

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM GERADOR EÓLICO EM CONEXÃO  
UNITÁRIA DURANTE A OCORRÊNCIA DE FALTAS

Victor Henrique Cascão

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DO  
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Ing.

---

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr-

(Orientador)

---

Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.

---

Eng. Carlos André Carreiro Cavaliere, MSc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
OUTUBRO DE 2007

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família que sempre me deu o suporte necessário e dedicou todo o seu esforço para que fosse possível a minha formação em uma pessoa capaz de lutar pelo meu futuro.

## AGRADECIMENTOS

A todos os professores e funcionários que contribuíram para realização deste trabalho fornecendo, nestes anos de faculdade, a base necessária para que eu pudesse estar me formando engenheiro elétrico pela UFRJ.

Ao Prof. Luis Guilherme Barbosa Rolim, pela orientação, compreensão e incentivo na elaboração deste trabalho.

A banca examinadora composta pelo professor Antonio Carlos Ferreira e pelo engenheiro Carlos André Cavaliere.

Ao engenheiro Eduardo Fiorini Pavinatto que colaborou com o meu aprendizado na área de energia eólica passando um pouco de seus conhecimentos e sua experiência no setor.

Aos amigos que tornaram mais fácil passar estes anos na faculdade e que indiretamente colaboraram para a elaboração deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de um gerador eólico por meio da observação do fluxo de potência no ponto de conexão de um parque eólico com a rede quando o sistema elétrico se encontrar sob a influência de diferentes tipos de curtos-circuitos.

A motivação para tal estudo se baseia no novo papel que as usinas eólicas estão assumindo no sistema elétrico de alguns países. Devido ao seu crescimento e ao aumento da sua parcela na geração de energia, as agências reguladoras de energia não permitem mais que grandes parques eólicos sejam desconectados da rede nos momentos de falta.

Para que sejam feitas tais análises este trabalho será composto de duas etapas principais. Na primeira serão feitas simulações computacionais dos tipos de curtos-circuitos mais comuns a fim de obter como cada uma deles afeta o sistema elétrico no que diz respeito ao comportamento das tensões.

Na segunda será montado um sistema elétrico equivalente que representará a conexão de uma turbina eólica com a rede elétrica. A partir deste sistema serão feitas as simulações dos diferentes tipos de defeitos com a turbina eólica permanecendo conectada ao sistema.

Feito isto serão analisados os problemas que ocorrem em virtude desta nova configuração de operação e de que maneira eles podem ser solucionados.



# ÍNDICE

<b>Capítulo 1 – Introdução</b> .....	1
1.1 <u>Situação no mundo</u> .....	4
1.2 <u>Comentários</u> .....	9
<b>Capítulo 2 – Escolha do Aerogerador</b> .....	10
2.1 <u>Aerogerador Enercon</u> .....	11
2.2 <u>Sistema de sincronização com a rede</u> .....	15
2.2.1 <u>Método de cruzamento por zero</u> .....	16
2.2.2 <u>Método da filtragem das tensões da rede</u> .....	17
2.2.3 <u>Método PLL (Phase-Locked Loop)</u> .....	17
2.3 <u>Comentários</u> .....	18
<b>Capítulo 3 – Procedimentos de rede</b> .....	20
3.1 <u>Operação em regime de frequência não nominal</u> .....	21
3.2 <u>Geração/absorção de reativos</u> .....	22
3.3 <u>Operação em regime de tensão não nominal</u> .....	22
3.4 <u>Participação em sistemas especiais de proteção (SEP)</u> .....	22
3.5 <u>Potência ativa de saída</u> .....	23
3.6 <u>Variação de tensão em regime permanente</u> .....	23
3.7 <u>Instabilidade de tensão</u> .....	23
3.8 <u>Desequilíbrio de tensão</u> .....	23
3.9 <u>Flutuação de tensão</u> .....	24
3.10 <u>Distorção harmônica</u> .....	24
3.11 <u>Requisitos específicos para o sistema de proteção do gerador</u> .....	24
3.12 <u>Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede básica</u> ..	25
3.13 <u>Requisitos para tomada de carga</u> .....	26
3.14 <u>Comentários</u> .....	26
<b>Capítulo 4 – Afundamento de Tensão</b> .....	27
4.1 <u>Falta monofásica para a terra</u> .....	31
4.1.1 <u>Falta monofásica para a terra através de um transformador <math>Y_g Y_g</math></u> .....	33
4.1.2 <u>Falta monofásica para a terra através de um transformador <math>\Delta Y</math></u> .....	35
4.2 <u>Falta bifásica</u> .....	38

4.2.1	<u>Falta bifásica através de um transformador <math>Y_g Y_g</math></u> .....	40
4.2.2	<u>Falta bifásica através de um transformador <math>\Delta Y</math></u> .....	42
4.3	<u>Falta bifásica para a terra</u> .....	44
4.3.1	<u>Falta bifásica para a terra através de um transformador <math>Y_g Y_g</math></u> .....	46
4.3.2	<u>Falta bifásica para a terra através de um transformador <math>\Delta Y</math></u> .....	48
4.4	<u>Falta fase-terra fase-terra</u> .....	50
4.4.1	<u>Falta fase-terra fase-terra através de um transformador <math>Y_g Y_g</math></u> .....	51
4.4.2	<u>Falta fase-terra fase-terra através de um transformador <math>\Delta Y</math></u> .....	52
4.5	<u>Falta trifásica</u> .....	54
4.6	<u>Comentários</u> .....	57
<b><u>Capítulo 5 – Simulação Computacional</u></b> .....		58
5.1	<u>Sistema elétrico equivalente</u> .....	59
5.2	<u>Faltas simuladas</u> .....	60
5.2.1	<u>Simulação monofásica para a terra</u> .....	61
5.2.2	<u>Simulação bifásica</u> .....	64
5.2.3	<u>Simulação bifásica para a terra</u> .....	66
5.2.4	<u>Simulação fase-terra fase-terra</u> .....	68
5.2.5	<u>Simulação trifásica</u> .....	70
5.3	<u>Comentários</u> .....	71
<b><u>Capítulo 6 – Análises e Conclusões</u></b> .....		73
6.1	<u>Comentário final</u> .....	77
6.2	<u>Sugestões de trabalhos futuros</u> .....	78
<b><u>Anexos:</u></b> .....		79
<b><u>Bibliografia</u></b> .....		80



## ÍNDICE DE TABELAS

<u>Tabela 1 - Potência eólica instalada na Europa no fim de 2006</u> .....	6
<u>Tabela 2 - Potência eólica nos países do mundo em 2006</u> .....	9
<u>Tabela 3 - Estatística de ocorrência de faltas</u> .....	27
<u>Tabela 4 - Grau de redução da potência ativa média nos diferentes tipos de falta</u> .....	73
<u>Tabela 5 - Parâmetros do sistema elétrico equivalente</u> .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Figura 1 – Novas instalações na Europa (2006)</u> .....	6
<u>Figura 2 – Formas de onda do retificador do conversor de frequência</u> .....	12
<u>Figura 3 – Formas de onda da corrente ao passar pelo retificador do conversor de frequência</u> .....	12
<u>Figura 4 – Formas de onda após o chopper e o filtro do conversor de frequência</u> .....	13
<u>Figura 5 – Formas de onda de entrada e saída do inversor do conversor de frequência</u> .....	14
<u>Figura 6 – Desenho esquemático do gerador eólico</u> .....	15
<u>Figura 7 – Curva de suportabilidade a subtensões</u> .....	25
<u>Figura 8 – Representação da rede elétrica e do local onde será conectada a turbina eólica</u> ..	29
<u>Figura 9 – Curto-circuito fase-terra</u> .....	31
<u>Figura 10 – Equivalente de Thèvenin para o curto-circuito fase-terra</u> .....	33
<u>Figura 11 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-terra (<math>Y_g Y_g</math>)</u> .....	34
<u>Figura 12 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-terra (<math>Y_g Y_g</math>)</u> .....	35
<u>Figura 13 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-terra (<math>\Delta Y</math>)</u> .....	37
<u>Figura 14 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-terra (<math>\Delta Y</math>)</u> .....	38
<u>Figura 15 – Curto-circuito bifásico</u> .....	39
<u>Figura 16 – Equivalente de Thèvenin para o curto-circuito bifásico</u> .....	40
<u>Figura 17 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-fase (<math>Y_g Y_g</math>)</u> .....	41
<u>Figura 18 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-fase (<math>Y_g Y_g</math>)</u> .....	41
<u>Figura 19 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-fase (<math>\Delta Y</math>)</u> .....	43
<u>Figura 20 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-fase (<math>\Delta Y</math>)</u> .....	44
<u>Figura 21 – Curto-circuito bifásico para a terra</u> .....	44
<u>Figura 22 – Equivalente de Thèvenin para o curto-circuito bifásico para a terra</u> .....	45
<u>Figura 23 – Diagrama fasorial para o curto-circuito bifásico para a terra (<math>Y_g Y_g</math>)</u> .....	46
<u>Figura 24 – Transformada de Clarke para o curto-circuito bifásico para a terra (<math>Y_g Y_g</math>)</u> .....	47
<u>Figura 25 – Diagrama fasorial para o curto-circuito bifásico para a terra (<math>\Delta Y</math>)</u> .....	49

<u>Figura 26 – Transformada de Clarke para o curto-circuito bifásico para a terra (<math>\Delta Y</math>)</u> .....	49
<u>Figura 27 – Curto-circuito fase-terra fase-terra</u> .....	50
<u>Figura 28 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-terra fase-terra (<math>Y_g Y_g</math>)</u> .....	51
<u>Figura 29 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-terra fase-terra (<math>Y_g Y_g</math>)</u> .....	52
<u>Figura 30 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-terra fase-terra (<math>\Delta Y</math>)</u> .....	53
<u>Figura 31 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-terra fase-terra (<math>\Delta Y</math>)</u> .....	54
<u>Figura 32 – Curto-circuito trifásico</u> .....	55
<u>Figura 33 – Equivalente para o curto-circuito trifásico</u> .....	55
<u>Figura 34 – Diagrama fasorial para o curto-circuito trifásico</u> .....	56
<u>Figura 35 – Transformada de Clarke para o curto-circuito trifásico</u> .....	56
<u>Figura 36 – Sistema PLL (Phase-Locked Loop)</u> .....	60
<u>Figura 37 – Desenho esquemático da falta monofásica para a terra</u> .....	62
<u>Figura 38 – Potências instantâneas para o defeito monofásico para a terra <math>Y_g Y_g</math></u> .....	63
<u>Figura 39 – Potências instantâneas para o defeito monofásico para a terra <math>\Delta Y_g</math></u> .....	64
<u>Figura 40 – Desenho esquemático da falta bifásica</u> .....	65
<u>Figura 41 – Potências instantâneas para o defeito bifásico <math>Y_g Y_g</math></u> .....	65
<u>Figura 42 – Potências instantâneas para o defeito bifásico <math>\Delta Y_g</math></u> .....	66
<u>Figura 43 – Desenho esquemático da falta bifásica para a terra</u> .....	67
<u>Figura 44 – Potências instantâneas para o defeito bifásico para a terra <math>Y_g Y_g</math></u> .....	67
<u>Figura 45 – Potências instantâneas para o defeito bifásico para a terra <math>\Delta Y_g</math></u> .....	68
<u>Figura 46 – Desenho esquemático da falta fase-terra fase-terra</u> .....	69
<u>Figura 47 – Potências instantâneas para o defeito fase-terra fase-terra <math>Y_g Y_g</math></u> .....	69
<u>Figura 48 – Potências instantâneas para o defeito fase-terra fase-terra <math>\Delta Y_g</math></u> .....	70
<u>Figura 49 – Desenho esquemático da falta trifásica</u> .....	70
<u>Figura 50 – Potências instantâneas para o defeito trifásico</u> .....	71

## Capítulo 1 – Introdução

Há cerca de quinze anos os parques eólicos de grande porte não eram componentes muito comuns do sistema elétrico da maioria dos países. Devido ao tipo de aerogeradores disponíveis no mercado o que se via eram apenas instalações compostas por turbinas isoladas ou conjuntos de no máximo duas ou três turbinas. Isto era motivado pelo fato de estes aerogeradores serem naquela época equipamentos muito caros, de baixa eficiência, de baixa potência (no máximo 500 kW) e com diâmetro do rotor e altura da torre de no máximo 50m. Com isso os sistemas eólicos instalados tinham como principal finalidade fornecer pouca quantidade de energia para locais onde seria muito caro levar a rede de transmissão elétrica.

Estes tipos de instalações, que são conhecidos como sistemas autônomos de pequeno porte, são normalmente destinados à eletrificação rural e caracterizados por possuírem uma turbina eólica, um banco de baterias, normalmente baterias chumbo-ácido 12 V seladas para funcionar como elemento armazenador de energia elétrica, um controlador de carga que serve para proteger as baterias contra sobrecarga ou descarga excessiva e um inversor que tem a finalidade de converter a energia elétrica de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), de forma a permitir a utilização de eletrodomésticos convencionais.

Caso fosse necessário fazer uma conexão deste sistema com a rede, esta era feita geralmente na baixa tensão. Portanto, por não ser um sistema de grande importância era comum determinar na lógica de proteção, a fim de proteger as turbinas eólicas, que elas fossem desconectadas da rede no momento em que qualquer um dos parâmetros (tensão, frequência, etc.) sofresse alguma perturbação. Além disso, agindo desta maneira, não

considerando uma geração na ponta da rede, ficava mais fácil projetar a lógica de proteção desta rede, já que somente os parâmetros normais entrariam nos cálculos.

Porém agora este cenário se modificou. O que se vê hoje em dia é um grande aumento na quantidade de potência eólica instalada pelo mundo. Este novo cenário vem como consequência de vários fatores como, por exemplo, o avanço da tecnologia dos aerogeradores. Atualmente eles são produzidos em escala industrial e chegam a 3.000kW de potência, com diâmetro de rotor de 100m e altura de torre de 110m. São turbinas cada vez maiores, de maior potência e mais eficientes. Durante os últimos dez anos o preço das turbinas eólicas teve uma queda de 5% a cada ano, enquanto que ao mesmo tempo o rendimento aumentou em 30%. Além disso, o custo de produção de eletricidade pela ação do vento diminuiu. Na Europa este valor caiu, nos últimos 15 anos, em aproximadamente 80%.

Porém é importante observar, para não deixar uma falsa impressão sobre a energia eólica, que mesmo com estes dados mostrados acima ainda é mais caro construir uma usina eólica do que construir, por exemplo, uma termelétrica. Então o principal fator que realmente vem impulsionando a energia eólica como fonte geradora de energia é obviamente a questão ambiental. As usinas eólicas representam a preocupação do mundo com a emissão dos chamados gases do efeito estufa que são produzidos principalmente na queima dos combustíveis fósseis presentes nas termelétricas. Portanto mesmo sendo uma fonte de energia de implantação mais cara, as usinas eólicas vêm ganhando espaço no cenário mundial.

Então, por todos estes motivos, parques eólicos de grande porte são cada vez mais comuns, principalmente na Europa, e são responsáveis, como poderá ser visto o tópico 1.1 Situação no mundo, por uma parte considerável da energia gerada. Eles têm como principal

finalidade fazer a complementação da geração de energia da região tornando mais diversificada a matriz energética local, diminuindo assim a probabilidade de haver falta de energia. Sistemas deste tipo são denominados pelas operadoras de energia como geração distribuída.

A conexão destes parques com a rede elétrica é feita geralmente na média tensão (34,5kV ou 69kV), o que acarreta numa maior preocupação no que diz respeito a sua interferência na estabilidade do sistema. Para fazer esta conexão geralmente são utilizados um conversor e um transformador elevador. Este conversor é um equipamento eletrônico (composto por retificador, inversor, etc.) que converte a energia gerada pela turbina, em geral tensão AC e frequência variável, para níveis adequados à injeção na rede. Já o transformador tem a função de aumentar o nível da tensão disponibilizada pelo conversor para o nível de tensão da rede, da ordem de dezenas ou centenas de kV.

A grande diferença em relação aos sistemas autônomos de pequeno porte é que neste caso não há o armazenamento de energia (baterias), ou seja, o fornecimento de energia, que só acontece quando existe disponibilidade de vento, é feito diretamente para a rede elétrica.

Portanto, tendo em mente tudo o que foi apresentado até este momento, percebe-se que, por serem responsáveis atualmente por uma grande parte da geração de energia, os parques eólicos não podem mais se desconectar da rede elétrica no momento da falta, pois seu desligamento pode acarretar em uma falta de energia. Logo, estes parques eólicos devem ser caracterizados como sistemas de importância dentro do sistema elétrico e merecem normas especiais para regularizar sua conexão com a rede.

O Brasil, apesar de não possuir ainda uma grande quantidade de usinas eólicas conectadas ao sistema elétrico, já possui regulamentações que obrigam estas poucas usinas a

se enquadrarem em condições especiais de operação e manutenção. Dentre elas, exigências de como se portar sob desligamentos acarretados por curto-circuito.

Como esta situação é relativamente nova, ainda não se sabe com certeza qual será o comportamento dos geradores eólicos e do fluxo de potência no ponto de conexão do parque com a rede elétrica quando ocorrerem estas condições de falta, pois isto vai depender das características da rede e do princípio de funcionamento de cada turbina eólica, ou seja, de qual tipo de gerador é usado, de como são os sistemas de controle desta turbina e de que maneira ela é conectada à rede elétrica.

Tendo em vista o que foi apresentado acima se pode dizer que este último parágrafo representa o tema central deste trabalho. Portanto para analisar o comportamento da rede elétrica e das turbinas eólicas sob as condições de curto-circuito mais comuns serão feitas algumas simulações utilizando o programa MATLAB.

Primeiramente será demonstrado como cada tipo de curto-circuito afeta o sistema elétrico no que diz respeito às características de afundamento de tensão. Após, será montado um equivalente elétrico que represente a conexão de um parque eólico com a rede elétrica que terá a finalidade de fornecer os dados de fluxo de potência para que seja possível determinar os problemas decorrentes. Com isso, além de descobrir as conseqüências que cada situação causa no sistema elétrico este estudo pode servir como base para determinar qual dos muitos tipos de aerogeradores disponíveis se adaptará melhor a este novo cenário.

A fim de demonstrar por meio de dados e números o avanço da energia eólica no âmbito mundial e desta maneira justificar a principal motivação deste trabalho, que se baseia no aumento da produção de energia por meio de parques eólicos, a seção 1.1 demonstrará a seguir como está o desenvolvimento desta fonte de energia apresentando a quantidade de potência eólica instalada em vários países.

## 1.1 Situação no mundo

Embora o mercado de usinas eólicas não seja explorado em toda sua plenitude e ainda esteja em crescimento no Brasil, ele já é um grande negócio no mundo, principalmente na Europa.

A criação da Associação Européia de Energia Eólica (EWEA) demonstra a preocupação que estes países têm com esta fonte de energia. A EWEA é a maior e mais poderosa rede de energia eólica do mundo e tem como principal finalidade estimular o aproveitamento desta fonte de energia na Europa e em todo o mundo. Ela é composta por 30 países e mais de 300 companhias e associações, englobando 98% dos fabricantes do mercado eólico do mundo.

De acordo suas com estatísticas, só no ano de 2006 foram investidos 9 bilhões de euros em energia eólica. Neste mesmo ano foram instalados 7588 MW de potência, superando em 23% a quantidade instalada em 2005.

Atualmente a Europa tem o total de 48000 MW de potência eólica instalada que são capazes de produzir aproximadamente 100 TWh de energia, em um ano de ventos com velocidade média normal. Esta produção representa 3,3% de toda a energia consumida na Europa.

Falando especificamente dos países que mais se destacam em investimentos nesta área, observa-se que Alemanha, Espanha e Dinamarca são os que mais atraem investimentos em energia eólica e os dois primeiros representam juntos 50% de todo o mercado europeu. A Alemanha, com o acréscimo de 2233 MW em 2006, ultrapassou a marca de 20000 MW de potência instalada.



Entretanto, até mesmo os países que não possuem grande tradição em investimentos em energia eólica estão mudando de idéia. Tirando os três países já mencionados acima, houve uma elevação de potência eólica instalada de 680 MW em 2002 para 3755 MW em 2006, nos demais países europeus. Este número tem se elevado como consequência da EU Renewable Electricity Directive que tem encorajado a Comissão e o Conselho Europeu a tomar medidas de proteção que asseguram a estabilidade das fontes renováveis de energia na Europa. No gráfico da Figura 1 está apresentado, dividido por países, o grau de investimento em novas instalações na Europa em 2006. Já na Tabela 1, apresentada posteriormente, pode ser visto o atual momento da energia eólica na Europa.

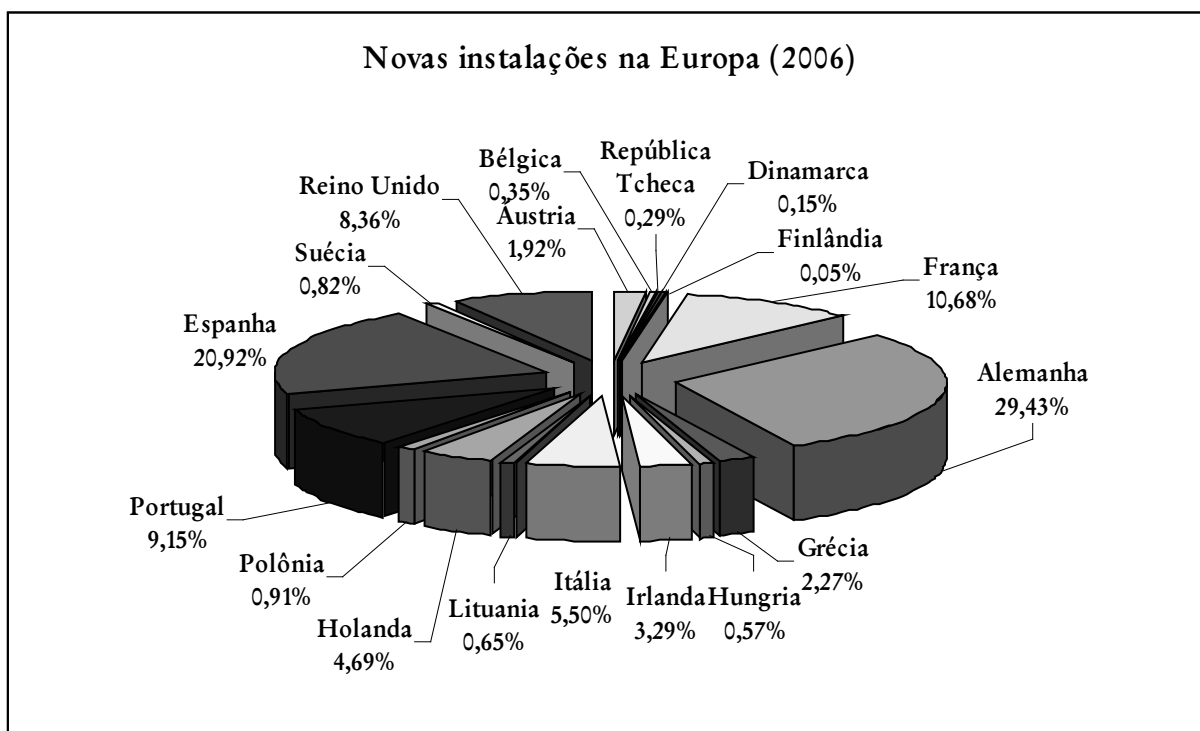


Figura 1 – Novas instalações na Europa (2006)

Este gráfico apresentado na Figura 1 e os dados da Tabela 1 foram retirados de artigos presentes no site da EWEA ([www.ewea.org](http://www.ewea.org)).

