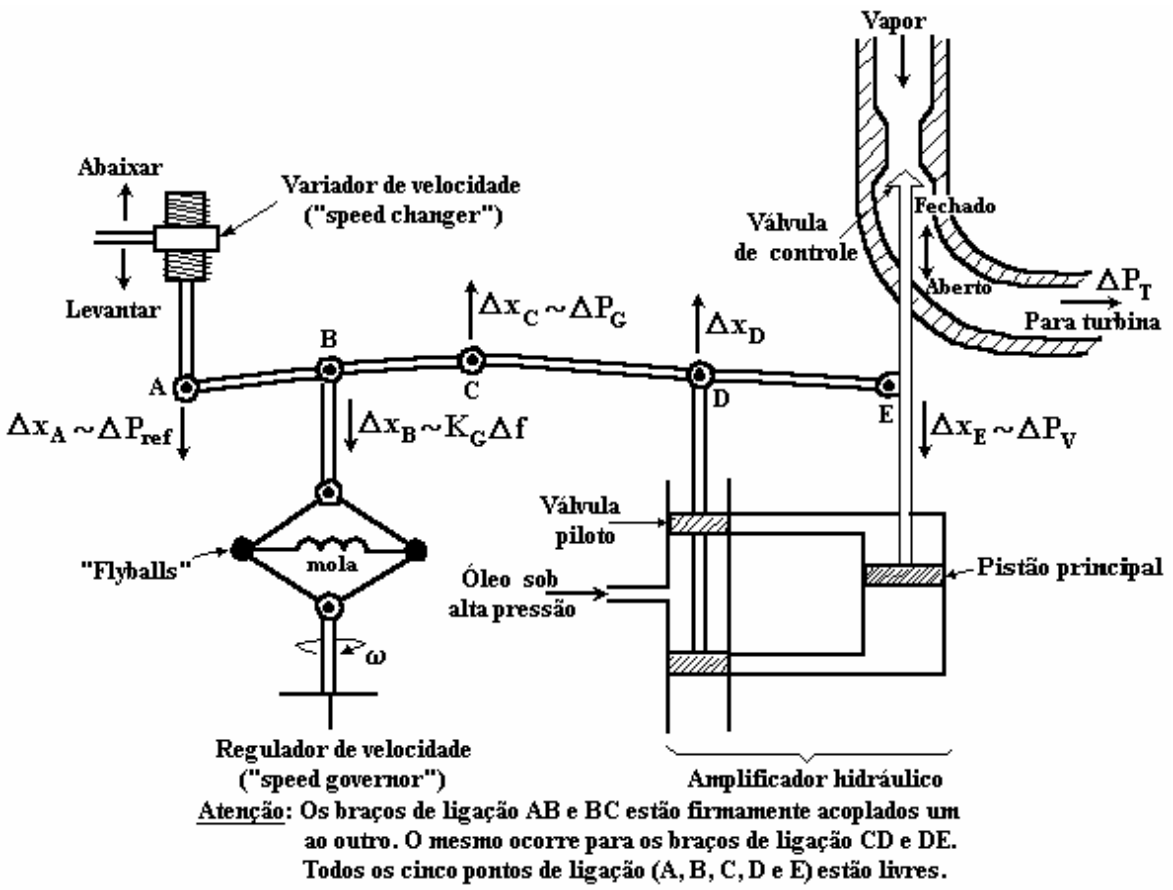


Figura 3.1- Exemplo ilustrativo de sistema de regulação de velocidade de uma turbina a vapor.

A válvula piloto $\mathbf{x_D}$, ainda na figura 3.1, pode ter sua posição alterada, através do sistema de ligação ou conexão dos braços, de três formas:

- Diretamente, pelo variador de velocidade. Um pequeno movimento para baixo do ponto de conexão A (Δx_A) corresponde a um acréscimo na potência de referência, ΔP_{ref};
- Indiretamente, por realimentação, devido a mudanças de posição do ponto de ligação E do pistão principal (Δx_E), resultantes de variações na pressão do vapor;
- Indiretamente, por realimentação, devido a mudanças de posição do ponto de ligação B (Δx_B), resultantes de variações de velocidade.

3.4- TIPOS DE MÁQUINAS PRIMÁRIAS

As máquinas primárias normalmente utilizadas para prover potência motriz em sistemas de geração de energia elétrica são: turbinas hidráulicas, a vapor e a gás, além dos motores a diesel.

As turbinas hidráulicas e a vapor são as máquinas mais utilizadas em geração de potência de grande escala (sistemas interligados). Já a turbina a gás e os motores a diesel são utilizados com maior freqüência em sistemas industriais e/ou isolados, tais como em plataformas marítimas de prospecção de petróleo, ilhas ou navios, dentre outros.

As características mais relevantes dessas turbinas serão apresentadas nos itens a seguir.

3.4.1- TURBINAS A VAPOR

Esta máquina converte a energia armazenada em forma de vapor em alta pressão e alta temperatura, em energia girante. Esta é convertida em energia elétrica pelo gerador. A fonte de aquecimento, que supre o calor para a caldeira, pode ser um forno à combustível fóssil (carvão, óleo e gás) ou até mesmo um reator nuclear.

Essas turbinas consistem de dois ou mais estágios, chamados cilindros, acoplados em série e que operam em várias pressões e temperaturas diferentes. Os cilindros são conectados por tubulações apropriadas e, em muitos conjuntos, o vapor é reaquecido na caldeira entre dois cilindros de pressão alta e intermediária.

A figura 3.2 ilustra o arranjo típico de uma turbina a vapor com reaquecimento.

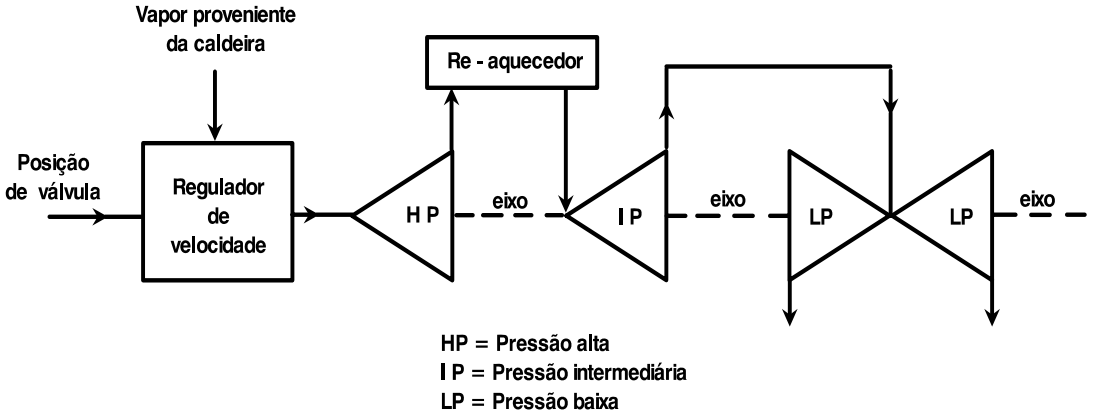


Figura 3.2- Arranjo típico de uma turbina a vapor com reaquecimento.

O vapor flui através dos cilindros, reaquecedor e tubulações com velocidade finita. Em diagrama de blocos isto é equivalente a incluir atrasos de tempo no sistema. O reaquecedor apresenta uma constante de tempo maior. Em conjuntos maiores, o reaquecedor pode reter vapor correspondente a vários segundos de potência plena do gerador. Isso implica em um atraso para o sistema de controle, pois esta energia está armazenada.

A inércia predominante do total do conjunto turbina-gerador, é a inércia da turbina a vapor, cuja rotação nominal é, em geral, de 3600 ou 1800 rpm (para geradores de 2 ou 4 pólos, respectivamente). Os valores das constantes de inércia, que correspondem ao vapor armazenado na turbina, variam de acordo com o tamanho do conjunto, e são tipicamente compreendidos na faixa de 1 a 6 segundos.

3.4.2- TURBINAS HIDRÁULICAS

Nestas turbinas, em geral, grandes quantidades de potência são envolvidas, em forma de água em trânsito do reservatório superior para a turbina. As características de controle de uma turbina hidráulica são similares às da turbina a vapor. Porém, a inércia de uma turbina hidráulica é menor que a de

uma turbina a vapor de mesma potência. Isto tem implicações claras em estudos de estabilidade transitória e rejeição de carga.

Alguns aspectos que afetam o comportamento da turbina hidráulica são: a característica da coluna de água que alimenta a turbina (isto é, a inércia da água), a compressibilidade da água e a elasticidade da parede tubular do conduto forçado [15].

A figura 3.3 mostra os principais itens que compõem uma turbina hidráulica. Pode-se observar aí o conjunto turbina-gerador de eixo vertical, o conduto forçado e os reservatórios a montante e a jusante do rio. A velocidade da água, U, varia diretamente com a abertura das palhetas diretoras, G, e com a raiz quadrada da coluna de água, H. A potência da turbina, P_m, é proporcional ao produto da altura da coluna de água pela velocidade do fluxo de água, U.

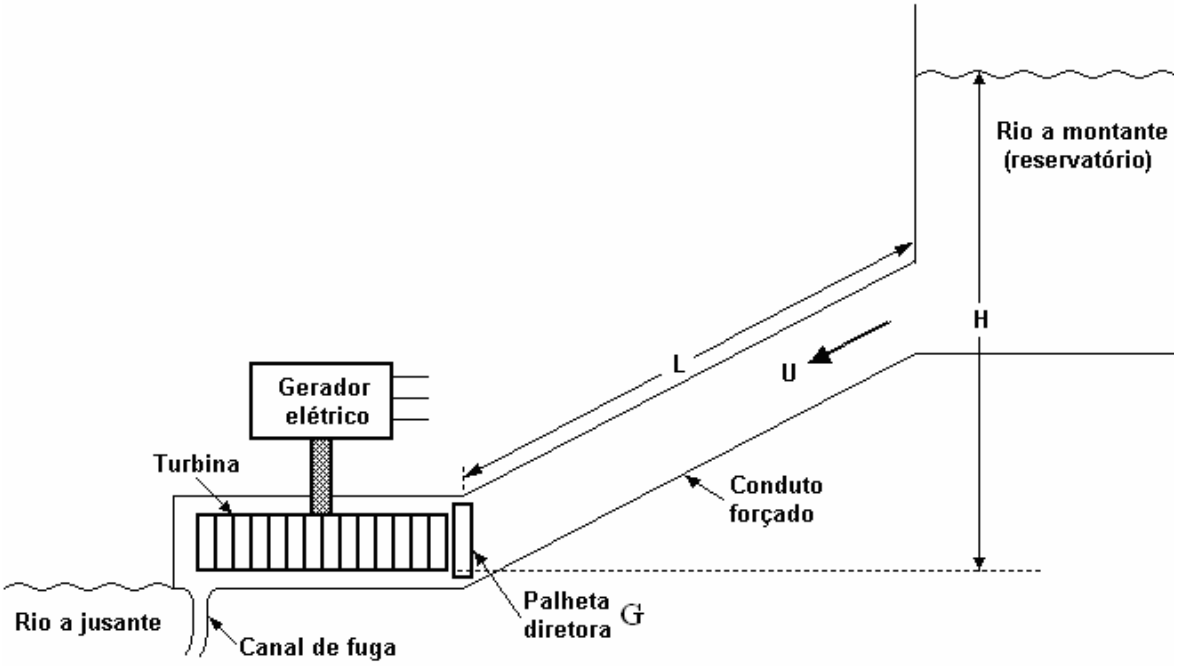


Figura 3.3- Principais itens de uma usina hidroelétrica.

3.4.3- TURBINAS A GÁS

A figura 3.4 ilustra um arranjo típico de uma turbina a gás. Esta possui várias qualidades como uma fonte primária de energia, tais como: ausência de componentes de movimento alternado, em oposição ao movimento dos

pistões dos motores diesel, proporcionando assim uma operação suave e livre de vibrações. Além desse fato, o contínuo desenvolvimento da tecnologia de fabricação destas máquinas tem proporcionado progressos em sua aerodinâmica, nos tipos de materiais empregados e nas técnicas de fabricação, o que resulta numa maior compactação e confiabilidade destas máquinas.

As constantes de tempo envolvidas são geralmente menores do que aquelas relativas às turbinas a vapor e hidráulicas. Para grandes sistemas interligados, com predominância de turbinas hidráulicas e a vapor, as dinâmicas dos conjuntos geradores movidos à turbina a gás não são importantes no contexto total do sistema, sendo considerada apenas em problemas locais.

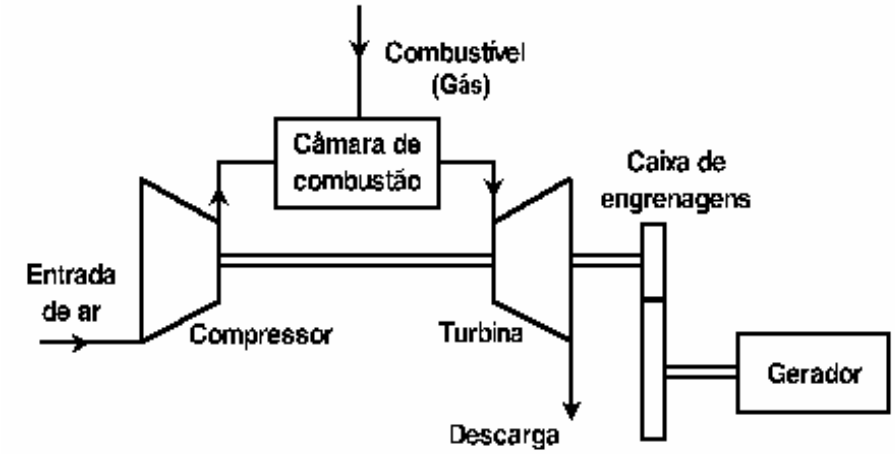


Figura 3.4- Arranjo típico de uma turbina a gás.

3.4.4- MOTORES DIESEL

Este ainda é o mais eficiente sistema de queima de combustível líquido já desenvolvido. Em sua forma turbinada, o motor diesel tem sido extensamente aplicado em sistemas de geração de potência elétrica de navios e também em plataformas marítimas de produção de petróleo. Em aplicações clássicas de geração de potência, a velocidade típica de funcionamento dessas

máquinas se encontra na faixa de 100 a 1000 rpm, tendo capacidade variando de 1 a 10 MW.

Esta máquina apresenta uma alta inércia e resposta lenta. Dessa forma, a potência de saída durante transitórios é substancialmente constante. Em conseqüência, as mudanças de carga são realizadas com lentidão. A capacidade de sobrecarga dos motores a diesel é pequena e súbitos aumentos de carga podem resultar em perda de sincronismo. Da mesma forma, grandes reduções de carga levam a velocidades excessivas. O sistema de controle pouco pode ajudar para compensar estes aspectos.

A título de ilustração, a figura 3.5 mostra o esquema básico de um motor diesel turbo- carregado (turbo-diesel) impulsionando um gerador através de uma caixa de engrenagens.

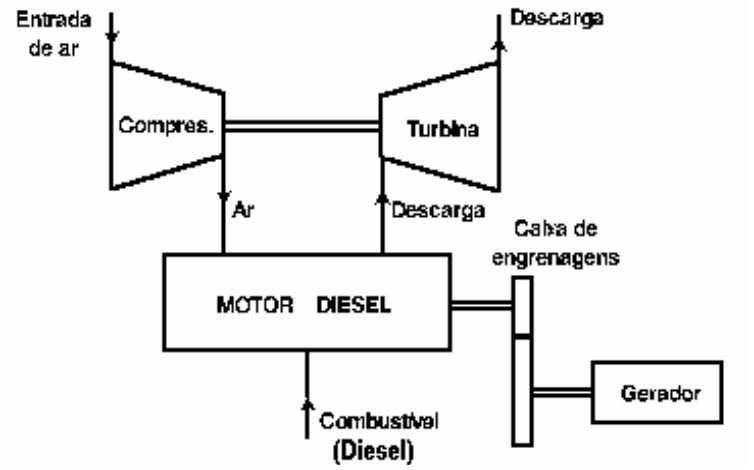


Figura 3.5- Arranjo típico de um motor diesel.

3.5- TIPOS DE REGULADORES DE VELOCIDADE

Para que se possam ter dois ou mais geradores CA alimentando uma mesma carga, torna-se necessário operá-los em paralelo. Neste sentido, será necessário ter um controle de velocidade bastante preciso, pois é necessário sincronizar a velocidade e o deslocamento elétrico de fase da unidade que entrará em operação com aquelas que já estão suprindo potência. Aliado a esse fato, a tensão terminal dessa unidade geradora deve também se igualar

com a do barramento. Quando ambas, a velocidade e a tensão, são satisfatórias, um sincronizador é usado para comparar a fase. Assim, o disjuntor somente será fechado quando os sistemas estiverem "em fase". Em seguida, o regulador de velocidade ajusta a máquina que está entrando em operação, ao nível requerido de carregamento.

Com o fim de se garantir uma melhor divisão de carga entre as unidades geradoras em paralelo, os reguladores devem incorporar uma característica denominada de "inclinação" ou "queda de velocidade" (ou *droop*, em inglês). A figura 3.6 ilustra o comportamento da queda de velocidade com o aumento da potência gerada por um gerador operando em um sistema elétrico.

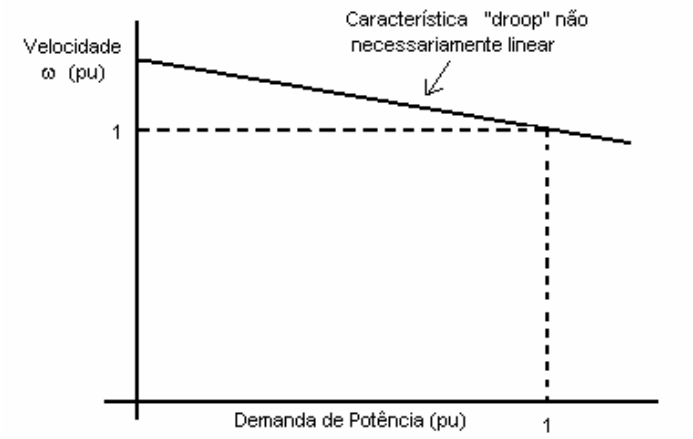


Figura 3.6- Comportamento típico da queda de velocidade com o aumento da potência gerada por um gerador operando em um sistema elétrico.

No Brasil e nos Estados Unidos, a inclinação desta curva característica é fixada em 5%. Assim, ao se carregar um gerador a vazio até plena carga (portanto, uma variação de carga da ordem de 100%) haverá uma queda de velocidade de 5% (supondo a característica linear). Na Europa o valor normalmente empregado é de 4%.

A figura 3.7 ilustra duas máquinas com característica do tipo "inclinação" alimentando uma carga comum. Como as duas máquinas estão operando na mesma velocidade, é evidente que, com as condições mostradas

nesta figura, as máquinas primárias irão compartilhar a carga de forma desigual. Para que haja uma distribuição equânime da carga, ou para satisfazer às especificações nominais das máquinas, a característica de tipo "inclinação" de cada máquina e seu regulador devem ser idênticas.

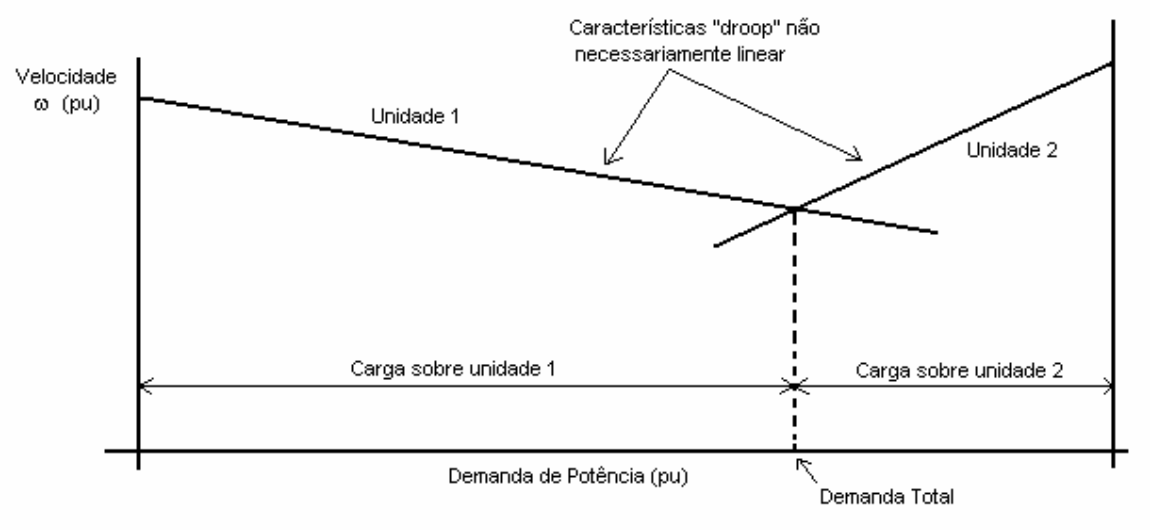


Figura 3.7- Diagrama esquemático de 2 máquinas operando em paralelo com característica tipo "inclinação" distintas suprindo uma carga comum.

Ao se utilizar regulação de velocidade convencional, é essencial que as máquinas primárias e reguladores das unidades de um sistema interligado, ou pelo menos de uma unidade, opere com uma "inclinação". Quando uma máquina opera sem "inclinação", ela usa uma característica chamada de isócrona. A figura 3.8 ilustra esse tal característica.

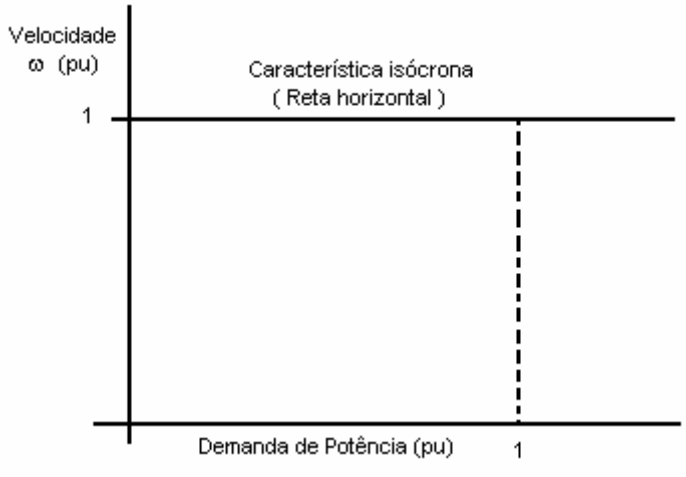


Figura 3.8- Característica isócrona de um gerador.

Considere, por exemplo, um sistema constituído de duas unidades, uma operando com "inclinação" e a outra operando com característica isócrona, conforme ilustrado na figura 3.9.

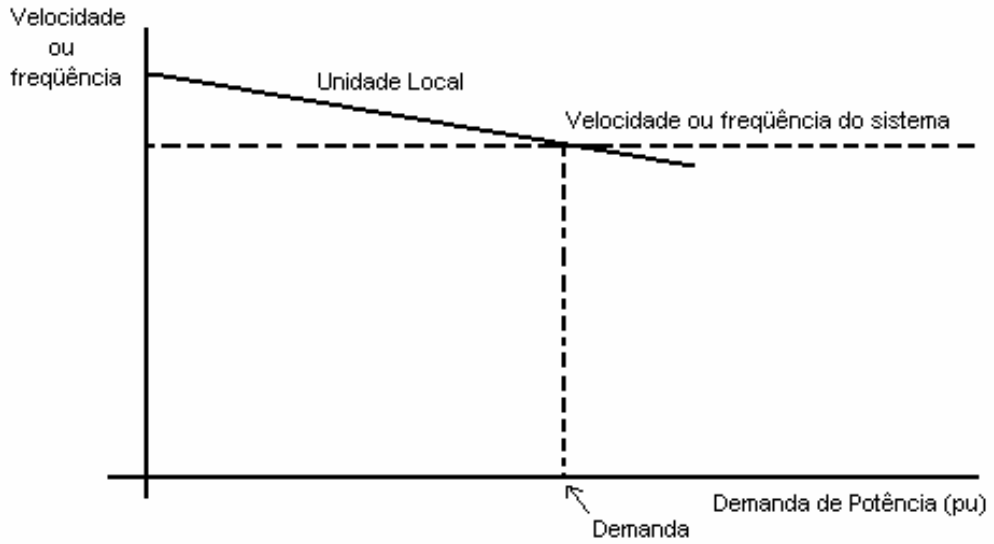


Figura 3.9- Diagrama representativo para dois geradores operando em paralelo, uma com característica de tipo "inclinação" e outra isócrona.

Observe que a unidade isócrona opera numa mesma velocidade para todas as cargas, e que quando a demanda de carga variar, a segunda unidade, que opera com "inclinação", porém acoplada à primeira unidade, somente pode operar em um único valor de velocidade. Portanto, para garantir o

paralelismo, a unidade que apresenta a característica de tipo “inclinação” deve operar em uma única velocidade e carga, e a variação de carga somente pode ser atendida pela máquina com característica isócrona.

Ressalta-se que se as duas máquinas estivessem operando de forma isócrona, ambas tentariam suprir a demanda total de carga. Dessa forma o resultado líquido seria que uma prevaleceria (funcionando como gerador) e a outra iria motorizar. Isto se deve ao fato de não existir ponto de cruzamento quando as duas características têm inclinação nula ou são isócronas.

Para grupos geradores operando em paralelo com o sistema da concessionária, frequentemente se encontra uma máquina operando de forma isócrona e a outra em “inclinação”.

Na figura 3.9, a concessionária de energia é representada pela curva isócrona. Portanto, se o grupo gerador local é operado com “inclinação”, enquanto a freqüência da rede permanecer constante ele fornecerá uma potência de saída constante. Assim, quaisquer variações de carga serão supridas pela concessionária.

3.6- ARRANJO TÍPICO DE UM SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE

A figura 3.10 ilustra um arranjo básico de um regulador de velocidade. Ambos os modos de operação (isócrono e de queda de velocidade) podem ser modelados por este esquema.

Cabe aqui ressaltar, novamente, que se utiliza a característica de queda de velocidade quando se requer o controle do fluxo de potência entre duas ou mais máquinas. Para a operação com uma máquina isolada qualquer um dos modos pode ser selecionado. Porém a operação isócrona possui a vantagem de restaurar a freqüência ao valor de referência após uma variação de carga.

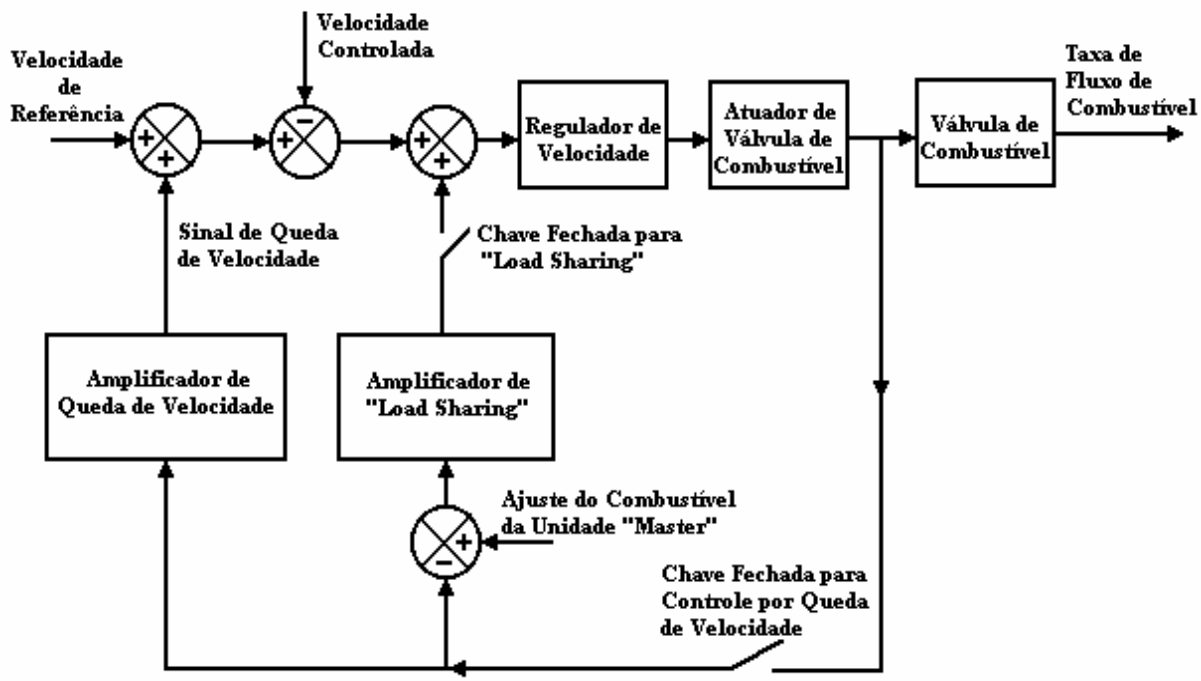


Figura 3.10- Arranjo básico de um regulador de velocidade.

3.7- CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MÁQUINAS PRIMÁRIAS

As máquinas primárias utilizadas para geração de potência elétrica não somente diferem em suas características construtivas, mas também nas operacionais. Tal fato influencia no projeto do dispositivo de controle de velocidade de cada tipo. Por isso, quando da escolha da representação mais adequada para simulação computacional de qualquer destas máquinas, vários fatores devem ser levados em consideração.

Listam-se abaixo os principais fatores a serem analisados quando da representação computacional de máquinas primárias:

- **Compatibilidade (ou incompatibilidade) com os detalhes de outros componentes do sistema.** Dessa forma, não é necessário partir para uma modelagem extremamente detalhada de uma máquina primária se algum componente importante do sistema (ex: o próprio gerador) tiver uma representação bem mais simples.

- **A precisão requerida para toda a simulação.** O componente mais importante do sistema é que deverá determinar o grau de precisão de toda a simulação.
- **A disponibilidade de dados confiáveis.** Não se deve ater em aprimoramentos de modelo se as informações requeridas forem incompletas e/ou imprecisas.
- **O custo total da simulação.** Deve-se incluir os tempos gastos nos processamentos de casos com o modelo adotado e a utilização abusiva de memória de computador para a simulação.

