

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO GERADOR DE ALTA TENSÃO –
POWERFORMER – EM COMPARAÇÃO A UMA MÁQUINA CONVENCIONAL

André Salles Souza

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por :

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

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

Dr. Julio César Rezende Ferraz, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2005

SOUZA, ANDRÉ SALLES

Análise do desempenho do gerador de alta tensão - Powerformer – em comparação a uma máquina convencional [Rio de Janeiro] 2005

X, 134 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2005)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Gerador de alta tensão
2. Fluxo de Potência
3. Estudo de Curto circuito
4. Estabilidade Eletromecânica

I.COPPE/UFRJ II. Título (série)

Para Nicole

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Antônio Carlos Ferreira pela sugestão do tema, apoio e ajuda na orientação deste trabalho.

Ao Professor Alquindar de Souza Pedroso pelas valiosas aulas sobre máquina síncrona e estabilidade; além da cooperação na orientação deste trabalho.

Ao amigo e colega Eduardo Pavinatto pela colaboração e amizade durante a realização do curso.

Aos amigos e colegas do CEPEL João Passos, Juan e Leonardo Almeida; e do ONS Gérson Rocha, pela ajuda na utilização dos programas computacionais ANAREDE, ANAFAS e ANATEM.

À Andréa.....

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

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO GERADOR DE ALTA TENSÃO –
POWERFORMER – EM COMPARAÇÃO A UMA MÁQUINA CONVENCIONAL

André Salles Souza

Abril / 2005

Orientador : Antônio Carlos Ferreira

Programa : Engenharia Elétrica

Este trabalho objetiva condensar as informações disponíveis sobre um novo tipo de gerador de energia elétrica, denominado *Powerformer*, que tem como característica principal a geração de energia elétrica em alta tensão. Isso é possível pela utilização de cabos de alta tensão no enrolamento do estator, ao invés de condutores de cobre de seção retangular utilizados em máquinas convencionais.

Torna-se então possível a não-utilização de transformadores elevadores, uma vez que a máquina gera energia já em nível de tensão de transmissão.

O desempenho da máquina é simulado em um sistema de pequeno porte com 15 barras em configuração de carga leve, ou 16 barras em configuração de carga pesada.

O desempenho do sistema nos dois cenários de carga é analisado em duas configurações: a primeira, com um gerador convencional, e a segunda considerando sua substituição por uma máquina de alta tensão. São realizados estudos em regime permanente, além de estudo de curto circuito e estabilidade eletromecânica, em condições nominais de operação e sob contingências, nos dois cenários de carga.

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

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF THE HIGH VOLTAGE GENERATOR –
POWERFORMER – IN COMPARISON WITH A CONVENTIONAL MACHINE

André Salles Souza

April / 2005

Advisor : Antônio Carlos Ferreira

Department : Electrical Engineering

This work aims to provide accurate information about a new type of electrical energy generator, entitled Powerformer, that features as its main characteristic the generation of electrical energy at high voltage level. It is made possible due to the utilization of high voltage cables in its stator windings, rather than typical rectangular conductors used in conventional machines.

It is then possible to disregard the utilization of a high voltage step up transformer, once the energy is already generated at transmission voltage level.

The performance of the machine is simulated in a small scale system consisting of 15 bars in its light load scenario, and 16 bars in its heavy load scenario.

The performance of the electric system is studied in two configurations: the first one considering the operation of a conventional machine, and the second one considering its replacement by the high voltage machine. Load-flow, short-circuit and transient stability analysis are evaluated, both under normal operating conditions and under system contingencies, on the two load scenarios.

SUMÁRIO

	Página
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Considerações Gerais	1
1.2 - Um breve histórico	4
1.3 - Instalações recentes	5
1.3.1 - Planta hidrelétrica de Porjus	5
1.3.2 - Planta termelétrica de Eskilstuna	7
1.3.3 - Planta hidrelétrica de Porsi	8
1.3.4 - Planta hidrelétrica de Holjebro	8
1.3.5 - Planta hidrelétrica de Miller Creek	8
1.3.6 - Planta hidrelétrica de Katsurazawa	8
1.4 – Objetivo da dissertação	9
1.5 – Estrutura do Trabalho	9
2- O PROJETO DO POWERFORMER	11
2.1 - Considerações Gerais	11
2.2 - O cabo do Powerformer	13
2.3 - O desempenho térmico do cabo	15
2.4 - O estator do Powerformer	18
2.5 - O sistema de refrigeração	19
2.6 - A reatância do Powerformer	20
2.7 - A interligação ao sistema elétrico	21
2.8 - Aspectos ambientais	24
2.9 - As plantas de Porsi e Eskilstuna	25
2.9.1 - A recapitação da planta hidrelétrica de Porsi	26
2.10 - Aplicação como motor - o MOTORFORMER	28

3 - APRESENTAÇÃO E DESEMPENHO DO SISTEMA TESTE EM REGIME PERMANENTE	30
3.1- Considerações Gerais	30
3.2- Apresentação do sistema	30
3.3- Desempenho do sistema	39
3.3.1 - Regime permanente – cenário de carga leve	39
3.3.2 - Regime permanente – cenário de carga pesada	41
3.3.3 - Análise da curva P _x V – cenário de carga leve	43
3.3.4 - Análise da curva V _x Q – cenário de carga leve	45
3.3.5 - Análise da curva P _x V – cenário de carga pesada	46
3.3.6 - Análise da curva V _x Q – cenário de carga pesada	47
3.4- Análise de contingências	48
3.4.1 - Análise de contingência na linha de transmissão entre as barras 9 e 10	48
3.4.2 - Análise de contingência no transformador entre as barras 8 e 9	50
3.4.3 - Análise de contingência na terceira usina	52
3.5- O controle de tensão na barra de alta através de gerador convencional	54
3.5.1 - Análise da curva P _x V – cenário de carga leve	58
3.5.2 - Análise da curva P _x V – cenário de carga pesada	59
4- ESTUDO DE CURTO CIRCUITO	61
4.1 - Considerações Gerais	61
4.2 - Aterramento de geradores	61
4.3 - Ligação de transformadores elevadores	64
4.4 - Esquema de ligação do Powerformer	65
4.5 - Modelagem do Sistema Teste	67
4.5.1 - Transformadores	68
4.5.2 - Geradores	68
4.5.3 - Linhas de Transmissão	68

4.6 - Análise de Contingências	69
4.7 - Análise dos resultados	69
4.7.1 - Curto circuito fase-terra na barra 10	69
4.7.2 - Curto circuito trifásico na barra 10	70
4.7.3 - Curto circuito fase-terra na barra 4	70
5- ANÁLISE EM REGIME DINÂMICO - ESTABILIDADE ELETROMECAÂNICA	71
5.1 - Considerações Gerais	71
5.2 - Modelagem das máquinas	71
5.3 - Reguladores de Tensão	74
5.4 - Operação de geradores de alta tensão em paralelo	75
5.5 - Limitadores de sobreexcitação	76
5.5.1 - Limitadores tipo “takeover”	77
5.5.2 - Limitadores tipo “summed”	77
5.6 - O colapso de tensão	82
5.7 - Cenário – colapso de tensão no sistema teste	83
5.7.1 - Curto-circuito monofásico através de impedância indutiva na barra 10, em cenário de carga leve, sem eliminação da falta	84
5.7.1.1 - Desempenho do sistema sem atuação do limitador de sobreexcitação	85
5.7.1.2 - Desempenho do sistema considerando a atuação do limitador de sobreexcitação	88
5.7.1.3 – Desempenho do sistema considerando a operação com rotores de maior capacidade térmica	98
5.7.1.4 – Análise dos resultados	106
5.7.2 - Curto circuito trifásico franco na barra terminal da terceira usina por 150 ms, seguido da eliminação da falta e da perda das unidades geradoras dessa barra em cenário de carga pesada	107
5.7.2.1 - Desempenho do sistema sem atuação do limitador de sobreexcitação	108

5.7.2.2 - Desempenho do sistema considerando a atuação do limitador de sobreexcitação	112
5.7.2.3 – Análise dos resultados	125
6 – CONCLUSÃO	127
Referências Bibliográficas	130

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Considerações Gerais

O *Powerformer* (LEIJON, 1998) é um gerador em alta tensão que se liga diretamente à rede de transmissão de energia elétrica, não necessitando conectar-se a um transformador elevador. Embora seja uma máquina elétrica diferente das convencionais, o princípio de operação do *Powerformer* baseia-se em fundamentos já conhecidos e em tecnologia comprovada, porém aplicados de forma inovadora. Seu idealizador foi o professor Mats Leijon, da Universidade de Uppsala, Suécia.

As principais características do *Powerformer* são:

- utilização de cabos de alta tensão no enrolamento do estator;
- conexão direta à rede de alta tensão, dispensando a utilização de transformador elevador.

O principal diferencial desse gerador reside no enrolamento do estator, no qual, ao invés de barras retangulares convencionais acondicionadas em ranhuras, utilizam-se cabos de alta tensão, similares aos utilizados nas redes de transmissão e distribuição. Quanto ao projeto das demais partes da máquina, rotor, mancais, sistema de excitação, etc., podem ser mantidas as características e materiais dos geradores convencionais.

Entre as vantagens da utilização do *Powerformer* destaca-se a simplificação do projeto em relação a uma planta convencional, devido à ausência de transformador elevador e equipamentos correlatos, como barramentos, disjuntores de média tensão e chave seccionadora, além da eliminação de outros transformadores de tensão e corrente associados à proteção dos equipamentos de média tensão, não mais necessários agora.

No caso de operação em paralelo de duas ou mais máquinas, o paralelismo é realizado diretamente no barramento de alta tensão.

Conclui-se, então, que não há interrupção no fornecimento de energia devido a falhas nesses equipamentos, aumentando a confiabilidade do sistema. Tanto o projeto como a construção da planta tornam-se mais simples e ocupam uma menor área, reduzindo o custo e a necessidade de obras civis. Há também menos interrupções na execução de serviços de manutenção, inclusive paradas planejadas, assim como uma melhor capacidade de suporte de potência reativa e controle de tensão – quando da necessidade de operação em regime de sobreexcitação - já que não há necessidade de suprimento de potência reativa ao transformador elevador e, finalmente, obtém-se um aumento da capacidade de sobrecarga temporária, tornando-o mais confiável.

Deve-se destacar que, no projeto da máquina, atentou-se também para a preservação do meio ambiente. O maior benefício, do ponto de vista da conservação ambiental, deve-se à maior eficiência do gerador que permite um menor consumo dos recursos naturais, água ou gás, como será citado no próximo capítulo.

O primeiro *Powerformer* começou a operar em 1998, em Porjus, Suécia, com potência nominal de 11 MVA e tensão nominal de 45 kV, acionado por turbina hidráulica. Com turbinas a gás, o primeiro a entrar em operação encontra-se na planta de Eskilstuna, Suécia, operando a 42 MW, 136 kV, 3000 rpm e 50 Hz. Logo em seguida, foram instaladas, também na Suécia, novas unidades operando a 155 kV / 75 MVA, hidrogerador; e 136 kV / 42 MVA, com turbina a gás.

A figura 1.1 a seguir mostra uma ilustração do *Powerformer*.

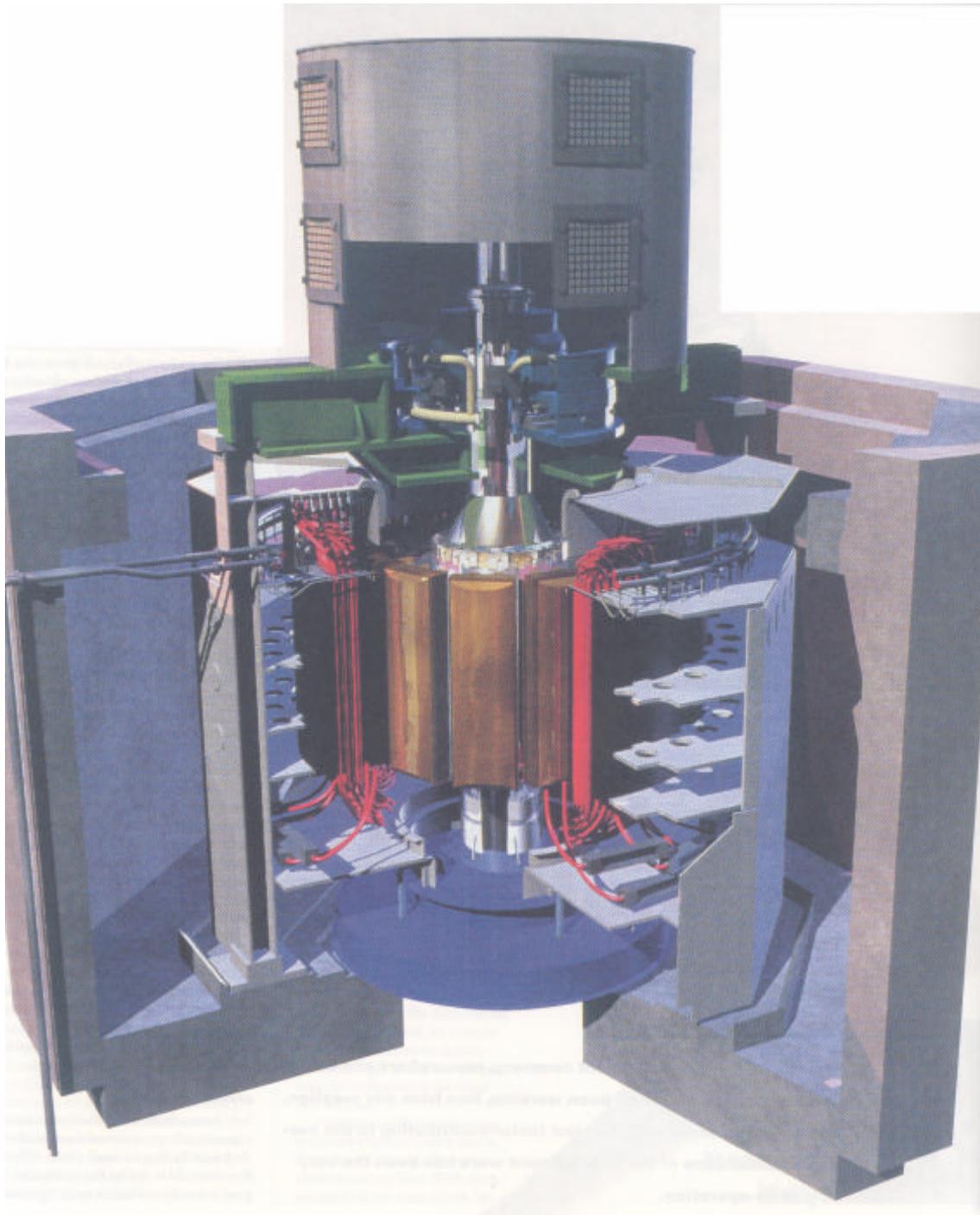


Figura 1.1 – Ilustração do *Powerformer* (ULVSGARD, 1998)

1.2 - Um breve histórico

A idéia da utilização de cabos circulares no enrolamento do estator de geradores e a conseqüente eliminação do transformador elevador não é totalmente nova. Na verdade, por volta de 1920, C.A. Parsons, da cidade de Newcastle upon Tyne, Inglaterra, desenvolveu uma série de máquinas com idéia similar à do *Powerformer*. A primeira delas, com capacidade de geração em 36 kV, foi comissionada e entrou em operação no País de Gales no final de 1928.

Entretanto, ao invés de cabos circulares, como considerado no *Powerformer*, ele utilizou barras circulares, em conjuntos de até três unidades. Parsons também empregou isolamento progressivo nas camadas do enrolamento, conseguindo extrair o máximo de aproveitamento da tecnologia de materiais isolantes disponível na época; esse sistema viria a ser utilizado no *Powerformer* quase 80 anos mais tarde. Entre 1928 e 1953, Parsons construiu 88 geradores de alta tensão. A partir de então, a utilização de tensões mais elevadas nas redes de transmissão de energia inviabilizou comercialmente suas máquinas, pois tornava-se inevitável, novamente, a utilização de transformadores elevadores (LEIJON, GERTMAR, 1998).

Curiosamente, em 1990, ao conceber o gerador de alta tensão com a utilização de cabos de seção circular, Mats Leijon desconhecia a idéia original de Parsons, tendo ficado “impressionado” com a simplicidade do projeto ao ler os artigos originais (DETTMER, 1998). A idéia conceitual do *Powerformer*, originalmente, ocorreu a Leijon em 1990, mas parecia algo tão extraordinário que só em 1992 ele teve coragem de apresentá-la à direção do centro de pesquisas da empresa “*Asea Brown Boveri*” (ABB) em Vasteras, Suécia, empresa para a qual trabalhava na época. Três anos depois, em 1995, foi assinado o primeiro contrato, no valor de 10 milhões de Kronas Suecos, aproximadamente 1,5 milhão de dólares, para a instalação de um protótipo na estação de Porjus, localizada no Rio Lule, região norte da Suécia, tendo como cliente a empresa estatal Vattenfall, operadora de geração de energia no País.

As máquinas de alta tensão operam com turbinas a gás, a vapor e hidráulicas, com potência na faixa de 40 a 200 MW, tensão entre 30 e 150 kV, velocidade de 3000 a 3600 rpm e frequências de 50 ou 60 Hz. Atualmente, há tecnologia para utilização do *Powerformer* em 230 kV; entretanto, pode-se prever que em breve será possível implementar o projeto de máquinas que operem em 400 kV, com base, evidentemente, na tecnologia de cabos de alta tensão e aspectos de isolamento (LINDHAL, 2001). No *Powerformer*, as emendas dos cabos merecem especial atenção, pois são o fator limitante para a utilização da máquina em tensões cada vez maiores (DETTMER, 1998). Como os hidrogeradores são geralmente montados na própria usina, não há limitação concreta da potência nominal, dependendo apenas da capacidade da turbina motriz. Com relação aos turbogeradores que são, em geral, montados na fábrica e, posteriormente, transportados para as usinas, há aspectos a serem considerados relacionados ao transporte da máquina e seus componentes. Entretanto, essa limitação também se aplica a geradores convencionais.

1.3 – Instalações recentes

Há atualmente seis geradores de alta tensão instalados no mundo, os quais estão listados a seguir :

Planta hidrelétrica de Porjus, Suécia, 45 kV, 11 MVA

Planta termelétrica de Eskilstuna, Suécia, 136 kV, 42 MVA

Planta hidrelétrica de Porsi, Suécia, 155 kV, 75 MVA

Planta hidrelétrica de Holjebro, Suécia, 78 kV, 25 MVA

Planta hidrelétrica de Miller Creek, Canadá, 25 kV, 32,8 MVA

Planta hidrelétrica de Katsurazawa, Japão, 66 kV, 9 MVA

A seguir, um breve detalhamento sobre cada uma dessas instalações :

1.3.1 - Planta hidrelétrica de Porjus:

O primeiro *Powerformer* a entrar em operação foi instalado na hidrelétrica do Rio Lule, região norte da Suécia. Seu desempenho está conforme o esperado, com

eficiência medida de 98%, não tendo sido registrada degradação mecânica do estator ou de outras partes da máquina. O gerador vem operando na tensão média de 44,5 kV, despachando 11 MVA.

Nessa planta há duas máquinas instaladas, sendo uma convencional e a outra um *Powerformer*. Com exceção do estator, o *Powerformer* instalado em Porjus, U9, é uma máquina comum; os projetos do rotor e do sistema de excitação são similares aos de uma máquina convencional.

A tabela 1.1 exemplifica uma análise básica da nova tecnologia, especialmente considerando-se a similaridade na potência das máquinas.

Tabela 1.1 – Comparação entre uma máquina convencional e um *Powerformer*, instalados em Porjus, Suécia.

	Porjus U8	Porjus U9 (Powerformer)	
Potência Aparente	11	11	MVA
Tensão	10	45	Kv
Corrente	635	141	A
Comprimento	750	1450	mm
Diâmetro do estator	3100	3050	mm
Peso do Estator	11,5	34,5	Ton
Peso do Rotor	23	22,8	Ton
Reatâncias			
X _d	0,98	0,79	pu
X' _d	0,25	0,22	pu
X'' _d	0,16	0,17	pu

Essa máquina tem servido de laboratório para avaliações de campo, comandadas pela empresa “ALSTOM”, da Suécia, incluindo testes de curto circuito, inclusive com a máquina conectada à rede. A figura 1.2 a seguir mostra uma fotografia da máquina.

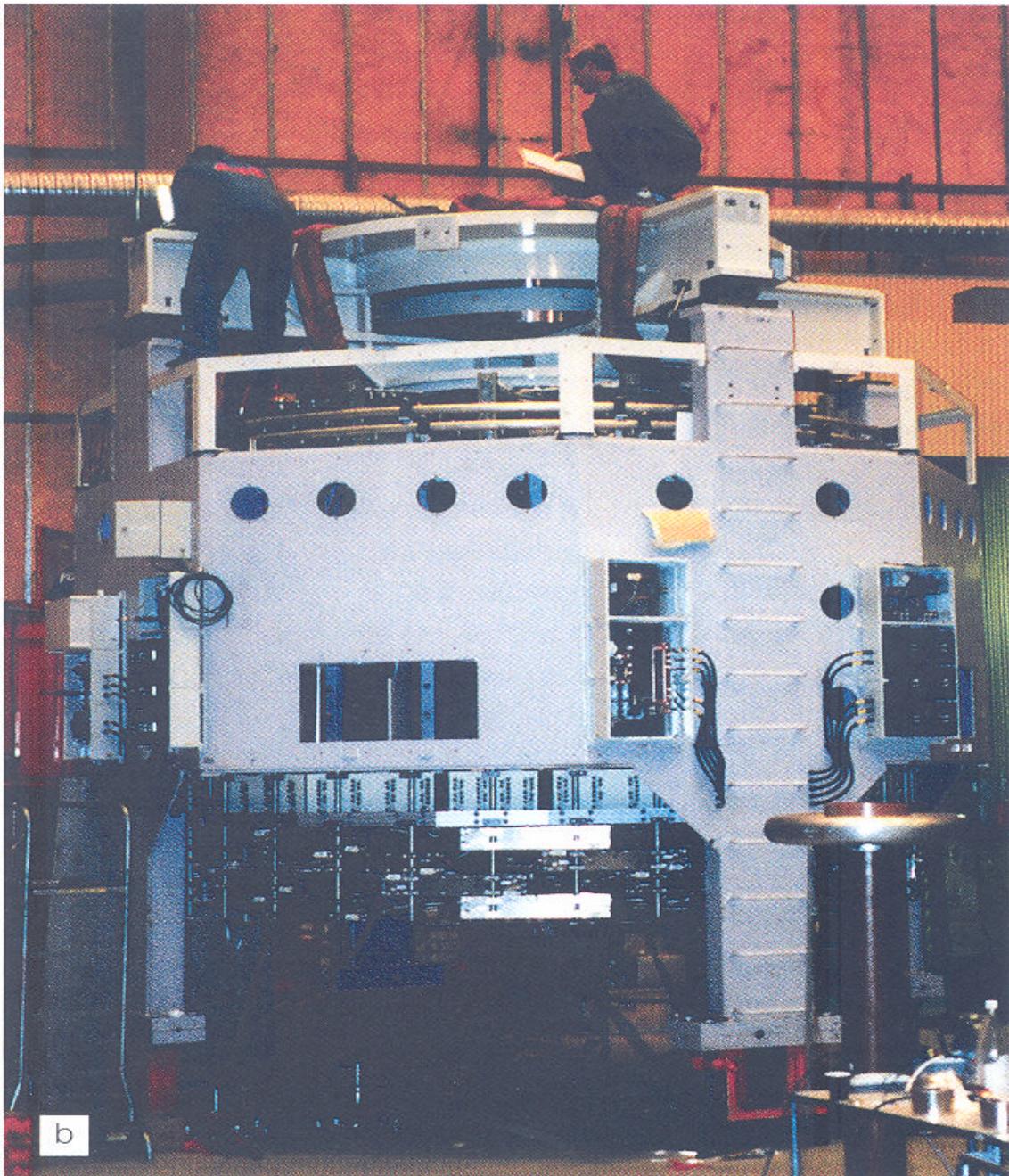


Figura 1.2 – *Powerformer* instalado em Porjus, Suécia (LEIJON, 1998)

1.3.2 - Planta termelétrica de Eskilstuna:

A máquina entrou em operação em Dezembro de 2000, despachando energia em 136 kV. Durante um teste de sobreexcitação, a máquina operou satisfatoriamente em

177 kV. O rotor e o sistema de excitação são similares aos utilizados em turbogeradores convencionais refrigerados a ar da ABB.

1.3.3 - Planta hidrelétrica de Porsi:

Também localizada em uma planta no Rio Lule, região norte da Suécia, esse gerador foi adquirido para substituir um gerador convencional. Em maio de 2001, novamente durante um teste de sobreexcitação, a máquina operou satisfatoriamente em 202 kV, maior nível de tensão já alcançado por um gerador de eletricidade.

1.3.4 - Planta hidrelétrica de Holjebro:

A máquina foi adquirida para substituir dois geradores antigos, datados de 1930, tendo entrado em operação em Agosto de 2001. Opera conectada diretamente à rede de 80 kV.

1.3.5 - Planta hidrelétrica de Miller Creek:

Primeiro *Powerformer* instalado fora da Suécia, mais precisamente no Canadá, em uma planta localizada 140 Km ao norte de Vancouver, na província de British Columbia, conectado diretamente à rede de 25 kV. Destaca-se o fato de ser o primeiro gerador de alta tensão a gerar energia em 60 Hz, diferente do padrão europeu de 50 Hz. Cabe ressaltar, entretanto, que o despacho em 25 kV pode também ser alcançado por geradores convencionais.

1.3.6 - Planta hidrelétrica de Katsurazawa:

Instalado no Japão, esse gerador também foi adquirido para substituir uma máquina convencional datada de 1950, despachando energia em 66 kV.

1.4 – Objetivo da dissertação

Este trabalho destina-se a comparar o gerador de alta tensão, denominado *Powerformer*, com geradores síncronos convencionais, especialmente considerando-se máquinas de mesma potência nominal. A comparação abordará aspectos de projeto, características construtivas, além da avaliação do desempenho da máquina em um sistema de pequeno porte em dois cenários de carregamento.

1.5 – Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. Inicialmente, no capítulo 1, há a introdução do tema e um breve histórico sobre o desenvolvimento da nova máquina.

No capítulo 2, abordam-se aspectos referentes ao projeto da máquina e características construtivas.

No capítulo 3, é introduzido um sistema elétrico de pequeno porte em dois cenários de carregamento, leve e pesado; fazendo-se então uma análise comparativa, em regime permanente (fluxo de potência) entre o desempenho da planta com máquinas convencionais e com a substituição de uma delas pelo *Powerformer*.

No capítulo 4 é feita a análise do nível de curto-circuito em alguns pontos da planta, abordando-se aspectos como aterramento de transformadores elevadores e geradores; além das alterações nas redes de seqüência decorrentes da operação da máquina de alta tensão.

No capítulo 5 é feita a análise da estabilidade eletromecânica do sistema, com particular ênfase na definição de um modelo de limitador de sobreexcitação adequado às características do *Powerformer*. São então definidas contingências na planta que

possibilitam a comparação do desempenho do *Powerformer* com o de uma máquina convencional.

O capítulo 6 é dedicado à conclusão do trabalho, destacando-se os pontos mais importantes abordados nos capítulos anteriores.

Capítulo 2

O Projeto do *Powerformer*

2.1 – Considerações Gerais

Sabe-se que os condutores retangulares utilizados em geradores convencionais têm uma distribuição de campo elétrico irregular (ALFREDSON, HERNNAS, 2000), com concentrações nas seções em ângulo reto. Esse campo, muito intenso nas seções quadradas, é decisivo na definição do material isolante a ser utilizado nas máquinas como, por exemplo, resina epóxi. O revestimento externo dos condutores retangulares recebe geralmente uma camada de tinta condutora, numa tentativa de manter o campo elétrico dentro do condutor. Entretanto, nas dobras dos condutores para a passagem entre as ranhuras, torna-se impossível, fisicamente, o confinamento do campo, sendo então “permitida” a expansão do campo elétrico para o ambiente imediatamente circundante. O controle desse campo elétrico, nas regiões de dobra dos condutores – transição entre ranhuras – constitui séria preocupação para o projetista da máquina, tornando-se imperativo, por exemplo, evitar a ionização do ar e a conseqüente descarga elétrica. Esse fator limita a utilização desses geradores a níveis de aproximadamente 36 kV (DARVENIZA, SAHA, 2001).

Conseqüentemente, os materiais isolantes utilizados em máquinas convencionais não são aproveitados de forma otimizada, sofrendo esforço intenso apenas em parte de sua estrutura, o que pode levar à falha de isolamento, interrupções de fornecimento, maior custo de manutenção, etc, ou seja, o aproveitamento de material não pode ser feito de forma econômica. Por outro lado, se o condutor tem uma seção cilíndrica, como um cabo de transmissão em alta tensão, a distribuição de campo é igual e regularmente distribuída em torno de todo o condutor.

A figura 2.1 exemplifica a distribuição do campo elétrico em um condutor retangular utilizado em máquinas convencionais, em comparação com a distribuição do campo elétrico em um cabo de alta tensão utilizado no *Powerformer*.

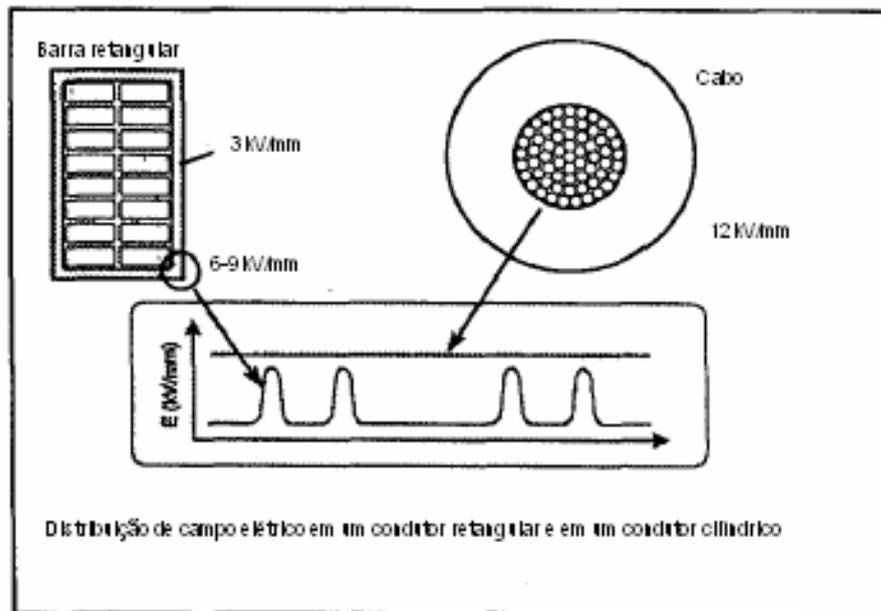


Fig 2.1 - Distribuição de campo elétrico em um cabo cilíndrico comparado à distribuição de campo elétrico em condutor de seção quadrada (ALFREDSON, HERNNAS, 2000).

Dada a limitação do nível de tensão, para elevar a potência das máquinas convencionais, a solução seria trabalhar com correntes mais elevadas. Essa técnica, porém, traria, de imediato, dois inconvenientes consideráveis: primeiro, a fixação dos condutores nas ranhuras torna-se mais difícil, pois as forças de repulsão entre os condutores são proporcionais ao quadrado da corrente; em segundo lugar, torna-se mais difícil o resfriamento do estator, já que as máquinas com potência nominal em torno de 1000 MVA requerem necessariamente refrigeração a água. Nessas máquinas, a água tem de ser rigorosamente tratada para evitar sua ionização, pois flui radialmente em canaletas dentro do estator, em contato direto com os condutores. Como regra geral, pode-se afirmar que a eficiência de um gerador é diretamente proporcional ao seu tamanho, mas, por outro lado, deve-se ressaltar que ganhos potenciais de eficiência em máquinas de grande porte perdem importância quando são considerados os custos para a

refrigeração de estatores muito grandes. Por esse motivo, os geradores de maior porte têm tido suas potências nominais estagnadas na faixa dos 1300 MVA nos últimos 25 anos.

Na concepção de uma máquina quatro fatores formam a base técnica que definirá seu projeto, a saber: aspectos elétricos, magnéticos, mecânicos e térmicos. Em geradores convencionais, devido a limitações do material isolante, é inviável tratar-se independentemente cada um desses aspectos, o que diminui as possibilidades de projetos mais avançados tecnologicamente.

Entretanto, ao considerar-se o enrolamento do *Powerformer* e sua capacidade de isolamento superior, esses pontos podem ser tratados separadamente, dando ao projetista mais flexibilidade na otimização do desempenho das máquinas. O aspecto elétrico é facilitado, por exemplo, pela utilização de condutores circulares, que tornam homogênea a distribuição do campo elétrico no interior da máquina, reduzindo o esforço sobre o material isolante. A camada externa dos cabos condutores é aterrada no *Powerformer*, facilitando o projeto do sistema de refrigeração, o que torna possível a utilização de água sem tratamento prévio.

Quanto aos aspectos elétricos, atualmente a tecnologia de isolamento de cabos de alta tensão em XLPE permite operação em até 500kV; portanto, por esse ponto de vista, seria possível o projeto de geradores do tipo *Powerformer* para operação nesse nível de tensão. Entretanto, devido a limitações construtivas no isolamento das emendas dos cabos, a operação nesse nível de tensão acaba por não ser viável.

2.2 - O cabo do *Powerformer*

O enrolamento do *Powerformer* é constituído por cabos com isolamento em polietileno XLPE, similar àqueles utilizados em linhas de transmissão. O cabo do *Powerformer* é formado por um condutor interno, uma camada semicondutora, uma

camada isolante e, mais externamente, uma última camada semicondutora, solidamente aterrada, como mostra a figura 2.2:

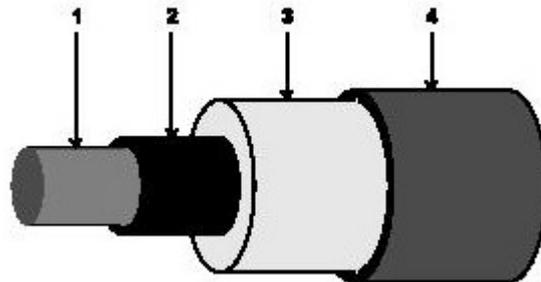


Figura 2.2 – O cabo do *Powerformer*: condutor interno (1), camada semicondutora interna (2), material isolante (3) camada semicondutora externa (4) (LEIJON, OWMAN, et al, 2000a).

A função da camada semicondutora interna é a de equalizar a distribuição do campo elétrico junto ao material isolante, enquanto que a camada semicondutora externa age de modo a manter confinado o campo elétrico dentro do cabo.

A uniformidade da distribuição do campo elétrico dentro do cabo maximiza a eficiência na utilização do material isolante, enquanto que, pelo fato de serem os condutores cilíndricos, não ocorre distorção na distribuição do campo elétrico mesmo nas seções terminais, onde os cabos têm que ser dobrados para a transição de uma ranhura para a outra.

O cabo utilizado em uma máquina elétrica está exposto a um fluxo magnético maior do que um cabo similar utilizado em linhas de transmissão, sendo sua seção dimensionada de acordo com a tensão e a potência da máquina.

Para a minimização das perdas no núcleo, os fios condutores que constituem o cabo devem ser subdivididos em grupos eletricamente isolados. Entretanto, para garantia de equalização do campo elétrico, um ou mais fios condutores próximos à primeira

camada semicondutora não devem ser isolados, para que haja, propositalmente, o contato (TOUMA-HOLMBERG, 2003).

Para uma mesma potência instalada pré-definida, a substituição de uma máquina convencional por um *Powerformer* possibilita a operação com correntes de estator muito inferiores, o que significa perdas resistivas muito menores. O enrolamento do estator do *Powerformer* é feito em camadas concêntricas, o isolamento é projetado com uma espessura menor nos cabos mais internos, aumentando à medida que o enrolamento vai progredindo para a periferia da máquina, com o emprego de componentes normalmente utilizados para a conexão dos cabos. Além disso, como a camada condutora externa é aterrada, o campo elétrico fica completamente confinado no material isolante, sendo esta uma simplificação muito importante em comparação aos métodos tradicionais para controle de campo elétrico nas regiões de seção quadrada em ângulo reto das máquinas convencionais. A segurança pessoal aumenta consideravelmente e torna-se desnecessário o controle do campo elétrico externo ao enrolamento, pois este será virtualmente zero, além de eliminar-se o risco de ocorrência de descargas parciais.

2.3 – Desempenho térmico do cabo

A temperatura máxima de operação contínua de cabos isolados com XLPE em linhas de transmissão é de 90°C. Alguns operadores permitiam a operação em sobrecarga, com temperaturas de até 130°C, sendo prática usual, atualmente, a operação em 105°C, em caráter emergencial.

No *Powerformer*, conforme a atual concepção de projeto, a temperatura de operação em regime contínuo fica abaixo de 90°C; na realidade, em torno de 70°C, sendo 90°C adotados, na prática, como máxima temperatura de emergência em regime contínuo. Apesar de 70°C ser a temperatura pré-definida para operação normal, freqüentemente a operação contínua ocorre em valores abaixo desse nível, prática adotada devido às características mecânicas do XLPE. A elasticidade do XLPE decresce à medida que a temperatura aumenta; porém, deve-se ressaltar ainda que, sob temperatura de 90°C, na qual os cabos operam normalmente em linhas de transmissão, o

XLPE oferece uma resistência mecânica maior do que qualquer outro material componente do cabo (LINDHAL, 2001).

A figura 2.3 mostra a distribuição prevista de temperatura no cabo do estator do *Powerformer* instalado em Porsi, Suécia.

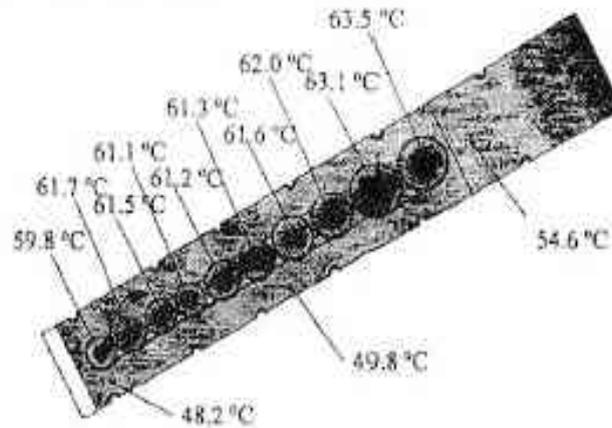


Figura 2.3 – Distribuição calculada de temperatura no cabo do estator instalado em Porsi (LEIJON, OWMAN, et al, 2000a).

Comparado à temperatura nos condutores de geradores convencionais, dimensionados para operar a 120°C, a temperatura do condutor na armadura do *Powerformer* é significativamente inferior. A “*International Electrotechnical Commission*” (IEC) define em norma três níveis de carregamento e operação para máquinas síncronas: o regime contínuo, o regime de curto prazo e ainda um regime em que a carga varia discretamente, mantendo-se em patamares constantes por longos períodos de tempo.

No regime contínuo, o operador da máquina especifica ao fabricante o carregamento máximo desejado para que a máquina opere em regime de equilíbrio térmico. No curto prazo, o operador especifica um elevado carregamento constante em um intervalo de tempo curto pré-definido, insuficiente para a máquina alcançar o equilíbrio térmico, seguido por um período de tempo também definido, em que esta estará desenergizada, devendo então retornar à temperatura ambiente.

Na ocorrência de distúrbios no sistema elétrico, como a perda de unidades geradoras, linhas de transmissão ou transformadores, é possível que os geradores fiquem sujeitos a um carregamento superior ao nominal por vários minutos, até que tenham sido tomadas medidas corretivas como o descarte de cargas ou a sincronização de novas máquinas. No curto prazo, o despacho de reserva girante provavelmente atende à demanda, mas o operador do sistema deverá, em questão de minutos, dar a partida em novas unidades geradoras, hidro ou turbomáquinas, para propiciar novo suporte ao sistema e prepará-lo para a ocorrência de novas contingências. A partida de uma turbina a gás leva, em geral, de 5 a 15 minutos, tempo no qual as outras máquinas interligadas ao sistema poderão estar sujeitas a sobrecarga. Durante esse intervalo de tempo, o operador da planta poderá permitir ao condutor atingir temperatura superior à especificada para operação em regime contínuo. Dessa forma, é possível afirmar que os regimes definidos acima não refletem adequadamente a demanda à qual os geradores síncronos estão sujeitos, no caso de ocorrências em regime excepcional.

Pode-se então até citar um novo regime, denominado “regime emergencial”, subdividido em regime emergencial de curto e longo prazo (LINDHAL, 2001). No regime emergencial de curto prazo, que pode variar de 5 a 20 minutos, permite-se ao condutor trabalhar a uma temperatura tal que, no final desse período, este tenha atingido a temperatura de emergência, 90°C. A partir de então, deve-se reduzir o carregamento da máquina para evitar que a temperatura ultrapasse esse nível e possam ocorrer danos ao enrolamento de armadura.

O regime de emergência de longo prazo varia entre 2 e 4 horas, dependendo do critério de cada operador. No *Powerformer*, como citado, é prática a operação em equilíbrio térmico emergencial na faixa de 90°C, continuamente, durante esse intervalo de tempo.

No *Powerformer*, a densidade de corrente é menor do que a de um gerador convencional e há maior massa térmica, isso significa que há maior liberdade para a operação em regime de sobrecarga. Ensaios realizados em geradores de alta tensão revelaram que, enquanto nas máquinas convencionais os condutores atingem a temperatura de projeto (120° C) em intervalos de tempo da ordem de 10 a 40 minutos,

no *Powerformer* são necessários 80 minutos para que o cabo atinja a temperatura de projeto, para operação sob regime contínuo, 70°C (LINDHAL, 2001).

