

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA
ÊNFASE ELETROTÉCNICA**

GUILHERME ERNESTO ZIMMERMANN

RODRIGO TAKASHI HIRAMATSU

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO POWERFORMER EM UM SISTEMA DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2011**

GUILHERME ERNESTO ZIMMERMANN

RODRIGO TAKASHI HIRAMATSU

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO POWERFORMER EM UM SISTEMA DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Alvaro Augusto W. de Almeida

CURITIBA
2011

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	8
1.2	POWERFORMER	9
1.3	POWERFORMER EM SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	11
1.3.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	12
1.4	DIFICULDADES E PREMISSAS	12
1.5	OBJETIVOS	13
1.5.1	OBJETIVO GERAL	13
1.5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.6	JUSTIFICATIVA	14
1.7	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
1.8	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
1.9	CRONOGRAMA	16
2	ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA	17
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	17
2.1.1	CONCEITO	17
2.1.2	VANTAGENS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	21
2.1.3	DESVANTAGENS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	22
2.1.4	ESTADO DA ARTE NO BRASIL	22
2.2	POWERFORMER	24
2.2.1	BREVE HISTÓRICO	24
2.2.2	PROJETO DO POWERFORMER	27
2.2.3	INTERLIGAÇÃO COM O SISTEMA	35
2.2.4	REATÂNCIA DO POWERFORMER E O GERADOR CONVENCIONAL	36
2.2.5	COMPORTAMENTO DO POWERFORMER DURANTE FALTAS	38
2.2.6	AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA DO POWERFORMER	39
3	MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DOS SOFTWARES	41
3.1	MODELAGEM PARA O ESTUDO DE ESTABILIDADE	41
3.1.1	ESTUDO DE ESTABILIDADE	41
3.1.2	MODELO PARA O ESTUDO DE ESTABILIDADE	44
3.1.3	SOFTWARE PARA ESTUDO DE ESTABILIDADE	46
3.2	MODELAGEM PARA O ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO	47
3.2.1	ATERRAMENTO DE GERADORES	47
3.2.2	CONSIDERAÇÕES	49
3.2.3	METODOLOGIA PARA CÁLCULO DO ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO	52
4	SIMULAÇÃO DOS SISTEMAS TESTE	57
4.1	SIMULAÇÃO DE ESTABILIDADE	57
4.2	RESULTADOS OBTIDOS NOS CÁLCULOS DE CURTO-CIRCUITO	61
5	CONCLUSÕES	64
5.1	CONCLUSÕES EM RELAÇÃO AO ESTUDO DE ESTABILIDADE	64
5.2	CONCLUSÕES EM RELAÇÃO AO ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO	66
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
6	REFERÊNCIAS	68

Lista de Figuras

Figura 1 - Estator do <i>Powerformer</i> de Porjus, Suécia. Fonte: Forrsander (2001)	9
Figura 2 - Diagrama esquemático (a) de uma planta convencional com transformador elevador, e (b) a mesma planta com um <i>Powerformer</i> conectado diretamente ao barramento. 1) Gerador, 2) chave do gerador 3) aterramento, 4) transformador elevador e 5) chave	10
Figura 3 - O cabo do <i>Powerformer</i> – condutor interno (1), camada semicondutora interna (2), material isolante (3) camada semicondutora externa (4).....	11
Figura 4 – Primeira usina de geração de energia, em Pearl Street, Nova Iorque em 1882 criada por Thomas Edison,	20
Figura 5 – <i>Powerformer</i> instalado em Porjus, Suécia.....	26
Figura 6 - Distribuição de campo elétrico em um cabo cilíndrico comparado à distribuição de campo elétrico em condutor de seção quadrada. Fonte: Leijon,Owman, (1999).....	27
Figura 7 - O cabo do <i>Powerformer</i> : condutor interno (1), camada semicondutora interna (2), material isolante (3) camada semicondutora externa (4).....	30
Figura 8 – Seção transversal do estator do <i>Powerformer</i> ,(1) rotor, (2) seção do estator, (3) dentes, (4) ranhuras, (5) condutores do enrolamento principal, (6) condutores do enrolamento do modo <i>standby</i> Fonte: Dettmer (1998).	31
Figura 9 – Distribuição da temperatura calculada do <i>Powerformer</i> instalado na Usina Hidrelétrica de Porsj.....	33
Figura 10 –Sistema de refrigeração à água utilizado no <i>Powerformer</i> - Detalhe da parte do estator do <i>Powerformer</i> com seus respectivos tubos isolantes de XLPE	34
Figura 11 – Fixação dos cabos do enrolamento nas ranhuras do <i>Powerformer</i> – (1) Núcleo laminado do estator, (2) Isolação de XLPE, (3) Condutor, (4) Cunha de fixação.	35
Figura 12 - Capacidade de sobrecarga no estator, <i>Powerformer</i> X Gerador convencional.....	36
Figura 13 - Comparação entre as correntes de curto-circuito de um sistema equipado com <i>Powerformer</i> e de um sistema convencional. (a)-Gerador convencional com transformador elevador, (b) – <i>Powerformer</i>	39
Figura 14 – Diagrama unifilar da usina de Eskilstuna com gerador convencional à esquerda e com o <i>Powerformer</i> à direita. Fonte: Leijon, Owman, 2000.....	40
Figura 15 – Comportamento do ângulo rotórico e velocidade angular na situação estável....	42
Figura 16 - Comportamento do ângulo rotórico e velocidade angular na situação instável....	43
Figura 17 - Sistema de distribuição de 34,5kV da Copel, com o ponto de conexão.	45

Figura 18 – Modelo de simulação com gerador convencional e com <i>Powerformer</i>	46
Figura 19 - Aterramento de gerador por resistência no neutro (LIMA, 2002).....	49
Figura 20 - Sequências de fase: (a) positiva, (b) negativa e (c) zero (ALMEIDA, 2011).....	50
Figura 21 - Circuito de sequência positiva no sistema convencional (à esquerda) e no sistema com <i>Powerformer</i> (à direita) (McDONALD, SAHA, 2000).	51
Figura 22 - Circuito equivalente de sequência zero no sistema convencional (acima) e no sistema com <i>Powerformer</i> (abaixo) (SOUZA, 2005).....	51
Figura 23 - Circuito de sequência positiva para o sistema convencional. Fonte: autoria própria.	53
Figura 24 - Circuito de sequência negativa para o sistema convencional. Fonte: autoria própria.	53
Figura 25 - Circuito de sequência zero para o sistema convencional. Fonte: autoria própria..	54
Figura 26 - Circuito de sequência positiva para o sistema com <i>Powerformer</i> . Fonte: autoria própria.	54
Figura 27 - Circuito de sequência negativa para o sistema com <i>Powerformer</i> . Fonte: autoria própria.	55
Figura 28 - Circuito de sequência zero para o sistema com <i>Powerformer</i> . Fonte: autoria própria.	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classificação da GD quanto aos níveis de tensão	18
Tabela 2 – Tecnologias empregadas na geração distribuída	23
Tabela 3 – Matriz energética brasileira.....	23
Tabela 4 – Plantas que utilizam <i>Powerformer</i> atualmente.....	26
Tabela 5 – Reatâncias, do <i>Powerformer</i> instalado na usina hidrelétrica de Porjus e de um gerador convencional equivalente	37
Tabela 6 - Parâmetros comparativos entre o <i>Powerformer</i> e um gerador convencional equivalente	38
Tabela 7 – Parâmetros dos elementos constituintes dos modelos.	46
Tabela 8 - Parâmetros utilizados para o cálculo de curto-circuito. Fonte: autoria própria.	52
Tabela 9 – Dados para tempo de eliminação da falta de 100ms	61
Tabela 10 - Dados para tempo de eliminação da falta de 150ms.....	61
Tabela 11 - Dados para tempo de eliminação da falta de 200ms.....	61
Tabela 12 - Valores obtidos para curto-circuito no barramento 3. Fonte: autoria própria.....	62
Tabela 13 - Valores obtidos para curto-circuito no barramento 1. Fonte: autoria própria.....	62

1 INTRODUÇÃO

1.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A necessidade de suprir a crescente demanda de energia elétrica tem aumentado a importância da Geração Distribuída (GD) nas últimas décadas. Além da necessidade de busca por fontes alternativas, o regime de competição no Setor Elétrico, adotado por vários países, resultou na descentralização da geração de energia, incentivando o uso da GD. O Brasil iniciou o incentivo a esse sistema no início da década de 90 com a reforma do Setor Elétrico. A Lei 10.848/04 (BRASIL, 2004), por exemplo, menciona a GD como um dos possíveis sistemas de geração de energia.

A GD é definida como um sistema no qual as fontes de geração de energia elétrica estão próximas de seus consumidores, independente da tecnologia e da fonte de energia (INEE, 2010). Tais tecnologias incluem: cogeneradores, geradores cujas fontes de energia são resíduos combustíveis de processo, geradores de emergência, geradores de regime *stand by*, painéis fotovoltaicos. Dentre as várias fontes alternativas de energia, encontram-se: energia eólica, biomassa, biogás, gás natural, energia solar, hidrelétrica etc.

As vantagens de se implantar este sistema em vez da geração centralizada se relacionam em um primeiro momento com a economia na transmissão, uma vez que a distância entre fonte e consumidor diminui. As perdas com transmissão, em um sistema convencional (centralizado), somam entre 5% e 10%, o que implica na necessidade de se gerar esse equivalente de perdas a mais para suprir a demanda dos consumidores (WADE, 2010). A dependência de grandes fontes de energia também diminui com a entrada de várias pequenas fontes geradoras no sistema integrado. Por consequência a confiabilidade aumenta, melhorando assim a estabilidade do sistema elétrico. Outra vantagem é a redução dos impactos ambientais desde o alagamento de grandes áreas para se construir os reservatórios, no caso das hidrelétricas, até os impactos ambientais causados pelas linhas de transmissão longas ou usinas termelétricas a carvão ou a gás natural.

1.2 POWERFORMER

Há pouco mais de uma década foram iniciados estudos acerca de um novo equipamento que pudesse inovar o conceito de geração e transmissão de energia elétrica, terreno que durante anos manteve-se estável. Idealizado pelo professor Mats Leijon da Universidade de Uppsala, Suécia (SOUZA, 2005), em 1998 foi lançado o *Powerformer* e iniciada sua primeira instalação na Suécia, Figura 1 Figura 1, com a finalidade de estudar o comportamento desta nova tecnologia em situação real.

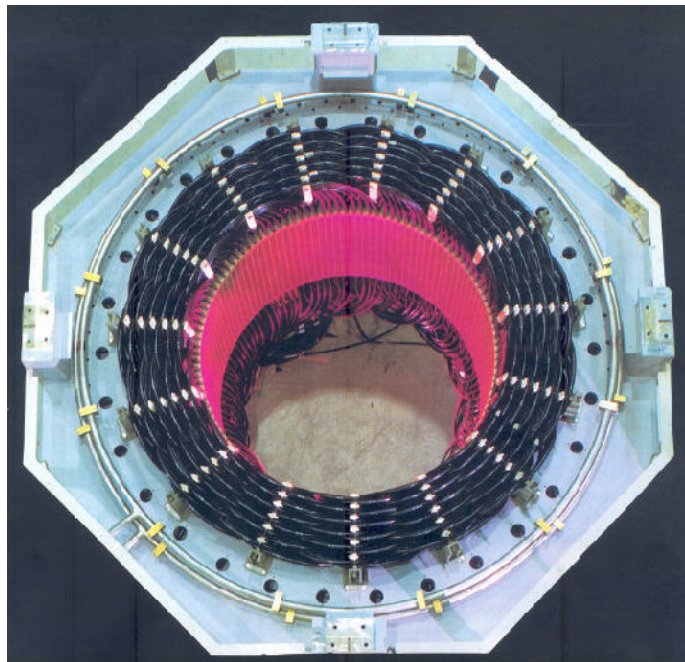


Figura 1 - Estator do *Powerformer* de Porjus, Suécia.
Fonte: Forsander (2001)

Enquanto os projetos atuais incluem em uma planta convencional um gerador e, em sua proximidade, um transformador elevador (juntamente com seus relés de proteção, disjuntores, seccionadoras, TCs e TPs), o *Powerformer* consiste apenas do gerador (METWALLY et. al., 2008). Sua grande vantagem está em gerar energia já em alta tensão e entregá-la diretamente ao sistema elétrico, sem necessidade de transformações de tensão. Além disso, o fato de se minimizar o espaço físico necessário para operação acarreta em redução de custos tanto em obras civis como em projetos, devido à sua simplificação. A Figura 2 apresenta o diagrama

esquemático comparando uma planta convencional com transformador e uma planta com *Powerformer* conectado diretamente no barramento.

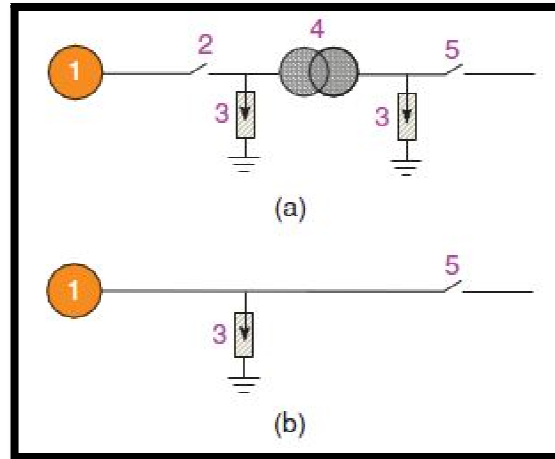


Figura 2 - Diagrama esquemático (a) de uma planta convencional com transformador elevador, e (b) a mesma planta com um *Powerformer* conectado diretamente ao barramento. 1) Gerador, 2) chave do gerador 3) aterramento, 4) transformador elevador e 5) chave

Fonte: Leijon (1999)

O funcionamento do *Powerformer* é baseado em fundamentos conhecidos e estudados há muito tempo, mas aplicados de forma inovadora. O primeiro deles é o uso, no enrolamento do estator, de cabos de alta tensão similares aos utilizados em linhas de transmissão, em formato arredondado, conforme a figura 1, em vez das barras retangulares convencionais alojadas em ranhuras. Com base nas equações de Maxwell, um condutor cilíndrico fornece uma melhor distribuição de campo elétrico e magnético, o que é comprovado pela permanência do campo elétrico na região final do *Powerformer*. A tecnologia também é inovadora, pelo uso de cabos de alta tensão com a tecnologia XLPE (Figura 3), que permite tensões de até 500kV (embora ainda não seja viável a operação com esse nível de tensão devido à limitação construtiva no isolamento).

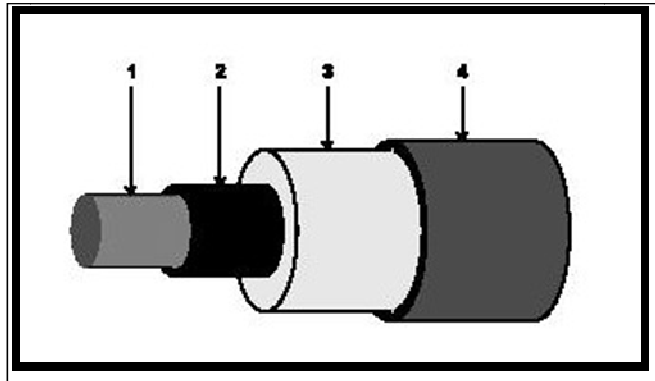


Figura 3 - O cabo do *Powerformer* – condutor interno (1), camada semicondutora interna (2), material isolante (3) camada semicondutora externa (4)

Fonte: Leijon (1999).

Quando da operação de dois ou mais equipamentos, o paralelismo é realizado diretamente na barra de alta tensão. Em caso de parada ou de manutenção, há uma melhor capacidade de suporte de potência reativa ou mesmo operação em regime de sobre excitação (AUMULLER, 2003).

1.3 **POWERFORMER EM SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

A matriz energética do Brasil é predominantemente hidrelétrica, com a energia produzida em média tensão e transmitida em alta tensão através de longas linhas de transmissão até os grandes centros consumidores, geralmente distantes.

Porém, a crescente demanda por mais energia e a legislação ambiental mais rigorosa aceleraram a procura por meios alternativos de geração, como a biomassa e a eólica. E como esses meios alternativos possuem capacidade de geração menor do que por meio das hidrelétricas, torna-se fundamental que o centro consumidor esteja próximo da geração, a fim de se evitar perdas na transmissão.

Seguindo a tendência de redução de perdas, o *Powerformer* torna-se uma nova solução. Sua utilização em uma planta reduz em grande parte o espaço físico, que por sua vez necessita de menor intervenção civil na construção; essa redução se deve principalmente ao fato de não ser utilizado um transformador elevador como na geração de energia usual, o que diminui também os custos com equipamentos de proteção, simplificando o projeto elétrico. Além disso, as perdas são menores no

Powerformer, pois a energia gerada vai diretamente ao barramento de alta tensão, e dele para a transmissão, enquanto nos sistemas usuais a energia gerada vai ao barramento em média tensão, passa por seccionadoras, disjuntores e transformador para somente assim chegar ao barramento de alta tensão (SOUZA, 2005).

No cenário nacional a legislação ambiental mais rigorosa tem estimulado a construção de PCHs. Há também outras fontes de energia, como as termelétricas convencionais e a biomassa, nas quais o uso do *Powerformer* pode ser um meio de garantir que a energia adicional gerada para compensar perdas seja aproveitada e não perdida na transmissão. Faz-se necessário salientar que a instalação do *Powerformer* pode ser ainda mais próxima do centro consumidor, visando ao máximo o aproveitamento de energia.

1.3.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho aborda a análise comparativa entre um gerador convencional com transformador elevador e de geradores de tensão de 34,5kV conectados diretamente ao sistema de distribuição de 34,5kV da Copel, sem o uso de transformador elevador. Este estudo foi dividido em duas partes:

- Levantamento de dados técnicos e a análise da viabilidade técnica desse tipo de sistema.
- Simulação da operação do *Powerformer* conectado a barramentos de 34,5 kV, quando confrontados com o gerador convencional ligado a um transformador elevador. A simulação foi realizada com o *software* Simulight (SIMULIGHT, 2004). Foram analisados os dados obtidos do estudo de estabilidade transitória e os resultados da análise de curto-circuito a partir dos modelos equivalentes dos diferentes tipos de falta.

1.4 DIFICULDADES E PREMISSAS

Na literatura não foram encontrados estudos realizados com *Powerformers* em sistemas de GD. Contudo, vale a investigação da hipótese de que os parâmetros de tais equipamentos possam se tornar adequados à GD por meio do processo de tentativa. Por se tratar de uma nova tecnologia, esta será comparada com o modelo

utilizado atualmente, o de geração com utilização de transformador elevador antes do barramento de transmissão.

Assim, o presente trabalho tem a intenção de auxiliar nos primeiros estudos com relação à introdução do *Powerformer* em um sistema de GD. Em um segundo momento, pretende-se trazer para o público o conhecimento da aplicabilidade desta tecnologia.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar o *Powerformer* como objeto de estudo em uma análise da viabilidade técnica do referido gerador ao ser inserido em um sistema de GD conectado diretamente nos barramentos de distribuição, comparando com o sistema atual, composto de gerador com transformador elevador.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo específico do presente trabalho será realizar um estudo de desempenho de um sistema de GD com o *Powerformer* ligado diretamente nos barramentos de tensão de 34,5kV. Tal objetivo pode ser dividido da seguinte forma:

- Análise de dados técnicos do sistema de geração.
- Levantamento e modelagem dos parâmetros de um sistema elétrico de GD.
- Simulação de um sistema de geração convencional e de um sistema de geração com *Powerformer*, dos pontos de vista de estabilidade transitória e de curto-circuito. Para atender a tal objetivo serão simulados estudos de estabilidade e de curto-circuito.