De acordo com as orientações anteriores, procedeu-se à implementação do regulador de velocidade no programa de simulações digitais, *ATP*, assunto do próximo item.

3.8- MODELAGEM COMPUTACIONAL DO REGULADOR DE VELOCIDADE NO ATP

A estratégia utilizada para a implementação computacional do regulador de velocidade foi a mesma adotada quando da modelagem do regulador de tensão, isto é: a partir da função de transferência, malha de controle do regulador, houve a construção do algoritmo no software, utilizando para isso as ferramentas computacionais específicas que aquele, software, disponibiliza. Abaixo é feita uma breve descrição do procedimento adotado para a implementação do regulador de velocidade.

Inicialmente identificam-se as funções de transferência representativas dos reguladores, as quais correspondem a equações diferenciais de primeira ordem. De um modo geral, a solução de qualquer uma destas equações pode ser obtida através da função de transferência genérica mostrada na figura 3.11.

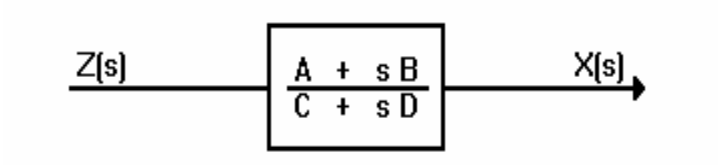


Figura 3.11- Função de transferência genérica.

A figura 3.12 ilustra uma função de transferência comumente empregada em sistemas de controle, a qual é mais completa do que aquela apresentada na figura 3.11.

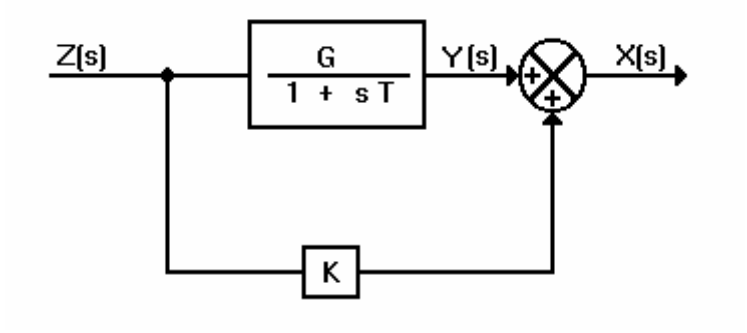


Figura 3.12- Arranjo de função de transferência comumente empregada.

O sistema da figura 3.12 pode ser representado, no domínio da freqüência, pelas seguintes equações:

$$Y(s) = \frac{G}{\mathbf{1} + sT} Z(s) \tag{3.1}$$

$$X(s) = kZ(s) + Y(s) \tag{3.2}$$

Já no domínio do tempo, essas equações podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{\mathbf{1}}{T}\left[Gz(t) - y(t)\right] \tag{3.3}$$

$$x(t) = kz(t) + y(t)$$

(3.4)

As equações (3.3) e (3.4) estão representadas na forma de "equações de estado", a qual é considerada a mais adequada para implementação computacional e para solução através de algum dos métodos numéricos de integração existentes. Na *TACS* entra-se com a função de transferência do regulador. Dessa forma, internamente, essa rotina soluciona a equação no domínio de **S** e posteriormente retorna os valores obtidos ao *ATP* no domínio do tempo.

Utilizando-se a estratégia descrita anteriormente, parágrafos anteriores, procedeu-se à modelagem do regulador de velocidade no *ATP*. A figura 3.13 apresenta o diagrama de blocos empregado para representar um modelo simples de um regulador de velocidade associado à turbina a vapor (se T4 = 0) ou a uma turbina hidráulica (se T4 $\neq$ 0).

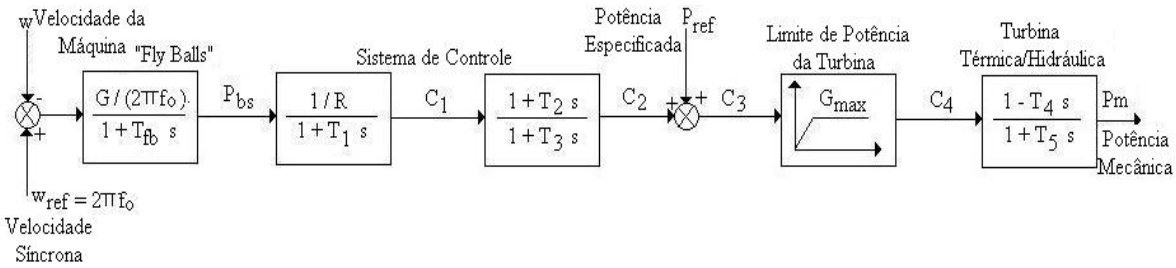


Figura 3.13- Modelo de um regulador de velocidade de turbina térmica/hidráulica.

No Anexo III são apresentados os dados das constantes de tempo, bem como os ganhos para o regulador de velocidade empregado na figura 3.13.

A função de transferência que representa o regulador de velocidade, foi implementada utilizando, na terminologia do programa *ATP*, as chamadas *TACS subroutines*. Estas subrotinas apresentam códigos e funções próprias para a correta e eficiente modelagem de funções lógicas e de malhas de sistema de controle.

No Anexo IV é apresentado o código fonte do algoritmo implementado para a modelagem do regulador de velocidade.

3.9- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou o papel do regulador de velocidade no comportamento dinâmico do sistema elétrico de potência, sendo que suas principais funções foram apresentadas. Tal dispositivo de regulação automática de velocidade atua no sentido de elevar ou reduzir a potência mecânica do grupo de geração, quando sua velocidade se afasta daquela de referência, além de realizar a correta distribuição de potência entre as máquinas de um sistema multi-máquinas.

Foi apresentado, de forma simplificada, o mecanismo de atuação de um regulador de velocidade, item 3.3. Neste observa-se que a válvula de controle $\mathbf{x_E}$ é a responsável pelo gerenciamento de admissão de vapor, ou água (para turbinas hidráulicas), de acordo com as variações de carga do sistema.

Os principais tipos de máquinas primárias, utilizadas para acionar geradores de energia elétrica, foram brevemente apresentados objetivando fornecer ao leitor uma visão geral do princípio de funcionamentos dessas.

No item 3.5 mostrou-se como o regulador de velocidade contribui para a melhoria da resposta do sistema quando do aumento ou rejeição de carga, bem como da necessidade de se estabelecer certo atraso na resposta desses reguladores quando da operação em paralelo de unidades geradoras. O objetivo desse atraso, chamado de “inclinação”, inserido na malha de controle, consiste em realizar a correta distribuição de carga entre os geradores que operam em paralelo no sistema de potência. Dessa forma, a velocidade de operação do sistema elétrico de potência permanece estável quando da rejeição ou aumento de carga, desde que a concessionária de

energia opere de forma isócrona. Portanto, toda variação de carga será suprida pela concessionária de energia elétrica.

Devido ao fato das máquinas primárias diferirem entre si pelo aspecto construtivo e operacional, o dispositivo de controle de velocidade se torna específico para cada máquina em particular. Contudo, quando da representação computacional da máquina primária, deve-se verificar a compatibilidade daquela com os demais elementos do sistema, a precisão requerida bem como a confiabilidade dos dados.

Foi apresentada a estratégia adotada para a representação computacional do regulador de velocidade no *ATP*. Para isto, utilizou-se um modelo matemático, figura 3.13, e este foi devidamente implementado no *software*.

Pode-se concluir que para uma correta análise da resposta dinâmica de um sistema de geração independente de energia elétrica, conectado em paralelo com a rede de distribuição da concessionária de energia, faz-se necessária à modelagem do regulador de velocidade para se analisar os impactos na velocidade (freqüência) do sistema.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS EFEITOS DA PRESENÇA DE GERAÇÃO INDEPENDENTE EM UM SISTEMA ELÉTRICO

4.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo procura destacar os efeitos da operação em paralelo de uma rede de distribuição de uma concessionária de energia elétrica, com um produtor independente (PI). Ressalta-se que esse PI utiliza a energia proveniente da biomassa, bagaço mais a palha da cana, para a produção de energia elétrica, pois se tratam de matérias primas de destaque [26].

A análise se dará na forma de estudos de casos, os quais utilizarão as modelagens desenvolvidas. Estes estudos compreenderão o monitoramento dos níveis de tensão no *Ponto de Acoplamento Comum* (PAC), antes e após a entrada do produtor independente, bem como análises de rejeição de carga, abertura de linha de distribuição e curtos-circuitos trifásicos.

4.2- LIMITES DE REFERÊNCIA PARA OS NÍVEIS DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Atualmente, existem várias normas propostas para a regulamentação dos limites de variação da tensão em regime permanente, elaboradas por empresas concessionárias de energia elétrica do Brasil e do exterior. Algumas destas normas apresentam características próprias no que tange aos limites típicos de variações de tensão e duração das mesmas.

Há também padrões estabelecidos pela *Resolução 505 da Agência Nacional de Energia Elétrica* – ANEEL – resolução 505 [22], publicada em 26 de novembro de 2001. Esta Resolução indica os padrões e valores típicos aceitáveis para as variações de tensão em regime permanente, para toda a rede. Os padrões discriminados levam em consideração a tensão nominal de operação do sistema. Além disso, a referida resolução apresenta procedimentos para efetuar os cálculos de transgressões de tensão, introduz os conceitos de afundamento momentâneo de tensão e elevação momentânea de tensão, entre outros conceitos. Outro fator relevante consiste no fato desta resolução especificar todos os procedimentos para se realizar a medição e o tratamento das medidas realizadas, quando da reclamação do consumidor, para eventuais problemas na magnitude das tensões elétricas em regime permanente.

As tabelas 4.1 e 4.2 ilustram os valores de referência para os níveis de tensão encontrados nesta dissertação de acordo com [22].

Tabela 4.1- Limites de variações de tensão em regime permanente para tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

Classificação da tensão de atendimento (TA)	**Faixa de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão contratada (TC)**
Adequada	$0{,}93TC \leq TL \leq 1{,}05TC$
Precária	$0{,}90TC \leq TL \leq 0{,}93TC$
Crítica	$TL < 0{,}90TC$ ou $TL > 1{,}05TC$

Tabela 4.2- Limites de variações de tensão em regime permanente para tensão nominal igual ou inferior a 1 kV.

Tensões nominais padronizadas				
Tensão nominal (TN)		**Faixa de valores adequados das tensões de leitura (TL) em relação à TN (Volts)**	**Faixa de valores precários das tensões de leitura (TL) em relação à TN (Volts)**	**Faixa de valores críticos das tensões de leitura (TL) em relação à TN (Volts)**
Ligação	**Volts**			
Trifásica	(220)/(127)	(201≤TL≤231)/ (116≤TL≤133)	(189≤TL<201 ou 231<TL≤233)/ (109≤TL<116 ou 133<TL≤140)	(TL<189 ou TL>233)/(TL<109 ou TL>140)
	(380)/(220)	(348≤TL≤396)/ (201≤TL≤229)	(327≤TL<348 ou 396<TL≤403)/ (189≤TL<201 ou 229<TL≤233)	(TL<327 ou TL>403)/(TL<189 ou TL>233)
Monofásica	(254)/(127)	(232≤TL≤264)/ (116≤TL≤132)	(220≤TL<232 ou 264<TL≤269)/ (109≤TL<116 ou 132<TL≤140)	(TL<220 ou TL>269)/(TL<109 ou TL>140)
	(440)/(220)	(402≤TL≤458)/ (201≤TL≤229)	(380≤TL<402 ou 458<TL≤466)/ (189≤TL<201 ou 229<TL≤233)	(TL<380 ou TL>466)/(TL<189 ou TL>233)

No que tange às variações de freqüência do sistema elétrico de distribuição, as referências [13,23] serão adotadas como guia para as análises a serem realizadas. As citadas referências trazem os limites de variação da freqüência permitidas e aceitáveis na ocorrência de distúrbios e em regime permanente.

Ressalta-se que o documento [23], citado acima, além de definir os limites para variação de freqüência, seja em distúrbios ou em regime permanente, também define e regulamenta itens da *Qualidade da Energia Elétrica*, tais como:

- Variações de tensão de longa ou curta duração;
- Flutuações de tensão (*Flicker*);
- Interrupções de tensão;
- Harmônicos em sistemas elétricos, etc.

Por outro lado, no que se refere ao sistema de geração independente, será adotada como padrão a referência [13], já que esta estabelece as diretrizes necessárias para a interconexão de produtores independentes de energia.

4.3- DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO

A figura 4.1 ilustra o diagrama unifilar do sistema elétrico a ser utilizado como referência para as simulações a serem realizadas. Este diagrama unifilar é bem representativo para a condição típica de geração independente interconectada com um sistema elétrico maior. Trata-se de uma rede de distribuição de energia elétrica, conectada na arra 3 (Ponto de Acoplamento Comum- PAC), através de um transformador, ao gerador independente. A representação do sistema com geração independente consistirá de um gerador síncrono (cuja máquina primária é uma turbina a vapor) e uma carga elétrica interna a este sistema dito "independente". Além de alimentar esta carga, este gerador também fornece energia para a rede de distribuição.

A rede de distribuição possui uma fonte de tensão ideal, conectada a um transformador, T1, através da barra 1. Este transformador T1 está ligado a duas linhas de distribuição de energia de 13,8 kV através da barra 2. Nesta barra, há um banco trifásico de capacitores e uma carga trifásica. As duas referidas linhas de distribuição terminam na barra 3, onde esta se conecta ao transformador T2. Na barra 3, há um banco trifásico de capacitores e uma

carga trifásica. O transformador T2 é utilizado para realizar a conexão entre a concessionária e o sistema independente. Ele é conectado a barra 4, onde está o gerador do sistema independente. Este gerador possui os valores nominais de 5 MVA, 6,6 kV. Nesta barra 4 também há um outro transformador, T3, o qual se liga à barra 5, onde se tem as cargas do sistema independente.

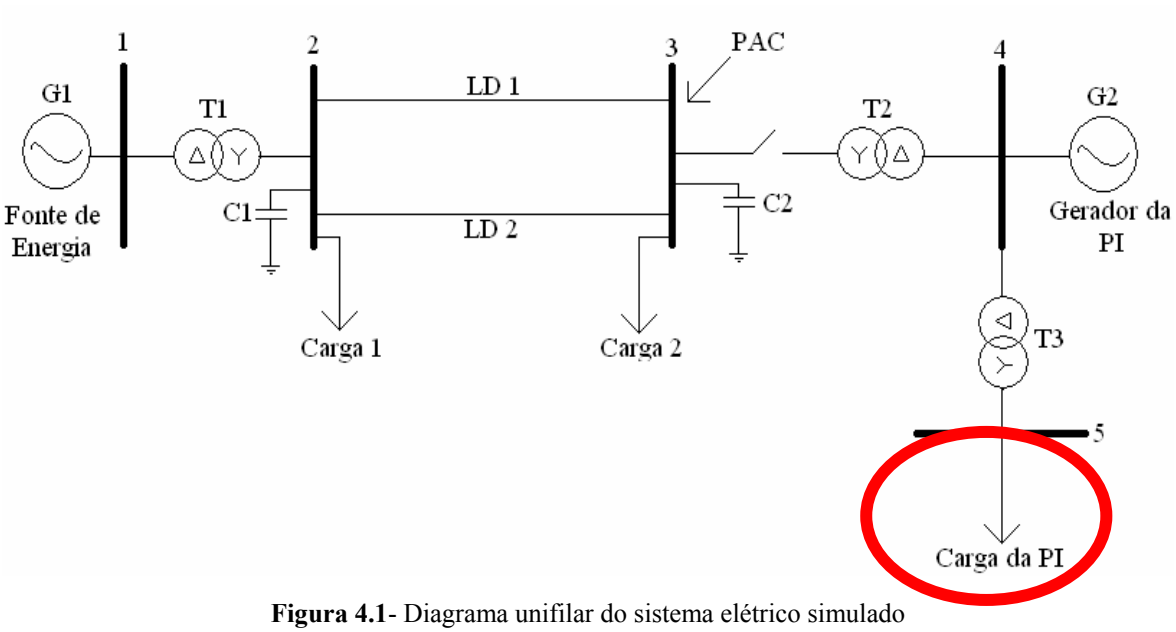


Figura 4.1- Diagrama unifilar do sistema elétrico simulado

A fonte de tensão, que é a alimentação principal do sistema de distribuição, foi implementada como sendo uma fonte trifásica ideal. Portanto, o nível de curto da barra 1 será considerado de valor infinito.

Os dados necessários para a modelagem do gerador do sistema independente (dentre outros, as reatâncias subtransitória, transitória e síncrona e as constantes de tempo) estão listados no anexo A.3. Ressalta-se que os valores descritos, no anexo em questão, foram obtidos diretamente de um fabricante, a WEG.

As tabelas 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os dados gerais de todos os componentes do sistema ilustrado na figura 1.

Tabela 4.3- Parâmetros gerais dos geradores.

Descrição	**Potência Nominal [MVA]**	**U_{ffn} [kV]**	**F.P**
G1	30	11,4	0,8 ind.
G2	5	6,6	0,8 ind.

Tabela 4.4- Parâmetros dos transformadores de potência.

Descrição	**Potência Nominal [MVA]**	**Tipo de Conexão**	**Resistência [%]**	**Reatância [%]**	**Tensão Nominal [kV]**
T1	30	Δ-Y	0	3	11,4/13,8
T2	3	Y-Δ	0	5	13,8/6,6
T3	3	Δ-Y	0	5	6,6/0,38

Tabela 4.5- Parâmetros dos bancos de capacitores.

Descrição	**Potência Nominal [MVAr]**	**Tipo de Conexão**	**U_{ffn} [kV]**
C1	5	Y	13,8
C2	8	Y	13,8

Tabela 4.6- Parâmetros das cargas do sistema.

Descrição	**Potência Nominal [MVA]**	**Tipo de Conexão**	**U_{ffn} [kV]**	**F.P**
Carga 1	12,5	Y	13,8	0,92 ind.
Carga 2	12,5	Y	13,8	0,92 ind.
Carga da Sistema independente	2,5	Y	0,38	0,92 ind.

Tabela 4.7- Parâmetros das linhas de distribuição.

Descrição	**R [Ω/Km]**	**X_L [Ω/Km]**	**Classe de Tensão [kV]**	**L [Km]**
LD 1	0,4374	0,524	15	15
LD 2	0,4374	0,524	15	15

4.4- ESTUDOS DE CASOS

As simulações computacionais foram realizadas de forma que se possa avaliar, para o sistema em análise, figura 4.1, quais são as principais implicações do produtor independente na rede da concessionária, e vice-versa. As respostas dos reguladores de tensão e velocidade também foram avaliadas para cada caso simulado.

Foi analisada a influência do regulador de tensão nos níveis de tensão do sistema da concessionária, principalmente no PAC. Isso foi realizado alterando-se os limites inferiores de operação do regulador de tensão. Para tal, serão utilizados dois limites inferiores de tensão de excitação para o regulador de tensão: U_{fmin} = 0,8 pu e 0,9 pu. Ao se utilizar U_{fmin} = 0,8 pu informa-se ao regulador que a máquina irá trabalhar com, no mínimo, 0,8 pu de tensão de excitação. Um valor menor do que este fará com que o gerador perda sua estabilidade. Além disso, com U_{fmin} = 0,8 pu, a máquina gerará uma potência reativa menor do que se estivesse com U_{fmin} = 0,9 pu. Dessa forma, o gerador contribuirá para reduzir possíveis sobretensões no PAC e na própria barra de geração, barra 4.

Já ao se utilizar U_{fmin} = 0,9 pu, a tensão final nos bornes de saída do gerador será mais elevada que no caso anterior. Isto fará com que a tensão na barra de geração, barra 4, após uma sobretensão, permaneça mais elevada. Isso contribuirá para deixar as tensões no PAC e na barra 4 mais elevadas do que para U_{fmin} = 0,8 pu, na ocorrência do distúrbio.

Os casos simulados, bem como a condição de operação do sistema, encontram-se listados a seguir:

CONDIÇÃO "A": Sistema sem a geração independente;

- Caso 1: Operação em regime permanente;
- Caso 2- Rejeição de carga na concessionária;
- Caso 3- Curto-circuito trifásico na concessionária;
- Caso 4- Saída de linha da concessionária;

CONDIÇÃO "B": Sistema com a geração independente (U_{fmin} = 0,8 pu e com U_{fmin} = 0,9 pu);

- Caso 5- Operação em regime permanente
- Caso 6- Rejeição de carga na concessionária;
- Caso 7- Rejeição de carga na geração independente;
- Caso 8- Curto-circuito trifásico na concessionária;
- Caso 9- Curto-circuito trifásico na geração independente;
- Caso 10- Saída de linha da concessionária;

CONDIÇÃO "C": Sistema com a geração independente (U_{fmin} = 0,9 pu) e com um reator de núcleo saturado instalado no PAC;

- Caso 11- Rejeição de carga na geração independente;
- Caso 12- Curto-circuito trifásico na concessionária;
- Caso 13- Curto-circuito trifásico na geração independente.

Para cada condição de operação do sistema e caso simulado, serão analisados os seguintes aspectos:

1. a magnitude das tensões nas barras 3 (PAC) e 4, que são as barras mais críticas;

2. a operação dos reguladores de tensão e de velocidade da máquina síncrona;

3. a freqüência de operação do gerador da geração independente (seu valor será comparado com o padrão estabelecido em [13,23]).

4.4.1- CONDIÇÃO "A": SISTEMA SEM A GERAÇÃO INDEPENDENTE

CASO 1: Sistema em regime permanente

Este caso é útil para se poder avaliar às condições iniciais de operação do sistema da concessionária, sem perturbações.

A figura 4.2 refere-se ao primeiro resultado obtido nas simulações para este capítulo. Esta figura ilustra a tensão eficaz, em pu, na barra 3 em regime permanente, antes da inserção da geração independente. Conforme esperado, esta tensão não apresenta nenhuma irregularidade. O valor desta tensão fase-neutro, em [V] é de 8270 V.

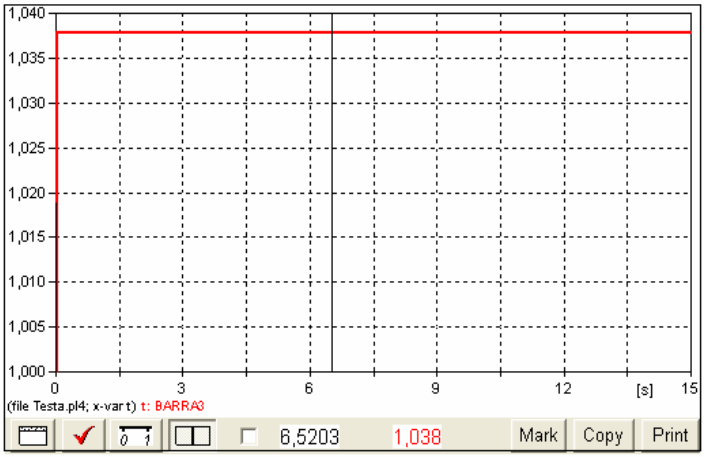


Figura 4.2- Tensão na barra 3 em regime permanente

CASO 2: Rejeição de carga na concessionária

Este caso permite identificar como se comporta o sistema da figura 4.1, mediante uma perda de carga. Para tanto, a carga 2, instalada na barra 3 do sistema, será retirada no tempo t = 6s.

A figura 4.3 ilustra o comportamento da tensão eficaz no PAC (barra 3), antes e após a retirada da referida carga. Observa-se que houve uma sobretensão extremamente expressiva, levando a tensão a atingir, no instante imediatamente após a retirada da carga 2, o valor de 1,49 pu, ou seja, 11900 V fase-neutro (20619 V fase-fase). Esta sobretensão se deve ao fato de todo o reativo absorvido pela carga 2, ser, agora, repassado para o sistema, até que um novo ponto de equilíbrio possa ser restabelecido.

g

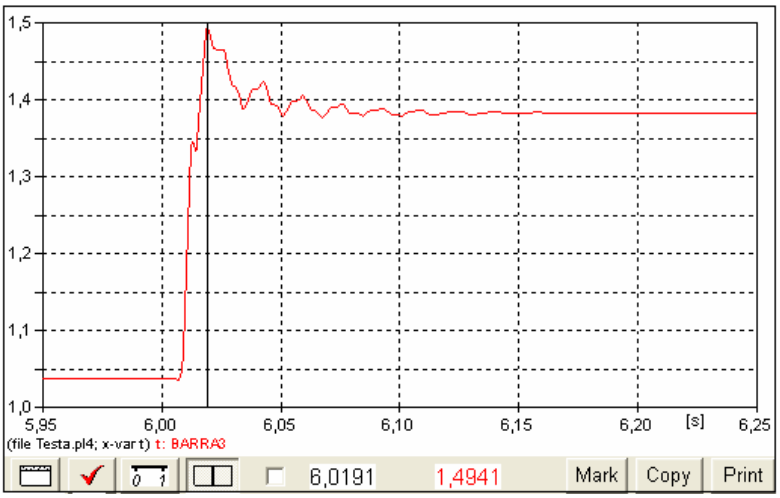


Figura 4.3- Tensão na barra 3 após a rejeição da carga 2

Após os transitórios, em t > 6,1s, a tensão fase-neutro se estabiliza em 11000 V.

As barras adjacentes também terão suas tensões variadas, porém, na barra 3, a conseqüência de tal contingência é mais expressiva.

CASO 3: Curto-circuito trifásico na concessionária

Este caso ilustra o comportamento do sistema, figura 4.1, antes e após um curto-circuito trifásico sólido, aplicado diretamente na barra 3 (PAC).

A figura 4.4 demonstra como a tensão eficaz na barra 3 se comporta. Observa-se que houve uma interrupção de tensão, pois o curto-circuito aplicado foi de caráter permanente.

Embora não ilustrado no texto, a tensão na barra 2, antes em 1,036 pu, sofreu um afundamento de 22%, e a tensão na barra 1, antes em 1,038 pu experimentou um afundamento de 16%.

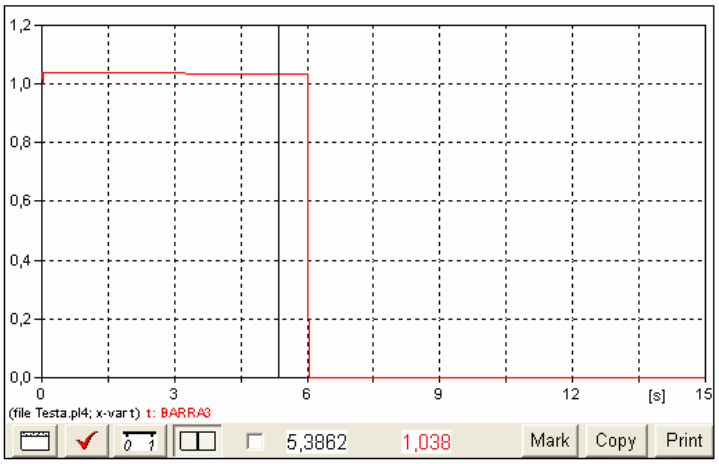


Figura 4.4- Tensão na barra 3 após a aplicação de curto-circuito trifásico

CASO 4: Saída de linha da concessionária

Ao realizar-se a análise deste caso, observa-se o comportamento do sistema da figura 4.1, mediante a abertura da linha de distribuição LD 2.

A figura 4.5 mostra o comportamento da tensão eficaz no PAC, barra 3, após a abertura da linha citada anteriormente.

Verifica-se que a tensão eficaz na barra 3 decresceu de forma significativa. Isto se deve ao fato da impedância entre a barra 2 e a barra 3 ter aumentado devido ao fim do paralelismo entre LD 1 e LD 2. Consequentemente, houve uma maior queda de tensão provocada pela impedância da linha LD 1.

Ressalta-se que apesar da tensão ter atingido um valor aproximado de 0,95 pu, ou seja, U_{fN} = 7549,86 V e U_{ff} = 13076,74 V, a mesma encontra-se dentro da recomendação técnica sugerida pela referência [22].

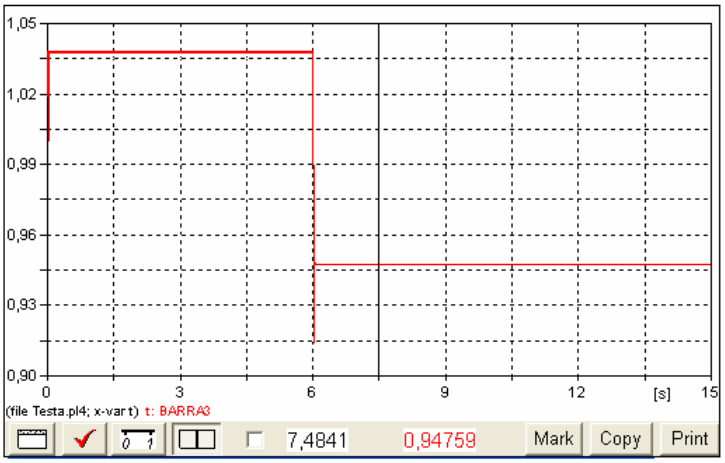


Figura 4.5- Tensão na barra 3 mediante a abertura da linha

Pode-se concluir das análises realizadas para este item (4.4.1- CONDIÇÃO "A": SISTEMA SEM A GERAÇÃO INDEPENDENTE), que:

- Em regime permanente, a tensão de operação da barra 3 encontra-se dentro da norma estabelecida para níveis de tensão no sistema de distribuição [22];
- Uma rejeição de carga na barra 3 provoca uma sobretensão extremamente elevada no sistema, sobretensão esta que atinge 1,38pu em regime permanente. Portanto, medidas preventivas com o intuito de mitigar os efeitos danosos de tal contingência precisam ser adotadas por parte da concessionária de energia. Uma possível solução seria o dimensionamento de um reator de núcleo saturado apto a absorver a energia reativa rejeitada.
- A aplicação de uma falta trifásica equilibrada na barra 3 provoca uma interrupção da tensão na mesma, e afundamentos de tensão nas barras vizinhas;
- Mediante a abertura da linha de distribuição LD 2, a tensão na barra 3 sofre um decréscimo significativo em sua magnitude, porém a mesma ainda se enquadra dentro do limite estabelecido em [22].