Em caso de sobrecarga de corrente no estator, a temperatura do enrolamento aumenta muito lentamente, por causa da baixa corrente de operação em regime permanente em condições normais. Em muitos casos, o *Powerformer* opera abaixo da sua capacidade de suprimento de potência reativa sob condição normal. Isso possibilita sobrecarregar o estator em dezenas de pontos percentuais por intervalos de até 20 minutos, sendo possível, por exemplo, aumentar o despacho de potência ativa, desligando temporariamente os equipamentos de proteção das turbinas.

Registre-se o aumento do uso de XLPE em cabos para transmissão de energia em todo o mundo, o que traduz a crescente confiabilidade depositada nesse material. O Japão, por exemplo, vem utilizando freqüentemente cabos isolados a XLPE em longas linhas de transmissão (LEIJON, OWMAN, et al, 2000a).

2.4 - O estator do *Powerformer*

As ranhuras, no *Powerformer*, diferentemente daquelas retangulares de geradores convencionais, são circulares, de forma a acomodar os cabos de diferentes diâmetros, crescentes do interior para a periferia do estator. Outra diferença importante é que não há, no *Powerformer*, dutos radiais de refrigeração; assim, o núcleo torna-se mais homogêneo e compacto em comparação a um gerador convencional.

Os cabos ocupam um volume maior do que os condutores de seção retangular de geradores convencionais, resultando em estatores maiores, com maiores perdas no ferro (núcleo). Por outro lado, é fato que as menores correntes do *Powerformer* resultam em menores perdas ôhmicas, além de exigirem menor demanda do sistema de ventilação (refrigeração a ar no rotor). Essas vantagens superam o problema da maior perda no núcleo, ou seja, a proporção entre as perdas ôhmicas e perdas no núcleo são menores no *Powerformer* do que numa máquina convencional, melhorando a eficiência do

Powerformer em relação a um gerador convencional e transformador na ordem de 0,5% a 2% (DETTMER, 1998), considerando-se ainda a ausência do transformador elevador.

A figura 2.4 mostra o estator do *Powerformer* de Porjus, Suécia:

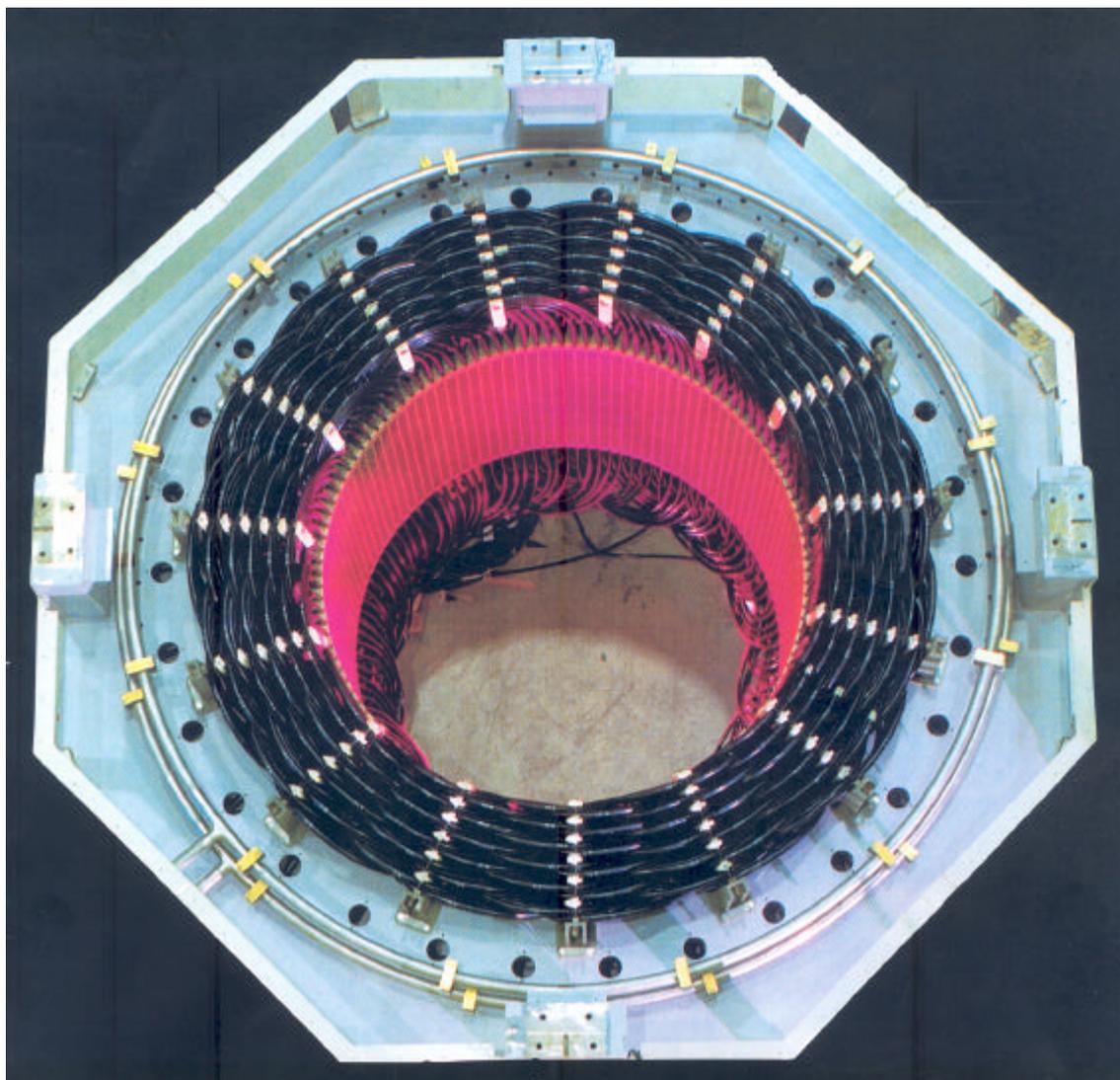


Figura 2.4 – Estator do *Powerformer* de Porjus, Suécia (FORSSANDER, 2001).

2.5 - O sistema de refrigeração

O sistema de refrigeração é constituído por dutos axiais de XLPE para circulação de água, que são fabricados, basicamente, com o mesmo material de isolamento dos cabos, porém com maior densidade. Uma das vantagens do uso dos dutos axiais ao invés dos tradicionais dutos radiais é que o núcleo do estator se torna

mais homogêneo, reduzindo o fluxo de dispersão e aumentando o rendimento da máquina. A utilização de material plástico também elimina o risco de curtos-circuitos entre os tubos e o núcleo, além de evitar a circulação de correntes parasitas nas junções. Devido às baixas perdas ôhmicas no *Powerformer*, a maior parte do calor gerado na máquina ocorre no núcleo, que trabalha aterrado; conseqüentemente, a água não precisa ser tratada, pois flui dentro de material plástico no estator sob potencial nulo (LEIJON, JOHANSSON, 2000b). Em máquinas convencionais, a água entra em contato direto com as barras condutoras, necessitando de tratamento prévio.

O rotor e as terminações dos enrolamentos são refrigerados a ar.

2.6 - A reatância do *Powerformer*

O conhecimento das reatâncias síncrona, transitória e subtransitória dos geradores síncronos é necessário para uma precisa análise das faltas e do comportamento dinâmico. As reatâncias do *Powerformer* variam de acordo com o projeto, e os operadores das plantas têm, geralmente, a oportunidade de determinar as reatâncias desejadas dentro de um intervalo pré-definido. Vários pesquisadores estudaram, durante os últimos anos, os dados dos projetos de máquinas de alta tensão; a experiência acumulada indica que a reatância subtransitória de geradores de alta tensão de pólos salientes, para operação em plantas hidrelétricas, é aproximadamente igual à soma da reatância subtransitória de um gerador convencional de potência nominal similar com a reatância de curto-circuito do transformador elevador associado.

Situação diferente é encontrada em relação aos turbogeradores, nesse caso a reatância subtransitória de um *Powerformer* é ligeiramente inferior à soma da reatância subtransitória de um turbogerador convencional de potência similar com o transformador elevador associado. Entretanto, deve-se ressaltar que essas conclusões não se constituem regra geral; apenas refletem a análise de dados empíricos de plantas já existentes.

Em estudos comparativos, muitos pesquisadores optam por representar geradores convencionais e máquina de alta tensão de potências similares com os

mesmos valores de reatâncias (AUMULLER, SAHA, 2003a), premissa também adotada no desenvolvimento deste trabalho.

2.7 - Interligação ao sistema elétrico

A estabilidade e o colapso de tensão são aspectos que vêm sendo estudados com mais frequência nos últimos anos, levando-se em consideração a rápida expansão de carregamento nos sistemas. Colapsos recentes, como o ocorrido na França em 1978, Suécia em 1983, Japão em 1987 e EUA em 1996 (AUMULLER, SAHA, 2003b) servem de alerta para que seja evitada a operação dos geradores próxima às suas capacidades máximas de sobreexcitação, ressaltando-se, em particular, o aspecto da limitação das correntes no estator. O *Powerformer* é capaz de sustentar uma corrente de estator maior por períodos de tempo superiores aos dos geradores convencionais, isso significa que o *Powerformer* tem uma maior capacidade de suporte de potência reativa ao sistema em caso de contingências, quando ocorre o fenômeno de afundamento de tensão.

O risco de colapso de tensão exige que o controlador do sistema utilize todos os recursos de fornecimento de potência reativa disponíveis para manutenção dos níveis de tensão adequados. Há, então, uma solicitação forte de corrente no circuito de excitação das máquinas, muitas vezes fazendo-as operar no limite de sua capacidade térmica, ou além, por curtos períodos de tempo.

O *Powerformer* pode prover o sistema elétrico com o mesmo nível de potência reativa, estando em menor nível de excitação do que uma máquina convencional equivalente, pois a ausência do transformador elevador elimina a demanda de potência reativa a este associada, podendo, por exemplo, o gerador ter uma menor capacidade de suprimento de potência reativa do que a máquina convencional que estiver substituindo em um projeto de recapacitação, ou, por outro lado, tendo a mesma capacidade de fornecimento de potência reativa, o *Powerformer* pode aumentar a injeção líquida no sistema, aliviando a necessidade de suporte de reativos por equipamentos associados, como capacitores e compensadores estáticos. Por outro lado, quando da necessidade de operação em regime de subexcitação, o *Powerformer* trabalha absorvendo mais potência

reativa do que um gerador convencional, devido à não demanda desta energia pelo agora inexistente transformador elevador.

Apesar de ser possível equipar-se um *Powerformer* com um rotor similar ao de um gerador convencional equivalente, é particularmente vantajoso prover-se um reforço na capacidade de enrolamento do rotor para se beneficiar da capacidade de sobrecarga do estator. O serviço de reforço no enrolamento de um rotor é mais barato do que o custo de aquisição de compensadores estáticos, por exemplo. Isso levaria, então, ao projeto de rotores mais pesados que contribuiriam para melhorar a estabilidade transitória (maior momento de inércia) em caso de contingências na rede, como curtos-circuitos, por exemplo. Entretanto, nas máquinas de alta tensão instaladas até o momento, tem-se optado pela utilização de rotores similares aos de máquinas convencionais.

O suporte adequado de potência reativa ao sistema aumenta a capacidade de despacho de energia ativa e reduz o risco de colapsos de tensão.

A figura 2.5 mostra a curva “Corrente x tempo” no estator do *Powerformer* em comparação a uma máquina convencional, segundo a norma ANSI C50.13.

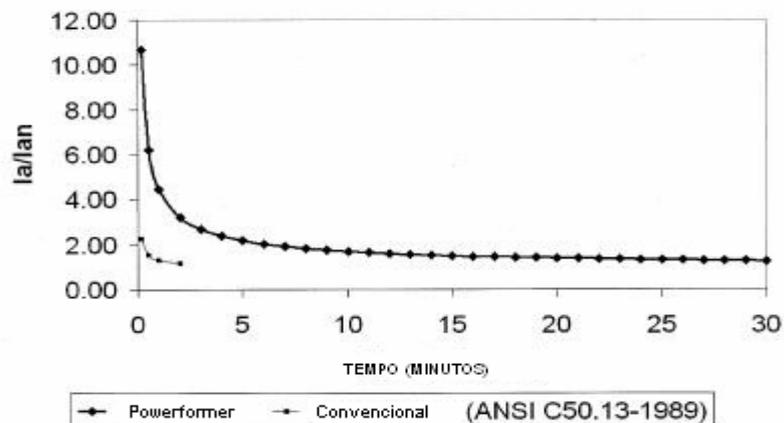


Figura 2.5 – Capacidade de sobrecarga no estator, *Powerformer* X Gerador convencional (AUMULLER, SAHA, 2003a)

Esta norma define os valores máximos de sobrecorrentes temporárias admissíveis tanto para os enrolamentos do estator como do rotor, que são mostrados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores máximos admissíveis para as correntes de estator e rotor

Tempo (s)	10	30	60	120
ANSI C50.13 Corrente de campo I_r (% da nominal)	208	146	125	112
ANSI C50.13 Corrente de estator I_s (% da nominal)	226	154	130	116

Conclusivamente, os agentes geradores não permitem às máquinas operar além desses limites, uma vez que as armaduras dos geradores convencionais não são construídas com capacitação térmica excessiva. Essa situação, claramente, não se aplica ao *Powerformer*, que consegue sustentar correntes de armadura além dos limites expressos na norma ANSI.

Assim sendo, é importante que o projeto do limitador de sobreexcitação a ser utilizado no *Powerformer* contemple uma capacidade adequada à máquina, apresentando limites superiores aos limitadores projetados para a operação com geradores convencionais.

Estudos recentes levaram à definição de valores que permitem uma adaptação da tabela ANSI, acima, para utilização com máquinas de alta tensão (AUMULLER, SAHA, 2003a), como mostrado na tabela 2.2 a seguir:

Tabela 2.2 - Valores máximos admissíveis para as correntes de estator no *Powerformer*

Tempo (s)	10	30	60	120
Corrente de estator I_s no <i>Powerformer</i> (% da nominal)	1067	620	444	322

No capítulo 5, será mostrado um modelo de limitador de sobreexcitação adequado aos valores mostrados nas tabelas 2.1 e 2.2 acima.

2.8 - Aspectos ambientais

O *Powerformer* apresenta um impacto ambiental menor do que os geradores convencionais; a sua maior eficiência permite o despacho do mesmo nível de potência, utilizando uma menor quantidade de recursos (combustíveis ou água), reduzindo-se as emissões de gases poluentes nos turbogeradores, ou possibilitando o aumento da energia gerada com a utilização da mesma quantidade de recursos.

O *Powerformer* contém menos substâncias potencialmente nocivas ao meio ambiente como, por exemplo, resina epóxi, material de difícil remoção e que não é sequer utilizado no *Powerformer*. Esse material, comumente empregado no estator dos geradores convencionais, não é passível de reciclagem, tendo que ser incinerado na própria máquina para sua total remoção.

A remoção do transformador elimina não só a poluição sonora, como também o problema do manuseio e acondicionamento de grande quantidade de óleo isolante e refrigerante que é associado ao risco de vazamento e incêndio. Usinas elétricas, especialmente as hidrelétricas, encontram-se geralmente instaladas em locais próximos a bacias hidrográficas e áreas de preservação ambiental. O vazamento do óleo isolante de transformadores constitui séria preocupação quanto à possível contaminação do ambiente. Da mesma forma, o isolamento dos cabos minimiza o risco de ocorrência de descargas parciais, reduzindo o risco de produção de ozônio, danoso à atmosfera terrestre.

O *Powerformer* apresenta também vantagens quando o tema é a reciclagem do material empregado após o fim da vida útil do equipamento. Ao contrário da resina epóxi, o termoplástico XLPE utilizado no isolamento do *Powerformer* pode ser facilmente removido das ranhuras através de um simples processo de aquecimento, sendo totalmente reaproveitado em processo de reciclagem posterior.

2.9 - As plantas de Porsi e Eskilstuna

A seguir, serão abordados os aspectos construtivos dos geradores de alta tensão instalados em Eskilstuna, turbo máquina construída nas instalações da fábrica, e Porsi, hidrogerador montado no local de instalação.

Em Eskilstuna, o núcleo do estator mede 3,25 metros, com 14 cabos por ranhura para acomodação de 3 espessuras diferentes de cabos. Já em Porsi, o núcleo do estator mede 2,40 metros e possui 10 cabos por ranhura, adaptáveis a 4 espessuras diferentes de cabos. Nos dois projetos, o assentamento das camadas de ferro do estator foi feito de forma manual, da mesma forma que em geradores convencionais, sendo que em Porsi utilizaram-se ferramentas semi-automatizadas para agilização do processo.

Como citado, o rotor e os terminais dos enrolamentos são refrigerados a ar em ambas as máquinas, porém em Eskilstuna há uma inversão no sentido de circulação do ar, isto é, a injeção é feita pelos ventiladores primeiramente na região de terminação dos enrolamentos, de maneira a manter a temperatura nos limites especificados.

O processo de enrolamento é muito similar tanto nas turbo máquinas quanto nos hidrogeradores. Inicia-se na posição inferior da ranhura, sendo então uma metade do cabo enrolada no sentido horário e a outra, no sentido anti-horário. Esse processo evita tensões excessivas que possam provocar danos físicos aos cabos, e é decisivo também na definição do comprimento máximo das seções de cabos: quanto menor o número de emendas, melhor. Entretanto, a capacidade efetiva de manuseio no enrolamento impõe um limite ao comprimento das seções.

O primeiro *Powerformer*, Porjus U9, com potência nominal de 11 MVA e 45 kV, tem um comprimento total de 6000 metros de cabos, divididos em seções de 100 metros. Já em Eskilstuna e Porsi, os cabos têm seções de 300 e 400 metros, respectivamente, devido aos novos métodos de enrolamento que foram desenvolvidos posteriormente. Essa tecnologia tem avançado e espera-se que as novas máquinas possam ter seções de cabos de 500 metros. Em Eskilstuna, há três níveis diferentes de tensões, a saber: 60 kV, 100 kV e 136 kV, com 18 emendas unindo as seções de 300

metros, perfazendo 5700 metros; já em Porsi, há 42 emendas unindo as seções de 300 metros em 4 níveis de tensão (60 kV, 95 kV, 125 kV e 155 kV), somando 17200 metros.

A fixação dos cabos é feita com auxílio de calços de silicone injetado, de forma a prover bom contato elétrico entre a camada externa do cabo e a carcaça do estator. Assim sendo, conforme já mencionado, assegura-se que as camadas externas dos cabos estejam em potencial nulo. O mesmo método de fixação é utilizado tanto em turbo máquinas como em hidrogeradores. É importante mencionar ainda que cada camada de cabos é submetida a ensaio sob plena tensão nominal antes de dar-se seqüência à camada seguinte, de modo a garantir que não tenham ocorrido danos no processo.

A figura 2.6 mostra a fixação do cabo na ranhura do estator do *Powerformer*:

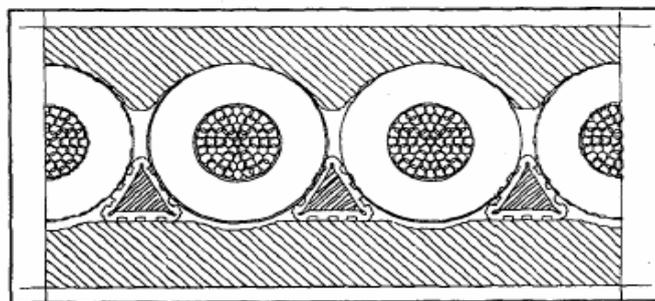


Figura 2.6 – Fixação do cabo na ranhura do estator do *Powerformer* (LEIJON, OWMAN, et al, 2000a).

2.9.1 - A recapitação da planta hidrelétrica de Porsi

Das atuais instalações de *Powerformers*, o único projeto de recapitação é o de Porsi, no qual um *Powerformer* substituiu um dos três geradores convencionais. Um dos principais objetivos da recapitação foi o aumento da confiabilidade da instalação, uma vez que os dados estatísticos de falhas em cabos indicam serem estes muito mais confiáveis do que os enrolamentos convencionais. As partes mais fracas das instalações a cabos são as emendas; conseqüentemente, o enrolamento do estator deve ser feito com o menor número possível destas. O *Powerformer* de Porsi tem aproximadamente 18

quilômetros de cabos divididos em 3 fases que, por sua vez, foram divididas em 4 níveis de isolamento, a saber: 155 kV, 125 kV, 95 kV e 60 kV. Isso resultaria, idealmente, em cabos de 1500 m, porém os cabos utilizados foram de 400 metros. Máquinas desse porte são demasiadamente grandes para serem transportadas por estradas ou navios; nesses casos, torna-se necessária a montagem do gerador no próprio local de instalação, tendo-se como objetivo a minimização do número de emendas. Em Porsi, o novo estator foi montado ao lado da planta e instalado na mesma fundação do estator do gerador convencional, apesar de ter peso superior.

Em Porsi, um dos dois transformadores originais foi retirado e o espaço remanescente, ao ar livre, foi utilizado para instalação de equipamentos de medição e aterramento. A tabela 2.3 mostra a comparação entre a máquina convencional e o *Powerformer* instalado em Porsi.

Tabela 2.3 – Comparação entre as máquinas de Porsi

	Gerador Convencional	Powerformer	
Potência Nominal	105	75	MVA
Tensão Nominal	13,8	155	Kv
Corrente Nominal	4400	279	A
Frequência Nominal	50	50	Hz

As perdas no transformador até então existente chegavam a 500 kW, o que corresponde à potência de uma turbina eólica de médio porte.

O gerador está equipado com enrolamentos auxiliares de potência nominal de 110 KVA, tensão nominal 0.75 KV, alocados embaixo do enrolamento principal e deslocados a 30 graus elétricos deste.

Uma série de ensaios foi realizada na máquina, quando esta apresentava um tempo de operação de 4500 horas, a fim de obter-se, empiricamente, os parâmetros do

gerador e compará-los com os valores previamente estimados segundo a norma IEC34-4.

Espera-se que o *Powerformer* tenha uma maior resistência de armadura do que um gerador convencional, pois a seção reta do cabo é menor em virtude da menor corrente, além de possuir mais enrolamentos devido ao suporte à alta tensão. Até certo ponto, esse fator é compensado, mas não completamente anulado pela menor temperatura de operação do *Powerformer*. Portanto, a desconsideração da resistência da armadura deve ser feita com especial cautela em se tratando do *Powerformer*, pois a imprecisão é maior neste caso do que naquele de uma máquina convencional.

Alguns resultados obtidos foram :

X_d não-saturada = 0.75 (valor calculado 0.79);

X'_d saturada = 0.18 (valor calculado 0.22);

X''_d saturada = 0.15 (valor calculado 0.17);

Em geral, os resultados medidos foram ligeiramente inferiores aos calculados.

2.10 - Aplicação como motor – O *Motorformer*

A máquina de alta tensão também pode ser usada como motor, denominado *Motorformer*, já estando em operação algumas unidades. A primeira delas está instalada na Suécia, desde setembro de 2001, operando em rede de 42 kV, 10 MVA de potência nominal e velocidade de rotação de 1500 RPM.

A capacidade de operação em regime de sobreexcitação, oferecendo suporte de potência reativa ao sistema interligado, oferece particular atratividade, especialmente se comparada à operação de motores de indução convencionais.

Outros dois motores de alta tensão idênticos estão em fase de instalação em plataformas de exploração de petróleo “*offshore*” no litoral da Noruega, e a entrada em operação está prevista para 2005. As máquinas têm potência nominal de 40 MW,

operam em rede de 56 kV, rotação entre 1260 e 1890 rpm e peso de 95 toneladas, sendo pressurizadas para operação segura em atmosferas explosivas.

A instalação em plataformas “*offshore*” oferece grande atratividade para as companhias petrolíferas, por ocuparem um espaço menor do que um motor com transformador abaixador convencional, além de serem mais leves do que o conjunto, exigindo um menor dimensionamento da estrutura mecânica de suporte.

Capítulo 3

Apresentação e desempenho do Sistema Teste em regime permanente

3.1 – Considerações Gerais

Os capítulos anteriores apresentaram, de forma detalhada, as características construtivas do *Powerformer*, ressaltando aspectos comparativos em relação a máquinas convencionais.

Neste capítulo, será apresentado, para fins didáticos, um sistema elétrico de pequeno porte, com 15 barras em configuração de carga leve e 16 barras em configuração de carga pesada, sendo 4 dessas as barras de geração nos dois casos. Serão abordados os aspectos comparativos entre a operação convencional (caso base), em que todos os geradores controlam as tensões em suas barras terminais, e o caso *Powerformer*, em que um gerador de alta tensão é instalado em substituição a um gerador convencional, eliminando o respectivo transformador elevador.

3.2 - Apresentação do sistema

O sistema possui uma estrutura similar a do Sistema Elétrico Brasileiro, com 2 usinas hidrelétricas que alimentam centros de carga distantes através de linhas de transmissão de alta tensão, complementado por duas usinas termelétricas a gás natural de menor potência, instaladas em local próximo aos centros de carga. As usinas hidrelétricas são compostas por unidades geradoras 6 X 415 MVA e 5 X 350 MVA e estão localizadas nas barras 1 e 2, respectivamente; as termelétricas são compostas por unidades geradoras 2 X 208,5 MVA e 1 X 294 MVA, instaladas nas barras 3 e 4, respectivamente (ROCHA, 2004). Na simulação em que a operação do *Powerformer* é estudada, a usina da barra 4 será substituída por uma de potência idêntica, instalada na barra 10. O sistema de transmissão é composto por dois troncos em 500kV e um em 230

kV, para suprimento a uma carga do tipo comercial localizada na barra 14 e a uma outra do tipo industrial (motores de indução) situada na barra 11. Adicionalmente, em cenário de carga pesada, é considerada uma carga do tipo comercial na barra 16, ligada à barra 9 através de um transformador abaixador.

A tabela 3.1 e as figuras de 3.1 a 3.4 a seguir apresentam ilustrações do sistema.

Tabela 3.1 – Tensão nominal nas barras

Barra	Tensão Nominal (kV)
1	18
2	16
3	16
4	16
5	500
6	500
7	500
8	500
9	230
10	230
11	138
12	138
13	138
14	69
15	500
16	138

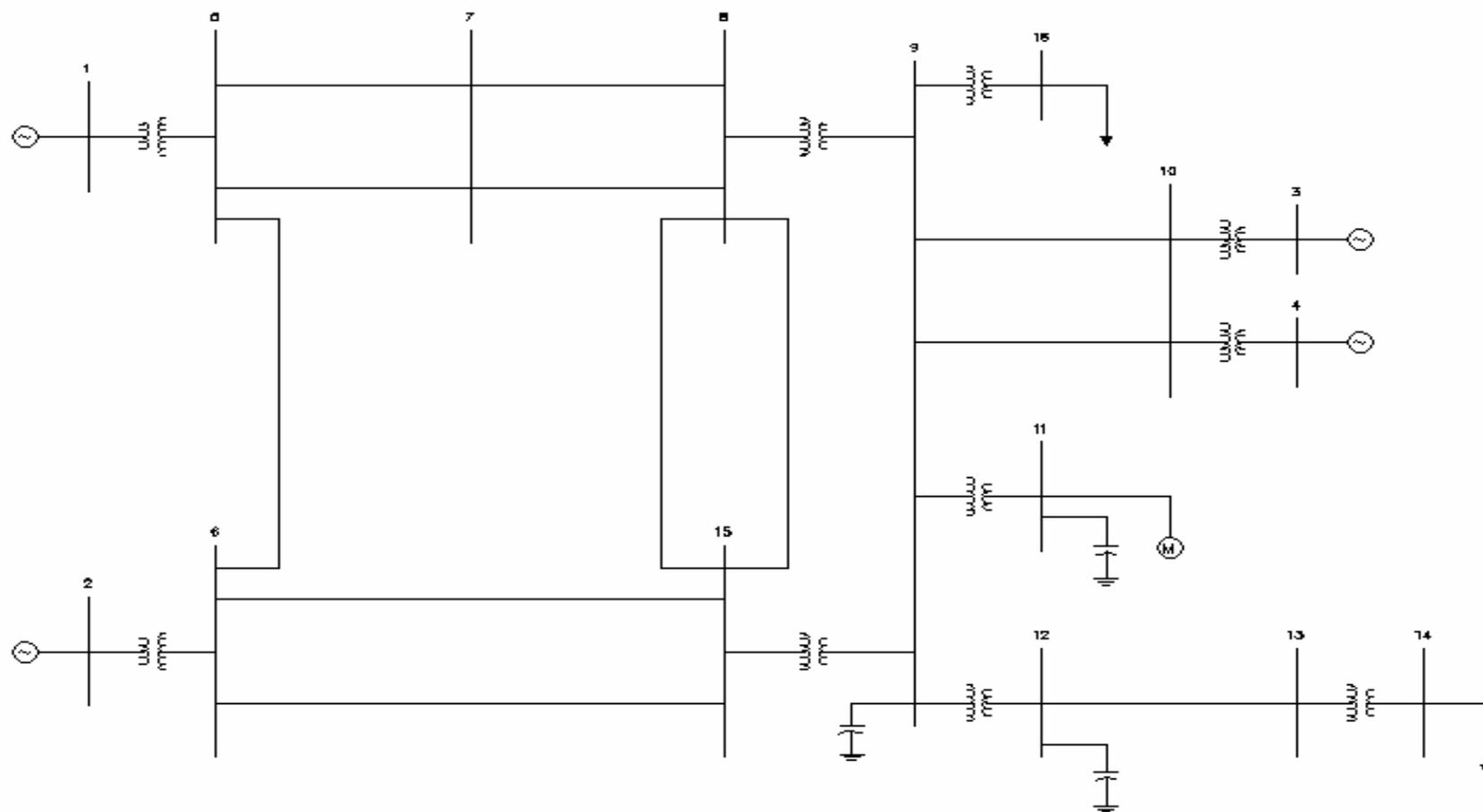


Figura 3.2 – Sistema teste – configuração com quatro usinas convencionais (caso base) em carga pesada.

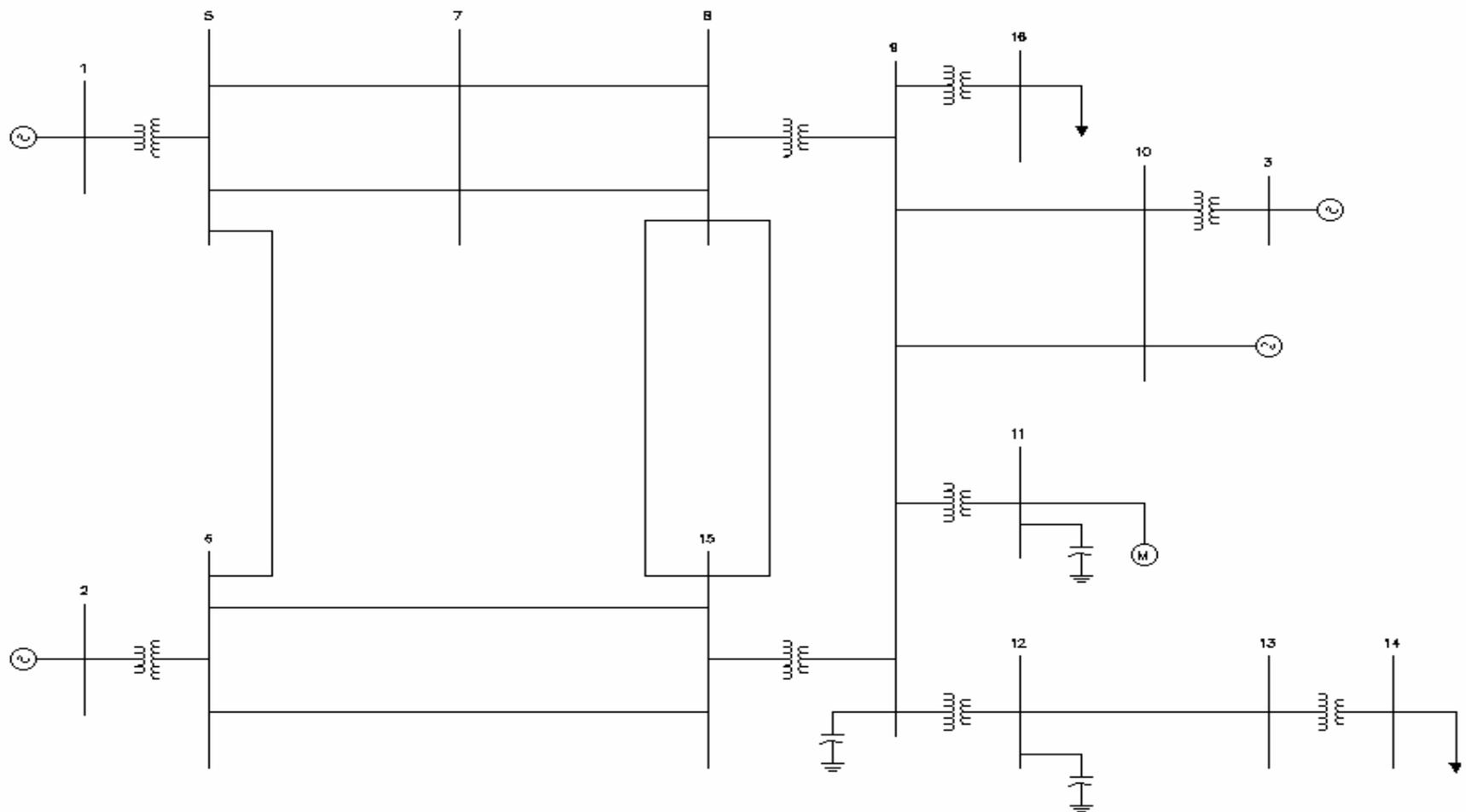


Figura 3.4 – Sistema teste – configuração com *Powerformer* na barra 10, em carga pesada.

As cargas comerciais são representadas por modelo tipo ZIP com 50% de potência constante e 50% de impedância constante para a parte ativa e 100% de impedância constante para a parte reativa, sendo do montante de 2800 +j1100 MVA na barra 14, e de 700+j300 MVA na barra 16, esta última apenas no cenário de carga pesada.

A carga representada por motores de indução é de 75 unidades de 5208 HP nos dois cenários, com 82% de carregamento. A barra 9 possui um compensador estático com capacidade compreendida entre -50 a 650 Mvar para suporte de tensão, enquanto que as barras 11 e 12 operam com bancos de capacitores para correção do fator de potência.

A tabela 3.2 apresenta uma descrição sucinta do sistema.

Tabela 3.2 - dados do sistema

CONFIGURAÇÃO CARGA LEVE						
			Motor de Indução			
	P (MW)	Q (MVar)	Unidades	Potência (HP)	Carregamento (%)	Shunt (MVar)
Barra 9			75	5208	82	1500
Barra 11						100
Barra 12						400
Barra 14	2800	1100				
Fator de Potência						
Barra 11	0,936					
Barra 12	0,949					
CONFIGURAÇÃO CARGA PESADA						
			Motor de Indução			
	P (MW)	Q (MVar)	Unidades	Potência (HP)	Carregamento (%)	Shunt (MVar)
Barra 9			75	5208	82	1500
Barra 11						100
Barra 12						400
Barra 14	2800	1100				
Barra 16	700	300				
Fator de Potência						
Barra 11	0,936					
Barra 12	0,949					
Barra 16	0,92					

A tabela 3.3 mostra os dados das linhas de transmissão do sistema.

Tabela 3.3 - Dados das Linhas de Transmissão

Da barra	Para barra	Nº de circuitos	Resistência por circuito (%)	Reatância por circuito (%)	Susceptância por circuito (%)	Capacidade térmica (MVA)
5	7	2	0,32	4,21	484,63	1150
5	6	1	0,12	1,58	180,54	1200
6	15	2	0,38	4,98	573,31	1250
7	8	2	0,32	4,21	484,63	1200
9	10	2	1,10	6,18	15,33	-
12	13	1	0,05	0,29	183,00	-
8	15	1	0,04	0,52	60,18	1200
8	15	1	0,04	0,54	63,47	1200

A tabela 3.4 mostra os dados dos transformadores do sistema.

Tabela 3.4 – Dados dos Transformadores

Da barra	Para barra	Nº de circuitos	Tensões (kV)	Reatância (na base do equipamento em %)	Potência Nominal (MVA)
5	1	6	500/18	10	420
6	2	5	500/16	10	360
10	3	2	230/16	10	208,5
10	4	1	230/16	10	294
9	11	1	230/138	6,3	2100
8	9	2	500/230	7,2	1300
9	12	1	230/138	7	3500
13	14	1	138/69	7,14	4200
15	9	2	500/230	7,2	1300
16	9	1	230/138	6,3	2100

A tabela 3.5 mostra os dados dos equipamentos *shunt* utilizados no sistema.

Tabela 3.5 - Dados de equipamentos *shunt*

Da barra	Para barra	Reator de Linha (MVar)	
		Da barra	Para barra
5	7	-	150
5	6	100	-
6	15	-	185
7	8	150	150

A tabela 3.6 mostra os dados dos geradores do sistema.

Tabela 3.6 – Parâmetros dos Geradores

Modelo de gerador com pólos salientes			
Barra 1	Barra 2		
127,0	127,0	Xd	Reatância Síncrona de eixo direto, em %
105,0	105,0	Xq	Reatância Síncrona de eixo em quadratura, em %
23,8	23,8	Xd	Reatância transitória de eixo direto, em %
16,7	16,7	X'd	Reatância subtransitória de eixo direto, em %
10,0	10,0	Xl	Reatância de dispersão da armadura, em %
8,22	8,00	Tdo	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto, em segundos
0,028	0,06	T'do	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto, em segundos
0,028	0,15	T'qo	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto, em segundos
0,0	0,0	Ra	Resistência do enrolamento da armadura, em %
4,425	4,425	H	Momento de Inércia, em segundos
0,0	0,0	D	Constante de amortecimento, em pu/pu
0,95	0,95	cos f	Fator de Potência
415	350	MVA	Potência aparente nominal da máquina, em MVA
Modelo de gerador com pólos lisos			
Barra 3	Barra 4 / Barra 10 PF		
188,0	188,0	Xd	Reatância Síncrona de eixo direto, em %
188,0	188,0	Xq	Reatância Síncrona de eixo em quadratura, em %
26,0	26,0	Xd	Reatância transitória de eixo direto, em %
60,0	60,0	Xq	Reatância transitória de eixo em quadratura, em %
15,0	15,0	X'd	Reatância subtransitória de eixo direto, em %
10,0	10,0	Xl	Reatância de dispersão da armadura, em %
8,10	8,10	Tdo	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto, em segundos
0,56	0,56	T'qo	Constante de tempo transitória de eixo em quadratura em circuito aberto, em segundos
0,07	0,07	T'do	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto, em segundos
0,01	0,01	T'qo	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto, em segundos
0,00	0,00	Ra	Resistência do enrolamento da armadura, em %
3,45	3,45	H	Momento de Inércia, em segundos
0,00	0,00	D	Constante de amortecimento, em pu/pu
0,90	0,90	cos f	Fator de Potência
208,5	294	MVA	Potência aparente nominal da máquina, em MVA

A tabela 3.7 mostra os limites de operação dos geradores do sistema

Tabela 3.7 – Limites de Operação

Limites de Operação por máquina				
Energia Reativa (MVA _r)				
Gerador na barra	1	2	3	4 (ou 10, caso PF)
Mínima	-125	-105	-98	-125
Máxima	125	105	90	120

A tabela 3.8 apresenta os valores dos parâmetros por unidade dos motores de indução conectados à barra 11. Os valores para as reatâncias, resistências e constantes de inércia são fornecidos na base de potência da máquina.

Tabela 3.8 – Parâmetros dos Motores de Indução – Barra 11

Parâmetro	
Resistência do estator (%)	4,4
Reatância do estator (%)	7,1
Reatância de magnetização (%)	169,0
Resistência do Rotor (%)	2,1
Reatância do rotor (%)	10,5
Inércia Total (s)	0,35
Expoente da curva do Tmec (?)	1,5
Potência de uma unidade (HP)	5208

3.3 - Desempenho do Sistema

3.3.1 - Regime Permanente – cenário de carga leve

Os dois grandes troncos de transmissão em alta tensão são responsáveis por uma expressiva produção de potência reativa, fazendo, inclusive, com que todas as quatro barras trabalhem com suas máquinas subexcitadas, apesar de o despacho de potência ativa, a princípio, requerer a sincronização de um menor número de máquinas nas barras 1 e 2. Para que haja a necessária absorção de potência reativa é imperativa a conexão das 6 máquinas da barra 1 e das 5 máquinas da barra 2. Uma das possíveis soluções para a diminuição da geração de potência reativa na planta seria o desligamento de circuitos duplicados que tenham carregamentos individuais abaixo de 50%, como por exemplo um dos circuitos entre as barras 7-8, 9-10 e 8-15. Entretanto, essa medida não é desejável por diminuir a confiabilidade de operação da planta em caso de contingências. A análise do fluxo de potência deste sistema, realizada utilizando-se a ferramenta computacional ANAREDE (CEPEL, 2003) revelou os seguintes pontos de operação das máquinas e do CER da barra 9 neste cenário, mostrados na tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Potências Ativa e Reativa nas quatro barras e CER na Barra 9, cenário de carga leve

CENÁRIO	Carga Leve Caso Base	Carga Leve Caso Powerformer
G1 MW	1485,90	1485,90
G1 MVar	-483,10	-482,50
G2 MW	1250,00	1250,00
G2 MVar	-469,80	-469,30
G3 MW	300,00	300,00
G3 MVar	-46,00	-44,20
G4 (G10 - PF) MW	250,00	250,00
G4 (G10 - PF) MVar	-29,60	-53,20
CER (MVar)	25,10	25,90
Tensão	1,039	1,039

A tabela 3.10 mostra o perfil de tensões nas barras do sistema neste cenário.