- Análise comparativa do desempenho do sistema de GD com o uso do *Powerformer* e sem sua utilização.

1.6 JUSTIFICATIVA

Na literatura não foram encontrados estudos relacionados ao *Powerformer* atuando em sistemas de geração distribuída. Contudo, o *Powerformer* pode vir a ser mais adotado no futuro como uma tecnologia que alia menores custos de geração a uma maior confiabilidade e estabilidade. Por ser um equipamento utilizado em substituição a um conjunto de geração (gerador convencional com transformador elevador, com seus equipamentos de controle, proteção e manobra associados), os projetos serão mais simplificados. A estrutura física reduzida e a necessidade de menor número de equipamentos de proteção também são de interesse, sem perder o foco do benefício ao setor energético.

1.7 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho tem sua estrutura concentrada inicialmente o estudo da viabilidade técnica. Serão utilizadas literaturas, projetos, pesquisas e também entrevistas com especialistas na área. Em um segundo momento será realizada a análise do *Powerformer* inserido em um sistema de GD, no qual os dados coletados serão originários da modelagem e simulação pelo *software* Simulight. Também serão consultados na literatura, projetos e pesquisas com os métodos de modelagem e simulação do referido *software*.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho será composto de sete capítulos principais, sendo:

- Capítulo 1 – Introdução: Compreende a apresentação dos conceitos e histórico envolvidos no presente trabalho: geração distribuída, *Powerformer* e a proposta de estudo da união destes conceitos. Objetivo geral e específico, método de pesquisa.

- Capítulo 2 – Análise de Viabilidade Técnica e Econômica: Este capítulo envolve a pesquisa sobre o estado da arte do *Powerformer*, geração distribuída, métodos de modelagem de sistemas elétricos e a avaliará a viabilidade técnica e econômica de se implantar o *Powerformer* no sistema de geração distribuída.
- Capítulo 3 – Modelagem do Sistema de Geração Distribuída e do *Powerformer*: A modelagem realizar-se-á de acordo com o método especificado no capítulo anterior.
- Capítulo 4 - Análise do Sistema de Geração Distribuída com e sem *Powerformer* via Software: Os dois sistemas serão simulados e os dados serão coletados e comparados.
- Capítulo 5 – Conclusões: Apresentará o resultado desta análise com relação a possíveis vantagens e desvantagens e apresentá-las quantitativamente;
- Capítulo 6 – Referência bibliográfica;
- Capítulo 7 – Apêndices;

1.9. CRONOGRAMA

Etapa	Desenvolvimento														
	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro
Trabalho de Conclusão de Curso															
Metodologia Aplicada ao TCC															
Estudos Preliminares sobre Powerformer															
Pesquisa de Geração Distribuída															
Elaboração da Proposta															
Entrega da Proposta															
Trabalho de Conclusão de Curso 1															
Estudos de Viabilidade Técnica e Econômica															
Estudos de Modelagem															
Defesa TCC 1															
Trabalho de Conclusão de Curso 2															
Simulação e coleta de dados do Sistema Modelado															
Análise dos dados e conclusão															
Defesa Final															

2 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

2.1.1 CONCEITO

Atualmente já existe certo consenso sobre a definição de Geração Distribuída (GD), tanto pela literatura como pelo fato desta ser regulamentada gradativamente por governos de diversos países, inclusive no Brasil. Porém, a análise da literatura dessa área mostra que as definições existentes para GD até pouco tempo atrás não eram de todo consistentes, existindo várias definições acerca deste conceito, conforme destacado por Ackermann; Andersson (2001). Uma possível lista foi proposta e discutida por (EL-KHATTAM, SALAMA 2004) El-Khattam; Salama (2004), na qual inclui-se a consideração de vários critérios para a classificação de uma GD, chegando-se ao fim a uma definição consistente e condizente com a maioria dos conceitos apresentados até então. Tais aspectos são apresentados e analisados individualmente a seguir. São eles: propósito; a localização; a especificação da potência; a área de entrega da energia gerada; a tecnologia; o impacto ambiental; o modo de operação; a propriedade; e o nível de penetração.

1. Propósito - dividido em subcategorias, são elas listadas a seguir seguidas de exemplos:
 - Propósito técnico de engenharia: prover ou não uma fonte de energia ativa ou reativa;
 - Propósito econômico: utilização da reserva energética para garantir o fornecimento de energia elétrica das cargas elétricas nos horários de alta demanda;
 - Propósito ambiental: substituição de geração de energia poluente com objetivo de eliminar ou diminuir a poluição ambiental.
 - Propósito social: casos em que não há a possibilidade de alimentar cargas para as quais não há possibilidade de alimentação por outra fonte de geração, especialmente por rede elétrica convencional.

Sob esse ponto de vista, essa classificação não é relevante para a definição de GD, porém é extremamente importante para a análise quanto à finalidade de um empreendimento de geração elétrica (SEVERINO et. al., 2008).

2. Localização – subdividido em três subcategorias:

- Sistema de transmissão: Podem ser conectados diretamente à rede ou do lado do consumidor.
- Sistema de distribuição: conexão direta à rede ou do lado do consumidor (como carga isolada ou como conexão indireta à rede).
- Instalação Isolada: pode ser fonte única, parte de um sistema híbrido ou coexistente com outras fontes de GD com operações independentes.

A definição de localização da GD, sendo de base técnica ou legal, é aspecto de maior relevância, pois, independente da potência nominal das usinas de GD, esta categoria possui caráter decisório na classificação de uma usina geradora como fonte de GD ou não (SEVERINO et. al., 2008).

3. Especificação da potência – Uma classificação proposta por Ackermann; Andersson (2001) sofreu uma adaptação por Severino et. al. (2008) para flexibilizar o limite máximo de 30 MW definido pelo Decreto n.º 5.163/2004 (BRASIL, 2004) para a GD, como demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da GD quanto aos níveis de tensão

Micro GD	Pequena GD	Média GD	Grande GD
< 10 kW	10 kW a 500 kW	500 kW a 30 MW	> 30 MW

Fonte: adaptado de: Severino et. al. (2008)

Área de entrega da energia gerada – Para alguns autores, a energia gerada deve ser consumida no mesmo local em que foi gerado para se caracterizar uma GD, porém mesmo tendo tal característica, um projeto de geração de energia pode não ser qualificado como GD (ACKERMANN, ANDERSSON, 2001).

Devido a esta situação contraditória, a definição de GD não considera a área de entrega da energia gerada (SEVERINO et.al., 2008).

4. Tecnologia - São várias as tecnologias utilizadas em GD e muito diferentes entre si (ACKERMANN, ANDERSSON, 2001), tais como tecnologia de geração eólica e de biomassa, por exemplo. Conceitos como fontes alternativas de energia (diferentes das fontes convencionais) e fontes renováveis de energia (fontes de energia que utilizam recursos renováveis, não passíveis de esgotamento) não devem ser confundidos como definição de GD unicamente. No entanto, para a definição de GD, a tecnologia também não é considerada.
5. Aspectos ambientais - As tecnologias utilizadas para GD não podem ser descritas em sua totalidade como sendo ecologicamente corretas. Apesar de o aspecto ambiental ter mais importância atualmente, com a evolução da tecnologia de geração de energia visando minimizar impacto ambiental, este não é um critério que determina na definição da GD.
6. Modo de Operação - As regras de operação e suas classificações mudam de acordo com a legislação local.—Sendo assim, não há como inserir tal critério em uma definição ampla de GD.
7. Propriedade - A GD representa uma quebra de paradigma, ou seja, tradicionais produtores de energia serão substituídos pelos produtores independentes de energia, autoprodutores e cogeneradores. Porém, não há uma razão que impeça produtores tradicionais a se incluírem na GD. Portanto, não cabe ser considerado na definição de GD.
8. Nível de penetração - A definição não adota este critério, pois as opiniões se dividem acerca da GD se ela substitui a geração centralizada ou apenas complementa o sistema já existente.

Após a análise e discussão de todos os aspectos listados anteriormente, (ACKERMANN, ANDERSSON, 2001), propõem a seguinte definição para GD:

“Geração Distribuída é uma fonte de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição ou no lado do consumidor.”

Tal definição cita explicitamente o aspecto do propósito e o aspecto da localização da GD, uma vez que na opinião desses autores, os demais aspectos não são relevantes para a definição.

No Brasil, a GD é conceituada através da Lei 10.848/2004 e do Decreto 5.163/2004 (BRASIL, 2004), o conceito pode ser apresentado como: *“Empreendimentos conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador...”* Estes são classificados e limitados por:

- Hidráulicos ≤ 30 MW
- Termelétricos e cogeração com eficiência ≥ 75 %
- Os que utilizam biomassa e resíduos de processo podem ter qualquer nível de eficiência.

Ao considerar o conceito atual de GD, pode-se afirmar que as primeiras redes de distribuição elétrica, criadas por Thomas Edison e a Westinghouse, eram GD, pois alimentavam cargas próximas devido à limitação quanto à transmissão de energia e ao fato de serem baseadas em transmissão de corrente contínua, o que limitava os níveis de tensão (DRIESEN, BELMAN, 2006). A Figura 4 ilustra a primeira usina de geração de energia a carvão em 1882 situada em Pearl Street, Nova Iorque, criada por Thomas Edison.



Figura 4 – Primeira usina de geração de energia, em Pearl Street, Nova Iorque em 1882 criada por Thomas Edison, fonte: World of Energy (2011)

Com a evolução tecnológica e com o surgimento dos transformadores, surgiu a transmissão em corrente alternada permitindo o transporte de energia elétrica a longas distâncias, e a viabilidade econômica permitiu a geração em potências cada vez mais elevadas. O resultado foi a maior comodidade e menor custo por unidade, surgindo então a geração centralizada, composta por grandes malhas e redes de distribuição radiais alimentados por grandes usinas (DRIESEN, BELMAN, 2006). A confiabilidade foi assegurada através de redundâncias em todo o sistema.

Contudo, na última década inovações tecnológicas e um ambiente econômico (livre mercado de energia) e regulatório (leis ambientais cada vez mais restritivas) favorecido resultaram em um interesse renovado para a GD (IEA, 2002).

2.1.2 VANTAGENS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Ao citar a utilização de geração distribuída e nominar suas vantagens, é necessário correlacionar a idéia de que sua função básica é a proximidade da geração com a carga ou centro de consumo. E pode-se citar uma das principais aplicações a esse respeito quando se fala sobre geradores de emergência. Não há como imaginar atualmente, por exemplo, um hospital de grande porte operando em dependência apenas do fornecimento de concessionárias.

Com essa mentalidade, podem-se destacar no cenário atual algumas vantagens importantes da GD. Primeiramente citando uma via de duas mãos, que é o atendimento rápido da demanda. Se há um cliente ou uma carga para atender, para o fornecedor é sinônimo de lucro. Com isso, uma construção de novas usinas – UHE mais especificamente – despenderia de muitos meses e algumas subestações ao longo do caminho, bem como torres, equipamentos de proteção, relés etc. Então, neste aspecto, uma instalação através de GD reduz drasticamente o tempo e os custos de entrada em operação, ou pode adiar reforços no sistema de transmissão e distribuição da rede. Também há a diminuição de custos na implementação de uma usina GD pela proximidade da carga consumidora, e conseqüente redução das perdas existentes na transmissão.

Outro ponto a se considerar é a confiabilidade e a estabilidade do sistema. Para a GD, estar perto da carga significa menor utilização de equipamentos de proteção devido ao caminho reduzido até a mesma. E a maior estabilidade se deve ao aumento na oferta de energia.

Em escala nacional, o aumento da participação da GD no sistema leva a uma oportunidade maior de comercialização da energia, incentivando concorrência no mercado. Além disso, por conta das fontes e tecnologias empregadas na geração, pode-se apontar como uma vantagem a diversificação da matriz energética e, dependendo da fonte, menor agressão à natureza.

2.1.3 DESVANTAGENS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Com o aumento da concorrência, há desvantagem no número de pedidos de acesso de Produtores Independentes de Energia (PIE) que querem entrar no mercado atacadista de energia. Além deles, também entram nesse mercado os Autoprodutores de Energia (APE) e Cogeneradores, pensando na venda do excedente. Com isso, o número de empresas atuantes no sistema vai aumentar significativamente, tornando mais complexo o planejamento e a operação do setor elétrico.

Segundo Willis e Scoot (2000), a compra e operação de uma unidade de GD requerem grande preocupação, já que deve ser garantido o atendimento da carga. Também se deve levar em conta o combustível usado e a fonte de recurso, por exemplo, uma microturbina a gás natural deve estar em uma localização atendida por gasodutos. Ainda segundo o autor, o uso de tecnologias recentes gera insegurança quanto à durabilidade, pois as empresas tendem a otimizar recursos e reduzir gastos com energia.

2.1.4 ESTADO DA ARTE NO BRASIL

A geração distribuída envolve tecnologias e fontes de energia de diferentes tipos, sendo que cada uma possui sua particularidade e consequente aplicabilidade em cada situação.

Segundo Rodriguez (2002), as tecnologias de geração distribuída podem ser diferenciadas pela fonte de combustível, pelo tipo de combustível e pela capacidade de geração, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Tecnologias empregadas na geração distribuída

Tecnologia	Fonte de Combustível	Interface	Pequeno <100kW	Intermediário 100kW-1MW	Grande >1MW
Motores recíprocos com geradores síncronos ou de indução	Combustível fóssil e biogás	Conexão direta	X	X	X
Pequenas turbinas a gás	Combustível fóssil e biogás	Conexão direta			X
Micro-turbinas	Combustível fóssil	Inversor	X	X	
Células Combustíveis	Combustível fóssil e renovável	Inversor	X	X	X
Geotérmico	Renovável	Conexão direta		X	X
PCH	Renovável	Conexão direta		X	X
Eólica	Renovável	Inversor	X	X	X
Fotovoltaico	Renovável	Inversor	X	X	X
Solar térmico	Renovável	Conexão direta	X	X	X
Armazenamento em baterias	Rede elétrica	Inversor	X	X	X
Armazenamento em capacitores	Rede elétrica	Inversor	X	X	
Armazenamento em volantes	Rede elétrica	Inversor		X	X
Armazenamento em supercondutores	Rede elétrica	Inversor		X	X

Fonte: Rodriguez (2002)

O Brasil possui uma matriz energética predominantemente hidrelétrica, como pode ser visto na Tabela 3:

Tabela 3 – Matriz energética brasileira

Empreendimentos em Operação							
Tipo	Capacidade Instalada			Total			
	N.º de Usinas	(kW)	%	N.º de Usinas	(kW)	%	
Hidro	908	81.102.896	66,36	908	81.102.896	66,36	
Gás	Natural	99	11.404.088	9,33	136	13.190.271	10,79
	Processo	37	1.786.183	1,46			
Petróleo	Óleo Diesel	867	3.862.213	3,16	897	6.657.340	5,45
	Óleo Residual	30	2.795.127	2,29			
Biomassa	Bagaco de Cana	334	6.455.556	5,28	408	8.149.131	6,67
	Licor Negro	14	1.245.198	1,02			
	Madeira	41	359.527	0,29			
	Biogás	13	69.942	0,06			
	Casca de Arroz	6	18.908	0,02			
Nuclear	2	2.007.000	1,64	2	2.007.000	1,64	
Carvão Mineral	10	1.944.054	1,59	10	1.944.054	1,59	
Eólica	51	998.542	0,82	51	998.542	0,82	
Importação	Paraguai		5.650.000	5,46		8.170.000	6,68
	Argentina		2.250.000	2,17			
	Venezuela		200.000	0,19			
	Uruguai		70.000	0,07			
Total	2.414	122.223.584	100	2.414	122.223.584	100	

Fonte: ANEEL (2011)

Este trabalho realizará a análise do *Powerformer* em um sistema de potência com geração distribuída, cuja tecnologia de geração será a de PCHs. A tecnologia de geração de energia elétrica das PCHs é apresentada a seguir.

Segundo a ANEEL (2011), a maior parte dos empreendimentos de geração em construção no país são as PCHs, conforme a tabela x. A classificação segundo a ANEEL (2011), para usinas hidrelétricas e apresentada a seguir:

- Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH): até 1MW de potência instalada;
- Pequena Central Hidrelétrica (PCH): entre 1,1MW e 30MW;
- Usina Hidrelétrica de Energia (UHE): acima de 30MW.

As PCHs são usinas hidrelétricas de pequeno porte, nas quais a capacidade de geração é menor comparada às UHE, não sendo necessário, portanto de grandes reservatórios, o que causa menos impacto ambiental. Geralmente são localizadas próximas às suas cargas e quando conectadas diretamente na distribuição são consideradas geração distribuída. Considerando a predominância da matriz energética de natureza hidrelétrica e a tecnologia acessível, pois o Brasil domina a tecnologia de produção de energia hidrelétrica por meio das usinas hidrelétricas, como visto na Tabela 3, os empreendimentos de PCHs atualmente se tornaram a preferência dos investidores na área de geração.

2.2 POWERFORMER

2.2.1 BREVE HISTÓRICO

O conceito de máquinas elétricas conectadas diretamente à rede não é nova, no final da década de 1920, C. A. Parsons de Newcastle desenvolveu uma série de máquinas semelhantes ao *Powerformer*. A primeira operava diretamente em tensões de 36 kV e foi encomendada para a estação de energia Treforest, no País de Gales, com sua operação iniciada no final de 1928 (LEIJON, GERTMAR, 1998).

Parsons maximizou o desempenho de isolamento de suas máquinas usando dentro das ranhuras do estator barras com seção circular. A construção do condutor Parsons foi particularmente engenhosa – formada a partir de um cabo cortado em comprimentos necessários, em que três condutores separados foram arranjados concentricamente dentro do cabo. Uma vez que o condutor havia sido colocado nas ranhuras no estator, as conexões finais foram feitas para dar três níveis de tensão - baixa, média e alta ligadas em série. O efeito líquido é que a diferença de potencial entre dois condutores foi apenas um terço da tensão da máquina, impulsionando o

desempenho da tecnologia do isolamento, então, por um fator de três. Entre 1928 e 1953, Parsons produziu 88 geradores de alta tensão com uma potência total de 3.434 MVA. Infelizmente, o mercado para tais máquinas foi prejudicado pelos crescentes níveis de tensão do sistema de potência (DETTMER, 1998).

Mats Leijon teve a ideia de um estator com cabos isolados de alta tensão e apresentou o conceito para a diretoria da ABB Corporate Research. Com orçamento de dez milhões de Kronas suecos o desenvolvimento foi realizado. Em 1995, a ABB e a Vattenfall (estatal da Suécia de energia elétrica) assinaram um contrato para a construção do primeiro protótipo da máquina. O trabalho de construção se iniciou em meados de 1996 e, 18 meses depois, a máquina fez seu primeiro teste. Na época Leijon não tinha conhecimento de trabalhos anteriores de Parsons, quando finalmente leu o artigo de Parsons em 1995, foi "surpreendido" pela simplicidade do projeto.

A ABB batizou a sua nova máquina de *Powerformer* (uma junção de gerador e transformador). O primeiro *Powerformer* do mundo, um hidrogerador de 600rpm, 11MVA e 45 kV, está atualmente instalado como unidade número 9 (U9) da Usina Hidrelétrica de Porjus, no rio Lule ao norte da Suécia (DETTMER, 1998), como pode ser visto na Figura 5.