Após estas análises, procede-se aos estudos de contingência com a presença da geração independente, sem a conexão em paralelo do produtor independente.

4.4.2- CONDIÇÃO "B": SISTEMA COM A GERAÇÃO INDEPENDENTE (U_{fmin} = 0,8 pu e U_{fmin} = 0,9 pu)

CASO 5: Operação em regime permanente

Objetivo: *avaliar o comportamento, em regime permanente, sem a ocorrência de nenhuma contingência, do sistema da figura 4.1, quando houver a interconexão entre a concessionária e a geração independente.*

Condições iniciais: Considera-se aqui e nos demais casos subseqüentes pertinentes a este item (caso 5 até caso 10), que a concessionária possui uma carga total de 25 MVA (sem incluir as perdas), sendo que, destes, o gerador independente contribui com a geração de 1 MVA. Além desta carga de 1 MVA, o gerador ainda supre a demanda interna do sistema independente, que é da ordem de 2,5 MVA.

Análise de resultados:

A tabela 4.8 ilustra as potências ativas e reativas geradas pela concessionária (G1) e pela geração independente (G2), considerando as perdas elétricas inerentes ao sistema da figura 4.1.

Tabela 4.8- Potências ativa e reativa gerada pelas fontes do sistema

Fonte	P_G [MW]	Q_G[MVAr]
G1	24,384	5,4
G2	3,531	1,2

Sob a luz dos fatos anteriormente citados, a figura 4.6 ilustra a tensão eficaz na barra 3, PAC, em regime permanente.

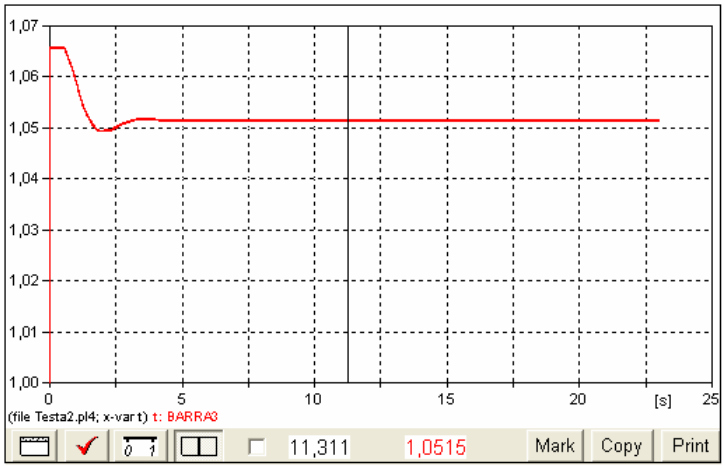


Figura 4.6- Tensão na barra 3 em regime permanente

Observa-se, nesta figura, que há um período de energização do sistema, no qual a tensão no PAC chega a 1,07 pu (14766 V fase-fase). Isto se deve a um pequeno transitório de energização do gerador da geração independente devido às condições de inicialização adotadas para as variáveis, pois agora, há a presença dos reguladores, de velocidade e tensão da máquina.

Decorrido o período de energização, o sistema atinge o regime permanente e, neste, a tensão fase-neutro no PAC estabiliza-se em 1,05 pu (14510 V fase-fase).

Comparando-se as figuras 4.2 e 4.6, nota-se que a presença da geração independente ocasionou um acréscimo no nível de tensão do PAC, pois o mesmo operava, anteriormente (figura 4.2) com uma tensão de 1,04 pu (14324,4 V fase-fase).

Prosseguindo nas observações, a figura 4.7 ilustra a tensão na barra 4 (local onde o gerador é inserido). Desta figura observa-se que, durante a inicialização do gerador do produtor independente, a tensão atinge, aproximadamente, a 1,02 pu.

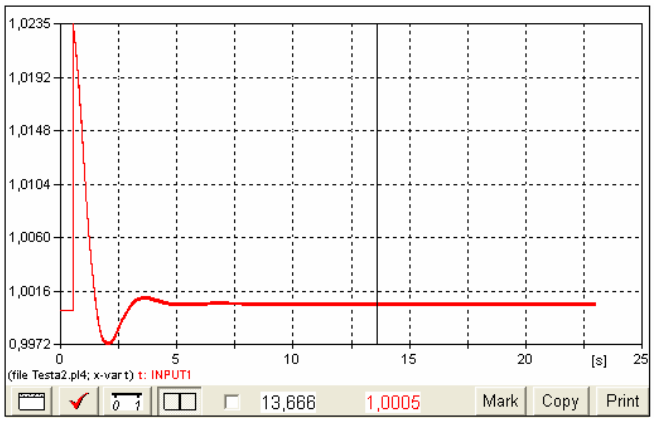


Figura 4.7- Tensão na barra da geração independente

Após o período de inicialização, o regulador de excitação atua, reduzindo a excitação da máquina. Em decorrência, surge uma pequena queda da tensão, fazendo com que o valor da tensão fique abaixo de 1,0 pu. Em seguida, o regulador entra em regime, levando a tensão na barra 4 a se estabilizar em 1,0 pu (6930 V fase-fase).

Cabe aqui ressaltar que, apesar da tensão nominal do gerador do sistema independente ser de 6600 V fase-fase, o fluxo de potência (mencionado no inicio deste tópico) requer que se estabeleça uma tensão de 6930 V fase-fase para a barra 4. Portanto, para as análises subseqüentes, 1,0 pu na barra 4 (aquela da geração independente) corresponderá a uma tensão de 6930 V fase-fase (sendo seu valor fase-neutro de 4000 V).

Em seguida, tem-se, na figura 4.8, a resposta do regulador de tensão do gerador independente. Ao comparar as figuras 4.7 e 4.8, pode-se observar o funcionamento do regulador de excitação: durante a pequena sobretensão na barra de geração, houve uma redução da excitação da máquina. Isso decorre do intuito de se manter a tensão na barra de geração em 1,0 pu.

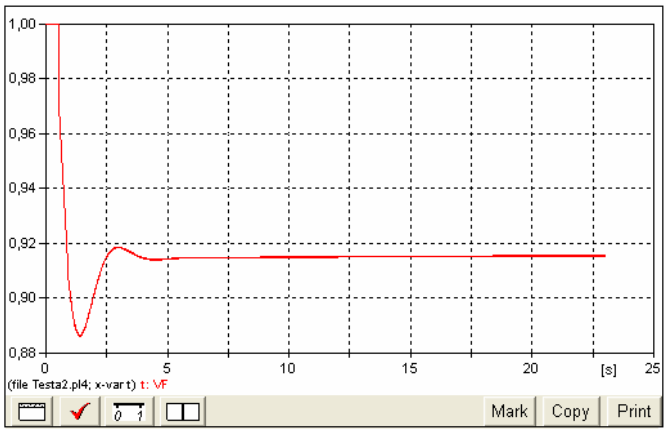


Figura 4.8- Resposta do regulador de tensão em regime permanente

Após o transitório de energização, observa-se uma pequena elevação no nível de excitação. O motivo disso é o fato da tensão na barra 4, neste período, estar abaixo de 1,0 pu. Posteriormente, com o alcance do regime permanente da tensão, nesta barra, em 1,0 pu, o regulador de excitação permaneceu estável, em aproximadamente 0,91 pu de excitação.

Portanto, observa-se que o regulador de tensão está respondendo de forma rápida e adequada às variações na magnitude da tensão da barra 4, comprovando-se, assim, sua eficácia na manutenção da tensão dentro do limite estabelecido.

A figura 4.9 ilustra a velocidade síncrona da máquina, desde o instante da inicialização da simulação, até o alcance do regime permanente. Observa-se que não houve uma variação significativa na velocidade da máquina, consequentemente o regulador de velocidade não atua de forma expressiva, sendo redundante sua apresentação nesse momento.

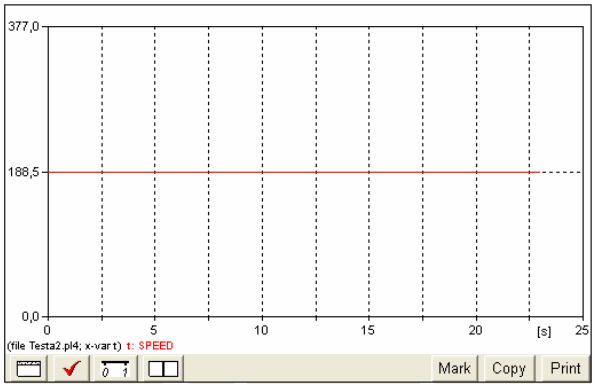


Figura 4.9- Velocidade da máquina síncrona da geração independente

Ao término da apresentação dos resultados para este caso (CASO 5: Sistema com a geração independente, em regime permanente), pode-se concluir que:

- Com a presença do PI, a tensão na barra 3, PAC, sofre um leve aumento na magnitude da tensão: esta agora passa a ser de 1,05 pu. Apesar deste acréscimo, a tensão nesta barra ainda se enquadra dentro dos valores especificados na referência [22];
- A tensão na barra do PI permanece em 1,0 pu, como foi devidamente estabelecido no controle do regulador de tensão da máquina;
- Para manter a tensão na barra da geração independente em 1,0 pu, o regulador de tensão mantém sua excitação em torno de 0,91 pu;
- A velocidade da máquina do produtor independente está perfeitamente sincronizada com a rede.

CASO 6: Rejeição de carga na concessionária

Objetivo: *avaliar as possíveis implicações na rede da concessionária e no produtor independente, da perda da carga 2 do sistema elétrico de potência.*

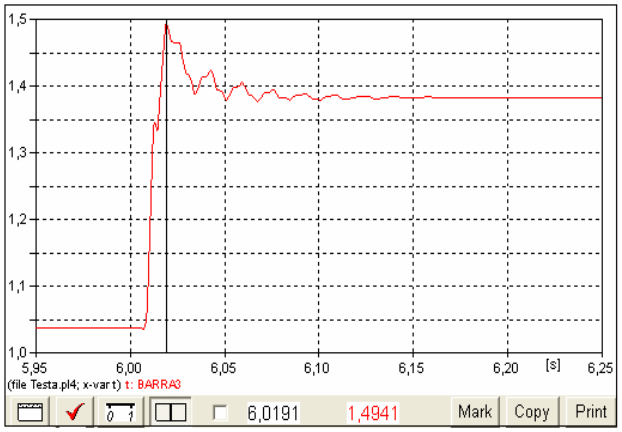
Análise de resultados:

A figura 4.10 mostra o comportamento da tensão na barra 3 após a rejeição da carga 2, em 3 condições: (a): sem a geração independente (é a figura 4.3, aqui novamente apresentada); (b): com geração independente e U_{fmin} = 0,8 pu; (c): com geração independente e U_{fmin} = 0,9 pu. Nota-se, nas figuras, que o nível de tensão no PAC fica bastante comprometido. Isso ocorre porque toda a potência reativa antes entregue à carga 2, é agora redistribuída para as demais partes do sistema elétrico. Isto causa uma sobretensão extremamente elevada para a referida barra 3.

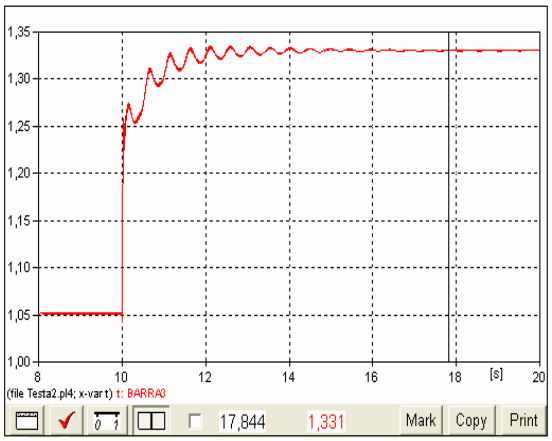
Ao analisar as figuras 4.10 (b) e (c), ambas referentes à condição em que a geração independente está presente, observa-se que, para esta última, há

uma sobretensão de regime permanente, pós-distúrbio, um pouco mais elevada do que na condição (b).

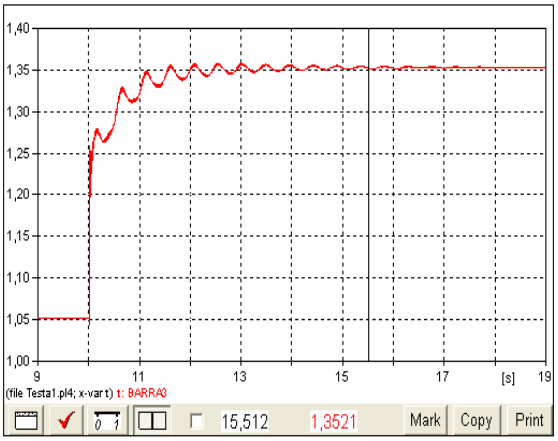
Salienta-se ainda que, apesar desta sobretensão ser expressiva, a mesma é menos severa do que aquela da figura 4.3, aqui repetida como figura 4.10 (a) (quando da ausência da geração independente): no instante imediatamente após a rejeição de carga, a tensão ilustrada na figura 4.10(c), não atinge o valor de 1,5 pu, e não se estabiliza em um valor superior a 1,35 pu como ocorre na figura 4.10 (a).



(a)



(b)



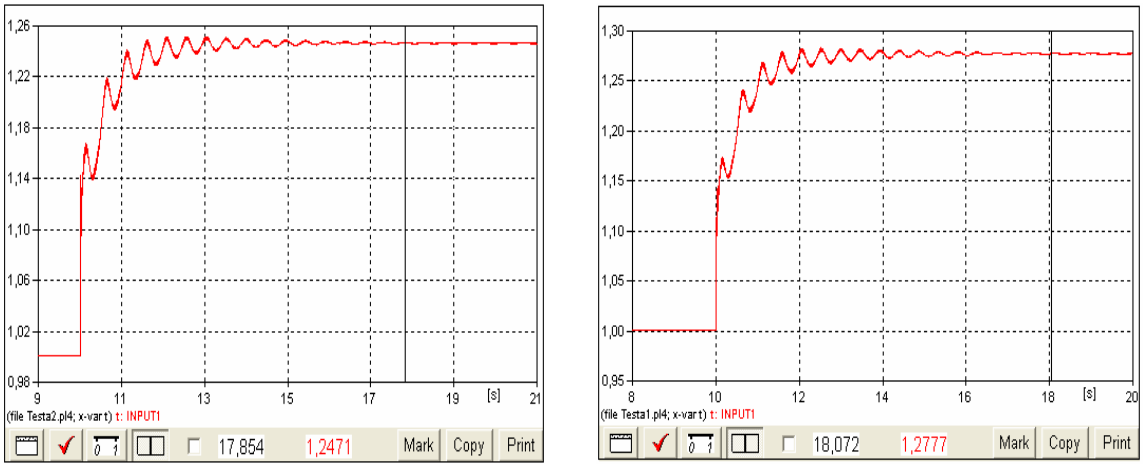
(c)

Figura 4.10- Tensão na barra 3 após a rejeição da carga 2
(a): sem geração independente; (b): U_{fmin} = 0,8 pu; (c): U_{fmin} = 0,9 pu

Pela existência da conexão em paralelo do sistema da concessionária com a geração independente, uma parcela da potência produzida pelo produtor independente, antes entregue à carga 2, flui agora para dentro de suas instalações elétricas. Isso ocorre porque o caminho a ser percorrido para suas instalações apresenta uma impedância mais baixa quando comparada com a impedância equivalente do sistema elétrico da concessionária de energia. Além disso, deve-se lembrar que a carga instalada no produtor independente é estática do tipo RL. Consequentemente, a potência ativa consumida por ela aumenta com o quadrado da tensão.

Por conseguinte, haverá uma sobretensão na barra 4 da geração independente, seguida de uma atuação do regulador de tensão para atenuar os efeitos dessa sobretensão.

A figura 4.11 apresenta o comportamento da tensão na barra da geração independente, quando da rejeição da carga 2, para duas condições: figura 4.11 (a): U_{fmin} = 0,8 pu; figura 4.11 (b): U_{fmin} = 0,9 pu. Observa-se que, para U_{fmin} = 0,8 pu, a tensão se estabiliza em 1,25 pu (8660 V fase-fase). Para U_{fmin} = 0,9 pu esta tensão é ligeiramente superior. Isto se deve ao fato do regulador de excitação da máquina não conseguir reduzir a tensão na barra de geração independente de forma mais eficiente, justamente pelo fato dessa máquina estar operando com uma excitação mínima de 0,9 pu.



(a) (b)

Figura 4.11- Tensão na barra da geração independente mediante a rejeição da carga 2.
(a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Em termos de tensões no PAC e na barra do produtor independente: no que se refere à *tensão de atendimento*, apesar da ação do regulador de tensão estas se enquadram como tensões críticas, pois ambas excedem o limite superior estabelecido de 1,05 pu, como pode ser comprovado pela tabela 4.6.

Portanto, quando da rejeição de carga no sistema da concessionária, as instalações do sistema independente estarão sujeitas a elevadas tensões e seus equipamentos serão danificados se uma proteção eficiente não atuar e desconectá-lo da rede da concessionária de energia. Contudo, de acordo com as referências [10,13], todos os custos referentes à ligação do produtor independente de energia, custos estes que envolvem proteção contra eventuais distúrbios que a rede possa ocasionar em seu sistema, e custos referentes a adequações necessárias no sistema da concessionária, deverão ser de responsabilidade do produtor independente de energia.

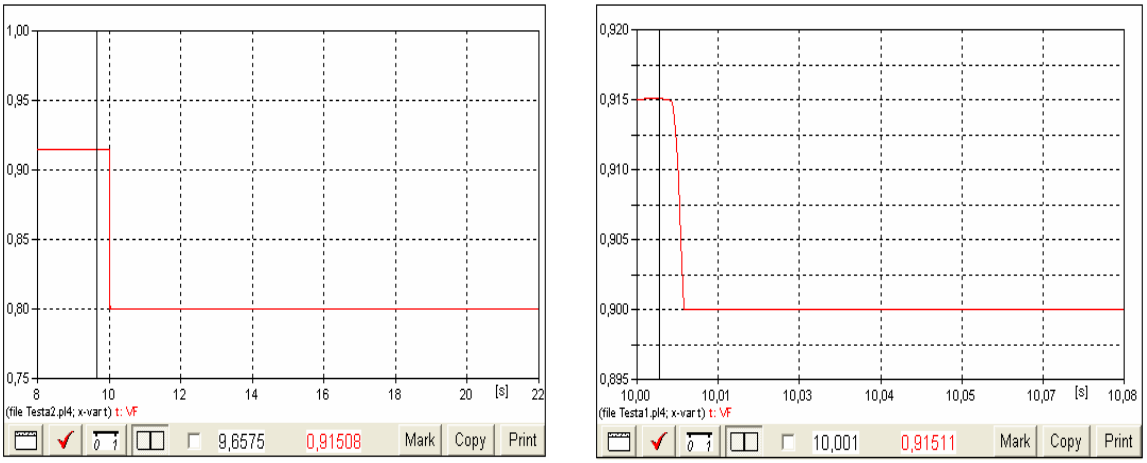
A figura 4.12 representa a resposta do regulador de tensão mediante a rejeição de carga da concessionária. Observa-se na figura 4.12 (a) que, quando a tensão na barra de geração ultrapassa a 1,0 pu, o regulador de tensão da máquina atua retirando a excitação da mesma, de tal forma a alcançar seu limite inferior de U_{fmin} = 0,8 pu. Na figura 4.12 (b) o regulador de tensão também atua de forma a retirar a excitação da máquina, alcançando assim o

seu limite de excitação inferior, agora de U_{fmin} = 0,9 pu. Observa-se em ambos os casos, que o regulador de excitação continua atuando no limite inferior, pois a tensão na barra 4, ainda se encontra acima de 1,0 pu.

Uma possível solução para evitar danos à instalação elétrica e à máquina síncrona do produtor independente, seria a especificação de um reator de núcleo saturado, a ser instalado na barra 3, PAC, para manter a tensão de operação dentro dos limites adequados. Nesta hipótese, o reator consumiria o excesso de reativo da rede, garantindo assim a não sobretensão no sistema.

Ressalta-se que antes da rejeição de carga, o produtor independente de energia fornecia 1 MVA de potência aparente à concessionária de energia, carga 2.

Contudo, com a referida rejeição desta carga, a máquina deverá acelerar, elevando a freqüência do sistema da geração independente de energia.



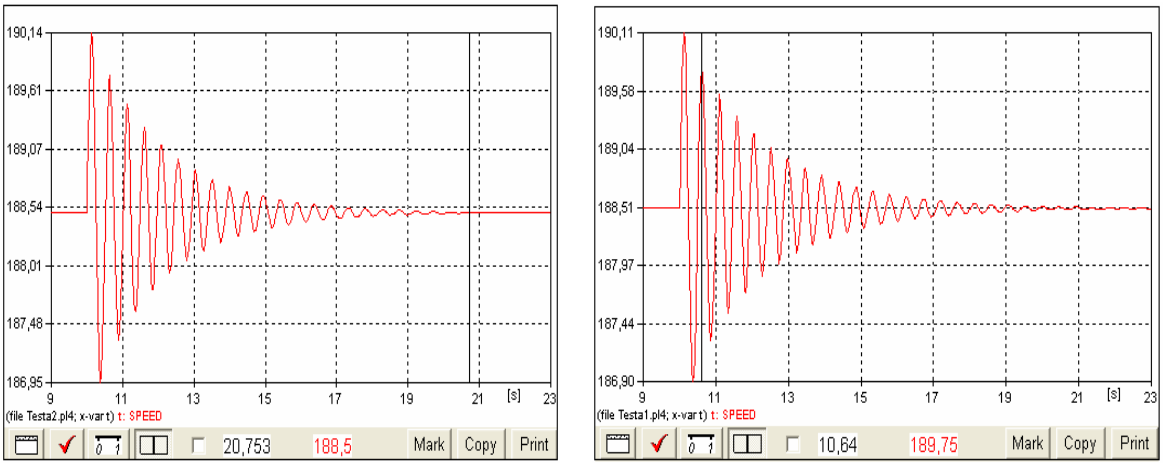
(a) (b)

Figura 4.12- Resposta do regulador de tensão mediante a rejeição de carga da concessionária. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

A figura 4.13 (a) ilustra como a velocidade da máquina (rad/s) varia devido à rejeição da carga 2: no instante imediatamente após a rejeição da carga 2, a velocidade da máquina atingiu 190,14 rad/s. Isso equivale a uma

freqüência de 60,52Hz. Observa-se que não houve uma expressiva alteração de seu valor, pois a inércia do barramento infinito ajuda a manter a estabilidade do sistema como um todo.

Já a figura 4.13 (b) ilustra a resposta em velocidade da máquina do PI, em rad/s, para um limite inferior de excitação de U_{fmin} = 0,9 pu. Observam-se praticamente as mesmas variações na velocidade para este caso se comparada às variações ilustradas pela figura 4.13 (a).



(a) (b)

Figura 4.13- Velocidade da máquina síncrona da geração independente, mediante uma rejeição de carga na concessionária. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

A referência [13] estabelece que o produtor independente deva prover meios para desconectar seu gerador do sistema da concessionária mediante situações de sobre e sub- freqüência. A proteção deve desconectar a máquina dentro de 0,5s para freqüência de 60,5Hz. Já para uma freqüência de 58,0Hz, a proteção deve retirar a máquina em 1,0s.

Constata-se pela figura 4.13 que a proteção para variações de freqüência, não atuará para a contingência aplicada, pois a freqüência não permanece por 0,5s em 60,5Hz e nem mesmo chega a atingir 58,0 Hz. A figura ilustra que o valor mínimo alcançado foi de 186,95 rad/s, o que equivale a 59,5Hz.

O sistema alcança novamente a estabilidade em t = 19s, mantendo a velocidade síncrona pré- distúrbio. Isso equivale a uma f = 60Hz.

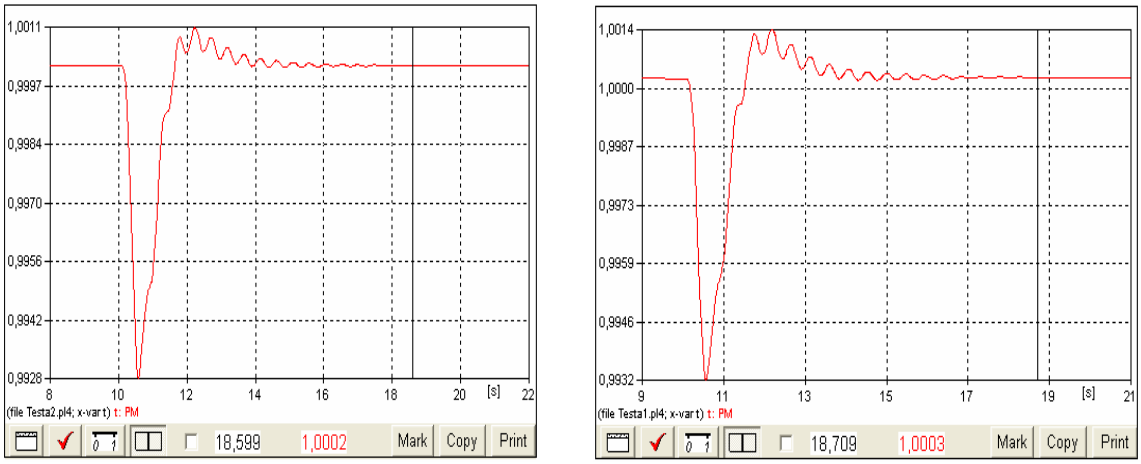
Verifica-se que houve uma pequena variação da velocidade da máquina em torno da velocidade síncrona (188,5 rad/s). Consequentemente, o erro gerado na entrada do regulador de velocidade, para atuação do mesmo, não é tão expressivo.

Dessa forma, não haverá uma expressiva atuação desse regulador visto que seus controles não serão sensibilizados de uma forma mais veemente.

Comprova-se aqui, que não houve uma expressiva alteração da freqüência do sistema da geração independente, pois a inércia do sistema elétrico de potência ajuda a manter a estabilidade como um todo, até que um novo ponto de equilíbrio seja encontrado.

Ao se comparar as figuras 4.13 (a) e (b), pode-se concluir que a oscilação da velocidade foi praticamente à mesma. Isso mostra que o limite inferior de excitação da máquina do produtor independente não influenciou significativamente na característica de velocidade da máquina. Ele influiu apenas na magnitude da tensão no PAC e na tensão da própria barra da geração independente.

No que se refere ao regulador de velocidade, as figuras 4.14 (a) e (b) comprovam que a potência mecânica aplicada permanece em torno de 1,0 pu da máquina, tendo apenas uma insignificante redução na mesma no instante imediatamente após a rejeição da carga de número 2 do sistema elétrico de potência, independentemente do valor de U_{fmin}.



(a) (b)

Figura 4.14- Potência mecânica x tempo, mediante rejeição da carga 2 (pu x s)
(a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Após as análises realizadas para esse caso (CASO 6: Rejeição de carga na concessionária, na presença do produtor independente), pode-se concluir que:

- A presença da geração independente de energia atenua os efeitos de uma rejeição de carga do sistema da concessionária, contribuindo dessa forma, para uma melhoria no nível da magnitude da tensão na situação pós-contingência. Porém, apesar de haver uma redução no nível da tensão em regime permanente no período pós-contingência, a magnitude da tensão ainda se encontra acima do limite permitido e estabelecido em [22];
- A proteção de sobretensão deverá atuar desconectando o sistema do PI da rede da concessionária, pois houve uma variação acima de 10% da tensão nominal, [13];
- Fica evidente a influência do regulador de tensão, mais especificamente das varáveis de controle de sub-excitação da máquina, na resposta em regime permanente na situação pós-distúrbio. Na situação após a aplicação da contingência, observa-se que quando a máquina trabalha com um limite inferior de excitação de U_{fmin} = 0,8 pu, a tensão em

regime é inferior a tensão final obtida para um U_{fmin} = 0,9 pu. Tal fato pode-ser devidamente comprovado nas figuras 4.10 e 4.11;

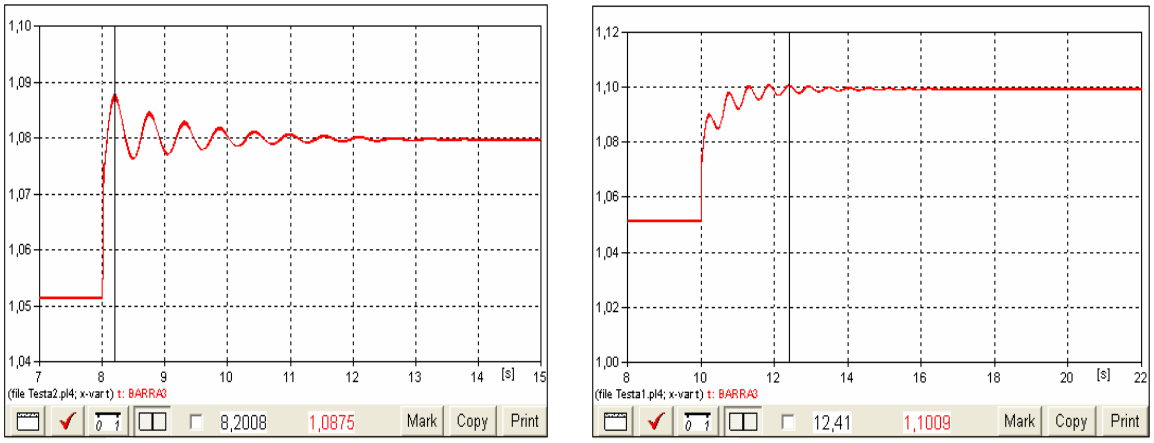
- A máquina do PI, no instante da aplicação da contingência, oscila alterando assim a freqüência do sistema do produtor independente. Porém, as oscilações transitórias são mitigadas pela inércia do sistema elétrico de potência. Observa-se que os controles do regulador de tensão da máquina não interferem na resposta em velocidade do sistema do PI;
- A proteção contra variações de freqüência não atuará, pois não excede os limites de tempo necessário para cada caso, sobre ou sub-frequência, especificados em [13];
- O regulador de velocidade da máquina não atuará de forma expressiva em virtude da faixa morta do controle deste regulador. O sinal de entrada, erro, deste controle não é suficiente para sensibilizá-lo.