Tabela 3.10 – Perfil de tensões nas barras do sistema, carga leve

CENÁRIO DE CARGA LEVE		
	Caso Base	Caso Powerformer
Barra	TENSÃO	TENSÃO
1	1,050	1,050
2	1,030	1,030
3	1,010	1,010
4	1,010	-
5	1,026	1,026
6	1,021	1,021
7	1,052	1,052
8	1,045	1,045
9	1,039	1,039
10	1,023	1,023
11	1,048	1,048
12	1,048	1,048
13	0,995	0,995
14	1,027	1,027
15	1,043	1,042

Excetuando-se uma pequena diferença na barra 15, o perfil de tensões é igual nos dois casos.

No caso *Powerformer*, a máquina de alta tensão operando na barra 10 teve seu ajuste de absorção de potência reativa definido de forma a não alterar significativamente o ponto de operação da usina vizinha, situada na barra 3, ou seja, no caso base, as máquinas da barra 3 operam absorvendo 46 Mvar de potência reativa, enquanto que, no caso *Powerformer*, esta usina passa a absorver um pouco menos: 44,2 Mvar.

Por outro lado, objetivando ainda o ajuste do sistema de modo a atuar, no caso *Powerformer*, da forma mais próxima à operação no caso base, nota-se que a máquina de alta tensão absorve uma quantidade de potência reativa significativamente maior do que a máquina correspondente convencional. Isso é devido à ausência de demanda de potência reativa no transformador elevador da barra 4 para a barra 10, que foi suprimido.

A instalação do Compensador Estático de Reativo na barra 9 constitui importante recurso para o controle da tensão em todo o sistema, pois esta é uma barra central que recebe a energia de fonte hidráulica, transmitida através dos longos troncos e faz a ligação com as barras de carga 11, 14 e 16 (cenário de carga pesada).

3.3.2 - Regime Permanente – cenário de carga pesada

Nesta situação, o ponto de operação das máquinas nas 4 barras é alterado substancialmente. As máquinas nas usinas hidrelétricas 1 e 2 passam a absorver uma quantidade bem menor de potência reativa, enquanto que as usinas termelétricas nas barras 3 e 4 (ou 10, caso *Powerformer*) passam do regime de sub para o de sobreexcitação. A tabela 3.11 mostra os pontos de operação das máquinas e do CER da barra 9 neste cenário.

Tabela 3.11 – Potências Ativa e Reativa nas quatro barras e CER na Barra 9, cenário de carga pesada.

CENÁRIO	Carga Pesada Caso Base	Carga Pesada Caso Powerformer
G1 MW	2103,20	2105,20
G1 MVar	-2,20	-3,40
G2 MW	1250,00	1250,00
G2 MVar	-85,30	-86,90
G3 MW	300,00	300,00
G3 MVar	52,10	44,40
G4 (G10 - PF) MW	250,00	250,00
G4 (G10 - PF) MVar	39,70	29,60
CER (MVar)	310,40	308,00
Tensão	0,965	0,965

Devido à ausência do transformador elevador, a injeção de potência reativa no sistema pelo *Powerformer* é menor do que o gerador convencional, para manutenção de nível de tensão satisfatório na barra 10.

A tabela 3.12 mostra o perfil de tensões nas barras do sistema neste cenário.

Tabela 3.12 – Perfil de tensões nas barras do sistema, carga pesada

CENÁRIO DE CARGA PESADA		
	Caso Base	Caso Powerformer
Barra	TENSÃO	TENSÃO
1	1,050	1,050
2	1,030	1,030
3	1,010	1,010
4	1,010	-
5	1,010	1,010
6	0,997	0,997
7	0,980	0,980
8	0,967	0,968
9	0,965	0,965
10	1,000	1,002
11	1,048	1,048
12	0,987	0,988
13	0,936	0,936
14	0,966	0,966
15	0,965	0,966
16	1,041	1,041

Da mesma forma que no cenário de carga leve, o perfil de tensões é praticamente idêntico para os dois casos. Ainda similarmente ao cenário anterior, no caso *Powerformer*, a máquina de alta tensão, operando na barra 10, teve definido seu ajuste de geração de potência reativa de forma a não alterar significativamente o ponto de operação da usina vizinha situada na barra 3, ou seja, no caso base, as máquinas da barra 3 operam injetando 52,10 Mvar no sistema, enquanto que no caso *Powerformer*, essa injeção é de 44,40 Mvar. Deve-se mencionar o baixo nível de tensão na barra 13, devido ao ajuste do tap do transformador.

3.3.3 - Análise da Curva PxV – cenário de carga leve

A curva PxV é um dos métodos utilizados para a avaliação da estabilidade de tensão em um sistema elétrico. Ela é obtida através de execuções sucessivas do fluxo de potência, onde a carga em uma das barras do sistema é aumentada em um determinado percentual a cada etapa, mantendo-se constante o fator de potência e definindo-se, antecipadamente, as máquinas geradoras que serão responsáveis por atender o acréscimo de demanda e em que proporção. Observando-se os troncos de transmissão, é

possível constatar que as linhas que interligam as barras 6 e 15 operam, nos dois casos, com carregamento ainda bastante inferior ao seu limite máximo. No caso base, o carregamento é de 65,7%, e no caso *Powerformer* é de 65,6%; enquanto que as linhas entre as barras 5 e 8 operam com carregamento da ordem de 50%. Sendo assim, e tendo-se em mente o menor custo da geração hidrelétrica em comparação com a geração termelétrica, optou-se, na execução do processo de fluxo de potência com incrementos sucessivos, por atribuir às usinas hidrelétricas a responsabilidade de assumir 80% da geração, em proporções iguais (40% cada), enquanto que as duas usinas termelétricas assumirão 20% do incremento de geração, em proporções também iguais, ou seja, 10% cada.

A Figura 3.5 a seguir apresenta as curvas PxV sobrepostas para os dois casos, considerando o acréscimo de carga na barra 14.

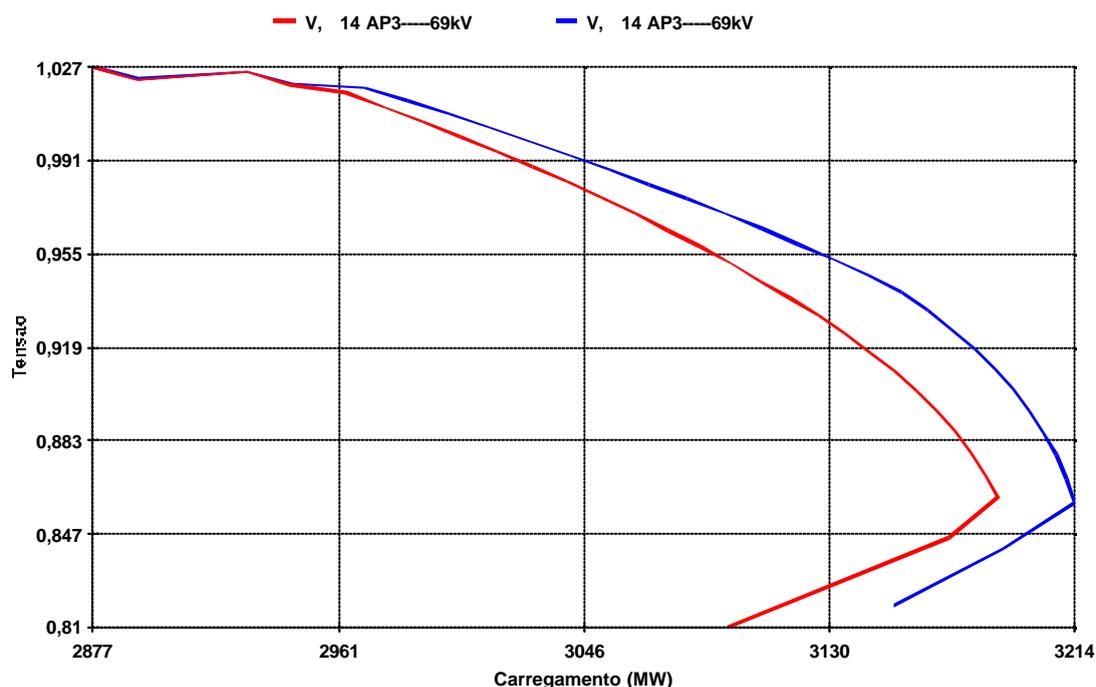


Figura 3.5 – Curva PxV, cenário de carga leve, tensão na barra 14, em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A operação da planta perto do limite máximo de carregamento não é desejável, por, indiscutivelmente, diminuir a margem de estabilidade, limitando uma futura expansão de carga na barra em questão. No Brasil, o Operador Nacional do Sistema

recomenda uma margem mínima de 6%, sendo esta definida pelo ponto de carregamento equivalente a 95% de tensão nominal.

Uma análise da curva PxV para o caso base mostra que a tensão atinge 0,95 pu para uma carga de 3106,5 MW, enquanto que no caso *Powerformer*, a tensão atinge este limite para o carregamento de 3143,4 MW, implicando em margens de estabilidade de 8% e 9,2%, respectivamente.

É importante ressaltar que, nos pontos de máximo carregamento, 3188 MW e 3214 MW, para os casos base e *Powerformer*, respectivamente, a exigência em relação ao fornecimento de potência reativa do gerador 4 ou 10 cresce abruptamente, como demonstrado na tabela 3.13 a seguir.

Tabela 3.13 – Injeção de potência reativa

Caso base	36,9 MVar
Caso <i>Powerformer</i>	168 MVar

Deve-se mencionar que esse ponto de operação no *Powerformer* seria inviável, porque extrapolaria o limite de geração de potência reativa da máquina, 120 Mvar, considerando-se, como já citado, máquinas de mesma potência nominal. Apesar da maior exigência no suporte ao fornecimento de potência reativa, o controle de tensão exercido na barra de alta revela uma clara vantagem na margem de estabilidade do sistema. O transformador elevador é um equipamento que demanda potência reativa, diminuindo a disponibilidade para injeção na rede interligada.

3.3.4 - Análise da curva VxQ – cenário de carga leve

O levantamento de curvas VxQ implica na instalação de uma fonte variável de potência reativa em uma determinada barra, alterando-se a tensão em fluxos de potência sucessivos e averiguando-se a injeção ou absorção de potência reativa necessária para manutenção das tensões especificadas. Esse método é utilizado, mundialmente, para a avaliação de estabilidade de tensão por operadores de sistema elétricos; entretanto seus resultados devem ser posteriormente validados por uma análise de estabilidade eletromecânica (CHOWDHURY, TAYLOR, 2000).

A figura 3.6 a seguir mostra as curvas VxQ, considerando-se a instalação da fonte de potência reativa na barra 14.

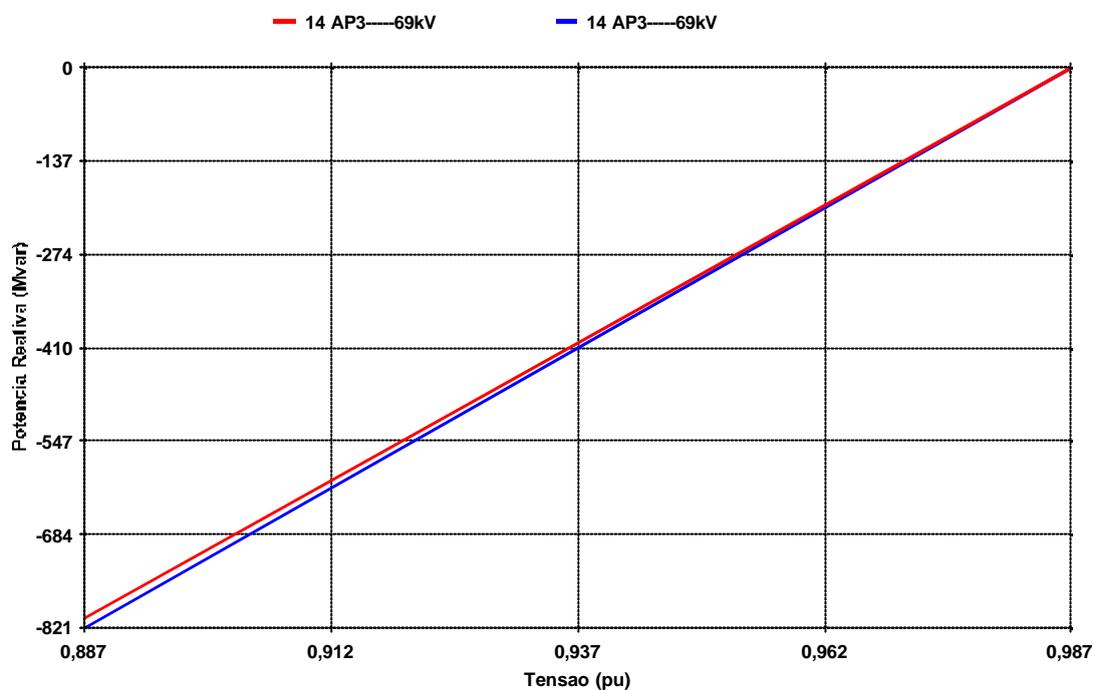


Figura 3.6 – Curva V x Q, barra 14, em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

Observa-se na figura acima que a margem de potência reativa dessa barra é de - 806 Mvar e - 821 MVAR nos casos base e *Powerformer*, respectivamente. Conclui-se então que na operação do *Powerformer*, um gerador síncrono instalado na barra 14 estaria absorvendo mais potência reativa do que se estivesse em operação na barra 4 uma máquina convencional para manutenção do mesmo nível de tensão, ou seja, o suporte à potência reativa é melhor no *Powerformer*.

3.3.5 - Análise da curva PxV – cenário de carga pesada

Similarmente ao cenário de carga leve, a figura 3.7 mostra a curva PxV do sistema para o cenário de carga pesada, considerando-se incrementos sucessivos de carga na barra 14.

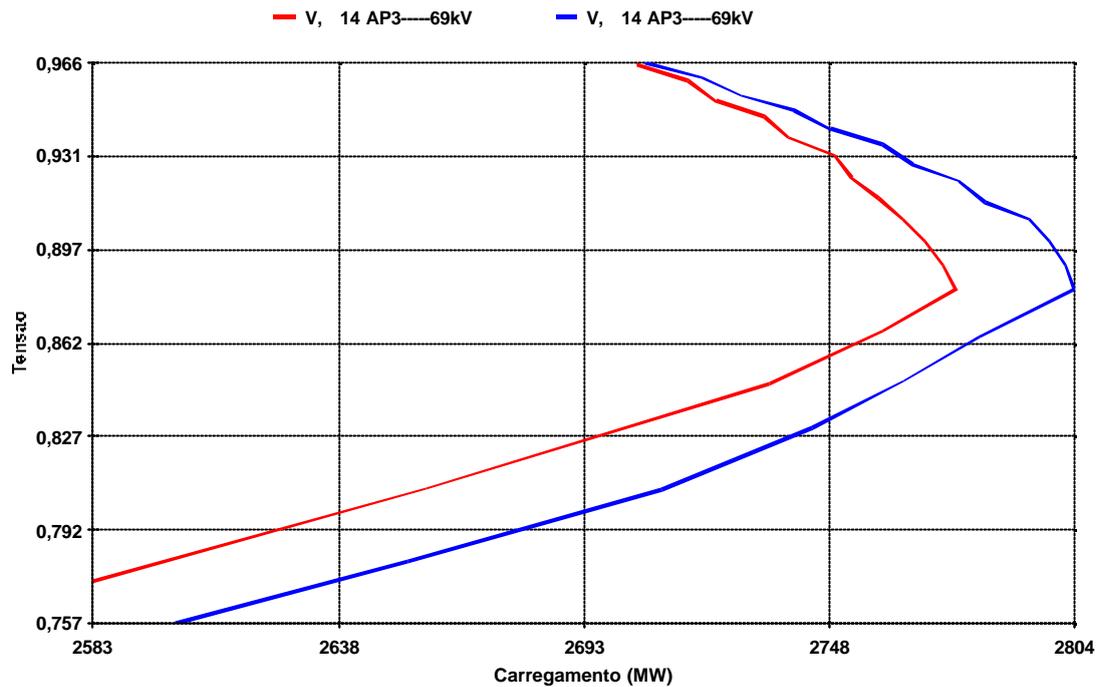


Figura 3.7 – Curva PxV, cenário de carga pesada, tensão na barra 14, em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A análise da figura revela que, enquanto no caso base a margem de estabilidade é de 0,65%, no caso *Powerformer* ela é ligeiramente superior: 0,76%.

3.3.6 - Análise da curva VxQ – cenário de carga pesada

A figura 3.8 mostra a curva VxQ do sistema no cenário de carga pesada, considerando a instalação de um compensador síncrono na barra 14.

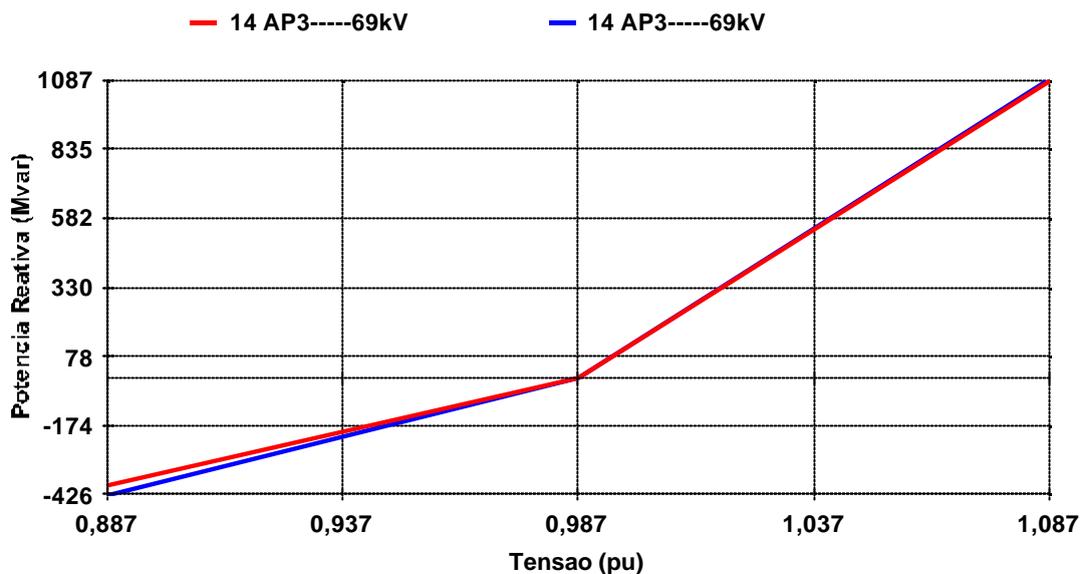


Figura 3.8 – Curva VxQ, carga pesada, barra 14, em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

No caso base, o compensador síncrono instalado na barra 14 estaria absorvendo 391,2 Mvar para manutenção da tensão na barra em 0,887 pu, enquanto que no caso *Powerformer*, devido à ausência do transformador elevador, a máquina estaria absorvendo maior nível de potência reativa, 426,1 Mvar.

3.4 - Análise de Contingências

Nesta seção, analisar-se-á o desempenho do sistema, em regime permanente, considerando-se a indisponibilidade de linhas de transmissão ou equipamentos da planta.

Será feita a análise das seguintes contingências:

- Perda de uma linha de transmissão entre as barras 9 e 10
- Perda do transformador entre as barras 8 e 9
- Perda da terceira usina

3.4.1 - Análise de Contingência na linha de transmissão entre as barras 9 e 10:

Considerou-se, neste caso, a perda de um dos circuitos entre as barras 9 e 10. A análise de fluxo de potência, indicou o seguinte perfil de tensões e despacho de potência nas usinas, nos dois casos no cenário de carga leve, como mostra a tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Perfil de tensões e despacho nas usinas, carga leve, perda de um circuito entre as barras 9 e 10

Perda de uma LT entre as barras 9 e 10					
Barra	Caso base	Caso Powerformer	Potência nas usinas	Caso base	Caso Powerformer
1	1,050	1,050	G1 MW	1503,80	1502,80
2	1,030	1,030	G1 MVar	-450,90	-460,80
3	1,010	1,010	G2 MW	1250,00	1250,00
4	1,010	-	G2 MVar	-439,70	-449,50
5	1,025	1,025	G3 MW	300,00	300,00
6	1,019	1,020	G3 MVar	-0,70	-44,20
7	1,046	1,048	G4 (G10-PF) MW	250,00	250,00
8	1,036	1,040	G4 (G10-PF) MVar	2,50	35,10
9	1,030	1,033	CER (MVar)	61,80	48,60
10	1,013	1,023			
11	1,048	1,048			
12	1,048	1,048			
13	0,995	0,995			
14	1,027	1,027			
15	1,034	1,037			

A análise da tabela acima revela que o *Powerformer*, ao controlar a tensão diretamente na barra de alta, oferece melhor suporte de tensão às barras vizinhas. Enquanto o gerador convencional injeta no sistema apenas 2,5 Mvar, o *Powerformer* injeta 35,10 Mvar para manutenção da tensão na barra 10, o que provoca um alívio no ponto de operação no CER da barra 9. Entretanto, há de se ressaltar que este ponto de operação se mostra inadequado, pois a terceira usina, vizinha ao *Powerformer*, operaria absorvendo grande quantidade de potência reativa. Seria necessária a definição de novos níveis de tensão nas barras 3 e 10 no caso de o sistema operar sob esta contingência, para evitar a troca de potência reativa entre as usinas.

No cenário de carga pesada, a análise de fluxo de potência revelou o seguinte perfil de tensões e despacho nas usinas, como mostra a tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Perfil de tensões e despacho nas usinas, carga pesada, perda de um circuito entre as barras 9 e 10

Perda de uma LT entre as barras 9 e 10					
Barra	Caso base	Caso Powerformer	Potência nas usinas	Caso base	Caso Powerformer
1	1,050	1,050	G1 MW	2068,80	2072,40
2	1,030	1,030	G1 MVar	41,20	38,60
3	1,010	1,010	G2 MW	1250,00	1250,00
4	1,010	-	G2 MVar	-35,80	-39,10
5	1,008	1,008	G3 MW	300,00	300,00
6	0,993	0,994	G3 MVar	66,60	44,40
7	0,970	0,970	G4 (G10-PF) MW	250,00	250,00
8	0,949	0,951	G4 (G10-PF) MVar	50,00	55,70
9	0,946	0,948	CER (MVar)	373,60	369,10
10	0,997	1,002			
11	1,048	1,048			
12	0,968	0,969			
13	0,917	0,918			
14	0,946	0,948			
15	0,948	0,949			
16	1,041	1,041			

Nesta situação, ocorre a violação do limite inferior de tensão de 0,95 pu nas barras 9, 13, 14 e 15 nos dois casos. Seriam necessários reforços no sistema para maior disponibilidade de potência reativa, tais como a instalação de novos Compensadores estáticos, bancos de capacitores, ou mesmo compensadores síncronos. O *Powerformer*, similarmente ao cenário de carga leve, proporciona uma pequena melhoria no perfil de tensões nas barras mais próximas. Neste cenário, não ocorre a troca de potência reativa entre as barras vizinhas 3 e 4, no caso base, e 3 e 10, no caso *Powerformer*.

Nos dois cenários, constatou-se que o carregamento da linha remanescente passou de 2,7% para pouco mais de 5,5%.

3.4.2 - Análise de contingência no transformador entre as barras 8 e 9:

A análise de fluxo de potência indicou o seguinte perfil de tensões e despacho de potência nos dois casos, no cenário de carga leve, como mostra a tabela 3.16.

Tabela 3.16 – Perfil de tensões e despacho nas usinas, carga leve, perda do transformador entre as barras 8 e 9

Perda do Transformador entre as barras 8 e 9					
Barra	Caso base	Caso Powerformer	Potência nas usinas	Caso base	Caso Powerformer
1	1,050	1,050	G1 MW	1484,90	1489,80
2	1,030	1,030	G1 MVar	-439,90	-442,70
3	1,010	1,010	G2 MW	1250,00	1250,00
4	1,010	-	G2 MVar	-404,30	-407,80
5	1,024	1,024	G3 MW	300,00	300,00
6	1,017	1,017	G3 MVar	-23,50	-44,20
7	1,044	1,044	G4 (G10-PF) MW	250,00	250,00
8	1,029	1,031	G4 (G10-PF) MVar	-13,70	-3,30
9	1,022	1,023	CER (MVar)	94,50	88,10
10	1,018	1,023			
11	1,050	1,051			
12	1,047	1,048			
13	0,994	0,995			
14	1,026	1,028			
15	1,024	1,025			

Nessa contingência, a energia proveniente das usinas hidrelétricas teria de ser escoada para os grandes centros consumidores exclusivamente através do transformador existente entre as barras 9 e 15. Entretanto, como o carregamento deste equipamento estabilizar-se-ia em torno de 52%, não haveria restrição quanto ao seu carregamento. Como esperado, devido à ausência do transformador elevador, o suporte à tensão nas barras vizinhas a 10 é melhor no caso *Powerformer*, em comparação ao caso de operação com o gerador convencional, havendo novamente um alívio no ponto de operação do Compensador Estático da barra 9.

Nessa eventualidade, e sem alterar o nível de tensão nas barras de geração, o *Powerformer* operaria absorvendo um nível de potência reativa bem inferior ao da terceira usina, vizinha. Este ponto de operação poderia ser considerado adequado tendo-se em vista a possibilidade de ocorrência de outras contingências no sistema que demandassem a rápida injeção de potência reativa, como por exemplo, curtos-circuitos. Estando instalado na barra de alta tensão e com seu ponto de absorção ou injeção de potência reativa próximo do zero, o *Powerformer* poderá responder mais rapidamente, sob análise dinâmica, a qualquer demanda de potência reativa que se faça necessária em caráter emergencial. Por outro lado, estando em uma condição de maior subexcitação,

as máquinas da terceira usina não estariam aptas a injetar potência reativa tão rapidamente na rede como o *Powerformer*.

A tabela 3.17 mostra o perfil de tensões no sistema para esta contingência, no cenário de carga pesada.

Tabela 3.17 – Perfil de tensões e despacho nas usinas, carga pesada, perda do transformador entre as barras 8 e 9

Perda do Transformador entre as barras 8 e 9					
Barra	Caso base	Caso Powerformer	Potência nas usinas	Caso base	Caso Powerformer
1	1,050	1,050	G1 MW	2033,00	2044,20
2	1,030	1,030	G1 MVar	52,90	46,60
3	1,010	1,010	G2 MW	1250,00	1250,00
4	1,010	-	G2 MVar	16,60	8,00
5	1,008	1,008	G3 MW	300,00	300,00
6	0,990	0,991	G3 MVar	86,70	44,40
7	0,967	0,968	G4 (G10-PF) MW	250,00	250,00
8	0,937	0,940	G4 (G10-PF) MVar	64,20	103,00
9	0,938	0,942	CER (MVar)	400,40	387,30
10	0,992	1,002			
11	1,048	1,048			
12	0,960	0,964			
13	0,909	0,913			
14	0,938	0,942			
15	0,934	0,937			
16	1,041	1,041			

Sob carga pesada, a operação da planta estaria inviabilizada nos dois casos pela sobrecarga de 130% sobre o transformador remanescente entre as barras 9 e 15; ainda assim, caracterizar-se-ia o maior aporte de potência reativa proporcionado pelo *Powerformer*, apesar de não ser possível evitar-se a violação no nível mínimo de tensão (0,95 pu) em várias barras do sistema.

3.4.3 - Análise de contingência na terceira usina:

A análise de fluxo de potência indicou o seguinte perfil de tensões e despacho de potência nas usinas para os dois casos no cenário de carga leve, como mostra a tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Perfil de tensões e despacho nas usinas, carga leve, perda da terceira usina

Perda da Usina 3					
Barra	Caso base	Caso Powerformer	Potência nas usinas	Caso base	Caso Powerformer
1	1,050	1,050	G1 MW	1796,90	1798,50
2	1,030	1,030	G1 MVar	-330,20	-327,50
3	-	-	G2 MW	1250,00	1250,00
4	1,010	-	G2 MVar	-358,50	-356,10
5	1,021	1,021	G3 MW	-	-
6	1,014	1,014	G3 MVar	-	-
7	1,031	1,031	G4 (G10-PF) MW	250,00	250,00
8	1,028	1,028	G4 (G10-PF) MVar	-31,00	-53,00
9	1,024	1,024	CER (MVar)	84,90	87,40
10	1,024	1,023			
11	1,052	1,051			
12	1,048	1,048			
13	0,995	0,996			
14	1,027	1,028			
15	1,026	1,025			

A análise da topologia do circuito indica que a perda desta usina forçará a primeira usina, definida como “swing” na análise de fluxo, a compensar a injeção no sistema dos 300 MW referentes à usina desligada (MONTICELLI, 1983). Ou seja, os grandes troncos de transmissão hidrelétrica estarão submetidos a um fluxo de potência adicional que visa suprir as distantes cargas nas barras 11, 14 e 16 (esta última apenas no cenário de carga pesada). A análise de fluxo de potência indica carregamentos da ordem de 50% a 70%, portanto não haveria restrição à transmissão do bloco adicional de energia pelos grandes troncos. Adicionalmente, no caso base, o transformador elevador da quarta usina estará sujeito também a um carregamento adicional, considerando-se que, em carga leve, a máquina 4 estará absorvendo uma maior parcela de potência reativa, pois a terceira usina, em contingência, não mais desempenha a função de absorção de potência reativa.

O nível de tensão em todas as barras do sistema permanece praticamente inalterado nos dois casos. Entretanto, nessa contingência, seria interessante que o *Powerformer* tivesse sua tensão terminal ajustada em um nível mais elevado, aliviando o Compensador Estático da barra 9, passando a máquina a absorver menor nível de potência reativa.

No cenário de carga pesada, o perfil de tensões estabilizou-se no patamar indicado na tabela 3.19.

Tabela 3.19 – Perfil de tensões e despacho nas usinas, carga pesada, perda da terceira usina

Perda da Usina 3					
Barra	Caso base	Caso Powerformer	Potência nas usinas	Caso base	Caso Powerformer
1	1,050	1,050	G1 MW	2327,60	2357,30
2	1,030	1,030	G1 MVar	240,40	222,50
3	-	-	G2 MW	1250,00	1250,00
4	1,010	-	G2 MVar	107,40	83,10
5	1,002	1,003	G3 MW	-	-
6	0,984	0,986	G3 MVar	-	-
7	0,944	0,949	G4 (G10-PF) MW	250,00	250,00
8	0,930	0,940	G4 (G10-PF) MVar	115,00	146,70
9	0,931	0,941	CER (MVar)	425,80	392,40
10	0,975	1,002			
11	1,048	1,048			
12	0,952	0,962			
13	0,901	0,911			
14	0,930	0,940			
15	0,929	0,938			
16	1,041	1,041			

Em operação normal em carga pesada, as máquinas nas usinas termelétricas operam injetando potência reativa no sistema. Portanto, inicialmente, é interessante notar-se que, no caso *Powerformer*, sob esta contingência e sem alteração no nível de tensão na barra 10, haveria violação do limite de injeção de potência reativa pela máquina. No caso base, essa restrição não seria observada uma vez que ocorreria a redução da tensão na barra 10, como mostra a tabela. Portanto, no caso *Powerformer*, seria necessária uma redução na tensão terminal da máquina de forma a possibilitar a operação dentro de sua margem de geração de potência reativa.

3.5 - O controle de tensão na barra de alta através de gerador convencional

Uma situação operacional intermediária às analisadas até o momento seria o controle de tensão realizado na barra de alta por um gerador convencional, o que, a princípio, propiciaria um perfil de tensão nas barras do sistema similar ao do caso *Powerformer*, desde que a máquina convencional controle a tensão na barra de alta no mesmo nível do *Powerformer*, ou seja, 1,023 pu nesse caso. De fato, a tabela 3.20

reproduz o perfil de tensão em todas as barras do sistema, no cenário de carga leve, em comparação com os casos base e *Powerformer* já analisados.

Tabela 3.20 – Perfil de tensões em carga leve contemplando controle de tensão na barra de alta por gerador convencional

CENÁRIO	Caso Base	Caso Base*	Caso Powerformer
	Carga Leve	Carga Leve	Carga Leve
1	1,050	1,050	1,050
2	1,030	1,030	1,030
3	1,010	1,010	1,010
4	1,010	1,009	-
5	1,026	1,026	1,026
6	1,021	1,021	1,021
7	1,052	1,052	1,052
8	1,045	1,045	1,045
9	1,039	1,039	1,039
10	1,023	1,023	1,023
11	1,048	1,048	1,048
12	1,048	1,048	1,048
13	0,995	0,995	0,995
14	1,027	1,027	1,027
15	1,043	1,042	1,042
*Máquina 4 controla tensão na barra 10			

A tabela 3.21 a seguir retrata o ponto de operação dos geradores da planta e do Compensador Estático da barra 9, contemplando a hipótese de controle de tensão na barra de alta tensão por um gerador convencional, no cenário de carga leve.

Tabela 3.21 – Despacho nas usinas e ponto de operação do CER na barra 9 em cenário de carga leve

CENÁRIO	Caso Base	Caso Base*	Caso Powerformer
	Carga Leve	Carga Leve	Carga Leve
G1 MW	1485,90	1485,90	1485,90
G1 MVar	-483,10	-482,50	-482,50
G2 MW	1250,00	1250,00	1250,00
G2 MVar	-469,80	-469,30	-469,30
G3 MW	300,00	300,00	300,00
G3 MVar	-46,00	-44,20	-44,20
G4 (G10 - PF) MW	250,00	250,00	250,00
G4 (G10 - PF) MVar	-29,60	-31,90	-53,20
CER (MVar)	25,10	25,90	25,90
Tensão	1,039	1,039	1,039
* Máquina 4 controla tensão na barra 10			

A única alteração é observada no nível de absorção de potência reativa do gerador situado na barra 4 ou 10. Como o transformador elevador está presente na planta e é um equipamento que demanda potência reativa, no caso de subexcitação, há um alívio no nível de absorção de potência reativa pelo gerador. Adicionalmente, a pequena diferença entre o nível de absorção de potência reativa pelo gerador da barra 4, nos casos em que há a presença do transformador elevador, deve-se à também pequena diferença de tensão nessa barra nos dois casos.

No cenário de carga pesada, o controle de tensão na barra de alta proporcionado pelo gerador convencional resultaria no seguinte nível de tensão nas barras do sistema, como mostra a tabela 3.22.

Tabela 3.22 – Perfil de tensões em carga pesada contemplando controle de tensão na barra de alta por gerador convencional

CENÁRIO	Caso Base	Caso Base*	Caso Powerformer
	Carga Pesada	Carga Pesada	Carga Pesada
1	1,050	1,050	1,050
2	1,030	1,030	1,030
3	1,010	1,010	1,010
4	1,010	1,048	-
5	1,010	1,010	1,010
6	0,997	0,997	0,997
7	0,980	0,982	0,980
8	0,967	0,971	0,968
9	0,965	0,969	0,965
10	1,000	1,013	1,002
11	1,048	1,048	1,048
12	0,987	0,992	0,988
13	0,936	0,940	0,936
14	0,966	0,970	0,966
15	0,965	0,969	0,966
16	1,041	1,041	1,041

*Máquina 4 controla tensão na barra 10

A tabela 3.23 a seguir retrata o ponto de operação dos geradores da planta e do Compensador Estático da barra 9, contemplando a hipótese de controle de tensão na barra de alta por um gerador convencional, no cenário de carga pesada.

Tabela 3.23 – Despacho nas usinas e ponto de operação do CER na barra 9 em cenário de carga pesada

CENÁRIO	Caso Base	Caso Base*	Caso Powerformer
	Carga Pesada	Carga Pesada	Carga Pesada
G1 MW	2103,20	2116,70	2105,20
G1 MVar	-2,20	-10,50	-3,40
G2 MW	1250,00	1250,00	1250,00
G2 MVar	-85,30	-96,20	-86,90
G3 MW	300,00	300,00	300,00
G3 MVar	52,10	-0,80	44,40
G4 (G10 - PF) MW	250,00	250,00	250,00
G4 (G10 - PF) MVar	39,70	120,00	29,60
CER (MVar)	310,40	294,10	308,00
Tensão	0,965	0,969	0,965

* Máquina 4 controla tensão na barra 10

A operação da planta com o gerador convencional controlando a tensão na barra de alta, neste cenário, apresenta uma pequena melhora nas tensões das barras próximas aos centros de carga, apesar de não ser possível a manutenção da tensão na barra 10 no nível de 1,023 pu, como ocorre no cenário de carga leve. Adicionalmente, há um ligeiro alívio no ponto de operação do compensador estático da barra 9; entretanto, deve-se ressaltar que a ligeira melhora no perfil de tensões seria conseguida através de um custo elevado, que seria o esgotamento da capacidade de geração de potência reativa da máquina convencional, 120 Mvar, enquanto o *Powerformer* estaria injetando apenas 29,6 Mvar, distante ainda do ponto de máximo carregamento e, mais importante, estaria disponível para prover rápido suporte de potência reativa à rede em caso de contingências, como será analisado posteriormente no capítulo referente à análise dinâmica.

3.5.1 - Análise da curva PxV – cenário de carga leve

A figura 3.9 exemplifica que, com o controle de tensão na barra de alta realizado por um gerador convencional, conseguir-se-ia um ponto de operação intermediário aos dois casos até aqui analisados; o caso base, com um gerador convencional controlando sua tensão terminal, e o caso *Powerformer*.

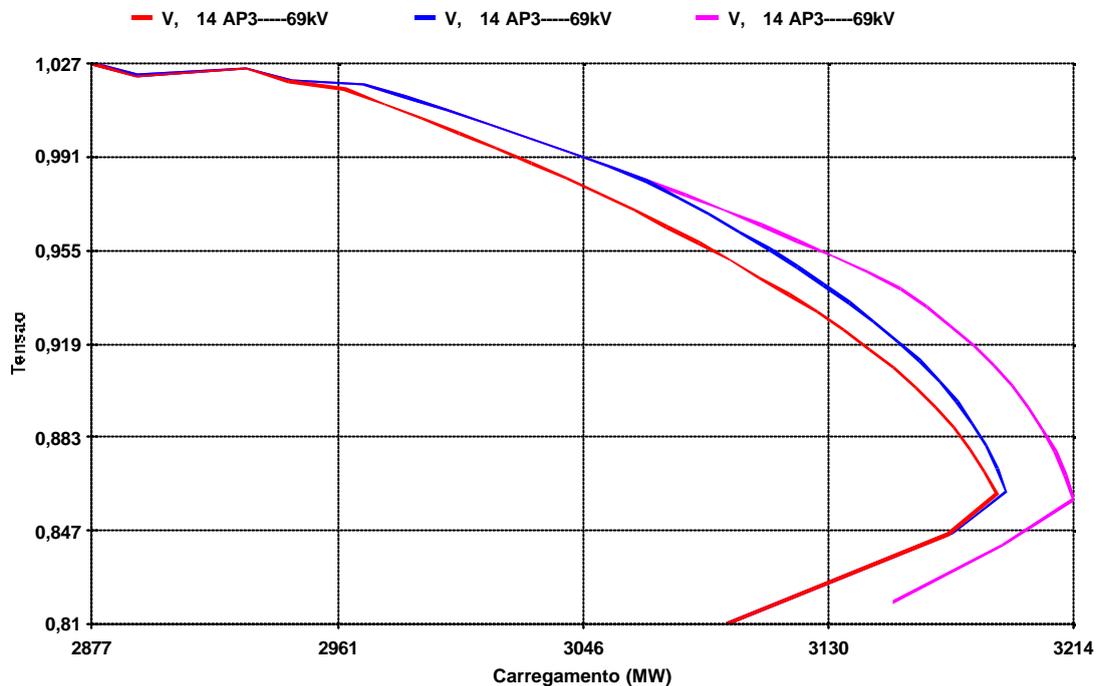


Figura 3.9 – Curva PxV contemplando o controle na barra de alta tensão por gerador convencional, no cenário de carga leve. Em vermelho, o caso base, em rosa, o caso *Powerformer* e em azul, o caso em que o gerador convencional controla a tensão na barra de alta.

No caso base, a tensão atinge 0,95 pu para uma carga de 3106,5 MW, no caso em que a máquina convencional controla a tensão na barra de alta; para o mesmo nível de tensão a carga chega a 3119 MW, enquanto que no caso *Powerformer* a tensão atinge este limite para o carregamento de 3143,4 MW, implicando, respectivamente, margens de estabilidade de 8%, 8,4% e 9,2%. A presença do transformador elevador na planta, em qualquer cenário, reduz a disponibilidade de potência reativa a ser injetada no sistema. Portanto a operação do *Powerformer* propiciará melhor suporte ao controle de tensão.

3.5.2 - Análise da curva PxV – cenário de carga pesada

Em carga pesada, como já mencionado, neste cenário, o perfil de tensão nas barras próximas ao centro de carga, inclusive a barra 14, seria um pouco melhor, porém a um custo elevado, que seria o esgotamento da capacidade de geração de potência reativa pela máquina convencional. Porém, partindo de um melhor nível de tensão, essa

configuração melhoraria a margem de estabilidade na barra 14, desde que fosse possível a sobreexcitação da máquina em um nível ainda maior, como mostra a figura 3.10 a seguir.