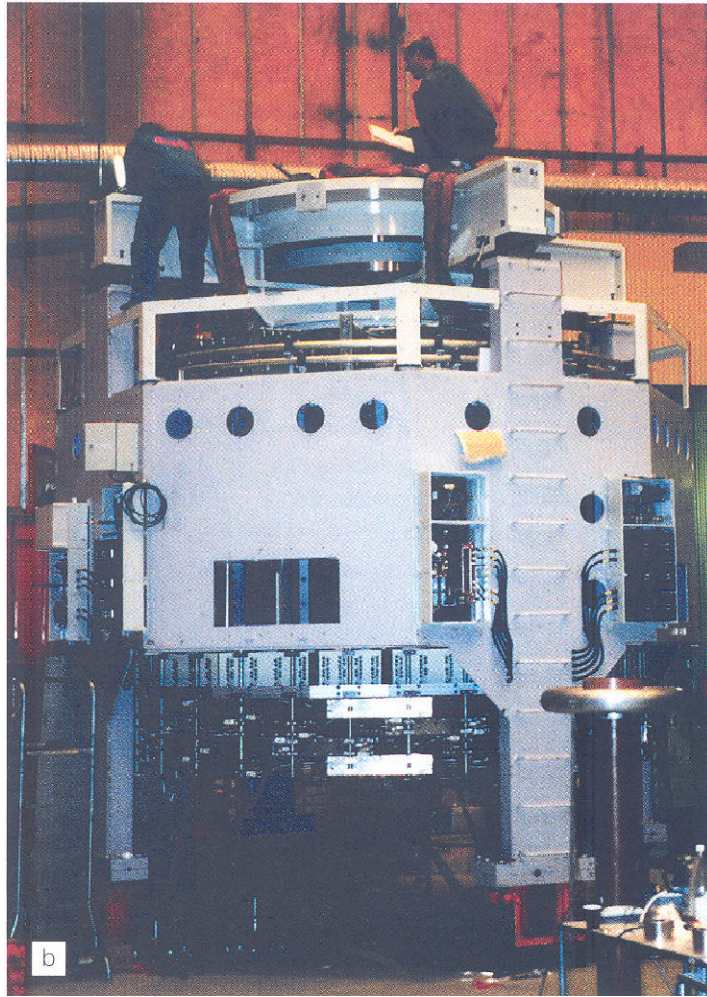


Figura 5 – *Powerformer* instalado em Porjus, Suécia

Fonte: Leijon, (1999)

Há atualmente seis geradores de alta tensão instalados no mundo, os quais estão listados a seguir (SOUZA, 2005), na Tabela 4:

Tabela 4 – Plantas que utilizam *Powerformer* atualmente

Plantas no mundo que utilizam <i>Powerformer</i>				
Usina	Ano de Comissionamento	Tipo	Tensão Nominal (kV)	Potência Nominal (MVA)
Porjus	1998	Hidro	45	11
Eskilstuna	2000	Termo	136	42
Porsi	2001	Hidro	155	75
Höljebro	2001	Hidro	78	25
Miller Creek	2002	Hidro	25	32,8
Katzurazawa	2003	Hidro	66	9

Fonte: Metwally et. al., (2008)

2.2.2 PROJETO DO POWERFORMER

2.2.2.1 CONDUTORES DE SEÇÃO CIRCULAR

A utilização das barras de seção circular apresenta uma forma de obter maior eficiência com relação ao campo magnético desses condutores, conforme citado por Leijon (1999):

“Em meados do século 19, J. C. Maxwell conseguiu descrever completamente os fenômenos da eletricidade e magnetismo em um único sistema de equações, conhecido como as equações de Maxwell. Essas equações formam a base científica para máquinas rotativas elétricas, como, por exemplo a Lei de Faraday de indução. Sem entrar em detalhes, alguns aspectos das diferentes soluções as equações de Maxwell serão brevemente discutidos aqui. Para um condutor de geometria retangular, as soluções das equações de Maxwell inferem que o campo magnético tem intensidade de campo elétrico desigual com concentrações críticas nas regiões de ângulo reto. A geometria cilíndrica do condutor, no entanto, produz uma suave distribuição do campo elétrico e magnético, que é um pré-requisito para se atingir níveis de alta tensão na máquina elétrica.”

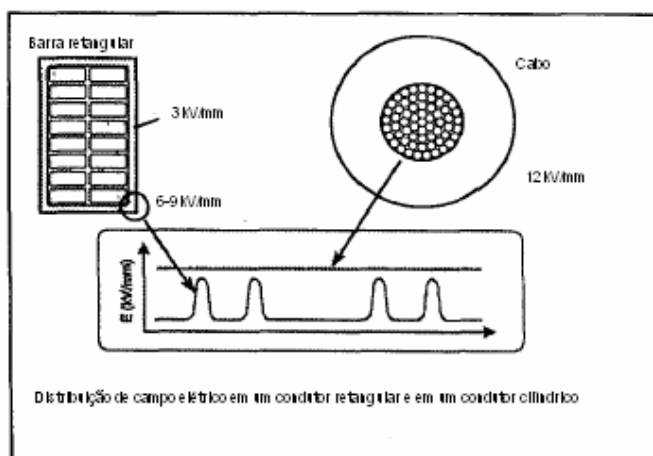


Figura 6 - Distribuição de campo elétrico em um cabo cilíndrico comparado à distribuição de campo elétrico em condutor de seção quadrada. Fonte: Leijon, Owman, (1999)

Em uma máquina elétrica com barras retangulares no estator o material do isolamento e o material magnético da máquina são utilizados em níveis elevados de esforço e não são uniformemente distribuídos, tornando difícil que a tensão de saída de um gerador convencional atinja níveis superiores a 30 kV (LEIJON, OWMAN, 1999). Isso pode acarretar em falhas no equipamento relacionadas ao esforço do material de isolamento do condutor. Assim sendo, condutores circulares tornam-se apropriados quando se deseja que o fluxo seja ótimo de modo a não danificar o isolamento do material devido ao campo uniformemente distribuído, Leijon (1999) ainda cita:

“Do ponto de vista da física, condutores circulares são a melhor escolha para os enrolamentos do estator de uma máquina elétrica. No entanto, problemas de engenharia até agora levaram o desenvolvimento dos enrolamentos em outra direção.”

O incremento de potência de saída de uma máquina elétrica requer o aumento do nível da tensão de saída ou da corrente nos enrolamentos do estator. Historicamente, devido às limitações do isolamento dos condutores, o aumento do nível de tensão tem sido impossibilitado, portanto foi utilizado o aumento do nível de corrente à medida que o aumento por demanda de energia elétrica solicitou níveis de potência cada vez maiores dos geradores (LEIJON, 1999). Assim, os geradores convencionais operam no máximo com níveis de tensão de 18kV.

No *Powerformer*, o enrolamento consiste em condutores cilíndricos com isolamento em XLPE, com uma aplicação nova de uma tecnologia originalmente desenvolvida para cabos de alta tensão. A ABB apresentou essa máquina como sendo capaz de gerar energia elétrica em tensões de até 500 kV, embora tal nível não tenha sido alcançado ainda na prática (LEIJON, OWMAN, 1999), o maior valor de tensão atingido até agora pelo *Powerformer* é de 202 kV, que operou durante um teste de sobre-excitação na usina hidrelétrica de Porsi, norte da Suécia (LEIJON, 1999).

Segundo Leijon (1999), no projeto de uma máquina elétrica quatro pontos principais podem ser destacados, e são eles: projeto elétrico, projeto magnético, projeto térmico e projeto mecânico. Em geradores convencionais não é possível fazer um tratamento independente das diferentes partes do projeto devido à

interdependência dessas partes, sobretudo com relação ao isolamento. Ainda segundo Leijon (1999) com o novo tipo de enrolamento no *Powerformer*, esses pontos podem ser tratados separadamente, possibilitando maior flexibilidade para otimizar o desempenho da máquina.

O projeto com partes independentes é possível devido aos condutores circulares que possibilitam a distribuição do campo magnético uniforme minimizando o esforço no material do isolamento e também pelas camadas semicondutoras no isolamento das barras cujas camadas confinam o campo elétrico no enrolamento. Não há interferências do campo elétrico sobre outros componentes do gerador.

2.2.2.2 PROJETO ELÉTRICO

O *Powerformer* pode ser conectado diretamente à rede elétrica sem a necessidade de um transformador elevador, isso se deve à utilização da isolação em XLPE que permite que maiores níveis de tensão sejam gerados no estator. Esse isolamento é utilizado em cabos de alta tensão subterrâneos. Atualmente, esses cabos possibilitam níveis de tensão até 500 kV, isso implica na possibilidade de se construir máquinas elétricas com tensões de saída de também de 500 kV (LEIJON, 1999). Isso permite também perdas resistivas mais baixas na máquina devido aos menores níveis de corrente. Conforme citado anteriormente, para o mesmo nível de potência de saída do gerador, o aumento da tensão permite diminuir os níveis de corrente de saída.

O enrolamento do *Powerformer* possui várias camadas concêntricas de condutores por ranhura. A espessura do isolamento aumenta à medida que se aproxima da periferia em consequência do potencial dos condutores à medida que se estes também se aproximam da periferia.

A configuração e as características do cabo isolado permitem além da otimização do material isolante, maior segurança, Leijon (1999) cita: *“É, portanto, possível a utilização de isolamento de menor espessura para o primeira volta e isolamento, em seguida, cada vez mais espessa para as camadas subsequentes. Este arranjo possibilita otimizar o volume do material isolante no estator. O projeto elétrico é ainda mais facilitado pois o campo elétrico é praticamente zero fora do cabo. Por exemplo, não há necessidade de controlar o campo elétrico de THC na*

região final da bobina como é o caso da tecnologia convencional das máquinas elétricas. A segurança também aumentou uma vez que toda camada semicondutora externa do cabo pode ser aterrada. Para a conexão dos terminais dos cabos no enrolamento do Powerformer, componentes já existentes no mercado podem ser utilizados.”

O cabo de XLPE utilizado para o enrolamento do estator possui as camadas interior e exterior sendo semicondutoras e a isolação é sólida (Figura 7).

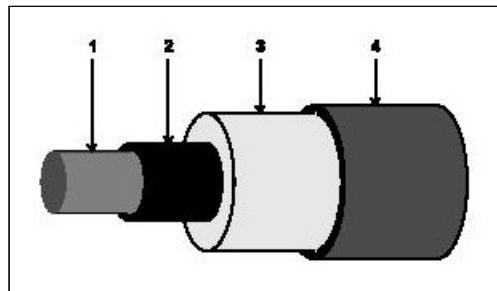


Figura 7 - O cabo do *Powerformer*: condutor interno (1), camada semicondutora interna (2), material isolante (3) camada semicondutora externa (4)

Fonte: Leijon, Owman (1999)

Para evitar correntes de Foucault a maioria dos condutores possui o material isolante apresentado na figura 7, apesar de em determinados projetos são deixados sem isolamento para proporcionar o contato elétrico com o a camada interior do semicondutor. O uso de "semicondutores" no contexto de cabos de energia pode ser um pouco confuso, seu uso neste caso visa utilizar-se de suas características para finalidades diferentes em cada camada, como Dettmer (1998) cita: “*isolante pobre’ pode ser uma melhor expressão neste caso. O objetivo da camada interna é criar um campo elétrico uniforme na superfície interna da camada de isolamento, enquanto a camada externa atua para limitar o campo elétrico dentro do isolador.*”

2.2.2.3 PROJETO MAGNÉTICO

O estator do *Powerformer* é formado por um núcleo laminado construído em aço. As ranhuras do estator são radialmente cilíndricas com furos percorrendo axialmente o estator. As perdas no gerador são reduzidas e a tensão de saída

contém menos harmônicos em decorrência do formato circular dos cabos, sendo este formato ideal, conforme item 2.2.2.1. As ranhuras do estator acompanham o formato circular dos condutores, conforme apresentado na figura 8. A diminuição da isolamento dos condutores à medida que se aproxima da periferia do estator também se reflete na seção transversal das ranhuras, o que resulta em uma largura radial praticamente constante dos dentes do estator (área entre as ranhuras do estator), o que reduz as perdas nos dentes (LEIJON, 1999).

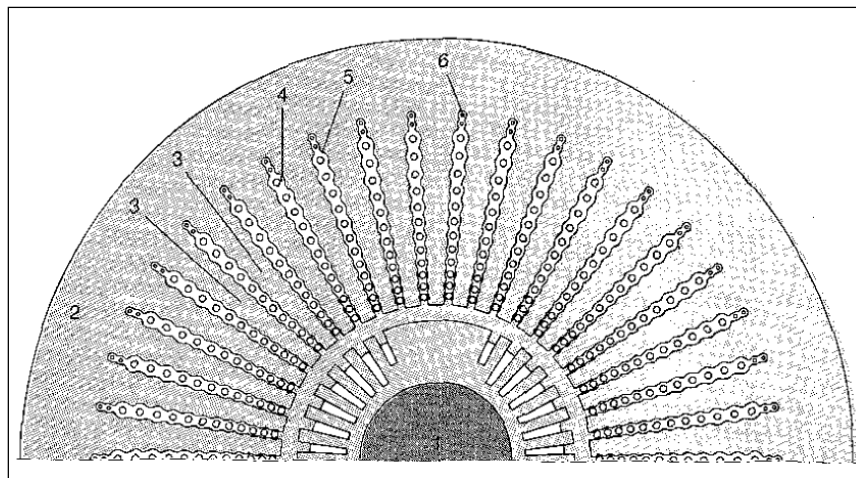


Figura 8 – Seção transversal do estator do *Powerformer*, (1) rotor, (2) seção do estator, (3) dentes, (4) ranhuras, (5) condutores do enrolamento principal, (6) condutores do enrolamento do modo *standby* Fonte: Dettmer (1998).

Em um enrolamento de bobina convencional, as lâminas do condutor devem ser transpostas ao longo do seu comprimento, a fim de reduzir perdas por correntes de Foucault. Para o novo arranjo da bobina, a minimização dessas perdas é conseguida através do isolamento e de fios trançados no condutor para formar o enrolamento. É possível instalar enrolamentos adicionais ao estator do *Powerformer* que podem, por exemplo, ser utilizados para o abastecimento de energia auxiliar na própria usina ou aumentar a capacidade de fornecimento de potência em caso de contingências. Além disso, o *Powerformer* permite ser usado como um transformador rotativo com possibilidades de conexão simultânea em um sistema com vários níveis de tensão utilizando taps no enrolamento (LEIJON, 1999).

2.2.2.4 PROJETO TÉRMICO

A corrente saída nos terminais do *Powerformer* é consideravelmente inferior à de um gerador convencional. Assim, a maior parte das perdas é no núcleo de ferro (perdas por Foucault) e não no cobre do enrolamento (perdas resistivas). Conseqüentemente, a refrigeração do *Powerformer* é concentrada no núcleo e não no enrolamento (LEIJON, 1999). A refrigeração no estator é realizada com uso de água deionizada em geradores convencionais, devido ao fato desta fluir radialmente através de canaletas no estator em contato com os condutores. No *Powerformer*, com o aterramento da camada externa, a água não precisa ser tratada previamente para percorrer as canaletas do estator, o que facilita o projeto térmico da máquina (SOUZA, 2005).

2.2.2.4.1 DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA

Segundo Lindahl (2001), a temperatura máxima em regime contínuo para os cabos de alta tensão com isolamento de XLPE é de 90 °C e para aplicações em linhas de transmissão subterrâneas, grande parte dos fabricantes considera a temperatura de 105°C para o condutor isolado com XLPE em uma sobrecarga de curto prazo.

A temperatura de operação nominal do condutor de cabo isolado com XLPE utilizado nos atuais *Powerformers*, no entanto, está abaixo da temperatura especificada para linhas de transmissão subterrâneas. A figura 9 ilustra a distribuição da temperatura no sentido radial no estator do *Powerformer*.

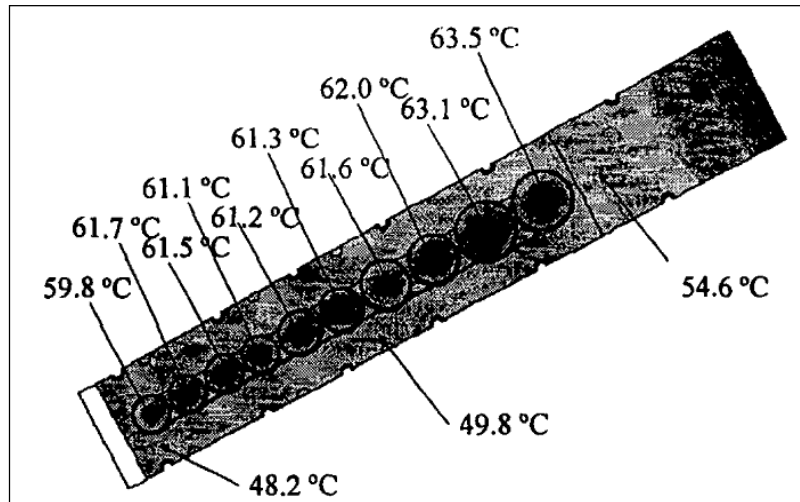


Figura 9 – Distribuição da temperatura calculada do *Powerformer* instalado na Usina Hidrelétrica de Porsi

Fonte: Leijon, Owman (2000)

2.2.2.4.2 REFRIGERAÇÃO A ÁGUA

O *Powerformer* é dotado de um sistema de refrigeração mais eficiente do que as máquinas convencionais. O sistema de refrigeração a água composto por canaletas axiais em relação aos condutores e não necessita de dutos de ar com configuração radial, ver Figura 10. Por consequência o núcleo do estator do *Powerformer* é homogêneo e possibilita que o comprimento do estator seja menor, a eficiência aumenta e a montagem do estator é facilitada pela homogeneidade da mesma. (LEIJON,OWMAN, 2000b).

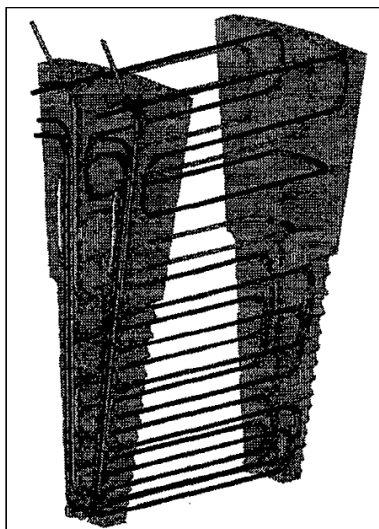


Figura 10 – Sistema de refrigeração à água utilizado no *Powerformer* - Detalhe da parte do estator do *Powerformer* com seus respectivos tubos isolantes de XLPE

Fonte: Leijon, Owman, (2000b)

2.2.2.5 PROJETO MECÂNICO

Com relação ao aspecto mecânico dos *Powerformers* será abordado apenas o projeto do estator, pois em todos as máquinas construídas com tal tecnologia até o momento se utilizam de rotores utilizados em geradores convencionais. Segundo Leijon (1999), o projeto mecânico de um gerador deve considerar as forças adicionais oriundas do campo magnético de excitação que são exercidas nas extremidades dos enrolamentos em operação normal e também em situações anormais, como em situações de curto-circuito. Segundo este critério de projeto, devem ser tomados os devidos cuidados para realizar o suporte dos enrolamentos do estator.

Os suportes dos enrolamentos *Powerformers* podem ser mais simples devido às correntes mais baixas nos cabos do estator, que provocam uma menor força induzida pelo campo magnético descrito anteriormente.

Outro aspecto a ser considerado é a profundidade das ranhuras do estator, uma vez que o *Powerformer* possui um enrolamento multicamadas, essa profundidade é maior do que em geradores convencionais, pois nestes, o enrolamento do estator é normalmente disposto em duas camadas, resultando em dentes mais curtos no estator.

Um novo tipo de cunha de entalhe rígida foi utilizada nos *Powerformers* para contornar os problemas de menor rigidez mecânica dos dentes e a diminuição da frequência de ressonância (LEIJON, 1999). A Figura 11 apresenta o detalhe da fixação dos cabos do *Powerformer* nas ranhuras do estator.