Tabela 1 – Potência eólica instalada na Europa no fim de 2006

Países da Associação Europeia de Livre Comércio (MW)			
Países	Final de 2005	Instalado em 2006	Final de 2006
Islândia	0,00	0,00	0,00
Liechtenstein	0,00	0,00	0,00
Noruega	267,00	47,00	314,00
Suíça	11,60	0,00	11,60
Total	278,60	47,00	325,60

Países de Acesso a União Europeia (MW)			
Países	Final de 2005	Instalado em 2006	Final de 2006
Croácia	6	11,2	17,2
Turquia	20	30,85	50,85
Total	26	42,05	68,05

Países da União Europeia (MW)			
Países	Total no final de 2005	Instalado em 2006	Total no final de 2006
Áustria	819,00	145,60	964,60
Bélgica	167,40	26,30	193,70
Bulgária	10,00	22,00	32,00
Chipre	0,00	0,00	0,00
República Tcheca	28,00	22,00	50,00
Dinamarca	3128,00	11,50	3139,50
Estônia	32,00	0,00	32,00
Finlândia	82,00	4,00	86,00
França	757,00	810,00	1567,00
Alemanha	18414,90	2233,10	20648,00
Grécia	573,30	172,50	745,80
Hungria	17,50	43,40	60,90
Irlanda	495,50	249,90	745,40
Itália	1718,00	417,00	2135,00
Letônia	27,00	0,00	27,00
Lituânia	6,40	49,05	55,45
Luxemburgo	35,30	0,00	35,30
Malta	0,00	0,00	0,00
Holanda	1219,00	356,00	1575,00
Polônia	83,00	69,30	152,30
Portugal	1022,00	694,40	1716,40
Romênia	1,69	1,30	2,99
Eslováquia	5,00	0,00	5,00

Eslovênia	0,00	0,00	0,00
Espanha	10028,00	1587,16	11615,16
Suécia	509,50	62,15	571,65
Reino Unido	1332,00	634,40	1966,40
Total	40511,49	7611,06	48122,55

Demais Países			
Países	Final de 2005	Instalado em 2006	Final de 2006
Ilhas Faroe	4,00	0,00	4,00
Ucrânia	77,30	8,30	85,60
Total	81,30	8,30	89,60
Total Europa	40897,39	7708,41	48605,80

Vale destacar que apesar de não apresentarem grandes investimentos, quando comparados aos principais países europeus, países como Polônia, Lituânia e Hungria triplicaram no último ano o número de novas instalações eólicas. Agora oito países europeus possuem mais de 1000 MW de potência eólica instalada.

Abordando agora todo o mundo, não especificamente a Europa, percebe-se que a energia eólica também está em amplo crescimento. Houve um acréscimo de 14900 MW, subindo para 73904 MW o total de potência eólica instalada no mundo. Esta potência é capaz de suprir por volta de 1 % de toda a energia consumida mundialmente. Acredita-se que para 2010 atinja-se a marca de 160000 MW de potência instalada.

Neste contexto devem-se destacar os Estados Unidos que possui 11603 MW instalados, a China, que possui 2405 MW instalados e a Índia, que possui 6270 MW instalados.

Mais de 2400 MW de potência foram instalados nos Estados Unidos no ano de 2006. Este valor é o bastante para abastecer 650 mil residências americanas. Somando com o total já instalado nos anos anteriores serão produzidos aproximadamente 31 bilhões kWh nos EUA no ano de 2007. Este é um valor suficiente para abastecer 3 milhões de residências.

Em apenas dez anos (1997-2006) aumentou-se em 10 vezes o total de potência eólica instalada no mundo.

A América Latina, principalmente o Brasil, vem demonstrando interesse em encontrar maneiras de investir em energia eólica. Tanto que está marcado para 2007 na Argentina a Conferência Anual de Energia Eólica que visa encontrar soluções para alguns problemas políticos.

Segundo Hermann Oelsner, presidente da Associação Africana de Energia Eólica, a energia eólica pode ser a solução para os problemas de energia que afetam a África. Ele está confiante que grandes parques eólicos podem ser instalados, principalmente no sul da África, onde há carência na produção de energia.

A tabela abaixo mostra um panorama da quantidade de potência eólica instalada no mundo.

Tabela 2 – Potência eólica nos países do mundo em 2006

Ranking Total 2006	País	Capacidade Adicional em 2006 MW	Crescimento em 2006 %	Capacidade Total no fim de 2006 MW	Capacidade Total em 2005 MW	Ranking Total em 2005
1	Alemanha	2194,00	11,9	20622,00	18428,00	1
2	Espanha	1587,00	15,8	11615,00	10028,00	2
3	EUA	2454,00	26,8	11603,00	9149,00	3
4	Índia	1840,00	41,5	6270,00	4430,00	4
5	Dinamarca	8,00	0,3	3136,00	3128,00	5
6	China	1145,00	90,9	2405,00	1260,00	8
7	Itália	405,00	23,6	2123,00	1718,00	6
8	Reino Unido	610,00	45,1	1963,00	1353,00	7
9	Portugal	628,00	61,4	1650,00	1022,00	11
10	França	810,00	106,9	1567,00	757,00	13
11	Holanda	336,00	27,5	1560,00	1224,00	9
12	Canadá	768,00	112,4	1451,00	683,00	14

13	Japão	354,00	34	1394,00	1040,00	10
14	Áustria	146,00	17,8	965,00	819,00	12
15	Austrália	238,00	41,1	817,00	579,00	15
16	Grécia	183,00	31,9	756,00	573,00	16
17	Irlanda	147,00	29,6	643,00	496,00	18
18	Suécia	54,00	10,6	564,00	510,00	17
19	Noruega	55,00	20,4	325,00	270,00	19
20	Brasil	208,00	729,6	237,00	29,00	34
	Resto	730,00	48,4	2238,00	1508,00	
Total		14900,00	20,16	73904,00	59004,00	

## 1.2 Comentários

Neste capítulo foi apresentado o tema central do trabalho, a motivação que levou à escolha deste tema e um panorama geral da energia eólica no mundo. Além disso, foram definidos também os passos que serão tomados para que seja possível obter o resultado desejado neste projeto. O próximo capítulo será destinado à apresentação da turbina eólica a ser utilizada neste trabalho. Será explicado o motivo da escolha, dentre as muitas possibilidades existentes, e o princípio de funcionamento do aerogerador escolhido.

## Capítulo 2 – Escolha do Aerogerador

No mercado atual existem vários tipos de aerogeradores. Aerogeradores que utilizam geradores síncronos, geradores assíncronos, controle de potência do tipo stall, do tipo pitch, acoplamento direto, acoplamento por meio de caixa multiplicadora, geradores de dupla alimentação e etc. Portanto escolher a turbina certa para o seu projeto requer uma boa avaliação das características de vento e de relevo do local de projeto para adequá-las corretamente com as características da turbina, a fim de encontrar uma melhor relação de custo-benefício.

Tendo em vista este grande número de turbinas existentes e o fato deste trabalho consistir na análise do impacto sofrido por estas turbinas sob condições de curto-circuito, percebe-se que fazer simulações com todos estes tipos de aerogeradores seria enormemente trabalhoso e acarretaria num trabalho exageradamente grande. Portanto é preciso criar um critério para escolher um, dentre estes tipos de aerogeradores, para ser utilizado neste trabalho.

O critério utilizado na escolha será baseado no tipo de aerogerador mais frequentemente encontrado no Brasil, ou seja, aquele que é mais utilizado nos nossos parques eólicos. Portanto, fazendo uma rápida pesquisa chega-se à conclusão de que o escolhido deve ser o tipo síncrono, sem caixa multiplicadora e 100% conectado à rede através de conversor estático (conexão unitária), como o fabricado pela empresa Enercon.

A Enercon foi uma das primeiras empresas de turbinas eólicas a se instalarem no país e contribuiu com a instalação de pequenos parques eólicos. Seu pioneirismo no território brasileiro é o principal motivo pelo qual seu aerogerador é o mais utilizado no Brasil. Seus investimentos em usinas eólicas no país podem ser notados pela construção de parques como o de Taíba (5MW), instalado em São Gonçalo do Amarante-RN e em operação desde o final de 1998, o de Prainha (10MW) instalado em Aquiraz-CE e operando desde o início de 1999, o de Mucuripe (2,4 MW), instalado em Fortaleza-CE, o de Palmas-PR (2,5MW) em parceria com a Copel em 1999 e uma usina-piloto para a Petrobrás em Macau, no Rio Grande do Norte, em 2003.

A turbina da Enercon possui algumas características especiais que não são encontradas na maioria das turbinas mais modernas. Por este motivo é importante, para a melhor compreensão deste trabalho, apresentar suas principais características e seu princípio de funcionamento. No site da Enercon podem ser encontrados catálogos de seus produtos caso

se deseje obter características particulares de cada tipo de turbina. Portanto o tópico abaixo será dedicado à apresentação dos princípios de funcionamento do aerogerador da Enercon.

## 2.1 Aerogerador Enercon

A principal característica deste tipo de turbina que a diferencia das demais utilizadas atualmente é o fato dela dispensar a etapa mecânica multiplicadora de velocidades entre a turbina eólica e o gerador elétrico, denominada caixa multiplicadora (*gearbox*). No aerogerador Enercon, um gerador elétrico especialmente desenvolvido é conectado diretamente à turbina eólica.

Os aerogeradores que possuem as caixas multiplicadoras têm como objetivo utilizá-las para superar o seguinte problema.

A fim de evitar esforços mecânicos excessivos ao equipamento e a fundação, as pás e consequentemente o rotor das turbinas eólicas giram em baixas rotações, em torno de 10 a 40 rpm. Porém estas velocidades são muito inferiores à velocidade de rotação nominal dos geradores elétricos destas mesmas turbinas eólicas que devem ser acionados por este rotor. Então para fazer conversão do torque e da velocidade entregue pelo rotor da turbina para rotações compatíveis a do gerador elétrico este equipamento, que é composto por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos é utilizado.

No aerogerador da Enercon, a solução para o problema da diferença existente entre o torque do rotor e o torque apropriado para o gerador elétrico é resolvido da seguinte maneira.

A conversão da energia mecânica em energia elétrica é feita por um gerador síncrono diretamente conectado ao rotor da turbina eólica. Neste aerogerador o cubo do rotor e o

gerador encontram-se ligados diretamente entre si como unidade fixa, sendo que o apoio da unidade do rotor é assegurado por um eixo fixo, o chamado pivô do eixo.

Com isso a tensão e a frequência de saída do gerador variam de acordo com a velocidade de rotação que está diretamente relacionada com a velocidade inconstante e variável do vento.

Para fazer com que estas grandezas sejam convertidas para valores apropriados à rede elétrica (60 Hz), um conversor de frequência é utilizado para realizar esta conexão com a rede.

Este conversor é composto por três etapas como pode ser visto na Figura 2.

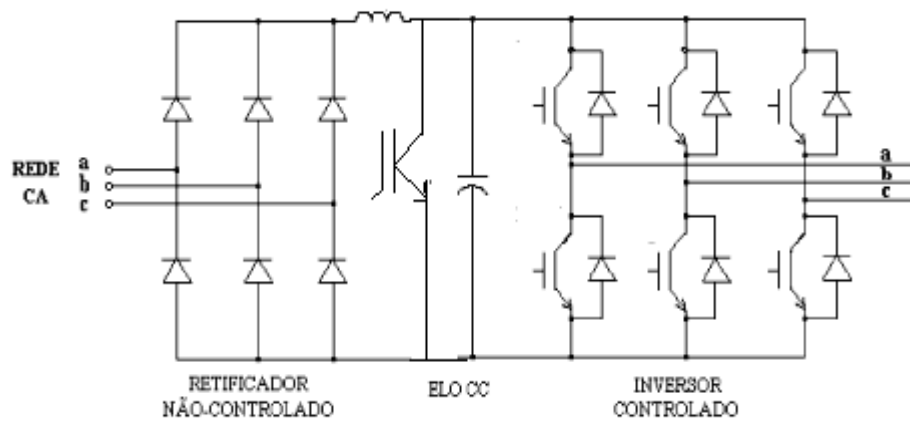


Figura 2 – Formas de onda do retificador do conversor de frequência

A primeira etapa deste conversor é composta por um retificador de onda completa (ponte de diodos) que transforma a corrente alternada de frequência variável em corrente aproximadamente contínua. Esta funcionalidade é exemplificada na Figura 3.

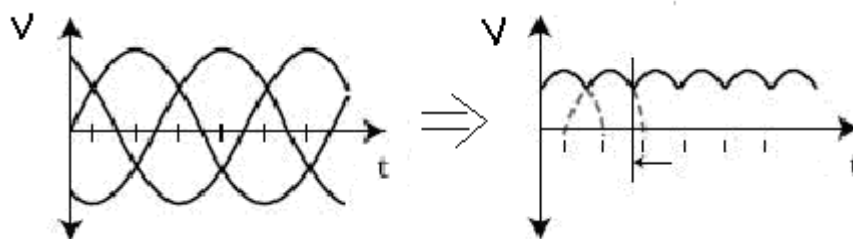




Figura 3 – Formas de onda da corrente ao passar pelo retificador do conversor de frequência

Após passar pelo retificador, esta corrente retificada tem seu valor controlado por um conversor cc-cc tipo *chopper*, que mantém a corrente contínua em um valor constante desejado e disponibiliza esta corrente retificada para o Elo CC, ou seja, ele tem como principal função controlar a corrente. Este Elo CC é composto pelo barramento de corrente contínua, indutor de alisamento e capacitores. Ele é o equipamento responsável pela filtragem da tensão e corrente contínuas oriundas do retificador controlado, como mostrado na Figura 4.

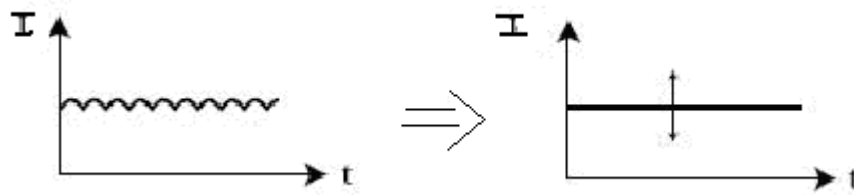


Figura 4 – Formas de onda após o chopper e o filtro do conversor de frequência

O controle de rotação da máquina é realizado através do controle da corrente retificada. Isto se reflete no torque eletromagnético no interior do gerador síncrono. Da diferença entre o torque mecânico, produzido pela turbina eólica, e o torque eletromagnético, no gerador, resulta o torque acelerante que incide sobre a inércia mecânica do conjunto rotativo, alterando ou mantendo constante a rotação deste conjunto.

A última etapa do conversor de frequência é composta pelo inversor. Ele é o responsável pela conexão do elo cc com a rede elétrica. Este equipamento transforma a corrente contínua disponibilizada em corrente alternada, tipicamente trifásica, com frequência de 60 Hz. A etapa de potência do inversor é composta por chaves eletrônicas do tipo IGBT, operando com modulação tipo PWM (modulação por largura de pulso).

Portanto ele tem a capacidade de controlar o nível da sua tensão de entrada a fim de obter a corrente desejada na sua saída. Nesta configuração, o inversor opera como uma fonte de corrente para a rede elétrica, medindo instantaneamente o valor de tensão da rede e calculando o valor de corrente que deve ser injetado pelo conversor para que um determinado valor de potência ativa e reativa seja atingido.

Como o nível da tensão encontrada na saída do inversor é inferior à da rede elétrica a ser conectada, para terminar esta conexão com a rede, é necessária ainda mais uma transformação. A compatibilização da tensão da rede de distribuição onde o aerogerador está conectado e da tensão de saída do inversor é realizada pelo transformador elevador. Este transformador normalmente possui seu enrolamento de média tensão (lado da rede) conectado em delta e o enrolamento do lado do inversor conectado em estrela aterrado. Esta ligação impede a circulação de correntes de seqüência zero além de evitar a injeção de harmônicos homopolares.

Na Figura 5 são mostradas as formas-de-onda típicas da corrente no lado CC do inversor, ou seja, a corrente de entrada, e no lado AC, ou seja, a corrente de saída do inversor.

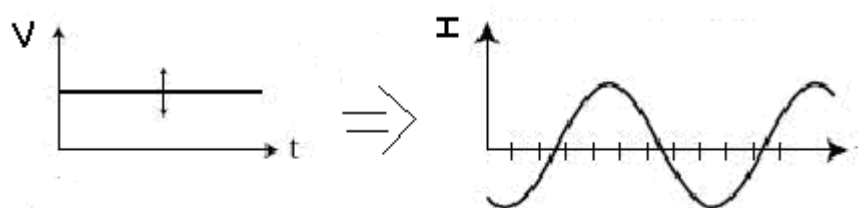


Figura 5 – Formas de onda de entrada e saída do inversor do conversor de freqüência

Outra característica importante presente nesta turbina é o controle de potência tipo passo. Este é um sistema que permite regular a potência mecânica que é extraída dos ventos variando o ângulo de inclinação das pás, ou seja, as pás giram em torno do seu próprio eixo

a fim de aproveitar mais ou menos a energia proveniente dos ventos. Isto é necessário no momento em que o vento atinge velocidades acima das máximas permitidas para a turbina eólica. Como sob ação destes ventos o rotor teria uma velocidade de rotação muito alta, que acarretaria em riscos para o equipamento, este sistema é então acionado, para mudar o ângulo de inclinação das pás em relação ao vento, fazendo com que haja menos contato destas com o vento incidente. Assim o rotor da turbina terá uma velocidade de rotação menor não oferecendo riscos ao equipamento. Outra utilidade deste sistema é no momento de frenagem e de partida. Como para partir é necessário vencer a inércia do rotor, que é grande devido ao peso do equipamento, aciona-se este sistema fazendo com que as pás fiquem com uma inclinação de modo a aproveitar ao máximo a força de arraste do vento e conseguir entrar em funcionamento mais rapidamente. Já na frenagem utiliza-se o mesmo princípio, só que agora se colocam as pás em um ângulo tal que o vento faça força ao contrário da usual parando mais rapidamente o rotor da turbina.

A filosofia construtiva do aerogerador Enercon, como já foi discutido antes, dispensa o multiplicador mecânico de velocidades fazendo o acoplamento entre a turbina eólica e o gerador elétrico diretamente. Isto se traduz em algumas vantagens principalmente no que diz respeito a uma considerável redução da complexidade mecânica da máquina e em uma redução das perdas nos componentes mecânicos, além de propiciar uma elevada confiabilidade e disponibilidade da máquina. Pelo fato do conjunto rotativo operar com baixa rotação, o desgaste dos mancais é enormemente reduzido. Os rolamentos dos mancais principais são projetados para operar sem a necessidade de substituição durante toda a vida útil da máquina (20 anos).

Esquemáticamente pode-se representar esta máquina da seguinte maneira.

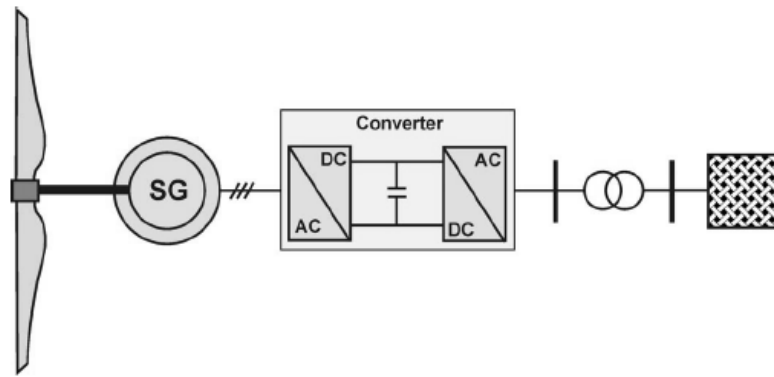


Figura 6 – Desenho esquemático do gerador eólico

## 2.2 Sistema de sincronização com a rede

Um importante sistema utilizado para garantir o bom funcionamento das turbinas eólicas, no que diz respeito a sua conexão com a rede elétrica, e que será representado nas simulações que serão feitas neste trabalho é o chamado sistema de sincronização da geração distribuída. Este tipo de sistema atua como um dispositivo de controle da turbina eólica e tem o objetivo de conseguir informações sobre as tensões da rede e a partir deles realizar algumas tarefas como controlar o fluxo de potência ativa e reativa que este gerador fornecerá à rede elétrica ou ainda sincronizar os dispositivos de desligamento e partida dos geradores eólicos.

Como o objetivo de uma turbina eólica, em uma operação normal, é fornecer potência ativa para a rede elétrica o sistema de sincronização deve ser capaz de detectar os ângulos de fase das tensões e fazer com que o gerador eólico, que como já foi dito pode ser considerado uma fonte de corrente do ponto de vista da rede, forneça somente correntes em fase com a tensão fazendo com que o fator de potência seja unitário e haja somente a injeção de potência ativa.

Percebe-se portanto que quando o sistema está operando em regime permanente não há muita dificuldade em conseguir um sistema de controle que acompanhe as tensões da rede elétrica uma vez que elas estão balanceadas. Porém o principal problema é no momento em que ocorrem perturbações na rede elétrica, como no momento de curtos-circuitos, nos quais as tensões mudam rapidamente de fase e há a aparição das componentes de seqüência negativa e zero.

Existem alguns métodos capazes de resolver estes problemas (TIMBUS et al., 2006). Cada um possui suas vantagens e desvantagens. A seguir será apresentada uma breve explicação de três destes métodos com maiores detalhes àquele que será utilizado neste trabalho que será o sistema PLL (Phase-Locked Loop).

### 2.2.1 Método de cruzamento por zero

Este método obtém a informação do ângulo de fase da tensão detectando seu cruzamento pelo zero. Ele funciona inicialmente detectando o primeiro cruzamento por zero da tensão de rede e calculando o ângulo de fase da referência. A partir deste ponto toda vez que uma nova passagem por zero for detectada, um novo cálculo do período de amostragem é feito, levando em conta parâmetros como o período anterior da tensão da rede, o último número acumulado de amostras, o número total de amostras por período de tensão de rede e o erro de cruzamento de zero.

Este algoritmo apresenta como desvantagens o fato de não necessariamente seguir a seqüência positiva da rede, pois sua passagem por zero pode ser deslocada por harmônicas, e o fato de se tornar instável no caso de múltiplas passagens por zero que podem ser ocasionadas pelos retificadores controlados. Além disso, o cruzamento pelo zero só pode

ser detectado a cada meio ciclo, o que faz com que o desempenho dinâmico deste sistema seja baixo em comparação aos outros métodos existentes.

### 2.2.2 Método da filtragem das tensões da rede

Este método utiliza a filtragem dos sinais de entrada das tensões para detectar as fases dos vetores. Ele é mais eficiente que o método anterior mas ainda apresenta alguns problemas para detectar as fases quando há a ocorrência de distúrbios na rede elétrica. Além disso, a utilização de um filtro introduz um atraso nos sinais processados o que acarretaria em um erro na detecção dos ângulos de fase.

### 2.2.3 Método PLL (Phase-Locked Loop)

Este é o método que apresenta os melhores resultados no que diz respeito ao sincronismo com a rede elétrica e por isso será utilizado neste trabalho.

Seu funcionamento é baseado no fato dele conseguir filtrar as componentes de seqüência negativa que aparecem durante os curtos-circuitos. Com isso ele consegue detectar a componente de seqüência positiva e fazer com que as correntes injetadas pela turbina continuem em fase com as tensões da rede elétrica, conseguindo manter o fluxo de potência desejado.

A estrutura simplificada de um PLL compreende um detector de fase (PD), um filtro (LF), e um oscilador controlado (VCO). O detector de fase faz a comparação entre o sinal de entrada e o sinal de referência VCO. O filtro serve para eliminar os harmônicos que podem ser produzidos pelo próprio conversor de potência ou gerados pela rede. Com isso evita-se que o sinal de saída seja contaminado.

Apesar de apresentar os melhores resultados, também existem alguns problemas neste tipo de sistema. O principal deles é o fato de as duas funções principais que devem ser realizadas pelo PLL serem, de certa forma, conflitantes uma com a outra sob o ponto de vista de projeto.