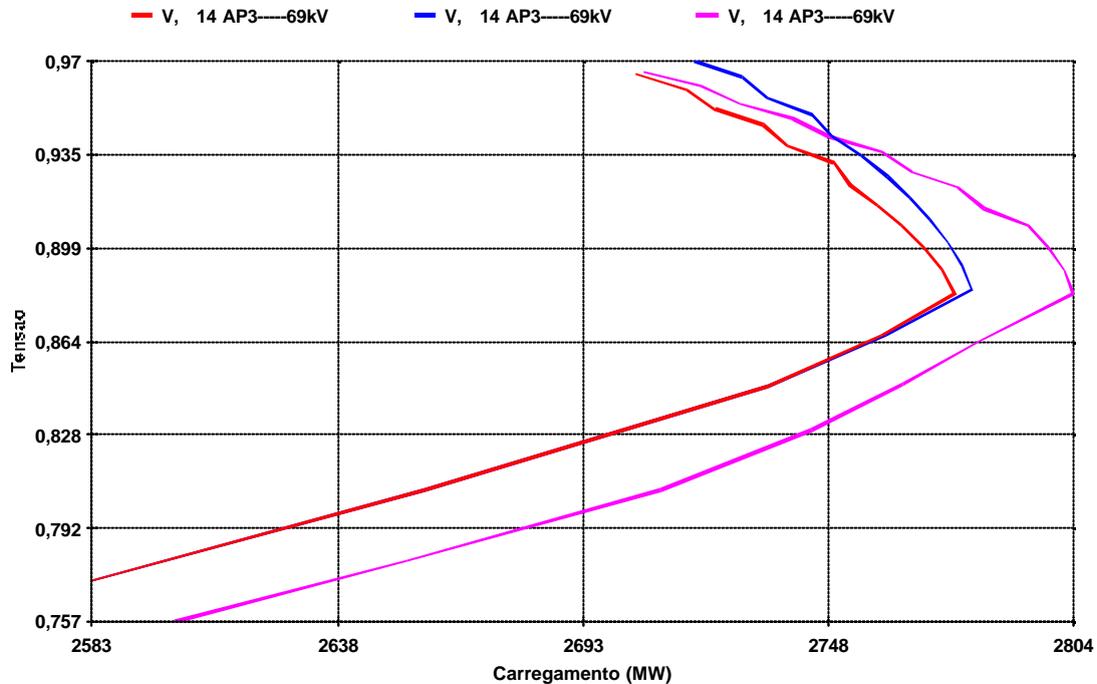


Figura 3.10 – Curva PxV contemplando o controle na barra de alta tensão por gerador convencional, no cenário de carga pesada. Em vermelho, o caso base, em rosa, o caso *Powerformer* e em azul, o caso em que o gerador convencional controla a tensão na barra de alta.

Conforme já mencionado, no caso base, a margem de estabilidade é de 0,65%; no caso *Powerformer*, esta é ligeiramente superior, de 0,76%, e, no caso em que o gerador convencional controla a tensão na barra de alta, a margem passa a ser de 0,97%. Na prática, porém, esta situação seria inviável porque configuraria esgotamento da capacidade de geração de potência reativa do gerador convencional.

Capítulo 4

Estudo de curto-circuito

4.1 – Considerações Gerais

A inserção do *Powerformer* em um sistema elétrico implica em mudanças nos componentes de seqüência do circuito, ressaltando-se a supressão do transformador elevador. A seguir, serão abordados os aspectos relativos ao aterramento dos geradores e a ligação de transformadores, além da simulação de contingências na planta nos dois casos, comparando-se o desempenho do sistema na operação com o gerador convencional e com o *Powerformer*.

4.2 - Aterramento de geradores

Geradores convencionais trabalham normalmente com o neutro aterrado através de alta impedância, com a finalidade de limitar as correntes de curto-circuito que envolvam a terra. O aterramento sólido do neutro do gerador propiciaria, em casos de curtos-circuitos envolvendo a terra, correntes muito altas, passíveis de causar danos aos enrolamentos da máquina. Por outro lado, a operação com neutro isolado também deve ser evitada, pois, se por um lado permitiria a continuidade da operação mesmo em caso de contato acidental de uma das fases com a terra, por outro permitiria a ocorrência de curtos-circuitos bifásicos francos, no caso em que uma outra fase entrasse em curto-circuito com a terra com uma delas já em contato.

Assim sendo, vários esquemas de aterramento podem ser utilizados, sendo que dois deles têm sido relatados como sendo os mais freqüentemente empregados (BASILESCO, TAYLOR, 1988):

- a) Neutro do gerador aterrado através de transformador de distribuição (alta resistência).

Este método utiliza apenas um transformador monofásico de distribuição ligado ao neutro do gerador, com tensão primária igual ou maior do que a tensão fase-neutro da máquina, e tensão secundária de 120 ou 240 volts, com um resistor conectado ao enrolamento secundário. Esse é um método de aterramento considerado de alta impedância; o transformador deve ter suficiente capacidade de sobretensão de forma que não ocorra saturação em caso de faltas fase-terra.

A figura 4.1 ilustra esse método.

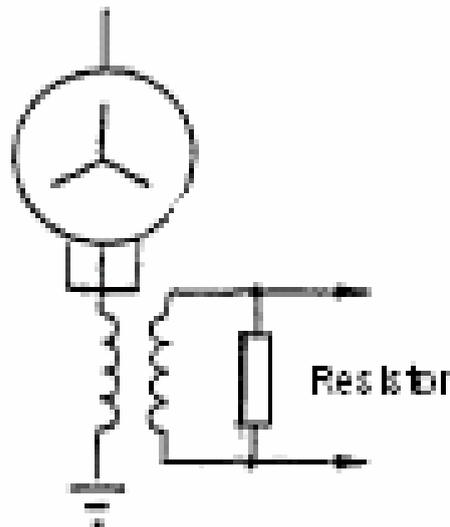


Figura 4.1 – Aterramento do neutro do gerador através de um transformador monofásico de distribuição (BASILESCO, TAYLOR, 1988).

b) Aterramento através de três transformadores monofásicos de distribuição

Este método utiliza três transformadores monofásicos, dimensionados tal como o método citado acima. Normalmente são empregados apenas quando o neutro do gerador não está disponível para conexão externa.

Os enrolamentos primários são ligados em estrela solidamente aterrada, enquanto que um resistor é conectado no secundário em delta aberto aterrado, também dimensionado como o método descrito acima.

A figura 4.2 a seguir ilustra esse método.

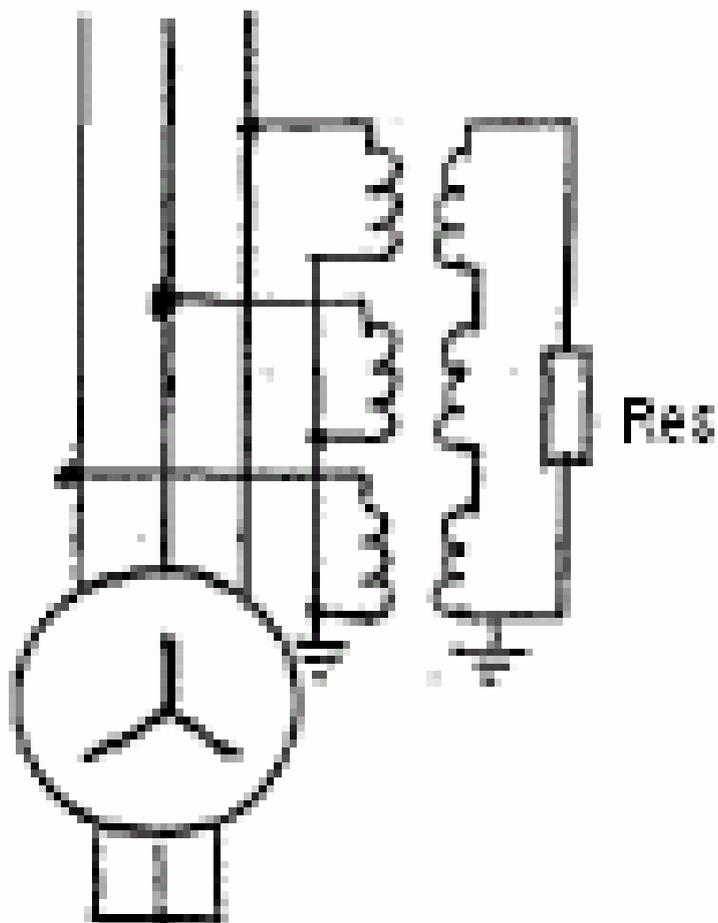


Figura 4.2 – Esquema para limitação de correntes de curto-circuito que envolvam a terra com resistor no enrolamento secundário dos transformadores (BASILESCO, TAYLOR, 1988).

Uma variação possível desse esquema é a ligação de um resistor aterrado no neutro dos enrolamentos primários dos transformadores, com o secundário em delta, em curto-circuito isolado (não aterrado).

A figura 4.3 ilustra esse método.

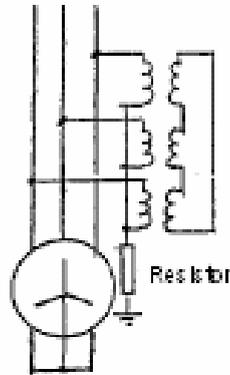


Figura 4.3 - Esquema para limitação de correntes de curto-circuito que envolvam a terra com resistor no enrolamento primário dos transformadores (BASILESCO, TAYLOR, 1988).

Esses três métodos são considerados como de alta impedância, com a finalidade de manter as possíveis correntes de curtos-circuitos que envolvam a terra em valores inferiores a 30 ampéres (BASILESCO, TAYLOR, 1988).

4.3 - Ligação de transformadores elevadores

Estes transformadores são normalmente utilizados com ligação delta no lado de baixa tensão e estrela aterrada, no lado de alta tensão, com a finalidade de evitar a circulação, no neutro do gerador, de corrente proveniente de faltas envolvendo a terra que ocorram na rede interligada, restringindo a exposição da máquina a esse tipo de falta apenas àquelas que ocorram no ramal de média tensão.

Estatisticamente, a maioria das faltas em sistemas elétricos é de natureza fase-terra; então, considerando-se a ligação Delta-Estrela do transformador elevador, estas faltas no lado de alta tensão do transformador são refletidas no gerador como faltas fase-fase, enquanto faltas fase-fase na rede de alta tensão são refletidas no gerador como faltas trifásicas assimétricas (STEVENSON, 1982).

Quanto ao esquema de ligação da estrela no lado de alta tensão, pode-se afirmar que o método mais freqüentemente utilizado é o do aterramento sólido do neutro (BASIESCO, TAYLOR, 1988).

Nesses casos, como esperado, a amplitude da corrente de seqüência zero pode atingir um valor muito alto, superando, inclusive, o nível das faltas trifásicas francas. Nessa ocorrência, outros métodos devem ser empregados para o controle da corrente de falta, sempre assegurado que o neutro da estrela esteja solidamente aterrado. Duas razões são decisivas para que esse método seja largamente utilizado; pelo aspecto técnico, atualmente, todas as redes de alta tensão trabalham solidamente aterradas; em outras palavras: os transformadores de potência utilizados ao longo das redes trabalham ligados em estrela-estrela aterrada nos dois lados. Esse esquema de ligação protege o enrolamento dos transformadores de sobretensões que acontecem freqüentemente, como, por exemplo, manobras de abertura de circuitos e ocorrência de descargas atmosféricas. O outro aspecto importante, a questão econômica, é consequência direta deste; quanto menor a exposição do enrolamento dos transformadores a sobretensões, menos complexos são o projeto e a construção desses equipamentos, tornando possível a simplificação na especificação do isolamento, com a utilização de menor quantidade de material, menor tamanho, menor custo de matéria prima, etc.

4.4 - Esquema de ligação do *Powerformer*

Como citado, a substituição de um gerador convencional e seu respectivo transformador elevador por um *Powerformer* altera significativamente os circuitos de seqüência da rede interligada.

Estando a máquina diretamente ligada na rede de alta tensão, torna-se desnecessário o aterramento do neutro do gerador, seja por nula, baixa ou alta impedância. Ao contrário de um gerador convencional, caso haja contato fase-terra em algum ponto do circuito, mesmo que seja no ramal da máquina, haverá o fechamento do circuito pelo neutro dos transformadores estrela-estrela aterrados na rede interligada, ou seja, não é necessário o fechamento do circuito através do neutro do *Powerformer*. Em suma, os curtos-circuitos fase-terra serão detectados pelo sistema de proteção da rede, independentemente de aterramento do neutro do *Powerformer*.

Na seqüência zero, havendo a eliminação do transformador elevador e o conseqüente aterramento da estrela, reduz-se a malha para a circulação das correntes de faltas que envolvam a terra na rede de alta tensão, ou seja, é de se esperar que haja uma redução na corrente de seqüência zero na operação de um *Powerformer*, em comparação a uma planta convencional.

Na seqüência positiva, nota-se a ausência da impedância representativa do transformador elevador, levando o analista a concluir que, em caso de curtos-circuitos trifásicos na rede de alta tensão, haverá aumento da corrente no ponto de falta em comparação a uma planta convencional.

Há ainda um outro fato importante a ser destacado no caso da operação do *Powerformer*, que é a ausência do efeito de transformação da corrente de falta, do lado de alta para o lado de média tensão do transformador. Para ilustrar esse fato, supõe-se a ocorrência de um curto circuito, equilibrado ou não, na barra de alta tensão de um transformador elevador em uma planta convencional. A elevada corrente de falta, no transformador, sofrerá o efeito da relação de transformação, tendo uma amplitude muito maior no lado dos enrolamentos dos geradores do que no lado de alta tensão.

No *Powerformer*, esse efeito de transformação evidentemente não ocorre; a máquina estará sujeita apenas à sua efetiva corrente de contribuição para o curto-circuito.

A figura 4.4 a seguir exemplifica os circuitos de seqüência positiva para uma planta convencional, à esquerda, e para uma planta em que um *Powerformer* substitui um gerador comum, à direita.

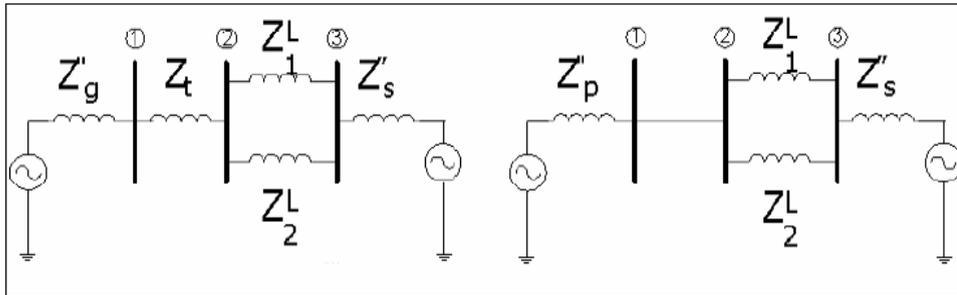


Figura 4.4 – Circuito de seqüência positiva de uma planta convencional (à esquerda), e de uma planta com *Powerformer* (à direita) (McDONALD, SAHA, 2001).

Extensivamente, a figura 4.5 representa os circuitos de seqüência zero para uma planta convencional, na parte superior, e para uma planta com *Powerformer* com neutro isolado, na parte inferior.

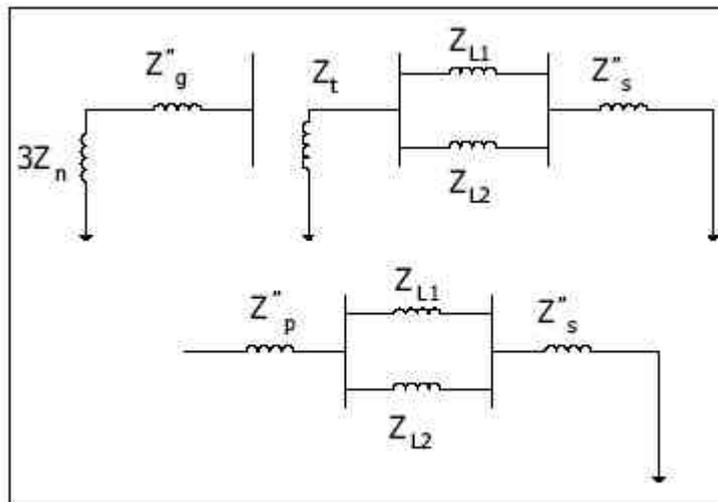


Figura 4.5 - Circuito de seqüência zero de uma planta convencional (acima), e de uma planta com *Powerformer* (abaixo) (McDONALD, SAHA, 2001).

4.5 - Modelagem do Sistema Teste

Para a realização de uma análise sob o ponto de vista conservativo, foram utilizadas tensões pré-faltas obtidas a partir do resultado do estudo de fluxo de potência.

As redes de seqüências positiva e negativa foram consideradas iguais, mas a rede de seqüência zero requereu criteriosa definição, de forma a representar adequadamente a topologia do sistema.

4.5.1 - Transformadores

Os transformadores elevadores das barras de geração foram modelados, para a utilização no programa ANAFAS (CEPEL, 1998), como descrito acima, ou seja, ligados em delta no lado de média tensão e estrela solidamente aterrada no lado de alta tensão.

Os transformadores de potência foram modelados como estrela solidamente aterrada em ambos os lados.

4.5.2 - Geradores

Os 4 geradores convencionais, excetuando-se o *Powerformer*, foram representados com neutro aterrado através de alta impedância puramente resistiva, dimensionada de forma a limitar as correntes de curto circuito monofásicas na média tensão em, no máximo, 30 ampéres, como citado anteriormente. O *Powerformer* foi representado com neutro isolado, como citado anteriormente.

A impedância de seqüência zero de uma máquina síncrona pode variar de 0,1 a 0,7 vezes o valor da seqüência positiva, dependendo da posição do rotor (LEIJON, SRIVASTAVA, et al, 2000). Para uma análise conservativa, foi considerado o menor valor.

4.5.3 - Linhas de Transmissão

Para as linhas de transmissão de circuito duplo, considerou-se a impedância de seqüência zero como sendo 5,5 vezes maior do que a de seqüência positiva (WEEDY, CORY, 1998).

Para linhas de transmissão de circuito simples, foi considerado que a impedância de seqüência zero é 3,5 vezes maior do que a de seqüência positiva (STEVENSON, 1982).

4.6 - Análise de Contingências

Na análise de curto-circuito, foi dada especial atenção à barra cuja máquina convencional será substituída por um *Powerformer*, assim como às barras e linhas de transmissão situadas eletricamente próximas. Assim sendo, foram simuladas faltas simétricas e assimétricas na barra 10, além de faltas na barra 4, para o caso base.

As seguintes contingências foram analisadas:

- Curto-circuito monofásico fase-terra franco na barra 4, da fase A para a terra.
- Curto-circuito monofásico fase-terra franco na barra 10, da fase A para a terra.
- Curto-circuito trifásico-terra franco na barra 10.

A tabela 4.1 a seguir mostra os resultados obtidos na simulação do programa ANAFAS.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos – análise de curto-circuito

CORRENTE NO PONTO DE FALTA	Curto 1F-N Barra 10	Curto 3F-N Barra 10	Curto 1F-N Barra 4
Caso base - Gerador Convencional			
Fase A (kA)	13,218	11,453	0,029
Fase B (kA)	0,000	11,453	0,000
Fase C (kA)	0,000	11,453	0,000
Caso Powerformer			
Fase A (kA)	12,650	13,426	NA
Fase B (kA)	0,000	13,426	NA
Fase C (kA)	0,000	13,426	NA
CONTRIBUIÇÃO DOS GERADORES			
Caso base - Gerador convencional			
Fase A (kA)	25,409	33,953	6,144
Fase B (kA)	19,289	33,953	6,122
Fase C (kA)	6,124	33,953	6,122
Caso Powerformer			
Fase A (kA)	3,012	4,900	NA
Fase B (kA)	0,899	4,900	NA
Fase C (kA)	2,116	4,900	NA

4.7 - Análise dos resultados

4.7.1 - Curto-circuito fase-terra na barra 10:

O caso base apresenta maior nível de curto-circuito no ponto de falta. Isso se deve ao aterramento da estrela do transformador elevador, que aumenta a malha disponível para a circulação da corrente de falta, ou seja, a impedância de seqüência zero equivalente do sistema, vista do ponto de falta, é menor do que no caso *Powerformer*, onde não há transformador solidamente aterrado, e o gerador opera isolado.

Quanto à contribuição dos geradores, devido ao efeito da transformação, a corrente no gerador convencional é muito mais elevada do que na configuração com o *Powerformer*.

4.7.2 - Curto circuito trifásico na barra 10:

Devido à ausência da reatância (impedância) do transformador elevador, a corrente no ponto de falta é maior no caso *Powerformer* do que no caso base. Entretanto, novamente devido ao efeito da transformação, a contribuição de corrente do gerador convencional é maior do que a do *Powerformer*.

4.7.3 - Curto circuito fase-terra na barra 4:

Esta contingência, válida somente para o caso base, ilustra apenas que, mesmo sob a limitação da corrente de curto-circuito no neutro do gerador em 29 ampéres, a contribuição do gerador convencional ultrapassa 6000 ampéres, valor superior à corrente no *Powerformer* sob curto-circuito trifásico franco em seus terminais: 4900 ampéres.

É possível afirmar que o *Powerformer* estará, em qualquer condição, exposto a menores correntes de curto-circuito do que um gerador convencional.

Capítulo 5

Análise em Regime Dinâmico – Estabilidade Eletromecânica

5.1 – Considerações Gerais

Técnicas baseadas em estudos de fluxo de potência têm sido normalmente utilizadas para a análise de fenômenos de estabilidade de tensão, como, por exemplo, as curvas $P \times V$ e $Q \times V$ analisadas no capítulo 3. Entretanto, essas técnicas são limitadas por não considerarem aspectos importantes como a dependência no tempo de ações de controle, exemplificando; a atuação dos reguladores de tensão e velocidade. Desta forma, o exame da dinâmica complementa e verifica os resultados obtidos em análises em regime permanente.

Nesse capítulo, será analisado o desempenho do sistema nas duas configurações sob a ótica da estabilidade eletromecânica, com especial atenção à modelagem dos limitadores de sobreexcitação. A maior tolerância do *Powerformer* a correntes excessivas no estator será modelada através de ajustes no modelo do limitador, como será detalhadamente descrito a seguir. Em seguida, serão definidas contingências no sistema que forcem as máquinas, nas duas configurações, a entrar em regime de sobreexcitação, quando então o desempenho dos limitadores será analisado.

5.2 - Modelagem das máquinas

A especificação técnica dos geradores, ou seja, o conhecimento dos modelos adotados em suas representações e valores de suas constantes constitui fator fundamental para a análise do sistema em regime dinâmico. Na seção anterior, foram descritos os parâmetros relativos aos geradores instalados nas barra de 1 a 4. Nas figuras 5.1 a 5.5 a seguir, há a representação de modelos tradicionalmente utilizados na

representação da máquina síncrona, úteis na representação dos geradores das quatro usinas.

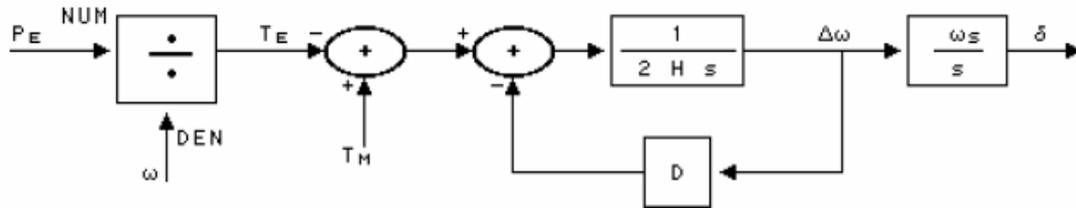


Figura 5.1 – Modelo clássico – diagrama para a equação de oscilação eletromecânica da máquina síncrona (CEPEL 2002).

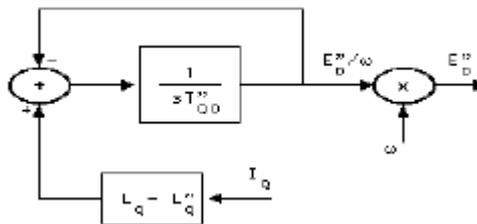


Figura 5.2 – Diagrama para as equações do eixo em quadratura – máquina de pólos salientes, barras 1 e 2 (CEPEL 2002).

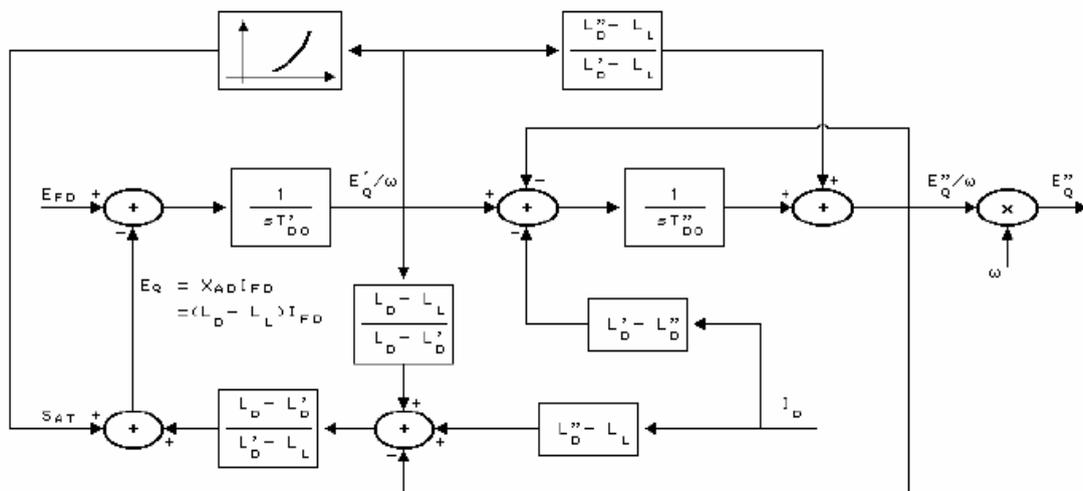


Figura 5.3 – Diagrama para as equações de eixo direto – máquina de pólos salientes, barras 1 e 2 (CEPEL 2002).

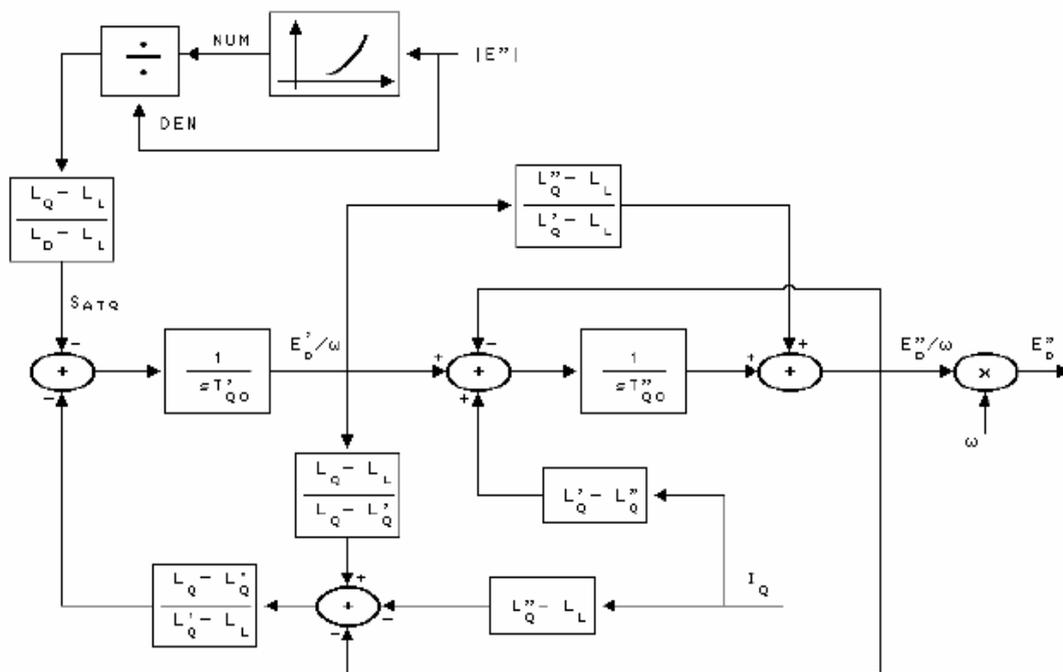


Figura 5.4 – Diagrama para as equações de eixo em quadratura – máquina de rotor liso, barras 3, 4 e 10 (caso *Powerformer*) (CEPEL 2002).

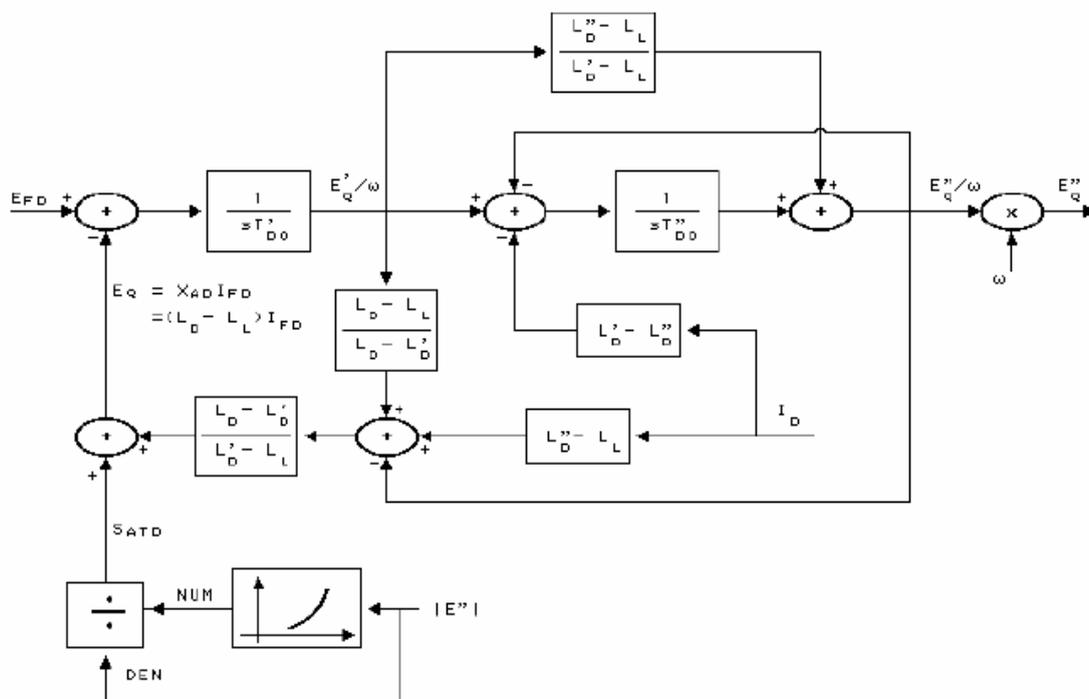


Figura 5.5 – Diagrama para as equações de eixo direto – máquina de rotor liso, barras 3, 4 e 10 (caso *Powerformer*) (CEPEL 2002).

5.3 - Reguladores de Tensão

A função básica dos reguladores de tensão é suprir o enrolamento de campo da máquina com tensão contínua para a geração de fluxo e excitação dos enrolamentos da armadura. Além disso, o regulador desempenha funções de controle e proteção do enrolamento, atuando de forma a manter a tensão terminal da máquina no nível desejado pelo operador (TAYLOR, 1994).

Dessa forma, é função do regulador controlar a tensão terminal da máquina e o fluxo de potência reativa, podendo, por exemplo, ser ajustado para que o gerador opere injetando ou absorvendo potência reativa da rede interligada, contribuindo para a manutenção da estabilidade do sistema (TAYLOR, C.W., MECHENBIER, JEFF R, et al, 1993).

A função de proteção do regulador atua de forma a garantir que os limites de capacidade da máquina e do sistema de excitação não sejam ultrapassados, como, por exemplo, os limites de sobre e subexcitação (KUNDUR, 1994).

O “*Institute of Electrical and Electronical Engineers*” (IEEE) define vários modelos de reguladores de tensão, cada um com características próprias, como, por exemplo, reguladores que atuam alimentados por fontes de tensão contínua ou alternada (IEEE, 1992).

No escopo deste trabalho, é necessária a definição de reguladores de tensão a serem utilizados nos geradores das barras de 1 a 4. Para um controle adequado, é conveniente que todas as máquinas conectadas a uma determinada barra tenham reguladores iguais, que atuem de forma sincronizada, com as mesmas constantes de tempo.

A interligação das máquinas aos respectivos transformadores elevadores se dá, nesse caso, de forma individualizada, ou seja, cada máquina está conectada separadamente a um transformador elevador, sendo que os respectivos reguladores de tensão atuam de forma a controlá-la em suas barras terminais, não tendo sido adotado, por questão de simplicidade, o esquema LDC (“*Line Drop Compensation*”). Esse

esquema, normalmente utilizado quando cada gerador é ligado individualmente a um transformador elevador, simula em geral a compensação de um terço a 50% da reatância do transformador, fazendo com que o ponto de monitoramento de tensão do regulador esteja mais próximo da barra de alta tensão do que em sua barra terminal. Ressalta-se que transformadores com mudança automática de “tap” sob carga não são, em geral, utilizados como transformadores elevadores, por aspectos de custo e confiabilidade do equipamento (TAYLOR, 2000).

5.4 - Operação de geradores de alta tensão em paralelo

No caso *Powerformer*, há a simulação de operação de apenas uma máquina na barra 10, de alta tensão. Entretanto, caso houvesse outras máquinas operando em paralelo, seria necessário um ajuste no controle dos reguladores de tensão de forma a assegurar-se que estes não estivessem monitorando a tensão em pontos superpostos no mesmo barramento, o que provocaria a troca de potência reativa entre as máquinas. Nesse caso, deveria ser considerada a adoção do esquema RDC – “*Reactive Droop Compensation*”, em que é simulada a inserção de uma reatância entre cada gerador e a barra de alta tensão, trazendo o ponto de controle de tensão para “dentro” da reatância síncrona do gerador (HURLEY, BIZE, et al, 1999).

Adicionalmente, é importante mencionar que, no caso da operação de geradores de alta tensão em paralelo, da mesma forma que na operação em paralelo de geradores convencionais (com transformadores elevadores individualizados ou não), seria necessária a adoção do esquema de Controle Secundário de Tensão (CST). Este esquema prevê o monitoramento da tensão na barra de alta da usina, com conseqüente atuação - retardada em relação ao controle primário - sobre os reguladores de tensão dos geradores, de forma a evitar a troca de potência reativa entre as máquinas operando em paralelo. Menciona-se que a terminologia “Controle Secundário de tensão”, em alguns países europeus, refere-se ao controle de tensão em barras de alta do sistema interligado; e não a barra de alta tensão da usina em questão (TAYLOR, 2000).

Para as máquinas conectadas às barras de 1 a 3, optou-se pela utilização do regulador de tensão definido na figura 5.6 a seguir, sem a definição de limitadores de sub e sobreexcitação.

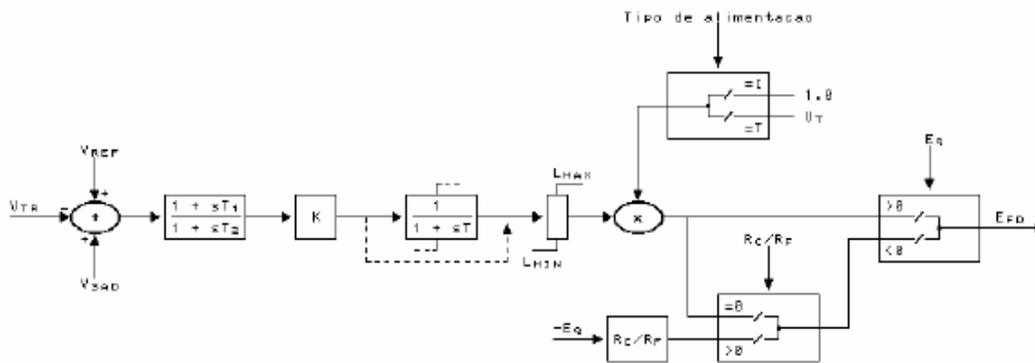


Figura 5.6 – Diagrama de equação para modelo de regulador de tensão utilizado nas máquinas instaladas nas barras de 1 a 3 (CEPEL 2002).

5.5 - Limitadores de sobreexcitação

A função dos limitadores de sobreexcitação é garantir que os enrolamentos do gerador não sejam danificados pelo sobreaquecimento causado por correntes excessivamente elevadas. Eles podem ser utilizados tanto na proteção do enrolamento do estator como também do rotor (MURDOCH, A., BOUKARIM, G.E., et al., 2001). A interação entre os dois limitadores é de suma importância para o desempenho adequado da máquina no contexto da estabilidade de tensão. Estudos anteriores (AUMULLER, SAHA, 2003a) indicam que a limitação da corrente do estator impacta de forma mais intensa na manutenção da estabilidade de tensão do que a limitação da corrente de rotor, ou seja, atrasar a atuação dos limitadores de corrente de armadura é extremamente benéfico para a manutenção da estabilidade de tensão.

É prática a utilização de limitadores de sobrecorrente para a proteção do enrolamento do rotor, enquanto que na armadura utiliza-se frequentemente a proteção pela instalação de relés de sobrecorrente, quando o dispositivo imediatamente desconecta o gerador da rede, em caso de detecção de corrente excessiva. Claramente, é possível afirmar que a utilização de limitadores de corrente, também na armadura, oferece uma maior possibilidade para a manutenção da estabilidade de tensão, já que os relés simplesmente desconectam a máquina da rede, enquanto que os limitadores agem mantendo-a conectada.

Ultimamente, tem-se notado, cada vez mais, a utilização de limitadores de sobrecorrente também no estator, ao invés da simples utilização de relés. Em projetos mais apurados, há a instalação dos dois dispositivos, seletivamente instalados, quando o relé é temporizado com maior atraso para atuar apenas em caso de falha do limitador (AUMULLER, SAHA, 2003a).

Há vários diferentes tipos de modelagem para limitadores de sobreexcitação (MUMMERT, 1999). O IEEE, assim como outras instituições, já abordou o tema extensamente (IEEE, 1995), oferecendo diversas referências. De maneira geral, pode-se definir dois tipos de limitadores: o tipo “*take over*” e o tipo “*soma*” (“*summed*”).

5.5.1 - Limitadores do tipo “*takeover*”:

Esses limitadores são também conhecidos como “*hard limiters*”; possuem alto ganho e precisam incorporar sinais de realimentação como, por exemplo, a tensão terminal da máquina, já que, quando atuam, o ramo de atuação direta do regulador de tensão não opera.

Na utilização desse limitador, o sinal de limitação de excitação “*Voel*” é injetado em um bloco de mínimo valor na saída da malha principal de controle do regulador de tensão, ou seja, sobrepondo-se a este caso haja uma excursão do sinal de saída da malha principal por valores elevados.

Durante a atuação desse limitador, o ramo direto de atuação do regulador de tensão geralmente encontra-se em estado de saturação. Assim sendo, ajustes devem ser feitos para que, cessada a atuação do limitador, o ramo direto de atuação do regulador de tensão volte a operar imediatamente, não sendo afetado pelo estado prévio de saturação. Isso deve ser garantido pela seleção adequada dos parâmetros de limitação na saída do regulador.

5.5.2 - Limitadores tipo “*summed*”:

Esses limitadores são também conhecidos como do tipo suave (“*soft*”), pois o regulador de tensão sente também o efeito das outras entradas na junção de soma do ramo principal.

Nesse caso, o sinal de limitação de excitação, “*Voel*”, é adicionado aos sinais de tensão terminal, ao sinal de estabilizador PSS e à tensão de referência na entrada da malha principal do regulador de tensão. O desempenho desse limitador depende do seu ganho e dos limites empregados; se o ganho for maior que 10 e os limites forem os mesmos do ramo principal do regulador de tensão, esse limitador atuará como se fosse do tipo “*takeover*”; caso contrário, será notada a influência das outras entradas no somatório do ramo direto do regulador de tensão.

Limitadores do tipo “soma” não requerem necessariamente a realimentação do sinal de tensão terminal, entretanto, este pode ser utilizado para prover um meio adicional de controle.

Os limitadores podem ainda ser classificados em duas categorias adicionais, de “tempo inverso” e de “tempo fixo”.

Os de “tempo fixo” atuam sem atraso na redução de excitação, a partir do momento em que detectam que as correntes do estator ou rotor ultrapassaram um valor de referência pré-determinado, enquanto que os de “tempo inverso” oferecem um controle mais avançado, onde a excitação não é reduzida de forma instantânea (IEEE, 1995).

No escopo deste trabalho, é necessário escolher a modelagem adequada de um dos tipos de limitadores para utilização da máquina na barra 4, e o correspondente caso de comparação com um *Powerformer* instalado na barra 10, assim como a escolha do modelo de regulador de tensão. Ambos devem ser modelados para utilização na ferramenta computacional ANATEM (CEPEL, 2002), escolhida para análise.

Optou-se por empregar um modelo de limitador do tipo “*summed*”, utilizado na ferramenta computacional PSS/E (AUMULLER, SAHA, 2003a), como também pela utilização do regulador de tensão tipo DC2A, definido na respectiva norma do IEEE

(IEEE 1992). Essa opção baseou-se em recomendação específica desse modelo de limitador para este modelo de regulador de tensão, conforme especificado em (AUMULLER, SAHA, 2003a) e (IEEE 1995).

Na figura 5.7 a seguir, é mostrado o modelo utilizado de limitador de sobreexcitação.