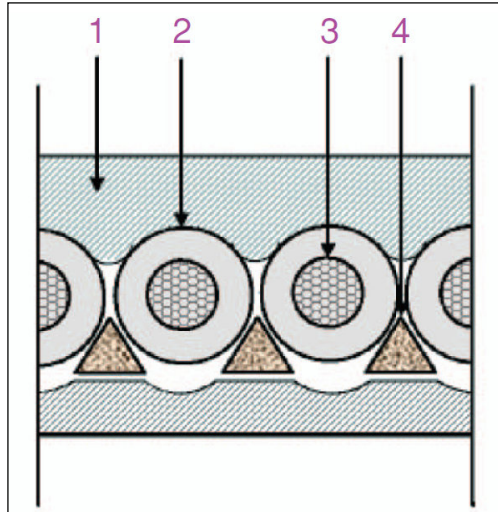


Figura 11 – Fixação dos cabos do enrolamento nas ranhuras do *Powerformer* – (1) Núcleo laminado do estator, (2) Isolação de XLPE, (3) Condutor, (4) Cunha de fixação.

Fonte: Metwally et. al. (2008)

2.2.3 INTERLIGAÇÃO COM O SISTEMA

A preocupação em relação à estabilidade do sistema elétrico tem aumentado nos últimos anos. O colapso de tensão, incluindo o de 1996 na região ocidental dos EUA, tem direcionado a importância de evitar que o gerador funcione próximo do limite de operação, com intuito de não permitir que o colapso se torne mais iminente (TAYLOR, 1999). A importância especial da limitação da corrente do estator e sua contribuição para o colapso de um sistema também é destaque dentre as preocupações (SJOGREN, JOHANSSON, 1995).

Devido às suas características construtivas, o *Powerformer* é capaz de manter uma sobrecarga por um período maior do que um gerador convencional. Isso significa que conforme Aumuller e Saha (2003), o *Powerformer* pode fornecer

potência reativa por um período de tempo maior em comparação com um gerador convencional (AUMULLER, SAHA, 2003).

Realizando o suporte adequado de potência reativa ao sistema, o gerador é capaz de despachar mais energia ativa reduzindo o risco de ocorrer colapsos de tensão (SOUZA, 2005).

O transformador demanda uma potência reativa pela sua natureza indutiva. Com a ausência deste, o *Powerformer* elimina a demanda de potência reativa associada ao transformador elevador, assim é possível aumentar a injeção de potência líquida no sistema e pode também absorver mais potência reativa do que um gerador convencional (SOUZA, 2005).

A Figura 12 mostra a curva “Corrente x tempo” no estator do *Powerformer* em comparação a uma máquina convencional, segundo a norma ANSI C50.13.

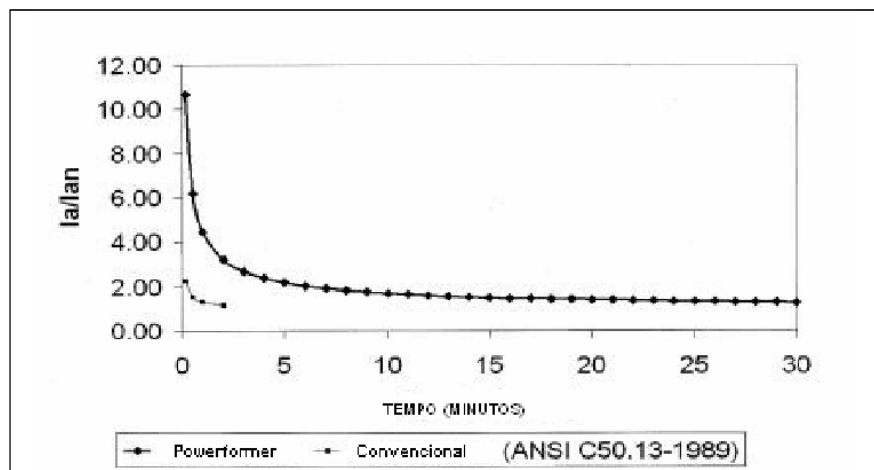


Figura 12 - Capacidade de sobrecarga no estator, *Powerformer* X Gerador convencional

Fonte: Aumuller, Saha (2003)

É possível verificar pelo gráfico a capacidade do *Powerformer* de suportar correntes de armadura além dos níveis expressos na norma ANSI em comparação com uma máquina convencional equivalente.

2.2.4 REATÂNCIA DO POWERFOMER E O GERADOR CONVENCIONAL

Os valores de reatâncias para o *Powerformer* serão considerados neste trabalho como sendo as mesmas que um gerador convencional de mesma potência, uma vez que as reatâncias síncrona, transitória e subtransitória dos *Powerformers* e

dos geradores convencionais são considerados iguais em estudos comparativos (AUMULLER, SAHA, 2003a).

Existem análises de dados empíricos que apresentaram diferenças de valores de reatância entre os dois tipos de geradores, porém, tais informações não constituem atualmente, uma base para se considerar como regra geral dos *Powerformers* (SOUZA, 2005), sendo mantido portanto, a utilização dos valores de reatância dos geradores convencionais no presente estudo.

De forma a ilustrar as diferenças entre os valores de reatância do *Powerformer*, é apresentado a seguir a Tabela 5 que contém o comparativo das reatâncias entre um *Powerformer* instalado na usina hidrelétrica de Porjus e um gerador convencional equivalente.

Reatâncias (pu)	Gerador Convencional	<i>Powerformer</i> de Porjus
X _d	0.98	0.79
X' _d	0.25	0.22
X'' _d	0.16	0.17
Eficiência	97.2%	97.6%

A eficiência do gerador convencional já considera o transformador elevador.

Tabela 5 – Reatâncias, do *Powerformer* instalado na usina hidrelétrica de Porjus e de um gerador convencional equivalente

Fonte: Al-Halabieh, (1999)

A Tabela 6 apresenta os demais parâmetros comparativos entre o *Powerformer* e um gerador convencional equivalente.

Parâmetros comparados	Gerador Convencional	<i>Powerformer</i> de Porjus
Potência fornecida (MVA)	11	11
Tensão nominal (kV)	10	45
Corrente (A)	635	141
Velocidade (rpm)	429	600
Comprimento (mm)	750	1450
Diâmetro externo do estator (mm)	3100	3050
Número de cabos por ranhura	-	12
Peso do estator (ton)	11,5	34,5
Peso do rotor (ton)	23	22,8

Tabela 6 - Parâmetros comparativos entre o *Powerformer* e um gerador convencional equivalente

Fonte: Al-Halabieh, (1999)

2.2.5 COMPORTAMENTO DO *POWERFORMER* DURANTE FALTAS

O desempenho do *Powerformer* em condições de falha comparada com um gerador convencional revelou muitos pontos.

Segundo Metwally, et. al. (2008), no caso de um gerador convencional, uma falta interna refere-se a uma falta que ocorre nos terminais do gerador, e uma falta externa é a que ocorre no lado de alta tensão do transformador elevador. No caso do *Powerformer*, faltas internas e externas são basicamente o mesmo, pois este está ligado diretamente ao barramento de alta tensão. Ainda segundo Metwally, et. al. (2008), eis o comportamento do *Powerformer* nos diferentes tipos de falhas:

1. Para faltas externas, as correntes de curto-circuito trifásico do *Powerformer* será da mesma magnitude que a corrente de curto-circuito trifásico de um gerador convencional.
2. A corrente de curto-circuito fase-terra externa de um *Powerformer* será menor que a de um gerador convencional. A razão é que o ponto de neutro de um *Powerformer* é isolado do potencial de terra, enquanto o ponto de neutro do transformador elevador de gerador convencional é aterrado. Portanto, a introdução de um *Powerformer* diminui a corrente de curto-circuito monofásica em uma corrente de curto-circuito fase-terra externo, pois a eliminação do transformador elevador aumenta a reatância de sequência-zero.

3. A corrente de curto-circuito trifásica interna de um *Powerformer* é menor do que o geradores convencionais devido à sua tensão de saída mais elevada.
4. No caso da falta interna fase-fase e fase-fase-terra, a corrente de curto-circuito em uma unidade geradora convencional será substancialmente maior do que a corrente de curto-circuito do *Powerformer*.
5. Para a corrente de curto-circuito fase-terra interna, a corrente de curto-circuito em uma unidade geradora convencional é muito menor do que o *Powerformer* devido à alta impedância de aterramento do neutro do gerador convencional.

A Figura 13 ilustra a comparação entre as correntes de curto-circuito de um sistema equipado com *Powerformer* e de um sistema convencional.

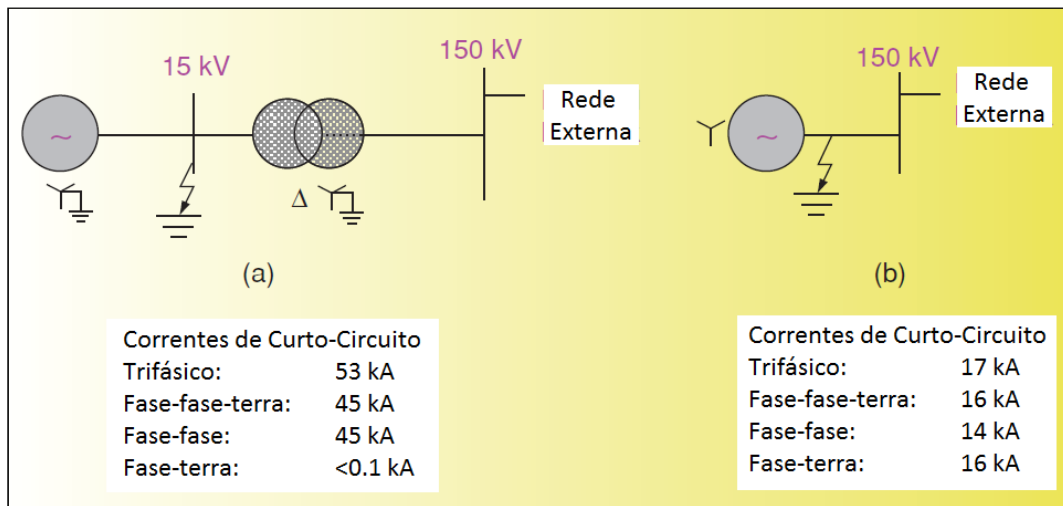


Figura 13 - Comparação entre as correntes de curto-circuito de um sistema equipado com *Powerformer* e de um sistema convencional. (a)-Gerador convencional com transformador elevador, (b) – *Powerformer*

Fonte: Metwally, et. al. (2008)

2.2.6 AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA DO POWERFORMER

Inúmeras vantagens foram apresentadas nos itens 2.2.2 e 2.2.3, como por exemplo, as vantagens no projeto magnético em relação ao uso dos cabos isolados com XLPE e as vantagens construtivas obtidas pela simplificação no projeto térmico. Porém, as principais vantagens são a ausência do transformador elevador e todos os equipamentos envolvidos na operação e proteção (ver Figura 14), aumentando a confiabilidade do sistema, simplificando o projeto e aumentando a capacidade de

injetar potência reativa no sistema devido à ausência da demanda de potência reativa do transformador em questão.

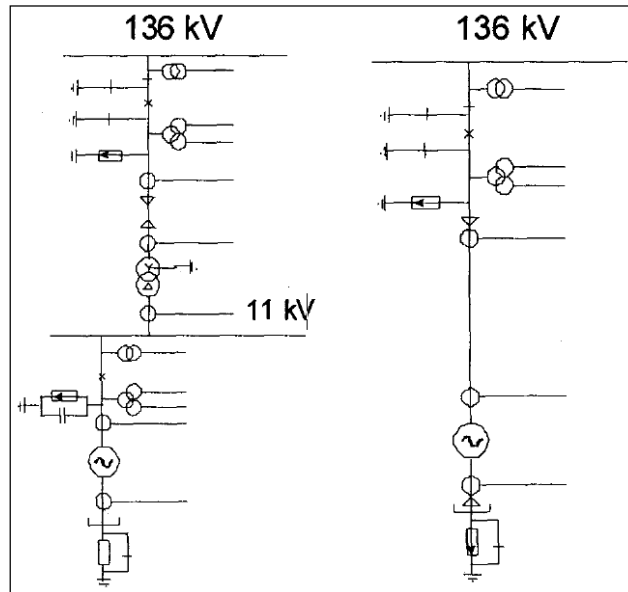


Figura 14 – Diagrama unifilar da usina de Eskilstuna com gerador convencional à esquerda e com o *Powerformer* à direita. Fonte: Leijon, Owman, 2000.

Existem por outro lado, possíveis objeções à tecnologia do *Powerformer*. Metwally, et. al. (2008) as apresenta e argumenta “O uso de um condutor circular implica em um volume maior ocupado pelo cabo dentro do estator, resultando em uma máquina maior e mais cara. Além disso, perdas no ferro serão maiores, compensando a ausência das perdas do transformador elevador. No entanto, usando as equações de Maxwell é possível mostrar que, em termos de energia produzida por unidade de volume, o *Powerformer* é mais eficiente. As perdas de no ferro no sistema convencional gerador são mais elevadas, mas a natureza de baixa corrente do projeto do *Powerformer* significa que essas perdas são mais do que compensadas pelas menores perdas no cobre do estator e pelas menores perdas na refrigeração da máquina devido à sua simplificação. Estima-se que um *Powerformer* seja entre 0,5% e 1,5% mais eficiente que um gerador convencional e seu transformador elevador. Cabos isolados de XLPE, especialmente os projetados para níveis de tensão de 400 kV, são um produto relativamente novo. Existem dúvidas sobre sua adequação a em longo prazo como enrolamentos do estator e o cabo é

muito duro, especialmente para sua aplicação em tensões elevadas, sendo difícil dobrar o cabo em seus terminais. O cabo na máquina XLPE é projetado para a operação em regime nominal de 90 ° C, com a capacidade para operar com até 130 ° C por várias horas. Em operação normal, os enrolamentos Powerformer são mantidos a 70 °C. A capacidade da máquina para operar com uma temperatura mais elevada (maior corrente), sem prejuízo para períodos curtos significa que ela pode desempenhar um papel importante no sistema de controle da rede, como uma “fonte controlável” de potência ativa e reativa. Acredita-se que quando a adoção do Powerformer torna-se mais comum, dados confiáveis podem ser obtidos quanto ao seu impacto nos sistemas de potência. Um julgamento justo e confiável sobre esta nova tecnologia pode ser convincente para concessionárias de energia”.

3 MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DOS SOFTWARES

3.1 MODELAGEM PARA O ESTUDO DE ESTABILIDADE

3.1.1 ESTUDO DE ESTABILIDADE

Em um estado ou condição de regime permanente em um sistema de potência, o fluxo de potência neste é constante (dos geradores para as cargas), mantendo também constante as diferenças entre os ângulos de fase e a velocidade angular dos rotores dos geradores do sistema. A potência elétrica gerada é igual à potência absorvida pela carga mais as perdas associadas à transmissão e o sistema é dito estável. Quando há uma perturbação, essa configuração é modificada e duas situações podem ocorrer: a perda da estabilidade, situação na qual o sistema não é capaz de estabelecer um novo estado de equilíbrio ou o sistema se reestabelecer retomando a um novo estado de operação (BRETAS, ALBERTO, 2000).

A magnitude dos distúrbios determina o tipo de estabilidade. Quando há pequenas perturbações (oriundas como exemplo de variações normais das cargas), o estudo de estabilidade é chamado de estabilidade dinâmica, no qual o modelo matemático é linear, pois é considerado que as pequenas perturbações não afetam o sistema de forma significativa, ou seja, não muda o sistema de sua condição de

operação original. A consequência disto em termos de modelagem matemática é que o modelo linear é considerado adequado no estudo da estabilidade no sistema. O outro tipo de estabilidade é a transitória, na qual o foco do estudo é determinar se no sistema as máquinas são capazes de manter o sincronismo após uma grande perturbação, esta por sua vez oriunda de um curto-circuito ou a queda de uma linha de transmissão, por exemplo. O distúrbio neste último caso provoca a aceleração ou desaceleração dos rotores das máquinas por sofrerem excesso ou déficit de energia e na tentativa de estabelecer um novo estado de equilíbrio, os ângulos das máquinas alteram no tempo. O período de análise nesse estudo é curto, no máximo de alguns segundos (cerca de 3 segundos). Assim, controladores, tais como estabilizadores de sistemas de potência (ESPs), não causam efeitos significativos no sistema em um período tão curto de tempo e por consequência, podem ser desprezados no estudo de estabilidade transitória (BRETAS, ALBERTO, 2000).

A preocupação no estudo de estabilidade transitória (ou a grandes perturbações) tem sido a manutenção do sincronismo entre as máquinas logo após a ocorrência de um distúrbio, portanto em seus estudos, é realizada a análise da resposta do sistema em questão com relação à capacidade do mesmo encontrar um novo estado de equilíbrio, mantendo assim o sincronismo com outras máquinas. A análise quantitativa nesse estudo reside no estudo de dois parâmetros: o ângulo rotórico e a velocidade angular dos geradores. As figuras a seguir apresentam o comportamento do ângulo rotórico e a velocidade angular na situação de estabilidade figura x e y e instabilidade figura w e z com relação a uma barra infinita (curva que não se altera no tempo).

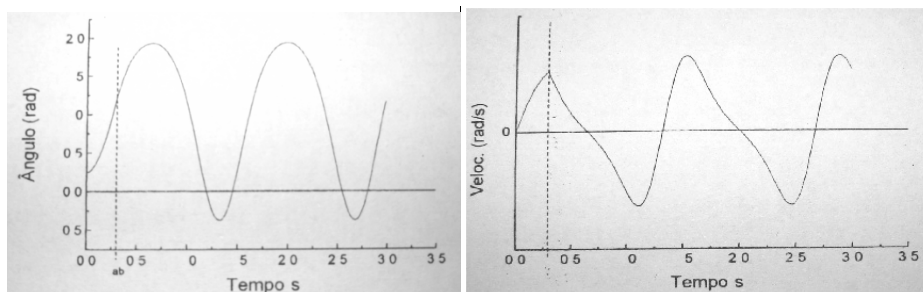


Figura 15 – Comportamento do ângulo rotórico e velocidade angular na situação estável.

Fonte: (BRETAS, ALBERTO, 2000)

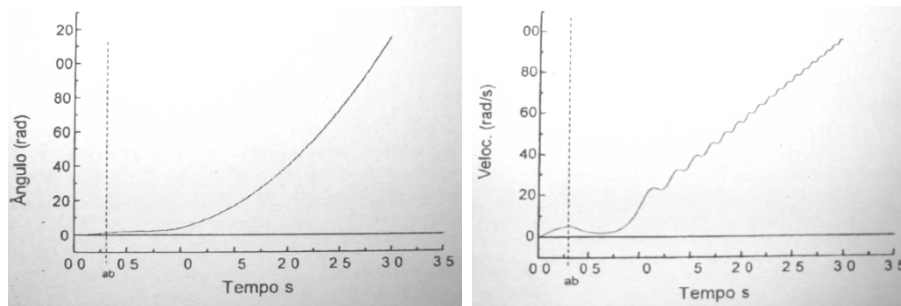


Figura 16 - Comportamento do ângulo rotórico e velocidade angular na situação instável.

Fonte: (BRETAS,ALBERTO, 2000)

Cabe, porém, ser esclarecido outro ponto com relação ao estudo de estabilidade transitória. Este é na verdade uma análise de sincronismo entre as máquinas e não de estabilidade do sistema (BRETAS, ALBERTO, 2000). Uma situação considerada estável ocorre quando as máquinas aceleram de forma conjunta após a eliminação do defeito. Surge uma inconsistência no que diz respeito ao ponto de equilíbrio estável nos estudos de sistemas de potência, pois as máquinas não possuem um ponto de equilíbrio com relação ao sistema e continuam acelerando juntamente, mesmo após a eliminação da falta. Para contornar esse problema são formulados matematicamente os problemas com utilização de uma máquina como referência e o centro de ângulo como referência (BRETAS, ALBERTO, 2000). Assim, o estudo permite que novas formulações matemáticas equivalentes às equações diferenciais da formulação do estudo análise de sincronismo representem o estudo de estabilidade.