A primeira função como já foi dito é filtrar a componente de seqüência negativa para que o sincronismo seja feito baseado nas componentes de seqüência positiva. A outra é fazer com que este sistema tenha uma resposta rápida e acompanhe as variações dos ângulos de fase das tensões que ocorrem no momento da falta. Então supondo que o PLL esteja acompanhando um sistema elétrico que está em regime permanente, pode-se dizer que ele está seguindo uma determinada componente de seqüência positiva das tensões. No momento em que ocorre a falta esta componente de seqüência positiva pode saltar e sofrer uma rápida alteração na sua fase. Com isso para que haja um rápido sincronismo com a rede, o PLL deve ser capaz de rapidamente detectar este avanço da seqüência positiva e acompanhá-lo. Portanto o problema aparece neste momento já que alterando os parâmetros do PLL é possível conseguir um rápido tempo de resposta, porém isto afetaria a qualidade da filtragem da componente de seqüência negativa. O mesmo se pode dizer caso se queira privilegiar a filtragem. Com isso é preciso encontrar um ponto de equilíbrio que faça as duas funções de maneira satisfatória. Logo este é um problema que exige para cada sistema um estudo para que seja encontrado o desempenho ideal do PLL para a função desejada.

### 2.3 Comentários

Neste capítulo foi apresentado o tipo de aerogerador que será utilizado nas simulações explicitando suas principais características e princípios de funcionamento. Com isso agora

há base para se montar um esquema equivalente no MATLAB que represente estas funcionalidades que foram apresentadas. Convém lembrar que existem muitas opções de turbinas eólicas no mercado, cada uma com suas características especiais, fazendo com que seja possível simular inúmeros esquemas diferentes.

No próximo capítulo serão apresentados alguns dos procedimentos de rede determinados pela ANEEL e ONS, que regulamentam o modo de operação dos parques eólicos sob determinadas condições. Com isso será possível observar os requisitos de operação no momento de falta na rede elétrica.



## Capítulo 3 – Procedimentos de rede

Como já foi dito antes, todo sistema de geração que queira se conectar com o sistema elétrico nacional deve seguir os procedimentos de rede fornecidos pela ANEEL. Estes procedimentos são documentos de caráter normativo que definem os procedimentos e os requisitos necessários à realização das atividades de planejamento da operação eletroenergética, administração da transmissão, programação e operação em tempo real no âmbito do sistema elétrico.

Cada país no mundo elabora seus próprios procedimentos de rede de acordo com suas necessidades e suas características. Existem, para a geração por meio de usinas eólicas, procedimentos específicos, regulamentados nos documentos das agências reguladoras, que devem ser seguidos pelos operadores deste tipo de usina. É importante dizer que todas as exigências são especificadas para o ponto de conexão, ou seja, toda a preocupação do projetista do parque eólico é com o ponto no qual a sua usina irá se conectar com o sistema elétrico, sendo dele toda a responsabilidade no que diz respeito à qualidade de tensão e fluxo de potência.

Pelo mundo, de maneira geral, o que vem se exigindo dos aerogeradores conectados com a rede de transmissão é o seguinte:

- Os aerogeradores têm de manter a ligação com a rede sem qualquer redução da potência mesmo no caso de desvios consideráveis da tensão e da frequência

- No caso de afundamentos de tensão causados por falhas na rede, os aerogeradores têm de permanecer ligados à rede durante um período de tempo definido.
- Durante uma falha na rede, poderá ser solicitada a injeção de corrente reativa.
- Após a reparação da falha, um parque eólico tem de retomar a alimentação de potência tão rapidamente quanto possível e dentro dos períodos de tempo máximos estabelecidos.
- O parque eólico deve poder operar sem limitação de tempo com potência efetiva reduzida.
- Para efeitos de uma distribuição coordenada das cargas na rede, a subida da potência de débito (gradiente de potência), por exemplo, durante o arranque do parque eólico, deve poder ser delimitável de acordo com as especificações do operador de rede.
- Os parques eólicos devem poder contribuir para a potência de reserva na rede. Em caso de subida da frequência de rede é necessário reduzir a potência efetiva de um parque eólico.
- Os parques eólicos devem, quando necessário, poder contribuir para a estabilidade da tensão na rede através do fornecimento ou consumo de potência reativa.
- Os parques eólicos devem poder ser integrados no sistema de gestão da rede para o controle ou comando à distância de todas as instalações na rede.

Falando especificamente do Brasil as principais exigências e os requisitos técnicos gerais são apresentados pelos procedimentos de rede. Este documento pode ser obtido no site da ONS e destaca as seguintes exigências para as centrais de geração eólica.

### 3.1 Operação em regime de frequência não nominal

Para evitar o desligamento dos geradores quando há déficit de geração, antes que o esquema de alívio de carga atue completamente, ou em condições de sobrefrequência controláveis, são definidos os seguintes requisitos para operação em regime de frequência não nominal:

- Operação entre 56,5 e 63 Hz sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência instantâneos.
- Operação abaixo de 58,5 Hz por até 10 segundos.
- Operação entre 58,5 e 61,5 Hz sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência temporizados.
- Operação acima de 61,5 Hz por até 10 segundos.

### 3.2 Geração/absorção de reativos

No que diz respeito à geração e absorção de reativos a central geradora eólica deve, no ponto de conexão, propiciar os recursos necessários para, em potência ativa nominal e quando solicitado pelo ONS, operar com fator de potência indutivo ou capacitivo dentro da faixa especificada abaixo:

- Mínimo de 0,95 capacitivo
- Mínimo de 0,95 indutivo

Como consequência consegue-se a participação efetiva no controle da tensão, aumentando as margens de estabilidade de tensão.

### 3.3 Operação em regime de tensão não nominal

Sob condições de operação em tensão diferente da nominal a central geradora deve garantir, no ponto de conexão:

- Operação entre 0,90 e 1,10 p.u. da tensão nominal sem atuação dos relés de subtensão e sobretensão temporizados.
- Operação entre 0,85 e 0,90 p.u. da tensão nominal por até 5 segundos.

Desta maneira evita-se o desligamento da usina quando há variações de tensão no sistema.

### 3.4 Participação em sistemas especiais de proteção (SEP)

No que diz respeito à participação nos sistemas especiais de proteção deve-se permitir a desconexão automática ou redução de geração mediante controle de passo e/ou de *stall* das pás. Com isso será possível minimizar as conseqüências de perturbações no sistema, incluindo sobrefreqüência no caso de ilhamento.

### 3.5 Potência ativa de saída

Sobre a potência ativa de saída, para tensões no ponto de conexão entre 0,90 e 1,10 pu, não será admitida redução na sua potência de saída, na faixa de freqüências entre 58,5 e 60,0 Hz. Para freqüências na faixa entre 57 e 58,5 Hz é admitida redução na potência de saída de até 10%. Esses requisitos aplicam-se em condições de operação de regime permanente, quase-estáticas.

A finalidade desta exigência é garantir a disponibilidade de potência das centrais de geração eólica em situações de subfreqüência de modo a evitar/minimizar os cortes de carga por atuação do esquema regional de alívio de carga ERAC.

### 3.6 Variação de tensão em regime permanente

As centrais de geração eólica não devem produzir variação de tensão superior a 5% no ponto de conexão no caso de manobra parcial ou total, tempestiva ou não, do parque gerador.

### 3.7 Instabilidade de tensão

As centrais de geração eólica devem dispor de dispositivos de controle que evitem o seu desligamento por instabilidade de tensão, conforme estabelecido no item “Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede básica”.

### 3.8 Desequilíbrio de tensão

O acessante deve manter suas cargas balanceadas de tal forma que o desequilíbrio da tensão decorrente da operação de seus equipamentos, bem como outros efeitos internos às suas instalações, não provoque no ponto de conexão à rede básica a superação do limite individual para o indicador Fator de Desequilíbrio de Tensão  $k$ .

### 3.9 Flutuação de tensão

Todas as condições inerentes à operação de centrais de geração eólica - operação em regime permanente, desligamento, conexão e transição (turbina com dois aerogeradores

para dupla velocidade, ou mudança do número de pólos) - que impliquem flutuação de tensão (flicker), devem ser consideradas na avaliação do seu desempenho.

### 3.10 Distorção harmônica

O acessante deve assegurar que a operação de seus equipamentos, bem como outros efeitos em suas instalações, não cause distorções harmônicas no ponto de conexão à rede básica em níveis superiores aos limites individuais estabelecidos para os indicadores de distorção de tensão harmônica individual e total definidos no Submódulo 2.8 - Gerência dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica, dos procedimentos de rede da ONS..

### 3.11 Requisitos específicos para o sistema de proteção do gerador

As unidades geradoras devem dispor de dois conjuntos de proteção, além dos conjuntos de proteção intrínseca recomendados pelo fabricante:

- Proteção unitária
- Proteção de retaguarda.

O tempo total de eliminação de todos os tipos de faltas pela proteção unitária, incluindo o tempo de abertura de todos os disjuntores da unidade geradora, não deve exceder a:

- 100 ms para unidades geradoras que acessem a rede básica em nível de tensão superior a 230 kV
- 150 ms para unidades geradoras cujo acesso seja realizado em nível de tensão igual ou inferior a 230 kV.

A proteção unitária deve ser capaz de realizar, individualmente e independentemente, a detecção e eliminação de faltas internas à unidade geradora, sem retardo de tempo intencional.

A proteção de retaguarda deve ser gradativa, para faltas entre fases e entre fases e terra, proporcionando adequada proteção para a unidade geradora, mantida a coordenação com as proteções dos equipamentos adjacentes nos casos de faltas externas sustentadas.

### 3.12 Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede básica

Caso haja afundamento de tensão em uma ou mais fases no ponto de conexão na rede básica da central de geração eólica, a central deve continuar operando se a tensão nos seus terminais permanecer acima da curva indicada na figura.



Figura 7 – Curva de suportabilidade a subtensões

### 3.13 Requisitos para tomada de carga

A central de geração eólica deve ser dotada de recursos que permitam ajustar a taxa de tomada de carga dos aerogeradores. Os ajustes serão definidos pelo ONS.

### 3.14 Comentários

Este capítulo teve o objetivo de apresentar as principais exigências a que os parques eólicos são submetidos no que diz respeito a seu comportamento operacional. Estes aspectos de operação serão de difícil observação nas simulações deste trabalho uma vez que só será monitorado o fluxo de potência de um sistema equivalente. Neste sistema não estarão presentes parâmetros da rede de transmissão e possíveis cargas conectadas. Portanto este capítulo fica com um caráter mais informativo do que propriamente de participação efetiva neste trabalho.

No próximo capítulo serão iniciadas as simulações. Serão mostrados quais tipos de curto-circuito serão analisados e como cada um deles afeta o sistema elétrico no que diz respeito ao afundamento de tensão. Serão apresentados gráficos ilustrativos e funções feitas no MATLAB.



## Capítulo 4 – Afundamento de Tensão

Este capítulo será dedicado à apresentação dos principais tipos de afundamentos de tensão presentes na rede elétrica. O objetivo é mostrar as características da tensão no momento da ocorrência da falta para saber sob quais condições os aerogeradores estarão operando. Assim será possível analisar o comportamento da rede e destes aerogeradores nestas situações.

O afundamento de tensão consiste na redução da magnitude da tensão por um pequeno período de tempo. Essa redução, da ordem de milisegundos (ms), causa instabilidade e pode danificar uma grande quantidade de equipamentos presentes no sistema elétrico caso as proteções não funcionem corretamente. É importante dizer que ele não é consequência somente dos curtos-circuitos. A partida de um motor e a energização de um transformador também são causas destes afundamentos já que são fenômenos que também ocasionam um grande aumento da corrente elétrica. Para este trabalho será analisado o comportamento da rede e dos geradores eólicos para os afundamentos de tensão motivados por faltas na rede elétrica, porque são nestes casos que ocorrem os afundamentos mais severos.

Dependendo do tipo da falta ocorrida as tensões terão respostas diferentes no que diz respeito a sua amplitude e fase. Portanto serão simuladas as situações mais comuns de falta. Estarão presentes a falta trifásica, que apesar de não ser muito comum é considerada a pior para a rede elétrica, a falta monofásica para a terra, a mais comum entre todas elas e as faltas

bifásica e bifásica para a terra. De acordo com a apostila de proteção disponível no site da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, o grau de incidência de cada falta é o seguinte:

Tipos de Faltas	Probabilidade de Ocorrência (%)	Permanente (%)	Transitória (%)
Trifásica	2	95	5
Bifásica	11	70	30
Fase-terra	79	20	80
Outros	8	-	-

Tabela 3 – Estatística de ocorrência de faltas

Neste ponto é importante fazer uma observação. Os afundamentos de tensão ao se propagarem pela rede elétrica mudam suas características não apenas devido à impedância de transferência entre a origem do afundamento e a carga, mas também por causa do tipo de conexão dos transformadores através dos quais se propagam e da conexão da própria carga. Por isso pode haver mais de um tipo de afundamento de tensão para um mesmo tipo de falta.

Esta situação é consequência de uma característica presente nos transformadores trifásicos ligados em  $\Delta Y$  ou  $Y\Delta$ . Estes tipos de transformadores não deixam passar a componente de seqüência zero da tensão ao fazer a propagação entre o primário e o secundário e alteram o ângulo de fase das componentes de seqüência positiva e negativa. Com isso, nas faltas em que a tensão possui as componentes de seqüência zero ou negativa, ou seja, todas com exceção da falta trifásica, novas formas de onda de tensão serão obtidas como resposta.

Portanto para obter uma análise mais completa das condições de falta existentes será preciso verificar a resposta do defeito propagado pelo transformador conectado em  $Y_g Y_g$ <sup>1</sup>, no qual não há remoção da componente de sequência zero ou alterações de fase, e pelo transformador conectado em  $\Delta Y$ . Logo os curtos-circuitos analisados serão os seguintes:

- Monofásico para a terra (transformador  $Y_g Y_g$  e transformador  $\Delta Y$ )
- Bifásico (transformador  $Y_g Y_g$  e transformador  $\Delta Y$ )
- Bifásico para a terra (transformador  $Y_g Y_g$  e transformador  $\Delta Y$ )
- Fase-terra fase-terra (transformador  $Y_g Y_g$  e transformador  $\Delta Y$ )
- Trifásico (transformador  $Y_g Y_g$ )

Para este capítulo serão demonstradas duas etapas do estudo. A primeira delas será baseada na parte teórica de faltas simétricas e assimétricas, presente na grande maioria dos livros de sistema de potência. Esta etapa terá como objetivo obter, por meio de funções analíticas criadas no MATLAB, os diagramas fasoriais das tensões para cada um destes defeitos mencionados acima.

A segunda etapa necessitará de um sistema equivalente que represente o ponto da conexão da usina eólica com a rede elétrica. Este equivalente será utilizado para obter os valores das tensões de fase para cada um dos defeitos. Com estes valores será feita, para obter uma melhor visualização do comportamento das tensões durante a falta, a transformada de Clarke destas tensões. Com isso será possível obter um gráfico mais representativo em relação ao comportamento do sistema sob as condições designadas.

O sistema elétrico equivalente no qual serão simuladas as faltas pode ser visto a seguir:

---

<sup>1</sup>  $Y_g Y_g$  – conexão estrela aterrada em ambos os lados do transformador.

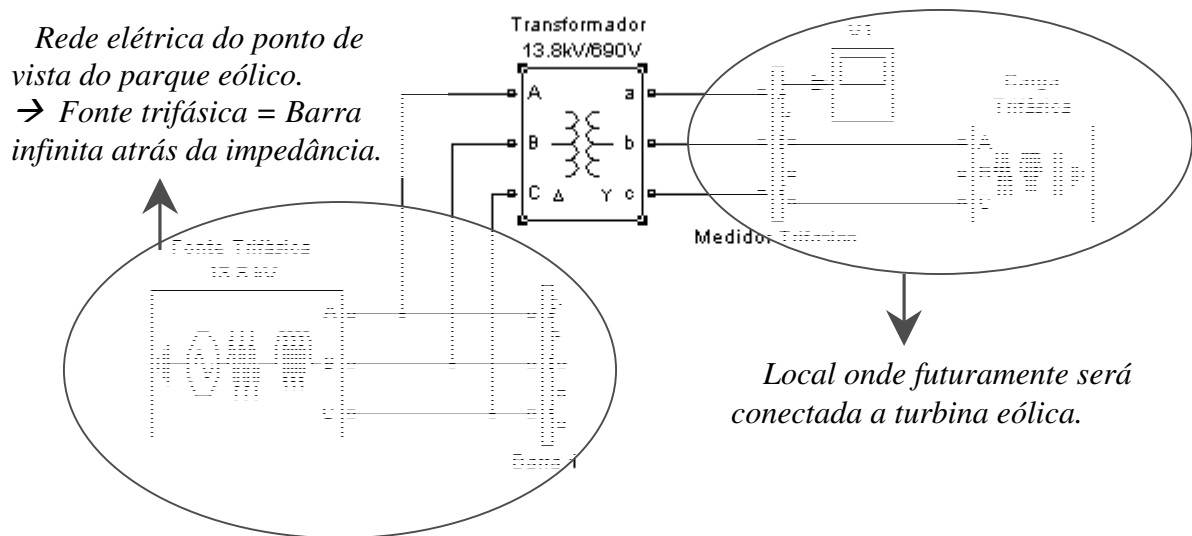


Figura 8 – Representação da rede elétrica e do local onde será conectada a turbina eólica

Este sistema é equivalente ao local de conexão de um parque eólico. A fonte de tensão representa a rede elétrica (barra infinita atrás de uma impedância) vista em relação ao parque eólico. O transformador  $\Delta Y$  representa o transformador elevador que conecta o parque eólico com a rede. Dependendo do defeito simulado este tipo de conexão será alterado.

Como neste momento só há a necessidade de analisar os tipos de afundamento de tensão será colocado uma carga trifásica no local onde deveria haver uma turbina eólica. Mais à frente um bloco equivalente ao funcionamento de uma turbina eólica será colocado no lugar desta carga trifásica.

O medidor V1 será utilizado para obter os dados de tensões no ponto de conexão do parque com a rede elétrica. Os defeitos serão simulados na Barra 1 e serão representados pela conexão de um disjuntor ou mais disjuntores à terra, dependendo da falta, através de uma impedância de falta.

Uma observação importante é que pelo fato do sistema ser composto basicamente pela fonte trifásica será adotado que as impedâncias de seqüência negativa, positiva e zero serão iguais. Foi considerado ainda que a relação X/R era a mesma, tanto para a impedância de

falta como para a impedância equivalente de Thévenin da rede. Estas duas medidas foram tomadas para simplificar a análise e os cálculos, apesar de na realidade haver diferenças entre as impedâncias de seqüência, principalmente as de seqüência zero, e de no momento da falta a relação X/R não ter normalmente valores iguais. O que se vê na realidade é uma impedância fortemente resistiva que é característica das impedâncias de arco.

A respeito da transformada de Clarke pode-se dizer que sua função é substituir um sistema composto por três eixos defasados de  $120^\circ$ , ou seja, as fases **a**, **b** e **c** por outro composto por dois eixos defasados de  $90^\circ$ , ou seja, fases  $\alpha$  e  $\beta$ . Para efetuar esta transformada será criada uma função que receba os dados de tensão obtidos nas simulações das faltas e utilize a matriz de transformação da transformada de Clarke para obter como resposta as tensões  $V_\alpha$  e  $V_\beta$ .

Como esta função do programa Matlab será igual para todos os defeitos ela será apresentada a seguir.

```
function [y,z]=clarke(x);

a=x(:,1);
b=x(:,2);
c=x(:,3);

% transpõe o vetor.
a=a.';
b=b.';
c=c.';

% matriz de transformação.
d=[1,-0.5,-0.5;0,0.866,-0.866];

e=2/3*(d*[a;b;c]);

y=e(1,:);
z=e(2,:);
```

Nesta função a entrada x representa os dados das tensões Va, Vb e Vc em relação ao tempo. Logo ao passar pela primeira etapa da função percebe-se que **a** recebe Va, **b** recebe Vb e **c** recebe Vc. Depois é só utilizar a fórmula e obter como resposta as tensões  $V_\alpha$  e  $V_\beta$ .

A próxima etapa será mostrar cada uma das faltas com seus respectivos resultados. Uma pequena análise com principais características de cada defeito estará presente em cada tópico.

#### 4.1 Falta monofásica para a terra

Este é o tipo de falta mais comum no sistema elétrico. Normalmente é causada pela incidência de raios ou pelo contato de um condutor com uma estrutura aterrada (árvores). Grande parte deste tipo de defeito é temporária, ou seja, permitem a continuação normal do fornecimento de energia após o fechamento dos disjuntores.

A representação de um curto-circuito fase-terra pode ser vista na Figura 9.

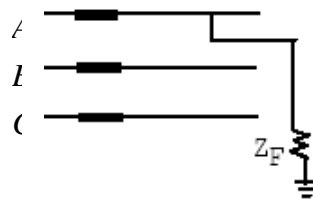


Figura 9 – Curto-circuito fase-terra

Para encontrar as tensões nas três fases durante a ocorrência da falta será utilizado o método das componentes simétricas, conforme apresentado no livro Power System Analysis (GRAINGER e STEVENSON 1994).

Adotando a fase A como aquela que sofrerá o curto-circuito para a terra pode-se dizer que as correntes de falta nas fases B e C são zero. Logo:

$$I_{fb} = I_{fc} = 0 \quad e \quad V_{ka} = Z_f \times I_{fa}$$

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{fa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{I_{fa}}{3}$$

$$\Rightarrow V_{ka} = 3 \times Z_f \times I_{fa}^{(0)}$$

Levando em conta que a tensão pré-falta, que é a tensão de seqüência positiva existente antes do momento da falta quando o sistema ainda estava balanceado, é representada por  $V_f$ , pode-se afirmar que:

$$\begin{aligned} V_{ka}^{(0)} &= -Z_{kk}^{(0)} \times I_{fa}^{(0)} \\ V_{ka}^{(1)} &= V_f - (Z_{kk}^{(1)} \times I_{fa}^{(0)}) \\ V_{ka}^{(2)} &= -Z_{kk}^{(2)} \times I_{fa}^{(0)} \end{aligned}$$

Fazendo as devidas substituições chega-se à seguinte conclusão:

$$V_{ka} = V_{ka}^{(0)} + V_{ka}^{(1)} + V_{ka}^{(2)} = V_f - (Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)}) \times I_{fa}^{(0)} = 3 \times Z_f \times I_{fa}^{(0)}$$

$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + 3 \times Z_f}$$

Onde:

$Z_f$  - impedância de curto.

$Z_{kk}$  - impedância de seqüência.

$V_f$  - tensão pré-falta

$V_{ka}$  - Tensão de falta na fase A.

$I_{fa}$ ,  $I_{fb}$  e  $I_{fc}$  - Correntes de falta nas respectivas fases.

Esquemáticamente a equação acima, que demonstra a situação de curto-circuito fase-terra, pode ser representada pelo circuito equivalente visto na Figura 10.

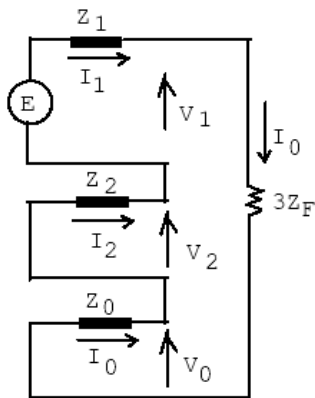


Figura 10 – Equivalente de Thèvenin para o curto-circuito fase-terra

A partir deste equivalente é possível determinar as tensões de seqüência zero, positiva e negativa da fase A. Portanto utilizando estas componentes de seqüência e a matriz de transformação encontra-se, como resposta, as tensões das três fases.

#### 4.1.1 Falta monofásica para a terra através de um transformador YgYg

Como dito anteriormente, para conseguir obter o diagrama fasorial destas três tensões será utilizada uma função criada no MATLAB. Esta função está reproduzida abaixo.

```
function [vka,vkb,vkc]=ft(zf,zg);

z1=zg;z2=zg;z0=zg;
vf=1*exp(j*0);
ifb=0;
ifc=0;

ifa0=vf/(j*z1+j*z2+j*z0+3*j*zf);
ifa=3*ifa0;

vka0=-j*z0*ifa0;
vka1=vf-(j*z1*ifa0);
vka2=-j*z2*ifa0;

vka=vka0+vka1+vka2;
vkb=vka0+(1*exp(j*4*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*2*pi/3)*vka2);
vkc=vka0+(1*exp(j*2*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*4*pi/3)*vka2);
```



Como parâmetros de entrada são fornecidas as impedâncias de seqüência e a impedância de falta. Neste caso as impedâncias de seqüência estão sendo representadas somente por  $Z_g$  (impedância do gerador), já que todas as impedâncias de seqüência estão sendo consideradas iguais. Para a realização dos cálculos foi adotado que a tensão pré-falta tem o valor de 1 pu com ângulo zero.