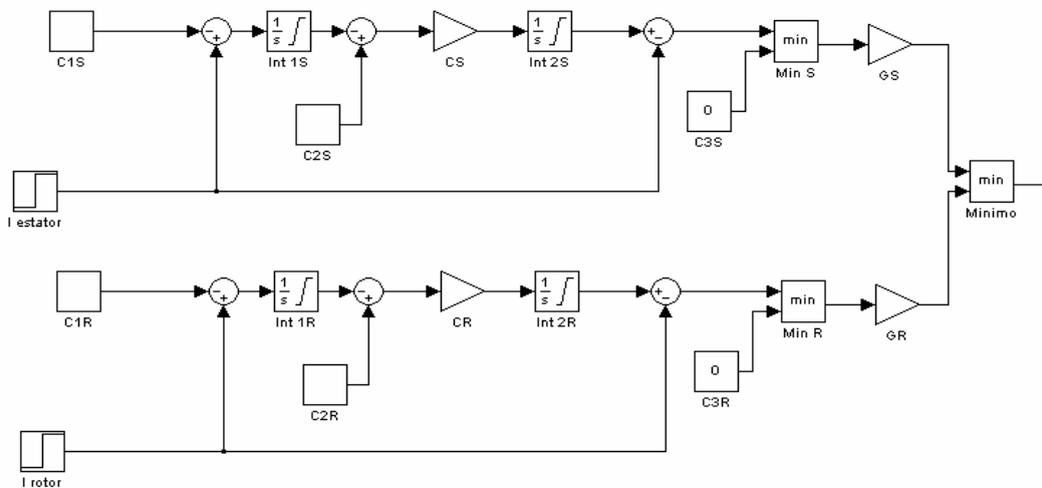


Figura 5.7 – Modelo de limitador tipo “soma” de tempo inverso.

Em seguida, na figura 5.8, é mostrado o modelo de regulador de tensão DC2A.

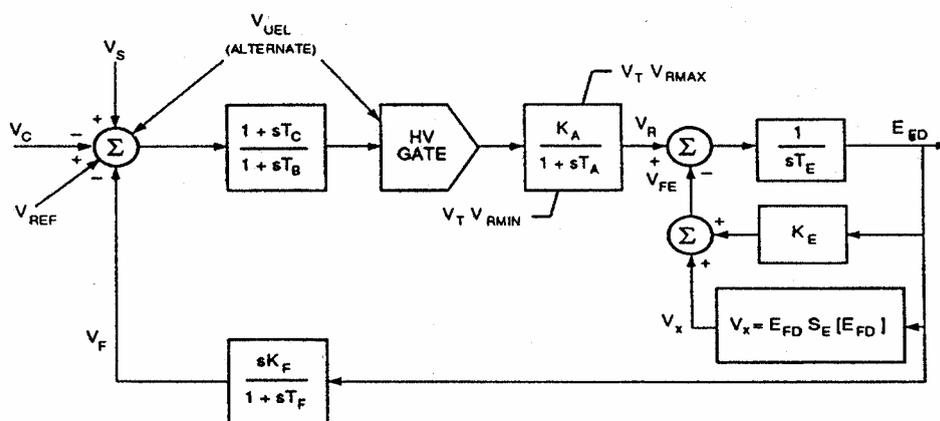


Figura 5.8 – Regulador de tensão DC2A (IEEE, 1992)

Para as simulações efetuadas neste estudo, em que foi utilizada a ferramenta computacional ANATEM (CEPEL 2002), os dois modelos acima foram implementados como do tipo “Controladores Definidos pelo Usuário” (CDU), que permite a correta integração destes ao modelo de máquina síncrona mostrado anteriormente.

Para atender às exigências da norma ANSI C50.13, citada no item 2.7 deste estudo, foram adotados, para um gerador convencional, os seguintes valores para as constantes do limitador de sobreexcitação (todos os valores em pu na base da máquina e fatores multiplicativos adimensionais) (AUMULLER, SAHA, 2003a):

Limite superior do integrador 1 = 2

Limite inferior do integrador 1 = 0

Limite superior do integrador 2 = 1,6

Limite inferior do integrador 2 = 1,05

C1S = C1R = 1,04

C2S = C2R = 1

CS = CR = 0,0275

GS = GR = 10

Há uma certa flexibilidade na definição do ganho das malhas (constantes GS e GR), sendo tarefa do projetista o ajuste apropriado das mesmas, de forma a garantir adequada proteção ao circuito de campo e ao enrolamento do estator, sem prejuízo da estabilidade de tensão do sistema. Em geral, um ganho igual a 10 para os dois circuitos mostra-se adequado, permitindo que o regulador ainda sinta a influência das outras entradas na junção de soma, evitando-se que o limitador tenha operação similar a um limitador do tipo “*take over*”.

Quanto às demais constantes e limites, geralmente utilizam-se os mesmos valores para os limitadores do estator e do rotor, o que significa dizer que a máquina, mesmo convencional, trabalha de forma conservativa quanto à limitação de corrente de estator, pois a tabela 2.1 revela que há mais tolerância para sobrecorrentes no estator do que no rotor. Ao contrário de outros modelos comumente utilizados, esse controlador não atua de forma instantânea na redução da excitação, a não ser quando a corrente ultrapassa o limite de 1,6 pu.

Se a corrente de estator ou rotor estiver acima do valor da constante C1S ou C1R, respectivamente, o primeiro integrador atua, fazendo uma rampa positiva que parte do valor inicial zero. Quando a saída deste integrador atinge valor superior ao da constante C2S para a malha do estator, ou C2R para a malha do rotor, o segundo integrador atua fazendo uma rampa negativa com inclinação dada pela constante CS para a malha do estator, ou CR para a malha do rotor. Quando a saída desse integrador se tornar inferior ao módulo da respectiva corrente, a saída da junção de soma se tornará negativa, passando pelos blocos de mínimo valor, que permite apenas a passagem de valores negativos; e de ganho, juntando-se depois à malha principal do regulador de tensão através de sua junção de soma. É importante notar que, se o sinal das correntes de estator ou rotor for superior a 1,6 pu, a saída se tornará imediatamente negativa, sem atraso, e a excitação será reduzida.

Para que esse modelo seja adequado à maior capacidade de sobrecorrente do *Powerformer*, mostrados na tabela 2.2, os valores adotados no modelo para o limitador do estator devem ser alterados para estes mencionados a seguir (AUMULLER, SAHA, 2003a):

Limite superior do integrador 1 = 240

Limite superior do integrador 2 = 2,0

C2S = 239

CS = 0,0015

Nota-se que o fator multiplicativo CS, para o *Powerformer*, é inferior ao caso do gerador convencional; esse valor menor atenuará a inclinação da rampa do integrador, aumentando o intervalo de tempo necessário para que a soma com o sinal de corrente se torne negativa, causando o disparo da atuação do limitador.

Esses novos limites proporcionarão ao *Powerformer* a adequação à curva mostrada na figura 2.5, fazendo valer a maior capacidade de sobrecarga temporária do enrolamento do estator da máquina.

Limitadores de subexcitação também são normalmente utilizados, em conjunto com os de sobreexcitação. A principal função desses limitadores é garantir um nível mínimo de excitação na máquina que não permita uma redução significativa no torque sincronizante, o que potencialmente pode comprometer a estabilidade do sistema. Além disso, têm também a função de retardar a atuação dos relés de perda de excitação (IEEE, 1995) (BERUBE, HAJAGOS, et al, 1995). Nesse trabalho, entretanto, por questões de simplicidade, não foi considerada a atuação desses limitadores.

5.6 - O fenômeno do colapso de tensão

Após a ocorrência de uma contingência no sistema, em que se configure restrição ao adequado nível de potência reativa requerido pela planta, os reguladores de tensão das máquinas entram em regime de sobreexcitação, o que, a princípio, permitiria a continuidade ao suporte de tensão, com fornecimento de potência reativa em nível superior ao de regime contínuo.

Entretanto, essa capacidade é limitada no tempo, de acordo com a capacidade de sobrecorrente do enrolamento de campo. Conseqüentemente, passado um intervalo de tempo pré-definido pelo limitador de sobreexcitação, o sinal de tensão de campo passa a ser limitado, não sendo mais possível regular adequadamente a tensão terminal das máquinas e dar o suporte adequado ao fornecimento de potência reativa ao sistema.

Considerando-se a presença na planta de cargas com característica do tipo “potência constante”, e conseqüentemente não havendo então redução na demanda de energia ativa, à medida que a tensão terminal das máquinas se reduz, há a elevação da corrente do estator, caracterizando um cenário de sobrecarga. Inevitavelmente, o relé de sobrecorrente da armadura irá atuar, desligando o gerador do sistema (TAYLOR, TESEMA, 2002).

Por outro lado, como mencionado, pode ser utilizada uma concepção para o limitador de sobreexcitação que leve em consideração também a sobrecarga da corrente de armadura, para atuação temporizada antes da atuação do relé de sobrecorrente, permitindo um maior retardo na programação deste, com a finalidade de manter a máquina em serviço por um maior intervalo de tempo, possivelmente permitindo ao

operador da planta a tomada de decisões em tempo hábil para que não ocorra o desligamento do gerador pelo relé de sobrecorrente.

5.7 - Cenário – Colapso de tensão no Sistema Teste

Para uma análise adequada do modelo de limitador de sobreexcitação, é necessária a criação de contingências no sistema que se destinem a acentuar a injeção de potência reativa na planta pelo gerador convencional instalado na barra 4, no caso base, ou do *Powerformer* na barra 10.

Em cenário de carga leve, as máquinas, nos dois casos, trabalham absorvendo potência reativa, subexcitadas, enquanto que no cenário de carga pesada estas já partem do regime de sobreexcitação.

Em qualquer dos cenários de carga, serão definidas situações que levem as máquinas ao sistema de sobreexcitação, no cenário de carga leve, ou que apenas acentuem a injeção de potência reativa no sistema, no cenário de carga pesada.

Para simulação dessas situações, duas contingências na planta foram consideradas, a saber:

a) Curto-circuito monofásico através de impedância indutiva na barra 10, em cenário de carga leve, sem eliminação da falta. Esta contingência provocará a entrada das máquinas das barras 3 e 4 (ou 10, no caso *Powerformer*) em regime de sobreexcitação, de forma a atender a demanda adicional de potência reativa.

b) Curto circuito trifásico franco na barra terminal da terceira usina por 150 ms, seguido da eliminação da falta e da perda das unidades geradoras dessa barra em cenário de carga pesada, o que levará a máquina instalada na usina vizinha, 4 ou 10, a elevar a injeção de potência reativa na planta, de forma a compensar a perda de potência reativa até então suprida pelas máquinas da terceira usina.

A seguir, esses casos serão analisados criteriosamente.

5.7.1- Curto-circuito monofásico através de impedância indutiva na barra 10, em cenário de carga leve, sem eliminação da falta.

As figuras 5.9 e 5.10 a seguir representam esta situação para os casos base e *Powerformer*.

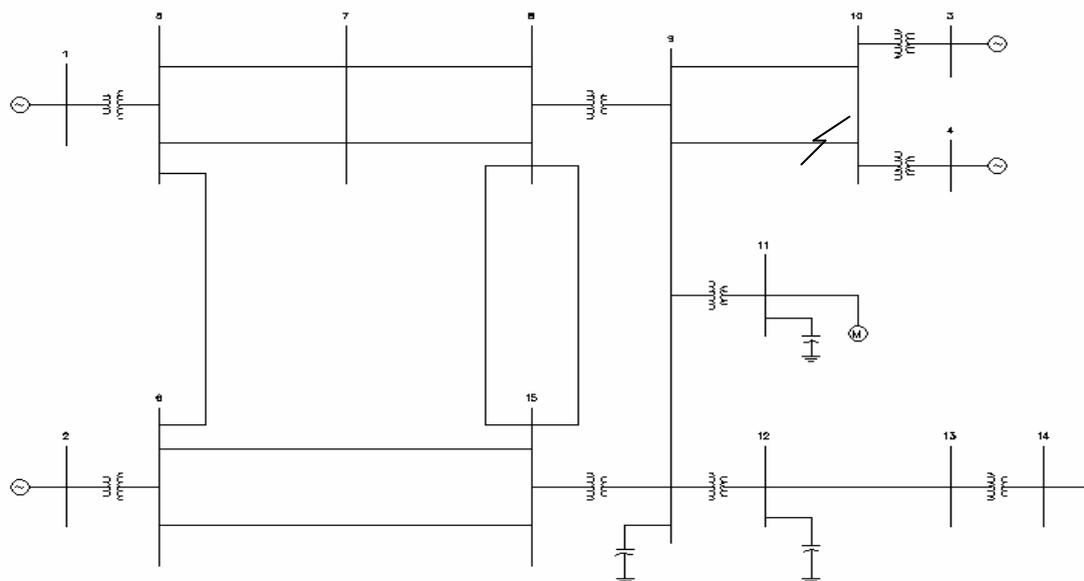


Figura 5.9 – Sistema teste em carga leve, caso base, curto-circuito monofásico na barra 10.

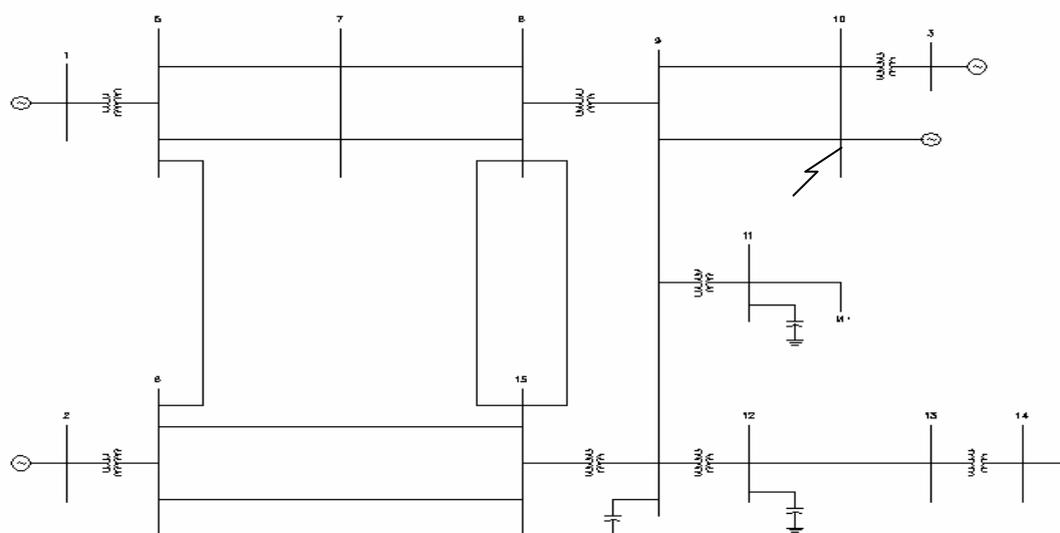


Figura 5.10 – Sistema teste em carga leve, caso *Powerformer*, curto-circuito monofásico na barra 10.

5.7.1.1 - Desempenho do sistema sem atuação do limitador de sobreexcitação

Inicialmente, para um melhor efeito comparativo, analisar-se-á a estabilidade de tensão no sistema desconsiderando-se a atuação do limitador de sobreexcitação, tanto da máquina na barra 4 no caso base, como da máquina na barra 10 no caso *Powerformer*.

A figura 5.11 mostra a tensão e corrente de campo do gerador na barra 4 no caso base.

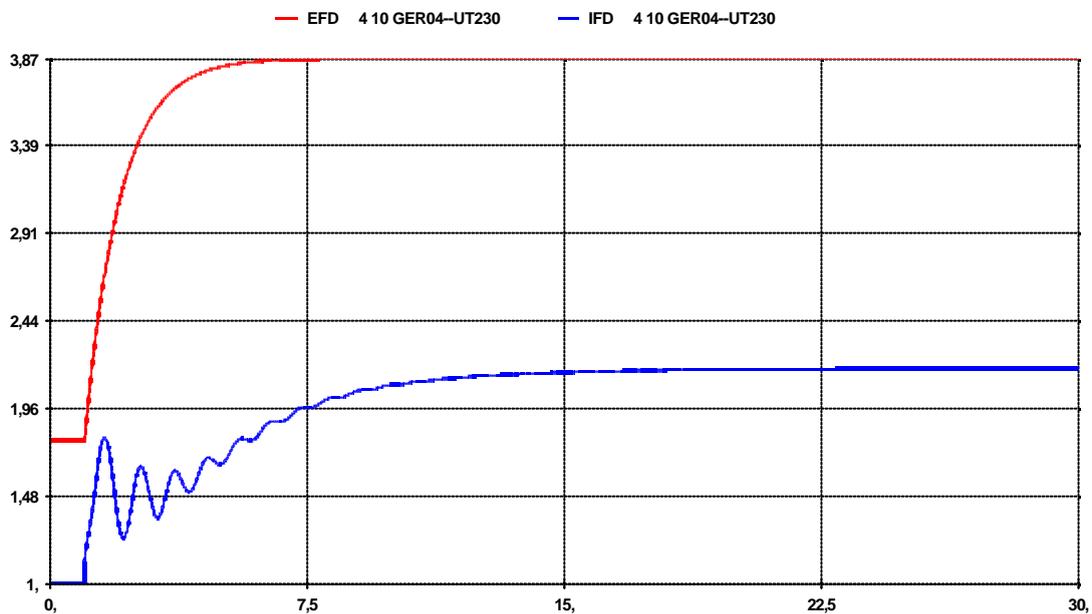


Figura 5.11 – Sinais de tensão (em vermelho) e corrente de campo (em azul) no gerador da barra 4, sem atuação do limitador de sobreexcitação.

Em seguida, na figura 5.12, a tensão na barra 10, ainda no caso base.

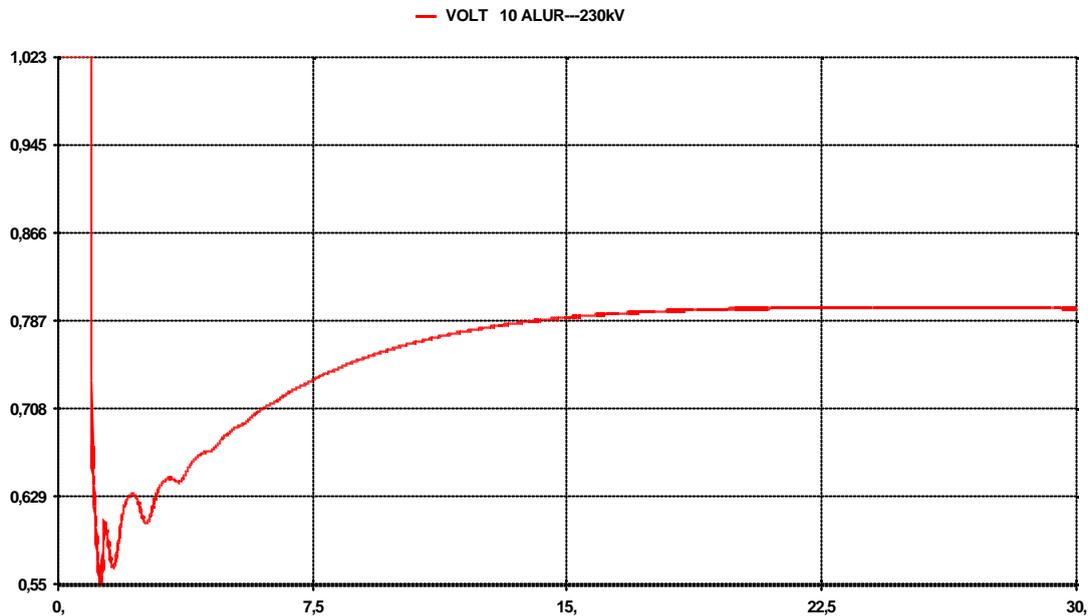


Figura 5.12 – Tensão na barra 10 sem atuação do limitador de sobreexcitação.

A análise das figuras acima revela que, no caso base, haveria estabilidade de tensão na barra 10, embora em um nível proibitivo, por demais reduzido, em torno de 0,8 pu. Deve-se ressaltar também o valor estabilizado da corrente de campo em 2,2 pu, o que caracterizaria dano ao enrolamento.

A figura 5.13 mostra a tensão e corrente de campo do gerador na barra 10, caso *Powerformer*.

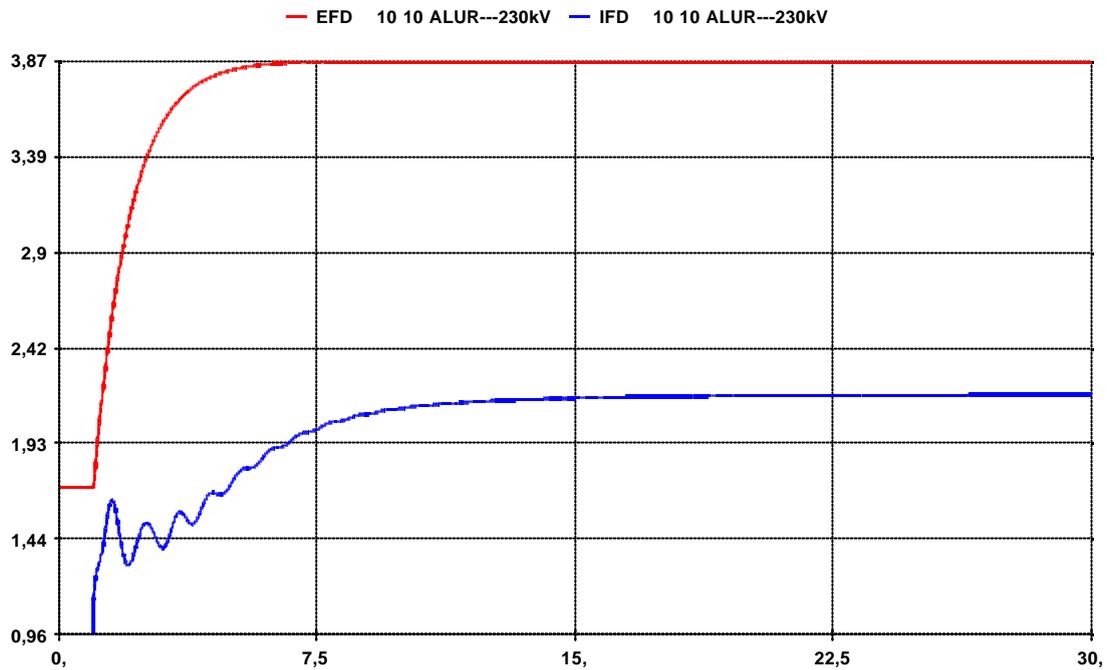


Figura 5.13 – Sinais de tensão (em vermelho) e corrente de campo (em azul) no gerador da barra 10, caso *Powerformer*, sem atuação do limitador de sobreexcitação.

A figura 5.14 mostra a tensão na barra 10, ainda no caso *Powerformer*.

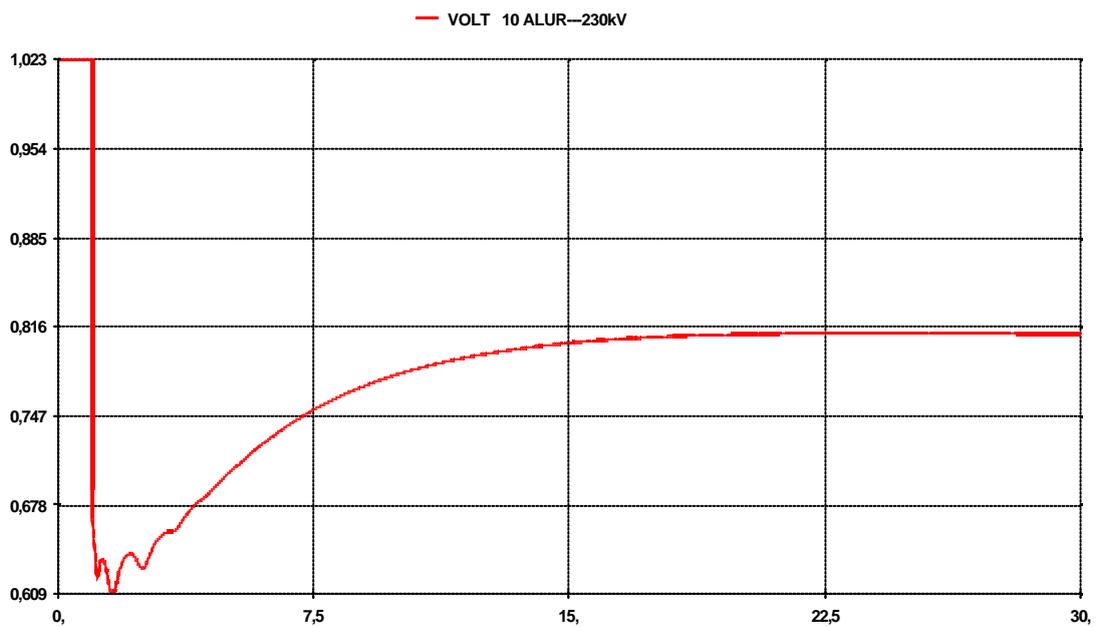


Figura 5.14 – Tensão na barra 10, caso *Powerformer*, sem atuação do limitador de sobreexcitação

A análise das figuras 5.13 e 5.14 revela que, no caso *Powerformer*, a situação é idêntica à do caso base. Conclui-se então que é necessário considerar a atuação do limitador de sobreexcitação.

5.7.1.2 – Desempenho do sistema considerando a atuação do limitador de sobreexcitação

A figura 5.15 mostra a tensão na barra 10, considerando a atuação do limitador de sobreexcitação:

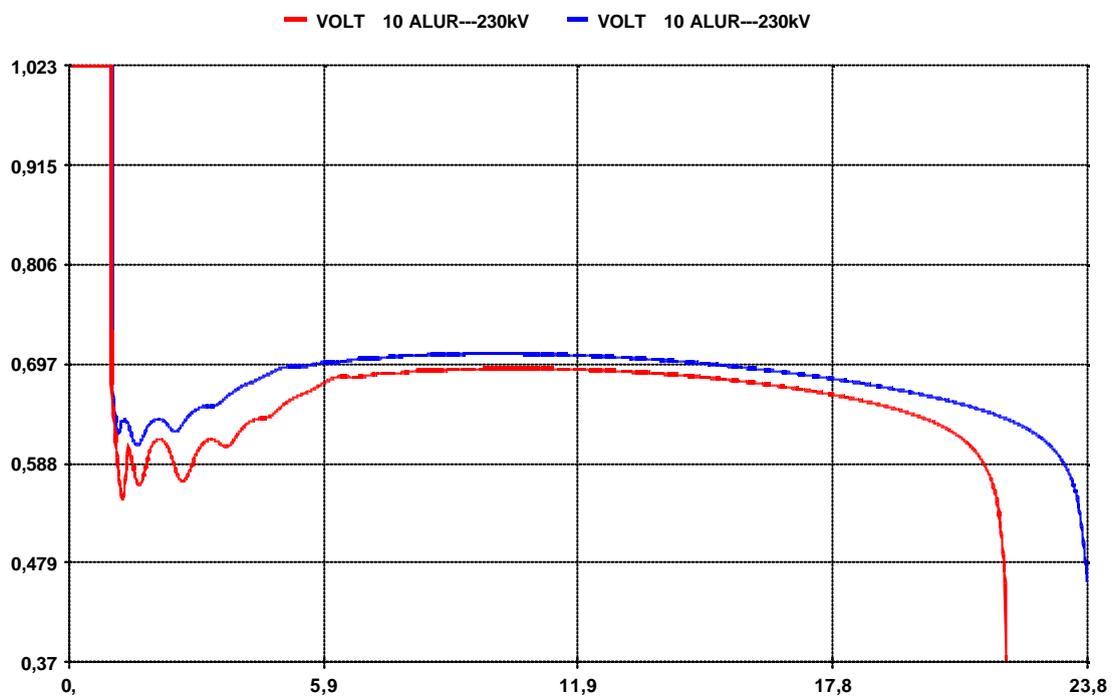


Figura 5.15 – Tensão terminal nas máquinas. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A atuação do limitador de sobreexcitação para atenuar a tensão de campo desestabiliza o sistema em ambos os casos; assim sendo, analisar-se-á criteriosamente a seqüência de eventos que provocam a atuação do limitador.

As figuras 5.16 e 5.17 mostram as oscilações nas correntes de estator e campo.

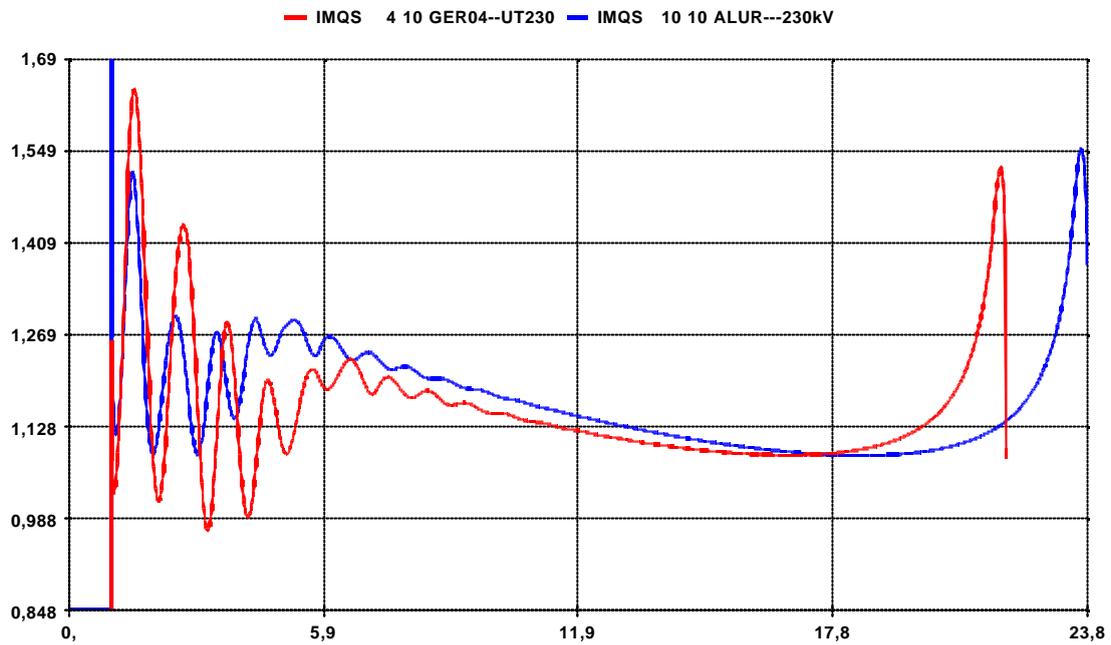


Figura 5.16 – Correntes no estator. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

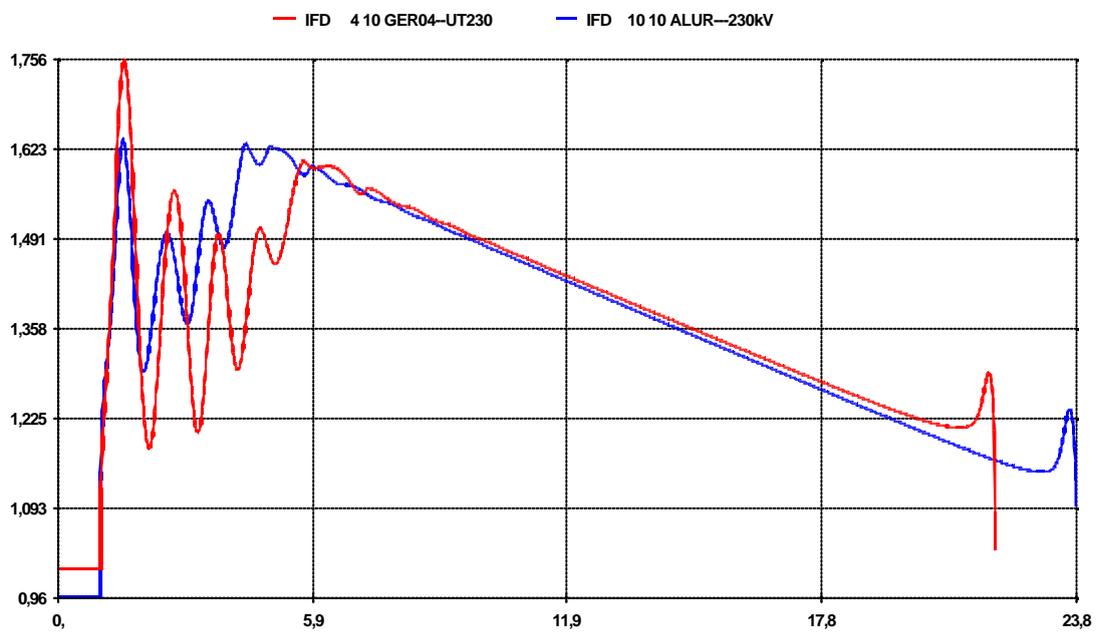


Figura 5.17 – Correntes de campo. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A análise do modelo do limitador de sobreexcitação revela que as elevações, acima de valores pré-definidos, em quaisquer dessas correntes, pode ativar o disparo do sinal de limitação, tanto na função temporizada como na instantânea.

Na comparação entre o *Powerformer* e uma máquina convencional, é particularmente importante destacar a sua maior capacidade de suportar sobrecarga no estator por longos períodos de tempo, da ordem de minutos. Dessa forma, inicialmente, é interessante analisar-se a possível atuação da função temporizada do limitador em comparação com sua atuação em uma máquina convencional. A análise do modelo utilizado, representado na figura 5.7, revela que o disparo da temporização para restrição na excitação da máquina se dá quando o sinal de saída do primeiro integrador supera, em módulo, o valor das constantes C2S ou C2R, fazendo com que a saída da segunda junção de soma passe a excursionar por valores negativos.

A figura 5.18 a seguir mostra, em superposição, nos casos base e *Powerformer*, o sinal na saída dessa junção para a malha de controle da corrente de campo.

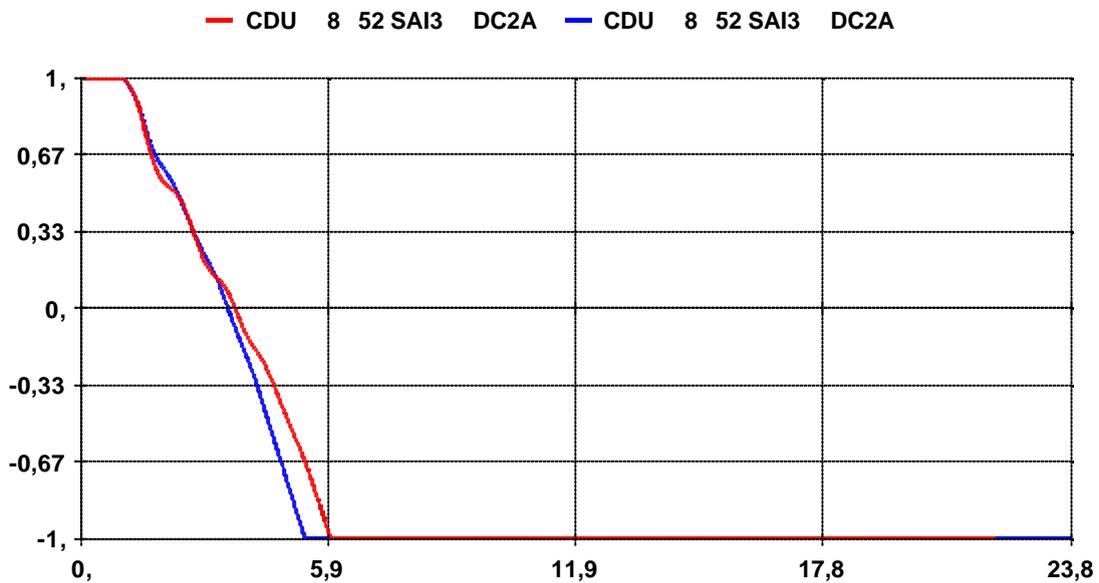


Figura 5.18 – Sinal na saída da segunda junção de soma do limitador – malha corrente de campo. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

No caso *Powerformer*, motivado pela maior corrente de campo, o sinal para disparo da atuação temporizada do limitador ocorre no instante $t = 3,53$ segundos, enquanto que no caso base, o disparo ocorre no instante $t = 3,71$ segundos.

Em seguida, na figura 5.19 em quadros individualizados, respectivamente, para os casos base e *Powerformer*, o sinal na saída da segunda junção somatória do limitador para a malha da corrente de estator:

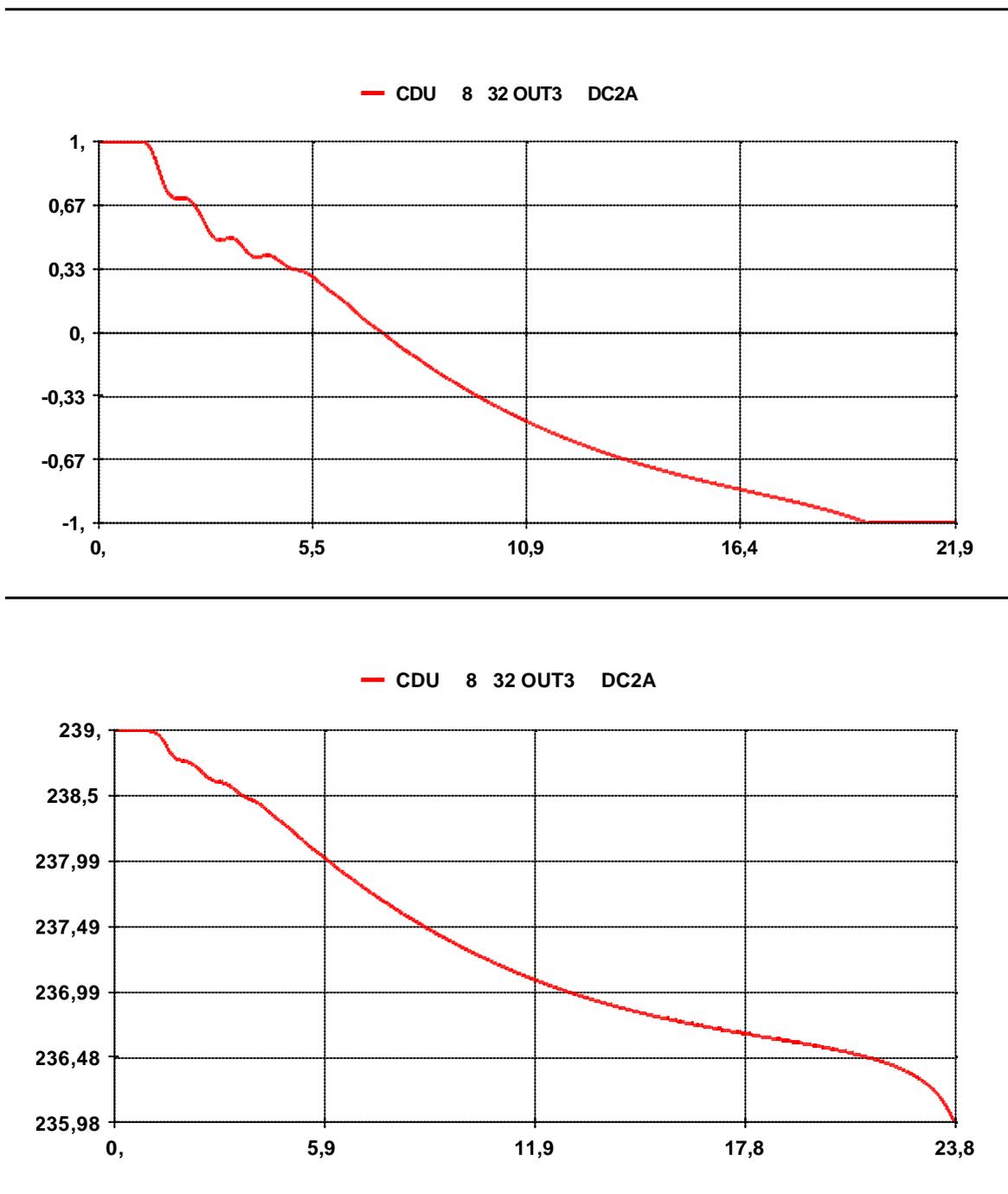


Figura 5.19 – Sinal na saída da segunda junção de soma do limitador – malha corrente de estator.

No caso base, o disparo para atuação do limitador provocado pela corrente de estator ocorre no instante $t = 7,24$ segundos, enquanto que no caso *Powerformer*, em virtude de o fator multiplicativo do segundo integrador ser muito menor, a corrente de armadura não é suficientemente elevada a ponto de provocar o disparo da função temporizada do limitador.

Novamente em relação ao circuito de controle de corrente de campo, após os instantes $t = 3,53$ segundos e $3,71$ segundos, o segundo integrador da malha de controle do limitador entra em rampa negativa, com taxa definida pelo fator multiplicativo “C”, que é igual a $0,025$, nos dois casos. Entretanto, o efetivo disparo e a atuação da limitação de tensão de campo apenas ocorrerá quando o sinal de saída do segundo integrador for inferior, em módulo, aos valores de corrente de campo ou armadura nos respectivos controladores, provocando a excursão por valores negativos do sinal na saída na terceira junção de soma. A figura 5.20 mostra, em quadros individualizados para os dois casos, os instantes de tempo em que esta situação ocorre.