No caso do estudo de estabilidade de um gerador ligado a um barramento infinito, porém, a inconsistência deixa de existir, uma vez que o barramento infinito pode ser considerado uma máquina com grande capacidade de geração e absorção de potência infinita e momento de inércia infinito, assim, faz-se desnecessário a utilização das formulações matemáticas a partir de máquina e centro de ângulo como referência. Todo o desbalanço ocorrido durante uma falta, não ocorre no barramento infinito, pois este absorve toda a potência decorrente deste desbalanço (BRETAS, ALBERTO, 2000), o que torna esta “máquina” um referencial do ponto de vista de estabilidade transitória.

Cabe ainda ressaltar que não é apropriado inserir um curto-circuito nos barramentos ou pontos do sistema de maneira que ocorra o fenômeno do “ilhamento”, uma vez que a máquina em estudo ficaria isolada do restante do sistema, não tendo assim um referencial para se realizar a análise de estabilidade transitória. No modelo adotado neste trabalho que será apresentado no próximo item, não ocorreria o fluxo de potência, pois não há cargas a serem abastecidas a não ser o próprio barramento infinito atuando como um ente que absorve toda a potência gerada. Em razão disso o curto será injetado apenas em uma das linhas de transmissão, evitando assim que a máquina entre na condição de “ilhamento”.

3.1.2 MODELO PARA O ESTUDO DE ESTABILIDADE

O modelo escolhido para o estudo de estabilidade neste trabalho é o modelo clássico de gerador conectado à barra infinita através de uma linha de transmissão. Os motivos desta escolha são em razão de uma perturbação próximo ao gerador ter mais influência no mesmo e em razão da possibilidade de simplificar o sistema ao considerar o conceito de GD, no qual uma fonte está próxima à carga, atendendo-a exclusivamente ou pode estar conectada ao sistema de distribuição, representada por um barramento infinito. Pode-se considerar o sistema em questão como um barramento infinito.

A capacidade de geração será limitada em 30MW por se tratar de uma PCH. Conforme apresentado no item 2.1.4., a tensão nominal do gerador é definida conforme o sistema ou carga ao qual o gerador está conectado. Neste trabalho será realizado o estudo dos geradores conectados ao sistema de distribuição da Copel de 34,5kV. A figura 1 ilustra o sistema de distribuição de 34,5kV da Copel:

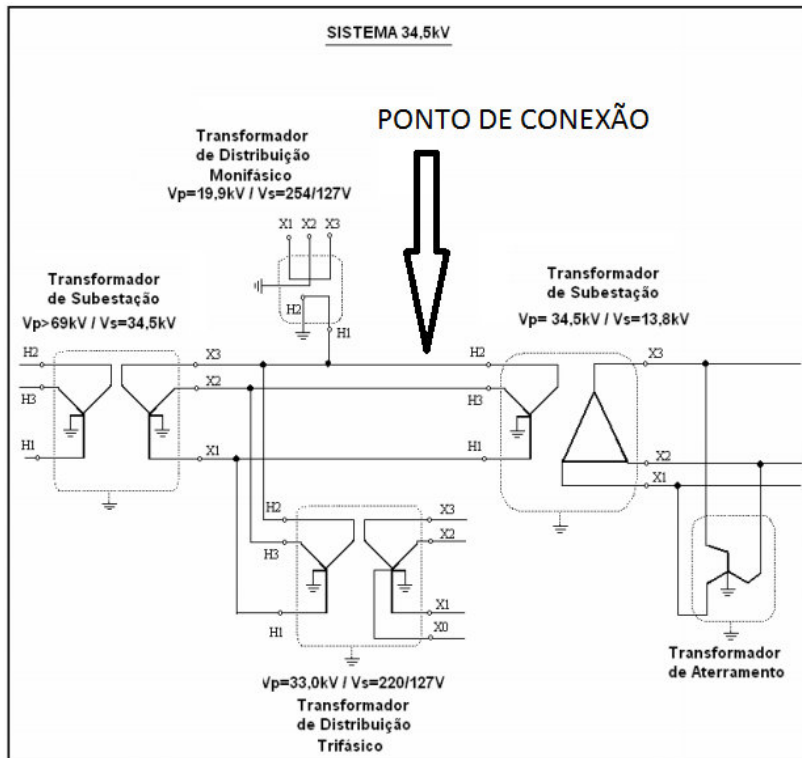


Figura 17 - Sistema de distribuição de 34,5kV da Copel, com o ponto de conexão.

Fonte: (COPEL, 2010)

A figura 17 apresenta o sistema de distribuição da Copel, o barramento infinito representa todo esse sistema, assim o gerador se conecta através de uma linha de transmissão ao barramento de 34,5kV da Copel, indicado como ponto de conexão. A esse tipo de conexão se dá o nome de "Pingo Direto em uma Linha de 34,5kV" (COPEL, 2010). Finalmente, o modelo gerador-barramento infinito do estudo deste trabalho possui a seguinte configuração:

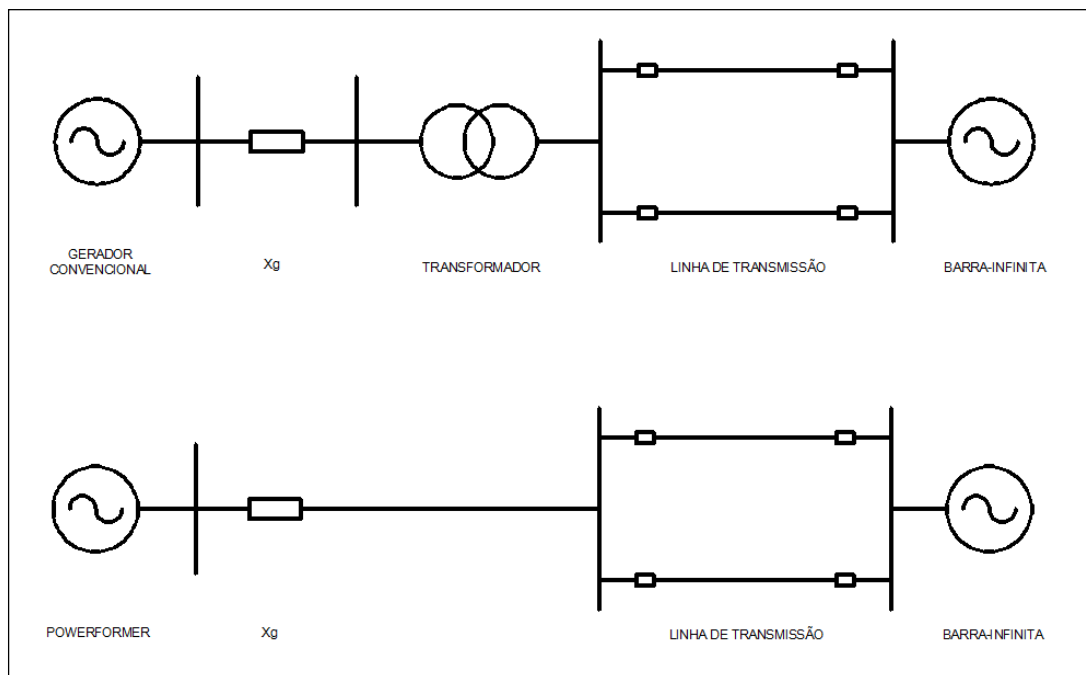


Figura 18 – Modelo de simulação com gerador convencional e com *Powerformer*

Fonte: Autoria própria

Os parâmetros dos elementos constituintes dos modelos são apresentados na tabela 8. Baseados em (LIMA, 2002) foram utilizados os seguintes parâmetros:

	Tensão (kV)	Reatância	Pot. Ativ.	H
Gerador convencional	6.6kV	$X_d' = 23,2\%$	30MW	4,23
Transformador elevador	6.6-34.5kV	5,76%	-	-
Linha de transmissão	-	$R = 21,6\%$ e $X = 21,6\%$	-	-

	Tensão (kV)	Reatância	Pot. Ativ.	H
Powerformer	34,5kV	$X_d' = 23,2\%$	30MW	4,23
Linha de transmissão	-	$R = 21,6\%$ e $X = 21,6\%$	-	-

Tabela 7 – Parâmetros dos elementos constituintes dos modelos.

Para as simulações, foi utilizado também o coeficiente de amortecimento das máquinas sendo igual a 5pu, em ambos os casos.

3.1.3 SOFTWARE PARA ESTUDO DE ESTABILIDADE

O software escolhido para o estudo de estabilidade é o Simulight, desenvolvido pelo COPPE/UFRJ em parceria com a concessionária Light, do Rio de Janeiro. O software foi projetado para realizar a análise de redes elétricas com

geração distribuída e é capaz de realizar estudos de fluxo de potência e estudos de estabilidade transitória.

Para o estudo foi utilizada a versão acadêmica do software, que, mesmo tendo recursos limitados com relação à versão comercial, foi avaliado para este estudo como adequado, pois o contexto na qual os geradores foram inseridos (geração distribuída) e a modelagem do *Powerformer* (basicamente é retirado o transformador elevador do sistema) no presente trabalho permitiram uma simplificação do modelo a ser estudado e ser simulado dentro das limitações da versão acadêmica.

O Método Trapezoidal Implícito (ou Regra Trapezoidal Implícita) tem sido utilizado na maioria dos programas comerciais voltado para o estudo de estabilidade de sistemas de potência. As razões para este método se tornar em um dos mais utilizados nos programas para a simulação da dinâmica de sistemas de potência reside nas características de desempenho computacional, precisão e principalmente estabilidade numérica (SIMULIGHT, 2004).

No Simulight, a Regra Trapezoidal Implícita é utilizada na solução numérica das equações diferenciais ordinárias (EDOs) envolvidas no estudo de estabilidade transitória.

3.2 MODELAGEM PARA O ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO

3.2.1 ATERRAMENTO DE GERADORES

Em um sistema convencional, os geradores operam com neutro aterrado através de alta impedância, devido à necessidade de limitar as correntes de curto-circuito à terra. Mas apenas o neutro diretamente aterrado não é uma boa solução, pois durante uma falta fase-terra a corrente seria demasiadamente grande, passível de danos aos enrolamentos do gerador. Utilizar o neutro isolado significa uma continuidade da operação do gerador mesmo durante uma falta fase-terra; e persistindo a atividade do gerador durante a falta, há a possibilidade de um curto-circuito bifásico franco, onde outra fase entraria em curto com a terra.

Dos aterramentos mais comuns de geradores, podem-se verificar dois esquemas (BASILESCO, TAYLOR, 1988):

- Neutro aterrado através de transformador de distribuição;
- Aterramento através de três transformadores monofásicos de distribuição.

Para o primeiro esquema, o neutro do gerador é ligado a um transformador monofásico com tensão de operação próxima à tensão fase-neutro daquele. No secundário, a tensão de saída é de 120V ou 240V e o enrolamento é ligado a um resistor.

No segundo esquema, tem-se os três transformadores monofásicos ligados em estrela-aterrado nos enrolamentos do primário e em delta aberto aterrado no secundário. É dimensionado do mesmo modo ao esquema anterior e usado apenas quando o neutro do gerador não é disponível para conexão externa.

Ainda há um terceiro tipo comum de aterramento de geradores, que é o aterramento por baixa resistência com resistor no neutro (LIMA, 2002). É mais indicado para o caso em que precisa limitar a corrente que circula no neutro do gerador durante uma falta à terra. O resistor é dimensionado para sensibilizar um relé de terra no sistema.

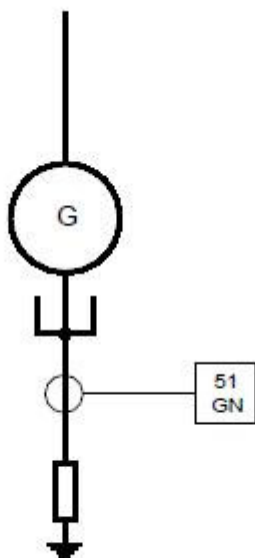


Figura 19 - Aterramento de gerador por resistência no neutro (LIMA, 2002).

Deve-se salientar que, em caso de falta no barramento de alta tensão do transformador elevador, a corrente tende a sofrer o efeito de transformação nos enrolamentos e chegar ao barramento do gerador com uma amplitude maior.

Já em um sistema envolvendo o *Powerformer* o aterramento do neutro é desnecessário, tanto por nula, baixa ou alta impedância. Por ser utilizado o neutro isolado e não possuir um transformador elevador, qualquer curto-circuito fase-terra que ocorra, caracterizará o fechamento de um circuito pelo neutro dos transformadores estrela-estrela aterrados da rede e, para tal, será detectado pela proteção contida e ajustada na rede.

3.2.2 CONSIDERAÇÕES

Para estudo em curto-circuito é necessário antes analisar os elementos pertencentes aos cálculos: as sequências das componentes simétricas (positiva, negativa e zero) e as impedâncias de sequência para gerador e transformador.

Em um sistema equilibrado trifásico, a sequência positiva pode ser mais bem entendida como a sequência de fases do sistema. Portanto, a defasagem entre duas fases é de 120° .

De posse das mesmas condições citadas anteriormente, a sequência negativa é a circulação da corrente em sentido contrário ao da positiva, mantendo inclusiva a defasagem desta.

E finalmente, a sequência zero, onde as fases são paralelas entre si e a corrente não circula como as anteriores.

Simplificadamente, a figura (X) melhor ilustra as 3 sequências:

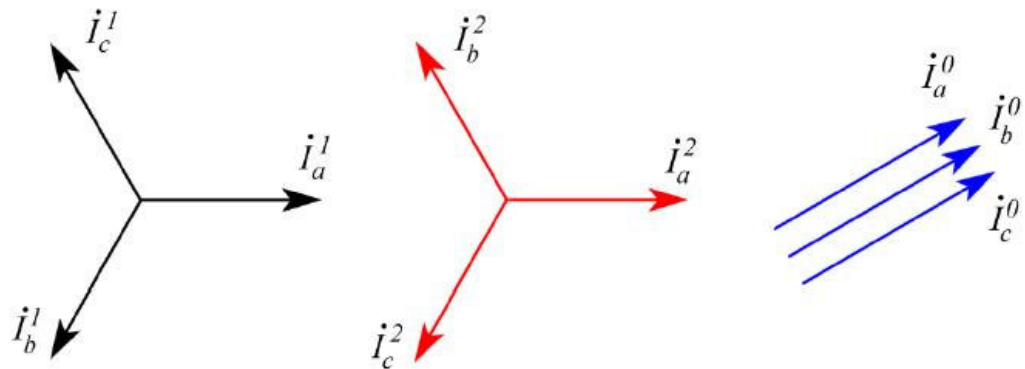


Figura 20 - Sequências de fase: (a) positiva, (b) negativa e (c) zero (ALMEIDA, 2011).

Em se tratando de impedâncias, para transformadores (e mais especificamente os de dois enrolamentos) as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero são consideradas iguais por se relevar apenas a impedância de dispersão.

Já em um gerador síncrono existem 3 tipos de reatância (ALMEIDA, 2011):

- de eixo direto, x_d , que corresponde ao funcionamento em regime;
- transitória de eixo direto, x'_d , que corresponde ao funcionamento durante o período transitório e
- subtransitória de eixo direto, x''_d , que corresponde ao funcionamento no período subtransitório.

E no caso em estudo, foi considerado funcionamento em regime, simplificadaamente.

Como o presente estudo prevê a comparação do sistema convencional frente ao sistema com *Powerformer*, abaixo seguem duas figuras que nos mostram o comparativo das impedâncias de seqüência positiva e seqüência zero:

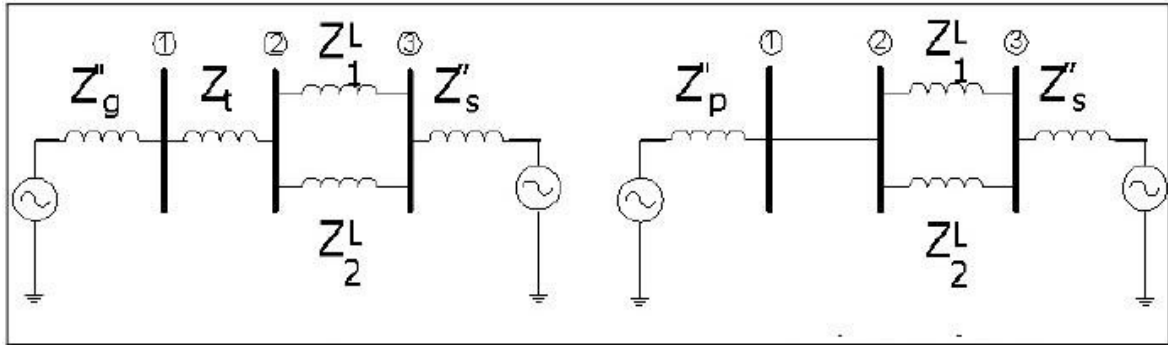


Figura 21 - Circuito de seqüência positiva no sistema convencional (à esquerda) e no sistema com *Powerformer* (à direita) (McDONALD, SAHA, 2000).

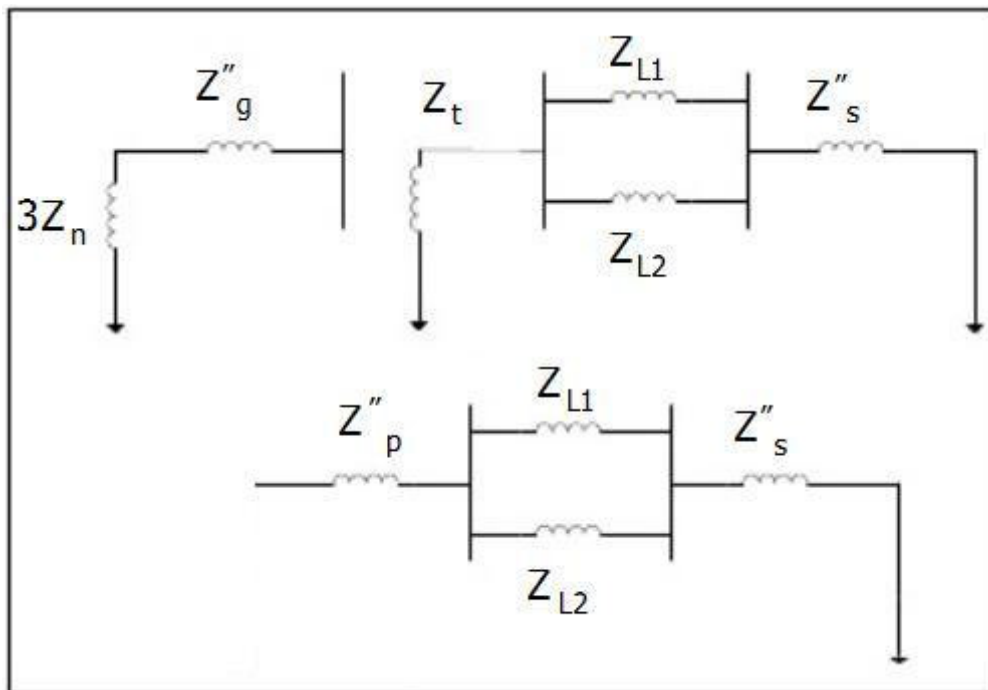


Figura 22 - Circuito equivalente de seqüência zero no sistema convencional (acima) e no sistema com *Powerformer* (abaixo) (SOUZA, 2005).