CASO 7: Rejeição de carga no sistema independente

Objetivo: *avaliar as possíveis implicações da perda da carga da barra 5 (pertencente ao sistema elétrico independente) na rede da concessionária e no produtor independente*

Análise de resultados:

A figura 4.15 (a) mostra como a tensão na barra 3, PAC, se comporta devido a esta contingência, para U_{fmin} = 0,8 pu. Observa-se que a tensão na barra 3 atinge um máximo de 1,088 pu (15000 V fase-fase). Este valor está acima do permitido pela normalização, referência [22]. Esta sobretensão se deve ao fato do reativo, antes consumido nas instalações internas do produtor independente, ser agora repassado para o sistema elétrico de potência.



(a) (b)

Figura 4.15- Tensão na barra 3 mediante a perda de carga da geração independente.
(a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

O sistema atinge o regime permanente com uma tensão aproximada de 1,08 pu (14900,0 V fase-fase), um valor que, se comparado à sobretensão, em regime permanente, da figura 4.10, não é tão significante, pois nesse caso a carga da produção independente é bem inferior se comparada à carga do sistema da concessionária energia.

Ressalta-se também que a tensão na barra 3, tanto para o caso 6 como também para o caso 7, situação pós-contingência, esta acima do limite estabelecido pela referência [22]. Consequentemente a qualidade da energia está comprometida no que se refere à magnitude da tensão.

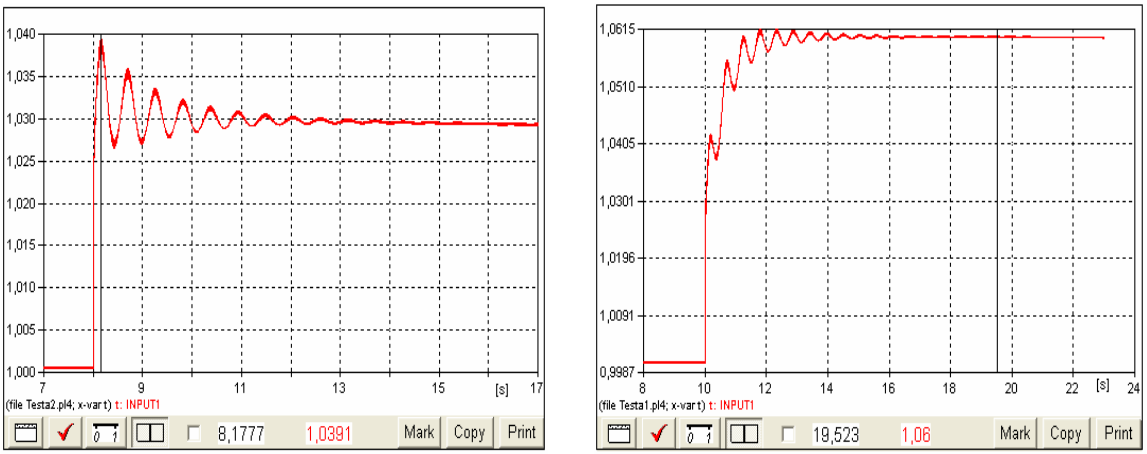
Torna-se necessário, para este caso, a inserção de medidas preventivas para evitar tal distúrbio no nível da tensão na barra 3, pois o problema advém da interligação do produtor independente na rede da concessionária. Consequentemente, essas medidas preventivas deverão ficar a cargo do produtor independente de energia, visto que devido a sua presença o sistema não mais operará de forma harmoniosa mediante a aplicação de tal contingência.

Com relação à influência do regulador de tensão, a figura 4.15 (b) ilustra que, para U_{fmin} = 0,9 pu a sobretensão é maior. Outro fato relevante a ser destacado: na figura 4.15 (b), em regime permanente, a tensão se

estabiliza em 1,10 pu, enquanto que na figura 4.15 (a), o regime se dá em uma tensão de 1,08 pu. Isto se deve à interferência do limite inferior de excitação da máquina síncrona adotado neste caso.

Prosseguindo, a figura 4.16 ilustra o comportamento da tensão na barra 4 (da geração independente), para U_{fmin} = 0,8 pu (figura 4.16 (a) e U_{fmin} = 0,9 pu (figura 4.16 (b)). Ao se comparar as figuras 4.16 (a) e (b), pode-se avaliar como as constantes do regulador de excitação, mais especificamente o limitador de excitação, interferem na resposta da máquina perante o distúrbio aqui aplicado. Como pode ser observado, em ambas as figuras, com a rejeição de carga há uma elevação da tensão, pois a potência reativa antes consumida na carga do sistema independente, agora flui para o sistema, aumentando assim o nível de tensão no PAC. Ao se alterar o limite inferior de excitação, a tensão final na barra de geração, barra 4, será mais elevada em relação ao ilustrado pela figura 4.16 (a).

Por outro lado, a elevação da tensão causa um aumento na potência ativa consumida pela carga instalada na barra 3, carga 2. Isto faz com que o gerador da produção independente de energia, passe a entregar uma potência ativa ligeiramente maior, quando comparada com a hipótese de U_{fmin} = 0,8 pu, para atender esta carga instalada no PAC, pois ela se encontra próxima à barra do produtor independente. Este fato contribui para reduzir significativamente as oscilações na velocidade da máquina da geração independente.



(a) (b)

Figura 4.16- Tensão na barra da geração independente mediante a rejeição de sua carga.
(a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Dessa forma uma proteção adequada deve ser dimensionada para desconectar o gerador mediante tal contingência, para que os demais equipamentos elétricos da geração independente não fiquem danificados.

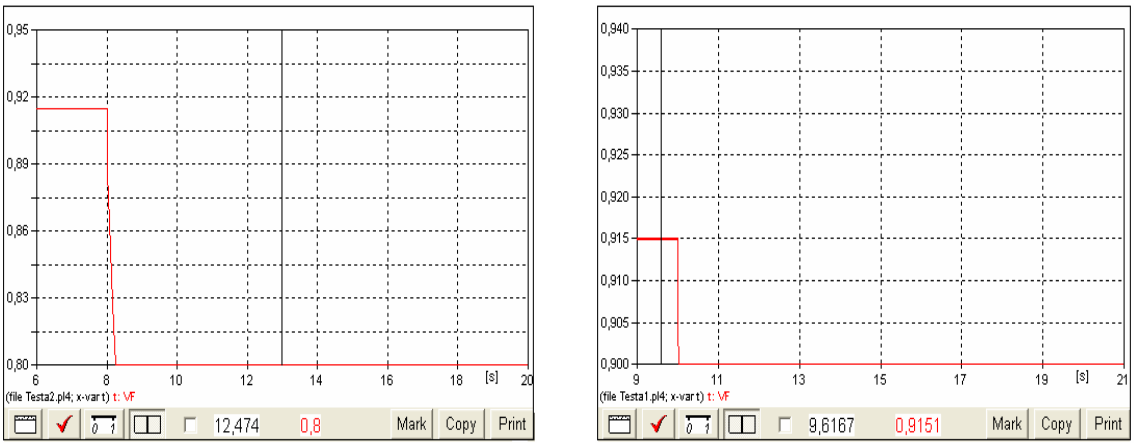
Uma observação a ser feita, consiste no fato da referência [13] relatar que, se a tensão na barra da produção independente de energia elétrica, não se manter dentro de uma variação de 10% da tensão nominal, o mesmo deverá desconectar seu gerador da rede dentro de 1s.

Portanto, para o caso em questão, quando a tensão atingir 7260,0 V fase-fase, a máquina do produtor independente deveria ser desconectada da rede da concessionária de energia.

Ainda no que tange à sobretensão sentida no PAC, outra possível solução seria a implantação de um reator de núcleo saturado dimensionado para receber todo o reativo rejeitado pela carga interna do produtor independente de energia.

Sob a luz dos fatos anteriormente relatados, comprova-se que o regulador de tensão não conseguiu amenizar, de uma forma efetiva, a sobretensão estabelecida na barra 4, barra da geração independente. Consequentemente, o regulador de tensão deve ter alcançado seu limite

inferior de excitação para tentar reduzir ao máximo a magnitude da tensão na barra 4. Tal fato pode ser claramente observado pelas figura 4.17 (a) e (b).



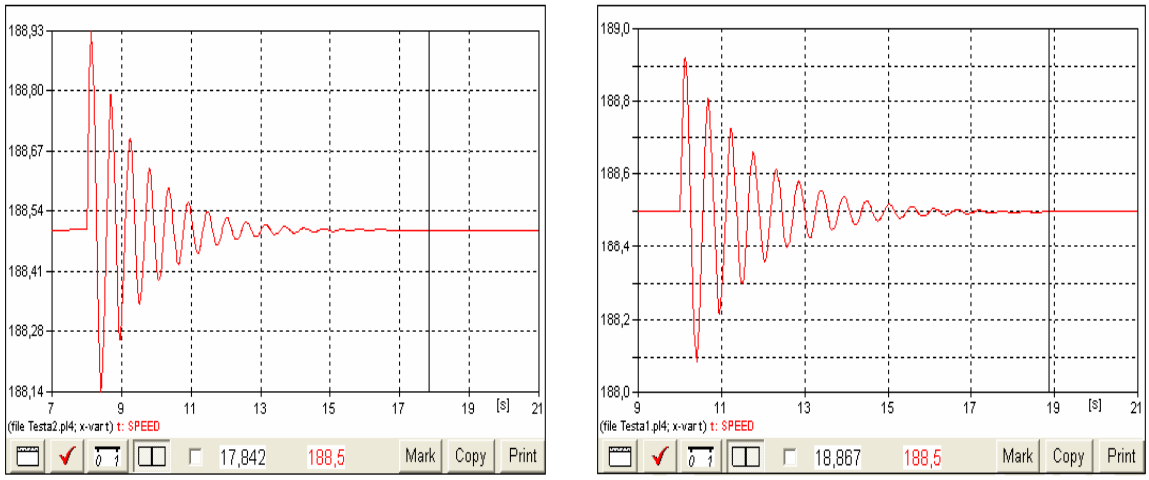
(a) (b)

Figura 4.17- Resposta do regulador de tensão mediante a rejeição de carga da geração independente. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Comparando-se as figuras 4.17 (a) e (b), tem-se que, nesta última, ao se aumentar o limite inferior do regulador de excitação, espera-se encontrar uma menor oscilação na velocidade da máquina (pois se sabe que a carga instalada no PAC é uma carga estática do tipo RL).

Além disso, a potência gerada pelo produtor independente passa agora a ser entregue para o sistema da concessionária, pois a impedância elétrica é a mesma se comparada com a impedância vista pelo gerador para atender a sua carga interna. Por ser uma carga estática do tio RL, esta tem sua potência ativa variando de acordo com o quadrado da tensão.

Procedendo-se à análise da velocidade da máquina, espera-se que a mesma tenda a disparar num primeiro momento e que, após as oscilações transitórias, a inércia do barramento infinito e a atuação do regulador de velocidade ajudem a estabilizar a máquina em torno da velocidade síncrona. Esse fato pode ser comprovado através das figuras 4.18 (a) e (b).



(a) (b)

Figura 4.18- Velocidade da máquina síncrona, mediante uma rejeição de carga na geração independente. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Apesar das oscilações na velocidade da máquina do produtor independente de energia, estas não são expressivas (como foram no caso da figura 4.13-rejeição de carga da concessionária) a ponto de exigir uma maior atuação do regulador de velocidade, pois as oscilações são muito próximas da velocidade síncrona, tanto para U_{fmin} = 0,8 pu como para U_{fmin} = 0,9 pu.

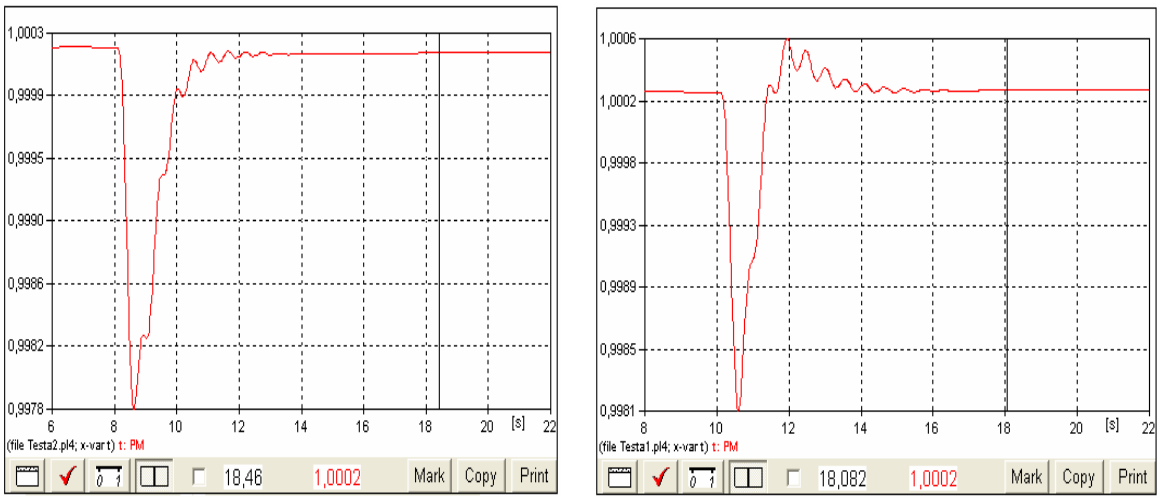
Isto se deve ao fato da potência antes entregue à carga interna da produção independente de energia, ser agora repassada para o sistema da concessionária. Há, portanto, um novo balanço de potência.

Consequentemente, a concessionária passa a gerar menos potência para atender ao seu sistema, pois o gerador da produção independente de energia está assumindo parte da potência demandada pelo sistema, com o conseqüente aumento da potência transferida do produtor independente para a concessionária através do transformador de interligação.

No caso 6, ilustrado pela figura 4.13, há uma redução drástica da potência gerada pelo gerador da concessionária, pois ele perdeu uma carga bastante elevada, a carga 2. Em conseqüência, a potência total gerada pelo produtor independente, passa a ser totalmente entregue à sua carga interna, pois trata-se de uma carga estática modelada como tipo RL.

Consequentemente, o valor da potência ativa consumida por ela varia de acordo com o quadrado da tensão.

A atuação do regulador de velocidade da máquina síncrona é ilustrada pela figura 4.19. Nesta, pode-se observar que a atuação do regulador não foi acentuada, simplesmente pelo fato da velocidade da máquina não ter uma variação expressiva, o que não sensibiliza o sistema de controle da máquina síncrona de uma forma mais efetiva.



(a) (b)

Figura 4.19- Potência mecânica x tempo, mediante rejeição da carga interna da geração independente. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Após as análises efetuadas para este caso (CASO 7: Rejeição de carga no sistema independente), pode-se concluir que:

- Com esta rejeição de carga, a magnitude da tensão no PAC fica comprometida, pois há um aumento considerável da tensão. Este aumento é mais pronunciado para a máquina que opera com um limite inferior de excitação de U_{fmin} = 0,9 pu, como pode ser comprovado pela figura 4.15 (b). Tal fato requer uma solução apta a mitigar essa elevação na magnitude da tensão;
- Uma proposta válida para mitigar a elevação da tensão no PAC seria a instalação de um reator de núcleo saturado capaz de absorver o reativo

rejeitado pela carga interna da produção independente de energia elétrica. Dessa forma, o ônus deste reator ficaria a cargo do PI, pois o problema advém da sua interligação ao sistema;

- Mais uma vez, há a influência do regulador de tensão na resposta do sistema elétrico. Portanto, um dos itens a serem avaliados quando da inserção de um produtor independente ao sistema, consiste na análise de desempenho de seus controles, dos seus reguladores de tensão e de velocidade;
- As oscilações da velocidade da máquina são menos expressivas quando comparadas com as demonstradas pela figura 4.13, consequentemente a proteção contra variações de freqüência também não atuará para este caso;
- O regulador de velocidade da máquina não atuará de forma expressiva em virtude da faixa morta do controle deste regulador, aliado a este fato o sinal de entrada, erro, deste controle não é suficiente para sensibilizá-lo.

CASO 8: Curto-circuito trifásico no PAC (barra 3)

Objetivo: *avaliar as implicações, na rede e no gerador do sistema independente, mediante a aplicação deste curto.*

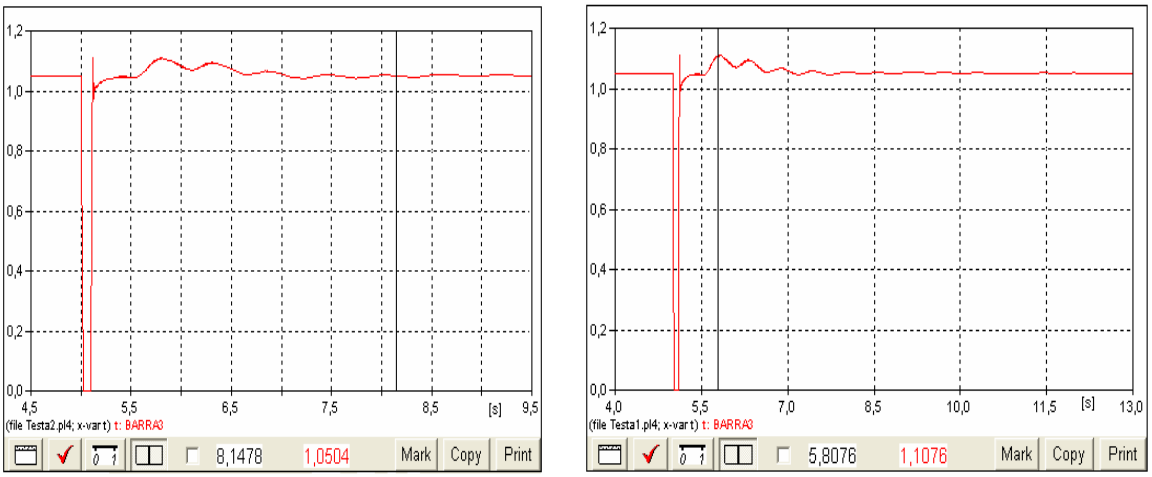
Análise de resultados:

As análises serão realizadas mediante as recomendações técnicas estabelecidas na referência [13], no que tange ao tempo de retirada da falta na rede da concessionária. Essa norma relata que, para a ocorrência de uma falta na rede, o produtor independente de energia deve retirar seu gerador em um tempo máximo de 6 ciclos e o relé de retaguarda deve dar seu *trip* em 18

ciclos. Diante disso, pretende-se aqui observar como o sistema se comporta durante os 6 ciclos em que a falta permanece no sistema.

A figura 4.20 ((a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu) ilustra como a tensão no PAC se comporta mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico de origem transitória exatamente aqui, no PAC (barra 3). Observa-se uma grande semelhança entre estas duas figuras.

Assim, a análise que se segue, será focada apenas para a condição da figura 4.20 (a), onde U_{fmin} = 0,8 pu: observa-se que a tensão chega a 0 V na barra 3 e que, após a retirada do curto-circuito (6 ciclos após seu inicio), a tensão em regime permanente sobe, atingindo a 1,05 pu.



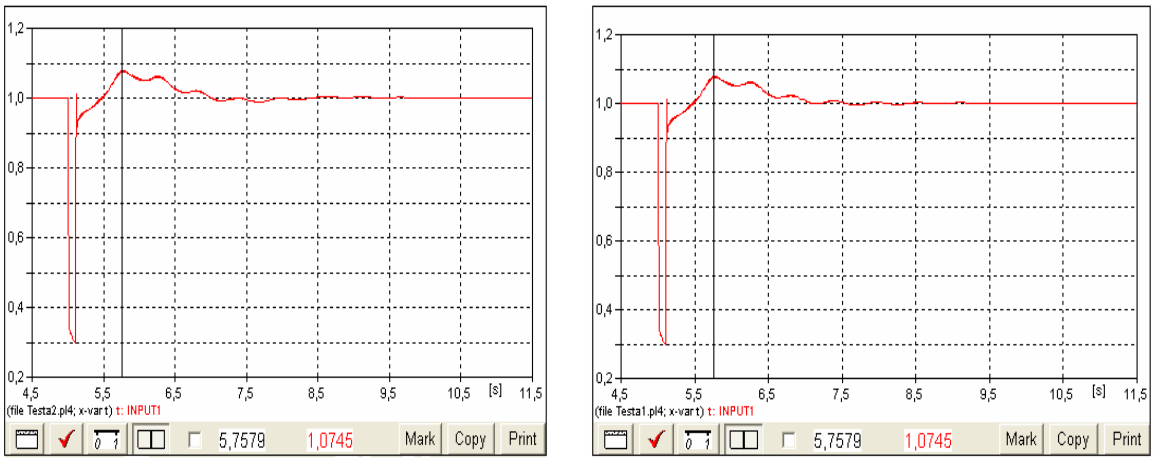
(a) (b)

Figura 4.20- Tensão na barra 3 após a aplicação de curto-circuito trifásico na mesma.
(a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Como a barra da geração independente se encontra muito próxima à barra 3 (na qual se aplicou o curto), a tensão na barra 4 também experimenta um profundo afundamento de tensão (da ordem de 70%). Isso pode ser constatado nas figuras 4.21 (a) e (b), que são bastante semelhantes.

Destaca-se, também, nas figuras 4.21 (a) e (b), o período pós-curto, quando a tensão chega a atingir 1,08 pu (7420 V fase-fase). Este valor está acima do estipulado pela norma da LIPA [13]. Porém, a proteção contra

sobretensão não deverá atuar neste caso. Isso porque o disjuntor de acoplamento deve retirar o sistema do PI dentro de 1s, se a tensão não permanecer dentro de uma faixa de variação de 10% da tensão nominal.

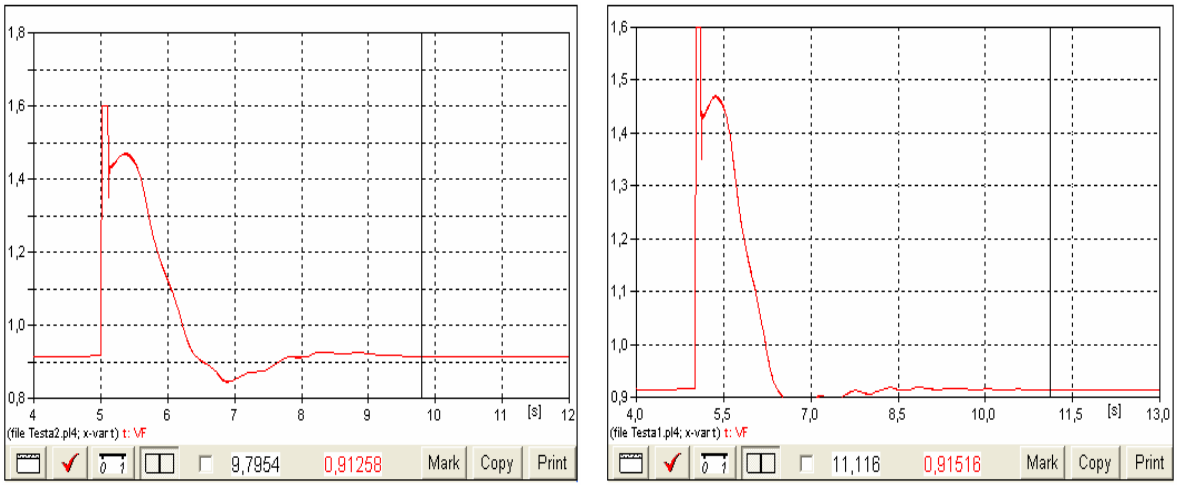


(a) (b)

Figura 4.21- Tensão na barra 4 após a aplicação de curto-circuito trifásico na barra 3.
(a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Ressalta-se que os componentes elétricos do produtor independente devem estar aptos, dimensionados para suportar um stress dielétrico de 12% no instante imediatamente após a retirada do curto. Esses 12% correspondem à magnitude da tensão no instante imediatamente após a retirada do curto, 7420 V fase-fase, quando comparada a tensão nominal de 6600 V fase-fase.

Procede-se, a seguir, à análise do regulador de tensão da máquina. As figuras 4.22 (a) e (b) ilustram o funcionamento do regulador de excitação da máquina para a contingência aplicada, respectivamente, para U_{fmin} = 0,8 pu e U_{fmin} = 0,9 pu.



(a) (b)

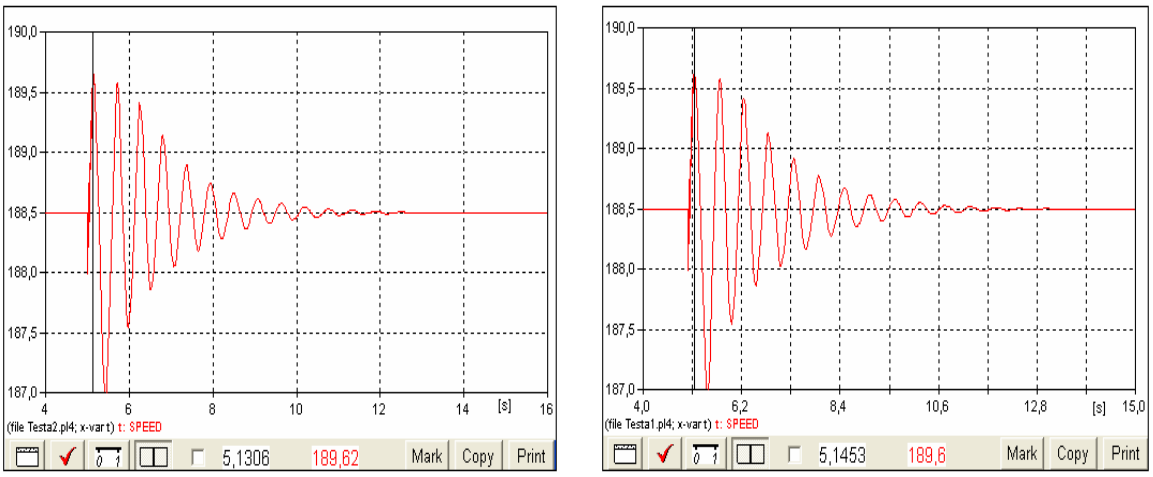
Figura 4.22- Resposta do regulador de tensão, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico no PAC. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Durante a permanência do curto-circuito, visando retornar a tensão na barra de geração, barra 4, para 1,0 pu, o regulador sobre-excita a máquina. Isto é, como o afundamento de tensão foi considerável, o regulador aplica a máxima excitação permitida para a máquina síncrona em questão e atinge seu limite superior de excitação.

Após a retirada do curto-circuito, o regulador ainda está no limite superior de excitação, o que contribui para que a tensão continue durante um pequeno intervalo de tempo, elevada. Posteriormente, o regulador decresce a excitação da máquina para que a mesma volte a operar com a tensão em torno de 1,0 pu (6930 V fase-fase).

Prosseguindo, as figuras 4.23 ((a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu) ilustram como a velocidade da máquina se comporta mediante ao distúrbio aplicado. Observa-se que a máquina não oscilou tanto, pois o curto-circuito aplicado durou apenas 6 ciclos. Consequentemente a proteção de sub, ou sobre-freqüência também não atuaria, pois em [13], o tempo necessário para retirar a máquina do produtor independente é de 0,5s para sobre-frequências e de 1s para sub-frequências.

Caso o curto permanecesse por um período maior, a máquina síncrona tenderia a disparar, pois ela passaria a atender única e exclusivamente à solicitação de corrente elétrica demandada pela falta. Isso levaria a uma alteração da freqüência de operação nas instalações do produtor independente, com a conseqüente alteração no funcionamento de seus equipamentos, se tal distúrbio não for devidamente solucionado.



(a) (b)

Figura 4.23- Velocidade da máquina síncrona da geração independente, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico no PAC. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

O regulador de velocidade não consegue atuar de forma expressiva, pois o curto aplicado durou apenas 6 ciclos e isso, aliado à inércia do sistema, não deixou a velocidade da máquina variar tanto neste curto intervalo de tempo. Dessa forma, não se torna interessante ilustrar a resposta desse regulador.

Ao término deste caso (CASO 8: Curto-circuito trifásico no PAC (barra 3)) pode-se concluir que:

- Mediante a contingência aplicada, os limites inferiores de excitação da máquina do PI em nada interferem na resposta do sistema. Isto já era esperado, pois esses limites inferiores apenas influem em casos de elevação na magnitude da tensão na barra de geração. Apenas o limite

superior de excitação da máquina afetaria a resposta do sistema, em virtude da necessidade de excitar a máquina do PI objetivando, assim, elevar a magnitude da tensão na barra 4. Portanto, pode-se inferir que a capacidade de sobre excitar a máquina síncrona do PI, ou seja, seu limite de suportabilidade máxima de excitação, também interfere na resposta do sistema;

- No instante imediatamente após a retirada da falta, há uma elevação na magnitude da tensão na barra 4. Esta elevação, devida a atuação do regulador de tensão do PI (que neste instante encontra-se saturado em seu limite superior de excitação), pode ser danosa aos equipamentos elétricos instalados na produção independente de energia. Portanto, os equipamentos do PI devem estar aptos a suportarem tal stress dielétrico;
- A resposta do regulador de tensão foi exatamente à mesma, independentemente do limite inferior de excitação utilizado;
- A resposta em velocidade da máquina, para o caso em questão, não foi afetada pela alteração do limite inferior de excitação da máquina do PI.

CASO 9: Curto-circuito trifásico na geração independente (barra 5)

Objetivo: *avaliar as implicações, na rede e no gerador do sistema independente, mediante a aplicação deste curto.*

Análise de resultados:

Os estudos serão realizados, novamente, mediante as recomendações técnicas estabelecidas na referência [13], no que tange ao tempo de retirada da falta. Essa norma relata que para a ocorrência de uma falta na produção independente, o mesmo deve retirar seu gerador em um tempo máximo de 6 ciclos e o relé de retaguarda deve dar seu *trip* em no máximo 18 ciclos.