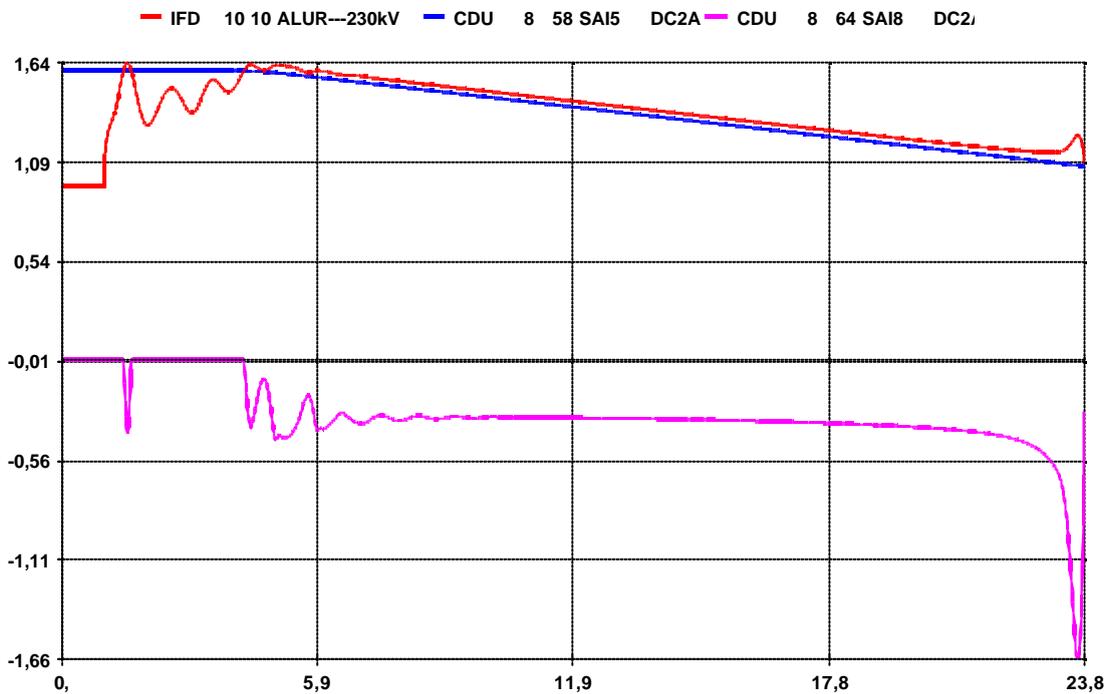
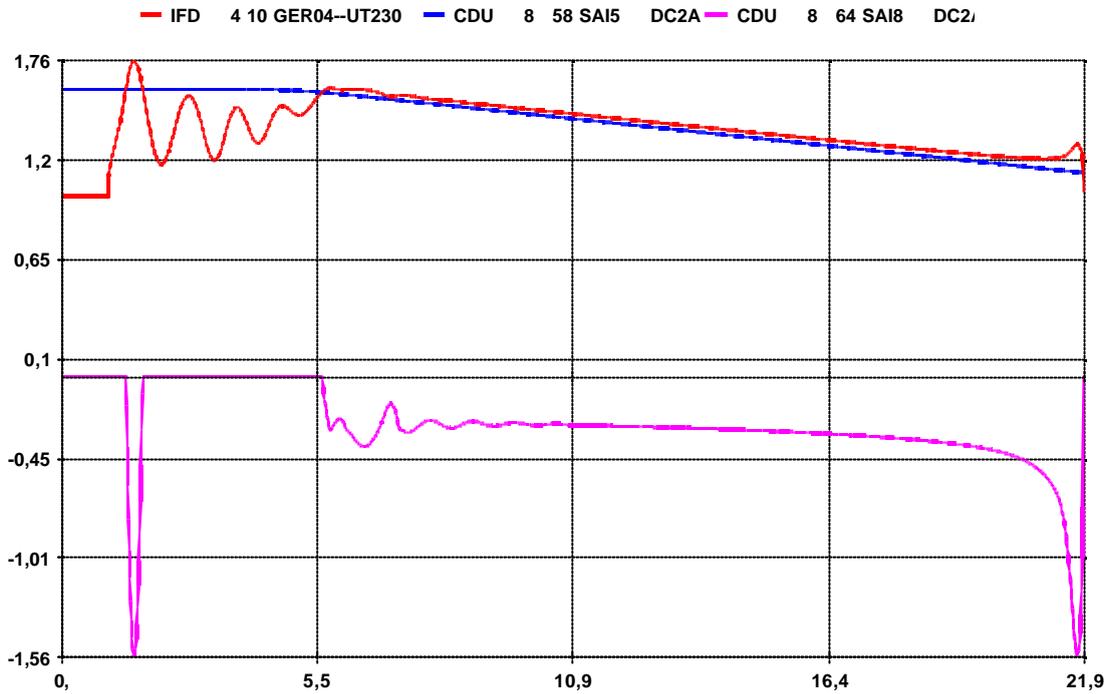


Figura 5.20 – Disparo do limitador de sobreexcitação pela corrente de campo. Em vermelho, o sinal da corrente de campo; em azul, o sinal na saída do segundo integrador e, em rosa, o somatório de ambos limitado a valores negativos.

Cessada a oscilação transitória inicial, analisa-se o momento em que ocorre o efetivo disparo, através da atuação temporizada do limitador, pela corrente de campo, da limitação na excitação das máquinas.

No caso base, o disparo ocorre em $t = 5,57$ segundos, enquanto que no caso *Powerformer* ocorre em $t = 4,24$ segundos. Como esperado, esses instantes de tempo apenas refletem os instantes em que a saída do sinal na segunda junção de soma passou a ser negativa, os quais já foram mostrados anteriormente.

Devido ao maior valor da corrente de campo, a ativação do sinal do limitador dá-se primeiro no *Powerformer*, o que revela, a princípio, que não é vantajosa a utilização de rotores de máquinas convencionais de potência similar nesse tipo de gerador.

Por outro lado, quando a análise recai sobre a malha de controle referente às correntes de estator, espera-se que, ao contrário de uma máquina convencional de potência similar, não haja, no *Powerformer*, elevação de corrente suficiente para sequer ativar o disparo da função temporizada de limitação. De fato, a figura 5.21 a seguir mostra que, no *Powerformer*, o sinal na saída do segundo integrador não entra em rampa negativa, enquanto na máquina convencional é perceptível a atenuação (inclinação negativa) no sinal de saída do segundo integrador, embora não seja suficiente para que ocorra a ativação da função temporizada - a intersecção de curvas no final do gráfico, que significaria a princípio a ativação da temporização, é na realidade já o retrato da instabilidade angular da planta, quando a tensão entra em colapso; e o ângulo de carga e a corrente de estator disparam.

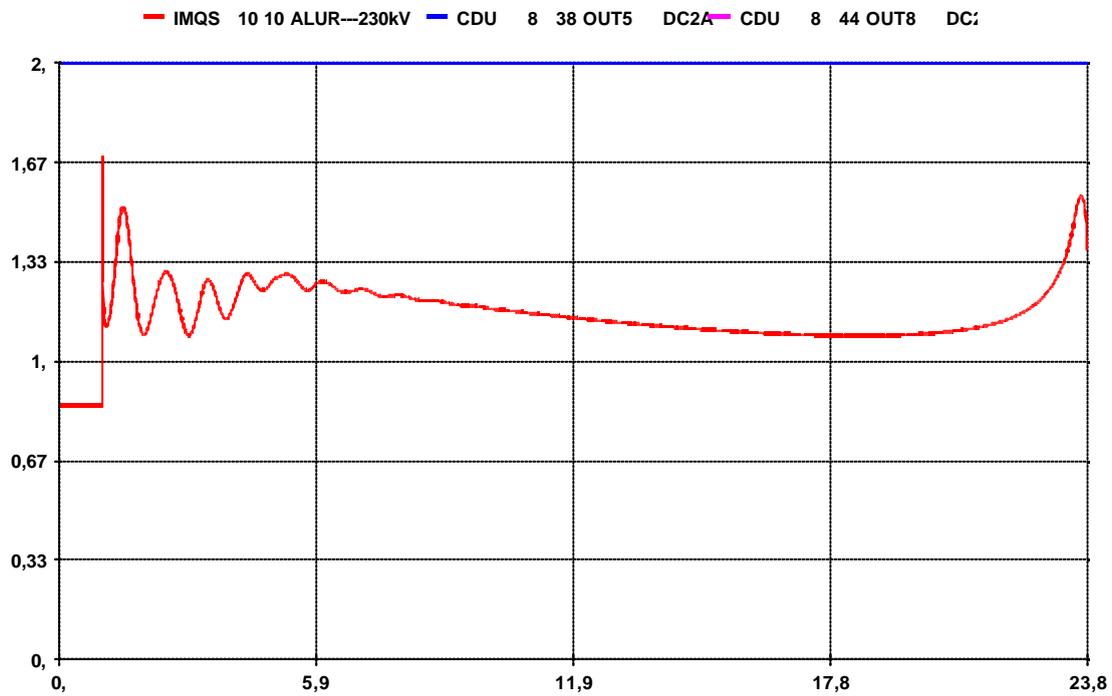
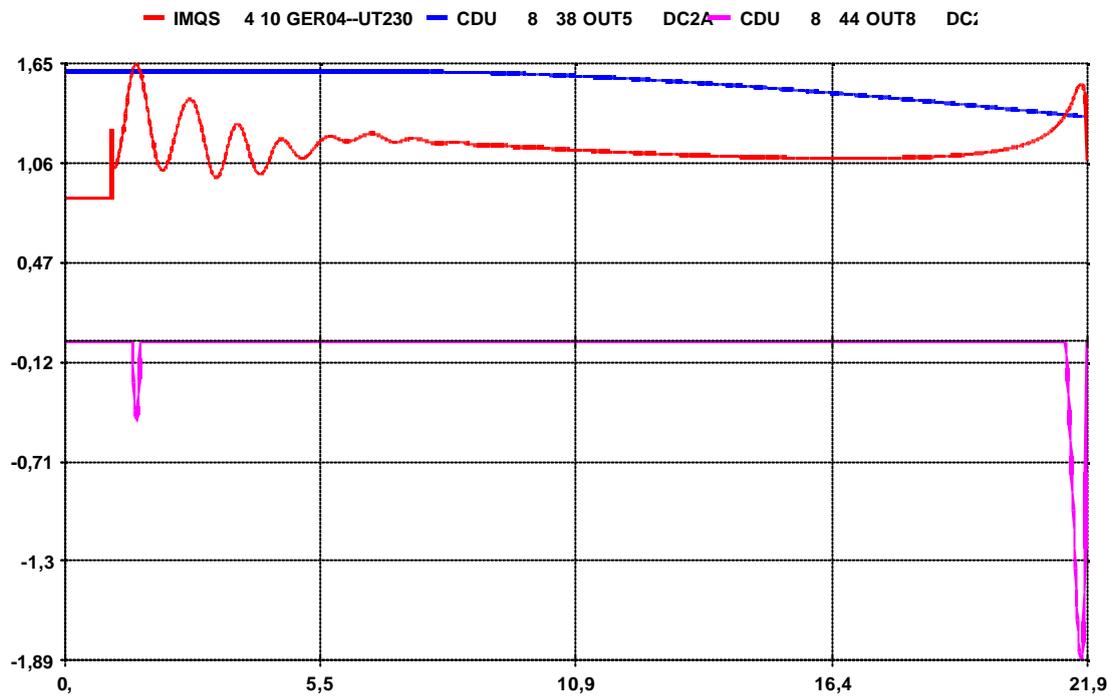


Figura 5.21 - Disparo do limitador de sobreexcitação pela corrente de estator. Em vermelho, o sinal da corrente de estator; em azul, o sinal na saída do segundo integrador e, em rosa, o somatório de ambos limitado a valores negativos.

Na figura 5.22, para os dois casos, a superposição dos sinais de limitação de sobreexcitação provocados pelos circuitos de rotor e estator.

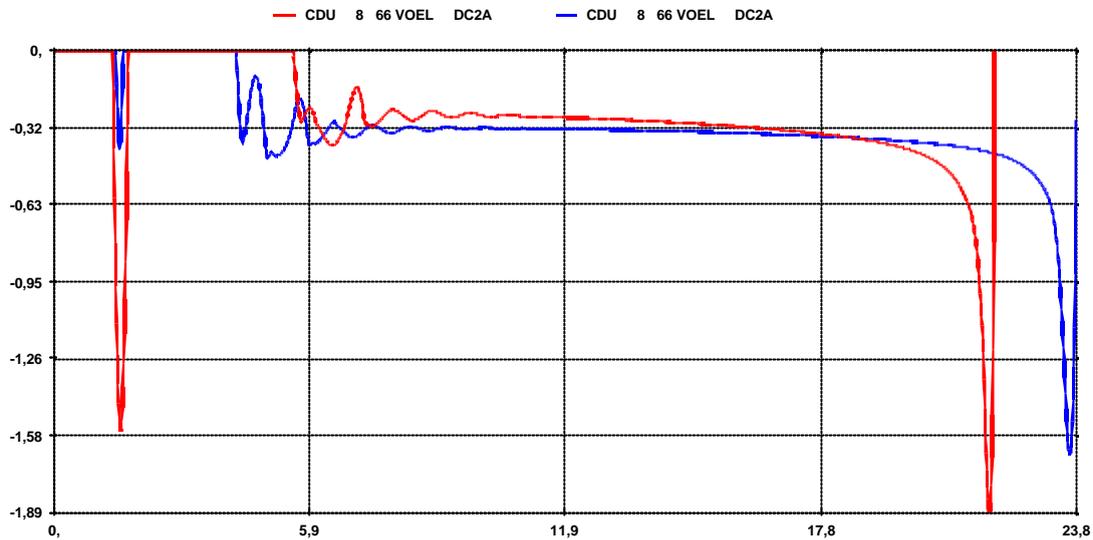


Figura 5.22 – Sinal de limitação de sobreexcitação. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

Na figura 5.23, o sinal efetivo de tensão de campo, sob influência do limitador, para os dois casos.

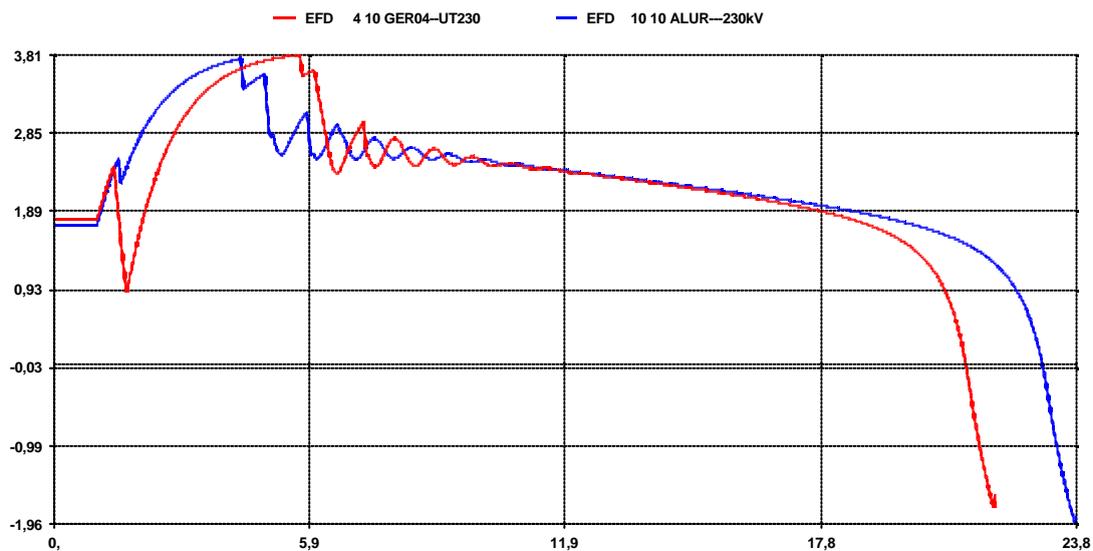


Figura 5.23 – Tensão de campo. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

Na figura 5.24 a seguir, o suporte à potência reativa nos dois casos.

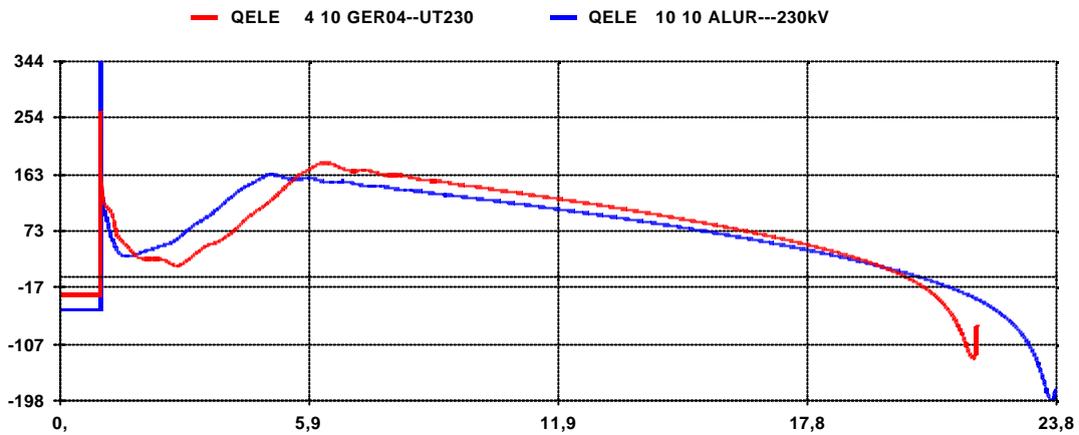


Figura 5.24 – Suporte à potência reativa. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

Enquanto não há atuação do limitador, o *Powerformer* oferece melhor suporte à potência reativa do que o gerador convencional. Entretanto, quando há o disparo para a atuação do limitador, nos dois casos, a injeção de potência reativa é substancialmente reduzida, embora, como citado anteriormente, devido à ausência do transformador elevador, ainda seja possível conseguir-se um melhor perfil de tensão na operação do *Powerformer*.

Na figura 5.25 a seguir, a plotagem do ângulo de carga das máquinas, nos dois casos.

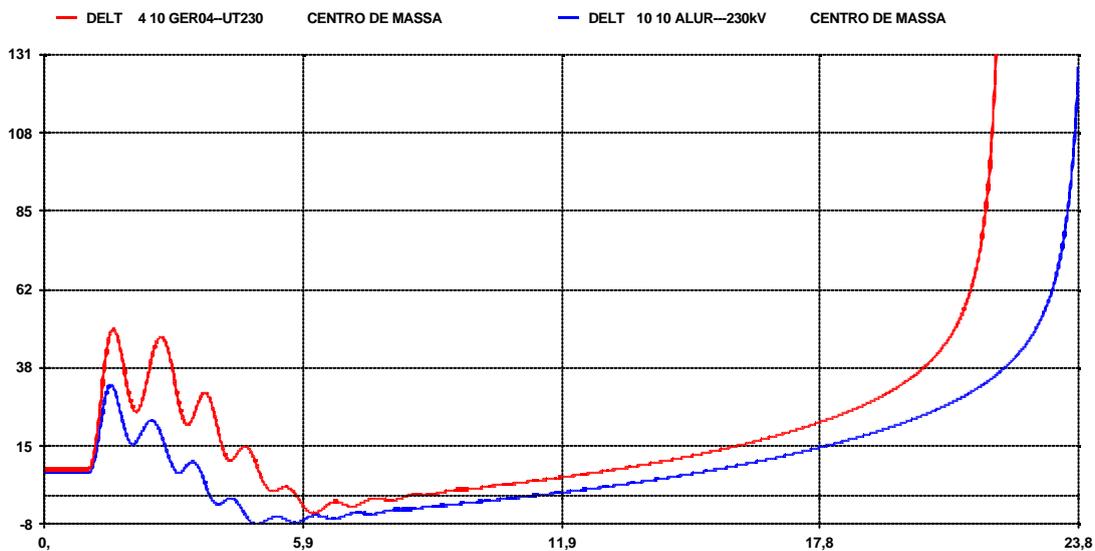


Figura 5.25 – ângulo de carga dos geradores. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A situação analisada até esta etapa revela que não há vantagem na utilização do *Powerformer* neste cenário, uma vez que a proteção do circuito de campo restringiria sua atuação no suporte à potência reativa na planta da mesma forma que em uma máquina convencional. Assim sendo, em uma abordagem estritamente conceitual, nesse ponto da análise torna-se interessante uma avaliação do desempenho da planta em um cenário em que se configure efetivamente a atuação do limitador de sobreexcitação por excessiva corrente de estator, o que não foi possível anteriormente devido à atuação antecipada do limitador por excessiva corrente de rotor. Esta situação, hipotética, será simulada considerando-se a utilização de rotores, nos dois casos, com maior capacidade térmica, similar ao cabo do estator do *Powerformer*. É importante mencionar que não há informação, atualmente, do desenvolvimento de rotores especialmente projetados para utilização com o gerador de alta tensão, entretanto provar-se-á na análise seguinte que o desenvolvimento deste tipo de equipamento seria de grande valia na efetiva função de suporte à injeção de potência reativa em um sistema elétrico - não considerando-se aspectos econômicos ou comerciais relativos ao tema.

5.7.1.3 – Desempenho do sistema considerando a operação com rotores de maior capacidade térmica

Essa simulação será feita alterando-se, nos dois casos, os parâmetros que definem as atuações temporizada e instantânea dos limitadores. A função temporizada é caracterizada pelo fator multiplicativo CR da malha de circuito de campo, além do limite superior do primeiro integrador e da constante C2R, que em conjunto definirão o instante em que se dará início a atuação temporizada. A atuação instantânea do limitador é definida pelo limite superior do segundo integrador. Assim sendo, no intuito de representar, em uma situação hipotética, a operação de um rotor com capacidade térmica similar enrolamento do estator do *Powerformer*, os valores serão alterados para:

Limite superior do integrador 1 = 240

Limite superior do integrador 2 = 2,0

C2R = 239

CR = 0,0015

Em suma, no caso base a análise considerará um gerador com estator de máquina convencional, porém com rotor reforçado, enquanto no caso *Powerformer* tanto o estator quanto o rotor serão considerados como reforçados.

A figura 5.26 é análoga à figura 5.20, porém contemplando estas alterações; o quadro superior refere-se à malha do circuito de campo para o caso base, enquanto o quadro inferior refere-se à mesma malha para o caso *Powerformer*.

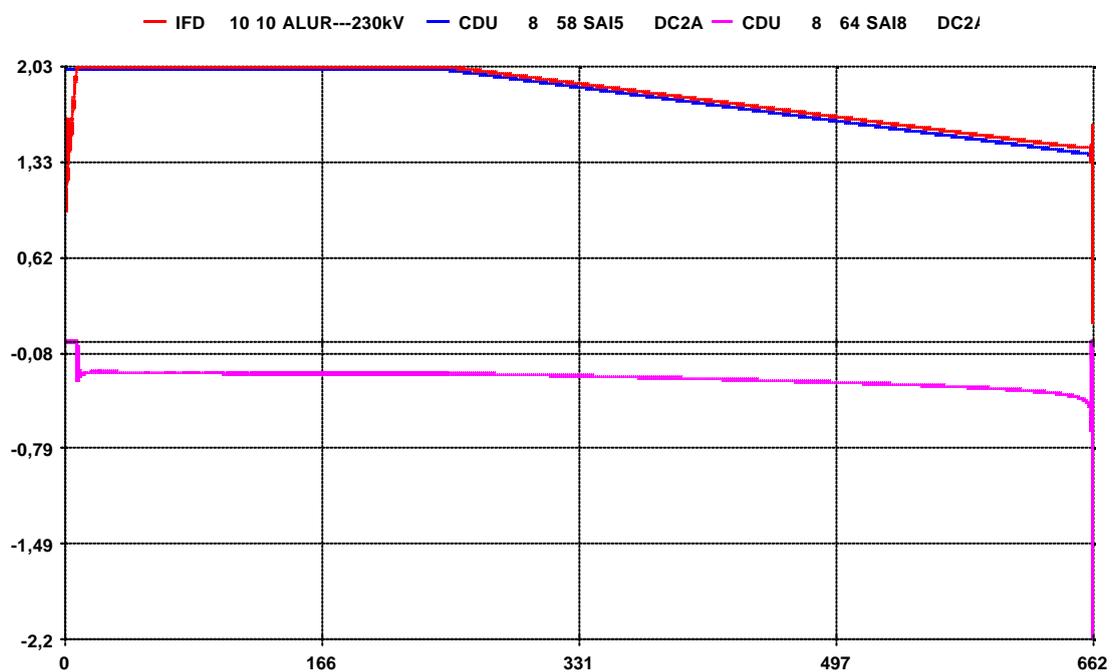
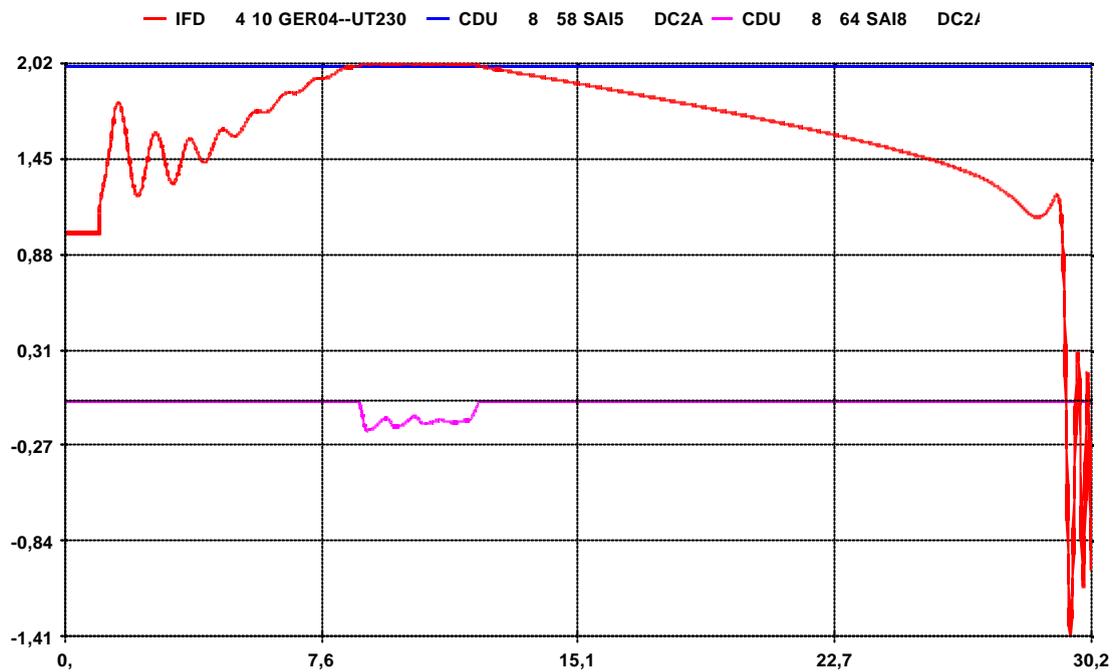


Figura 5.26 – Disparo do limitador de sobreexcitação pela corrente de campo – consideração de rotor com maior capacidade térmica. Em vermelho, a corrente de campo; em azul, o sinal na saída do segundo integrador; e em rosa, o sinal de limitação provocado pela excessiva corrente de campo.

A parte superior da figura revela que, no caso base, não há atuação da função temporizada do limitador de sobreexcitação por excessiva corrente de campo, pois o

sinal na saída do segundo integrador, representado em azul, não entra em declínio. Nota-se ainda a atuação da função instantânea do limitador por um curto intervalo de tempo, caracterizada pela excursão da corrente de campo acima do nível de 2,0 pu. Entretanto, observa-se logo a seguir, em torno do instante $t = 11,3$ segundos, o início do declínio acentuado desta corrente, e como não há atuação da função temporizada; conclui-se que a atenuação da corrente de campo é consequência da redução de excitação provocada por excessiva corrente de estator, o que por sua vez leva à redução da corrente de campo.

A parte inferior da figura, referente ao caso *Powerformer*, revela que, em torno do instante $t = 7,4$ segundos, inicia-se a atuação da função instantânea do limitador de sobreexcitação provocada por excessiva corrente de campo, situação que prevalece até o instante de aproximadamente $t = 246$ segundos. A partir de então, começa a se fazer notar a atuação da função temporizada do limitador, caracterizada pela entrada em declínio do sinal na saída do segundo integrador, sempre com módulo inferior ao valor da corrente de campo. Conseqüentemente, acentua-se a limitação na excitação da máquina, o que por sua vez provoca a redução na corrente de campo observada na figura. Em suma, a atuação do limitador de sobreexcitação por excessiva corrente de campo no *Powerformer* impõe, em dois instantes distintos, restrições ao sistema de excitação da máquina. A primeira, devido à atuação de sua função instantânea, ocorre em torno de $t = 7,4$ segundos; e a segunda, devido à atuação de sua função temporizada, ocorre em torno de $t = 246$ segundos.

De forma análoga, a figura 5.27 mostra, em contraponto à figura 5.21, o disparo para atuação do limitador de sobreexcitação provocado por excessiva corrente de estator, para o caso de utilização de rotores reforçados nos dois geradores. Novamente, o quadro superior refere-se à malha do circuito de estator para o caso base, enquanto o quadro inferior refere-se à mesma malha para o caso *Powerformer*.

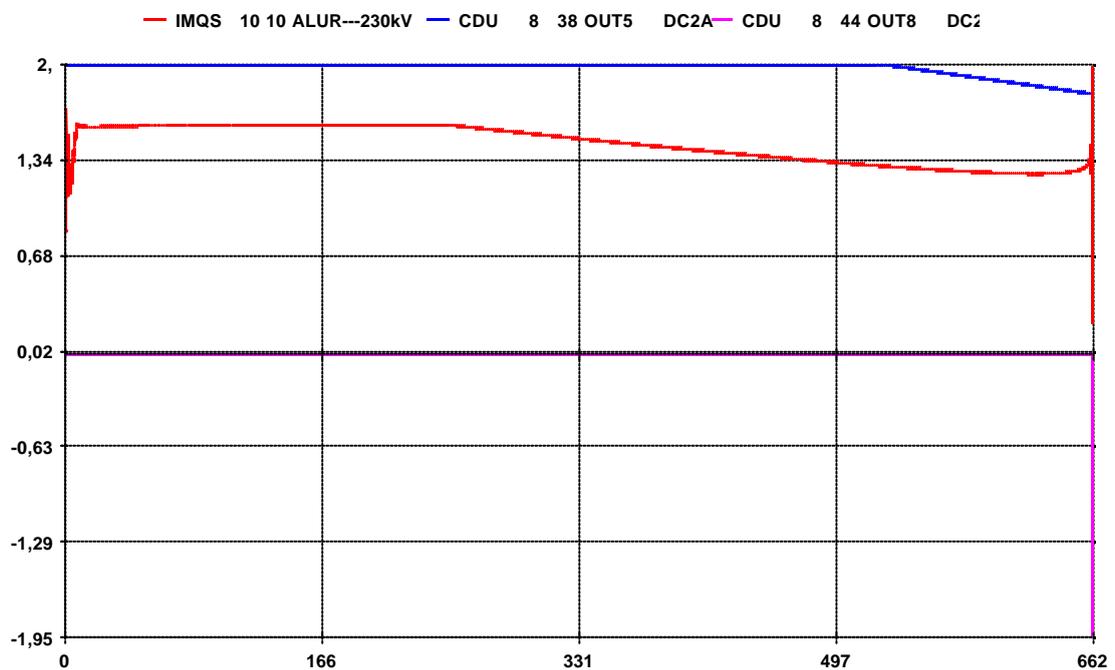
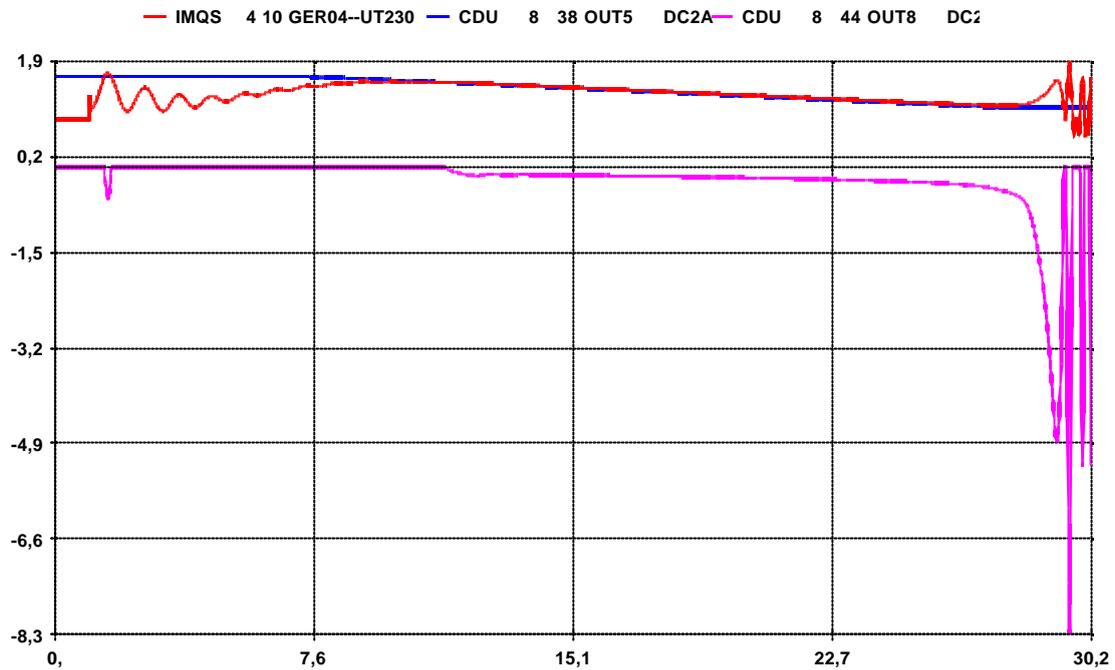


Figura 5.27 - Disparo do limitador de sobreexcitação pela corrente de estator – consideração de rotor com maior capacidade térmica. Em vermelho, a corrente de estator; em azul, o sinal na saída do segundo integrador; e em rosa, o sinal de limitação provocado pela excessiva corrente de estator.

A análise do quadro superior da figura 5.27 revela que, no caso base, em que é utilizado um estator convencional, o disparo para atuação temporizada da limitação de

excitação por excessiva corrente de estator ocorre aproximadamente no instante $t = 11,3$ segundos, o que provoca a redução na corrente de campo observada na figura 5.26. Esta limitação é então responsável pelo colapso de tensão que ocorre em torno do instante $t = 30$ segundos; não havendo, nesse caso, influência da limitação de excitação provocada por excessiva corrente de campo.

Em relação ao *Powerformer*, a análise do quadro inferior da figura 5.27 revela que, em torno do instante $t = 522$ segundos, o sinal na saída do segundo integrador entra em declínio, o que caracterizaria, a princípio, instantes depois, a atuação da função temporizada de limitação de excitação por excessiva corrente de estator, caso houvesse a interseção com a curva representativa da respectiva corrente. Entretanto, essa situação não chega a ocorrer, pois é caracterizado o colapso de tensão em torno do instante $t = 662$ segundos devido exclusivamente à atuação do limitador de sobreexcitação por excessiva corrente de campo, não havendo portanto influência da malha do limitador referente à corrente de estator.

Conclusivamente, a hipotética situação operacional em que os geradores seriam equipados com rotores de capacidade térmica reforçada teria, nos dois casos, efeitos diferentes. No caso base, a desestabilização da planta ocorreria em aproximadamente 30 segundos devido à atuação do limitador de sobreexcitação provocado por excessiva corrente de estator, enquanto; no *Powerformer*, a desestabilização seria consequência da atuação do limitador de sobreexcitação provocado por excessiva corrente de campo, em um intervalo de tempo aproximadamente 20 vezes maior.

A figura 5.28 mostra, para os dois casos, o efetivo sinal de limitação de excitação aplicado na malha de controle do regulador de tensão, provocado pela superposição dos sinais de limitação de excitação dos circuitos de campo e estator.

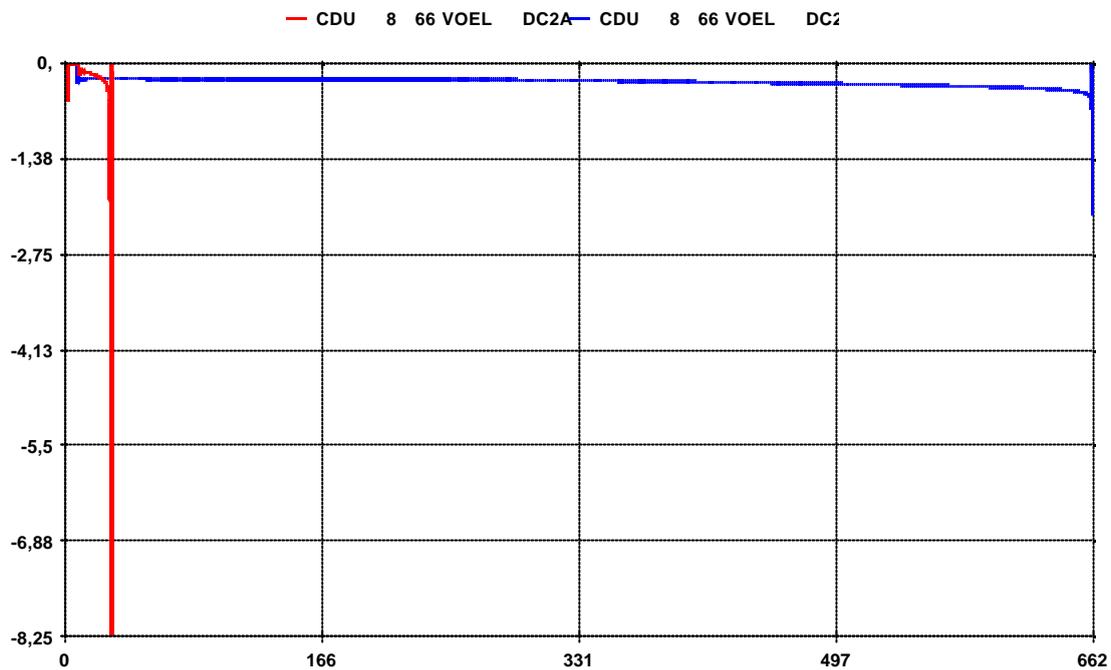


Figura 5.28 – Sinal de limitação de sobreexcitação, caso de utilização de rotores reforçados nas duas máquinas. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A figura 5.29 mostra o sinal de tensão de campo sob efeito dos limitadores.

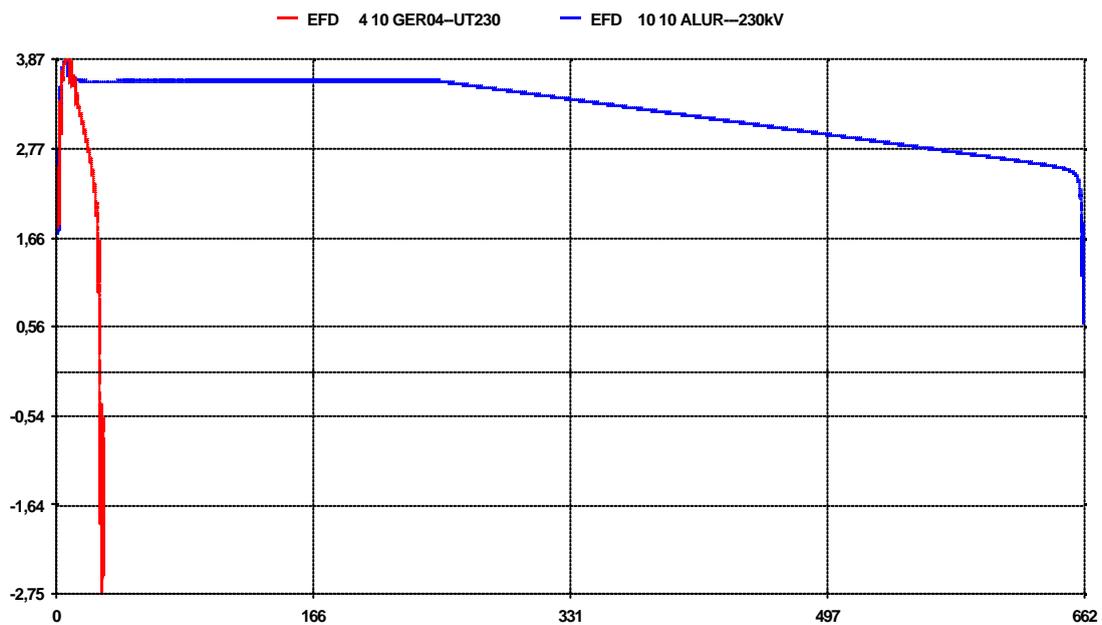


Figura 5.29 – Tensão de campo, utilização de rotores reforçados. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

Na figura 5.30, a tensão na barra 10 para ambos os casos .

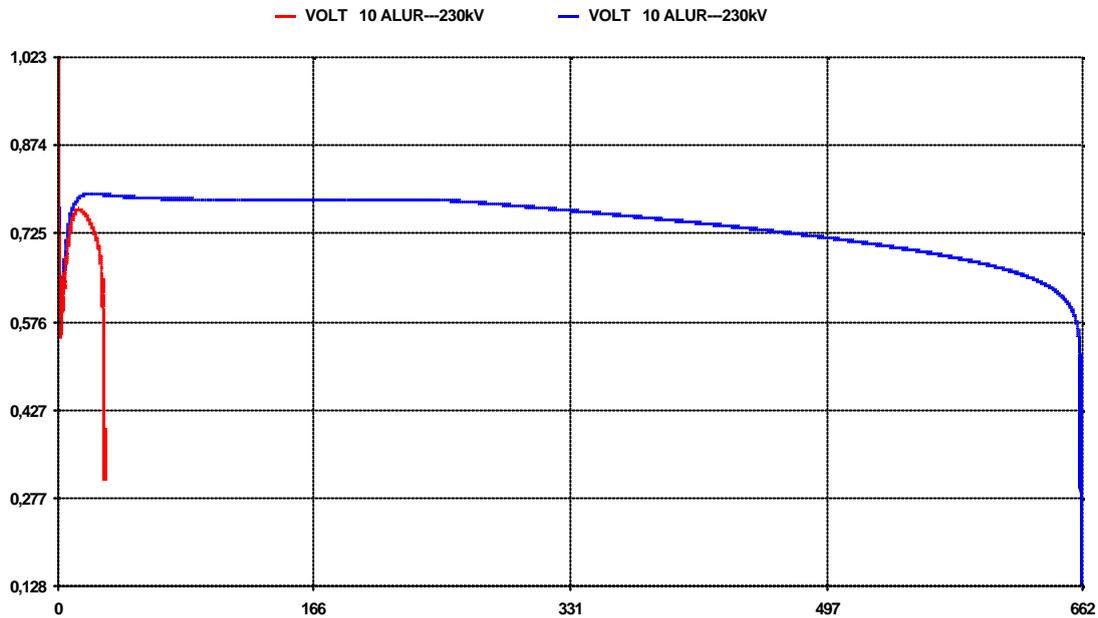


Figura 5.30 – Tensão na barra 10, utilização de rotor reforçado nas duas máquinas. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A figura 5.31 mostra o perfil de injeção de potência reativa na planta pelos geradores; evidenciando-se o efeito provocado pela atuação dos limitadores.