Depois de encontrada a tensão em cada fase, basta utilizar o comando “compass ( )” que o MATLAB fornecerá o diagrama fasorial com as três tensões desenhadas (Figura 11).

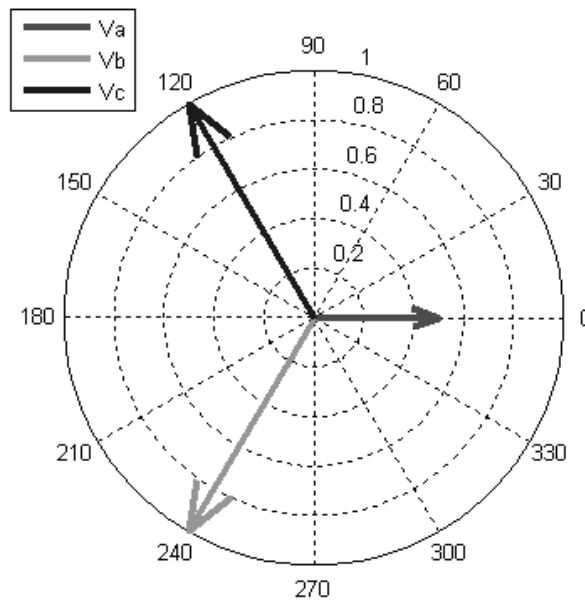


Figura 11 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-terra ( $Y_g Y_g$ )

Percebe-se, tendo como base o diagrama acima, que para um curto-circuito fase-terra através de um transformador  $Y_g Y_g$  a fase que está diretamente envolvida na falta (neste caso a fase A) é a única que sofre perturbação. Há uma diminuição na amplitude da tensão porém sem haver qualquer alteração no ângulo de fase, pois  $X/R$  foi considerado igual para as impedâncias da rede e da falta. As fases B e C não sofrem nenhuma alteração e continuam da mesma maneira que estavam no momento anterior à falta.

Para obter uma outra visualização da falta pode-se analisar o gráfico da transformada de Clarke mostrado abaixo.

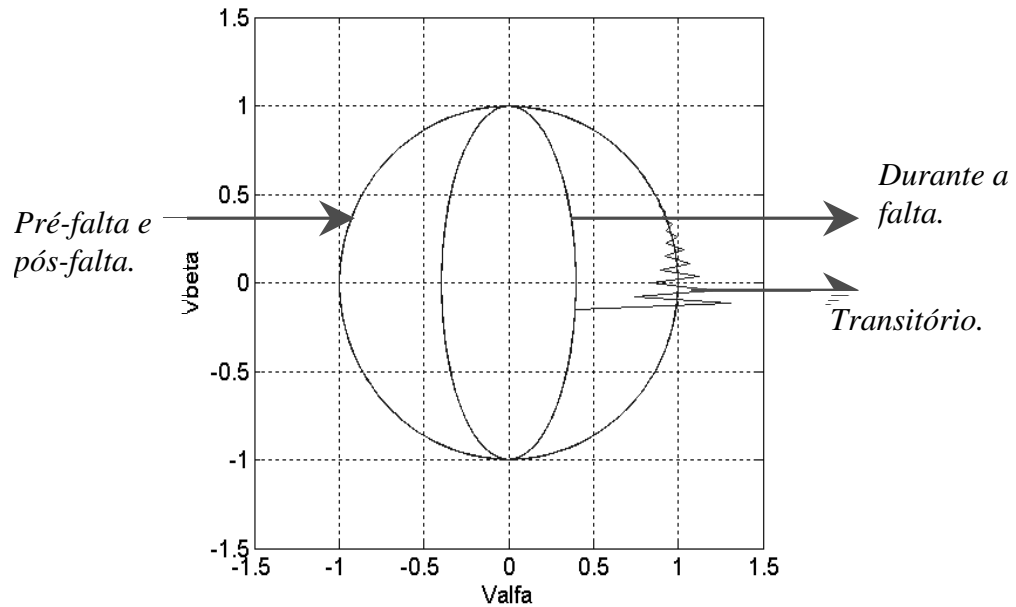


Figura 12 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-terra (YgYg)

Neste gráfico é possível observar os momentos pré-falta e durante a falta. Quando o sistema está balanceado em regime permanente, as tensões traçam um círculo com magnitude de 1,0 pu. No momento em que ocorre a falta acontece uma oscilação que pode ser observada no diagrama e depois disso as tensões do sistema passam a traçar uma elipse. Isto acontece porque a componente de seqüência positiva da tensão que é responsável por traçar o círculo é somada agora a componente de seqüência negativa que gira no sentido contrário. Portanto somando estes dois fasores a resposta obtida é uma elipse como mostrado na figura. A excentricidade dessa elipse pode ser correlacionada com grau de desbalanço de seqüência negativa.

#### 4.1.2 Falta monofásica para a terra através de um transformador $\Delta Y$

Neste momento será simulado o curto-circuito propagado pelo transformador conectado em  $\Delta Y$ . Esta análise será mais próxima do que acontece na realidade pois os transformadores nos parques eólicos geralmente são conectados em  $\Delta Y_g$ .

Neste caso, para encontrar as três tensões de fase, calculam-se primeiramente as tensões para um curto-circuito fase-terra normal, como foi obtido no primeiro caso. Depois, ao obter as tensões de seqüência positiva, negativa e zero da fase A, neste caso, somam-se estas tensões da seguinte maneira.

Como não há seqüência zero do outro lado do transformador, pois a conexão delta é um circuito aberto para a componente de seqüência deste tipo determina-se que  $V_{ka0} = 0$ .

A componente de seqüência positiva da tensão ao passar por um transformador  $\Delta Y$  sofre um atraso de  $30^\circ$  enquanto a de seqüência negativa sofre um avanço de  $30^\circ$ . Com todas as componentes de seqüência definidas basta utilizar a matriz de transformação para encontrar a tensão nas três fases. A função utilizada para este caso foi a seguinte:

```
function [vka,vkb,vkc]=ftY(zf,zg);

z1=zg;z2=zg;z0=zg;
vf=1*exp(j*0);
ifb=0;
ifc=0;

ifa0=vf/(j*z1+j*z2+j*z0+3*j*zf);
ifa=3*ifa0;

vka0=-j*z0*ifa0;
vka1=vf-(j*z1*ifa0);
vka2=-j*z2*ifa0;

vka0=0;
vka1=vka1*1*exp(j*-pi/6);
vka2=vka2*1*exp(j*pi/6);

vka=vka0+vka1+vka2;
vkb=vka0+(1*exp(j*4*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*2*pi/3)*vka2);
vkc=vka0+(1*exp(j*2*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*4*pi/3)*vka2);
```

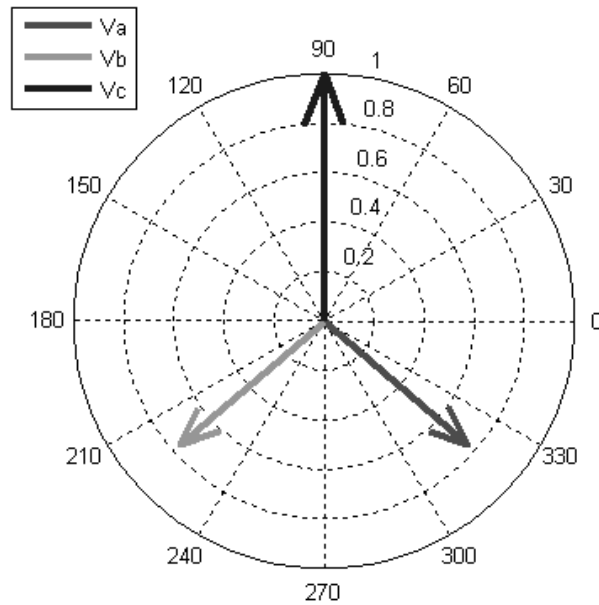


Figura 13 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-terra ( $\Delta Y$ )

Percebe-se que neste caso, diferentemente do anterior, duas fases sofrem com o curto-circuito. Quando a falta acontece na fase A, as fases A e B sofrem uma queda na amplitude da tensão e uma alteração nos seus ângulos de fase. Já a fase C continua com 1,0 pu e não sofre qualquer alteração no seu ângulo de fase. Como se trata de uma propagação através de um transformador  $\Delta Y$ , a tensão pré-falta base no lado delta tem as seguintes características: fase A ( $0^\circ$ ), fase C ( $120^\circ$ ) e fase B ( $240^\circ$ ). Logo as tensões pré-falta do lado Y tem as seguintes características: fase A ( $-30^\circ$ ), fase C ( $90^\circ$ ) e fase B ( $210^\circ$ ). Percebe-se então que a tensão da fase C permanece como estava antes do lado Y, ou seja, com ângulo de  $90^\circ$ .

Outro detalhe a ser observado nesta resposta é que este diagrama fasorial é diferente do que é mostrado na referência “Grid Requirements, Monitoring, Synchronization and Control of Wind Turbines Under Grid Faults” (TEODORESCU et al., 2007), para este mesmo caso. Isto acontece devido ao fato de o ângulo de alteração de fase para as componentes de seqüência positiva e negativa não ser igual para todos os transformadores conectados em  $\Delta Y$ . No caso do Brasil é que este ângulo é geralmente de  $-30^\circ$  e  $+30^\circ$

respectivamente. Já no caso ensaiado no documento do IEEE é utilizada uma defasagem angular de  $90^\circ$  ao se propagar do primário para o secundário deste transformador.

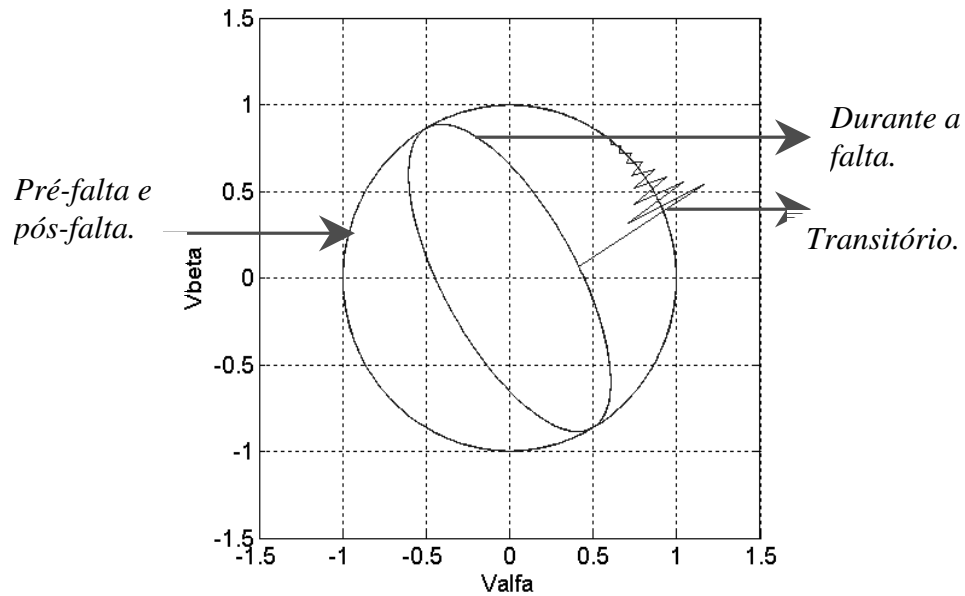


Figura 14 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-terra ( $\Delta Y$ )

Com relação ao gráfico da transformada de Clarke pode-se observar que assim como no caso do transformador conectado em  $Y_g Y_g$ , a aparição da componente de seqüência negativa durante a falta também faz com que a figura seja uma elipse. A inclinação diferente da elipse resultante, em relação ao caso do transformador conectado em  $Y_g Y_g$ , tem relação com quais fases foram afetadas na falta e com o fato de, como já foi observado anteriormente, as tensões ao passarem por um transformador  $\Delta Y$  sofrerem uma defasagem de  $30^\circ$ . Esta defasagem pode ser observada com uma comparação entre as Figuras 12 e 14

#### 4.2 Falta bifásica

Este tipo de falta ocorre quando um condutor de uma fase encosta no condutor da outra fase. Uma característica importante a se destacar, e que pode ser comprovada nas equações,

é que como não há contato com a terra não haverá a presença de componentes de seqüência zero neste tipo de defeito. Pode-se representar o curto-circuito bifásico da seguinte maneira:

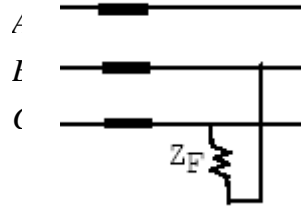


Figura 15 - Curto-circuito bifásico

Simulando uma falta bifásica entre as fases B e C, representa-se analiticamente este tipo de falta pelas seguintes equações.

$$\begin{aligned} I_{fa} &= 0 \\ I_{fb} &= -I_{fc} \\ V_{kb} - V_{kc} &= Z_f \times I_{fb} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ I_{fb} \\ -I_{fb} \end{bmatrix} \rightarrow I_{fa}^{(0)} = 0 \quad ; \quad I_{fa}^{(1)} = -I_{fa}^{(2)}$$

Expandindo a equação utilizando as relações de componentes simétricas e as encontradas acima, encontra-se a seguinte resposta:

$$\begin{aligned} V_{kb} - V_{kc} &= Z_f \times I_{fb} \\ \Rightarrow (V_{kb}^{(1)} + V_{kb}^{(2)}) - (V_{kc}^{(1)} + V_{kc}^{(2)}) &= (I_{fb}^{(1)} + I_{fc}^{(2)}) \times Z_f \\ \Rightarrow (V_{kb}^{(1)} - V_{kc}^{(1)}) + (V_{kb}^{(2)} - V_{kc}^{(2)}) &= (a^2 I_{fa}^{(1)} + a I_{fa}^{(2)}) \times Z_f \\ \Rightarrow (a^2 - a) \times V_{ka}^{(1)} + (a - a^2) \times V_{ka}^{(2)} &= (a^2 - a) \times I_{fa}^{(1)} \times Z_f \\ \Rightarrow (a^2 - a) \times (V_{ka}^{(1)} - V_{ka}^{(2)}) &= (a^2 - a) \times I_{fa}^{(1)} \times Z_f \\ \Rightarrow V_{ka}^{(1)} - V_{ka}^{(2)} &= I_{fa}^{(1)} \times Z_f \end{aligned}$$

A equação da corrente de seqüência positiva para a falta bifásica pode ser definida por:

$$I_{fa}^{(1)} = -I_{fa}^{(2)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f}$$

Esquemáticamente esta equação, que demonstra a situação de curto-circuito fase-fase, pode ser representada pelo seguinte equivalente de Thèvenin.

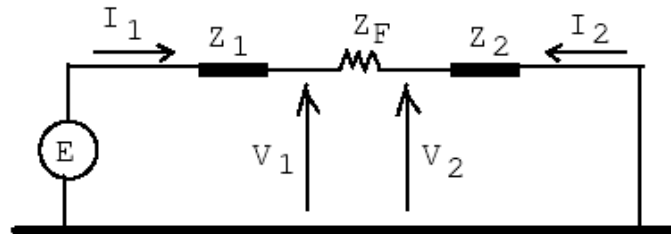


Figura 16 – Equivalente de Thèvenin para o curto-circuito bifásico

Como foi observado anteriormente não há a componente de seqüência zero da corrente neste circuito equivalente para a falta bifásica.

#### 4.2.1 Falta bifásica através de um transformador YgYg

Escrevendo uma função específica para obter as tensões deste tipo de curto-circuito consegue-se a seguinte resposta:

```
function [vka,vkb,vkc]=ff(zf,zg);

z1=zg;z2=zg;z0=zg;
vf=1*exp(j*0);

ifa=0;

ifa0=0;
ifa1=vf/(j*z1+j*z2+j*zf);
ifa2=-ifa1;

vka0=-j*z0*ifa0;
vka1=vf-(j*z1*ifa1);
vka2=-j*z2*ifa2;

vka=vka0+vka1+vka2;
vkb=vka0+(1*exp(j*4*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*2*pi/3)*vka2);
vkc=vka0+(1*exp(j*2*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*4*pi/3)*vka2);
```

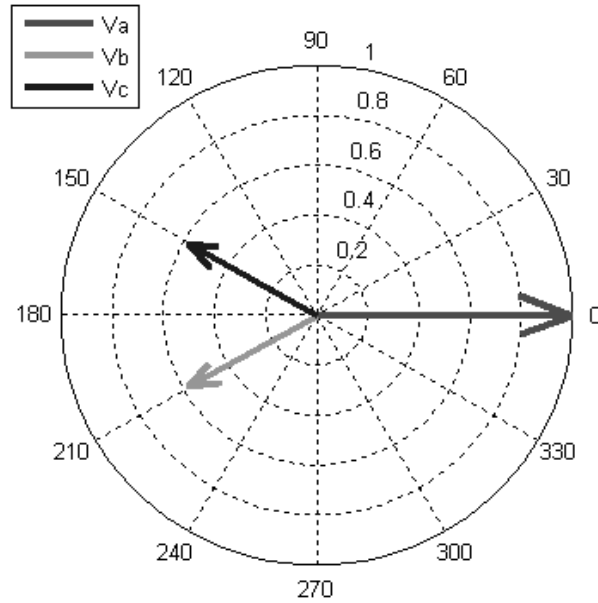


Figura 17 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-fase (YgYg)

Nota-se que neste caso ocorre uma diminuição na amplitude e uma alteração nos ângulos das tensões das fases B e C, fases diretamente envolvidas na falta. Estas tensões que deveriam estar defasadas de  $120^\circ$  cada uma estão agora mais próximas uma da outra. É bom lembrar que dependendo da impedância de curto o grau de defasagem das tensões pode sofrer alterações. Já a fase A continua com 1,0 pu e sem alteração no seu ângulo de fase.

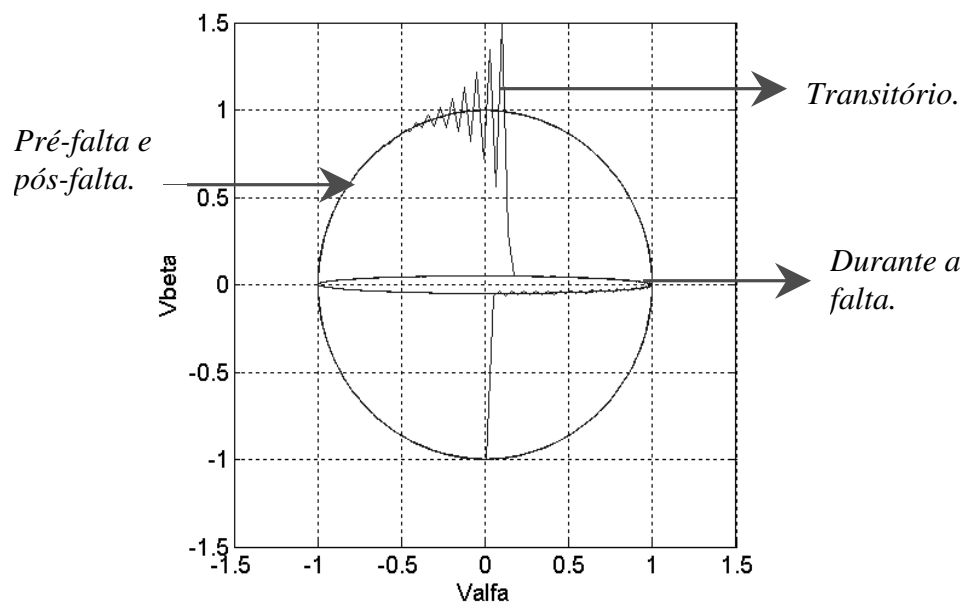


Figura 18 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-fase (YgYg)



Neste caso é possível observar que este é um curto-circuito mais severo do que o monofásico. Isto pode ser notado pelo fato de a amplitude da elipse ser menor em relação as que foram mostradas nos gráficos anteriores.

#### 4.2.2 Falta bifásica através de um transformador $\Delta Y$

Apesar de neste caso não haver ocorrência de componentes de seqüência zero, haverá a necessidade de verificar o caso da propagação através de um transformador  $\Delta Y$ , pois por ser uma falta desbalanceada há a presença de componentes de seqüência negativa e de seqüência positiva que fazem com que o diagrama fasorial resultante apresente diferenças.

Portanto, diferentemente do caso da falta monofásica para a terra, neste caso a componente de seqüência zero não precisará ser anulada, pois ela já é zero. A alteração a ser feita está na tensão de seqüência positiva que ao passar por um transformador  $\Delta Y$  sofre um atraso de  $30^\circ$  e na de seqüência negativa que sofre um avanço de  $30^\circ$ .

Com o auxílio do MATLAB e alterando somente estes detalhes nas componentes de seqüência, pode-se aproveitar a função feita para os cálculos da falta bifásica e assim encontrar a resposta para este caso. A função utilizada e o diagrama fasorial podem ser vistos abaixo.

```
function [vka,vkb,vkc]=ffY(zf,zg);

z1=zf; z2=zf; z0=zf;
vf=1*exp(j*0);
ifa=0;

ifa0=0;
ifa1=vf/(j*z1+j*z2+j*zf);
ifa2=-ifa1;

vka0=-j*z0*ifa0;
vka1=vf-(j*z1*ifa1);
vka2=-j*z2*ifa2;
```

```

vka1=vka1*1*exp(j*-pi/6);
vka2=vka2*1*exp(j*pi/6);
vka=vka0+vka1+vka2;
vkb=vka0+(1*exp(j*4*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*2*pi/3)*vka2);
vkc=vka0+(1*exp(j*2*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*4*pi/3)*vka2);

```

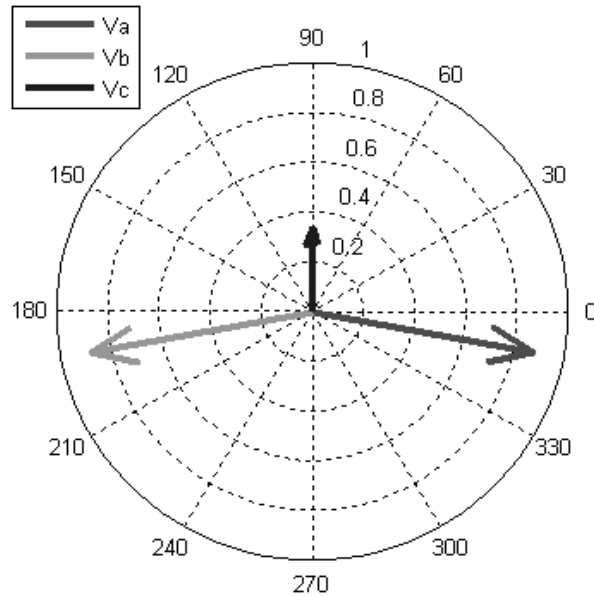


Figura 19 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-fase ( $\Delta Y$ )

Como resposta pode-se perceber que uma falta bifásica propagada através de um transformador  $\Delta Y$  acarreta numa grande queda de amplitude de uma das fases (neste caso fase C) e numa pequena diminuição das outras duas. Com relação aos ângulos de fase percebe-se uma alteração nas fases A e B, enquanto na fase C, da mesma maneira que ocorreu no caso da falta fase-terra para o mesmo transformador, não há alteração. Seu ângulo de fase permanece em fase com a sua tensão pré-falta do lado Y. Isto comprova o fato de que apesar de não possuir componentes de seqüência zero a falta bifásica sofre alteração ao passar por este tipo de transformador.