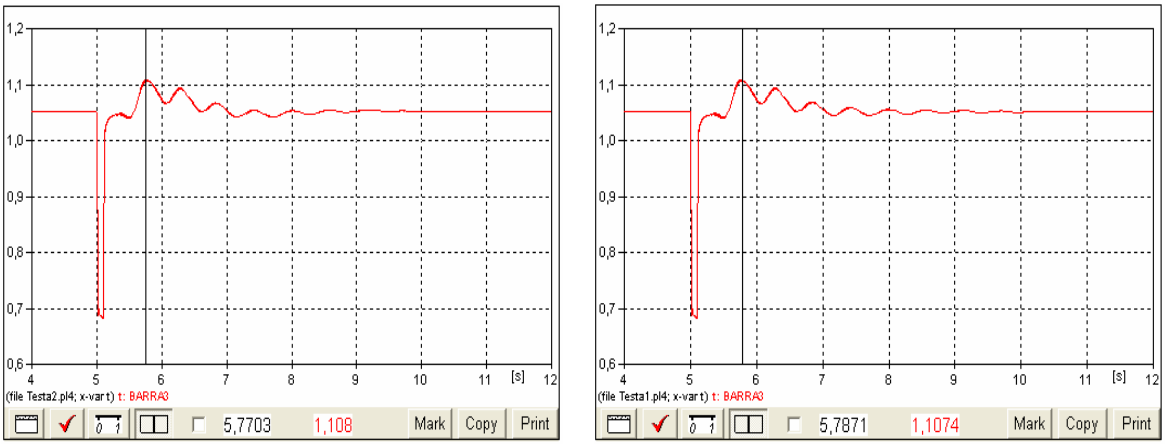
Portanto, pretende-se aqui observar como o sistema se comporta durante os 6 ciclos em que a falta permanece no sistema.

Pretende-se também avaliar os impactos na rede da concessionária, e nas instalações elétricas do produtor independente, para o novo limite inferior de excitação adotado (U_{fmin} = 0,9 pu). Contudo, espera-se obter as mesmas respostas já observadas para U_{fmin} = 0,8 pu, pois como já foi discutido anteriormente, o limite inferior de excitação em nada interfere na situação em que há um afundamento de tensão na barra da produção independente de energia.

As figuras 4.24 ((a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu) ilustram como a tensão no PAC se comporta mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5, pertencente ao sistema independente de energia elétrica. Como a falta é aplicada na barra 5 da geração independente, a tensão no PAC não será interrompida, como no caso anterior, onde isso ocorreu.

Observa-se, em ambas as figuras, que houve um afundamento de tensão para, aproximadamente, 70% do valor nominal durante o período de duração da falta.

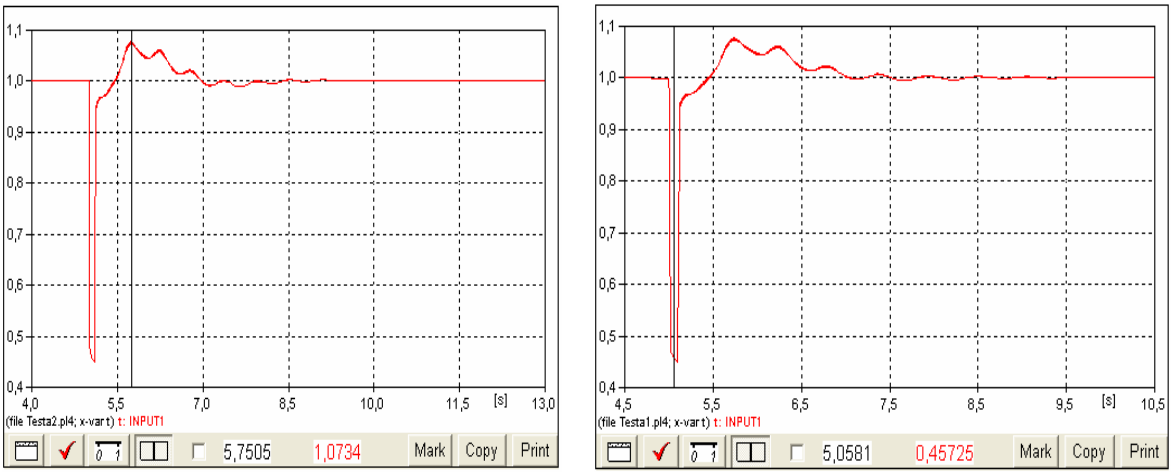
Outro fato relevante consiste na elevação momentânea de tensão, estabelecida nesta barra, quando da retirada do curto. Esta elevação pode ser explicada pela atuação do regulador de tensão da máquina do produtor independente, pois durante a fase imediatamente após a retirada do curto, a excitação da máquina está no limite superior de excitação. Consequentemente, a tensão na barra de geração sobe, elevando assim a tensão no PAC. Somente após o equilíbrio da tensão da barra 4 (o qual é alcançado quando esta se restabelecer em 1,0 pu), é que a tensão no PAC retorna ao valor original.



(a) (b)

Figura 4.24- Tensão na barra 3 após a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5.
(a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

A figura 4.25 ilustra o comportamento da tensão na barra da geração independente, barra 4, durante e após a aplicação da falta simétrica, para (a): U_{fmin} = 0,8 pu e (b): U_{fmin} = 0,9 pu. As respostas obtidas para a tensão na barra da geração independente, para ambas as hipóteses, é praticamente a mesma.



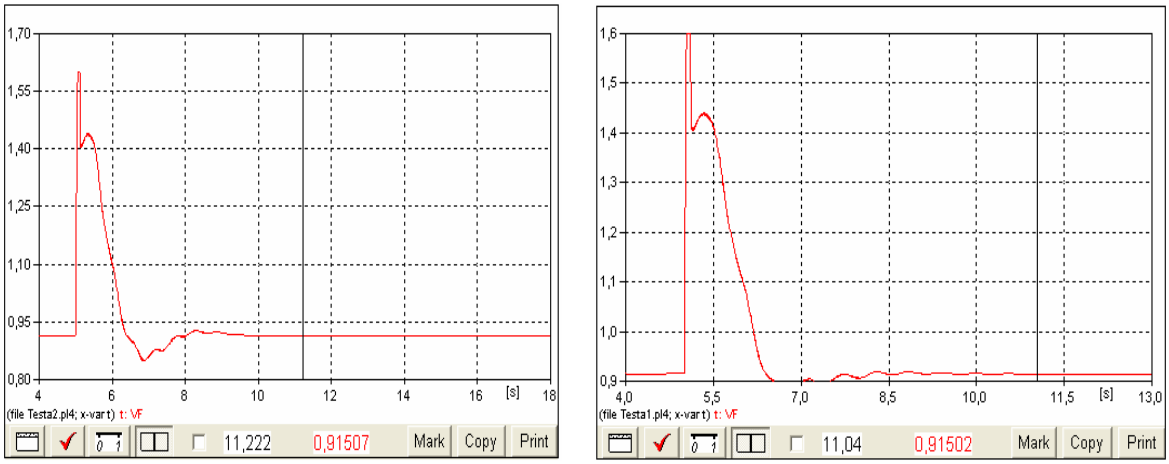
(a) (b)

Figura 4.25- Tensão na barra 4 após a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5.
(a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Como a falta é aplicada na barra 5 do produtor independente, a tensão na barra 4 sofreu um afundamento considerável, de 55%. Porém, este é menos expressivo quando comparado ao afundamento de tensão ilustrado pela figura 4.21 (quando a barra 4 estava mais próxima do curto, na barra 3, PAC).

Após a retirada da falta, a tensão na barra 4 começa a se elevar, ultrapassando o valor nominal (a tensão se eleva ao valor de 1,07 pu, o que equivale a uma tensão de 7416 V). Esta sobretensão se deve ao fato do regulador de tensão estar saturado em seu limite superior de excitação e continuar em um valor elevado. Após um determinado tempo, o controle do regulador atua, diminuindo a excitação, reduzindo assim tensão na barra 4.

A atuação do regulador de excitação da máquina, para a contingência aplicada, está ilustrada na figura 4.26.



(a) (b)

Figura 4.26- Resposta do regulador de tensão, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

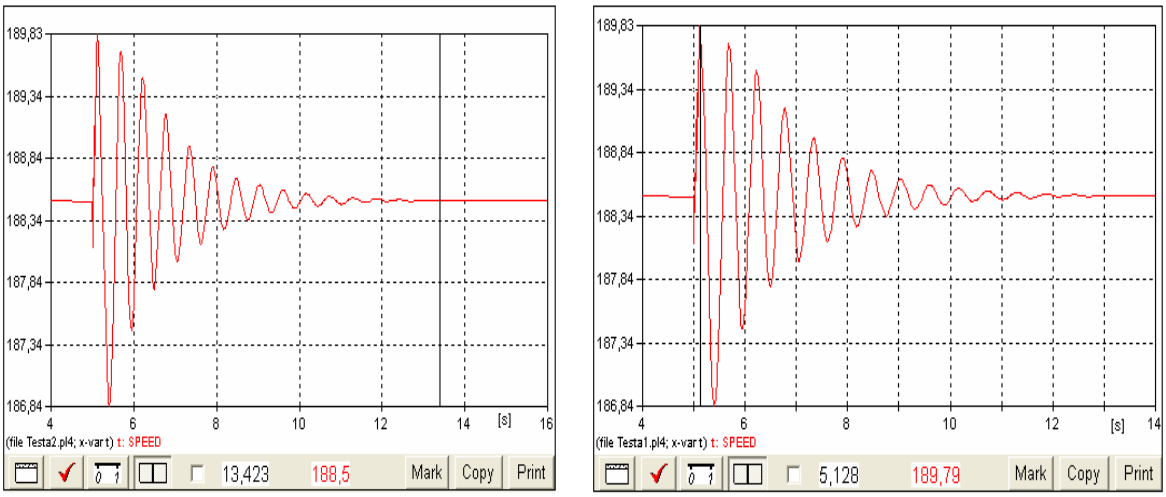
A figura 4.27 ilustra o comportamento da velocidade da máquina o caso em questão. Se compararmos a figura 4.27 (a) com a figura 4.27 (b) observa-se que o limite inferior estabelecido para o regulador de tensão em nada interfere na resposta em velocidade da máquina, para o caso aqui estudado.

No instante da aplicação do curto, a máquina tende a disparar, elevando a freqüência do sistema. No entanto, como o curto é retirado de forma rápida (em 6 ciclos), a velocidade não terá uma elevação tão considerável.

Após a retirada do curto, a inércia do barramento infinito contribui para o restabelecimento da velocidade da máquina do PI para a situação pré-falta. Contudo, ressalta-se que a variação da velocidade da máquina não foi

suficiente para sensibilizar de forma mais efetiva o regulador de velocidade da máquina.

Ressalta-se que a proteção de sobre e sub-frequência não atuará, pois o tempo de duração dessa oscilação é muito curto.



(a) (b)

Figura 4.27- Velocidade da máquina síncrona da geração independente, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Ao término das análises relativas a este caso (CASO 9: Curto-circuito trifásico na geração independente (barra 5)) pode-se concluir que:

- Fica evidente a interferência do regulador de tensão, mais especificamente do limite inferior de excitação, nos casos em que há a necessidade da redução do nível de tensão na barra da geração independente de energia elétrica;
- Os consumidores instalados no PAC ficarão sujeitos a um afundamento de tensão que poderá causar uma série de incômodos. Dentre eles pode-se citar o "*shutdown*" dos equipamentos eletrônicos, como computadores e CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), ou mesmo, o desligamento de tais aparelhos. Tal fato leva a perdas no processo industrial e o reinício completo das atividades de produção, parando a indústria por horas. Porém, destaca-se que o tempo de

permanência da falta no sistema é de apenas 6 ciclos, o que ameniza o efeito de tal fenômeno. Daí resulta o fato da referência [13] citar que o tempo necessário para retirar a falta é de 6 ciclos;

- O período pós-falta causa uma elevação na tensão da barra 3. Essa elevação na magnitude da tensão se deve a retirada da falta e a ação do regulador de excitação da máquina do PI, pois este regulador se encontra saturado em sua máxima excitação, objetivando assim, restabelecer a tensão de 1,0 pu na barra de geração, barra 4. Apenas quando a tensão na barra 4 se enquadra novamente em torno de 1,0 pu, é que a tensão no PAC volta a se estabelecer em 1,05 pu. Tal fato demonstra como as tensões no PAC e na barra de geração independente estão eletricamente interligadas. Uma forma de minimizar a sobretensão no período pós-curto seria a utilização de um reator de núcleo saturado a ser instalado na barra 4. Dessa forma, a tensão seria mantida em torno 1,0 pu, pois o reator absorveria o excesso de reativo produzido e manteria a tensão no PAC em torno de 1,05 pu no instante imediatamente após a retirada da contingência;
- A proteção contra variações da tensão não atuará, pois a tensão não excede o limite de 10% durante 1s, referência [13];
- A resposta do regulador de tensão é a mesma, independentemente do limite inferior de excitação adotado;
- A resposta em velocidade da máquina é a mesma e independe do limite inferior de excitação utilizado, figura 4.27.

CASO 10: Saída de linha de distribuição da concessionária

Objetivos: *avaliar as implicações, na rede e no gerador do sistema independente, da saída da linha LD 2.*

Análise de resultados:

A figura 4.28 ilustra o comportamento da tensão na barra 3, PAC, após a abertura da linha de distribuição LD 2 em três condições. Figura 4.28 (a): sistema sem a geração independente (trata-se da figura 4.5 novamente aqui representada), figura 4.28 (b): U_{fmin} = 0,8 pu e figura 4.28 (c): U_{fmin} = 0,9 pu.

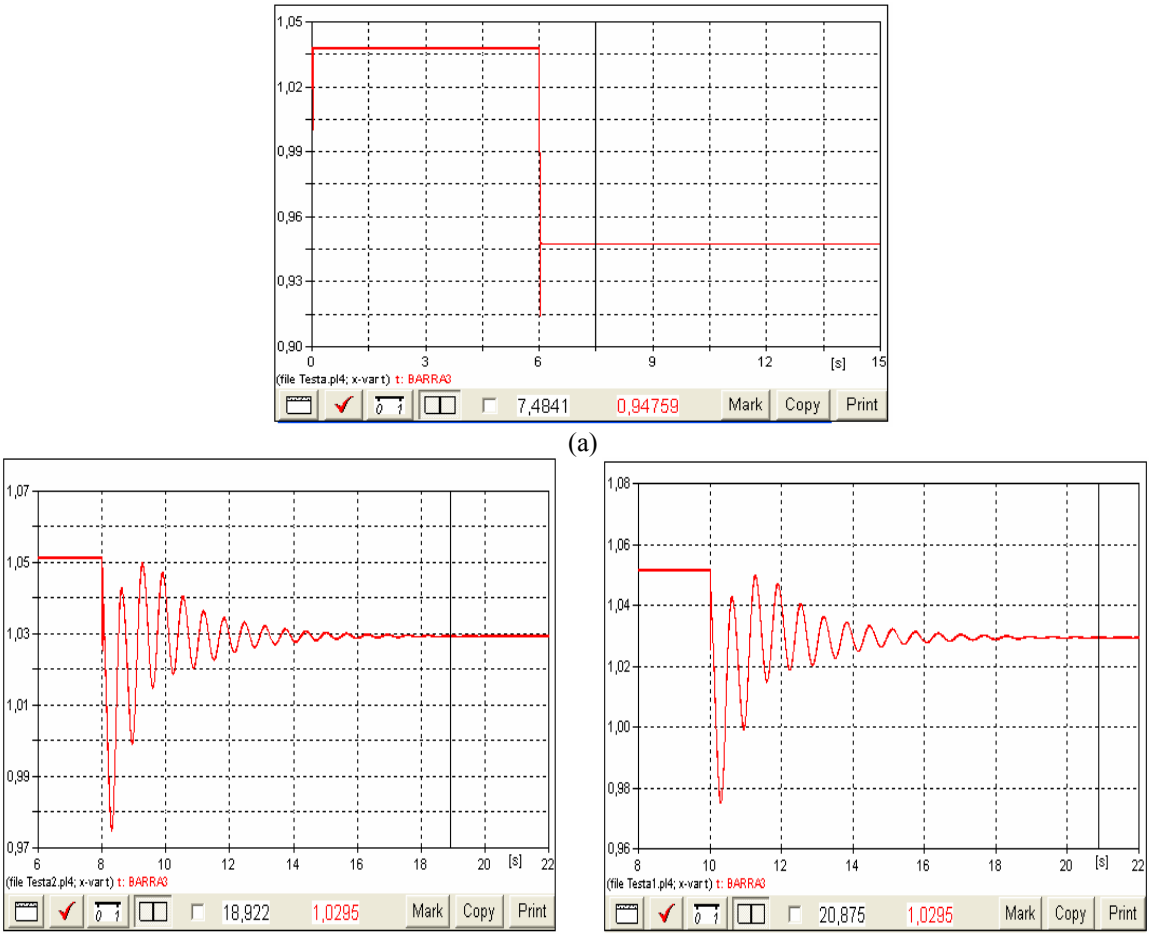


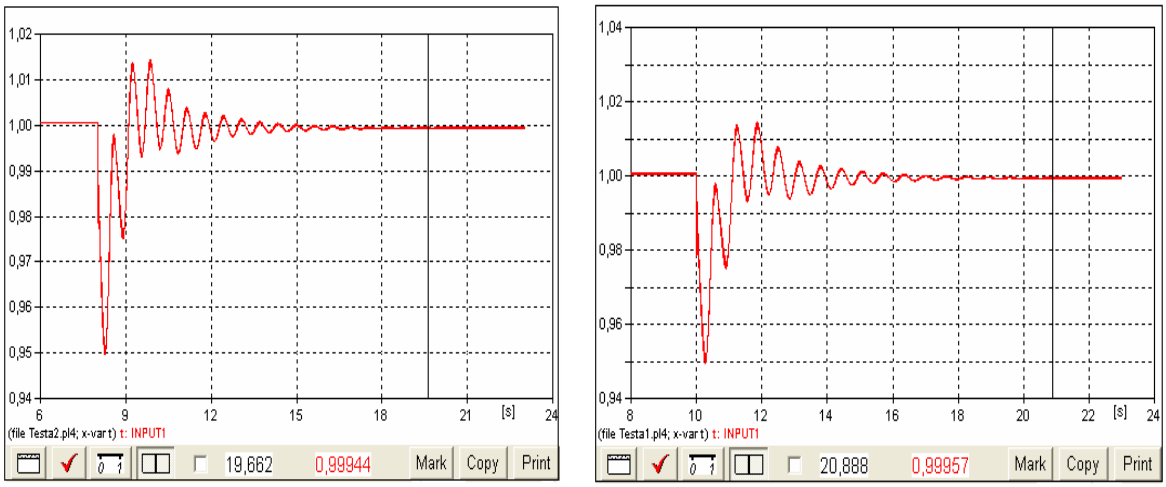
Figura 4.28- Tensão na barra 3 mediante a abertura da linha.
(a): Sem geração independente; (b): U_{fmin} = 0,8 pu, com geração independente; (c): U_{fmin} = 0,9 pu, com geração independente

Nas figuras 4.28 (b) e 4.28 (c), no instante imediatamente após a retirada da LD 2, a tensão no PAC cai para aproximadamente 0,98 pu. Este valor ainda está dentro da faixa de variação permitida (a tabela 4.6 informa que essa tensão é classificada como adequada). Essa queda de tensão se deve ao fato de se ter um aumento nas perdas elétricas provocada pela elevação da impedância da linha de distribuição, pois ao retirar a LD 2, a impedância equivalente entre as barras 2 e 3 (originalmente um paralelo entre as linhas LD1 e LD2), aumenta.

Após um pequeno período de tempo, a tensão volta a subir de forma oscilatória e se estabiliza em torno de 1,03 pu. Isso ocorre porque, quando a tensão na barra 3 cai, ela provoca o mesmo efeito na barra 4. Consequentemente, o regulador de tensão da máquina do produtor independente entra em ação, elevando o nível de excitação da máquina. Isso eleva a tensão na barra da geração independente para o valor pré-distúrbio, ou seja, 1,0 pu e eleva consigo a tensão na barra 3.

O comportamento da tensão na barra 4 está mostrado na figura 4.29 (figura 4.29 (a): U_{fmin} = 0,8 pu e figura 4.29 (b): U_{fmin} = 0,9 pu).

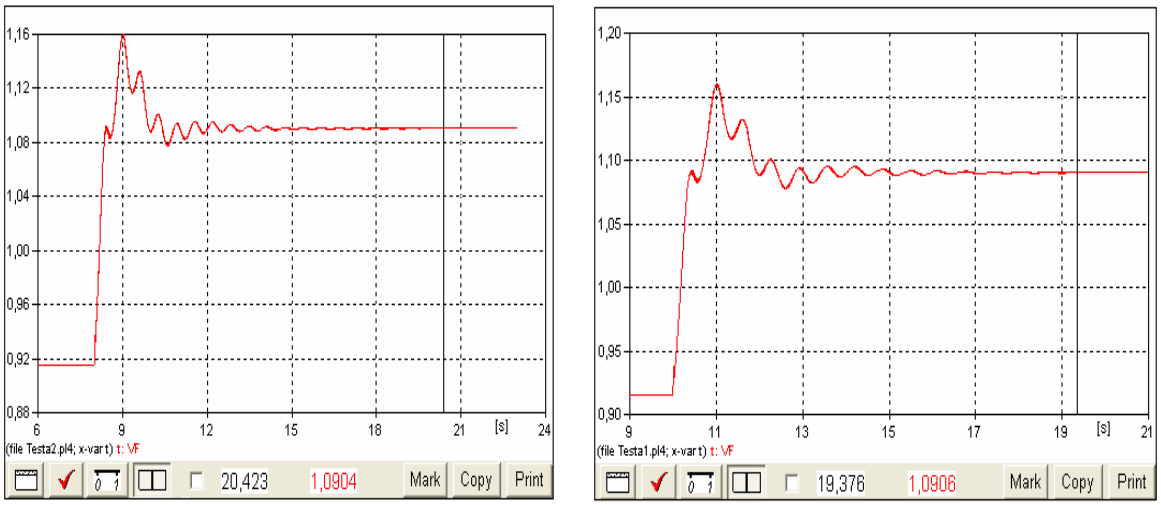
Dessa forma, pode-se inferir que a presença do PI, para o caso de uma perda de linha de distribuição, ajuda a manter a tensão no PAC dentro de limites aceitáveis de tensão. Tal fato é ilustrado pela análise da figura 4.28. Na figura 4.28 (a), a tensão atinge o regime em 0,95 pu, este valor ainda está de acordo com a normalização, tabela 4.6, porém na presença do PI, do ponto de vista de magnitude da tensão, o novo regime permanente estabelecido é mais adequado.



(a) (b)

Figura 4.29- Tensão na barra 4 mediante a abertura da linha.
(a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

A figura 4.30 ilustra o comportamento do regulador de tensão da máquina da produção independente de energia, também para U_{fmin} = 0,8 pu e U_{fmin} = 0,9 pu.



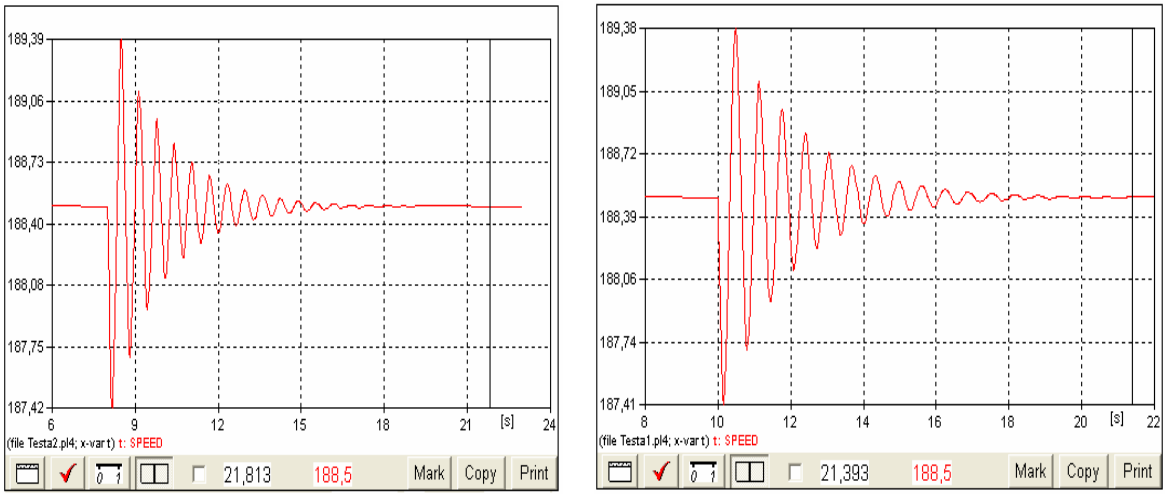
(a) (b)

Figura 4.30- Resposta do regulador de tensão, mediante a abertura da LD 2.
(a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Uma análise cuidadosa das figuras 4.29 e 4.30 mostram que, quando a tensão da barra 4 cai, o regulador de tensão aumenta a excitação para que esta tensão retorne a 1,0 pu. Uma vez alcançada à tensão de 1,0 pu, o sistema passa a ter uma nova excitação de regime permanente. A mesma é de

aproximadamente 1,09 pu, ou seja, a máquina está com 9% de sobre-excitação.

Prosseguindo, a figura 4.31 retrata a resposta da velocidade da máquina do produtor independente mediante a abertura da linha LD 2. No instante da abertura da linha LD 2, a impedância vista pela concessionária de energia, para entregar a potência demandada pela carga 2, aumenta. Como o gerador do produtor independente de energia se encontra mais próximo desta carga 2, ele assume uma parcela maior de potência a ser entregue para a mesma. Consequentemente, para o gerador do produtor independente, isto equivale a um aumento de carga, o que leva a uma desaceleração da máquina síncrona.



(a) (b)

Figura 4.31- Velocidade da máquina síncrona da geração independente, mediante a abertura da linha LD 2. (a): U_{fmin} = 0,8 pu; (b): U_{fmin} = 0,9 pu

Analisando a figura 4.31, tem-se que, no instante imediatamente após a abertura de LD 2, a velocidade da máquina independente é de ω = 187,42 rad/s. Isso equivale a uma freqüência de 59,65 Hz. Portanto, há a desaceleração da máquina (contudo, esta freqüência se comparada com o limite de sub-frequência estabelecido pela referência [13], não disparará a proteção estabelecida de sub-frequências). Após as oscilações, a máquina volta a se estabilizar, pois, a inércia do sistema de potência é muito grande. Aliado a este fato há a atuação do regulador de velocidade.

Como a oscilação da velocidade em torno da velocidade síncrona, não foi expressiva, o regulador de velocidade da máquina não foi sensibilizado de forma significativa.

Ao término das análises pertinentes a este caso (CASO 10: Saída de linha de distribuição da concessionária), tem-se que:

- A presença do PI auxilia na manutenção do nível de tensão no PAC devido à ação do regulador de excitação da máquina deste produtor. Pois, a barra 3 está eletricamente interligada a barra 4, do PI, consequentemente, qualquer oscilação na tensão no PAC se faz sentir na barra 4;
- Mais uma vez observa-se a não interferência do limite inferior do regulador de excitação para casos em que há queda de tensão. Apenas o limite superior de excitação do regulador poderá interferir nestes casos. Dessa forma, tanto as respostas em tensão, em velocidade, e as próprias respostas dos reguladores são as mesmas para a contingência aplicada, independentemente do limite inferior de excitação adotado;
- Há uma desaceleração da máquina do produtor independente, tal fato decorre de um aumento na impedância vista pelo gerador do PI para entregar potência à carga 2 do sistema. Ressalta-se que apesar da alteração no valor de freqüência num primeiro momento, a proteção contra variações de freqüência não atuará.

4.4.3- CONDIÇÃO "C": SISTEMA COM A GERAÇÃO INDEPENDENTE (U_{fmin} = 0,9 pu) E COM UM REATOR DE NÚCLEO SATURADO INSTALADO NO PAC

Baseado nas respostas obtidas e comentadas para os casos anteriores fica evidenciado a interferência da geração independente de energia no sistema elétrico de potência da concessionária. Estas interferências podem prejudicar em determinados casos, ou mesmo ser benéfica, em outros.

Com o objetivo de mitigar a perturbação causada pela rejeição de carga da geração independente no sistema elétrico, mais especificamente para o caso 7, um compensador estático tipo reator à núcleo saturado (**CERNS**) foi acrescentado ao sistema da figura 4.1.

A figura 4.32 representa o arranjo genérico para o compensador aqui utilizado.

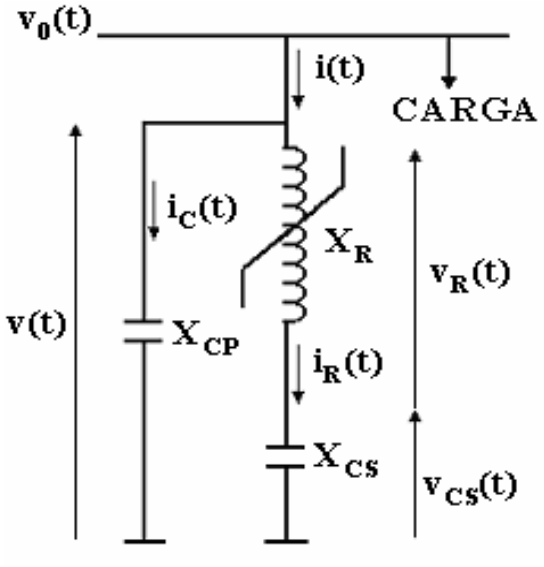


Figura 4.32- Arranjo típico de um compensador estático tipo reator à núcleo saturado

Na figura:

$V_0(t)$ – Tensão do sistema CA no ponto de acoplamento do CERNS;

I(t) – Corrente no ramo entre o CERNS e o sistema CA;

V(t) – Tensão nos terminais do CERNS;

$v_R(t)$ – Tensão nos terminais do reator;

$v_{CS}(t)$ – Tensão nos terminais do capacitor colocado em série com o reator à núcleo saturado;

$i_C(t)$ – Corrente no ramo do capacitor shunt;

X_R – Reatância do reator à núcleo saturado;

$i_R(t)$ – Corrente no reator à núcleo saturado;

X_{CP} – Reatância do capacitor em paralelo para aumentar a flexibilidade de operação do compensador, proporcionando a característica de manutenção de tensão constante quando houver queda de tensão;

X_{CS} – Reatância do capacitor série para melhorar a inclinação da curva característica do reator.