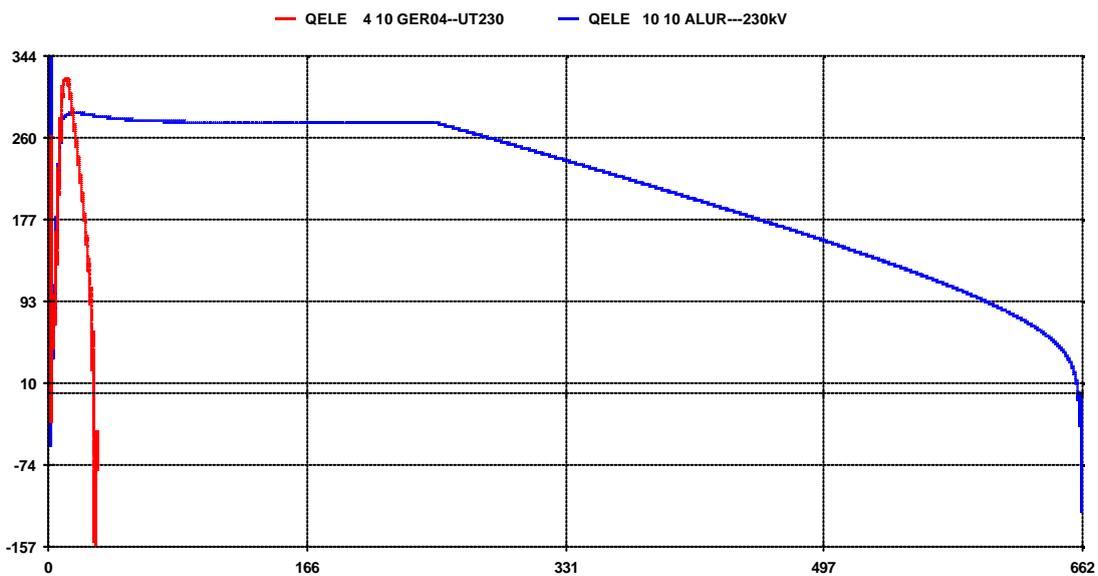


Figura 5.31 – Suporte à potência reativa, consideração de utilização de rotores reforçados nos dois casos. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A figura 5.32 mostra, como consequência do colapso de tensão nos dois casos, a caracterização da instabilidade angular da planta.

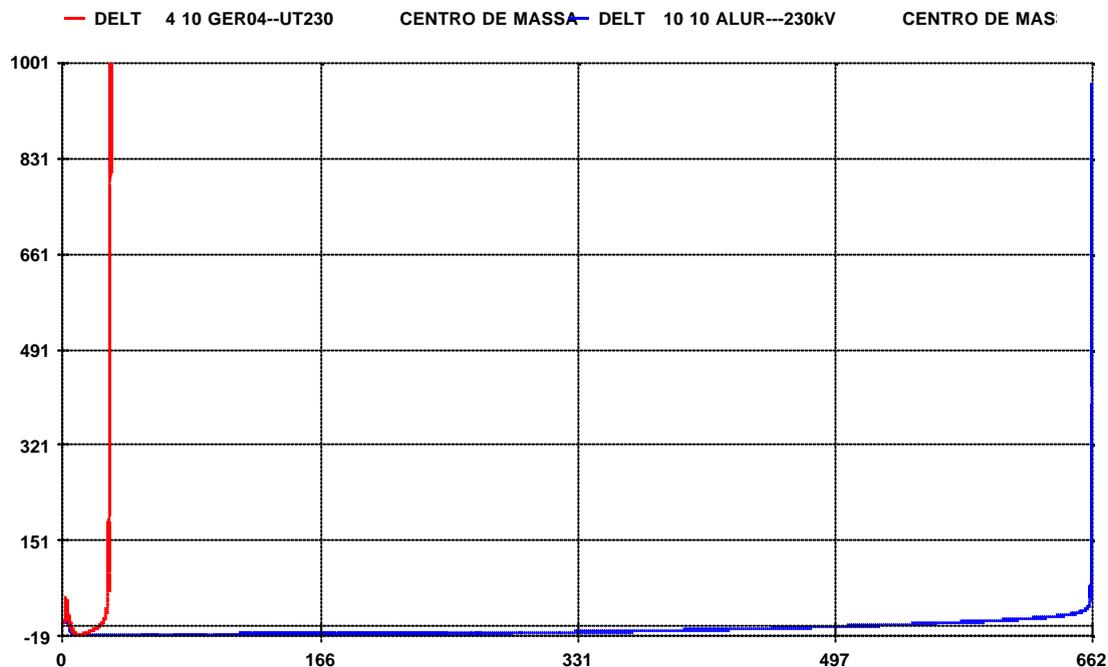


Figura 5.32 – ângulo delta dos geradores. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

5.7.1.4 – Análise dos resultados

Inicialmente, no sistema analisado e em um cenário realista, contemplando a utilização de rotores convencionais tanto na máquina de média tensão como no *Powerformer*, foi verificado que não há vantagem na operação da máquina de alta tensão, uma vez que o circuito de campo desta teria sua excitação limitada da mesma forma que em uma máquina convencional. Por outro lado, desta vez em uma situação hipotética, contemplando a utilização de rotores, nas duas máquinas, com capacidade térmica similar ao cabo do enrolamento do estator do *Powerformer*, é evidenciada a vantagem na utilização do gerador de alta tensão, pois, como esperado, a atuação dos limitadores dos circuitos de campo e estator ocorre de forma bastante lenta, retardando consideravelmente a desestabilização do sistema.

5.7.2 - Curto-circuito trifásico na barra 3, com duração de 150 ms, seguido de perda da terceira usina, no cenário de carga pesada.

As figuras 5.33 e 5.34 a seguir ilustram esta contingência para os dois casos.

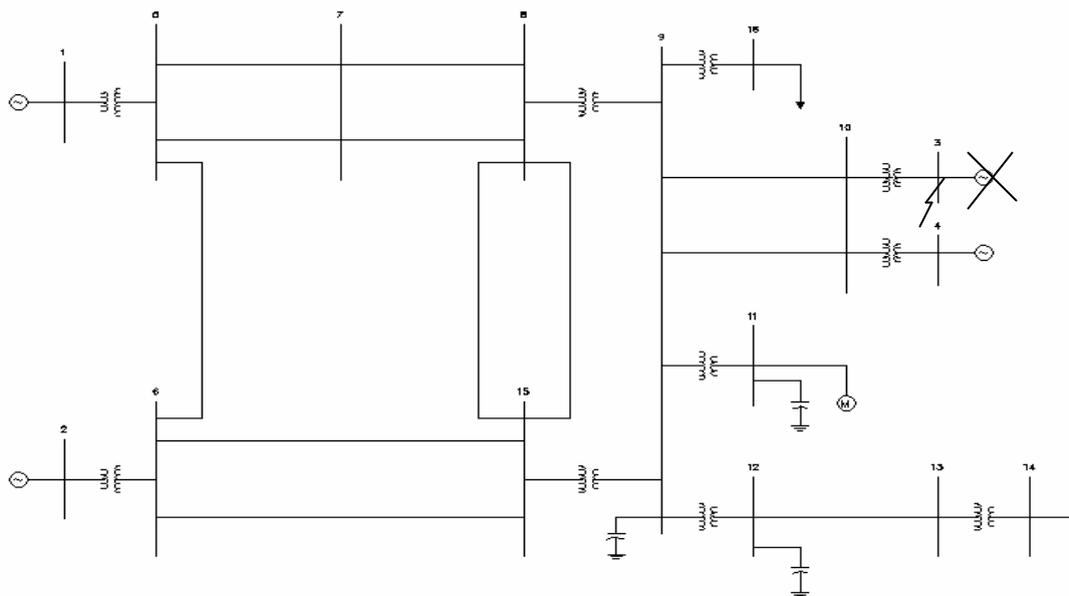


Figura 5.33 – Sistema teste no caso base, cenário de carga pesada, curto-circuito na barra 3 e perda da terceira usina.

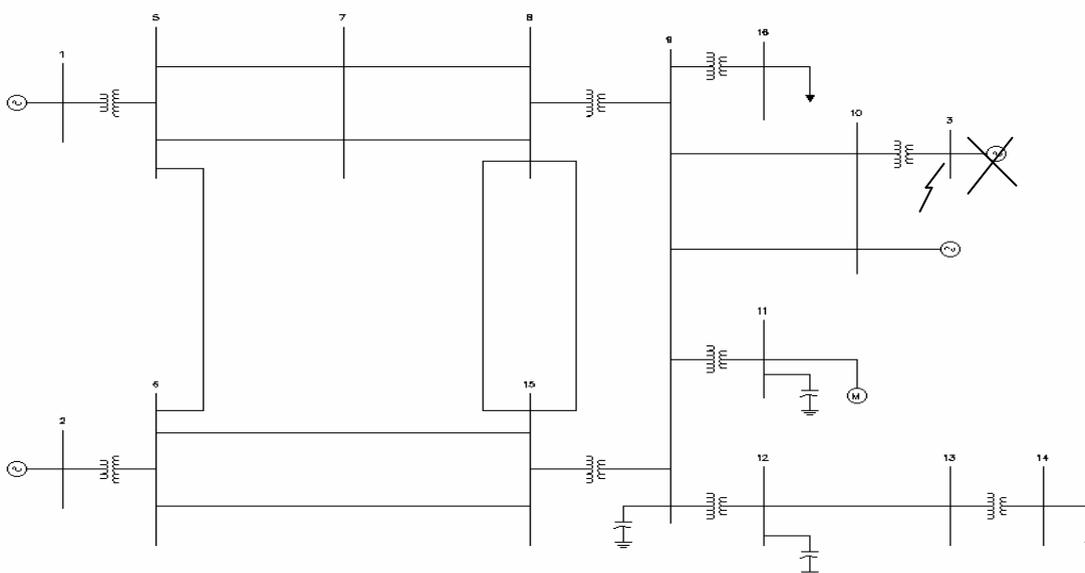


Figura 5.34 – Sistema teste, configuração 3, curto-circuito na barra 3 e perda da terceira usina.

Essa contingência, a princípio, para os casos base e *Powerformer*, forçará a máquina na usina vizinha, 4 ou 10, respectivamente, a injetar mais potência reativa no sistema, de modo a compensar a perda da terceira usina geradora, que vinha operando em regime de sobreexcitação.

5.7.2.1 - Desempenho do sistema sem atuação do limitador de sobreexcitação

Inicialmente, para melhor efeito comparativo, analisar-se-á a estabilidade do sistema sem a atuação do limitador de sobreexcitação da máquina da barra 4, no caso base; e da máquina na barra 10, no caso *Powerformer*.

A figura 5.35 a seguir mostra a tensão e corrente de campo do gerador na barra 4 no caso base.

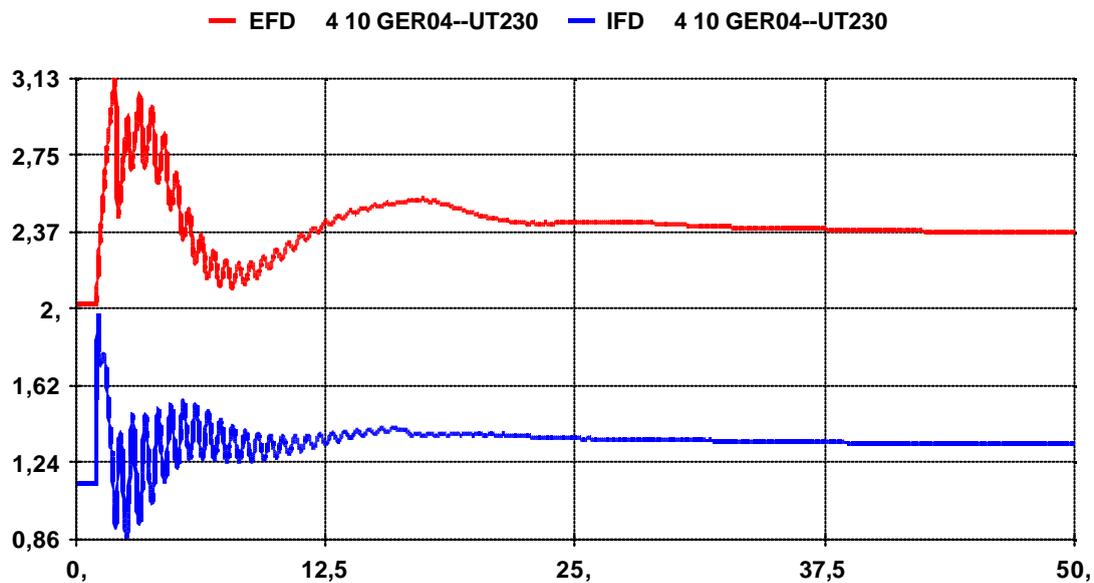


Figura 5.35 – Tensão (em vermelho) e corrente de campo (em azul), caso base sem atuação do limitador.

Na figura 5.36 a seguir, o perfil de tensão na barra 10, caso base.

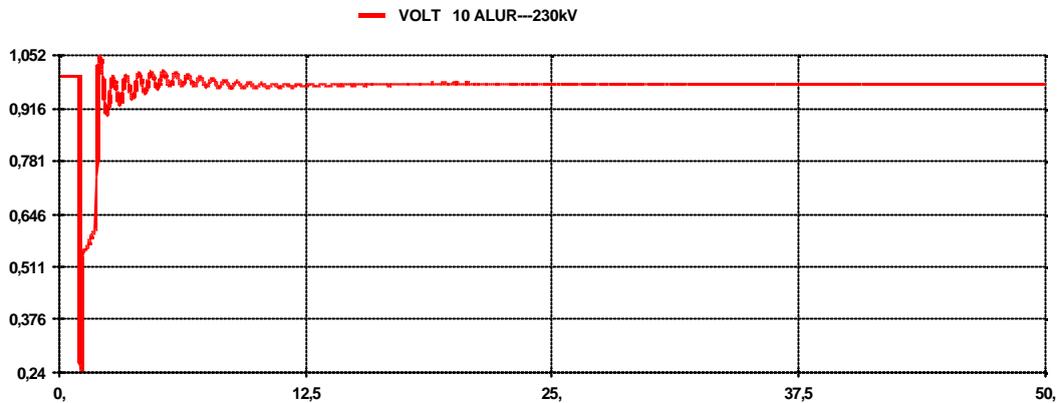


Figura 5.36 – Tensão na barra 10, caso base, sem atuação do limitador de sobreexcitação.

A análise das figuras acima revela que o valor da tensão na barra 10 se estabiliza em torno de 0,97 pu, porém em uma condição operacional proibitiva, pois a corrente de campo estabilizar-se-ia em 1,33 pu. Esse ponto de operação é inviável por caracterizar dano ao circuito de campo da máquina.

A figura 5.37 a seguir mostra a tensão e corrente de campo do gerador na barra 10, no caso *Powerformer*.

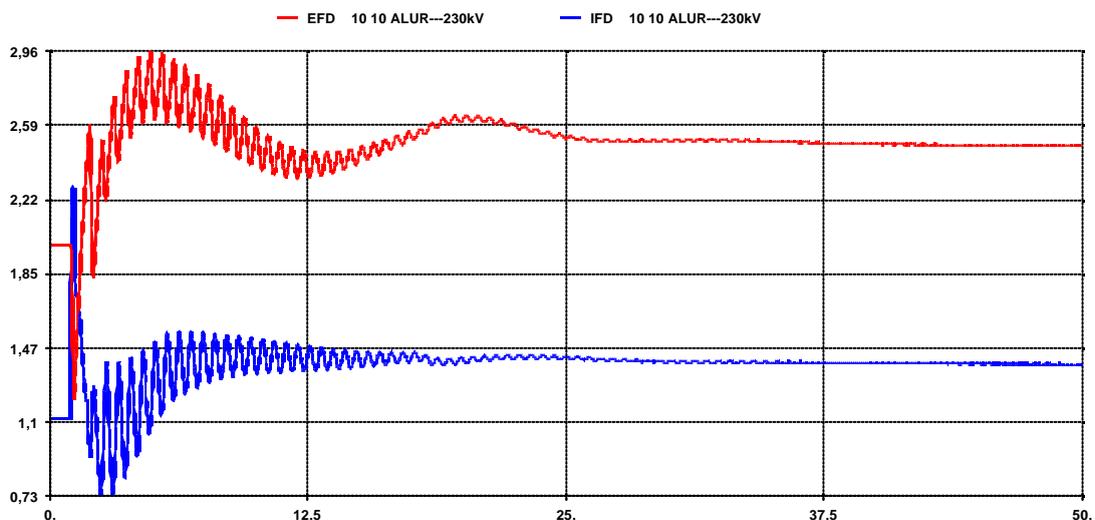


Figura 5.37 – Tensão (em vermelho) e corrente de campo (em azul), caso *Powerformer* sem atuação do limitador.

A figura 5.38 a seguir mostra o perfil de tensão na barra 10, caso *Powerformer*.

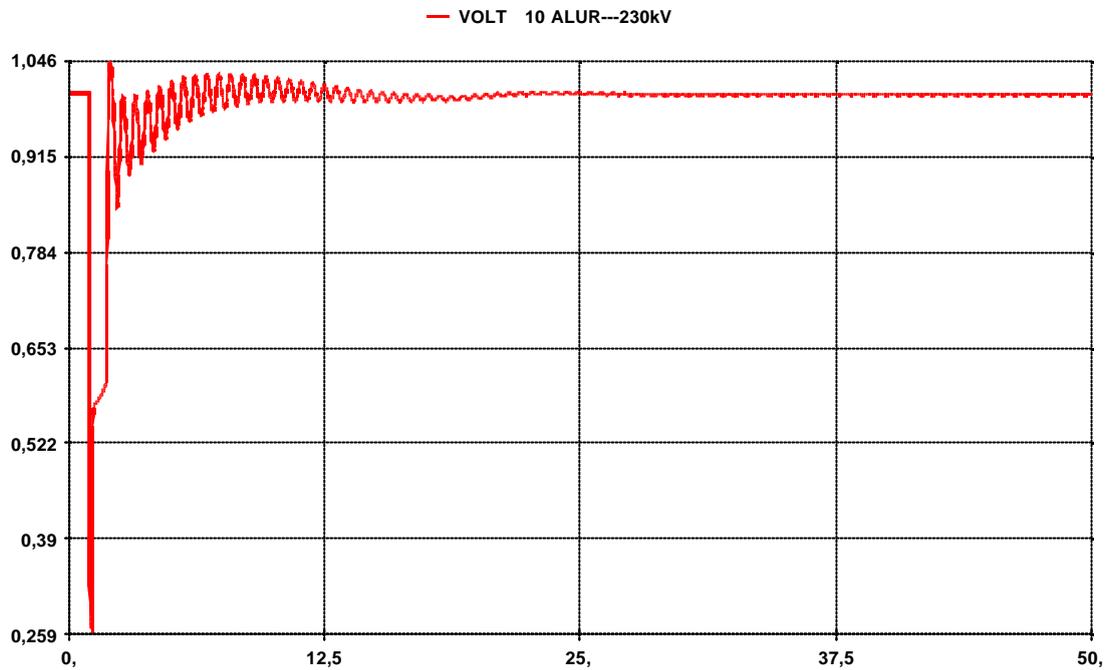


Figura 5.38 - Tensão na barra 10, caso *Powerformer*, sem atuação do limitador de sobreexcitação.

A análise das figuras acima revela que no caso *Powerformer* a situação é análoga a do caso base, conclusivamente, é necessário considerar-se a atuação do limitador de sobreexcitação nos dois cenários.

Adicionalmente, as figuras acima revelam que, mesmo que não ocorram contingências na planta, haverá a atuação dos limitadores de sobreexcitação, pois a corrente de campo já está inicialmente estabilizada, nos dois casos, em níveis proibitivos, acima de 1,04 pu. Ou seja, mesmo sem contingências, em ambos os casos ocorrerá a atuação dos limitadores de sobreexcitação. Entretanto, a análise do sistema sem a ocorrência de contingências revela que não haverá restrições à estabilização da planta mesmo sob a atuação dos limitadores, como revela as figuras 5.39 e 5.40 a seguir.

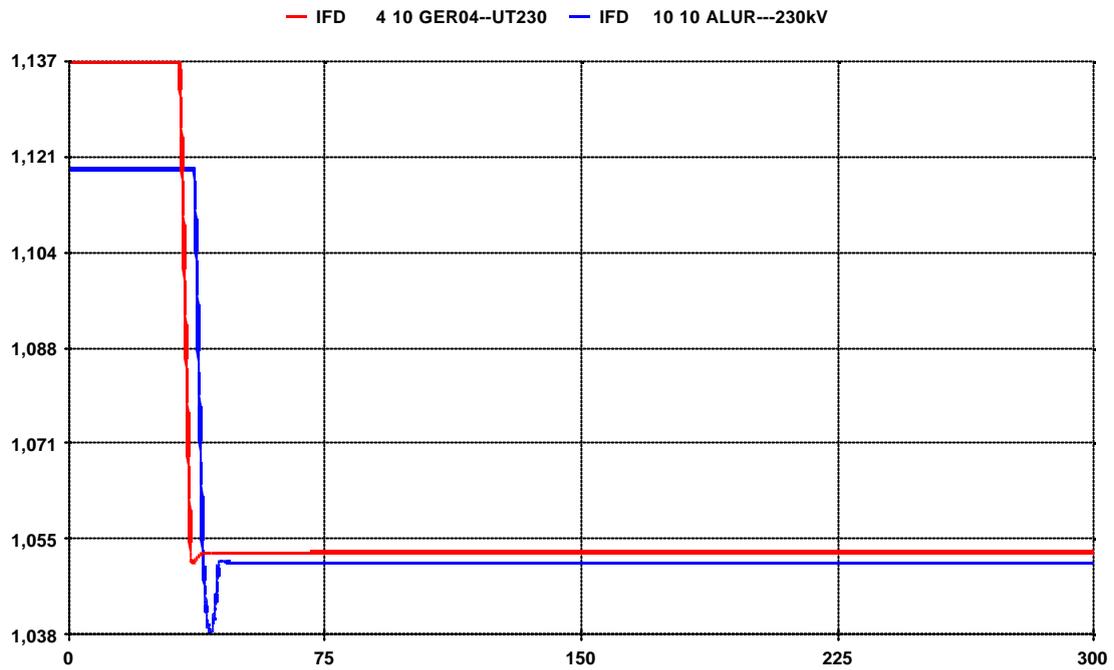


Figura 5.39 – Corrente de campo em carga pesada, sem a ocorrência de contingências. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

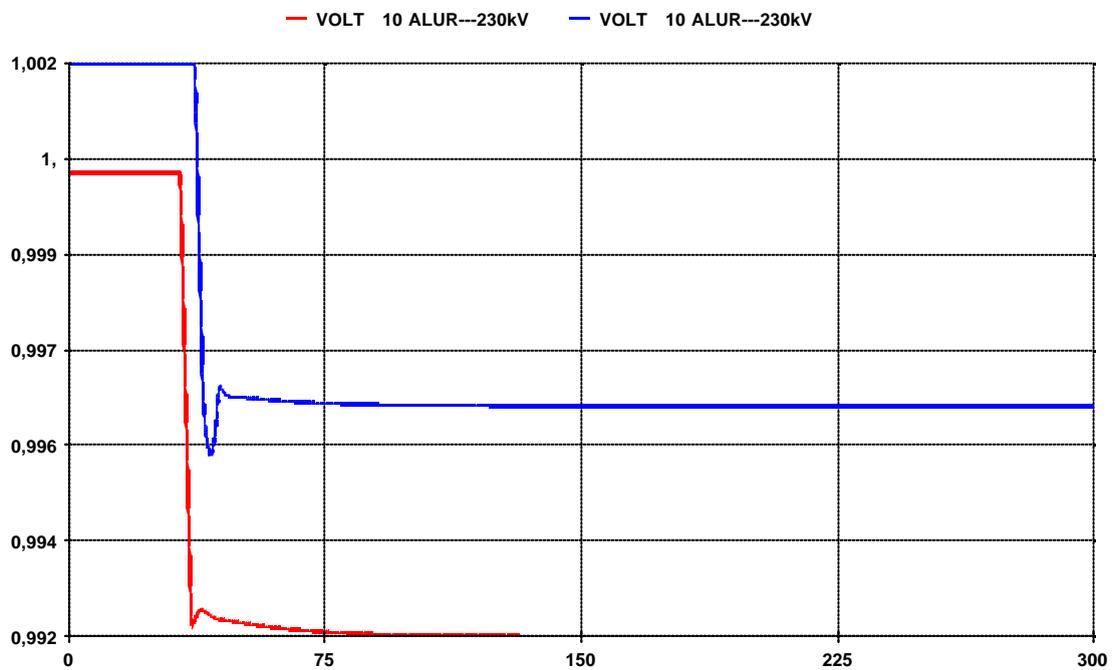


Figura 5.40 – Tensão na barra 10, carga pesada, sem a ocorrência de contingências. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

Essa situação revela a importância do estudo de estabilidade eletromecânica em complemento ao estudo de fluxo de potência; enquanto este último não apresentou restrições ao desempenho da planta, a análise dinâmica revela a atuação no tempo do limitador de sobreexcitação, sem, entretanto, comprometer a estabilidade do sistema.

Nos tópicos a seguir, será analisado o desempenho da planta nos dois casos, considerando-se a contingência especificada (perda da terceira usina) e a atuação dos limitadores de sobreexcitação.

5.7.2.2 - Desempenho do sistema considerando a atuação do limitador de sobreexcitação

A figura 5.41 a seguir mostra a tensão na barra 10, considerando a atuação do limitador de sobreexcitação.

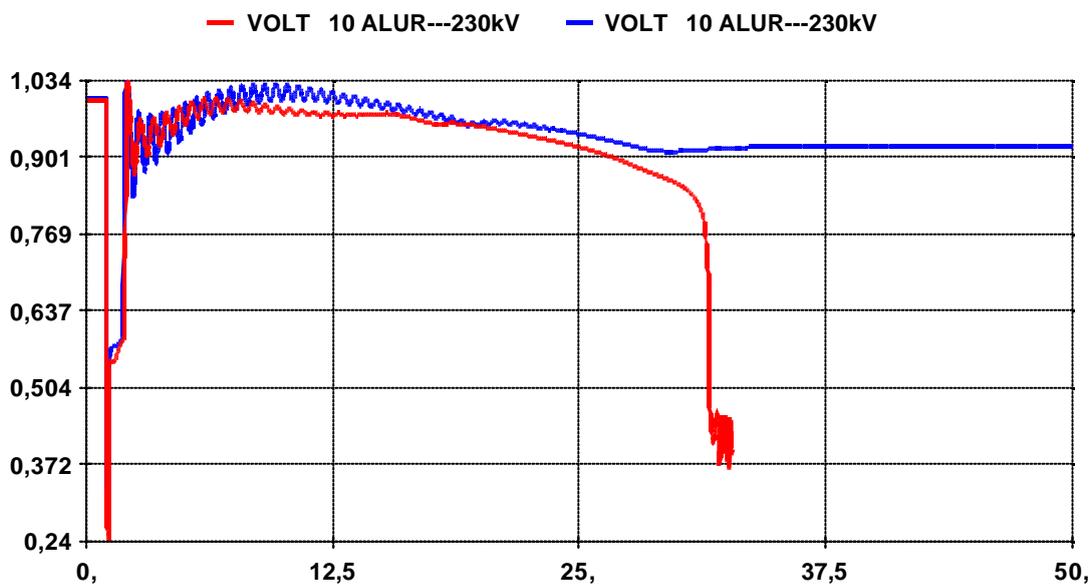


Figura 5.41 – Tensão na barra 10. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

Imediatamente, revela-se que a atuação do limitador desestabiliza a planta no caso base, ocorrendo estabilidade de tensão no caso *Powerformer*, ainda que em um nível baixo de tensão.

Dessa forma, faz-se necessária uma análise da atuação do limitador de sobreexcitação. As figuras 5.42 e 5.43 mostram as oscilações nas correntes de estator e de campo, para os dois casos.

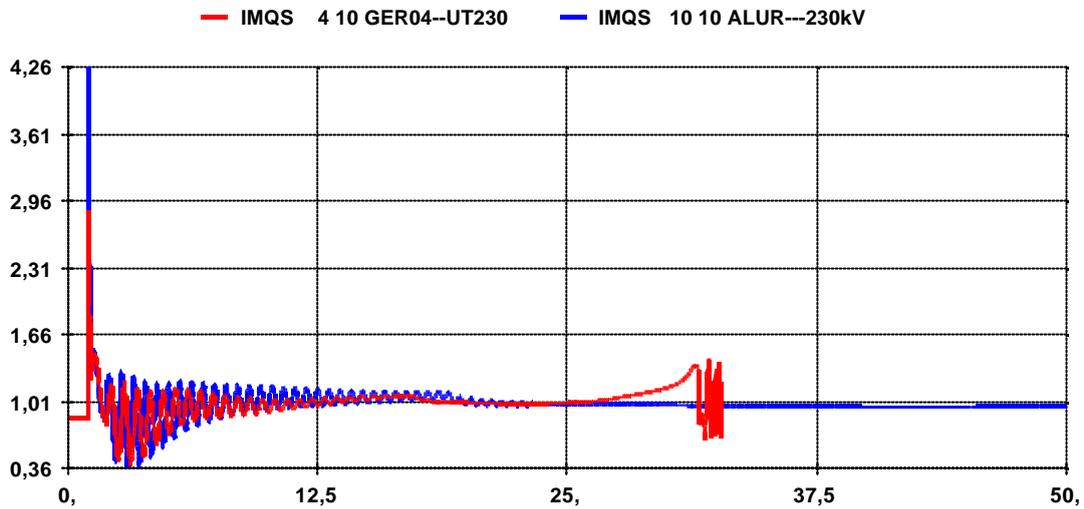


Figura 5.42 – Corrente no estator das máquinas. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

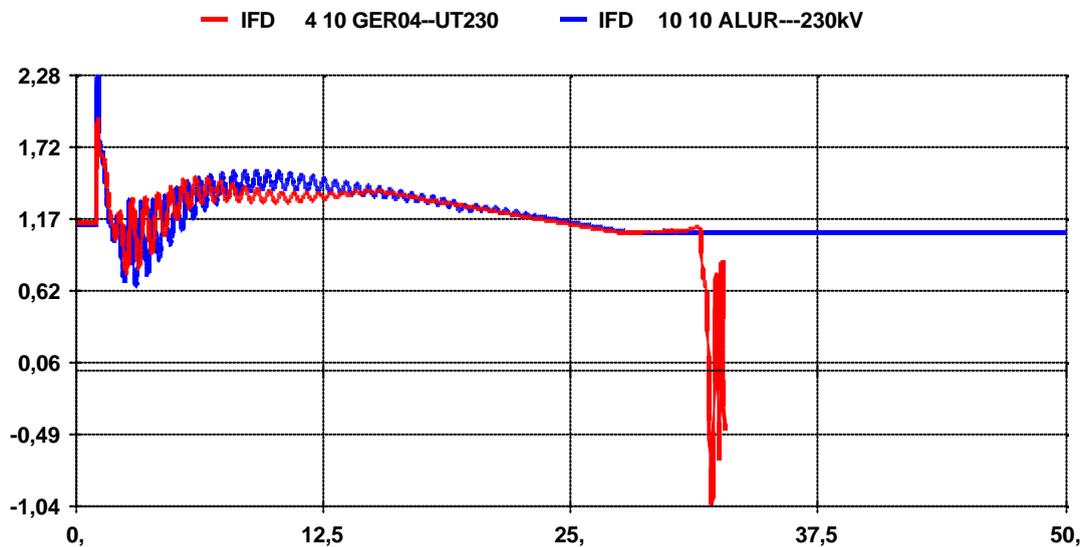


Figura 5.43 – Corrente no campo das máquinas. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A análise da função temporizada do limitador indica que sua atuação inicia-se quando o sinal de saída do primeiro integrador supera, em módulo, o valor das

constantes C2S ou C2R, fazendo com que a saída da segunda junção de soma passe a excursionar por valores negativos.

A figura 5.44 a seguir mostra, em superposição, os dois casos, isto é, o sinal na saída dessa junção de soma, para a malha da corrente de campo.

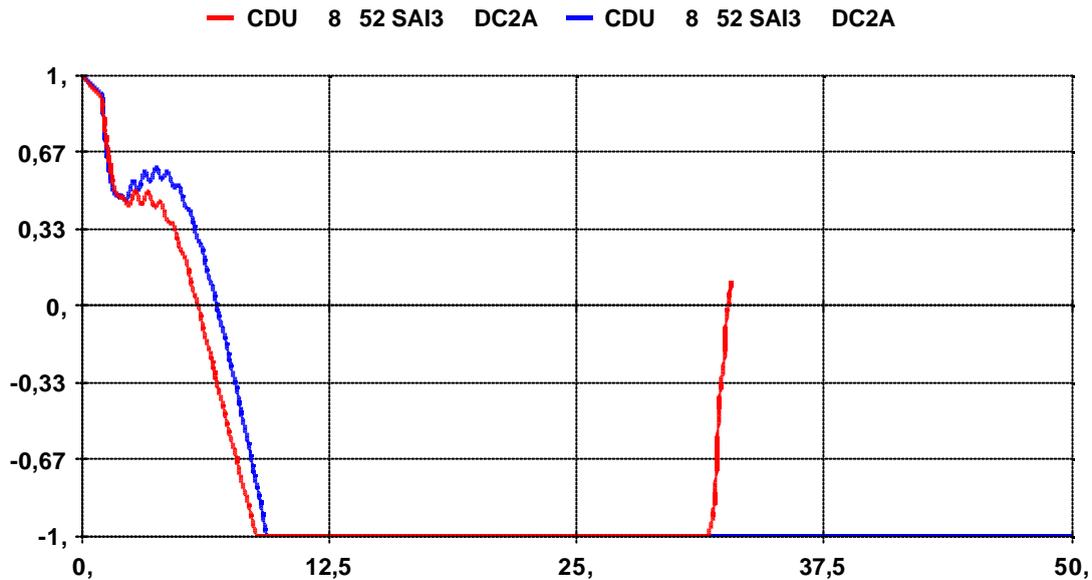


Figura 5.44 - Sinal na saída da segunda junção de soma do limitador – malha corrente de campo. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

No caso base, o disparo para o início da atuação temporizada do limitador ocorre no instante $t = 5,90$ segundos, enquanto que no caso *Powerformer*, o início da atuação se dá no instante $t = 6,82$ segundos.

Em seguida, representados na figura 5.45 em quadros individualizados, para os casos base e *Powerformer*, respectivamente, o sinal na saída da segunda junção somatória do limitador para a malha da corrente de estator.

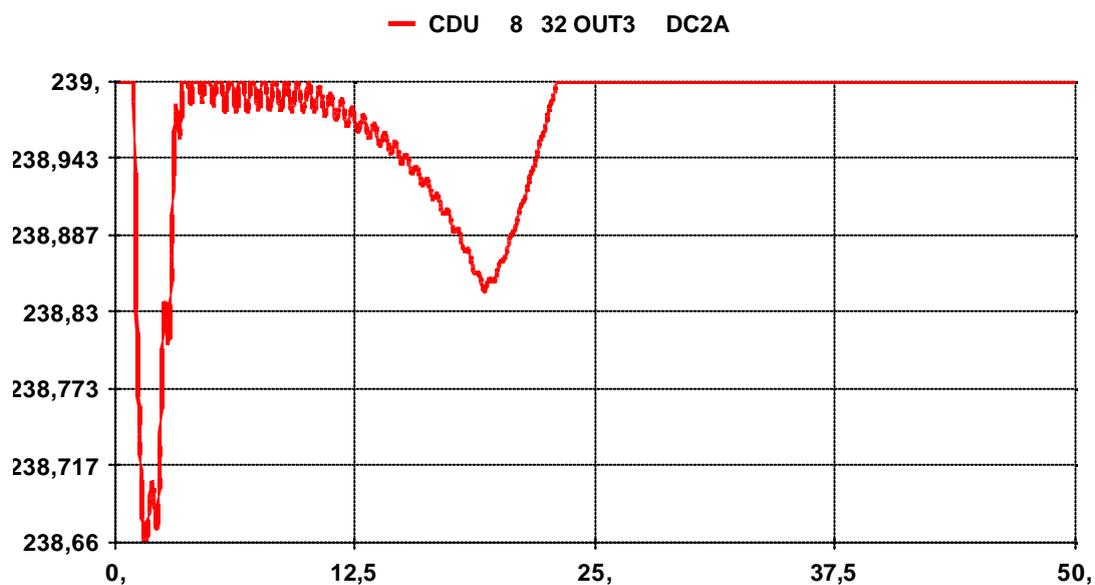
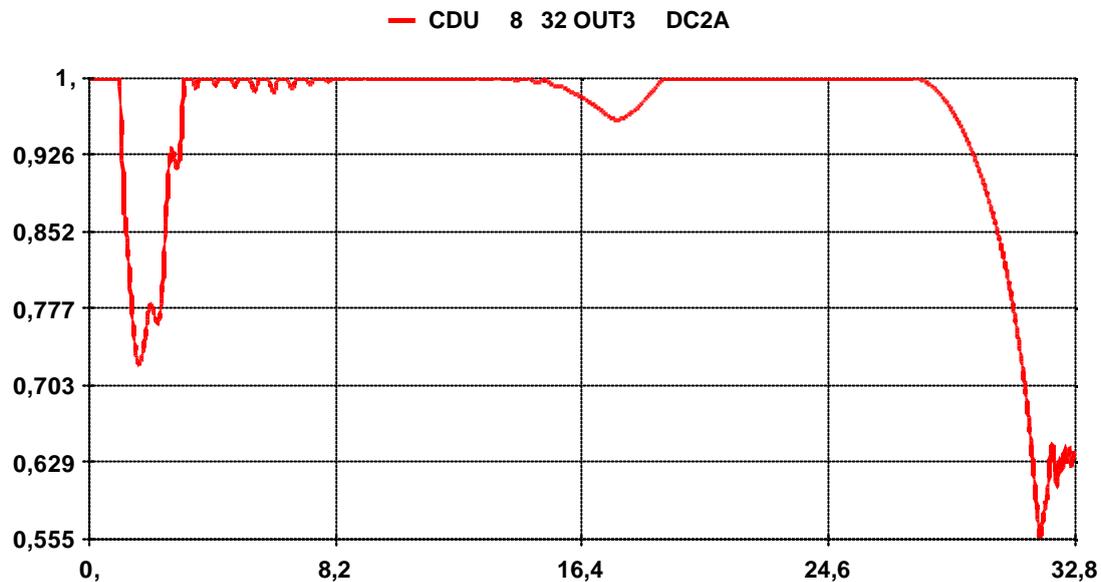


Figura 5.45 – Sinal na saída da segunda junção de soma do limitador – malha corrente de estator.

Em ambos os casos, não há excursão do sinal por valores negativos; conclui-se, então, que não há atuação da função temporizada do limitador de sobreexcitação provocada por excessiva corrente de estator, ou seja, para essa contingência, a maior capacidade de sobrecarga do estator do *Powerformer* não é vantajosa, em comparação a um gerador convencional.

A instabilidade da planta, no caso base, ocorre por causa da excessiva corrente de campo que provoca a atuação do limitador de sobreexcitação, cuja atuação também é notada no caso *Powerformer*, porém em um maior intervalo de tempo, sem provocar a perda da estabilidade do sistema; beneficiando-se ainda da ausência da reatância do transformador elevador.

Como especificado acima, após os instantes $t = 5,90$ segundos e $6,82$ segundos, para os casos base e *Powerformer*, respectivamente, o segundo integrador da malha de controle do limitador entra em rampa negativa, a uma taxa definida pelo fator multiplicativo de $0,025$ para os dois casos. Entretanto, como já citado, a efetiva atuação da limitação de tensão de campo somente ocorrerá quando o sinal de saída do segundo integrador for inferior, em módulo, aos valores de corrente de campo ou armadura nos respectivos controladores, provocando a excursão por valores negativos do sinal na saída na terceira junção de soma. A figura 5.46 mostra, em quadros individualizados para os dois casos, para o circuito de campo, os instantes de tempo em que esta situação ocorre.