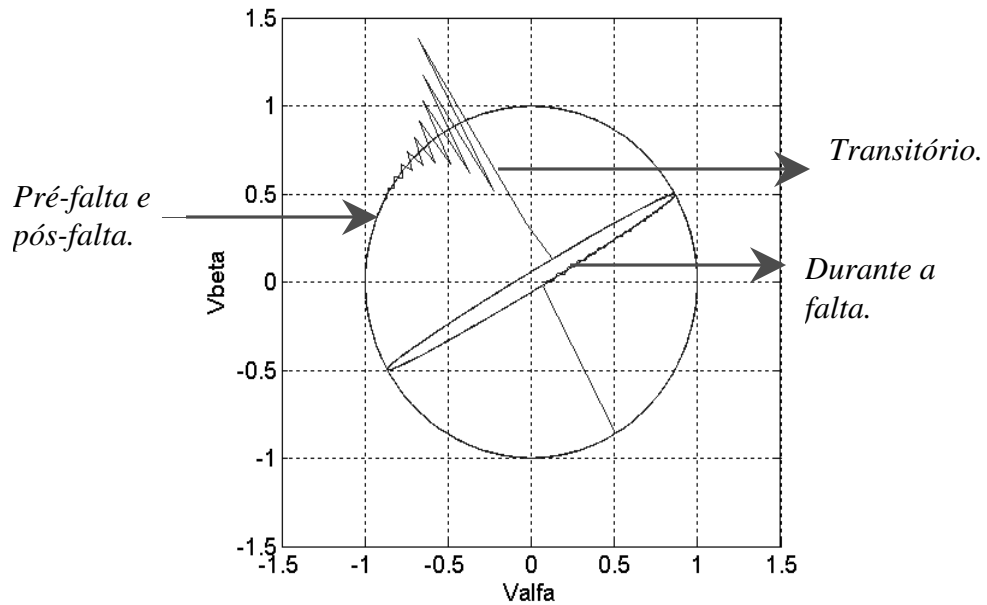


Figura 20 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-fase ( $\Delta Y$ )

Assim como no caso anterior percebe-se que este é um curto-circuito severo. A única diferença para a falta bifásica anterior é que, devido à alteração de fase das componentes de seqüência ocasionadas pela conexão  $\Delta Y$  do transformador, aparece a inclinação de  $30^\circ$  da elipse em relação ao transformador conectado em  $YgYg$ .

#### 4.3 Falta bifásica para a terra

Este defeito, diferentemente do anterior, inclui a terra, portanto a componente de seqüência zero estará presente nas equações e no circuito equivalente. Logo será necessário analisar a propagação deste defeito através do transformador  $\Delta Y$ . Esta falta pode ser representada da seguinte maneira.

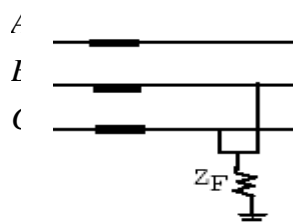


Figura 21 – Curto-circuito bifásico para a terra

Tomando as fases B e C como aquelas que estão sob a ocorrência da falta, representa-se analiticamente este tipo de falta pelas seguintes equações:

$$I_{fa} = 0 \quad ; \quad V_{kb} = V_{kc} = Z_f \times (I_{fb} + I_{fc})$$

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} \rightarrow I_{fa}^{(0)} = (I_{fb} + I_{fc})/3$$

Substituindo:

$$V_{kb} = V_{kc} = 3 \times Z_f \times I_{fa}^{(0)}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ka}^{(0)} \\ V_{ka}^{(1)} \\ V_{ka}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{ka} \\ V_{kb} \\ V_{kc} \end{bmatrix} \rightarrow V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(2)}$$

$$3 \times V_{ka}^{(0)} = V_{ka} + 2 \times V_{kb} = (V_{ka}^{(0)} + V_{ka}^{(1)} + V_{ka}^{(2)}) + 2 \times (3 \times Z_f \times I_{fa}^{(0)})$$

A partir das equações acima é possível chegar, através de substituições, às seguintes relações:

$$V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(2)} = V_{ka}^{(0)} - (3 \times Z_f \times I_{fa}^{(0)})$$

$$I_{fa}^{(0)} + I_{fa}^{(1)} + I_{fa}^{(2)} = I_{fa} = 0$$

Logo a equação que define a componente de seqüência positiva da corrente de falta é:

$$I_{fa}^{(1)} = V_f / Z_{kk}^{(1)} + \left[ \frac{Z_{kk}^{(2)} \times (Z_{kk}^{(0)} + 3 \times Z_f)}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3 \times Z_f} \right]$$

Esquemáticamente esta equação, que demonstra a situação de curto-circuito bifásico para a terra, pode ser representada pelo seguinte equivalente de Thèvenin.

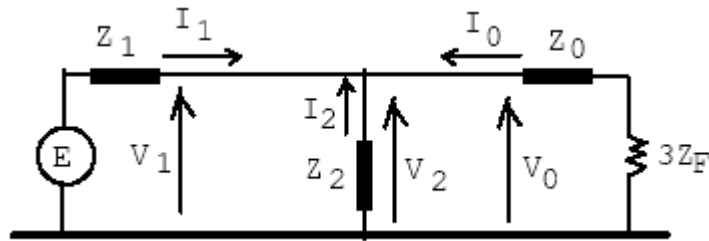


Figura 22 – Equivalente de Thèvenin para o curto-circuito bifásico para a terra

Nota-se que realmente as três componentes de seqüência estão presentes neste circuito equivalente de Thèvenin.

#### 4.3.1 Falta bifásica para a terra através de um transformador $Y_g Y_g$

Para estar de acordo com a parte teórica mostrada acima será adotado para este caso que as fases envolvidas na falta serão as fases B e C. Mais uma vez utilizando o MATLAB para escrever uma função específica para obter as tensões deste tipo de curto-circuito consegue-se a seguinte resposta:

```
function [vka,vkb,vkc]=ffte(zf,zg);

z1=zg;z2=zg;z0=zg;
vf=1*exp(j*0);

ifa1=vf/(j*z1+(j*z2*(j*z0+(3*j*zf)))/(j*z2+j*z0+(3*j*zf)));
ifa2=-ifa1*((j*z0+3*j*zf)/(j*z2+j*z0+(3*j*zf)));
ifa0=-ifa1*((j*z2)/(j*z2+j*z0+(3*j*zf)));

vka0=-j*z0*ifa0;
vka1=vf-(j*z1*ifa1);
vka2=-j*z2*ifa2;

vka=vka0+vka1+vka2;
vkb=vka0+(1*exp(j*4*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*2*pi/3)*vka2);
vkc=vka0+(1*exp(j*2*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*4*pi/3)*vka2);
```

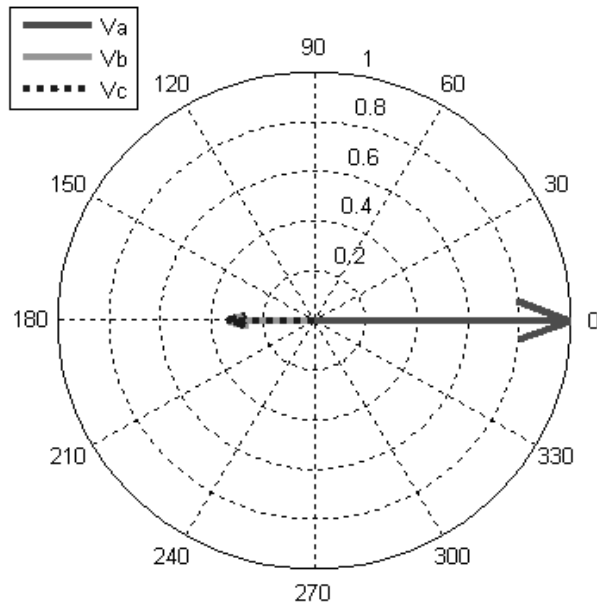


Figura 23 – Diagrama fasorial para o curto-circuito bifásico para a terra (YgYg)

Para este caso a resposta obtida é uma diminuição na magnitude das tensões das fases B e C, que ficam com o mesmo ângulo e a mesma amplitude. Isto já era esperado ao analisar as equações que definem este tipo de defeito, pois como  $v_{ka1}=v_{ka2}$ , ao somar as três componentes de seqüência para encontrar as tensões das fases B e C é óbvio que os valores obtidos serão os mesmos. Com relação à fase A é possível notar que ela permanece com o mesmo ângulo de fase e com amplitude de 1,0 pu, portanto se pode dizer que ela não sofre alteração neste tipo de falta.

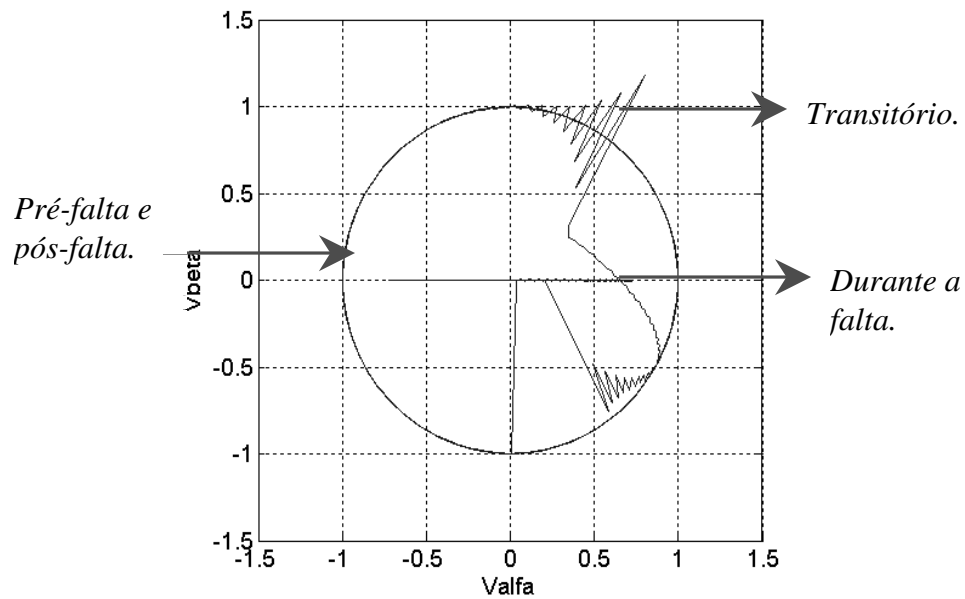


Figura 24 – Transformada de Clarke para o curto-circuito bifásico para a terra (YgYg)

No diagrama da transformada de Clarke percebe-se que este defeito é bastante severo. Neste caso nem é possível perceber a formação de uma elipse no interior do círculo. Além disso, a amplitude da elipse não atinge o valor de 1,0 pu. Outro fator que evidencia a severidade da falta é a forte oscilação que ocorre no momento do defeito. É bom destacar que esta oscilação pode ser ocasionada em parte também por erros numéricos do programa utilizado, que neste caso foi o Matlab.

#### 4.3.2 Falta bifásica para a terra através de um transformador $\Delta Y$

Assim como foi feito anteriormente, para encontrar as tensões propagadas através de um transformador  $\Delta Y$ , serão calculadas primeiramente as tensões para um curto-circuito bifásico para a terra normal. Depois fazendo da mesma maneira que foi realizado naquele

tópico determinam-se as tensões de fase no outro lado do transformador. No MATLAB a função utilizada para este tipo de curto-circuito e o diagrama fasorial obtidos podem ser vistos abaixo. Vale lembrar novamente que neste caso foi utilizada a convenção determinada pelo tipo de transformador  $\Delta Y$  mais utilizado no Brasil que é caracterizado por adiantar em  $30^\circ$  a componente de seqüência negativa e de atrasar em  $30^\circ$  a de seqüência positiva.

```
function [vka,vkb,vkc]=ffteY(zf,zg);

z1=zg;z2=zg;z0=zg;
vf=1*exp(j*0);

ifa1=vf/(j*z1+(j*z2*(j*z0+(3*j*zf)))/(j*z2+j*z0+(3*j*zf)));
ifa2=-ifa1*((j*z0+3*j*zf)/(j*z2+j*z0+(3*j*zf)));
ifa0=-ifa1*((j*z2)/(j*z2+j*z0+(3*j*zf)));

vka0=-j*z0*ifa0;
vka1=vf-(j*z1*ifa1);
vka2=-j*z2*ifa2;

vka0=0;
vka1=vka1*1*exp(j*-pi/6);
vka2=vka2*1*exp(j*pi/6);

vka=vka0+vka1+vka2;
vkb=vka0+(1*exp(j*4*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*2*pi/3)*vka2);
vkc=vka0+(1*exp(j*2*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*4*pi/3)*vka2);
```

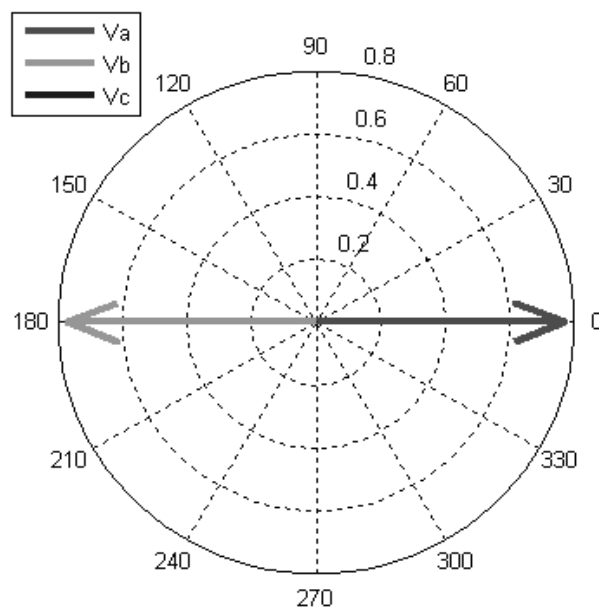




Figura 25 – Diagrama fasorial para o curto-circuito bifásico para a terra ( $\Delta Y$ )

O gráfico acima mostra que para este caso, a tensão da fase C é completamente anulada. Com relação às fases A e B percebe-se que as duas sofrem uma pequena alteração no que diz respeito as respectivas amplitudes, e uma alteração nos seus ângulos de fase. Com isso o resultado final mostra duas componentes de mesma amplitude e em oposição de fase.

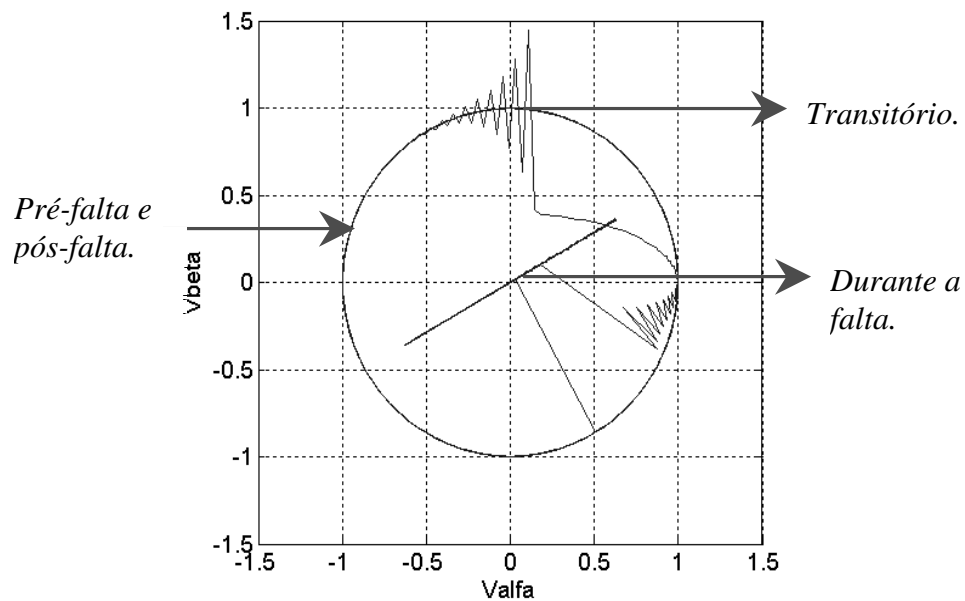


Figura 26 – Transformada de Clarke para o curto-circuito bifásico para a terra ( $\Delta Y$ )

Assim como no caso anterior da falta bifásica para a terra percebe-se que para este caso as conseqüências são semelhantes. Apenas a inclinação da elipse traçada sofre alteração por motivos já explicados anteriormente.

#### 4.4 Falta fase-terra fase-terra

Ao fazer o caso anterior, da falta bifásica para a terra, percebi que os diagramas encontrados como resposta estavam diferentes dos que são mostrados no documento de referência deste trabalho para o caso de uma falta bifásica para a terra. Portanto percebi que

a falta bifásica para a terra ali representada se referia a um caso diferente anterior. O tipo de falta que consta no documento do IEEE pode ser representado pelo contato das duas fases em falta com a terra, sem que haja a conexão direta entre estas duas fases, ou por uma falta em que haja uma impedância de arco entre estas fases. Portanto a simulação anterior pode ser interpretada como um caso ideal presentes em livros, enquanto este próximo caso é mais próximo do que acontece na realidade. A representação gráfica deste tipo de defeito pode ser visto a seguir:

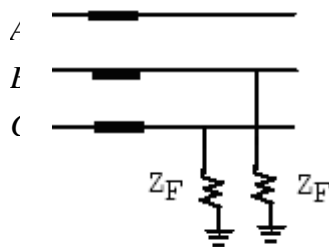


Figura 27 – Curto-circuito fase-terra fase-terra

Neste caso não há caminho direto, sem nenhuma impedância, para a corrente elétrica circular entre as duas fases. Sem haver esta conexão direta percebe-se que a tensão na fase B não será igual a da fase C, pois haverá a diferença de fase. Portanto este tipo de falta pode ser caracterizada pela combinação de duas faltas monofásicas à terra.

Seguindo este pensamento para obter a resposta e adotando que  $V_{ka}$ ,  $V_{kb}$  e  $V_{kc}$  representam as tensões de falta e  $V_{af}$ ,  $V_{bf}$  e  $V_{cf}$  as tensões pré-falta, chegou-se a seguinte conclusão:

$$\begin{aligned} V_{ka} &= V_{af} \\ V_{kb} &= V_{bf} \times \left[ \frac{Z_f}{Z_f + Z_g} \right] \\ V_{kc} &= V_{cf} \times \left[ \frac{Z_f}{Z_f + Z_g} \right] \end{aligned}$$

#### 4.4.1 Falta fase-terra fase-terra através de um transformador YgYg

Utilizando as equações acima se obteve as seguintes respostas para este tipo de defeito:

```
function [vka,vkb,vkc]=ffte2(zf,zg);

vf=1*exp(j*0);

vka=vf;
vkb=vf*exp(j*4*pi/3)*(zf/(zf+zg));
vkc=vf*exp(j*2*pi/3)*(zf/(zf+zg));
```

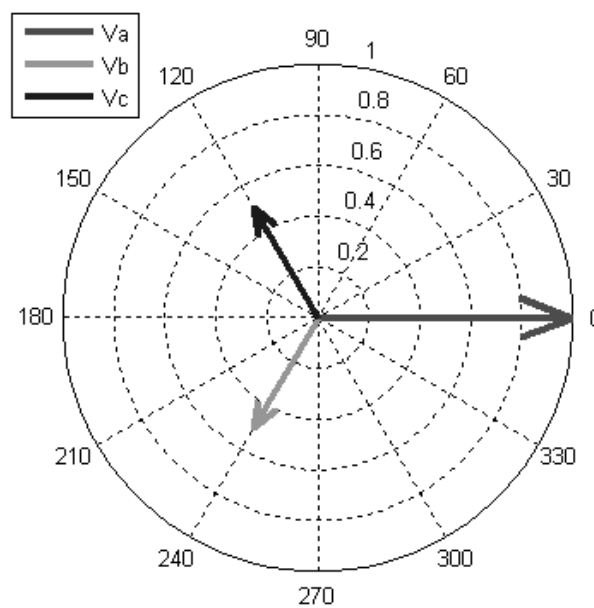


Figura 28 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-terra fase-terra (YgYg)

Percebe-se que este caso realmente representa duas faltas monofásicas à terra. Nota-se a redução apenas na amplitude das fases B e C, fases diretamente envolvidas na falta. Assim como no caso monofásico não há alterações nos ângulos. Outra observação é que este tipo de defeito é realmente o que está representado no documento “Grid Requirements, Monitoring, Synchronization and Control of Wind Turbines Under Grid Faults” (TEODORESCU et al., 2007), pois o gráfico obtido aqui é igual ao mostrado neste documento.

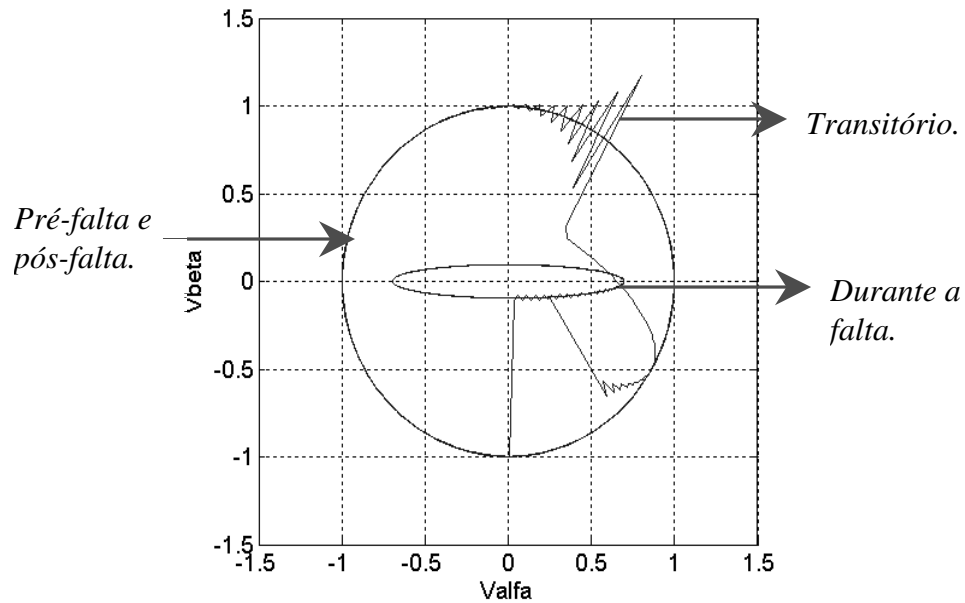


Figura 29 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-terra fase-terra (YgYg)

Por ser uma falta bifásica percebe-se que a severidade dela é maior do que a encontrada para o caso de uma falta monofásica.

#### 4.4.2 Falta fase-terra fase-terra através de um transformador $\Delta Y$

Para encontrar as tensões características deste tipo de defeito após a propagação através do transformador  $\Delta Y$  utilizou-se as tensões resultantes encontradas no tópico anterior para encontrar as componentes de seqüência. A partir daí o procedimento usado foi o mesmo utilizado para os outros casos, ou seja, zerar a componente de seqüência zero e alterar as fases da componente de seqüência positiva e negativa em  $30^\circ$ .

```
function [vka,vkb,vkc]=ffteY2(zf,zg);

vf=1*exp(j*0);

vka=vf;
```

```

vkb=vf*exp(j*4*pi/3)*(zf/(zf+zg));
vkc=vf*exp(j*2*pi/3)*(zf/(zf+zg));

vka0=1/3*(vka+vkb+vkc);
vka1=1/3*(vka+vkb*exp(j*2*pi/3)+vkc*exp(j*4*pi/3));
vka2=1/3*(vka+vkb*exp(j*4*pi/3)+vkc*exp(j*2*pi/3));

vka0=0;
vka1=vka1*1*exp(j*-pi/6);
vka2=vka2*1*exp(j*pi/6);

vka=vka0+vka1+vka2;
vkb=vka0+(1*exp(j*4*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*2*pi/3)*vka2);
vkc=vka0+(1*exp(j*2*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*4*pi/3)*vka2);

```

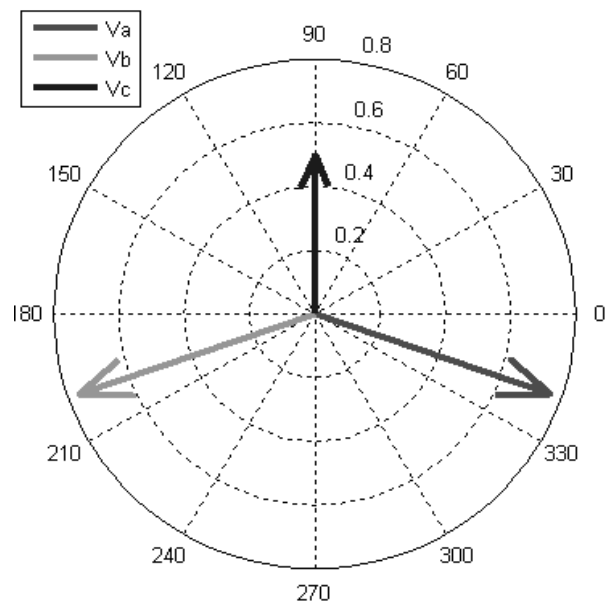


Figura 30 – Diagrama fasorial para o curto-circuito fase-terra fase-terra ( $\Delta Y$ )

Neste caso todas as tensões sofrem alterações de amplitude, enquanto apenas a fase C não sofre alteração no seu ângulo de fase. Outra conclusão que se pode chegar é que a resposta obtida mostra que o defeito bifásico para a terra é realmente diferente do defeito aqui chamado de fase-terra fase-terra.