3.2.3 METODOLOGIA PARA CÁLCULO DO ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO

Uma vez definido o circuito no estudo de estabilidade, os parâmetros para estudo de curto-circuito foram alterados, devido ao foco que cada estudo exige, e representados com as devidas impedâncias de sequência, bem como os cálculos teóricos de curto-circuito dos tipos: fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásico para os dois sistemas em estudo.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados para o cálculo de curto-circuito. Fonte: autoria própria.

	Tensão (kV)	Z_s^+	Z_s^-	Z_s^0	Potência Ativa
Gerador convencional	6.6kV	10%	8%	1,50%	30MW
Transformador elevador	6.6~34.5kV	5,76%	5,76%	5,76%	-
Linha de transmissão	-	R=21,6% e X=21,6%			-
Powerformer	34,5kV	10%	8%	1,50%	30MW
Linha de transmissão	-	R=21,6% e X=21,6%			-

Foram utilizados dois cenários nos cálculos:

- a falta ocorrendo no sistema, que é representado pelo barramento infinito (b.i.);
- falta no barramento da saída do gerador, podendo ser na conexão do barramento com o gerador ou na conexão do barramento com uma das linhas.

3.2.3.1 CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA POSITIVA, NEGATIVA E ZERO

Com o circuito definido, foram desenhados os equivalentes em sequência positiva, negativa e zero para o caso do sistema convencional e também do sistema com *Powerformer*.

Na construção dos circuitos foi levado em conta o sistema sendo representado pelo barramento infinito, com tensão igual a 1pu, o gerador convencional com conexão estrela-aterrado e o transformador elevador ligado em delta-estrela-aterrado.

Abaixo seguem os modelos considerados para estudo, onde:

- Z_f representa a impedância de falta;
- Z_g a impedância do gerador;
- Z_t a impedância do transformador e
- Z_{lt} a impedância da linha de transmissão.

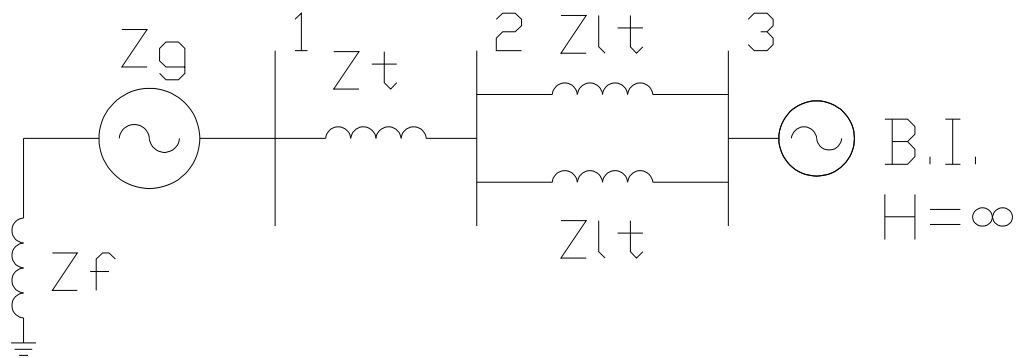


Figura 23 - Circuito de seqüência positiva para o sistema convencional. Fonte: autoria própria.

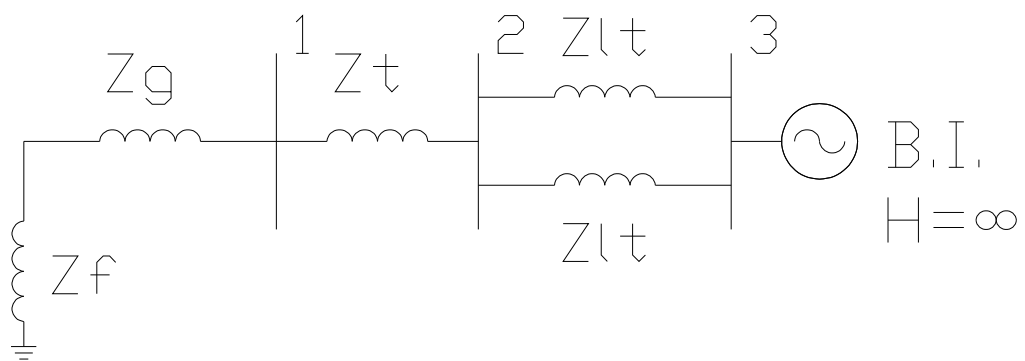


Figura 24 - Circuito de seqüência negativa para o sistema convencional. Fonte: autoria própria.

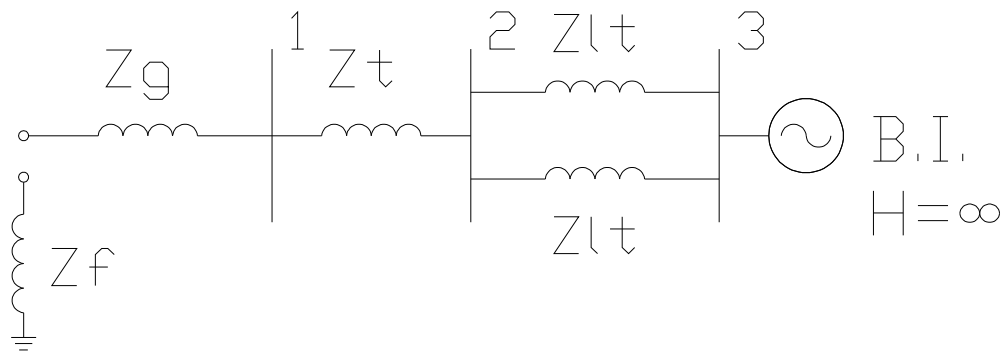


Figura 25 - Circuito de seqüência zero para o sistema convencional. Fonte: autoria própria.

Para o sistema com *Powerformer*, a representação do gerador foi alterada para Z_p com o intuito de não confundir as análises e cálculos. A impedância do transformador foi retirada e os barramentos mantidos para uma melhor visualização, em modo convencional, para fins comparativos:

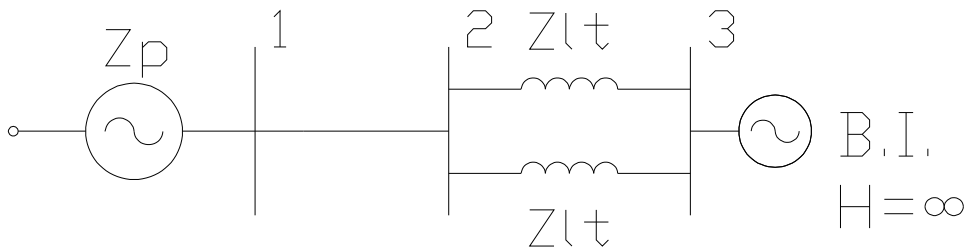


Figura 26 - Circuito de seqüência positiva para o sistema com *Powerformer*. Fonte: autoria própria.

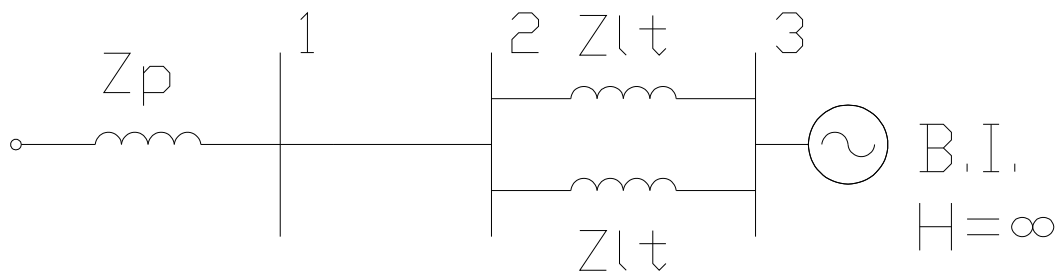


Figura 27 - Circuito de seqüência negativa para o sistema com *Powerformer*. Fonte: autoria própria.

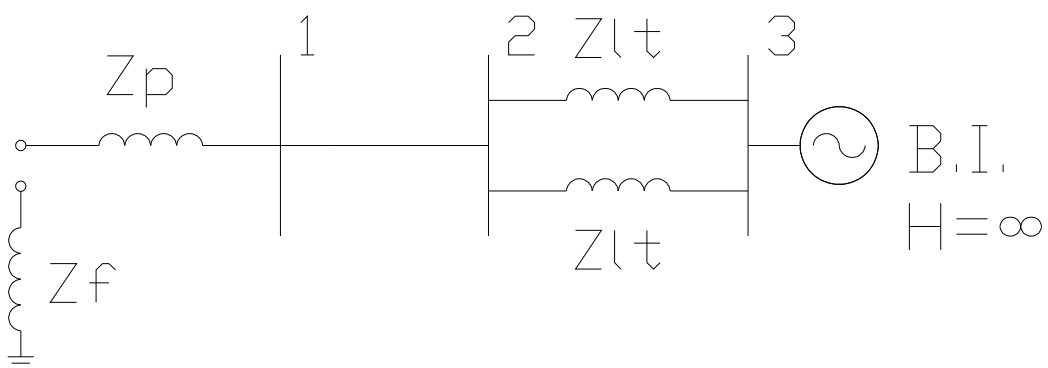


Figura 28 - Circuito de seqüência zero para o sistema com *Powerformer*. Fonte: autoria própria.

3.2.3.2 EQUAÇÕES PARA O CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO

Antes de apresentar as equações, é importante mostrar a simbologia adotada:

I_{ccFT}^{pu} - corrente de curto-circuito fase-terra em pu;

I_{ccFF}^{pu} - corrente de curto-circuito fase-fase em pu;

I_{ccFFT}^{pu} - corrente de CURTO-CIRCUITO fase-fase-terra em pu;

$I_{cc3\phi}^{pu}$ - corrente de curto-circuito trifásico em pu;

I_b - corrente base;

Z_s^+ - impedância de seqüência positiva;

Z_s^- - impedância de sequência negativa;

Z_s^0 - impedância de sequência zero;

Z_f - impedância de falta;

I_a^0 - corrente de sequência zero;

I_a^1 - impedância de sequência positiva;

Foram utilizadas as seguintes equações para os cálculos (ALMEIDA, 2011):

– Curto-circuito fase-terra:

$$i_{ccFT}^{pu} = \frac{3 \cdot \dot{E}_a}{\dot{Z}_s^+ + \dot{Z}_s^- + \dot{Z}_s^0 + 3 \cdot \dot{Z}_f}$$

$$\dot{I}_{ccFT}(A) = I_b \cdot I_{ccFT}^{pu}$$

– Curto-circuito fase-fase:

$$i_{ccFF}^{pu} = \frac{-j\sqrt{3}\dot{E}_a}{\dot{Z}_s^+ + \dot{Z}_s^- + \dot{Z}_f}$$

$$\dot{I}_{ccFF}(A) = I_b \cdot I_{ccFF}^{pu}$$

– Curto-circuito fase-fase-terra:

$$i_{ccFFT}^{pu} = 3 \cdot i_a^0$$

onde

$$i_a^0 = \frac{\dot{Z}_s^+ \cdot i_a^+ - \dot{E}_a}{3\dot{Z}_f + \dot{Z}_s^0}$$

e

$$i_a^+ = \frac{\dot{E}_a}{(\dot{Z}_s^+ + \dot{Z}_s^-) // (3 \cdot \dot{Z}_f + \dot{Z}_s^0)}$$

$$\dot{I}_{ccFFT}(A) = I_b \cdot I_{ccFFT}^{pu}$$

– Curto-circuito trifásico:

$$I_{cc3\phi}^{pu} = \frac{\dot{V}_{th}}{\dot{Z}_{th}}$$

$$i_{cc3\phi}(A) = I_b \cdot I_{cc3\phi}^{pu}$$

4 SIMULAÇÃO DOS SISTEMAS TESTE

4.1 SIMULAÇÃO DE ESTABILIDADE

Em sistemas de distribuição, faltas são eliminadas pelo sistema de proteção em um intervalo entre 100ms e 200ms, assim, foram analisados os períodos pós-falta em tempos de eliminação de falta em 100ms, 150ms e 200ms.

Os gráficos ilustram o comportamento dos ângulos rotóricos no decorrer do tempo.

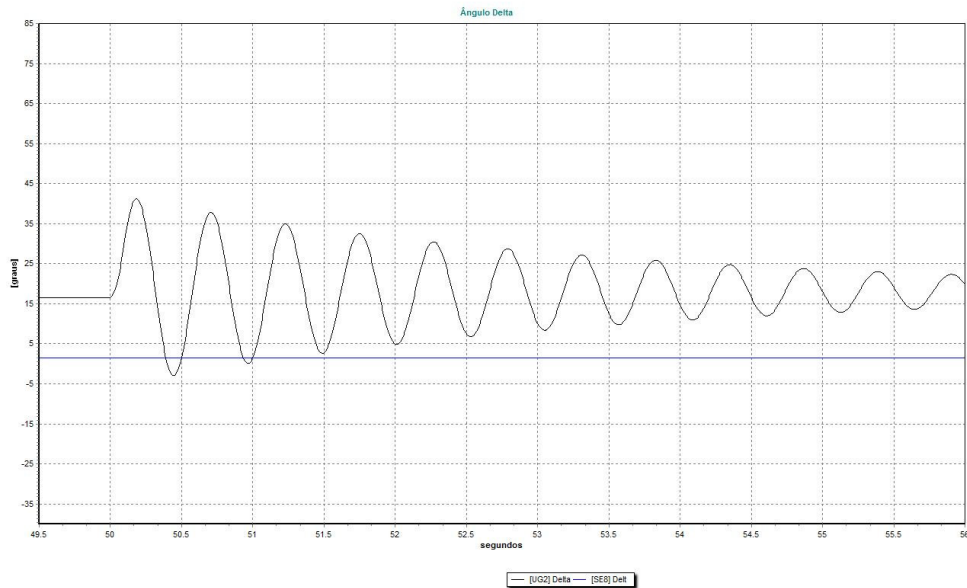


Gráfico 1 - Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 100ms no sistema com gerador convencional (graus x segundos). Fonte: autoria própria.

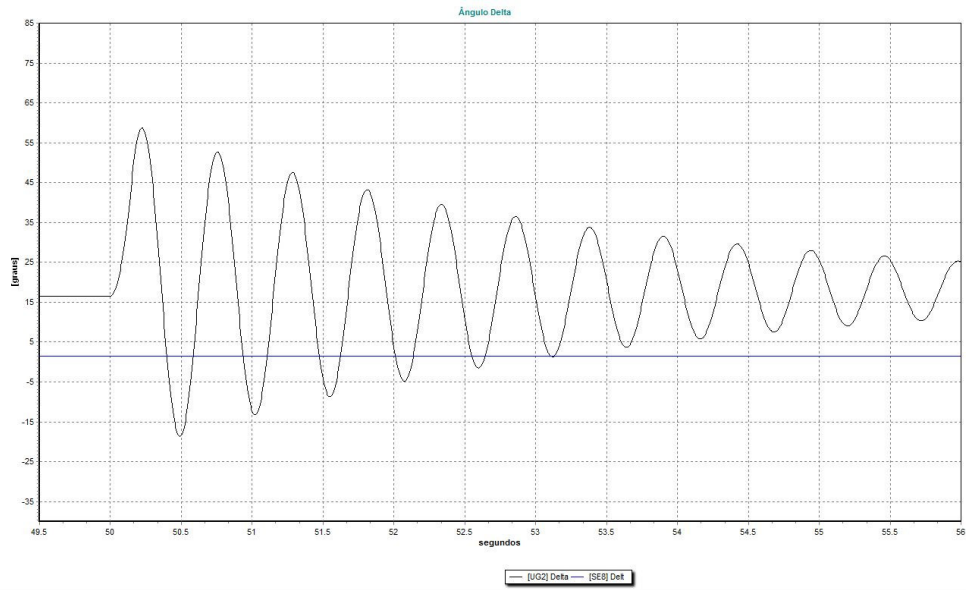


Gráfico 2 - Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 150ms no sistema com gerador convencional (graus x segundos). Fonte: autoria própria.

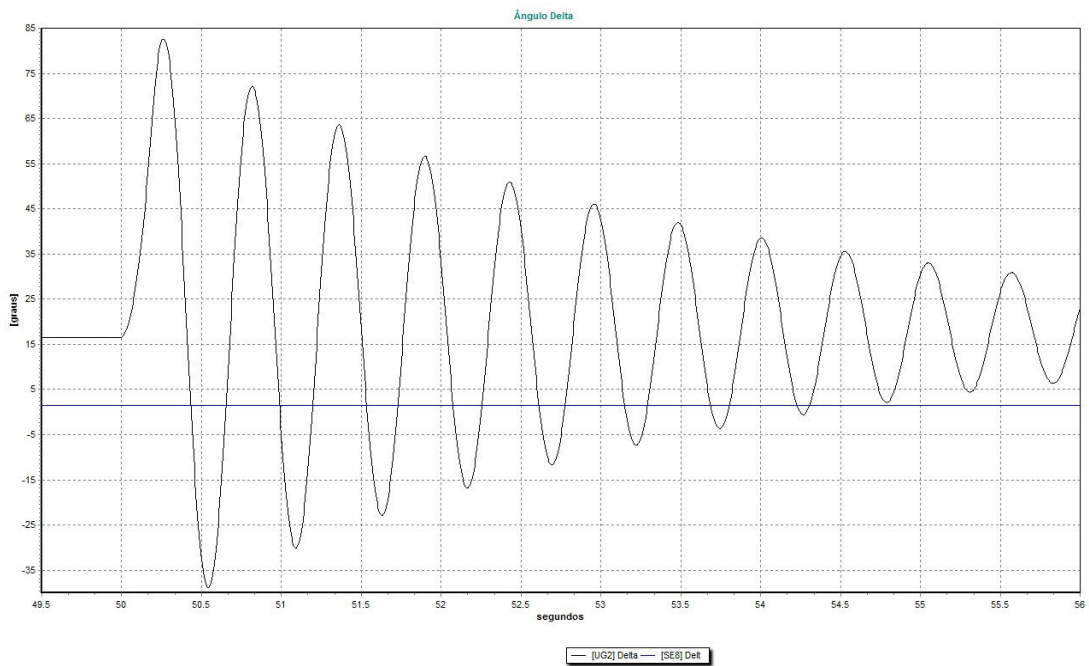


Gráfico 3- Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 200ms no sistema com gerador convencional (graus x segundos). Fonte: autoria própria.

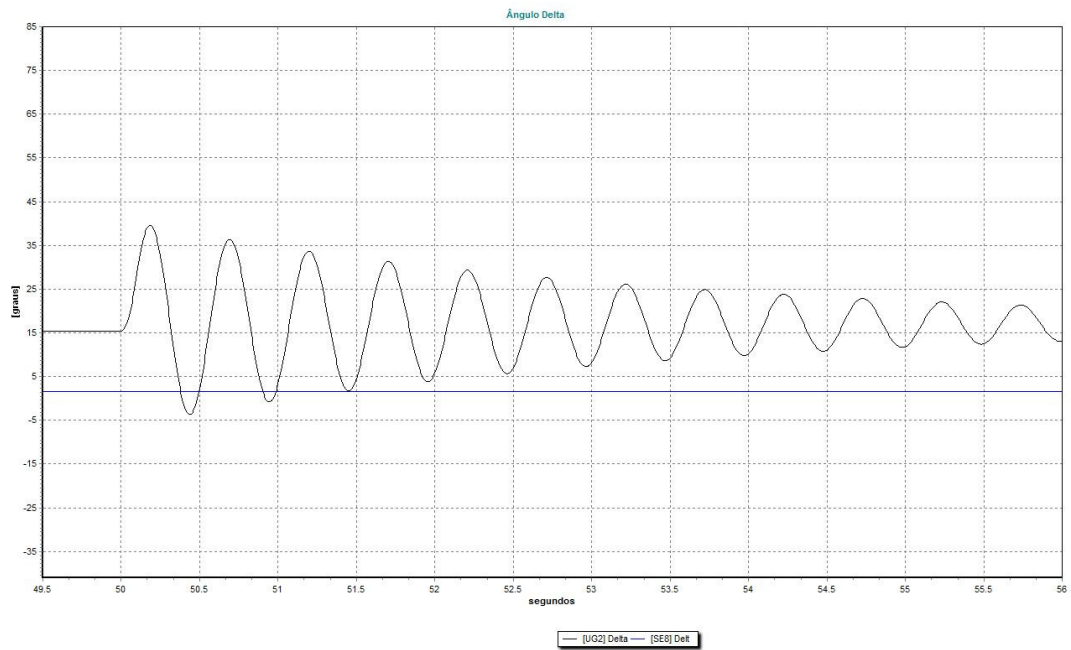


Gráfico 4- Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 100ms no sistema com *Powerformer* (graus x segundos). Fonte: autoria própria.