Observando os princípios básicos que norteiam o funcionamento desse compensador estático, ressalta-se que o reator, operando isoladamente, só poderá agir no sentido de absorver potência reativa do sistema de suprimento. Entretanto, com a inclusão de um banco de capacitor em paralelo (X_{CP}), o conjunto pode também fornecer potência reativa ao complexo elétrico ao qual o mesmo se encontra conectado.

Objetivando o controle da tensão do barramento ao qual o **CERNS** será instalado, tal intento é obtido pela absorção ou injeção de reativos na forma e proporção definidas pela variação de tensão na barra. Se a carga aumentar o consumo de potência reativa dentro de um limite pré-estabelecido, o banco de capacitores fornece um montante de reativos suficiente para a compensação da carga e do consumo do reator. Dessa forma, proceder-se-á a restauração da tensão aos patamares determinados pela legislação. Por outro lado, se a carga é aliviada, a tensão tenderia a aumentar. Nestas condições o reator passa a administrar a situação operacional, visto que o mesmo entra em sua região saturada, passando a consumir um substancial montante de potência reativa. Tal valor de potência reativa absorvida pelo reator visa compensar os reativos produzidos pelo banco de capacitores e ainda, produzir a necessária redução da tensão no barramento. Este controle da tensão se faz produzir através de

um aumento da corrente indutiva. A situação discutida encontra-se ilustrada na figura 4.33.

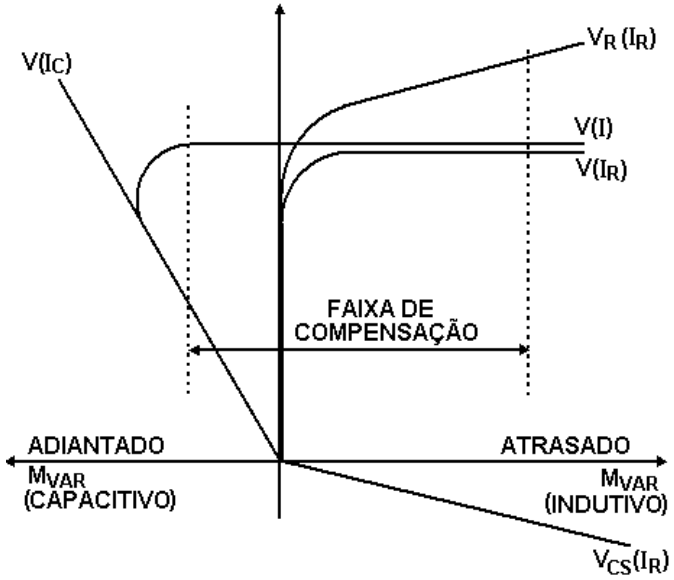


Figura 4.33- O CERNS como fonte e consumo de reativo

O **CERNS** aqui implementado utiliza o próprio banco de capacitor instalado no PAC para compor sua unidade capacitiva. Vale ressaltar que o reator aqui empregado é do tipo ideal. Tal reator será instalado no PAC, barra 3, com a intenção de absorver o excesso de reativo, provocado pela perda da carga interna da geração independente de energia.

Maiores informações sobre o CERNS podem ser encontradas em [25].

CASO 11: Rejeição de carga na geração independente, na presença de reator saturado, instalado na barra 3.

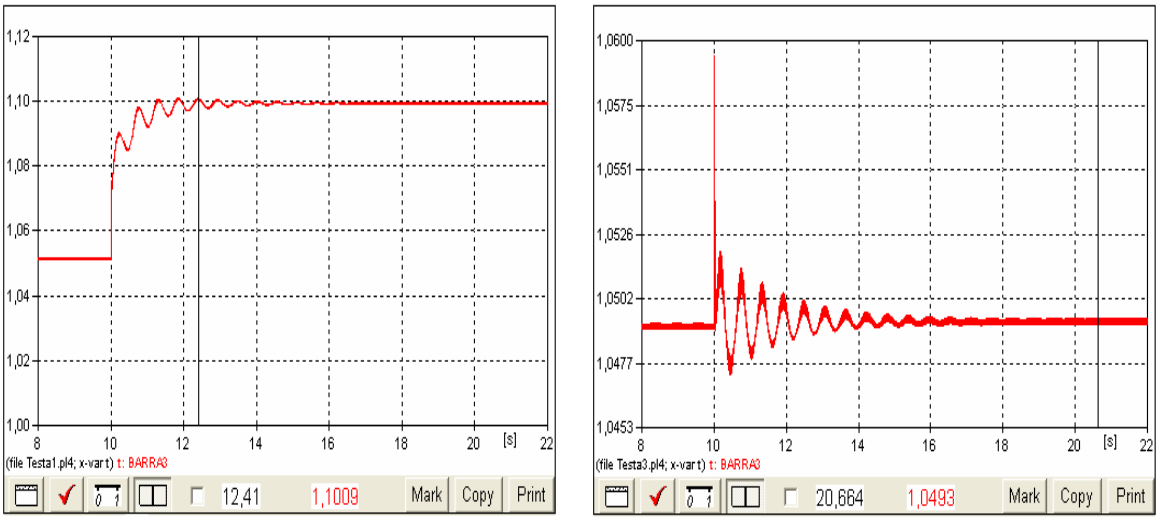
Objetivo: *avaliar o comportamento do sistema ilustrado pela figura 4.1, mediante a rejeição da carga da produção independente, porém com a presença de um reator de núcleo saturado instalado no PAC, barra 3, para mitigar a sobretensão experimentada por aquela barra, sobretensão esta evidenciada no caso 7.*

Análise de resultados:

A figura 4.34 (b) ilustra a tensão na barra 3, PAC, perante a aplicação de tal contingência no tempo t = 10 s, na presença do reator saturado. Pode-se observar a elevação da tensão no instante imediatamente após a perda da carga, evidenciada pelo transitório em que a tensão atinge 1,06 pu, aproximadamente.

Após este transitório, o reator de núcleo saturado passa a atuar na região de saturação, absorvendo dessa forma o reativo rejeitado pela perda da carga do PI. Consequentemente há uma oscilação do valor rms da tensão na barra 3 seguida de um novo regime permanente, tal que a tensão se estabilize novamente em 1,05 pu.

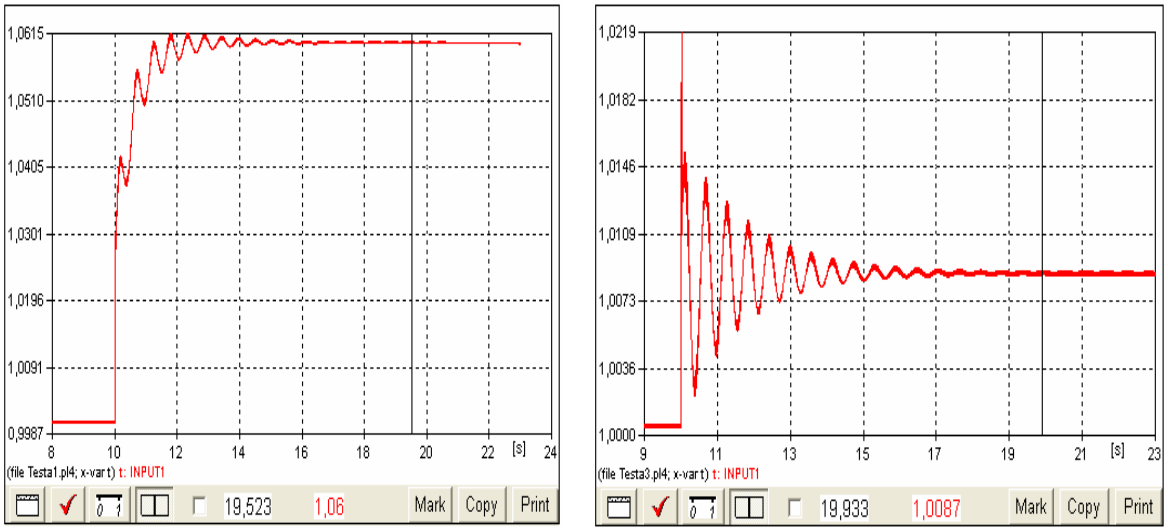
Ao se comparar a figura 4.34 (b) com a figura 4.15 (b) (a qual está repetida abaixo como 4.34 (a)), pode-se observar a melhoria da qualidade da energia elétrica, no que tange a magnitude da tensão. Em 4.34 (a) evidencia-se uma tensão pós-distúrbio de 1,1 pu, a qual é inadmissível para a operação do sistema elétrico de potência. Comprova-se a eficácia do reator de núcleo saturado, em 4.34 (b), para manter a tensão dentro do valor pré-distúrbio.



(a) (b)

Figura 4.34- Tensão na barra 3 mediante a perda de carga da geração independente.
(a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado

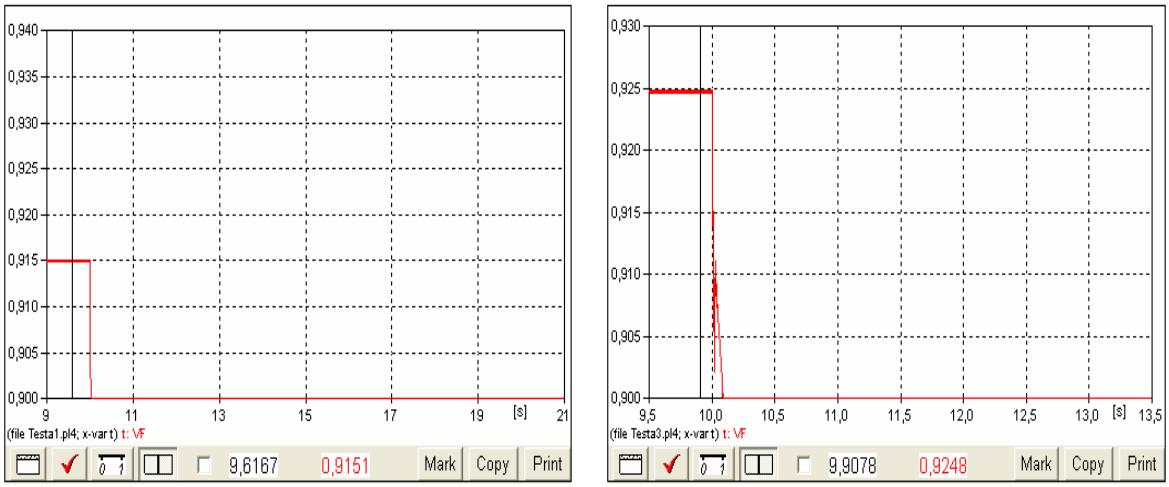
A figura 4.35 (b) mostra como a tensão na barra do produtor independente se comporta na aplicação de tal contingência, na presença do reator. Observa-se uma elevação da tensão no instante imediatamente após a rejeição da carga: a tensão atinge 1,02 pu (equivalente a uma tensão de 7060,0 V fase-fase). Após as oscilações, a tensão volta a se estabelecer em torno de 1,0 pu, isto demonstra, mais uma vez, a eficácia do reator de núcleo de saturado, pois como pode ser observado na figura 4.35 (a), quando não há o reator saturado, a tensão atinge 1,06 pu. Neste caso, após a inserção do reator, a tensão na barra 4 passa a operar dentro do limite estabelecido pelas referências [13,22].



(a) (b)

Figura 4.35- Tensão na barra da geração independente mediante a rejeição de sua carga.
(a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado

A figura 4.36 mostra a ação do regulador de tensão da máquina perante a aplicação da contingência, sem (figura 4.36 (a)) e com (figura 4.36 (b)) o reator de núcleo saturado. Na figura 4.36 (b) observa-se a saturação em seu limite inferior de excitação. Isso demonstra que, apesar da inserção do reator de núcleo saturado, a máquina teve de retirar ao máximo a excitação do enrolamento de campo para assegurar a tensão de 1,0 pu na barra de geração, barra 4.



(a) (b)

Figura 4.36- Resposta do regulador de tensão mediante a rejeição de carga da geração independente. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado

Prosseguindo, a figura 4.37 ilustra a resposta em velocidade da máquina da geração independente de energia, perante a aplicação da contingência, sem (figura 4.37 (a)) e com (figura 4.37 (b)) o reator de núcleo saturado.

Pela figura 4.37 (b), no instante após a rejeição da carga, a potência aparente antes entregue à carga interna do produtor independente, tende a fluir para o sistema elétrico de potência. Porém o reator de núcleo saturado impede a elevação do modulo da tensão e também atua reduzindo a variação na fase da tensão da barra onde se encontra o reator, no caso a barra 3.

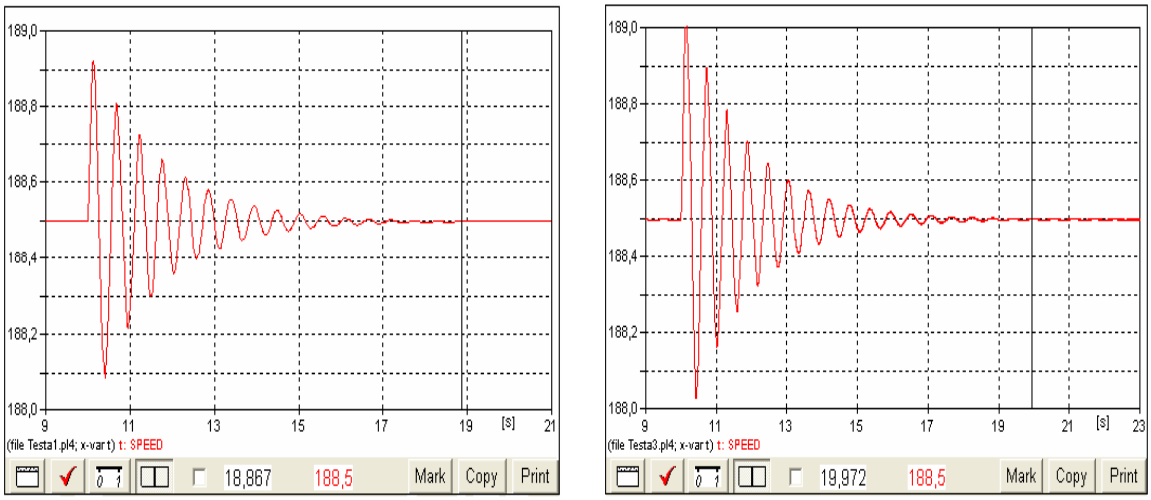
Consequentemente, no instante imediatamente após a rejeição da carga, o gerador do produtor independente não encontra um caminho para escoar sua potência ativa. Ressalta-se que isto se deve à manutenção da magnitude e da fase da tensão, e como o fasor da tensão na barra 3 não variará instantaneamente, o fluxo de potência ativa da barra 4 para a barra 3 não se dará de forma instantânea devido à manutenção da diferença angular daquelas barras.

Como essa diferença angular deve se manter, a barra 4 será responsável por uma oscilação maior no seu ângulo de operação, dando origem a uma

variação correspondente no ângulo de potência da máquina síncrona do produtor independente.

Somente após um determinado período, com o amortecimento das oscilações, a potência gerada pelo produtor independente passa a ser toda entregue ao sistema elétrico da concessionária.

Com isto, observa-se uma maior oscilação da velocidade da máquina quando comparada com a resposta obtida para o caso 7 (figura 4.37 (a)).



(a) (b)

Figura 4.37- Velocidade da máquina síncrona, mediante uma rejeição de carga no produtor independente. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado

Apesar da oscilação da velocidade da máquina síncrona, mais uma vez constata-se que esta variação não foi tão expressiva, a mesma se dá em torno da velocidade síncrona, a inércia do sistema elétrico de potência aliado a ação do *AVR* ajuda a amortecer essas oscilações.

Consequentemente, o controle de velocidade não atuará de forma decisiva no processo. Dessa forma não se torna necessário apresentar aqui, a resposta de desse regulador.

Após as análises realizadas para este caso (CASO 11: Rejeição de carga na geração independente, na presença de reator saturado, instalado na barra 3), pode-se concluir que:

- A instalação do reator de núcleo saturado no PAC provoca uma maior oscilação na velocidade da máquina, pois o mesmo também interfere na variação da fase da barra na qual está instalado;
- Estudos de alocação do reator de núcleo saturado devem ser realizados, com o objetivo de se obter melhores resultados do ponto de vista de qualidade da energia e de dinâmica de sistemas elétricos;
- A presença do reator de núcleo saturado assegura a manutenção da magnitude da tensão no PAC dentro de um valor aceitável, contribuindo para a melhoria da qualidade da energia. Isto demonstra a eficiência do emprego do reator saturado para mitigar os efeitos da rejeição de carga do PI;
- A magnitude da tensão na barra do PI, barra 4, também permanece em nível aceitável para a situação pós-contingência, na presença do reator.

CASO 12: Curto-circuito trifásico no PAC (barra 3), incluindo reator saturado, instalado na barra 3.

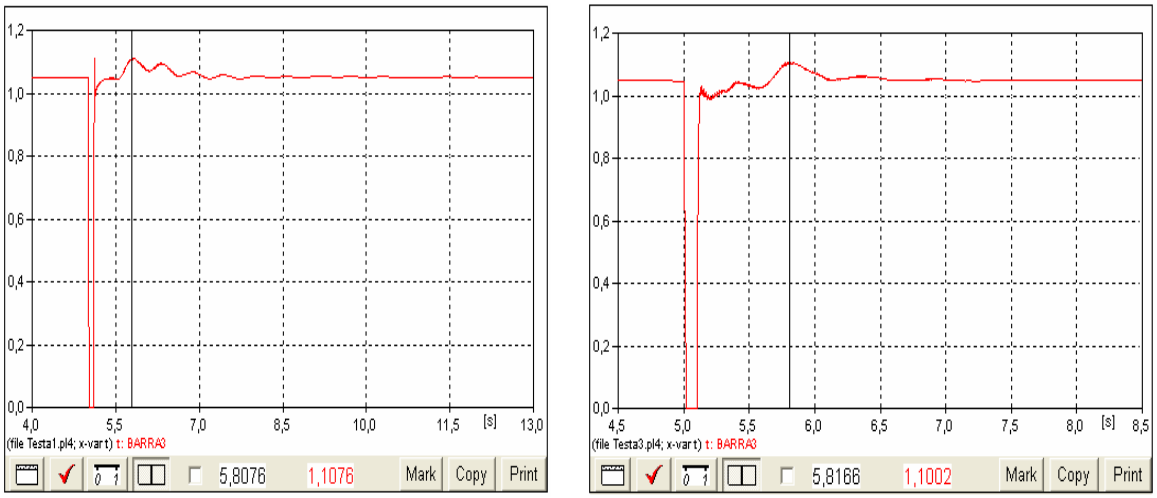
Objetivo*: avaliar o comportamento do sistema ilustrado pela figura 4.1, mediante a aplicação de um curto circuito trifásico no PAC, barra 3, com o reator de núcleo saturado instalado no mesmo (os resultados serão comparados com o caso 8, quando não há o reator saturado).*

Análise de resultados:

Conforme já comentado anteriormente, a referência [13] relata que para a ocorrência de uma falta na rede, o PI deve retirar seu gerador em um tempo máximo de 6 ciclos e o relé de retaguarda deve dar seu trip em 18 ciclos. Portanto, analisa-se o comportamento do sistema durante os 6 ciclos.

A figura 4.38 (b) ilustra a tensão na barra 3, PAC, durante a aplicação da contingência, na presença do reator saturado. Pode-se observar que a tensão, a exemplo do que acontece na figura 4.38 (a), extraída do caso 8, quando não há o reator saturado, sofre uma interrupção. Porém, uma análise

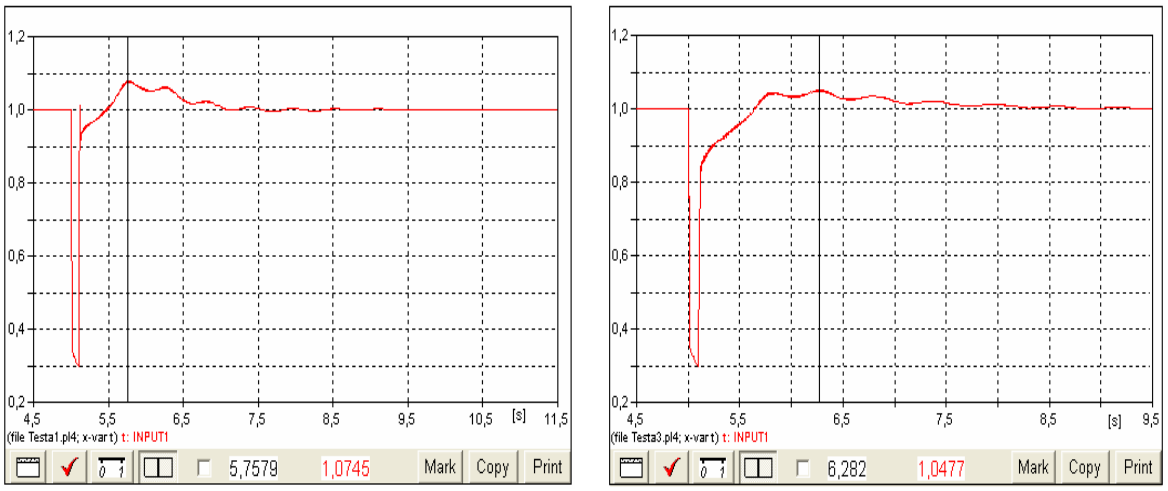
mais detalhada destas duas figuras mostra uma redução mais acentuada nas oscilações da tensão, no restabelecimento da tensão, para o presente caso (figura 4.38 (b)).



(a) (b)

Figura 4.38- Tensão na barra 3 após a aplicação de curto-circuito trifásico na mesma.
(a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado

A figura 4.39 ilustra o comportamento da tensão na barra do produtor independente energia, barra 4. Na figura 4.39 (a) o reator saturado ainda não está presente (caso 8). Na figura 4.39 (b) o reator já está conectado.

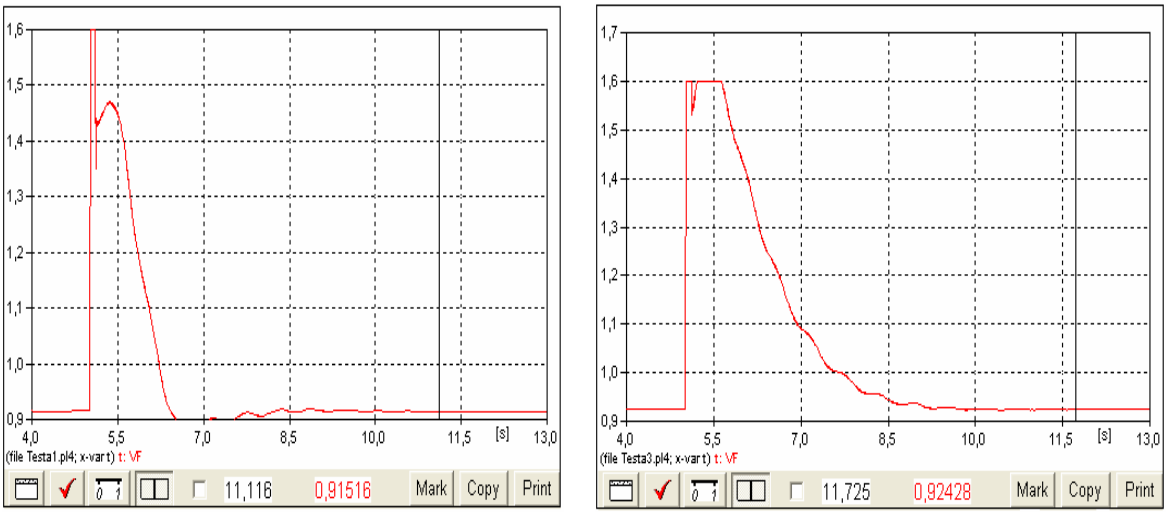


(a) (b)

Figura 4.39- Tensão na barra 4 após a aplicação de curto-circuito trifásico na barra 3.
(a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado

Observa-se aqui, para ambas as condições (sem e com o reator saturado), um afundamento de tensão para 0,3 pu. Porém, no período pós-distúrbio, nota-se uma redução nas oscilações da tensão para a figura 4.39 (b), onde o reator saturado está presente.

Prosseguindo nas análises, a figura 4.40 ilustra a atuação do regulador de tensão perante a aplicação do distúrbio.



(a) (b)

Figura 4.40- Resposta do regulador de tensão, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico no PAC. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado.

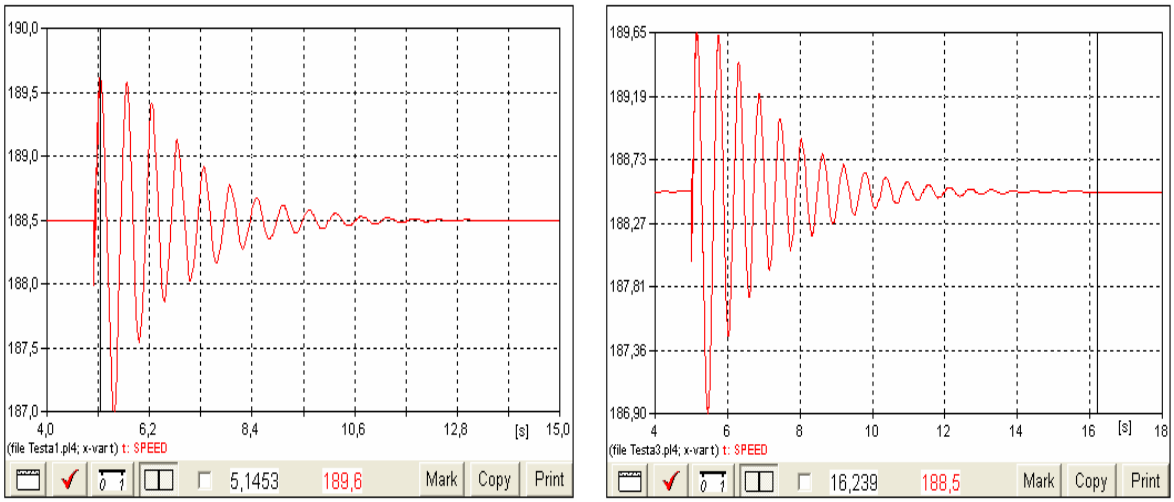
A figura 4.40 (a) refere-se à condição já comentada no caso 8. Já a figura 4.40 (b), refere-se à condição em que o reator saturado está presente. Ela mostra que, durante a falta, o regulador satura em seu limite superior de excitação, buscando assim restabelecer a tensão ao seu valor pré-distúrbio. Porém, mesmo após a retirada do curto, a tensão na barra 4 ainda se encontra abaixo do valor estabelecido para a mesma. Consequentemente, o regulador de tensão mantém a excitação no limite superior até que a tensão na barra de geração volte a alcançar 1,0 pu.

A figura 4.41 ilustra a resposta da velocidade da máquina do produtor independente nas condições sem e com reator saturado. Como pode ser observado, em ambas as hipóteses, a máquina tende a disparar para atender ao

curto-circuito, pois a mesma passa a fornecer apenas potência reativa neste momento.

A exemplo dos casos anteriores, não há uma oscilação expressiva da velocidade da máquina, pois o curto-circuito aplicado durou apenas 6 ciclos.

Consequentemente a proteção de sub, ou sobre-freqüência também não atuará, pois em [13], o tempo necessário para retirar a máquina do produtor independente é de 0,5s para sobre-frequências e de 1s para sub-frequências.



(a) (b)

Figura 4.41- Velocidade da máquina síncrona da geração independente, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico no PAC.
(a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado.

Como não há uma expressiva sensibilização do regulador de velocidade da máquina do PI, não é interessante apresentar a resposta desse regulador.

Após os estudos realizados para este caso 12 (Curto-circuito trifásico no PAC (barra 3), incluindo reator saturado, instalado na barra 3), pode-ser concluir que:

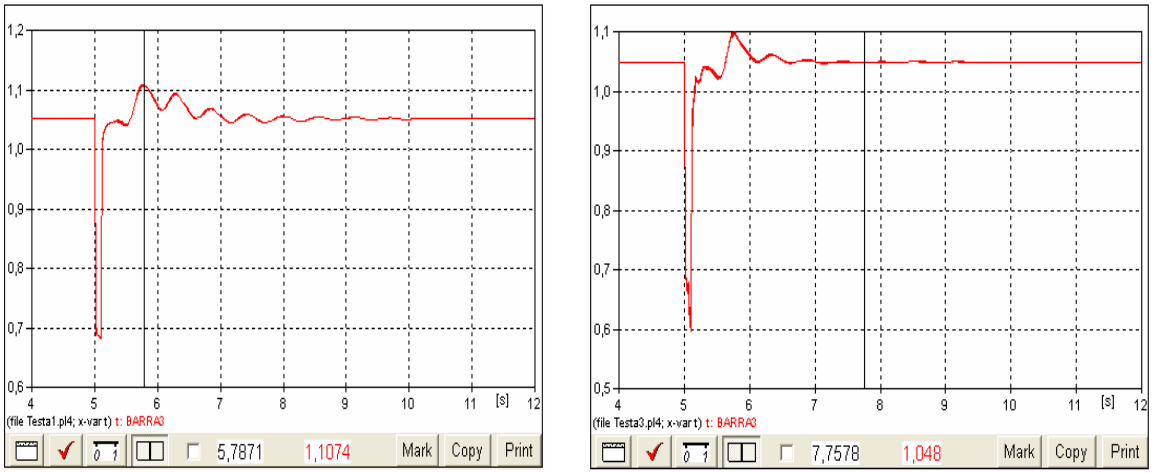
- A presença do reator de núcleo saturado ameniza as oscilações da tensão na barra 3, PAC, no momento imediatamente após a retirada da falta. Porém, ainda se verifica, em um dado instante, que a tensão atinge um valor de 1,1 pu no período pós-falta. Esta sobretensão é transitória e se deve a atuação do regulador de tensão da máquina do PI, que ainda se encontra no nível máximo de saturação;
- A tensão na barra do PI, barra 4, também apresenta uma redução nas oscilações de tensão no instante imediatamente após a retirada da falta. Mas aqui também se observa uma sobretensão de 1,048 pu, isto equivale a 7225,0 V fase-fase. Porém esta sobretensão é inferior à demonstrada pela figura 4.39 (a);
- A resposta em velocidade da máquina do PI independente de energia foi praticamente à mesma, independentemente da presença do reator.