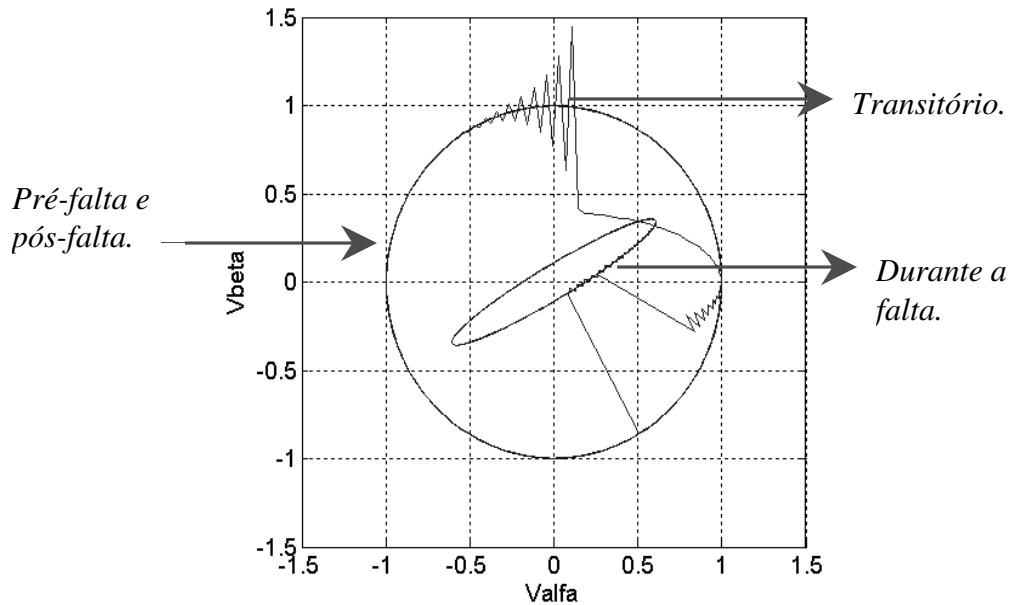


Figura 31 – Transformada de Clarke para o curto-circuito fase-terra fase-terra ( $\Delta Y$ )

Aqui também é percebida uma forte oscilação no momento da falta e a obtenção de uma elipse de amplitude inferior a 1,0 pu e com uma inclinação de  $30^\circ$  defasado em relação ao caso anterior.

#### 4.5 Falta trifásica

Os curtos-circuitos trifásicos, também chamados balanceados, provocam afundamentos de tensão que mantêm, mesmo durante a falta, o balanceamento das três fases do sistema. No afundamento de tensão balanceado observa-se uma redução de igual magnitude para os fasores de tensão, sem alteração no ângulo de fase. As impedâncias existentes entre cada linha e o ponto comum de falta possuem os mesmos valores. Por este motivo é que só fluirão correntes de seqüência positiva e não aparecerão as componentes de seqüência negativa e zero.

Pode-se representar o curto-circuito trifásico da seguinte maneira.

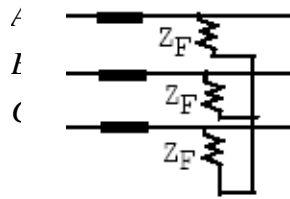


Figura 32 – Curto-circuito trifásico

Portanto neste caso haverá somente uma impedância que representará a soma das impedâncias de seqüência positiva da fonte e dos condutores, por fase, até o ponto da falta. Esta impedância será chamada de  $Z_{kk}$ .

$$I_{fa}^{(1)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_f}$$

Esquemáticamente a situação de curto-circuito trifásico pode ser representada pelo seguinte equivalente de Thèvenin.

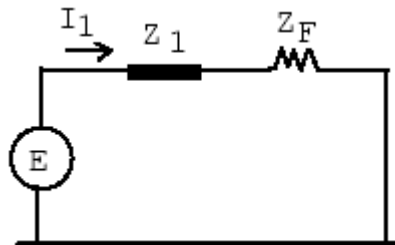


Figura 33 – Equivalente para o curto-circuito trifásico

A função do MATLAB utilizada para representar este defeito foi a seguinte:

```
function [vka,vkb,vkc]=ftr(zf,z1);

vf=1*exp(j*0);
vka0=0;ifa0=0;
vka2=0;ifa2=0;

ifa1=vf/(j*z1+j*zf);
vka1=vf-(j*z1*ifa1)

vka=vka0+vka1+vka2;
vkb=vka0+(1*exp(j*4*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*2*pi/3)*vka2);
vkc=vka0+(1*exp(j*2*pi/3)*vka1)+(1*exp(j*4*pi/3)*vka2);
```

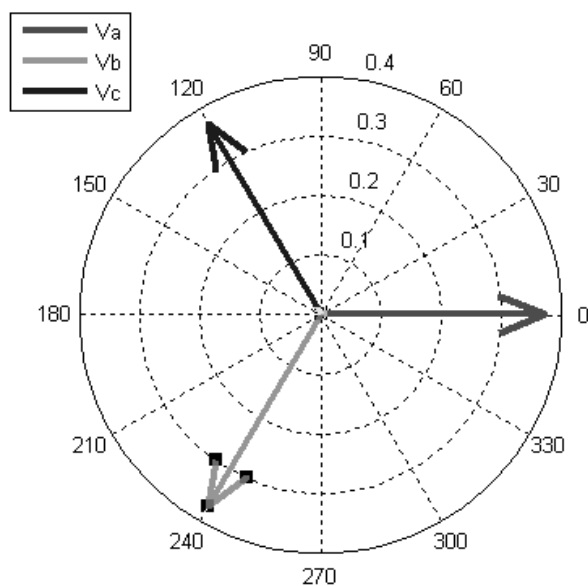


Figura 34 – Diagrama fasorial para o curto-circuito trifásico

Como já foi dito antes e pode ser observado no diagrama acima, o afundamento de tensão esperado para o curto trifásico é uma queda de amplitude severa, cerca de 60%, nas três fases. Porém o sistema continua equilibrado sem alterações nos ângulos de fase das tensões.

Uma observação importante é que neste caso não é necessário fazer a situação de propagação através de um transformador  $\Delta Y$  já que não há as componentes de seqüência negativa e zero.



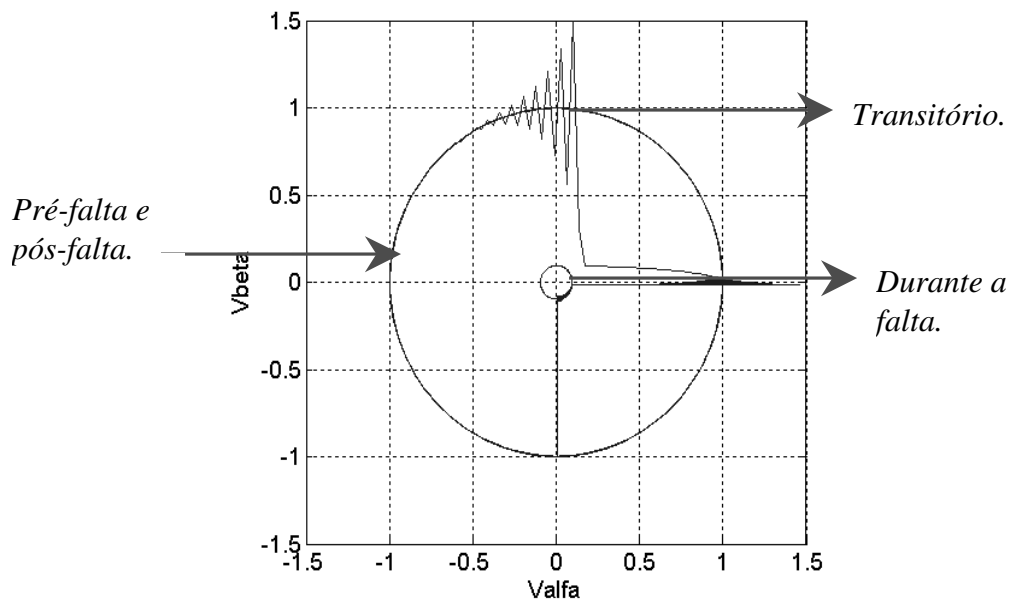


Figura 35 – Transformada de Clarke para o curto-circuito trifásico

O gráfico da transformada de Clarke mostra que mesmo após a falta as tensões realmente continuam balanceadas, só que agora com menor amplitude. Apesar de ser um curto-circuito muito severo, o que pode ser visto pela amplitude do círculo interno, como não há o surgimento de componentes de seqüência negativa a figura traçada durante a falta ainda é um círculo e não uma elipse como foi visto nos casos anteriores.

#### 4.6 Comentários

Neste capítulo procurou-se observar quais são os afundamentos de tensão encontrados em cada tipo de curto-circuito e saber como cada um deles afeta o sistema elétrico. Além disso, é importante lembrar que sob efeito destes afundamentos os parques eólicos não podem mais simplesmente se desconectar do sistema elétrico. Portanto é importante saber como será a resposta, sob o ponto de vista do fluxo de potência no ponto de conexão do

parque eólico com a rede elétrica, a fim de analisar qual será o impacto que cada um destes tipos de falta estará ocasionando às turbinas eólicas. Isto será visto no próximo capítulo.

## Capítulo 5 – Simulação Computacional

A simulação computacional consistirá basicamente na realização das medições do fluxo de potência no ponto de conexão da turbina eólica com a rede elétrica, ou seja, entre a fonte de corrente e o transformador. As correntes e tensões serão monitoradas para que seja possível determinar as potências ativa e reativa instantâneas na saída do gerador e assim analisar o impacto sofrido pela turbina eólica e o comportamento da rede elétrica no momento da falta. Tanto antes quanto durante a falta, a turbina eólica estará injetando correntes em fase com as componentes de seqüência positiva da tensão. Assim será possível analisar o que ocorre quando no momento da falta, a geração eólica continua conectada a rede elétrica.

O programa utilizado para fazer as simulações será o MATLAB. Sua escolha foi baseada no fato de ser um programa de fácil acesso para os estudantes da universidade tendo em vista que ele está disponível em muitos dos seus laboratórios. A ferramenta utilizada será mais especificamente o Simulink com o seu pacote SimPower. O Simulink é um pacote do software dedicado a modelar, simular, e analisar sistemas dinamicamente. Suporta sistemas lineares e não-lineares modelados em tempo contínuo, tempo discreto ou em uma mistura dos dois. Possui uma interface gráfica com usuário que permite construir modelos como diagramas de blocos.

O cálculo das potências será baseado na teoria de potência instantânea (teoria p-q) que define as potências ativa e reativa como:

$$p(t) = v_{\alpha} \times i_{\alpha} + v_{\beta} \times i_{\beta}$$
$$q(t) = v_{\beta} \times i_{\alpha} - v_{\alpha} \times i_{\beta}$$

Como para obter os gráficos do Capítulo 4 já foi feita uma fórmula para calcular a transformada de Clarke fica mais fácil neste momento conseguir os valores das potências ativa e reativa instantâneas. Para tanto será simulado o circuito equivalente e obtidos os valores de tensão e corrente no momento da falta. Feito isto será utilizada esta transformada de Clarke para conseguir os valores de  $v_{\alpha}, i_{\alpha}, v_{\beta}, i_{\beta}$  e assim calcular as potências.

Para finalizar será traçado um gráfico que mostrará o comportamento deste fluxo de potência no ponto de conexão, tornando possível a avaliação de qual será o impacto sofrido pela turbina eólica e pela rede elétrica.

A função utilizada para realizar este trabalho, onde x e y são respectivamente as tensões e correntes de fase obtidas na simulação, será a seguinte:

```
function [p,q]=pq(x,y);
```

```
[a, b]=clarke(x);  
[c, d]=clarke(y);  
  
p=a.*c+b.*d;  
q=b.*c-a.*d;
```

## 5.1 Sistema elétrico equivalente

Para conseguir simular as situações de falta já mencionadas anteriormente será montado um esquema um pouco diferente daquele mostrado no Capítulo 4. Este esquema representará mais perto da realidade o tipo de conexão de um parque eólico com a rede elétrica. A primeira alteração em relação ao sistema mostrado no Capítulo 4 é o fato de que no lugar da carga trifásica será colocada uma fonte de corrente que representará a turbina eólica conectada naquele ponto. O fato de não representar a turbina eólica com todos os seus parâmetros, mas sim colocar uma fonte de corrente em seu lugar não acarretará em nenhum prejuízo para este trabalho pois como foi explicado no Capítulo 2, o fato da turbina escolhida ter um sistema de conversão ca/cc cc/ca com um inversor que injeta corrente de acordo com as tensões da rede faz com que ela possa ser considerada, do ponto de vista da rede elétrica, como uma fonte de corrente. Na simulação do Matlab esta fonte de corrente está aterrada para evitar problemas de cálculo (erro numérico).

A segunda alteração, e a principal delas, é a inclusão de um sistema PLL. Este sistema, como já foi visto no Capítulo 2, tem como função controlar a fase da corrente injetada pela fonte de corrente de acordo com a tensão da rede elétrica. Desta maneira é possível fazer com que no momento de operação normal e de falta haja somente a injeção de potência ativa por parte da fonte de corrente, que neste caso representa um gerador eólico. Por este motivo o PLL será utilizado como sinal de entrada da fonte de corrente em questão.

Abaixo pode ser visto o diagrama de blocos do PLL implementado.



transformador em  $\Delta Y$ , o fato de não haver caminho para terra faz com que sobre uma corrente residual numérica de miliampères, caso as correntes não estejam exatamente iguais, como deve ser num sistema balanceado. Esta corrente multiplicada por uma resistência altíssima (quase infinita) como há no caso de uma conexão Y não aterrado faz com que apareça uma tensão elevada que não representa a realidade. Como o MATLAB não consegue fazer os cálculos de maneira exata esta corrente residual acaba aparecendo e ocasionando o problema mencionado. Por isso é que o secundário será aterrado, pois assim há um caminho para esta corrente residual escoar. Do ponto de vista da análise a ser feita neste trabalho esta situação não acarreta em nenhum prejuízo já que como o primário continua conectado em delta a corrente de seqüência zero continua não tendo caminho para se propagar, o que resulta na mesma condição de afundamento de tensão.

### 5.2.1 Simulação monofásica para a terra

A primeira situação será o curto-circuito fase-terra. Para ficar de acordo com a parte teórica será adotado um defeito na fase A que será representado pela ligação de uma impedância por meio de um disjuntor até a terra. Este disjuntor será previamente programado para fechar e abrir em tempos determinados, de maneira a produzir afundamentos de tensão com um tempo suficiente, da ordem de milisegundos, para que sejam feitas as análises de fluxo de potência.

Na figura a seguir, que mostra o sistema utilizado para simular este tipo de defeito, se pode perceber um medidor trifásico colocado entre o transformador e a fonte de corrente. Ele será utilizado para adquirir os dados de tensão e corrente que serão vistos no osciloscópio V1.

Os parâmetros dos equipamentos utilizados neste sistema equivalente estão mostrados no final deste documento no tópico Anexos.

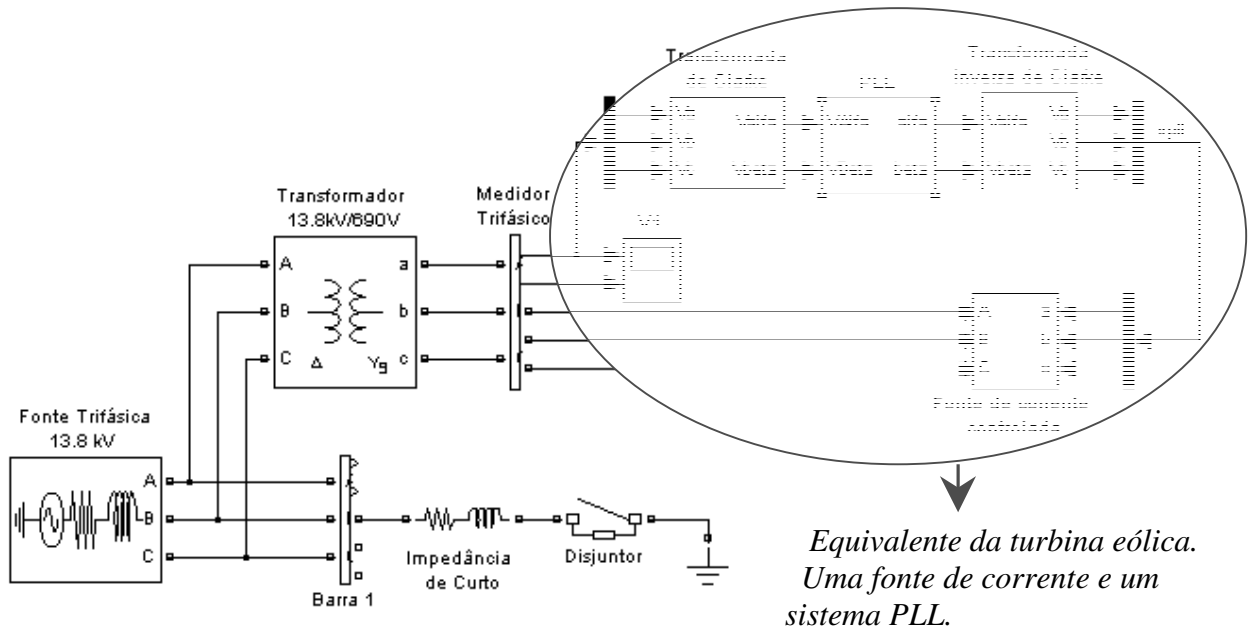


Figura 37 – Desenho esquemático da falta monofásica para a terra

Para dar início à simulação será adotado que o disjuntor fechará no tempo correspondente a 0,5s e que a nova abertura ocorrerá em 0,833s. Com isso aparecerão três zonas diferentes no ensaio. A primeira que representa a operação normal da rede, a segunda que representa as perturbações no momento da falta e a terceira que representa a volta à operação normal após algumas oscilações.

Tomando os dados de tensão e corrente (em pu) para a falta monofásica e fazendo os devidos cálculos para a obtenção das potências consegue-se os seguintes gráficos para o caso de propagação através de um transformador  $Y_g Y_g$ .

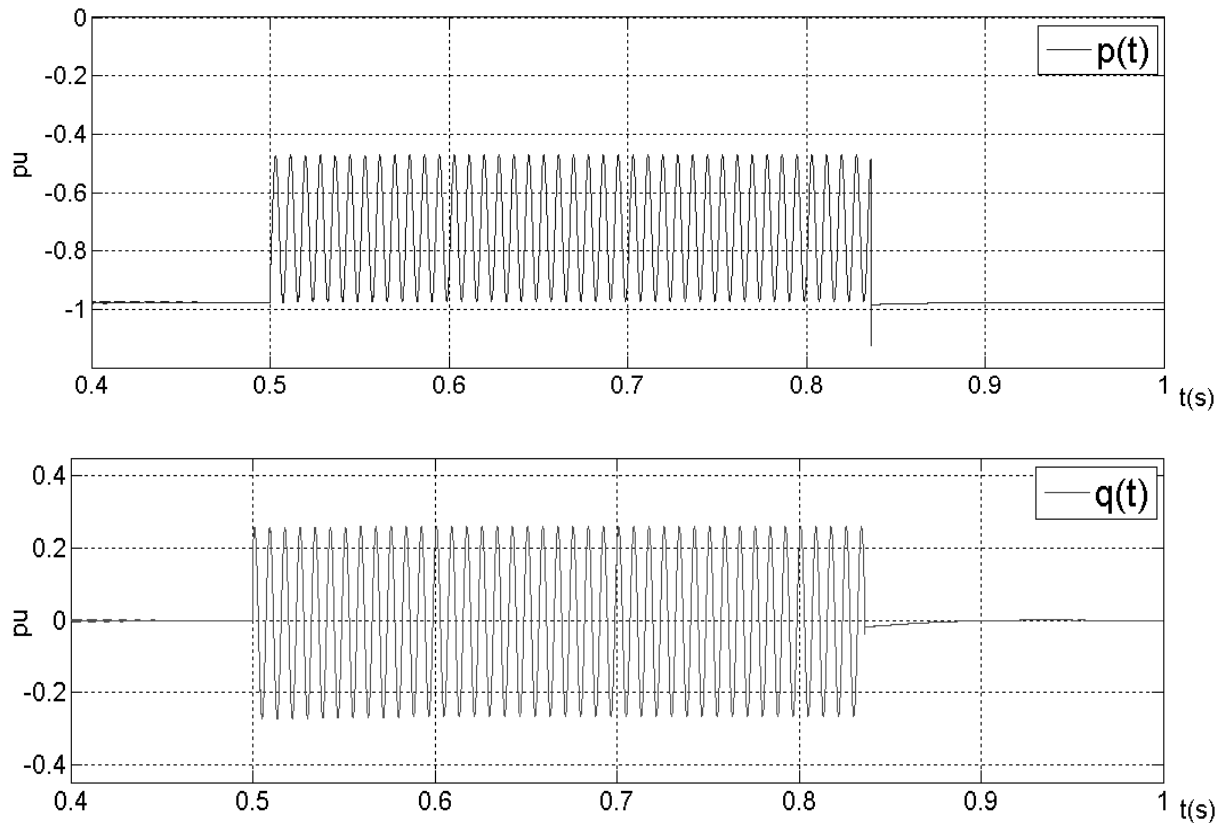


Figura 38 – Potências instantâneas para o defeito monofásico para a terra  $Y_g Y_g$

Dos gráficos podem ser retiradas duas informações importantes. A primeira é que há uma grande variação nas potências instantâneas no momento da falta. A segunda é que além desta variação há também uma redução no valor médio da potência ativa.

É possível perceber também o funcionamento do sistema PLL. Basta ver que tanto antes quanto após a falta a potência reativa tem valor zero e a potência ativa injetada tem valor 1,0 pu.