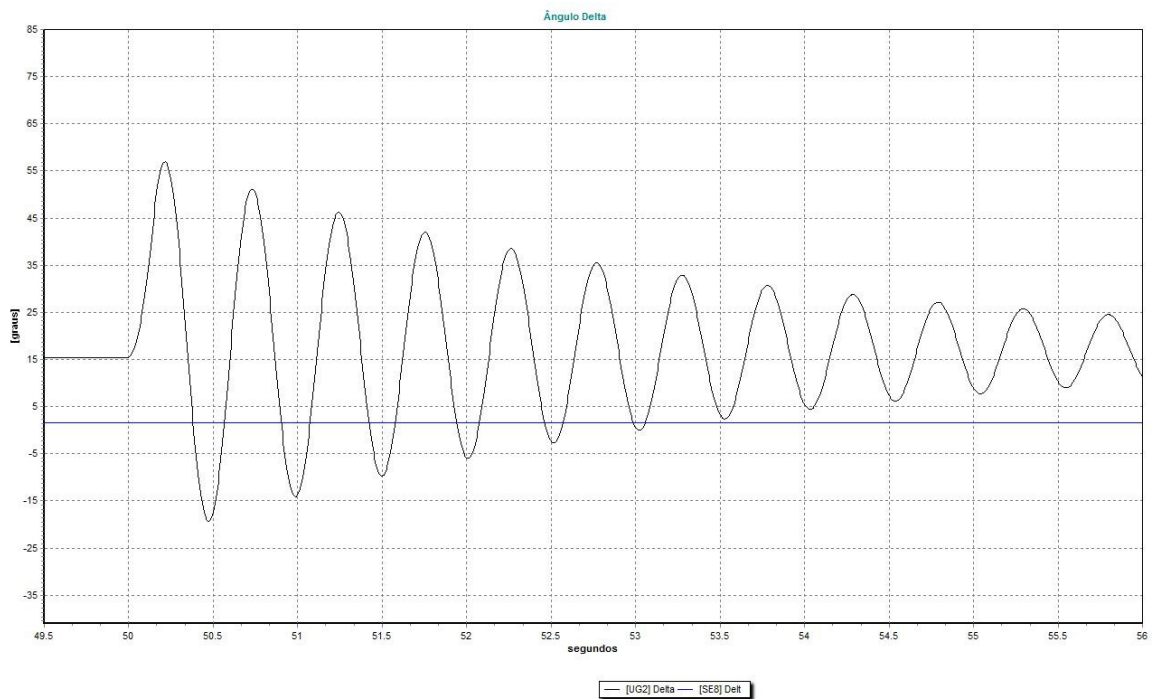


Gráfico 5 - Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 150ms no sistema com *Powerformer* (graus x segundos). Fonte: autoria própria.

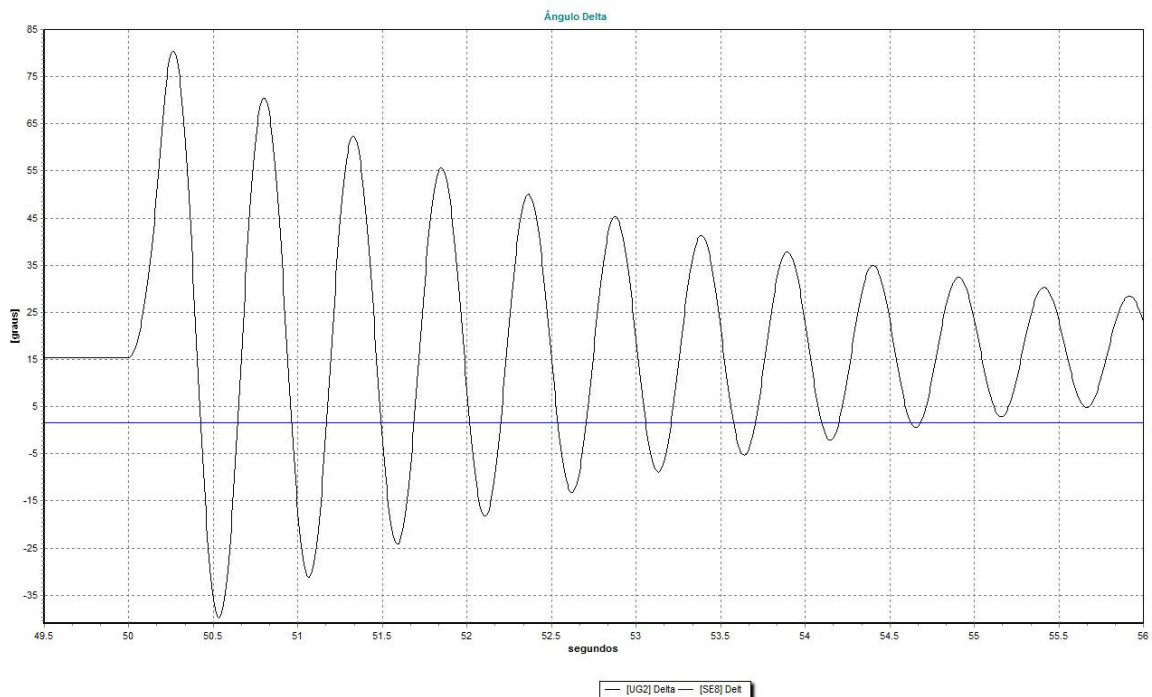


Gráfico 6 - Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 200ms no sistema com *Powerformer* (graus x segundos). Fonte: autoria própria.

Com intuito de apresentar o tempo de acomodamento, estão incluídos no apêndice deste trabalho os gráficos com o tempo de simulação até 90 segundos.

Em ambos os casos, nota-se que a quanto menor o tempo de abertura do disjuntor confere ao ângulo rotórico uma menor amplitude, isso ocorre devido ao fato deste tempo ser cada vez menor com relação ao ângulo crítico. A partir do método de tentativa e erro, foi sendo ajustado o tempo de abertura dos disjuntores da linha de transmissão e foi encontrado o tempo crítico de abertura do disjuntor, sendo de 270ms para o gerador convencional e 280ms para o *Powerformer*. Este tempo representa o tempo máximo para que o disjuntor da linha de transmissão que foi afetado pela falta opere sem que o gerador saia do estado de sincronismo com o barramento infinito.

O tempo de acomodação da oscilação foi obtido segundo uma tolerância de 0,2 graus com relação ao ângulo pós-falta para cada sistema.

Os dados obtidos pela simulação são apresentados nas três tabelas a seguir:

Tempo de eliminação da falta = 100ms		
Parâmetro	Powerformer	Ger. Conv.
Ângulo pré-falta δ_0 em graus	15,385	16,444
Ângulo pós-falta δ_e em graus	17,049	18,122
Máximo desvio de ângulo (δ_Δ) em graus	22,504	23,052
Tempo de acomodação da oscilação (t_a) em s	15,900	16,756

Tabela 9 – Dados para tempo de eliminação da falta de 100ms

Tempo de eliminação da falta = 150ms		
Parâmetro	Powerformer	Ger. Conv.
Ângulo pré-falta δ_0 em graus	15,385	16,444
Ângulo pós-falta δ_e em graus	17,049	18,122
Máximo desvio de ângulo (δ_Δ) em graus	39,875	40,661
Tempo de acomodação da oscilação (t_a) em s	17,705	18,252

Tabela 10 - Dados para tempo de eliminação da falta de 150ms

Tempo de eliminação da falta = 200ms		
Parâmetro	Powerformer	Ger. Conv.
Ângulo pré-falta δ_0 em graus	15,385	16,444
Ângulo pós-falta δ_e em graus	17,049	18,122
Máximo desvio de ângulo (δ_Δ) em graus	63,334	67,824
Tempo de acomodação da oscilação (t_a) em s	19,000	19,753

Tabela 11 - Dados para tempo de eliminação da falta de 200ms

4.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS CÁLCULOS DE CURTO-CIRCUITO

Após os cálculos com as equações citadas em 3.2.3.2, segue a tabela 12 contendo os valores obtidos para a falta no barramento 3, supondo que venha do sistema interligado:

Tabela 12 - Valores obtidos para curto-circuito no barramento 3. Fonte: autoria própria.

	Sistema Convencional	Sistema <i>Powerformer</i>
$I_{ccFT}(A)$	7191,07	1942,73
$I_{ccFF}(A)$	6591,2	1599,34
$I_{ccFFT}(A)$	2164,17	1930,53
$I_{cc3\phi}(A)$	8603,67	2013,59

E na tabela 13 os valores obtidos para a falta no barramento 1:

Tabela 13 - Valores obtidos para curto-circuito no barramento 1. Fonte: autoria própria.

	Sistema Convencional	Sistema <i>Powerformer</i>
$I_{ccFT}(A)$	13670,84	3387,35
$I_{ccFF}(A)$	18822,81	6727,56
$I_{ccFFT}(A)$	5354,64	1263,14
$I_{cc3\phi}(A)$	14665,75	7241,48

Graficamente, tem-se os valores:

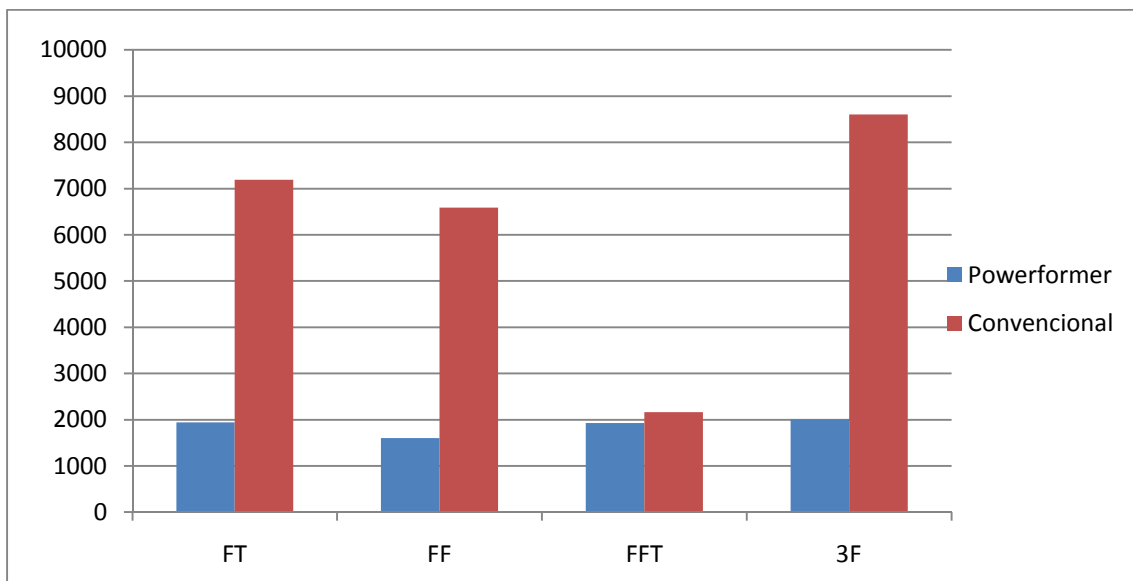


Gráfico 7 - Valores obtidos para curto-circuito no barramento 3. Fonte: autoria própria.

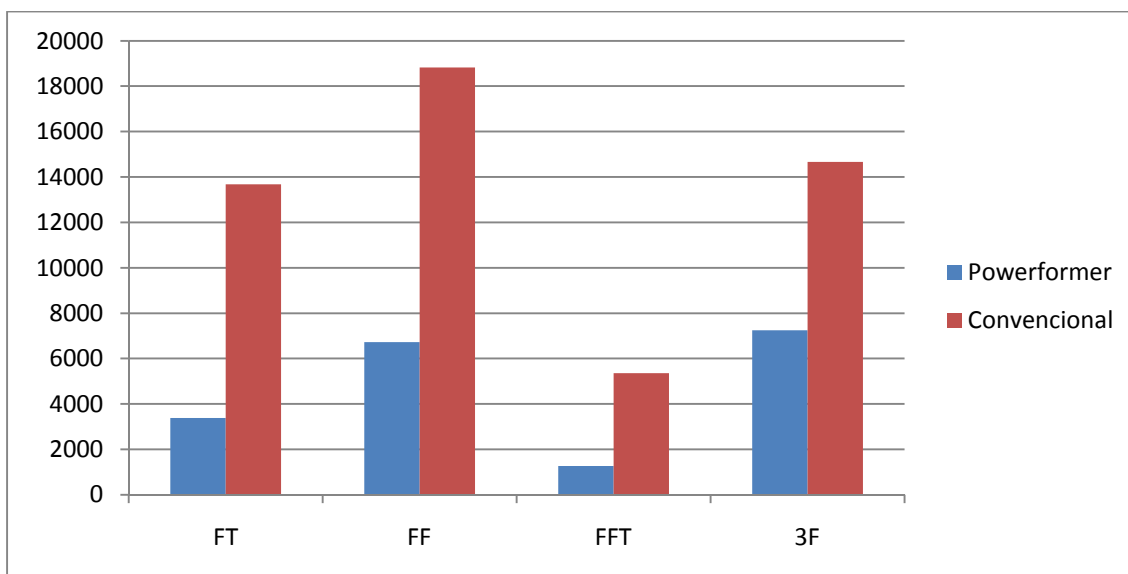


Gráfico 8 - Valores obtidos para curto-circuito no barramento 1. Fonte: autoria própria.

A partir destes valores obtidos, pode-se concluir que, em termos de corrente, o uso do *Powerformer* no sistema significa uma redução considerável. Por trabalhar em níveis de tensão elevados, evita danos aos demais componentes do sistema e seu dimensionamento devido a esse novo valor, pode impactar economicamente futuras aplicações e instalações.

Com a retirada do transformador, o sistema com *Powerformer* retira uma possibilidade de falta, suas respectivas proteções intrínsecas e usufrui de correntes menores. Aliás, pelo fato das correntes de operação se apresentarem muito menores que no sistema convencional é que se entendem as diferenças “benéficas” contidas nos gráficos acima.

Outra análise importante é observar que um sistema com *Powerformer* possui faltas fase-terra com valores próximos aos valores de faltas trifásicas, mostrando que a operação em neutro isolado tem suas desvantagens. No sistema convencional, o aterramento sólido a terra é necessário para evitar danos nas unidades geradoras.

Com a ocorrência de uma falta em um sistema utilizando *Powerformer*, a falta será absorvida pelo sistema interligado, em transformadores estrela-aterrado/ estrela-aterrado e conseqüentemente as proteções nele contidas serão utilizadas para isolar a falta.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES EM RELAÇÃO AO ESTUDO DE ESTABILIDADE

Este trabalho teve como um dos objetivos realizar um estudo inicial com relação ao comportamento do *Powerformer* conectado em um sistema de geração distribuída comparado ao comportamento do gerador convencional.

Na análise de estabilidade transitória, o modelo de um gerador de uma PCH foi implementado, no caso do gerador convencional, com transformador elevador e no caso do *Powerformer*, sem transformador elevador e assim através de linhas de transmissão foram conectados com configuração tipo pingo na rede de 34,5kV da Copel (este sendo considerado o barramento-infinito), de forma que estas características configuraram um sistema de geração distribuída. Na modelagem do sistema, foi considerado no caso do modelo do *Powerformer* a retirada da reatância do transformador elevador, em comparação ao modelo com gerador convencional. Foram considerados os mesmos valores de momento de inércia, uma vez que os *Powerformers* atuais utilizam o mesmo rotor dos geradores convencionais e foram utilizados os mesmos valores de reatância de gerador, conforme item 2.2.4.

O ângulo do rotor na situação pré-falta é ligeiramente menor no caso do *Powerformer* devido à ausência do transformador elevador devido à saída de sua reatância, fazendo com que o *Powerformer* a mesma capacidade do que o gerador convencional de absorver e prover potência reativa para as cargas ou ao sistema ao qual ele está conectado com menor deslocamento dos ângulos rotóricos. Os resultados obtidos para o ângulo pós-falta ilustram essa capacidade também, pois o *Powerformer* se estabiliza em um ângulo menor do que o do gerador convencional em todos os tempos de abertura do disjuntor.

Com relação ao tempo de abertura crítico obtido nas simulações, este tempo aumentou 10ms para o modelo de sistema do *Powerformer*, indicando uma maior capacidade deste de suportar uma falta sem perder o sincronismo e assim, manter a estabilidade.

A comparação entre o modelo de gerador convencional e o *Powerformer* com relação ao máximo desvio do ângulo rotórico resultou em diferenças de 0,8 e 4 graus e cerca de 700ms, respectivamente. Isso ilustra uma leve vantagem ao modelo do *Powerformer* de atingir um novo ponto de operação em um tempo menor do que o modelo com gerador convencional. Uma vez que a oscilação do ângulo rotórico faz também oscilar a potência injetada na no sistema causando o momentâneo desbalanceamento entre geração e consumo de energia elétrica, existe a importância de cessar a oscilação no menor tempo possível, porém esta é uma preocupação apresentada para o estudo de estabilidade dinâmica do sistema (BRETAS, ALBERTO, 2000). Apesar deste estudo visar apenas a análise do período transitório, com análise do sistema em um tempo de no máximo de 3s, foi considerado pertinente a inclusão do resultado do tempo de acomodação, pois este é um dos parâmetros utilizados para a análise dos resultados utilizados em um estudo de estabilidade transitória.

As considerações sobre o estudo de estabilidade são feitas sob o ponto de vista dos parâmetros do *Powerformer*. Para a modelagem, não foram considerado as características elétricas desse tipo de gerador, uma vez que a modelagem foi baseada nos modelos utilizados em outros estudos comparativos (AUMULLER, SAHA, 2003a). Conforme item 2.2.4, dados empíricos apresentam diferenças de valores de reatância entre os dois tipos de geradores.

Assim, a diferença entre os dois modelos estudados neste trabalho se resumiu basicamente na retirada do transformador elevador para o modelo do *Powerformer* e os resultados obtidos no presente estudo se deve exclusivamente à presença ou não do transformador elevador no modelo. Apesar de configurar uma pequena vantagem do ponto de estabilidade transitória, cabe ressaltar que as características internas do *Powerformer* não foram exploradas neste trabalho, como por exemplo, a maior capacidade do *Powerformer* de manter a estabilidade e sincronismo em caso de faltas, devido à presença de barras adicionais no estator citados no item 2.2.2.3. Porém, conforme item 2.2.4, a utilização de tais informações para o estudo comparativo não foi aplicado, tais informações referentes às

características internas dos *Powerformers* não constituem atualmente, uma base para se considerar como regra geral para estas máquinas (SOUZA, 2005).