CASO 13: Curto-circuito trifásico na geração independente (barra 5)

Objetivo: *avaliar os impactos na rede da concessionária e nas instalações elétricas do produtor independente, da contingência aqui aplicada, na presença do reator de núcleo saturado instalado no PAC.*

Análise de resultados:

A figura 4.42 ilustra o comportamento da tensão na barra 3 perante as condições estabelecidas para este caso.



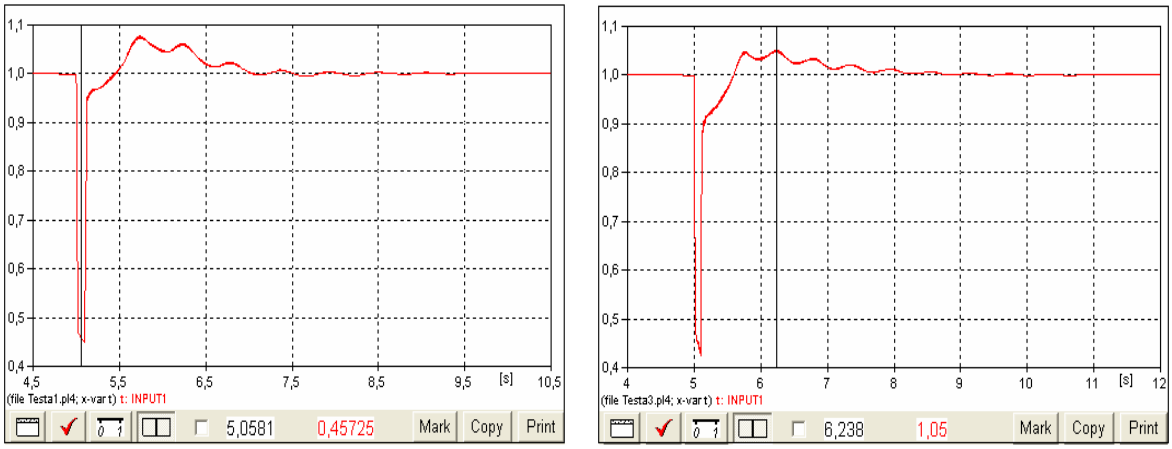
(a) (b)

Figura 4.42- Tensão na barra 3 após a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5.
(a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado.

Na figura 4.42 (b) observa-se, durante a falta, um afundamento para 0,6 pu, este afundamento de tensão é mais expressivo se comparado ao ilustrado pela figura 4.42 (a), quando o reator saturado está ausente. Isto se deve à presença do reator de núcleo saturado em paralelo com o banco de capacitores instalado no PAC.

Por outro lado, no período pós-falta, tem-se uma redução nas oscilações da tensão, figura 4.42 (b), quando comparada com a figura 4.42 (a).

As figuras 4.43 (a) e (b) ilustram o comportamento da tensão na barra do produtor independente de energia, sem e com o reator saturado, respectivamente.

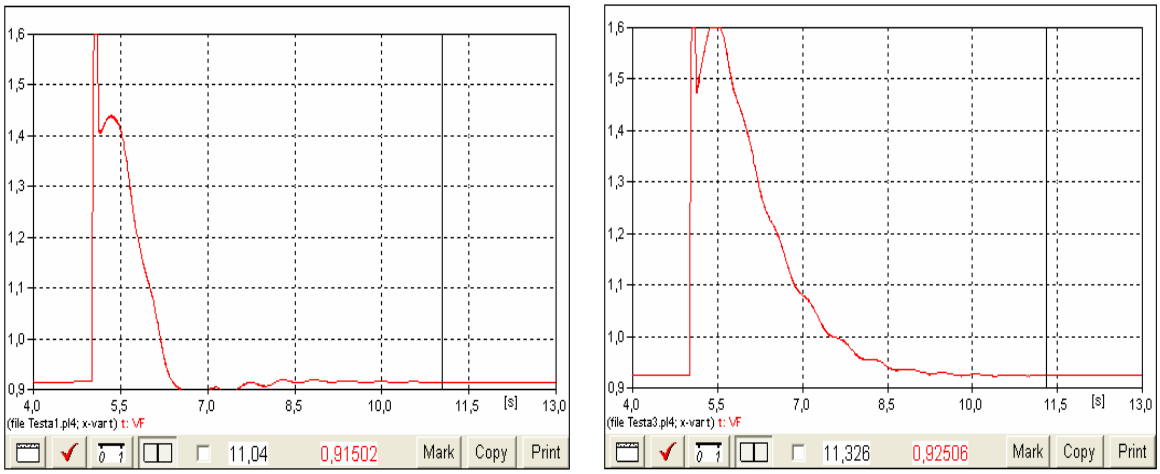


(a) (b)

Figura 4.43- Tensão na barra 4 após a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5.
(a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado.

Nas duas condições, a tensão na barra 4 sofreu um afundamento momentâneo de tensão considerável de 57%. Após a retirada da falta, devido à ação do regulador de tensão, a tensão começa a se elevar, ultrapassando o valor original, de 1,0 pu. Após um período de transitórios, o controle do regulador atua, diminuindo a excitação, reduzindo assim tensão na barra 4. A figura 4.43 (b), representativa da condição em que o reator saturado está presente, apresenta elevações de tensão menores do que na condição em que não há reator saturado (figura 4.43 (a)).

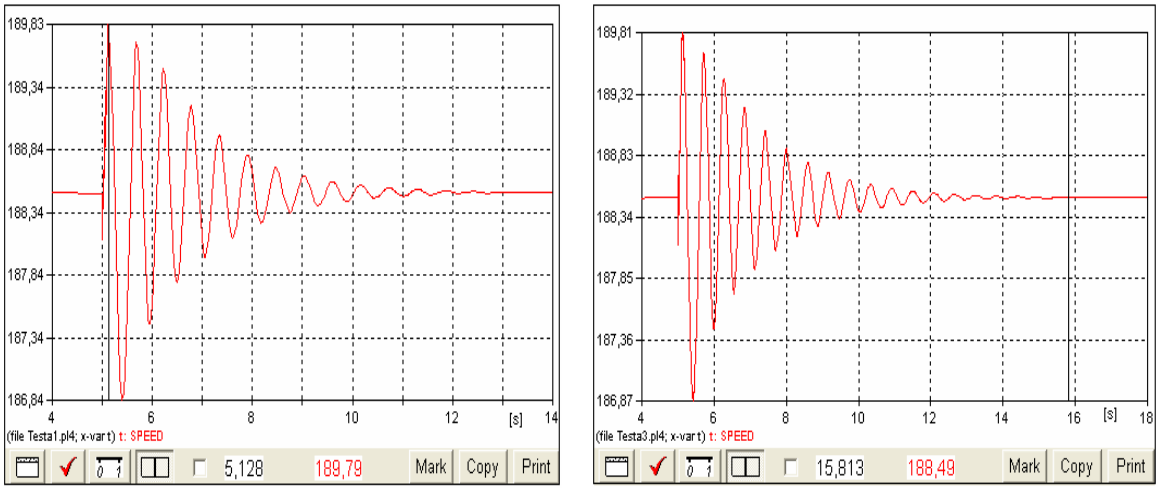
A figura 4.44 ilustra a ação do regulador de tensão da máquina síncrona do produtor independente de energia. Pelo fato de termos um reator em paralelo com o banco de capacitores instalado no PAC, o reativo gerado pelo banco é absorvido pelo reator na situação pós-contingência. Consequentemente, após a retirada do curto a quantidade de reativo líquida a ser fornecida por este banco ao sistema é menor, o que interfere no restabelecimento da tensão no período pós-distúrbio. Dessa forma, observa-se na figura 4.44 (b) o fato do regulador de tensão permanecer por um intervalo de tempo superior ao da figura 4.44 (a), na saturação máxima.



(a) (b)

Figura 4.44- Resposta do regulador de tensão, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5. (a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado.

As figuras 4.45 (a) e (b) ilustram a resposta em velocidade da máquina do produtor independente, perante a contingência aplicada, sem e com o reator saturado, respectivamente. As variações na velocidade da máquina do PI foram praticamente às mesmas. Observa-se, no instante da aplicação do curto, a tendência da máquina de disparar, elevando consigo a freqüência do sistema. Como o curto é retirado de forma rápida, pois ele dura apenas 6 ciclos, a velocidade não terá uma elevação tão considerável. Após a retirada do curto, a inércia do sistema elétrico de potência aliado à atuação do *AVR*, mais uma vez, contribui para o restabelecimento da velocidade da máquina para a situação pré-falta.



(a) (b)

Figura 4.45- Velocidade da máquina síncrona da geração independente, mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 5.
(a) Sem reator saturado; (b) Com reator saturado.

Todavia, a variação da velocidade da máquina não foi suficiente para sensibilizar de forma mais efetiva o regulador de velocidade da máquina. Dessa forma, não se torna conveniente a ilustração da resposta desse regulador.

Ao término deste caso 13 (Curto-circuito trifásico na geração independente (barra 5)), tem-se que:

- A presença do reator ameniza as oscilações de tensão no período após a retirada da falta, porém independente da presença desse reator, a tensão na barra 3, em um dado instante, atinge 1,1 pu;
- Devido ao fato deste reator estar em paralelo com o banco de capacitores instalado no PAC, o afundamento de tensão experimentado pela barra 3 se torna mais expressivo;
- A tensão na barra 4, barra do PI, apresenta uma maior estabilidade no que tange as oscilações na magnitude da tensão no período pós-contingência;
- A presença do reator em nada interferiu na resposta em velocidade do sistema.

4.5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao término deste capítulo algumas conclusões relativas a aplicação de contingências em um sistema elétrico que contém um produtor independente podem ser apresentadas. Tais conclusões serão apresentadas a partir dos casos estudados em que o produtor independente está conectado:

CASO 6: Rejeição de carga na concessionária

- A presença da geração independente de energia atenua os efeitos de uma rejeição de carga do sistema da concessionária;
- Há influência do regulador de tensão, mais especificamente das variáveis de controle de sub-excitação da máquina, na resposta em regime permanente na situação pós-distúrbio;
- A máquina do PI, no instante da aplicação da contingência, tende a disparar, oscilando sua velocidade. Alterando assim a freqüência do sistema do produtor independente. Porém, as oscilações transitórias são mitigadas pela inércia do sistema elétrico de potência em conjunto com a ação do *AVR*;
- O regulador de velocidade da máquina não atuará de forma expressiva em virtude da faixa morta do controle deste regulador. O sinal de entrada, erro, deste controle não é suficiente para sensibilizá-lo.

CASO 7: Rejeição de carga no sistema independente

- A magnitude da tensão no PAC fica comprometida, pois há um aumento considerável da tensão. Este aumento é mais pronunciado para a máquina que opera com um limite inferior de excitação de U_{fmin} = 0,9 pu;

- Uma proposta válida para mitigar a elevação da tensão no PAC seria a instalação de um reator de núcleo saturado capaz de absorver o reativo rejeitado pela carga interna da produção independente de energia elétrica;
- Há influência do regulador de tensão na resposta do sistema elétrico. Portanto, um dos itens a serem avaliados quando da inserção de um produtor independente ao sistema, consiste na análise de desempenho de seus controles, dos seus reguladores de tensão e de velocidade;
- As oscilações da velocidade da máquina são menos expressivas quando comparadas com as demonstradas pela figura 4.13;

CASO 8: Curto-circuito trifásico no PAC (barra 3)

- Os limites inferiores de excitação da máquina do PI em nada interferem na resposta do sistema. Os limites inferiores apenas influem em casos de elevação na magnitude da tensão na barra de geração. Apenas o limite superior de excitação da máquina afetaria a resposta do sistema, em virtude da necessidade de excitar a máquina do PI objetivando, assim, elevar a magnitude da tensão na barra 4. Portanto, pode-se inferir que a capacidade de sobre excitar a máquina síncrona do PI, ou seja, seu limite de suportabilidade máxima de excitação, também interfere na resposta do sistema;
- No instante imediatamente após a retirada da falta, há uma elevação na magnitude da tensão na barra 4. Esta elevação é devida a atuação do regulador de tensão do PI (que neste instante encontra-se saturado em seu limite superior de excitação).
- A resposta do regulador de tensão foi exatamente à mesma, independentemente do limite inferior de excitação utilizado;

- A resposta em velocidade da máquina, não é afetada pela alteração do limite inferior de excitação da máquina do PI.

CASO 9: Curto-circuito trifásico na geração independente (barra 5)

- É evidente a interferência do regulador de tensão, mais especificamente do limite inferior de excitação, nos casos em que há a necessidade da redução do nível de tensão na barra da geração independente de energia elétrica;
- Os consumidores instalados no PAC ficarão sujeitos a um afundamento de tensão durante seis ciclos;
- O período pós-falta causa uma elevação na tensão da barra 3. Essa elevação na magnitude da tensão se deve a retirada da falta e a ação do regulador de excitação da máquina do PI. Uma forma de minimizar a sobretensão no período pós-curto seria a utilização de um reator de núcleo saturado a ser instalado na barra 4;
- A resposta do regulador de tensão é a mesma independentemente do limite inferior de excitação adotado;
- A resposta em velocidade da máquina é a mesma e independe do limite inferior de excitação utilizado, figura 4.28.

CASO 10: Saída de linha de distribuição da concessionária

- A presença do PI auxilia na manutenção do nível de tensão no PAC devido à ação do regulador de excitação da máquina deste produtor;
- Apenas o limite superior de excitação do regulador poderá interferir neste caso. Dessa forma, tanto as respostas em tensão, em velocidade, e as próprias respostas dos reguladores são as mesmas para a contingência aplicada, independentemente do limite inferior de excitação adotado;

- Há uma desaceleração da máquina do produtor independente. Ressalta-se que apesar da alteração no valor de freqüência num primeiro momento, a proteção contra variações de freqüência não atuará.

CASO 11: Rejeição de carga na geração independente, na presença de reator saturado, instalado na barra 3.

- A instalação do reator de núcleo saturado no PAC provoca um acréscimo na oscilação da velocidade da máquina;
- Estudos de alocação do reator de núcleo saturado devem ser realizados, com o objetivo de se obter melhores resultados do ponto de vista de qualidade da energia e de dinâmica de sistemas elétricos;
- A presença do reator assegura a magnitude da tensão no PAC dentro de um valor aceitável;
- A magnitude da tensão na barra do PI, barra 4, também permanece em nível aceitável para a situação pós-contingência, na presença do reator.

CASO 12: Curto-circuito trifásico no PAC (barra 3), incluindo reator saturado, instalado na barra 3.

- A presença do reator de núcleo saturado ameniza as oscilações da tensão na barra 3, PAC, no momento imediatamente após a retirada da falta;
- A tensão na barra do PI, barra 4, também apresenta uma redução nas oscilações de tensão no instante imediatamente após a retirada da falta;
- A resposta em velocidade da máquina do PI independente de energia foi praticamente à mesma, independentemente da presença do reator.

CASO 13: Curto-circuito trifásico na geração independente (barra 5)

- A presença do reator ameniza as oscilações de tensão no período após a retirada da falta;
- Pelo fato do reator estar em paralelo com o banco de capacitores instalado no PAC, o afundamento de tensão experimentado pela barra 3 é mais expressivo;
- A tensão na barra 4, barra do PI, apresenta uma maior estabilidade no que tange as oscilações na magnitude da tensão;
- A presença do reator não interferiu na resposta em velocidade do sistema.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

Este capítulo tem como objetivo a apresentação das principais constatações obtidas nesta dissertação, enfatizando seus pontos de maior destaque e sugerindo temas para futuros trabalhos.

Neste sentido, o Capítulo 1 apresentou, de uma maneira geral, a evolução de comercialização de energia elétrica por autoprodutores e produtores independentes no Brasil, com enfoque na geração de energia oriunda do processo de queima do bagaço da cana em usinas de álcool e açúcar. Procedeu-se, em seguida, a uma breve discussão sobre as principais normas técnicas nacionais que regem a conexão de novos produtores independentes e autoprodutores ao sistema elétrico interligado. Também foi discutida uma das mais importantes normas técnicas utilizadas nos Estados Unidos da América. Para finalizar o capitulo 1, foi realizada uma comparação entre as bibliografias citadas anteriormente, onde os principais fatores técnicos foram ressaltados.

No Capítulo 2 apresentou-se a influência do regulador de tensão na resposta dinâmica do sistema elétrico de potência. Observaram-se as contribuições desse regulador no perfil de tensão do sistema quando da ocorrência de sobretensão ou subtensão, bem como o benefício obtido pelo seu emprego na manutenção da estabilidade da máquina síncrona, gerador, e melhoramento da estabilidade transitória da mesma. Também foi apresentada, de forma sucinta, a atuação do mecanismo de regulação de tensão, sendo

discutidos os principais arranjos típicos de reguladores de tensão utilizados em estudos de dinâmica de sistemas elétricos de potência. Para finalizar o capítulo, foi apresentada a estratégia computacional utilizada para a modelagem desse regulador no *ATP*.

No Capítulo 3 apresentou-se a importância do regulador de velocidade no comportamento dinâmico do sistema elétrico de potência. Suas principais funções e método de atuação foram comentados. Observou-se que tal dispositivo atua no sentido de elevar ou reduzir a potência mecânica do grupo de geração, quando sua velocidade se afasta daquela de referência, além de realizar a correta distribuição de potência entre as máquinas de um sistema multi-máquinas. O mecanismo de atuação de um regulador de velocidade foi apresentado e discutido, bem como os principais tipos de máquinas primárias utilizados para acionar os geradores de energia elétrica. Por fim, foi apresentada a função de transferência utilizada para representar o regulador de velocidade (com turbina a vapor), juntamente com a estratégia computacional utilizada para a sua modelagem no software *ATP*.

Já o Capítulo 4 teve como enfoque principal a análise e o estudo de casos, todos simulados no programa computacional *ATP*. Para tanto, primeiramente detalhou-se o sistema elétrico considerado nas simulações, o qual se trata de uma rede de distribuição de energia elétrica, conectada através de um transformador, ao gerador independente. Neste estudo foram feitas análises das respostas do sistema, perante as aplicações de contingências comuns aos sistemas elétricos de potência, mais especificamente aos sistemas de distribuição de energia elétrica na classe de 15 kV.

Neste contexto, levando-se em consideração as simulações apresentadas, bem como as observações destacadas ao final de cada caso simulado, chegou-se à conclusão de que, para algumas condições analisadas, a presença do produtor independente de energia se mostra atraente quando da

presença de determinadas contingências comuns às redes de distribuição. Nas simulações observa-se a influência das variáveis do regulador de tensão, mais especificamente dos limites de excitação, nas respostas do sistema elétrico, o que demonstra a necessidade de se realizar um correto dimensionamento de tal controle, para as máquinas a serem instaladas em paralelo com o sistema da concessionária. Quanto ao regulador de velocidade da máquina do produtor independente, nos casos analisados, foi constatado que o mesmo não é chamado a atuar de forma expressiva. Isso ocorre em virtude da faixa morta do controle deste regulador e da inércia do sistema de potência. Isto é, o sinal de erro na entrada deste controle não é suficiente para sensibilizá-lo.

Por outro lado, contingências aplicadas nas instalações elétricas do produtor independente afetam de forma clara os consumidores instalados no *PAC*. Isso leva à necessidade de medidas para mitigar tais efeitos nocivos e assegurar o funcionamento harmonioso dos sistemas, concessionária e produtor independente. Uma forma de mitigar tais efeitos foi apresentada: o reator de núcleo saturado. Observou-se que a presença do mesmo reduz de forma significativa as sobretensões evidenciadas no *PAC* perante algumas contingências aplicadas.

Apesar de uma série de comentários conclusivos já terem sido realizados nas considerações finais de cada capítulo, uma abordagem global enfocando as principais contribuições efetuadas por este trabalho se faz necessária. Dessa forma, as principais contribuições técnicas desta dissertação serão resumidas a seguir:

- Revisão bibliográfica em relação a normas técnicas para conexão de novos acessantes aos sistemas elétricos de distribuição e subtransmissão;

- Desenvolvimento de modelos computacionais no programa digital *ATP*, dos reguladores de tensão e de velocidade de uma máquina síncrona, para estudos que vislumbrem a viabilidade de conexão de produtores independentes de energia elétrica com o sistema de interligado;

- Apresentação dos benefícios e malefícios advindos quando da utilização dos reguladores de tensão e de velocidade da máquina síncrona, perante aplicações de contingências no sistema elétrico de potência;

- Realização de simulações computacionais envolvendo análises do perfil de tensão no *PAC* e dentro das instalações elétricas do produtor independente, perante a aplicação de contingências bem como análises das oscilações de velocidade da máquina, freqüência, do sistema do produtor independente.

Os procedimentos, as técnicas e as considerações descritas no presente trabalho, além de possibilitarem o desenvolvimento do modelo computacional apresentado e das diversas análises efetuadas ao longo desta dissertação, também poderão servir de base para futuras investigações do tipo:

- Desenvolvimento de pesquisas no sentido de aperfeiçoar as normas técnicas nacionais que regem a entrada de novos acessantes aos sistemas de distribuição e subtransmissão;

- Estudo e desenvolvimento de modelagens de reguladores de tensão, a exemplo dos mais utilizados nos programas de dinâmica de sistemas elétricos, tipo I e tipo II do IEEE;

- Modelagem dos reguladores no *ATPdraw*, possibilitando, assim, uma maior facilidade ao usuário, quando da utilização dos modelos;

- Desenvolvimento de técnicas que assegurem uma conexão segura e eficaz do sistema elétrico da concessionária com o produtor independente;

- Estudos de ponto ótimo para a alocação do reator de núcleo saturado;

- Análise de viabilidade técnica de sistemas, tal que o produtor independente receba parte de sua demanda de energia pelo sistema da concessionária e atenda o restante com sua autoprodução;

- Estudos de dinâmica e estabilidade de sistemas elétricos, através da análise do ângulo de carga do gerador.

ANEXO I

CARTA DE CAPABILIDADE DA MÁQUINA SÍNCRONA

A.1 - CARTA DE CAPABILIDADE DO GERADOR

A carta de capabilidade de um gerador síncrono ilustra os limites de operação da máquina, fornecimento de potência ativa e reativa, de forma a assegurar a estabilidade da mesma quando conectada ao sistema elétrico, [24].

Os limites para a operação dos geradores síncronos são:

- Aquecimento da armadura (corrente máxima de armadura);
- Aquecimento do enrolamento de campo (corrente máxima de campo);
- Potência mecânica da turbina;
- Estabilidade;
- Excitação máxima e excitação mínima da máquina.

A.1.1- LIMITE DE AQUECIMENTO DA ARMADURA

A passagem da corrente de armadura pelos enrolamentos provoca o aquecimento dos mesmos devido às perdas ôhmicas por fase. Essas perdas podem ser obtidas de acordo com a equação A.1:

$$P = R_a . I^2 \qquad \text{(A.1)}$$

Onde:

R_a = resistência da armadura, por fase.

É sabido que a reatância síncrona apresenta uma magnitude superior a resistência elétrica. Porém, esta é responsável pelo aquecimento dos enrolamentos. Portanto, a resistência pode ser responsável pela limitação da máxima potência fornecida em algumas situações de operação da máquina síncrona.

A figura A.1 ilustra a influência do aquecimento na potência ativa máxima fornecida pela máquina. Considera-se que a mesma está conectada a um barramento infinito de tensão terminal $\mathbf{V_t}$.

A corrente de armadura além de ser responsável pelo aquecimento da máquina, também é responsável pelo valor de potência aparente (MVA) fornecido. Contudo, dependendo do ângulo θ, ter-se-á uma limitação de potência ativa a ser fornecida pela máquina.

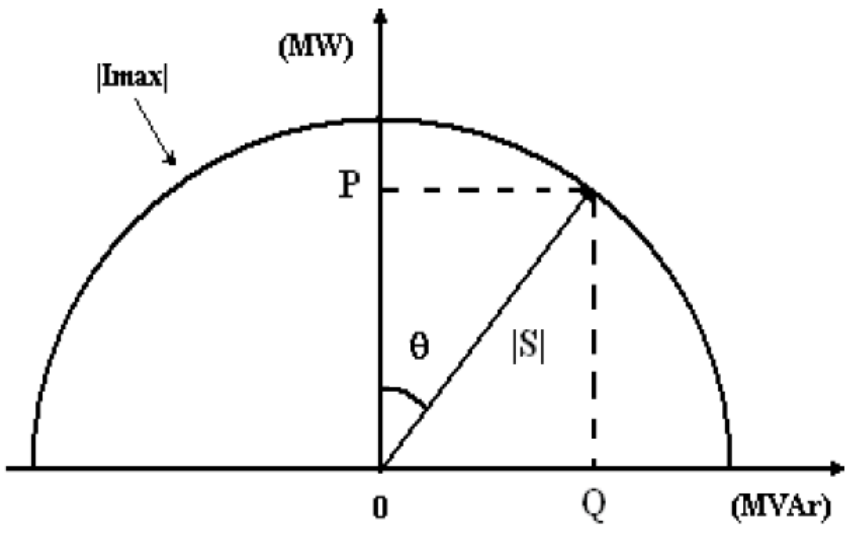


Figura A.1- Limite de aquecimento da armadura (corrente de armadura)

A.1.2- LIMITE DE AQUECIMENTO DO ENROLAMENTO DE CAMPO

Devido à corrente elétrica aplicada ao enrolamento de campo, enrolamento este localizado no rotor da máquina, esse enrolamento pode sofrer aquecimento por fase. Tal fato pode ser demonstrado pela equação A.2:

$$P = R_f . I_f^{\,2} \qquad \text{(A.2)}$$

Onde:

R_f = resistência do enrolamento de campo;

I_f = corrente de campo.

O limite de aquecimento do enrolamento de campo é mostrado na figura A.2 através de um segmento de circunferência. Tal segmento apresenta centro em **O`** e raio $\frac{E_t . V_f}{X_s}$, onde E_t se refere a força eletromotriz produzida pela corrente de campo (valor correspondente à máxima corrente de campo). A variável $\mathbf{V_f}$, apresentada como $\mathbf{V_t}$ na figura A.2, se refere a tensão da barra infinita na qual está conectado o gerador, cuja reatância síncrona é representada por X_s.

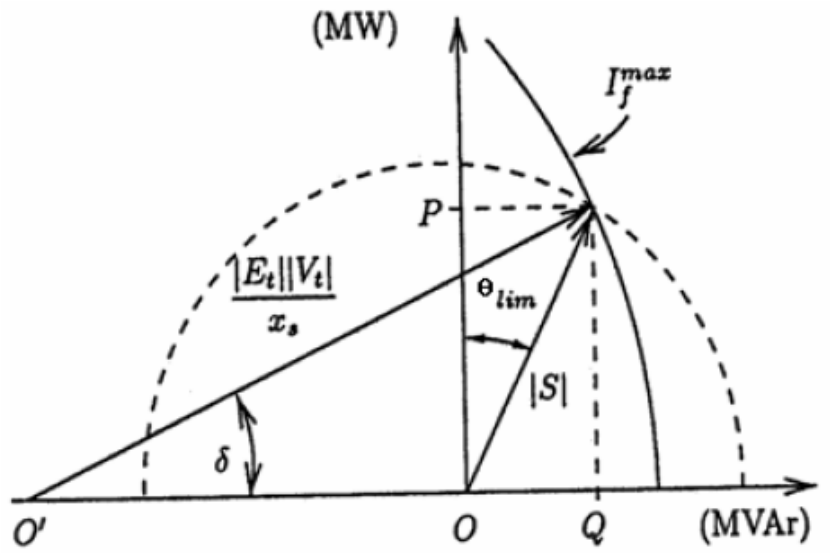


Figura A.2- Limite de aquecimento do enrolamento de campo

A.1.3- LIMITE DE POTÊNCIA DA TURBINA

Existe uma máxima potência mecânica fornecida pela turbina ao eixo do gerador síncrono. Essa potência mecânica máxima é representada seguinte pela equação:

$$P_{mec} = T.\omega_s \tag{A.3}$$

Onde:

T = torque;

ω_s = velocidade mecânica = $\frac{2\pi f}{p}$, sendo f a freqüência e p o número de pares de pólos da máquina.

Através da figura A.3 vislumbra-se o limite máximo de potência mecânica aplicada ao eixo do gerador através de um valor máximo de potência ativa gerada. De acordo com as características da máquina síncrona, esse limite pode ser mais restritivo ou menos restritivo quando comparado ao limite imposto pelo aquecimento da armadura. Na figura aqui apresentada, o limite está mais restritivo.

Ressalta-se que o limite de potência mecânica da turbina só afeta a potência ativa, pois a parcela de energia líquida associada à potência reativa é nula.