Repetindo os passos para o caso do transformador  $\Delta Y_g$  se consegue a seguinte resposta:



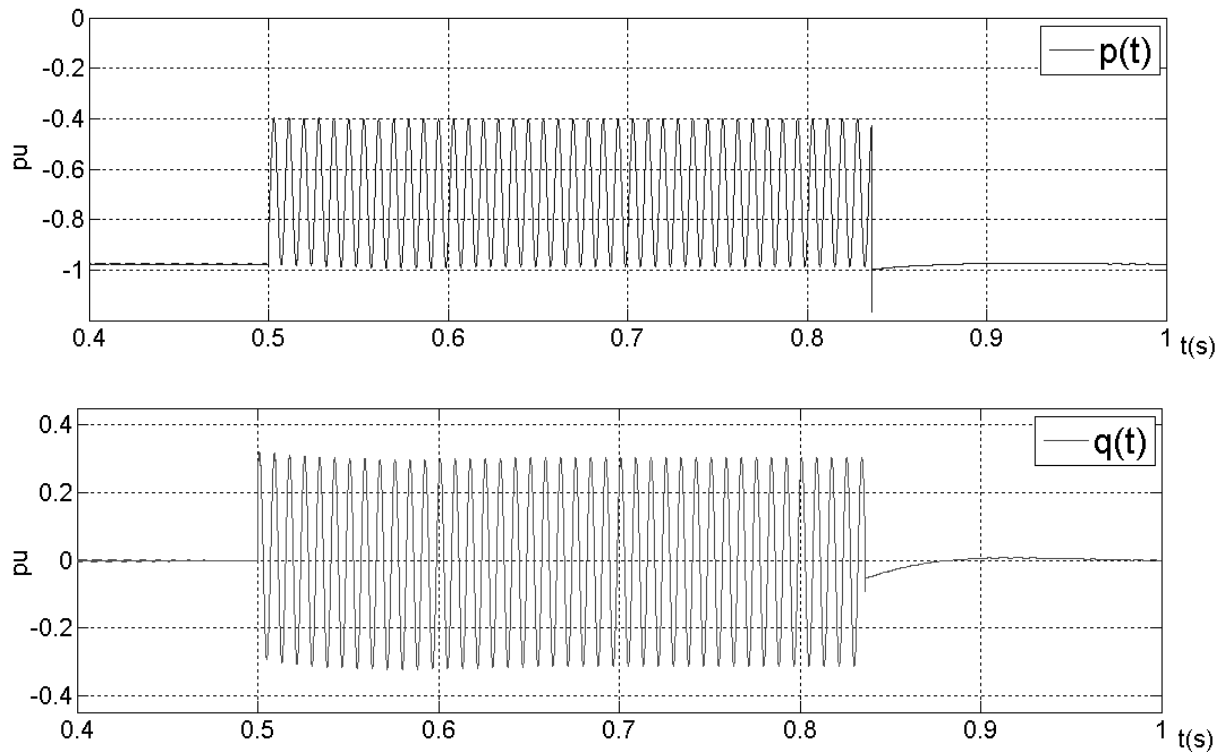


Figura 39 – Potências instantâneas para o defeito monofásico para a terra  $\Delta Y_g$

Apesar de possuir características de afundamentos de tensão diferentes, como fo visto no Capítulo 4, no momento da falta percebe-se que não há muita diferença na resposta obtida para o fluxo de potência de uma falta monofásica propagada por um transformador conectado em  $Y_g Y_g$  e um transformador conectado em  $\Delta Y_g$ . Os problemas ocasionados por uma falta deste tipo são iguais aos do caso anterior. A única diferença é que há um pequeno aumento na amplitude das potências ativa e reativa que atinge valores um pouco mais elevados.

### 5.2.2 Simulação bifásica

Para que a simulação fique de acordo com a parte teórica exibida no Capítulo 4 e seja possível manter uma base de comparação com as tensões obtidas será simulada uma falta entre as fases B e C.

A impedância entre as fases representa a impedância de arco existente numa falta deste tipo.

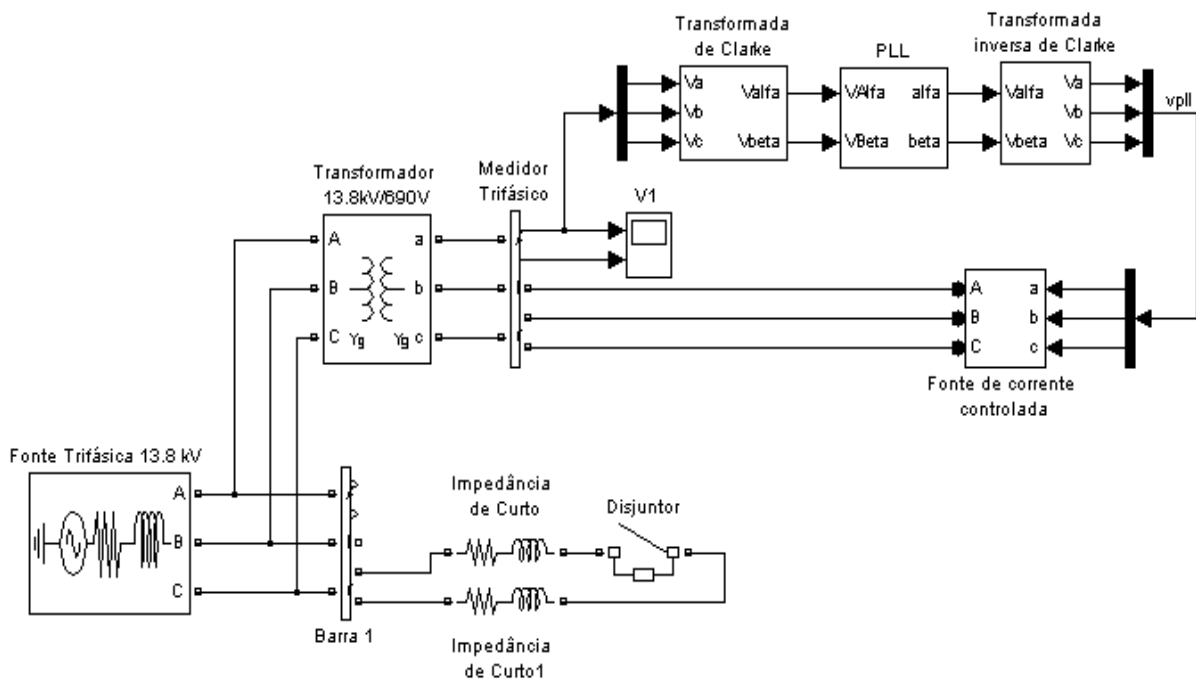
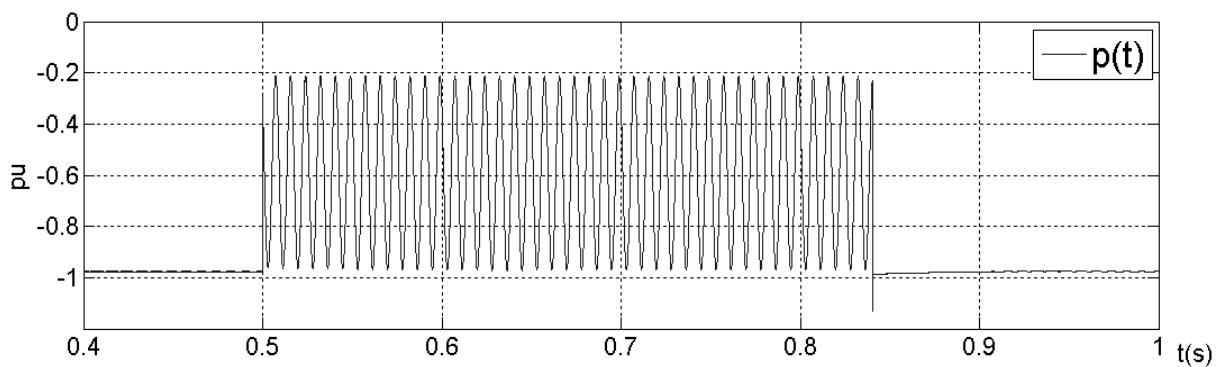


Figura 40 – Desenho esquemático da falta bifásica

Como resultados foram obtidos os seguintes gráficos para as potências instantâneas.



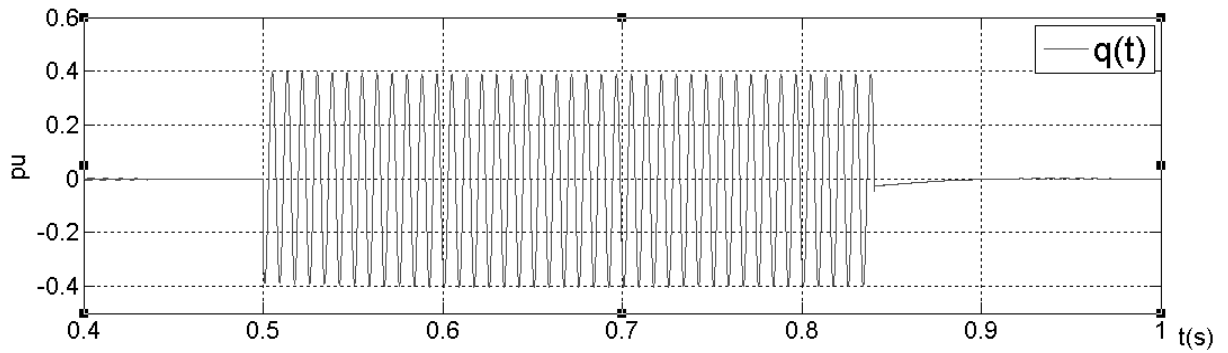


Figura 41 – Potências instantâneas para o defeito bifásico  $YgYg$

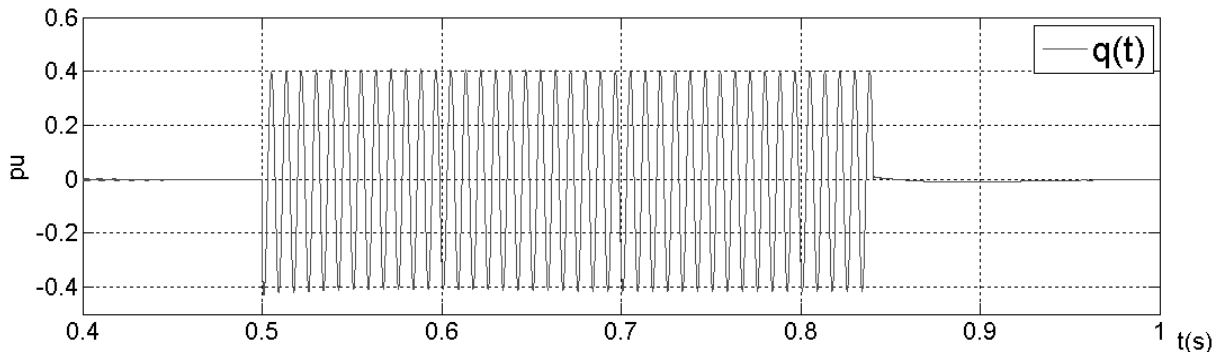
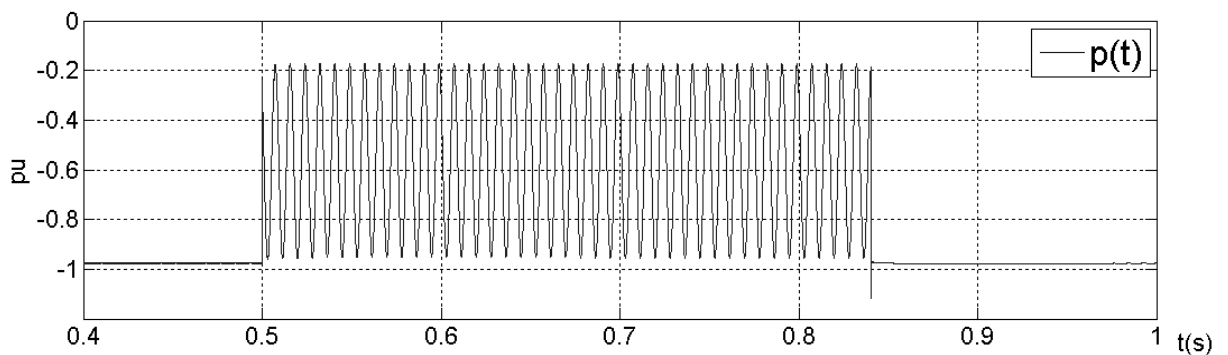


Figura 42 – Potências instantâneas para o defeito bifásico  $\Delta Yg$

Assim como no caso anterior também há uma variação nas potências instantâneas e uma diminuição no valor médio da potência ativa. A diferença também está na magnitude destas potências, que aqui atingem valores ainda mais elevados quando comparados à falta monofásica.

### 5.2.3 Simulação bifásica para a terra

Assim como no caso anterior para que a simulação fique de acordo com a parte teórica exibida no capítulo 4 será simulada uma falta entre as fases B e C.

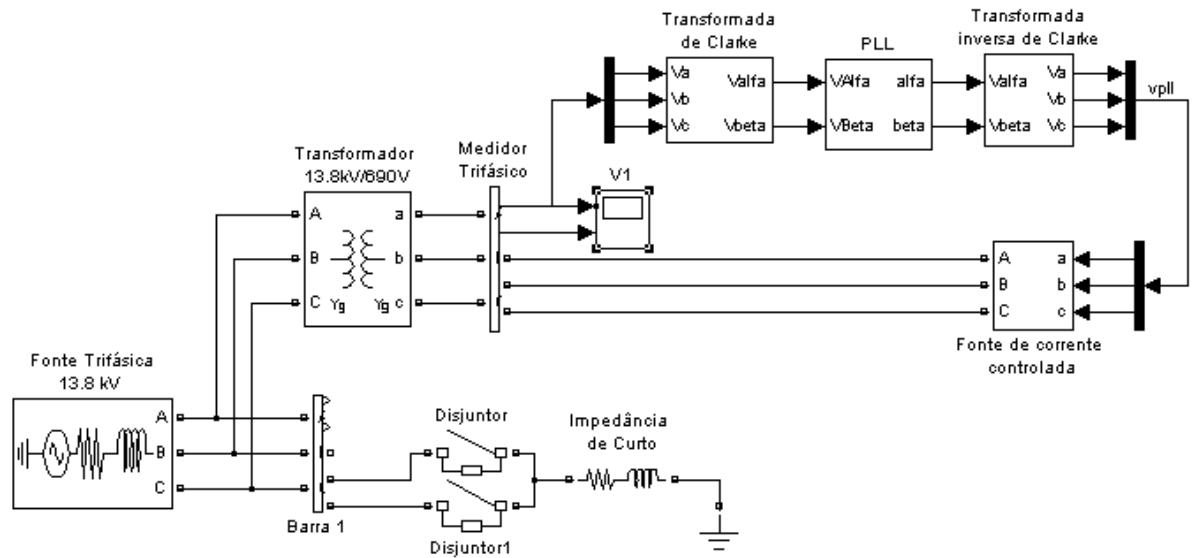


Figura 43 – Desenho esquemático da falta bifásica para a terra

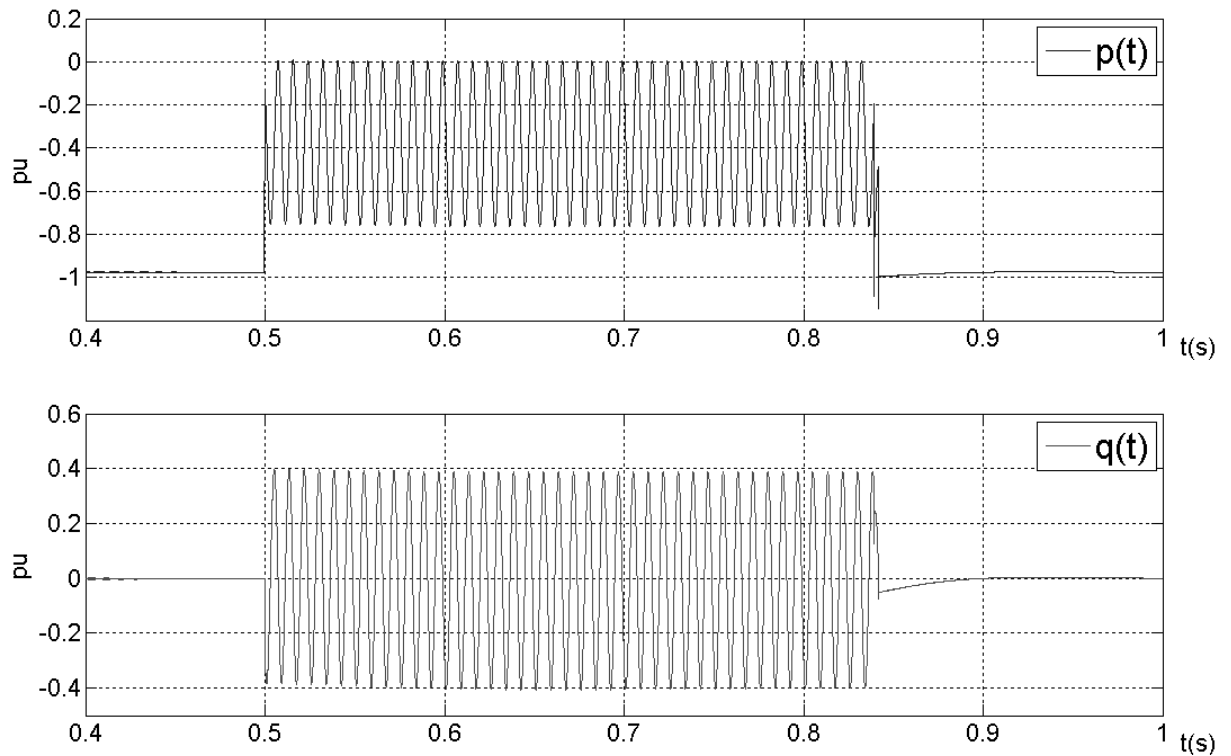


Figura 44 – Potências instantâneas para o defeito bifásico para a terra  $Y_g Y_g$

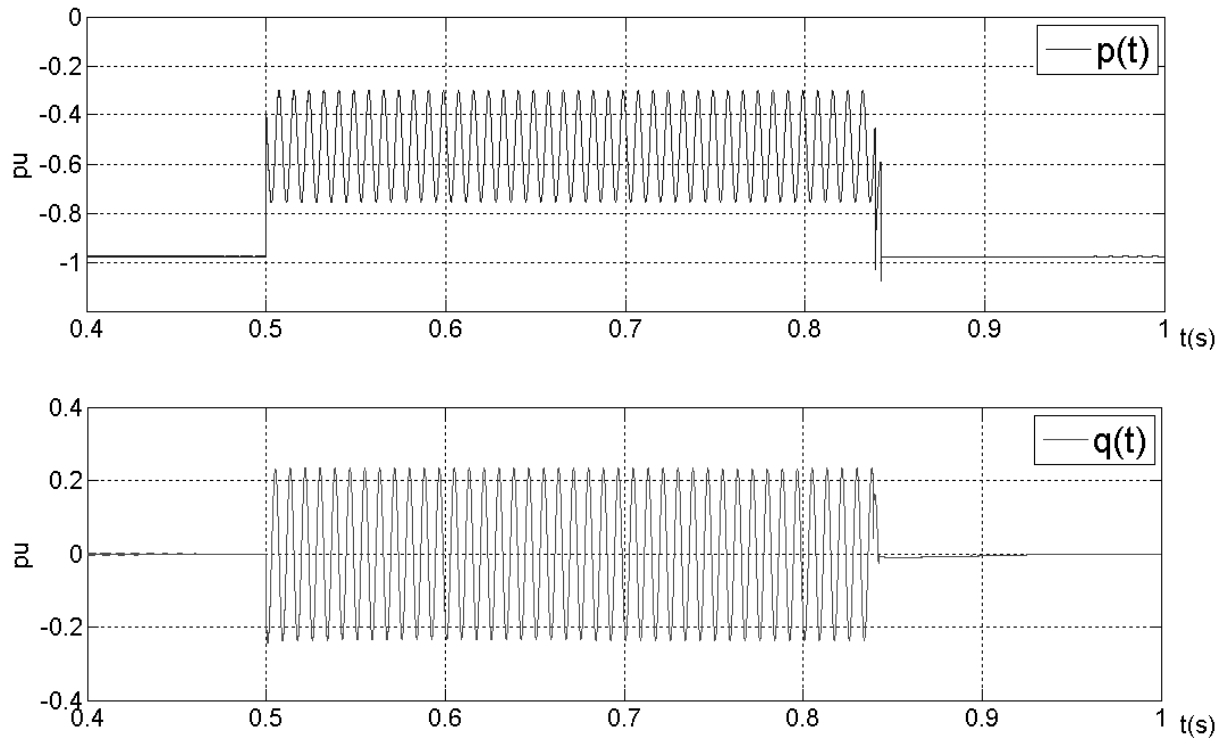


Figura 45 – Potências instantâneas para o defeito bifásico para a terra  $\Delta Y_g$

O que pode ser dito é que parece haver um padrão nas respostas do fluxo de potência. Tanto nas faltas que possuem contato com a terra quanto uma falta fase-fase, através dos dois tipos de transformadores, apresentaram respostas bem semelhantes, com diferenças apenas na intensidade.

#### 5.2.4 Simulação fase-terra fase-terra

Neste caso, que representa um defeito bifásico para a terra real, as fases em falta serão B e C.