Finalmente, em vista dos objetivos deste trabalho, a análise de estabilidade transitória visou avaliar a viabilidade técnica e os impactos da introdução do *Powerformer* em um sistema de geração distribuída, conclui-se que a referida tecnologia traz uma margem maior de estabilidade no sistema devido aos resultados representarem um leve aumento na capacidade do *Powerformer* suprir a demanda reativa do sistema e um leve aumento na capacidade de suportar perturbações de grande magnitude, tendo em vista que os aspectos de melhoria se originaram apenas a partir da retirada do transformador elevador e não considerando as características internas da máquina em questão.

5.2 CONCLUSÕES EM RELAÇÃO AO ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO

Durante este estudo, que envolveu vários aspectos teóricos e já existentes, foi levantada uma série de abordagens quanto à característica construtiva e sua aplicabilidade no sistema elétrico, limitado a PCH. E conforme definido nos objetivos, uma elaboração de comparativo de desempenho entre uma unidade convencional e uma unidade utilizando o *Powerformer*.

A primeira consideração a se levar em conta é o uso de cabos de alta tensão, que mostrou possível aumentar o nível de tensão na geração graças a uma nova tecnologia de isolamento, o XLPE. Com isso, o valor das correntes dentro do sistema de geração antes de chegar à rede é muito menor. A partir desta constatação nota-se que em nível de curto-circuito os prejuízos podem ser menores. A redução da corrente que circula pela geração possibilita que o dimensionamento de cabos, equipamentos e proteções na rede sejam readequados, bem como a área destinada para construção e, evidentemente, o custo de implementação reduzido em empreendimentos deste gênero.

Com um comparativo através de estudos teóricos de curto-circuito têm-se valores calculados mostrando que em uma falta o valor da corrente no sistema

convencional chega a ser 270% maior que em um sistema com *Powerformer*. E considerando uma falta trifásica na geração, o valor pode ser no mínimo 100% maior.

Portanto, seria interessante investir no sistema com *Powerformer* para PCH devido à simplificação na quantidade de equipamentos tanto de operação como proteção, de paradas para manutenção ou mesmo inspeção, e maior confiabilidade.

Além dos benefícios econômicos proporcionados, como menor área de construção civil e retirada do transformador elevador, é primordial afirmar que com a redução de corrente no sistema de geração e dos níveis de curto-circuito é esperado o aumento na segurança para operadores e, principalmente, ao responsável pela manutenção da máquina, pois dentro da Engenharia a tecnologia é criada para beneficiar primeiramente o ser humano com melhora da qualidade de vida, direta ou indiretamente.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros podem utilizar este como base para:

- Realizar uma análise de estabilidade transitória de um sistema multimáquinas, inserido no contexto de geração distribuída, onde o *Powerformer* seria confrontado em tempo real com outros geradores;
- Análise de curto-circuito considerando o mesmo sistema multimáquinas no contexto de geração distribuída;
- Avaliar o impacto na confiabilidade e estabilidade do sistema com enfoque na retirada do transformador elevador do sistema;
- Avaliar o desempenho do *Powerformer* através da modelagem e análise de uma usina híbrida, composta de uma unidade geradora com *Powerformer* e outra com um gerador convencional, como a planta de Porjus na Suécia.

6 REFERÊNCIAS

ACKERMANN, Thomas; ANDERSSON, Göran; SÖDER, Lennart. **Distributed Generation: a definition**. Electric Power Systems Research, Elsevier Science, Oxford, Reino Unido, v. 57, n. 3, p. 195 a 204, 2001

AL-HALABIEH, Sami. **Powerformer™**. Lappeenranta University of Technology. Lappeenranta, 1999.

ALMEIDA, A. A. W. de. **Sistemas Elétricos de Potência – Notas de Aula**, disponível em: <www.daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/SEP_notas_aula.pdf>. Acesso em 28 de Outubro de 2011.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; **Banco de Informações de Geração e Matriz Energética**, disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em 8 de Maio de 2011.

AUMULLER, Craig A.; SAHA, Tapan K. Investigating the Impact of *Powerformer* on Voltage Stability by Dynamic Simulation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 18, n. 3, Agosto 2003.

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.

BRASIL. LEI No 10.848, DE 15 DE MARÇO DE 2004. **Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos**. Brasília, 15 de março de 2004.

BRETAS, Newton G. ALBERTO, Luis Frenando C.; **Estabilidade Transitória em Sistemas Eletromagnéticos**; EESC/USP, São Carlos, 2000.

COPEL; **Manual de Acesso de Geração Distribuída ao Sistema da Copel – NTC 905100**; dezembro de 2010.

DETTMER, Roger; **The Heart Of a New Machine**, IEE Review, v. 44, n. 6, p. 255 a 258, 1998.

DRIESEN, J.; BELMANS, R.; **Distributed Generation: Challenges and Possible Solutions**, Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2006.

EL-KHATTAM, W; SALAMA, M.M.A. **Distributed generation technologies, definitions and benefits**. Electric Power Systems Research, Elsevier Science, Oxford, Reino Unido, v. 71, n. 2, p. 119 a 128, 2004.

IEA; **Distributed generation in liberalised electricity markets**, Organization for Economic Co-operation and Development, International Energy Agency, editora OECD/IEA, 2002.

INEE, Insitituto Nacional de Eficiência Energética, **Geração Distribuída e Cogeração**, Disponível em <http://www.inee.org.br/forum_sobre_gd_cg.asp?Cat=forum>, Acesso em 09/10/2010.

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, GERTMAR, L., KARLSSON T., **Breaking Conventions in Electrical Power Plants**, Cigré Session, Paris, p. 1 a 8, 1998

LEIJON, Mats, OWMAN, Frederick; **Powerformer: A Giant Step In Powerplant Engineering**, Electric Machines and Drives, 1999. International Conference IEMD '99, p. 830 a 832, 1999.

LEIJON, Mats, OWMAN, Frederick; **Powerformer - Experiences from the Application of Extruded Solid Dielectric Cables in the Stator Winding of Rotating Machines**, Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, v. 1, páginas p.736 a 744, 2000a

LEIJON, Mats, OWMAN, Frederick; **Powerformer - The prototype and beyond**, Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, v. 1, p. 139 a 144, 2000b

LIMA, Roberth dos S.; **Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**; Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, Dezembro de 2002.

LINDAHL, S.; **Improved control of field current heating for voltage stability machine design - Powerformer**, Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE, v. 1, p. 209 a 214, 2001.

METWALLY, Ibrahim A.; RADWAN, R. M.;ABOU-ELYAZIED, A. M. **Powerformers: A breakthrough of high-voltage power generators. IEEE Potentials**, IEEE Xplore, v. 27, n. 3, Agosto 2008.

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.

RODRÍGUEZ, C. R. C.; **Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede**, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2002.

SEVERINO, Mauro M; CAMARGO, Ivan M. T.; OLIVEIRA, Marco A. G., **Geração Distribuída: Discussão Conceitual e Nova Definição**, Revista Brasileira de Energia, v. 14, n. 1, p. 47 a 69, 2008.

SIMULIGHT; **Simulador para Redes Elétricas com Geração Distribuída - Manual do Usuário**; Fundação Coppetec, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

SJOGREN, F. G. A., JOHANSSON, S. G., DAALDER, J. E.; **Behavior of generator current limiters near the point of voltage collapse**; Electric Power Engineering, Stockholm Powertech, v.6, Nova Iorque, EUA, 1995.

SOUZA, André S. **Análise do desempenho do gerador de alta tensão - Powerformer – em comparação a uma máquina convencional**. 2005. 134p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2005041301.pdf>. Acesso em: 31/08/2010, 00:48.

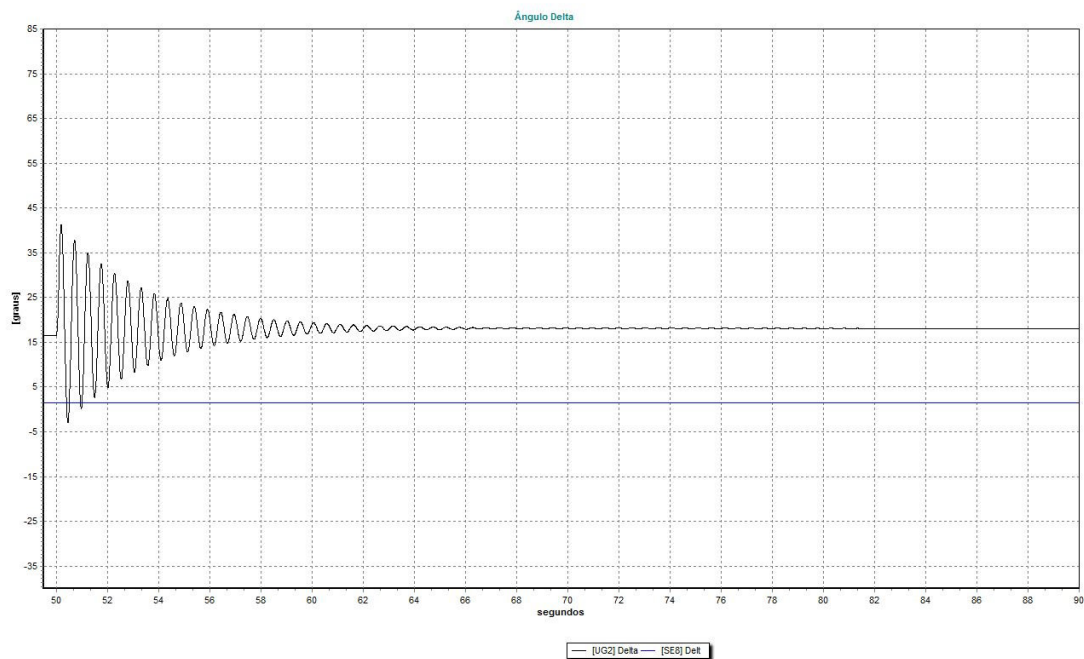
TAYLOR, C. W. **Improving grid behavior**, IEEE Spectrum, v. 36, p. 40 a 45, 1999.

WADE, World Alliance for Decentralized Energy, **How does DE work?**, Disponível em <http://www.localpower.org/deb_how.html>, Acesso em 09/10/2010.

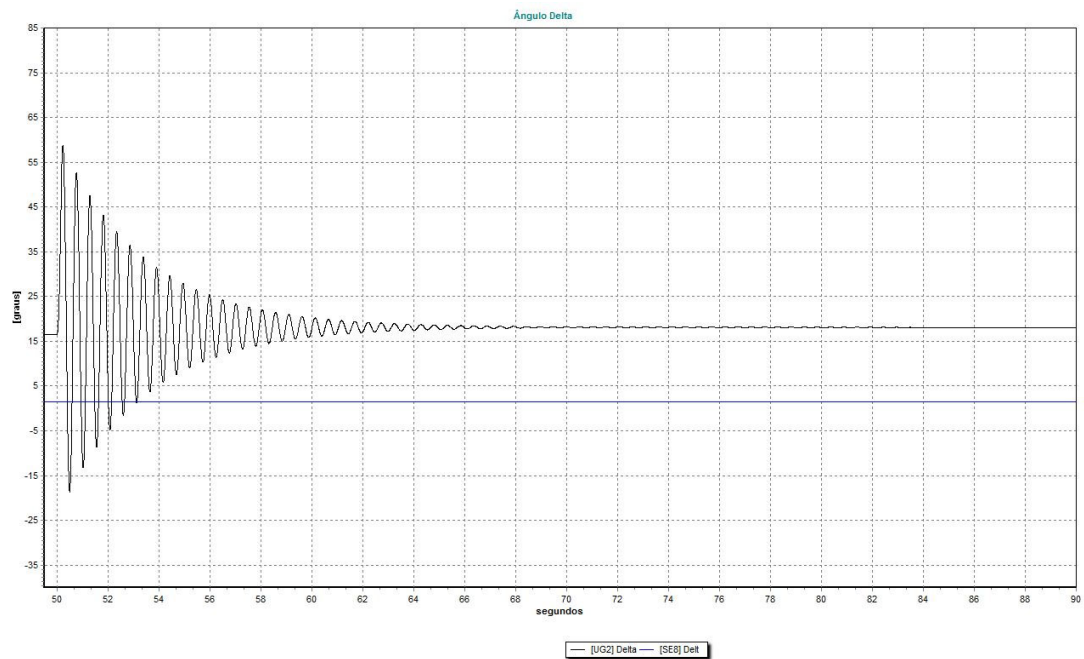
WILLIS, H.L., SCOTT,W.G., **Distributed Power Generation – Planning and Evaluation**, ed. Dekker, 2000.

APÊNDICES

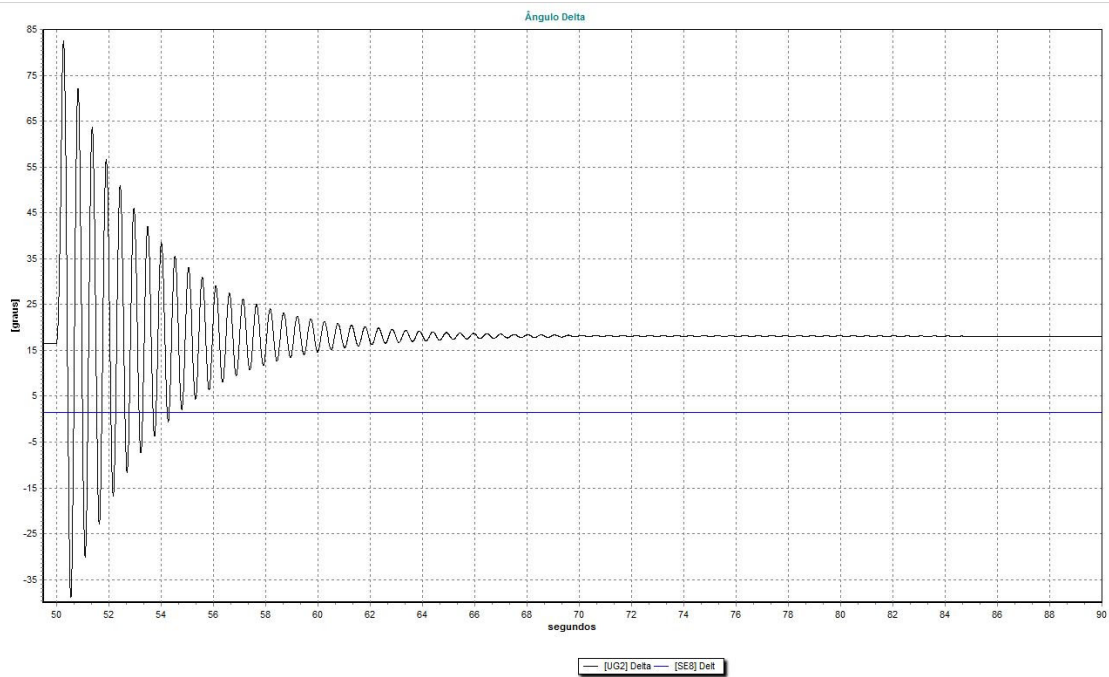
APÊNDICE 1 - Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 100ms no sistema com gerador convencional



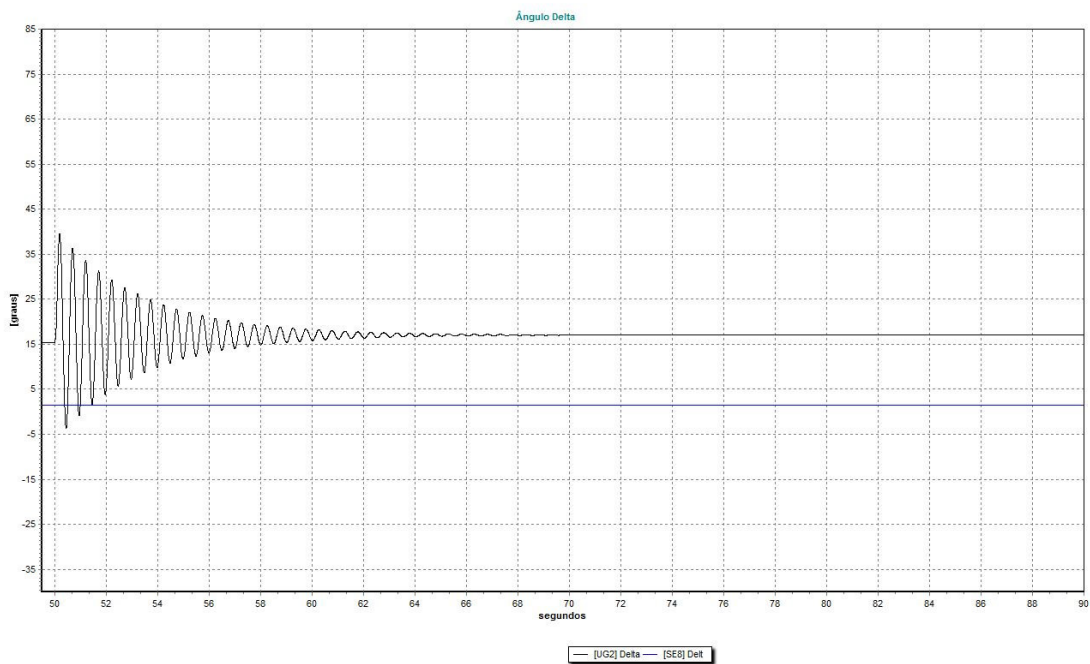
APÊNDICE 2 - Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 150ms no sistema com gerador convencional



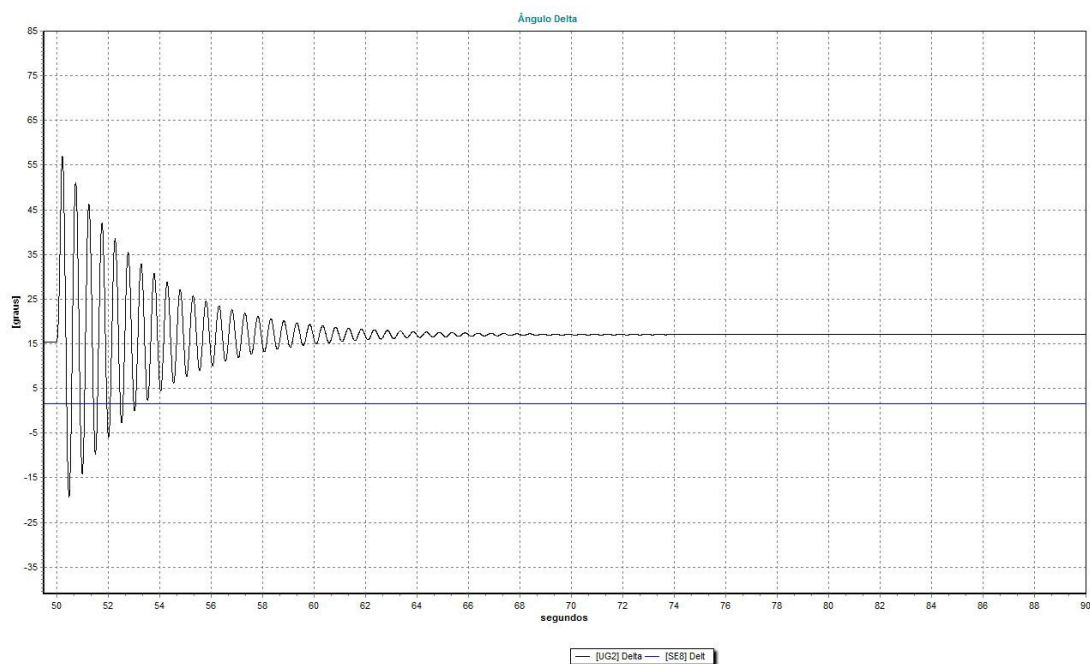
APÊNDICE 3 - Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 200ms no sistema com gerador convencional



APÊNDICE 4 - Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 100ms no sistema com Powerformer



APÊNDICE 5 - Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 150ms no sistema com Powerformer



APÊNDICE 6 - Ângulo do rotor para o tempo de abertura do disjuntor de 200ms no sistema com Powerformer