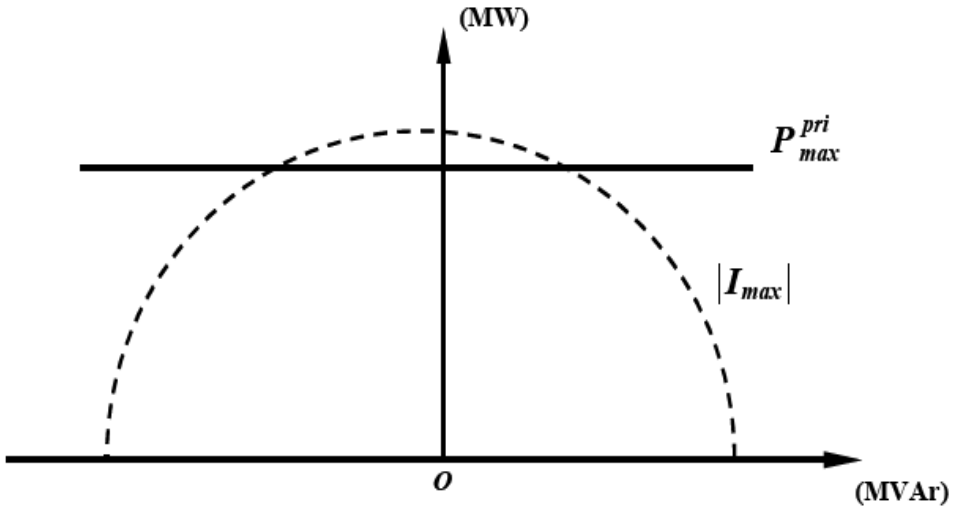


Figura A.3- Limite de potência mecânica da turbina

A.1.4- LIMITE DE ESTABILIDADE

O limite de estabilidade da máquina síncrona, funcionando como gerador, é dependente do ângulo de potência máximo permitido, $\delta_{máx}$.

A figura A.4 apresenta duas situações distintas: ponto **O`**compreendido dentro dos limites térmicos de operação da armadura e o ponto **O``** externo ao limite térmico da armadura. Para ambos os casos, o limite de $\delta_{\max} = \pi/\mathbf{2}$ aparece como uma linha vertical. Porém, para o caso ilustrado para o ponto **O``**, que se apresenta fora da região de aquecimento viável da armadura, o limite de estabilidade é inoperante. Pode-se observar também, outras situações nas quais os limites de estabilidade são impostos na forma de uma margem angular em relação ao ângulo máximo teórico ($\pi/\mathbf{2}$).

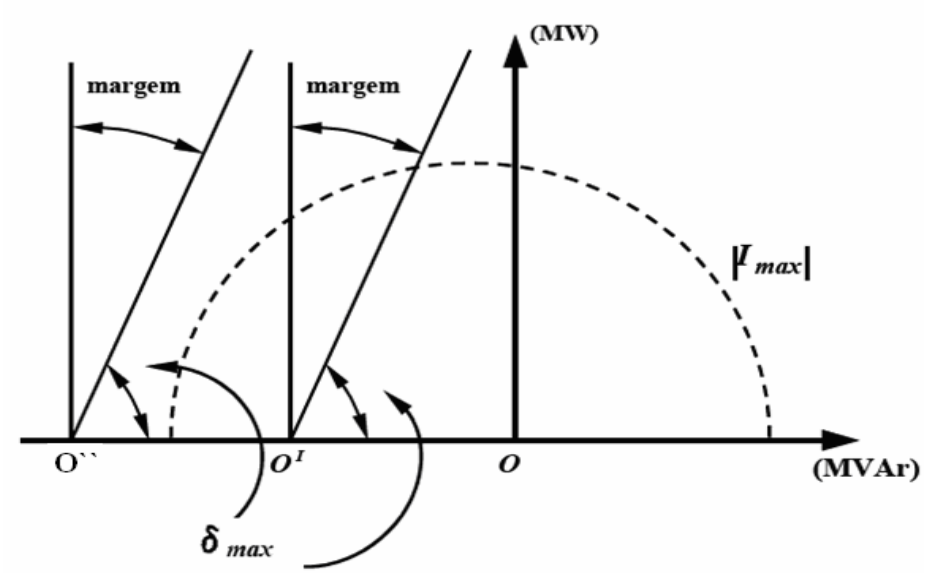


Figura A.4- Limite de estabilidade devido ao máximo valor do ângulo de potência ($\delta_{\max}$)

A curva P - δ ilustrada pela figura A.5 mostra que ao se reduzir a excitação da máquina, haverá uma redução na magnitude de E_f. Consequentemente, o valor máximo de potência teórica também sofrerá uma redução. É sabido que há uma margem em **MW** especificada para a operação do gerador síncrono. Dessa forma, quanto menor a excitação, menor será o ângulo de operação possível a fim de se manter a referida margem em **MW** de operação da máquina.

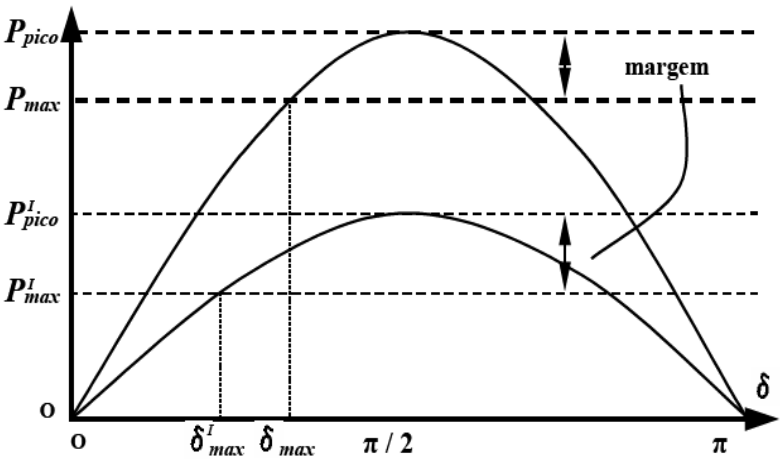


Figura A.5- Efeito da margem de estabilidade em potência no valor de $\delta_{\max}$

A.1.5- LIMITE DE EXCITAÇÃO MÍNIMA DA MÁQUINA

A contínua redução da corrente de excitação I_f levará a curva demonstrada na figura A.4 a operar sobre o eixo das abscissas (capacidade de geração de potência ativa nula). Portanto, uma limitação adicional deve ser imposta ao valor da corrente de excitação.

A figura A.6 ilustra no gráfico de potência (P,Q) os lugares geométricos das correntes de campo, I_f.

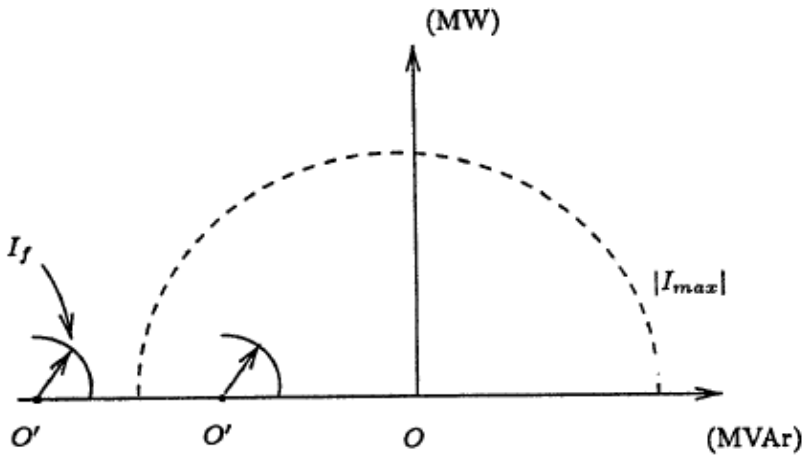


Figura A.6- Limite mínimo de excitação do gerador síncrono

A.1.6- CURVA FINAL DE OPERAÇÃO DA MÀQUINA

De acordo com todos os limites operativos descritos anteriormente para o funcionamento da máquina, é apresentada, através da figura A.7, a carta de capabilidade dos geradores síncronos.

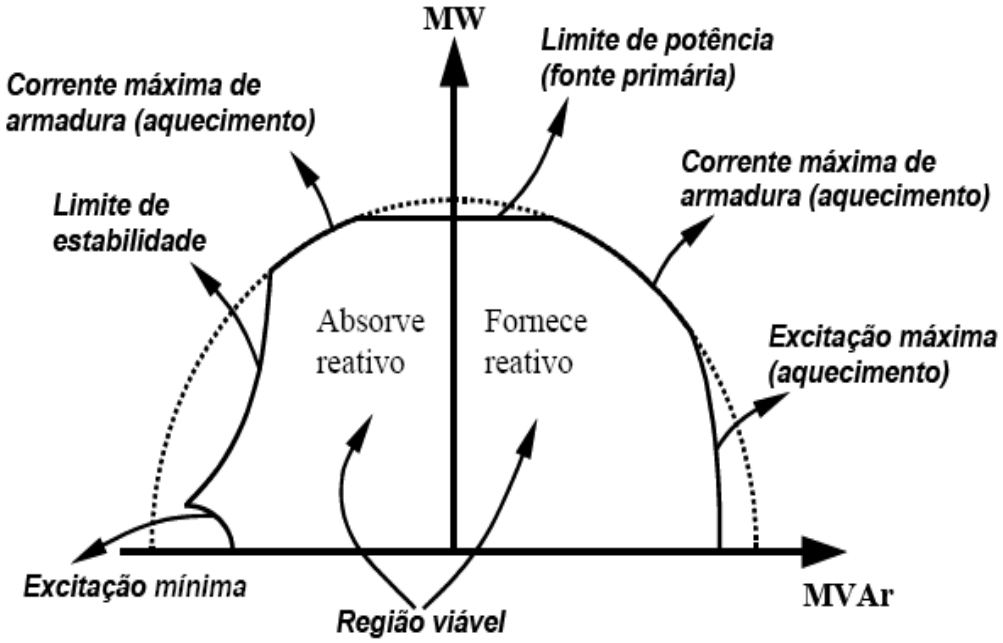


Figura A.7- Carta de capabilidade do gerador síncrono

A.2- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este anexo apresentou os principais fatores limitantes para a correta operação do gerador síncrono, de forma a assegurar sua estabilidade e vida útil.

Foi comentado sobre o limite térmico de operação da armadura e observado que tal limite está intimamente relacionado com as perdas ôhmicas devido à passagem da corrente elétrica aplicada pela resistência da armadura.

Quanto ao limite de aquecimento do enrolamento de campo, foi apresentado que tal limite se deve as perdas ôhmicas provocadas pela passagem da corrente de excitação pela resistência do enrolamento de campo presente no rotor.

Quando da geração de potência ativa pela máquina síncrona, gerador, existe um limite máximo de potência mecânica a ser aplicada ao eixo do gerador. Isto se deve a limitações mecânicas da máquina primária.

Quanto ao limite de estabilidade da máquina, foi observado que o gerador opera dentro de uma margem aceitável para variações no ângulo de potência. Além disso, a diminuição na excitação da máquina leva a uma redução do $\delta_{\max}$.

A fim de se eliminar o risco da máquina operar de forma a não gerar potência ativa, um limite inferior de excitação é utilizado. Tal artifício assegura a operação dentro de limites aceitáveis para a geração de potência ativa.

Por fim é apresentada a carta de capabilidade do gerador síncrono constituída dos demais limites operativos discutidos anteriormente, demonstrando assim a região viável de operação de um gerador síncrono.

ANEXO II

DADOS DO REGULADOR DE TENSÃO E DA MÁQUINA SÍNCRONA DO PRODUTOR INDEPENDENTE DE ENERGIA ELÉTRICA

A- Dados da máquina síncrona

Dados necessários a G2	
S_n = 5MVA	x_0 = 0,046pu
U_n = 6,6kV	$T`_{d0}$ = 1,754s
R_A = 0,004pu	$T`_{q0}$ = 0s
x_L = 0,1pu	$T``_{d0}$ = 0,019s
x_d = 1,8pu	$T``_{q0}$ = 0,164s
x_q = 1,793pu	J = 74,8kgm^2
$x`_d$ = 0,166pu	P = 4 pólos
$x`_q$ = 0,98pu	f = 60Hz
$x``_d$ = 0,119pu	ω_s = 188,5 rad/s
$x``_q$ = 0,17pu	

Onde:

S_n = potência aparente nominal.

U_n = Tensão nominal.

R_A = resistência de armadura (pu).

x_L = reatância de dispersão da armadura (pu).

x_d = reatância de eixo direto (pu).

x_q = reatância de eixo de quadratura (pu).

$x`_d$ = reatância transitória de eixo direto (pu).

$x`_q$ = reatância transitória de eixo de quadratura (pu).

$x``_d$ = reatância subtransitória de eixo direto (pu).

$x``_q$ = reatância subtransitória de eixo de quadratura (pu).

x_0 = reatância de seqüência zero (pu).

$T`_{d0}$ = constante de tempo de curto-circuito, transitório de eixo direto (s).

$T`_{q0}$ = constante de tempo de curto-circuito, transitória de eixo de quadratura (s).

$T``_{d0}$ = constante de tempo de curto-circuito, subtransitória de eixo direto (s).

$T``_{q0}$ = constante de tempo de curto-circuito, subtransitória de eixo de quadratura (s).

J = momento de inércia (Kg.m^2).

P = número de pólos.

f = freqüência (Hz).

ω_s = velocidade síncrona em (rad/s).

B- Dados do regulador de tensão

Dados do regulador de tensão
V_{ref} = 1,0pu
K_a = **250**
K_f = 0,1
T_a = 0,8s
T_f = 0,1
V_{max} = 1,6pu
V_{min} = 0,8pu

Onde:

V_t = tensão na barra da geração independente (pu).

V_{ref} = tensão de referência (pu).

K_a = ganho do regulador.

K_f = ganho de tempo do circuito estabilizante do regulador.

T_a = constante de tempo amplificada do regulador (s).

T_f = constante de tempo do circuito estabilizador do regulador (s).

$V_{\max}$ = limite máximo da tensão de saída do regulador (pu).

$V_{\min}$ = limite mínimo da tensão de saída do regulador (pu).

E_f = tensão de campo (pu).

ANEXO III

DADOS DO REGULADOR DE VELOCIDADE

A- Dados do regulador de velocidade

Flyballs Ganho (pu)	**Regulação (pu)**	**Tfb (s)**	**T1 (s)**	**T2 (s)**	**T3 (s)**	**T4 (s)**	**T5 (s)**	**P_{ref} (pu)**	**$P_{máx.}$ (pu)**
1,0	0,05	0,2	0,0	0,0	0,3	0,0	0,3	1,0	1,2

ANEXO IV

ALGORITMO IMPLEMENTADO NO *ATP*

A- Algoritmo computacional representativo do sistema elétrico simulado

```
* * * Top of File * * *
BEGIN NEW DATA CASE
C ------------------------------------------------------------
C Generated by ATPDRAW  junho, sexta-feira 15, 2007
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEfAS - NORWAY 1994-2003
C ------------------------------------------------------------
C  dT  >< Tmax >< Xopt >< Copt >
   1.E-5    15.     60.
     500       1       1       1       1       0       0       1       0
C        1         2         3         4         5         6         7         8
C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
TACS HYBRID
C -------------------------CONTROLE DA VELOCIDADE----------------------------------
92SPEED
 0IN      +REFER  -SPEED                                1.
 1PB      +IN                                           1.
    0.003                                               1.
    1.         .2
 1C1      +PB                                           1.
    20.
    1.         .2
 1C2      +C1                                           1.
    1.
    1.         .3
 0C3      +C2     +REFERE                               1.
 0C4      +C3                                           1.   0.    1.2
98TESTE   = C4*1.
 1PM      +TESTE                                        1.
    1.
    1          .3
C ------------------------CONTROLE DA EXCITAÇÃO-----------------------------------
90VF1
90BAR4_A
90BAR4_B
90BAR4_C
98INPUTA66+BAR4_A                                   60
98INPUT2  =INPUTA/3810.
C ------------------------------------------------------------------------------------
90BAR3_A
98INPUTB66+BAR3_A                                   60
98INPUT3  =INPUTB/7967.4
98BARRA360+UNITY  +UNITY  +INPUT3                   0.018             TIMEX
C ------------------------------------------------------------------------------------
```

```
90BAR2_A
98INPUTC66+BAR2_A                                   60
98INPUT4  =INPUTC/7967.4
98BARRA260+UNITY  +UNITY  +INPUT4                   0.018             TIMEX
C ------------------------------------------------------------------------------
90BAR1_A
98INPUTD66+BAR1_A                                   60
98INPUT5  =INPUTD/6581.8
98BARRA160+UNITY  +UNITY  +INPUT5                   0.018             TIMEX
C ------------------------------------------------------------------------------
90BAR5_A
98INPUTE66+BAR5_A                                   60
98INPUT6  =INPUTE/219.43
98BARRA560+UNITY  +UNITY  +INPUT6                   0.018             TIMEX
C -----------------------Cartão de funções da TACS--------------------------------
 0XX0046  +REFERE -INPUT1 +XX0052                      1.
 1XX0048  +XX0046                                      1.  -0.2   0.6
    150.
      1.        .1
98ENT     = XX0048+1.00
98FAB     = XX0048
98SAID  60+ENT    +VF1    +ENT                                            FAB
98INPUT160+UNITY  +UNITY  +INPUT2                   0.518             TIMEX
 0VF                      +SAID                       1.
 1XX0050                  +XX0048                     1.
                .1
      1.        .1
98XX0052  = -XX0050
C ------------------------CONDIÇÕES INICIAIS-------------------------------------
77VF      1.
77SPEED   188.5
77INPUT1  1.
77BARRA2  1.0365
77BARRA3  1.038
77VF1     1.
77BAR4_A  3810.
77BAR4_B  3810.
77BAR4_C  3810.
77BAR3_A  8270.2
77BAR3_B  8270.2
77BAR3_C  8270.2
77BAR2_A  8258.2
77BAR2_B  8258.2
77BAR2_C  8258.2
77PM      1.
```

```
C ---------------------------------FONTES-----------------------------------------
11REFERE   1.                                                  0.        95
11REFER    188.5                                               0.        95
C ------------------------------Variáveis de saida da TACS-------------------------
33PM
33SPEED
33VF
33INPUT1
33BARRA2
33BARRA3
33BARRA1
33BARRA5
BLANK
C -----------------------DADOS DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA-------------------
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R  >< L  >< C  >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R  >< A  >< B  ><Leng><><>0
  TRANSFORMER                .38   .38X0004A  1.E6                              0
            9999
 1BAR1_ABAR1_C                   .324911400.
 2BAS1_AXX0006                   .15877967.4
  TRANSFORMER X0004A                  X0004B
 1BAR1_BBAR1_A
 2BAS1_BXX0006
  TRANSFORMER X0004A                  X0004C
 1BAR1_CBAR1_B
 2BAS1_CXX0006
C -----------------------LINHA DE DISTRIBUIÇÃO 1---------------------------------
  CHA1_ALDT1_A              1.059.0209                                          0
  CHA1_BLDT1_B              1.059.0209                                          0
  CHA1_CLDT1_C              1.059.0209                                          0
C -----------------------LINHA DE DISTRIBUIÇÃO 2---------------------------------
  CHA2_ALDT2_A              1.059.0209                                          0
  CHA2_BLDT2_B              1.059.0209                                          0
  CHA2_CLDT2_C              1.059.0209                                          0
C ---------------------------------CARGA 1-----------------------------------------
  CAR1_A                  14.016  5.97                                          0
  CAR1_B                  14.016  5.97                                          0
  CAR1_C                  14.016  5.97                                          0
C ---------------------------------CARGA 2-----------------------------------------
  CAR2_A                  14.016  5.97                                          0
  CAR2_B                  14.016  5.97                                          0
  CAR2_C                  14.016  5.97                                          0
```

```
C ------------------------------TRANSFORMADOR 2-----------------------------------
  TRANSFORMER                 .38    .38X0033A  1.E6                              0
            9999
 1TRA2_AXX0034                    1.5877967.4
 2BAS2_ABAS2_B                    1.089 6600.
  TRANSFORMER X0033A                   X0033B
 1TRA2_BXX0034
 2BAS2_BBAS2_C
  TRANSFORMER X0033A                   X0033C
 1TRA2_CXX0034
 2BAS2_CBAS2_A
C ----------------------------TRANSFORMADOR 3-------------------------------------
  TRANSFORMER                 .38    .38X0045A  1.E6                              0
            9999
 1BAR4_ABAR4_C                    1.089 6600.
 2BAR5_AXX0047                    .0012  220.
  TRANSFORMER X0045A                   X0045B
 1BAR4_BBAR4_A
 2BAR5_BXX0047
  TRANSFORMER X0045A                   X0045C
 1BAR4_CBAR4_B
 2BAR5_CXX0047
C ----------------------------------CARGA 3-------------------------------------
  CAR3_A                      .055  .023                                          3
  CAR3_B                      .055  .023                                          3
  CAR3_C                      .055  .023                                          3
C ---------------------------IMPEDÂNCIA DO GERADOR 1----------------------------
  GER1_ABAR1_A                        .65                                         3
  GER1_BBAR1_B                        .65                                         3
  GER1_CBAR1_C                        .65                                         3
C ----------------------Banco de Capacitores da Barra 3-------------------------
  BAR3_A                               111.43                                     3
  BAR3_B                               111.43                                     3
  BAR3_C                               111.43                                     3
C ----------------------Banco de Capacitores da Barra 2-------------------------
  BAR2_A                               69.64                                      3
  BAR2_B                               69.64                                      3
  BAR2_C                               69.64                                      3
BLANK
C ----------------------------CHAVES TRIFÁSICAS----------------------------------
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde ><   Ie   ><Vf/CLOP ><  type  >
  BAR2_ACHA1_A       -1.        6.                                               4
  BAR2_BCHA1_B       -1.        6.                                               4
  BAR2_CCHA1_C       -1.        6.                                               4
```

```
C ------------------------------------------------------------------------------
  BAR2_ACHA2_A       -1.       80.                                            4
  BAR2_BCHA2_B       -1.       80.                                            4
  BAR2_CCHA2_C       -1.       80.                                            4
C ------------------------------------------------------------------------------
  LDT1_ABAR3_A       -1.        6.                                            4
  LDT1_BBAR3_B       -1.        6.                                            4
  LDT1_CBAR3_C       -1.        6.                                            4
C ------------------------------------------------------------------------------
  LDT2_ABAR3_A       -1.       80.                                            4
  LDT2_BBAR3_B       -1.       80.                                            4
  LDT2_CBAR3_C       -1.       80.                                            4
C ------------------------------------------------------------------------------
  BAR2_ACAR1_A       -1.       80.                                            4
  BAR2_BCAR1_B       -1.       80.                                            4
  BAR2_CCAR1_C       -1.       80.                                            4
C ------------------------------------------------------------------------------
  BAR3_ACAR2_A       -1.       80.                                            4
  BAR3_BCAR2_B       -1.       80.                                            4
  BAR3_CCAR2_C       -1.       80.                                            4
C ------------------------------------------------------------------------------
  BAR3_ATRA2_A       20.       -1.                                            3
  BAR3_BTRA2_B       20.       -1.                                            3
  BAR3_CTRA2_C       20.       -1.                                            3
C --------------------------CURTO TRIFASICO NA BARRA 3--------------------------
  BAR3_A             16.       -1.                                            3
  BAR3_B             16.       -1.                                            3
  BAR3_C             16.       -1.                                            3
C ------------------------------------------------------------------------------
  BAS2_ABAR4_A       20.       -1.                                            4
  BAS2_BBAR4_B       20.       -1.                                            4
  BAS2_CBAR4_C       20.       -1.                                            4
C ------------------------------------------------------------------------------
  BAR4_AGPDI_A       -1.       80.                                            4
  BAR4_BGPDI_B       -1.       80.                                            4
  BAR4_CGPDI_C       -1.       80.                                            4
C --------------------------CARGA DA INDÚSTRIA----------------------------------
  BAR5_ACAR3_A       -1.       33.                                            4
  BAR5_BCAR3_B       -1.       33.                                            4
  BAR5_CCAR3_C       -1.       33.                                            4
C ------------------------CURTO TRIFÁSICO NA BARRA 5-------------------------
  BAR5_A             80.       -1.                                            3
  BAR5_B             80.       -1.                                            3
  BAR5_C             80.       -1.                                            3
C ------------------------------------------------------------------------------
  BAS1_ABAR2_A       -1.       80.                                            4
  BAS1_BBAR2_B       -1.       80.                                            4
  BAS1_CBAR2_C       -1.       80.                                            4
  VF    VF1          -1.      120.
BLANK
60VF
C --------------------------------FONTES-----------------------------------------
C < n 1><>< Ampl.  >< Freq.  ><Phase/T0><   A1   ><   T1   >< TSTART >< TSTOP  >
C -------------------FONTE DE REPRESENTAÇÃO DA CONCESSIONÁRIA--------------------
14GER1_A 0    9773.5       60.                                   -1.       80.
14GER1_B 0    9773.5       60.     -120.                          -1.       80.
14GER1_C 0    9773.5       60.      120.                          -1.       80.
C -------------------------GERADOR DA INDÚSTRIA---------------------------------
C -------------------Dados eletricos da maquina sincrona-------------------------
59GPDI_A   5192.9          60.   0.
  GPDI_B
  GPDI_C
C ------------------------------------------------------------------------------
PARAMETER FITTING             2.
 1 1  14        1.        1.     5.0         6.6     4.2
BLANK
    0.004      .1         1.8      1.793     .166       .98      .119       .17
    1.754                 0.019    0.164     .046                          .1
```

•

•

•

•

```
C -------------------------Saídas desejadas-------------------------------------
  11
  21
  31
  41
  51
BLANK
72PM            1
74SPEED         2
71VF
  FINISH
BLANK
  BAR1_A
  BAR1_B
  BAR1_C
  BAR2_A
  BAR2_B
  BAR2_C
  BAR3_A
  BAR3_B
  BAR3_C
  BAR4_A
  BAR4_B
  BAR4_C
  BAR5_A
  BAR5_B
  BAR5_C
  GPDI_AGPDI_BGPDI_CGER1_AGER1_BGER1_C
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
* * * End of File * * *
```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES – acessado na Internet em 03/12/2007, página http://www.bndes.gov.br/conhecimento/bnset/alcool.pdf, às 15:55.

[2] Álcool Combustível, encontrado na Internet em 03/12/2007, página http://www.pick-upau.com.br/mundo/alcool_combustivel, às 15:38.

[3] Eletrobrás – Usinas de Cogeração – acessado na Internet em 03/12/2007, página http://www.eletrobras.gov.br/downloads/IN_Noticias_Assuntos, às 16:19.

[4] Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL – Ligação de Autoprodutores em Paralelo com o sistema de distribuição da CPFL acessado em 22/04/2008, página http://agencia.cpfl.com.br/publ_tecnica/Normas, às 12:19.

[5] Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG – Cartilha do Acessante aos Sistemas de Subtransmissão e de Média Tensão da Distribuição. NO – 02.111-EM/OM-062, Junho de 2002.

[6] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, Submódulo 3.4, Informações para a Solicitação de Acesso, Brasília, DF, 2007, acessado na Internet em 22/04/2008, página http://www.ons.org.br/download/procedimentos/Submodulo3.4.pdf, às 14:39.

[7] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, Submódulo 3.5, Inspeções e Ensaios nas Instalações de Conexão, Brasília, DF, 2007, acessado na Internet em 22/04/2008, página

http://www.ons.org.br/download/procedimentos/Submodulo3.5.pdf, às 14:41.

[8] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Resolução Nº 281, 01 de Outubro de 1999.

[9] Companhia Paranaense de Energia Elétrica – COPEL – Requisitos Técnicos para a Conexão de Geração em Paralelo com o Sistema Elétrico da COPEL, outubro de 2002.

[10] Bandeirante Energia S/A – Conexão de Autoprodutores e Produtores Independentes no Sistema Elétrico de 15/25 kV da Bandeirante Energia S/A. Recomendação Técnica RT 008-0 de Junho de 2001.

[11] Centrais Elétricas de Santa Catarina S/A – CELESC – Requisitos Gerais para Conexão de Autoprodutor e Produtor Independente de Energia à Rede da CELESC. Código: I-432.0003 de 29 de Junho de 2006.

[12] Companhia Energética do Ceará – COELCE – Conexão de Produtor Independente e Autoprodutor de Energia com o Sistema Elétrico da COELCE. Norma técnica NT-008/2004, de Setembro de 2004.

[13] LIPA-Long Island Power Authority, Control and Protection Requirements for Independent Power Producers, Transmission Interconnections, encontrado na Internet em 22/11/2007, na página: http://tinyurl.com/33clq4

[14] RIBEIRO, V. P., Análise computacional da dinâmica de estabilizadores de sistemas de potência tipos convencional e fuzzy, dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

[15] GUIMARÃES, G. C, "Curso de teoria e análise de estabilidade de sistemas elétricos-Partes I e II" Pós-graduação em Engenharia Elétrica FEELT/UFU, 1996.

[16] GUIMARÃES, G. C, Computer methods for transient stability analysis of isolated power generation systems with special reference to prime mover and induction motor modeling", PhD Thesis, University of Aberdeen, Scotland, GB, 1990.

[17] ANDERSON, P. M. and FOUAD, A. A., "Power system control and stability" The Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, 1997.

[18] KUNDUR, P., "Power system stability and control" The EPRI Power system Engineering series, Califórnia, USA, McGraw-Hill, 1994.

[19] IEEE Recommended practice for excitation system models for power system stability studies, IEEE Std. 421.5, Nova Iorque, EUA, 2005.

[20] IEEE Committee report - "Computer representation of excitation systems" – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems - Vol. PAS-87, pp.1460-1464, Jun/1968.

[21] ATP-EMTP – Alternative Transients Program, acessado na Internet em 22/11/2007, página http://www.emtp.org.

[22] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Resolução Nº 505, 26 de Novembro de 2001.

[23] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, Submódulo 2.2, Padrões de Desempenho da Rede Básica, DF, 24 de Novembro de 2002, acessado na Internet em 24/04/2008, na página http://www.ons.org.br/download/procedimentos/submodulo02-02-r2.pdf às 09:57.

[24] MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Introdução a Sistemas de Energia Elétrica. São Paulo. Editora Unicamp, 2003.

[25] VASCONCELLOS, A. B, Modelagem, projeto e construção de compensadores estáticos tipo reator à núcleo saturado para melhoria da qualidade da energia: análise computacional e validação experimental. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

[26] Embrapa, encontrado na Internet em 02/08/2008, página http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/A%20energia%, às 14:38.