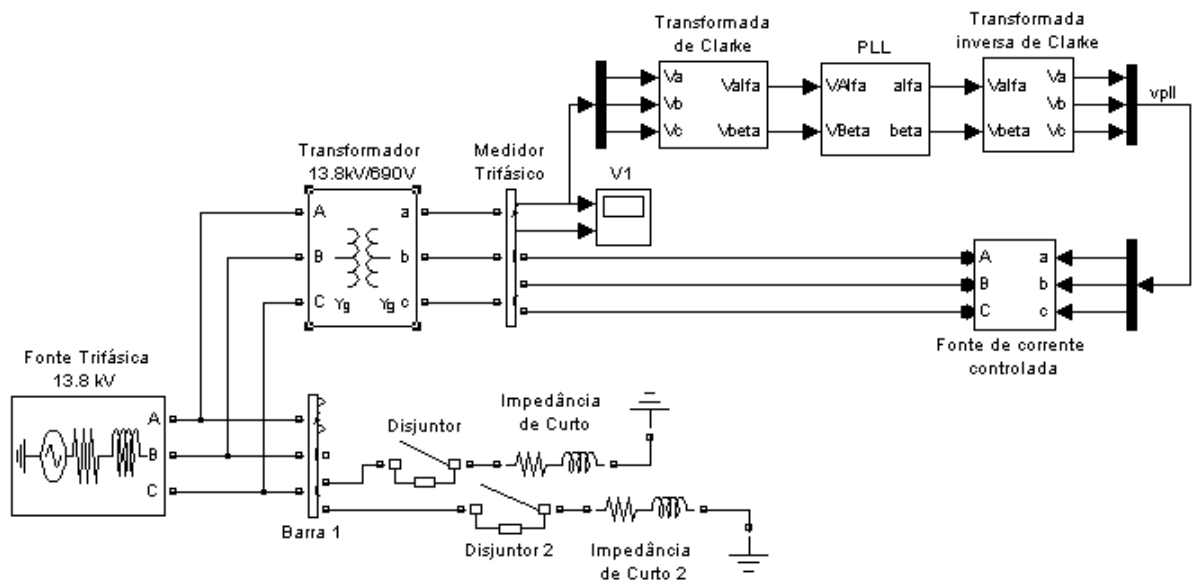


Figura 46 – Desenho esquemático da falta fase-terra fase-terra

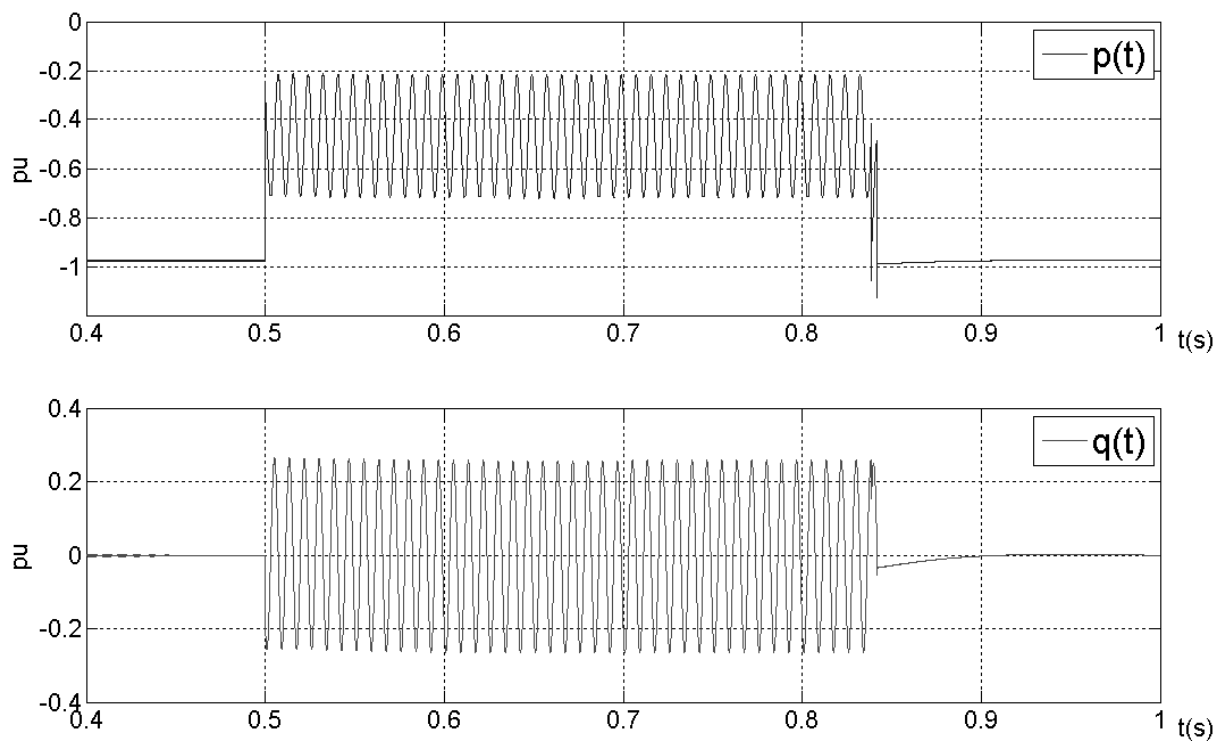


Figura 47 – Potências instantâneas para o defeito fase-terra fase-terra YgYg

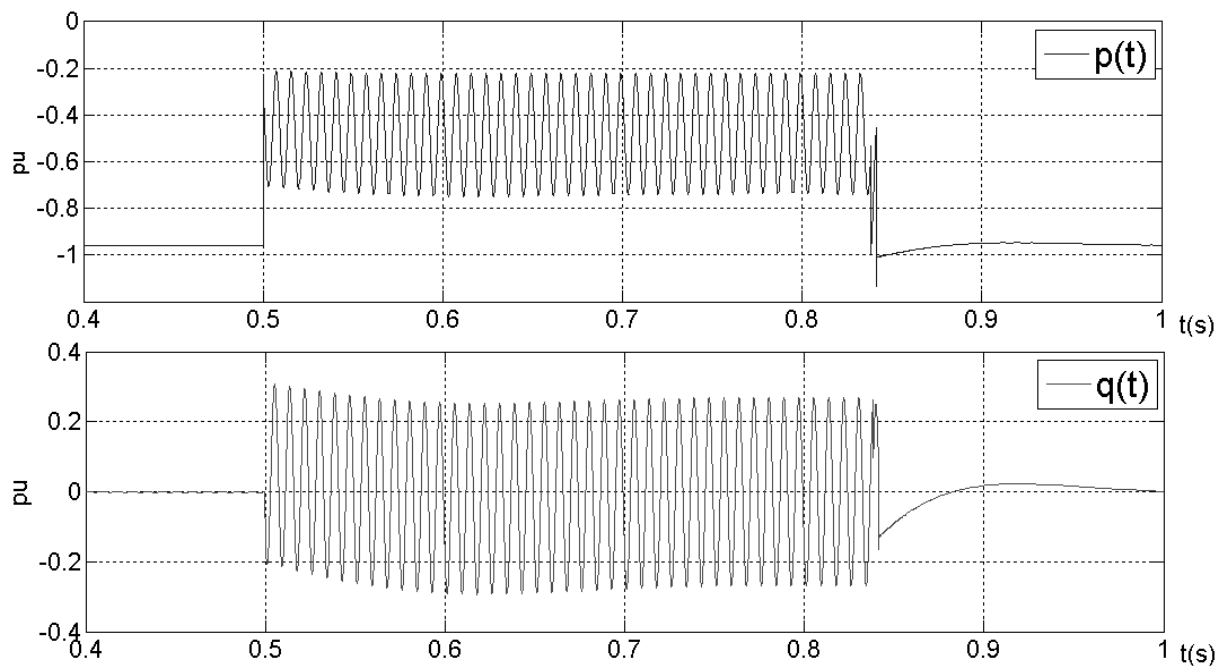


Figura 48 – Potências instantâneas para o defeito fase-terra fase-terra  $\Delta Y_g$

Como esta é a última análise de uma falta assimétrica nota-se que realmente o que difere os fluxos de potência obtidos é uma pequena variação nas amplitudes das potências.

### 5.2.5 Simulação trifásica

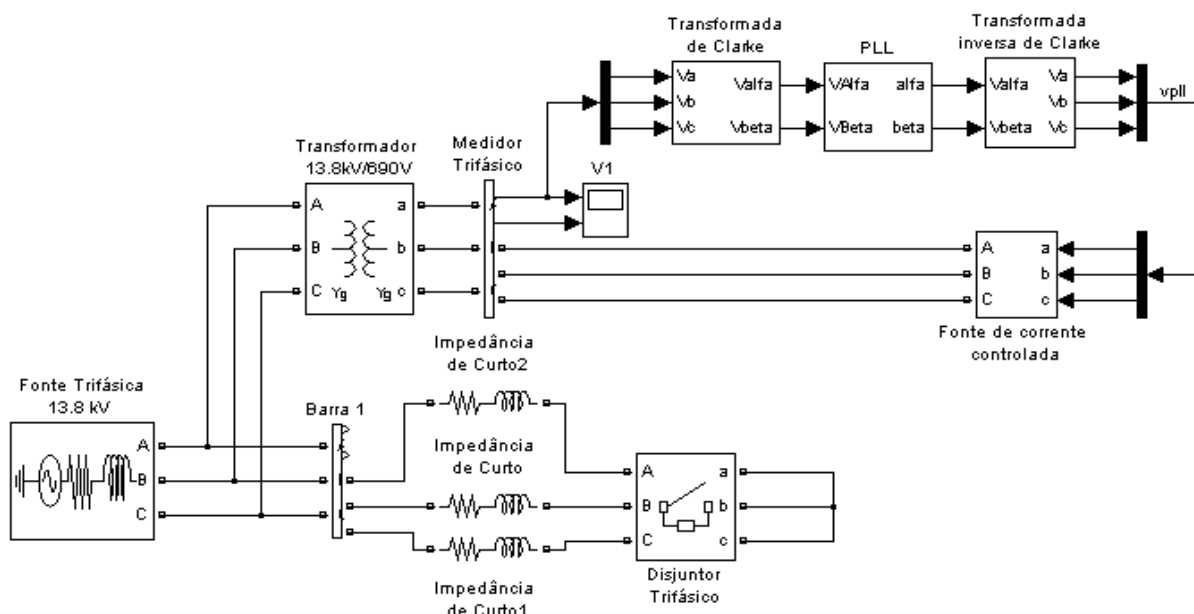


Figura 49 – Desenho esquemático da falta trifásica

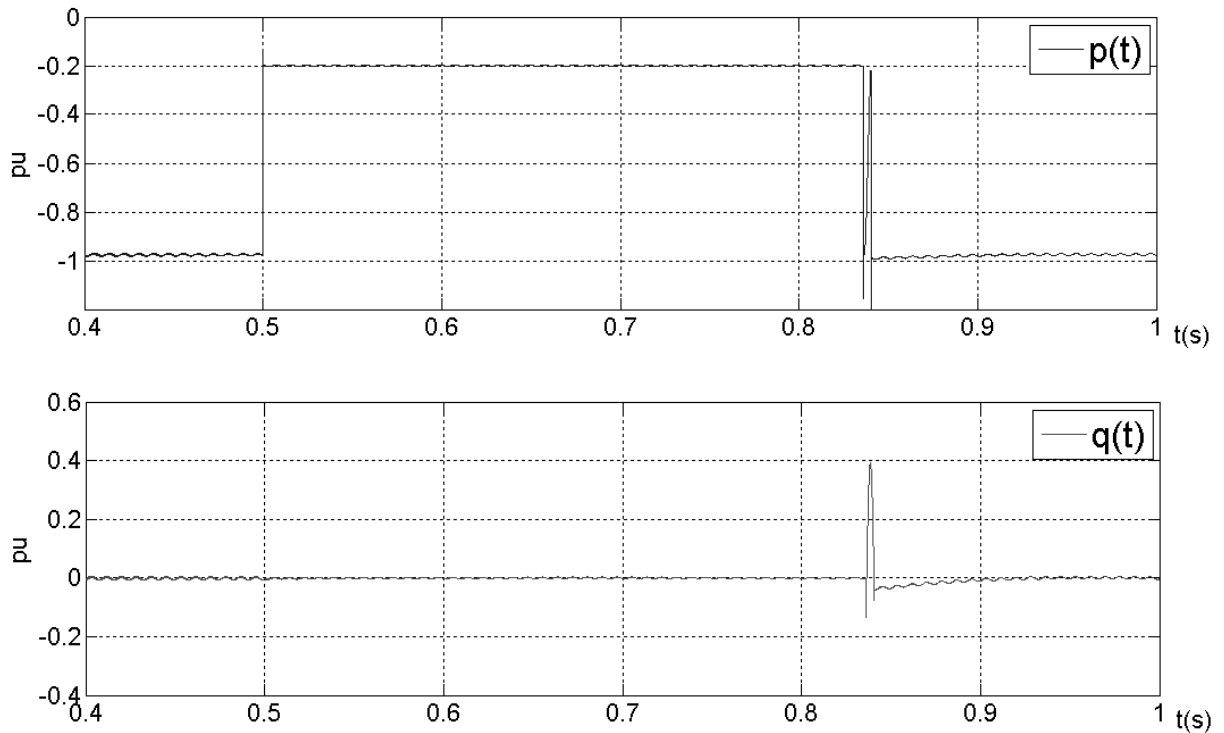


Figura 50 – Potências instantâneas para o defeito trifásico

Este é o único caso em que não há a aparição da potência ativa instantânea variante ou qualquer componente de potência reativa. Isto já era esperado pois como não há outra componente senão a de seqüência positiva, a corrente injetada, por conta do PLL, continua com fator de potência unitário em relação à tensão no momento da falta. A queda no valor médio da potência ativa é consequência da queda na amplitude das tensões que ao serem multiplicadas pelo mesmo valor de corrente que estava sendo injetado antes da falta (1,0 pu) produzem agora um valor menor de potência ativa.

### 5.3 Comentários



Neste capítulo foi apresentado o impacto que cada um dos diferentes tipos de defeitos, quando simulados em um sistema que representa uma turbina eólica conectada com a rede elétrica, acarreta no sistema elétrico. A partir dos dados obtidos neste capítulo é possível retirar informações sobre quais conseqüências acontecerão com o sistema elétrico e com as turbinas eólicas quando se opta pela manutenção da conexão da turbina eólica com a rede elétrica no momento da falta. No próximo capítulo estarão mostradas estas conseqüências que podem servir de base para estudos futuros.

Nas simulações apresentadas neste Capítulo e no Capítulo 4, foi adotado como hipótese simplificadora o mesmo valor de  $X/R$  para a rede e a falta. Como já foi mencionado anteriormente, na realidade não há a igualdade entre estes dois valores, mas sim um valor praticamente resistivo da impedância de falta que representa a impedância de arco. Como conseqüência desta simplificação, percebe-se que os ângulos de fase das tensões de seqüência positiva não sofrem descontinuidades no momento da falta.

Para valores diferentes de  $X/R$  na rede e na falta, pode haver saltos de fase nas componentes de seqüência positiva. Isto pode prejudicar o comportamento do sistema PLL, que tem a função de sincronizar a corrente com a tensão no conversor usado para acoplar o aerogerador à rede. Uma análise mais aprofundada dessa questão deve ser objeto de trabalhos futuros.

## Capítulo 6 – Análises e Conclusões

Tendo como base os gráficos obtidos no capítulo anterior percebe-se que todos os tipos de curto-circuito afetam de maneira semelhante o fluxo de potência do sistema. Apesar de alguns serem mais severos do que os outros, pode se dizer que os principais problemas observados para cada um deles serão os mesmos sendo melhor então agrupar todos eles em uma lista que servirá para todas as faltas. É importante observar que caso sejam alterados os parâmetros da rede ou do PLL, podem ser obtidas respostas diferentes de fluxo de potência.

Dos gráficos das potências ativa e reativa do capítulo anterior é possível listar as seguintes problemas:

1. Brusca redução no valor médio da potência ativa durante a falta. Na Tabela 4 pode ser visto o grau de redução que cada falta atingiu.

Tabela 4 – Grau de redução da potência ativa média nos diferentes tipos de falta

Potência média (pu)	Fase-terra	Fase-fase	Fase-fase-terra	Fase-terra fase-terra	Trifásica
	0,5	0,6	0,4	0,5	0,2

2. Forte oscilação da potência ativa instantânea.

3. Surgimento de potência reativa que apesar de ter valor médio igual a zero também sofre uma grande variação no seu valor instantâneo.

Estes problemas foram ocasionados em virtude das seguintes situações.

Em todas as faltas, seja antes, durante ou depois, devido ao sistema de controle PLL continuou-se injetando, por meio da turbina eólica equivalente, corrente de 1,0 pu na rede elétrica. Como no momento da falta, independente do tipo de falta, sempre há uma redução da amplitude da tensão de uma ou mais fases é esperado que haja uma diminuição no valor médio da potência ativa, pois ao multiplicar a corrente constante por um valor menor de tensão se perceberá obviamente uma queda neste valor.

Quanto à potência reativa percebe-se que o aparecimento desta variável tem como causa o surgimento de componentes de seqüência negativa da tensão. Como esta componente não está em fase com a corrente injetada, que por causa do PLL está em fase somente com a componente de seqüência positiva, o fator de potência em relação a estas novas tensões de falta não pode mais ser considerado unitário. Portanto há o surgimento da potência reativa. Como dito antes uma maneira de confirmar o que foi dito é perceber o caso da falta trifásica. Como neste caso não há surgimento de outras componentes de seqüência, pois se trata de uma falta simétrica, a corrente injetada continua com fator de potência unitário em relação à tensão já que esta tensão de falta tem somente a componente de seqüência positiva. Com isso não há o aparecimento da potência reativa nos gráficos de fluxo de potência.

Algumas conseqüências destes problemas podem ser observadas tanto para o sistema elétrico quanto para o gerador eólico. Com relação à diminuição do valor médio da potência ativa é possível destacar as seguintes conseqüências:

- Para o sistema elétrico a diminuição do valor médio da potência ativa entregue pela turbina eólica não acarretará em grandes danos, pois uma rede elétrica com boa

seletividade é capaz de suprir, caso necessário, esta falta de potência por outro sistema gerador de energia.

- Em relação ao gerador eólico há alguns problemas. Ao haver a redução de cerca de 60% da potência ativa entregue à rede elétrica a turbina eólica não consegue acompanhar este distúrbio e diminuir tão rapidamente a produção de energia do seu gerador para um valor tão baixo. Isto porque a produção de energia está relacionada com a velocidade do vento e da rotação do rotor, ou seja, para diminuir a produção de energia uma solução seria usar o controle de passo e desta maneira alterar o ângulo das pás em relação ao vento. Porém este sistema é mais lento do que as variações elétricas ocorridas em uma falta e não seria capaz de realizar tal tarefa. Portanto como consequência, o fato de haver uma diminuição da potência exigida pela rede acarretará em uma aceleração do rotor que poderá ocasionar sérios problemas mecânicos nos eixos e engrenagens da máquina.

Uma solução encontrada para este problema pode ser a adição de um resistor de descarga entre o gerador e o transformador. Este resistor tem a função de receber esta potência ativa excedente fornecida pela turbina e dissipá-la fazendo com que não seja necessária uma brusca redução no fornecimento de energia da turbina e evitando com isso a aceleração do rotor. Porém é importante que haja um sistema de controle que perceba que esta potência está sendo desviada para o resistor e que avise a turbina que ela deve diminuir gradualmente sua produção de energia, caso contrário este resistor queimará pois não suportará por muito tempo a grande quantidade de energia (60% do nominal) que passará por ele.

Com relação a variação da potência ativa instantânea é possível destacar as seguintes consequências:

- Assim como no caso da diminuição do valor médio da potência ativa instantânea, a rápida variação desta potência instantânea também poderá causar grandes esforços e danos mecânicos na turbina eólica que tentará, mas não conseguirá acompanhar estas rápidas variações.
- Outro problema está relacionado com o capacitor presente no circuito intermediário do conversor de frequência deste tipo de turbina. Este capacitor age como um armazenador de energia e tem a função de entregar uma tensão constante para o inversor. Quando este capacitor receber esta potência oscilante ele não conseguirá entregar uma tensão constante como pode ser verificado pelas relações que expressam o comportamento da potência em um capacitor.

$$W_c = \frac{1}{2} C v_c^2 \rightarrow v_c = \frac{2}{C} \sqrt{\int p(t) dt}$$

Logo o inversor não conseguirá, ao fazer o chaveamento, eliminar esta variação de tensão e passará este problema para frente entregando uma tensão distorcida na saída. Logo terá sua função comprometida. Portanto o método de controle utilizado pelo aerogerador Enercon não soluciona este problema, pois não há nada nele que evite tal problema, fazendo com que seja necessário um outro sistema de controle.

É importante observar que é muito difícil obter informações detalhadas sobre o funcionamento de um equipamento como um aerogerador de uma empresa como a Enercon, já que estes assuntos são confidenciais. Portanto do que foi retirado dos seus catálogos e que é disponível para o público não foi vista uma solução no sistema de controle utilizado por eles para resolver este problema.

Uma solução possível é que é mostrada no documento “Independent PQ Control for Distributed Power Generation Systems under Grid Faults” (RODRIGUEZ et al., 2006) é

fazer com que no momento da falta o controle da turbina perceba esta falta e forneça uma corrente de referência para os inversores que possuam características que possibilitem a obtenção de uma potência estável na saída. Desta maneira ele diz ainda ser possível controlar separadamente as potências ativa e reativa.

Um problema encontrado neste estudo é que as correntes mais satisfatórias, no que diz respeito ao controle das potências injetadas, são correntes de formas não padronizadas, bem diferentes de uma senóide. Com isso além de não ser algo muito fácil de obter não se sabe ao certo, sem estudos mais profundos, quais seriam as conseqüências possíveis, do ponto de vista do sistema elétrico, da injeção de correntes tão disformes.

- Com relação ao sistema elétrico uma variação na potência ativa instantânea pode acarretar numa perda da estabilidade do sistema ou então em uma má operação dos sistemas de controle presentes na rede elétrica. Para saber exatamente quais seriam os problemas seria necessário um estudo mais detalhado no qual seriam feitas simulações mais completas utilizando informações de parâmetros de rede e etc.

Com relação a variação da potência reativa instantânea é possível destacar as seguintes conseqüências:

- Vendo do ponto de vista do gerador a potência reativa pulsante não ocasiona problemas já que esta potência não chegará até o gerador pois será bloqueada no elo cc presente no conversor deste tipo de turbina. O único problema que poderá ser ocasionado por este fato é a limitação potência ativa gerada pelo conversor pois ele terá que fornecer uma parcela de potência reativa.
- Com relação ao sistema elétrico se pode destacar os mesmos problemas ocasionados pela potência ativa oscilante. São eles: uma perda de estabilidade e má operação dos sistemas de controle.

## 6.1 Comentário final

Portanto este trabalho foi desenvolvido para mostrar qual seria o impacto sofrido pelo gerador eólico escolhido quando este se encontra sob condições de ocorrência de falta na rede elétrica. Além disso, ele mostra o crescimento do interesse de todo o mundo na energia eólica pois como pude perceber já há uma série de trabalhos publicados nesta área e cada vez mais surgem novos estudos que visam melhorar o aproveitamento desta fonte de energia tornando-a mais barata, eficiente e confiável.

Neste trabalho, para conseguir chegar a uma conclusão final foram feitas duas análises fundamentais que serviram de base para as simulações. Primeiro a definição de como é o funcionamento de uma turbina eólica e depois de como cada tipo de curto-circuito afeta a rede elétrica. Passos que foram apresentados nos Capítulos 2 e 4 respectivamente. Com esta base pronta foi possível simular um sistema equivalente e chegar as conclusões apresentadas no tópico anterior.

Como pode ser visto o esquema aqui apresentado não soluciona os problemas que aparecem, mas mostra quais são eles e dá sugestões de como seria possível solucioná-los.

Uma série de estudos podem ser feitos para chegar a conclusões posteriores e avançar neste campo de pesquisa. Portanto para encerrar este trabalho deixarei algumas sugestões de possíveis trabalhos seguindo esta linha.

## 6.2 Sugestões de trabalhos futuros

- Análise da estabilidade do sistema elétrico numa situação em que a turbina eólica permaneça conectada no momento da falta.
- Utilização de outros tipos de turbina sob as mesmas condições para fazer um comparativo entre as respostas obtidas.
- Utilização de outros sistemas de sincronização com a rede elétrica a fim de encontrar melhores respostas no que diz respeito ao fluxo de potência.
- Fazer o mesmo tipo de estudo, porém com parâmetros da rede diferentes.
- Alterar a relação X/R da impedância de falta e fazer uma comparação entre esses novos resultados obtidos com os resultados do projeto.
- Utilizar no sistema de controle três PLLs monofásicos em vez de utilizar o PLL trifásico que foi apresentado neste projeto.

## Anexos:

Tabela 5 – Parâmetros do sistema elétrico equivalente

Fonte trifásica	V <sub>ff</sub> (V)	Frequência (Hz)	Conexão	X/R	Nível de curto trifásico (MVA)
	13800	60	Y <sub>g</sub>	7,0	100



Transformador	Vff (V)	Frequência (Hz)	Conexão	Potência nominal (MVA)	R1 (pu)	L1 (pu)	Rm (pu)	Lm (pu)
	13800/690	60	YgYg ou DYg	40	0,002	0,001	500	500

Impedância de curto	Tipo	R (ohms)	L (H)
	RL	0,07143	0,00133

Disjuntor	R(ohms)	R snubber (ohms)	C snubber (F)
	0,01	1,00E+06	Inf.

PLL	A	B	C	D	Condição inicial	Condição inicial do integrador
	0,0	1,0	$(2 \cdot \pi \cdot 5)^2 = 985,96$	$2 \cdot 0,7 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 5) = 32,8$	0,383	$(-\pi/2)$

## Bibliografia

- TEODORESCU, Remus; RODRÍGUEZ, Pedro; HELLE, Lars. **Grid Requirements, Monitoring, Synchronization and Control of Wind Turbines Under Grid Faults**. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Espanha. Junho, 2007.
- COSTA, D.R.Jr.; ROLIM, Luis Guilherme; AREDES, Maurício. **Analysis and software implementation of a robust synchronizing circuit PLL circuit**. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2003. ISIE '03. 2003 . Junho, 2003.
- CASTRO, M.G. Rui; JESUS, J.M. Ferreira de. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Equipamento Eléctrico dos Geradores Eólicos - 1º parte - Princípio de Funcionamento**. Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico. Março, 2004.
- PAVINATTO, Eduardo. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede eléctrica**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- WIND ENERGY INTERNATIONAL TRADE FAIR - HAMBURG - 16-19 MAY 2006. **Wind Energy-Study 2006 -Assessment of the Wind Energy Market until 2014**. Alemanha. Maio, 2006.
- EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (EWEA). **European Market for Wind Turbines Grows 23% in 2006**. Bélgica. Fevereiro, 2007.
- MORTHORST, Poul. **Wind energy - the facts: Costs & Prices**. 2 vol. Dinamarca, 2003.

- WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION (WWEA). **Press Release New World Record in Wind Power Capacity.** Alemanha. Janeiro, 2007.
- ROSAS, Pedro; ESTANQUEIRO, Ana. **Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas - Projeto Elétrico e Impacto de Centrais Eólicas na Rede Elétrica.** Recife, 2003.
- GRAINGER, John; STEVENSON, William. **Power System Analysis.** Cingapura, 1994.
- RODRÍGUEZ, Pedro; TIMBUS, Adrian; TEODURESCU, Remus; LISERRE, Marco; BLAABJERG, Frede. **Independent PQ Control for Distributed Power Generation Systems under Grid Faults.** IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference. França. Novembro, 2006.
- BRASIL. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). **Procedimentos de rede - Requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica - Submódulo 3.6 - Revisão 4.**
- TIMBUS, Adrian; TEODURESCU, Remus; LISERRE, Marco; BLAABJERG, Frede. **Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, N°5. Outubro, 2006.