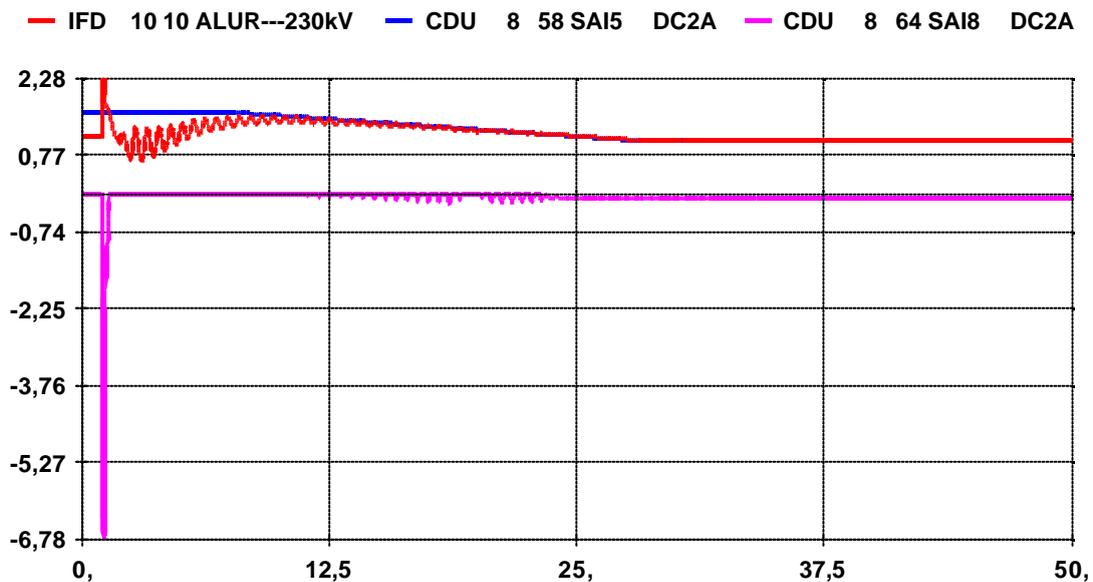
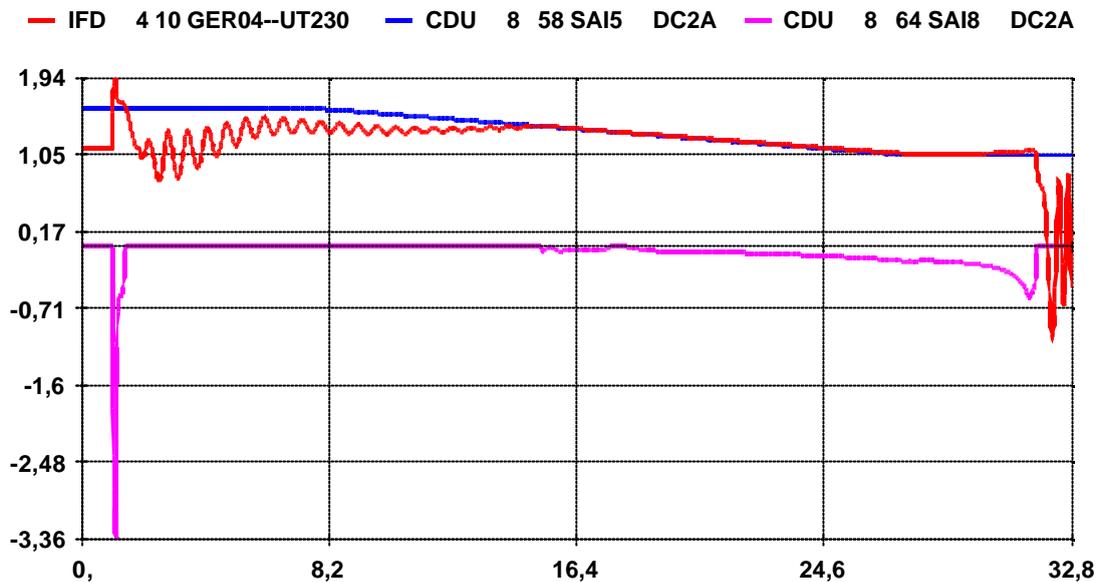


Figura 5.46 – Disparo do limitador de sobreexcitação pela corrente de campo, casos base e *Powerformer*. Em vermelho, o sinal da corrente de campo, em azul, o sinal na saída do segundo integrador e, em rosa, o somatório de ambos, limitado a valores negativos, ou seja, o sinal de limitação provocado pela malha do circuito de campo.

Cessada a oscilação transitória inicial, analisa-se o momento em que ocorre o efetivo disparo para a limitação na excitação das máquinas, através da atuação

temporizada do limitador pela corrente de campo. No caso base, o disparo ocorre em $t = 15,2$ segundos, enquanto que no caso *Powerformer*, em $t = 23,1$ segundos.

Como já mencionado, no que concerne às correntes de estator nos dois casos, uma vez que não tenha ocorrido a excursão por valores negativos na saída da segunda junção de soma do limitador, não há o disparo para a atuação da função temporizada de limitação de excitação.

De fato, a figura 5.47 a seguir mostra, em quadros distintos, que não há intersecção entre o sinal de saída do segundo integrador e a corrente de estator em ambos os casos.

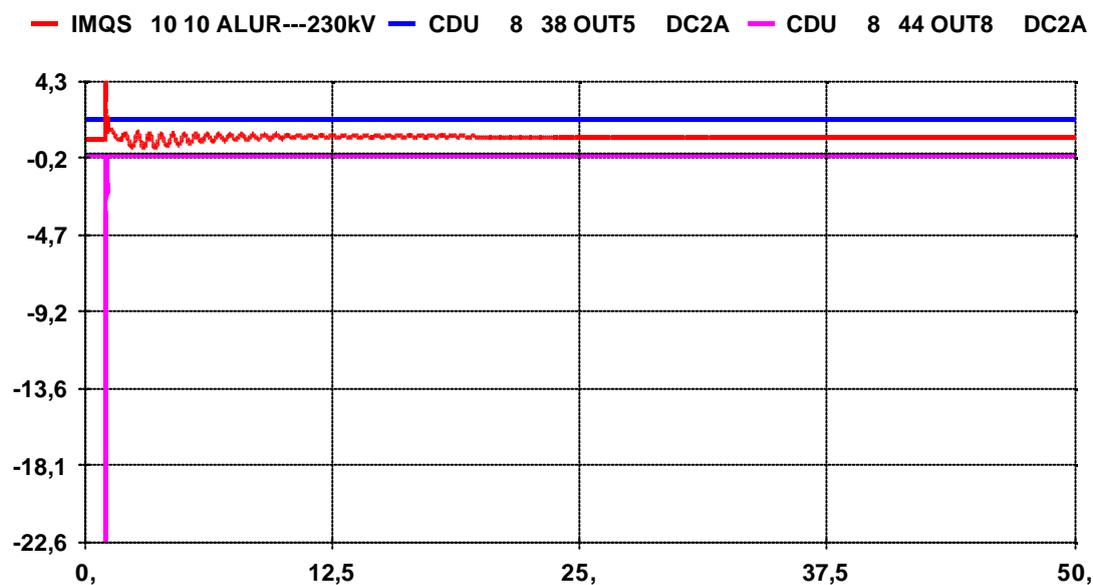
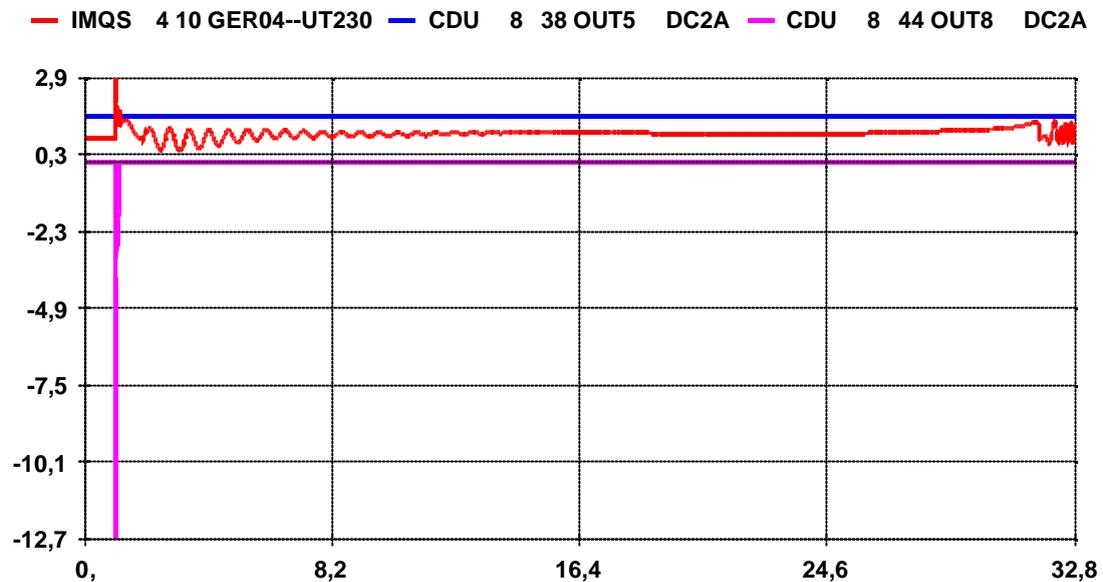


Figura 5.47 - Disparo do limitador de sobreexcitação pela corrente de estator, casos base e *Powerformer*. Em vermelho, o sinal da corrente de estator, em azul, o sinal na saída do segundo integrador e, em rosa, o somatório de ambos, limitado a valores negativos.

Apesar de a atuação da função instantânea do limitador ocorrer, em ambos os casos e em um transitório muito rápido, não há disparo para a atuação da função temporizada pela excessiva corrente do estator.

Na figura 5.48 a seguir, o sinal de limitação de excitação do campo nos dois casos:

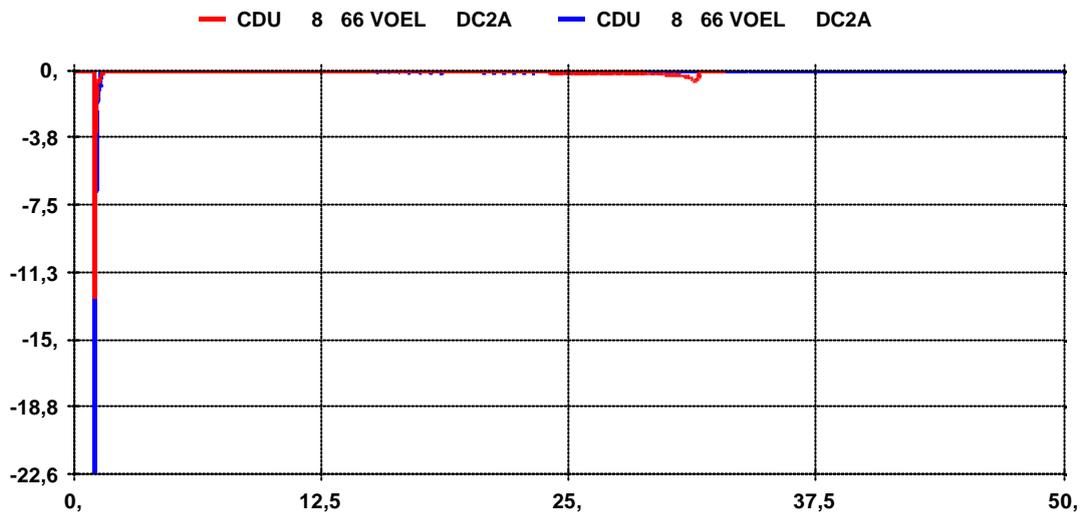


Figura 5.48 – Sinal de limitação de sobreexcitação. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

Na figura 5.49, o sinal de tensão de campo, sob influência do limitador, para os dois casos:

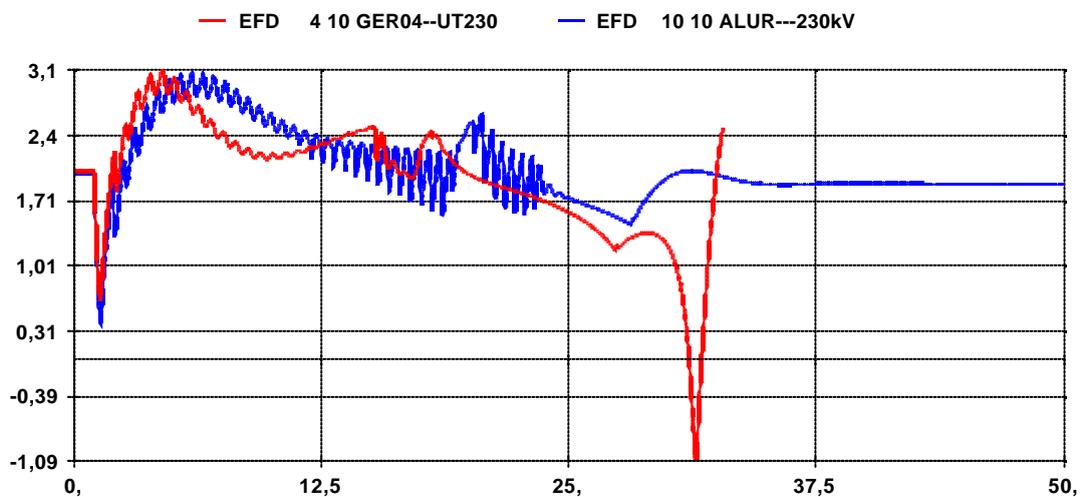


Figura 5.49 – Tensão de campo. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A figura 5.50 mostra que, no caso *Powerformer*, no instante $t= 28,1$ segundos, a corrente de campo é estabilizada em seu nível máximo permissível de 1,05 pu, pelo limitador de excitação, ocorrendo, a partir de então, a estabilização do sinal de tensão de campo.

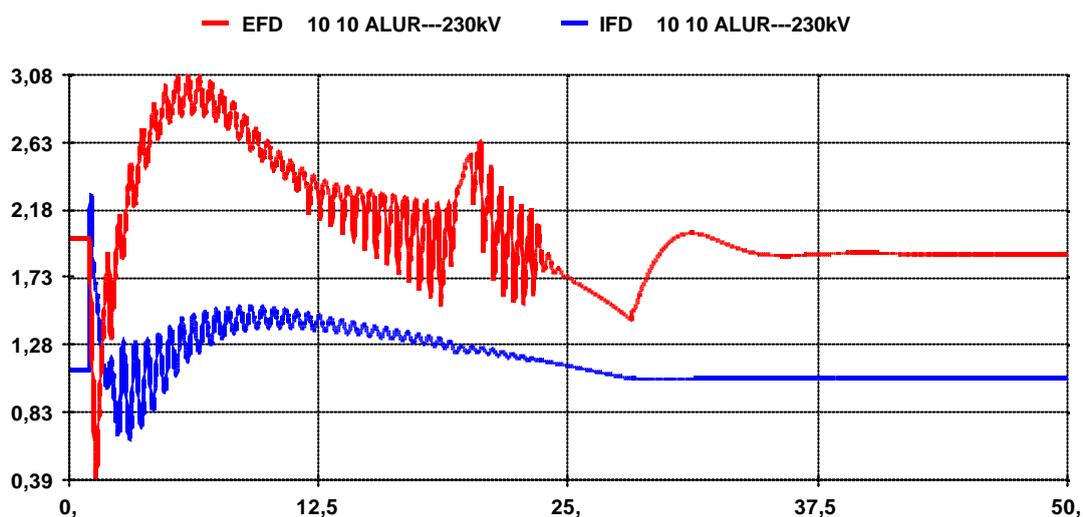


Figura 5.50 – Tensão e corrente de campo, caso *Powerformer*.

Na figura 5.51, a tensão terminal na barra das máquinas:

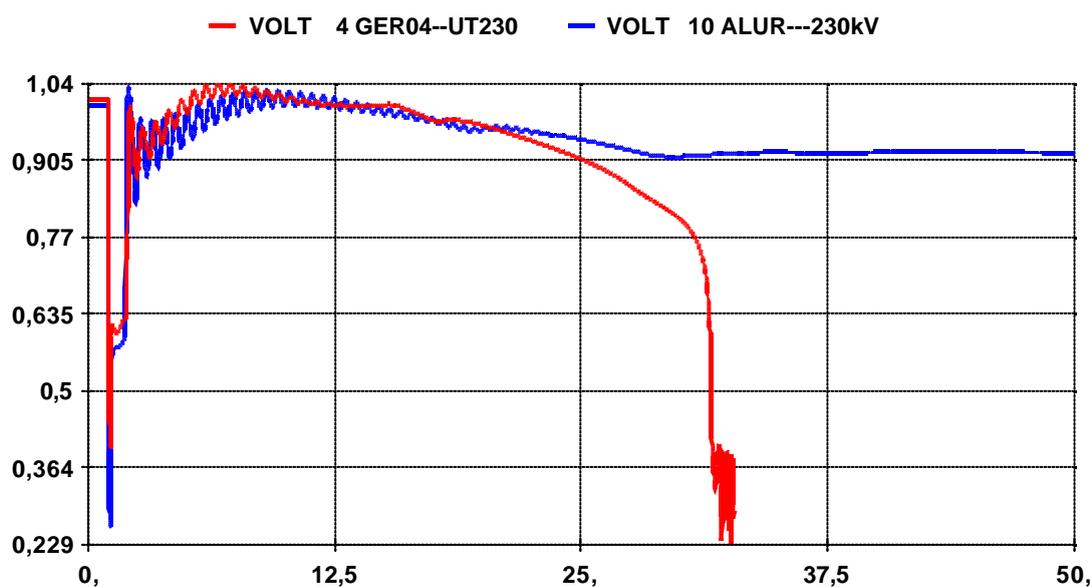


Figura 5.51 – Tensão terminal nas máquinas. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

Para dar suporte à tensão nas barras terminais, inicialmente em 1,010 pu na barra 4, e 1,002 pu na barra 10, nos casos base e *Powerformer*, respectivamente, as correntes de campo, em ambos os casos, sobem. Entretanto, no *Powerformer*, beneficiado pelo valor referencial de tensão um pouco inferior, a elevação da corrente não é tão acentuada, o que provoca a atuação da limitação de excitação em um instante de tempo posterior ao caso do gerador convencional, mesmo considerando-se que a função de limitação é idêntica nos dois casos.

Na figura 5.52, a tensão na barra 10 para os dois casos:

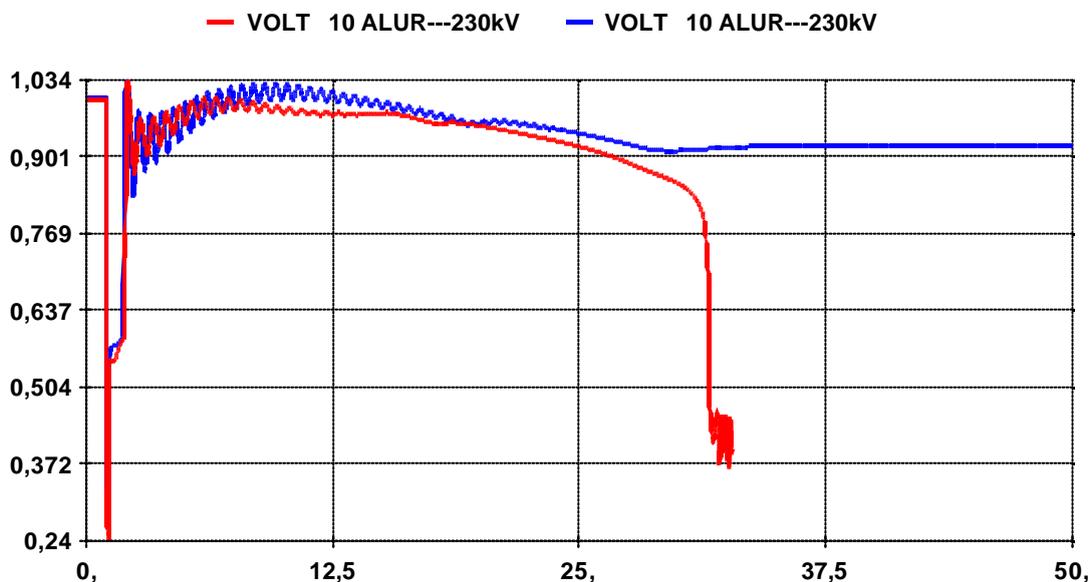


Figura 5.52 – Tensão na barra 10. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A limitação de excitação provoca, no caso *Powerformer*, a estabilização da tensão na barra em um nível baixo, em torno de 0,91 pu. Conseqüentemente, as tensões nas barras próximas também serão afetadas.

A figura 5.53 mostra a tensão nas barras de carga do sistema no caso *Powerformer*, em que se configura a estabilização da tensão na barra 14 em um nível proibitivo, 0,91 pu; caracterizando-se a inviabilidade da operação do sistema sob essa condição.

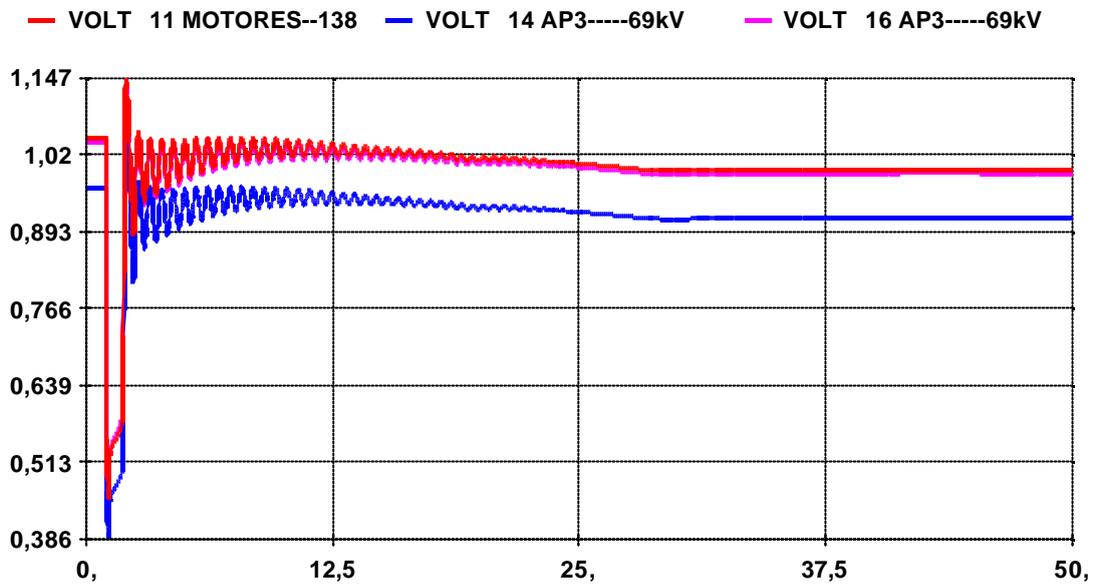


Figura 5.53 – Tensão nas barras 11 (em vermelho), 14 (em azul) e 16 (em rosa).

Na figura 5.54 a seguir, o suporte à injeção de potência reativa no sistema, para os dois casos:

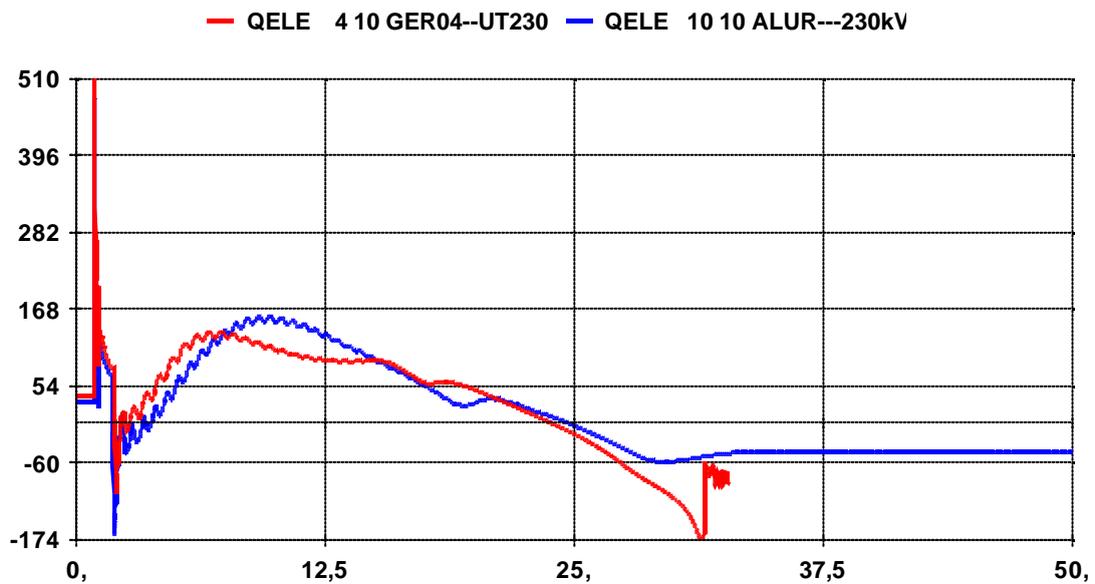


Figura 5.54 – Potência reativa dos geradores. Em vermelho, o caso base; em azul, o caso *Powerformer*

A atuação do limitador faz com que o *Powerformer* passe do estado de sobreexcitação para o de subexcitação, fazendo com que o Compensador Estático na barra 9 tenha que assumir, teoricamente, um nível de capacitância proibitivo para dar suporte à potência reativa na planta, em torno de 410 Mvar.

A figura 5.55 representa esta situação:

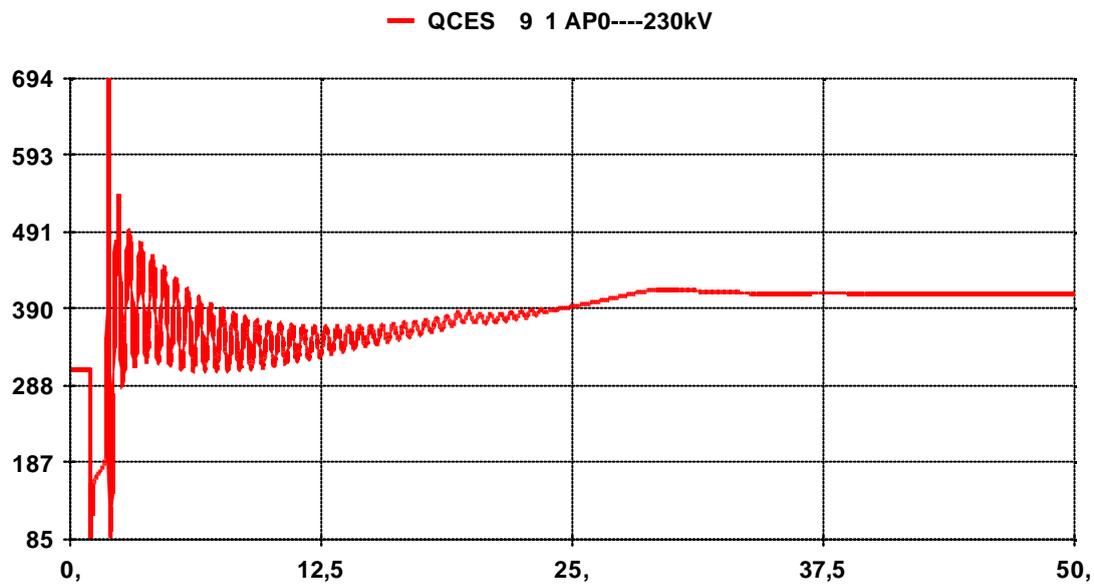


Figura 5.55 – Injeção de potência reativa pelo CER da barra 9, caso *Powerformer*.

Adicionalmente, para compensação da limitação de suporte à potência reativa provocada pelo limitador de excitação do *Powerformer*, as usinas hidrelétricas nas barras 1 e 2 passam do regime de subexcitação para o de sobreexcitação, porém em um nível proibitivo, como mostra a figura 5.56.

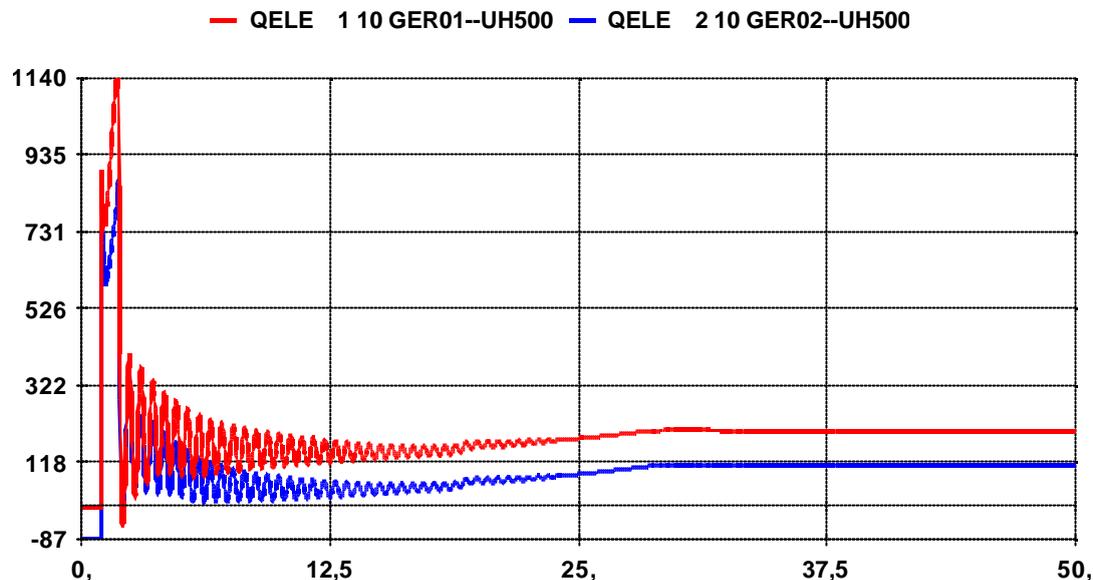


Figura 5.56 – Injeção de potência reativa na planta pelas usinas nas barras 1 (em vermelho) e 2 (em azul), caso *Powerformer*.

5.7.2.3 – Análise dos resultados

Pode-se afirmar que, sob essa contingência, o *Powerformer* instalado na barra de alta tensão, 10, traria, a princípio, estabilidade ao sistema, o que não seria possível através da operação de um gerador convencional na barra 4. Entretanto, seria necessário adotarem-se medidas que propiciassem um melhor suporte de potência reativa.

A atuação do limitador de sobreexcitação foi verificada em ambos os casos, porém a maior tolerância à sobrecarga na corrente de estator no *Powerformer* não influenciou, nesse caso, na estabilização da planta, uma vez que a sua atuação, por excessiva corrente de estator, não foi ativada em nenhum dos cenários. O limitador, em ambos os casos, teve atuação disparada pela excessiva corrente de campo e, conforme já mencionado, a utilização de um rotor de máquina convencional no *Powerformer* provocou a atuação da limitação de maneira similar a de um gerador convencional. Entretanto, beneficiando-se de uma menor corrente de campo necessária para dar suporte à tensão na barra terminal, no *Powerformer*, a atuação do limitador ocorreu em um intervalo de tempo maior do que no caso do gerador convencional (15,2 segundos

contra 23,1 segundos), permitindo um melhor suporte de tensão na barra terminal e uma menor variação do ângulo de carga, o que tornou o sistema estável, mesmo que com perfil de tensões inadequado.

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho propôs-se condensar informações sobre o *Powerformer*, um novo tipo de gerador de energia elétrica que tem como característica principal a utilização de cabos de alta tensão, similares àqueles utilizados em redes de transmissão de energia elétrica, no enrolamento do estator.

Inicialmente, foram detalhados os aspectos construtivos da máquina; em seguida, foi simulada a operação de um *Powerformer* em um pequeno sistema, comparando-a com um gerador convencional.

Neste trabalho optou-se por representar as reatâncias do *Powerformer* de forma similar a uma máquina convencional de mesma potência nominal, inclusive configurando-se a utilização de um rotor idêntico.

Essas considerações levaram a resultados que devem ser criteriosamente analisados. A consideração de reatâncias idênticas revela, de imediato, uma melhoria na estabilidade angular da planta, pois a comparação entre os casos de operação com uma máquina convencional e com o *Powerformer* se diferenciará apenas pela ausência da reatância do transformador elevador no sistema. Por outro lado, haverá prejuízo na limitação da corrente no caso de curtos-circuitos sem envolvimento de terra, especialmente aqueles próximos à barra de operação do *Powerformer*. Da mesma forma que em uma máquina convencional, convém ao projetista buscar, para o *Powerformer*, um valor de reatâncias que possa equilibradamente prover vantagens sob os dois aspectos.

O perfil de carregamento do sistema constitui também fator primordial na avaliação da operação do *Powerformer* em comparação a uma máquina convencional. Numa planta em carga leve que demande das máquinas em determinada usina a operação em regime de subexcitação, a operação do *Powerformer* não será vantajosa,

pois, em virtude da ausência do transformador elevador, haverá uma absorção de potência reativa pelo *Powerformer* maior do que aquela efetuada por um gerador convencional instalado na mesma barra, que poderia até trabalhar em sobreexcitação no mesmo cenário de carga.

Do ponto de vista da estabilidade eletromecânica, é fundamental destacar-se a utilização de rotores similares aos de máquinas convencionais em geradores de alta tensão, prática adotada nas seis máquinas existentes atualmente no mundo. Para a adequada proteção dos enrolamentos de estator e de campo, o limitador de sobreexcitação deve monitorar as correntes nos dois enrolamentos, atuando caso quaisquer delas ultrapasse limites pré-definidos. Como o *Powerformer* utiliza em seu estator cabos de alta tensão, há uma tolerância acentuada quanto à ocorrência de correntes elevadas, pois a máquina suporta sobrecorrentes por um período de tempo superior ao de uma máquina convencional. Entretanto, a utilização de rotores convencionais anula essa aparente vantagem, uma vez que a limitação da corrente de campo, em patamar similar ao de uma máquina convencional, provocará a atuação do limitador de sobreexcitação de maneira idêntica a de um gerador convencional.

A atuação de um modelo de limitador de sobreexcitação adaptado para o *Powerformer* foi criteriosamente analisada neste trabalho, com especial atenção à dinâmica de longo prazo, criando-se situações que caracterizam a deficiência ao suporte de potência reativa na planta, com a conseqüente necessidade de injeção de potência reativa no sistema, seja pela máquina convencional ou pelo *Powerformer* considerado em sua substituição. No sistema estudado, não configurou vantagem a maior tolerância do *Powerformer* em relação a sobrecarga no estator, devendo-se isto à peculiaridade do sistema escolhido para análise. A existência de uma barra central na planta, número 9, tendo sua tensão controlada por um Compensador Estático, e eletricamente próxima à barra de operação do *Powerformer*, reduz a solicitação de potência reativa da máquina, não permitindo o aproveitamento pleno da característica avançada do limitador de sobreexcitação.

Estudos futuros podem vislumbrar o desempenho do *Powerformer* em sistemas elétricos com características substancialmente diferentes deste analisado neste trabalho, como, por exemplo, abordando em maior detalhe a característica do não-aterramento do

neutro da máquina e seu papel em sistemas que apresentem alto nível de curto-circuito, ou, ainda, considerando a ausência da reatância do transformador elevador, contemplar a operação da máquina em sistemas em que haja restrições quanto à estabilidade angular. Adicionalmente, pode ser estudado o desenvolvimento de condutores de maior capacidade térmica para utilização no enrolamento do rotor do *Powerformer*, a fim de que se tenha maior proveito na utilização da máquina no suporte à injeção de potência reativa na planta, como analisado neste trabalho.

Referências Bibliográficas:

ALFREDSON, STEFAN, HERNNAS, BO, BERGSTRON, HANS, “*Assembly of Generators with Rated Voltage higher than 100 kV*”, 0-7803-6338-8/00, IEEE 2000.

AUMULLER, CRAIG ANTHONY, SAHA, TAPAN KUMAR, “*Investigating the impact of Powerformer on Voltage Stability by Dynamic Simulation*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No.3, Agosto 2003a.

AUMULLER, CRAIG ANTHONY, SAHA, TAPAN KUMAR, “*Determination of Power System Coherent Bus Groups by Novel Sensitivity-Based Method for Voltage Stability Assessment*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No.3, Agosto 2003b.

BASILESCO, J., TAYLOR, J., “*Report on methods for earthing of generator step-up transformer and generator winding neutrals as practiced throughout the world*”, Electra- Cigré Report, Convener, Working Group, nº 121, Nov-Dez, pp (89-101) , 1988.

BERUBE, G. ROGER, HAJAGOS, LES M., BEAULIEU R.E., “*A utility perspective on under-excitation limiters*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 10, Nº 3, Setembro 1995.

CEPEL, *Manual do Usuário do Programa de Análise de Redes – ANAREDE*. Rio de Janeiro, Brasil, Janeiro 2003.

CEPEL, *Manual do Usuário do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – ANATEM*. Rio de Janeiro, Brasil, Dezembro 2002.

CEPEL, *Manual do Usuário do Programa de Análise de faltas – ANAFAS*. Rio de Janeiro, Brasil, Dezembro 1998.

CHOWDHURY, BADRUL H., TAYLOR, CARSON W., “*Voltage Stability Analysis : V-Q Power Flow Simulation versus Dynamic Simulation*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 15, N°4, Novembro 2000.

DARVENIZA, M., SAHA T.K., BERRGGREN B., et al, “*A research project to investigate the impact of Electricity System Requirements on the design and optimal application of the Powerformer*”, 0-7803-7285-9/01, IEEE 2001.

DETTMER, ROGER, “*The Heart of a new Machine*”, IEEE Review, Novembro 1998.

FORSSANDER, T., “*Revista Electra*”, Cigré, N° 189, Abril 2001.

HURLEY J.D., BIZE L.N., MUMMERT C.R., “*The adverse effects of excitation system Var and Power factor Controllers*”, IEEE Transactions on Energy Conversions, Vol 14, N° 4, Dezembro 1999.

IEEE TASK FORCE ON EXCITATION LIMITERS, “*Recommended Models for Overexcitation Limiting Devices*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.10, No 4, Dezembro 1995.

IEEE TASK FORCE ON EXCITATION LIMITERS, “*Underexcitation Limiter Models for Power System Stability Studies*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.10, No 3, Setembro 1995.

IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, “*IEEE Recommended practice for excitation system models for power system stability studies*”, IEEE Std, 421.5-1992, 10 de agosto de 1992.

JOHANSSON, STEFAN G., LARSSON, BERTIL, “*Short-circuit tests on a high voltage, cable wound hydropower generator*”, IEEE transactions on Energy Conversion, Vol 9, N°1, Março 2004.

KUNDUR, P., “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1994.

LEIJON, MATS., “*Novel Concept in High Voltage engineering: Powerformer*”, ABB Corporate research, Vasteras, Sweden, Conference Publication N° 467, High Voltage Engineering Symposium, 22-27, Agosto 1999.

LEIJON, MATS., “*Powerformer – una machine tourante résolument neuve*”, Revue ABB, Fevereiro 1998.

LEIJON, MATS, JOHANSSON, STEFAN G., OWMAN, FREDRIK, et al, “*Powerformer – Experiences from the application of extruded solid dielectric cables in the stator winding of rotating machines*”, 0-7803-5935-6/00 – IEEE 2000a.

LEIJON, MATS, JOHANSSON, STEFAN G., OWMAN, FREDRIK, et al, “*Powerformer – The Prototype and Beyond*”, 0-7803-5935-6/00, IEEE 2000b.

LEIJON, MATS, GERTMAR, L., KARLSSON T, et al, “*Breaking Conventions in Electrical Power Plants*”, Cigré Session, Paris, Setembro, pp 1-8, 1998.

LEIJON, MATS; SRIVASTAVA, K.N.; FRANKÉN, BENGT, et al, “*Generators connected directly to high voltage network*”, 3rd Int. Research and Development Conf. of Central Board of Irrigation and Power, Aurangabad, India, 29 Fevereiro a 3 Março, 2000.

LINDHAL, STURE, “*Improved Control of Field Current Heating for Voltage Stability Machine Design – Powerformer*”, Columbus, OH, IEEE/PES Winter Meeting, 28 de Janeiro a 1 de Fevereiro de 2001.

MCDONALD, J.D.F., SAHA, T.K., “*Preliminary investigations into the influence of generator and transformer impedance on power system fault behaviour*”, 3rd Int. Research and Development Conf. of Central Board of Irrigation and Power, Aurangabad, India, 29 Fevereiro a 3 Março, 2000.

MONTICELLI, A.J., “*Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*”, Editora Edgar Blucher Ltda., 1983.

MUMMERT, C. RICHARD, “*Excitation System Limiter Models for use in System Stability Studies*”, 0-7803-4893-1/99, IEEE 1999.

MURDOCH, A., BOUKARIM, G.E., D’ANTONIO, M.J. et al., “*Generator Over Excitation and Excitation System Limiters*”, Columbus, OH, Panel Session Summary for the IEEE/PES 2001 WPM.

ROCHA, GERSON FREDERICO CABRAL DA, “*Análise do desempenho dinâmico de alternativas de expansão de geração - geração hidráulica distante versus geração térmica local*”, Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/RJ, Março 2004.

STEVENSON, WILLIAM D. Jr; “*Elements of Power System Analysis*”, 4ª edição, McGraw Hill, 1982.

TAYLOR, C.W., “*Power System Voltage Stability*”, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1994.

TAYLOR, C.W., “*Line Drop Compensation, High Side Voltage Control, Secondary Voltage Control – Why not control a generator like a static Var Compensator ?*” – Panel session on Power Plant Secondary (High Side) Voltage Control, IEEE/PES 2000 Summer Meeting, Seattle, Washington, 16-20 Julho 2000.

TAYLOR, C.W., MECHEMBIER, JEFF R., MATTHEWS, CHARLES E., “*Transient Excitation Boosting at Grand Coulee Third Power Plant: Power System Application and Field Tests*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 8, N°3, Agosto 1993.

TAYLOR, C.W., TESEMA, BERHANU K., “*Voltage Stability: Review of Field and Armature Current Limits*”, VIII Symposium of Specialist in Electric Operational and Expansion Planning, Brasília, Brasil, 19 a 23 de Maio de 2002.

TOUMA-HOLMBERG, MARGUERITE, “*Supression of Slot Discharges in a cable Wound Generator*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, N° 3, Setembro 2003.

ULVSGARD, JORGEN, “*From idea to innovation*”, Revista High Voltage, ABB Suécia, 1998.

WEEDY, B.M., CORY, B.J., “*Electric Power systems*”, 4^a edition, John Wiley Sons, New York, NY, USA 1998.