

Nicolau Kellyano Leite Dantas

**ANÁLISE DE ALGORITMOS DE
SINCRONIZAÇÃO PARA CONVERSORES
ESTÁTICOS DE POTÊNCIA**

Campina Grande, Brasil

18 de março de 2015

Nicolau Kellyano Leite Dantas

ANÁLISE DE ALGORITMOS DE SINCRONIZAÇÃO PARA CONVERSORES ESTÁTICOS DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Univesidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Orientador: Edgar Roosevelt Braga Filho

Campina Grande, Brasil

18 de março de 2015

Nicolau Kellyano Leite Dantas

ANÁLISE DE ALGORITMOS DE SINCRONIZAÇÃO PARA CONVERSORES ESTÁTICOS DE POTÊNCIA/ Nicolau Kellyano Leite Dantas. – Campina Grande, Brasil, 18 de março de 2015-

35 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Edgar Roosevelt Braga Filho

Trabalho de Conclusão de Curso – Univesidade Federal de Campina Grande - UFCG

Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI

Departamento de Engenharia Elétrica - DEE , 18 de março de 2015.

Nicolau Kellyano Leite Dantas

ANÁLISE DE ALGORITMOS DE SINCRONIZAÇÃO PARA CONVERSORES ESTÁTICOS DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Campina Grande, Brasil, 18 de março de 2015:

Edgar Roosevelt Braga Filho
Orientador

Leimar de Oliveira
Convidado

Campina Grande, Brasil
18 de março de 2015

Este trabalho é dedicado à minha família, em especial ao meu avô Domingos Viana Maia e a minha mãe Maria Aparecida Leite.

Agradecimentos

Os agradecimentos deste trabalho são direcionados:

- A Deus pela existência, perseverança e força para enfrentar os desafios;
- Ao meu avô Domingos Viana Maia e a minha mãe Maria Aparecida Leite, exemplos de trabalho, honestidade e dedicação;
- À minha família, pelo apoio em tudo que fiz e em todas as decisões importantes da minha vida;
- Ao professor Edgar Roosevelt Braga Filho, pela orientação, confiança, e por estar sempre a disposição para qualquer dúvida;
- A todos os amigos e colegas conquistados nestes cinco anos de curso e durante a vida;
- A todos os professores e a todas as pessoas anônimas que, de forma direta ou indireta, fizeram parte da minha formação.

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá."

Ayrton Senna

Resumo

Nos sistemas de geração de energia elétrica baseados em fontes primárias do tipo eólica e fotovoltaica, comumente são utilizados conversores estáticos de potência para a interligação direta a rede elétrica de energia. Estes conversores são responsáveis pelo processamento da energia adequando-a as características da rede elétrica para a qual a mesma será fornecida. Para que os conversores possam operar com desempenho satisfatórios, os mesmos deverão ser bem projetados e precisamente controlados. No tocante ao controle, a sincronização em um sistema trifásico se coloca como um procedimento de grande impacto na operação com desempenho e segurança dos conversores conectados a rede elétrica. As técnicas mais utilizadas para sincronização em sistemas trifásicos são baseadas em PLL's. Neste trabalho é apresentado um estudo detalhado sobre diferentes estruturas de PLL's que utiliza os conceitos de transformação de coordenadas para detectar e rastrear a frequência e o ângulo de fase das tensões ou correntes do sistema trifásico. Resultados de simulações para condições ideais e não ideais de rede são apresentados para a análise do comportamento de cada estrutura de PLL em diferentes condições a que a rede elétrica pode estar submetida.

Palavras-chave: Conversores estáticos, eficiência energética, geração distribuída, PLL's.

Abstract

In electrical energy generation systems based on primary sources, such as wind or photovoltaic energy, static power converters are commonly used to connect directly to the electrical grid. These converters are responsible for the energy processing, adjusting it and delivering to the electrical grid. In order to get the converters to have satisfactory performance, these converters must be well projected and precisely controlled. When it refers to controlling, the synchronization in a three-phase system is very important to safe and well-performed operation in grid connected applications. The most used techniques in three-phase synchronization are based on PLL's. In this academic work, it is presented a detailed study about different PLL structures that are based on coordinate transformation concepts to detect and track the frequency and the phase angle of the three-phase system voltages or electrical currents. Simulation results in ideal and non-ideal conditions are presented in order to analyze the behavior of each PLL structure in different conditions to which the grid may be submitted.

Key-words: Static Power Converters, Energy efficiency, Distributed Energy generation, PLL's.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sinal de tensão trifásica com presença de harmônicos.	5
Figura 2 – Afundamento de tensão no sistema trifásico.	8
Figura 3 – Tensão trifásica desequilibrada.	10
Figura 4 – Estrutura básica de um PLL.	13
Figura 5 – Diagrama de blocos básico do SRF - PLL.	16
Figura 6 – Modelo linearizado do SRF - PLL no domínio da frequência.	18
Figura 7 – Diagrama de Bode do sistema em malha aberta para $w_n = 4.3538$ e $\zeta = 0.0442$	20
Figura 8 – Diagrama de Bode do sistema em malha fechada para $w_n = 4.3538$ e $\zeta = 0.0442$	20
Figura 9 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada para $w_n = 4.3538$ e $\zeta = 0.0442$	21
Figura 10 – Lugar das raízes do sistema em malha fechada para $w_n = 4.3538$ e $\zeta = 0.0442$	21
Figura 11 – Diagrama de blocos básico do q - PLL.	22
Figura 12 – Modelo linearizado do q - PLL no domínio da frequência.	24
Figura 13 – Diagrama de blocos básico do q - PLL com condição inicial de frequência.	25
Figura 14 – Esquema do SRF - PLL no Simulink/Matlab.	26
Figura 15 – Esquema do q - PLL no Simulink/Matlab.	27
Figura 16 – Sinal de entrada com tensões equilibradas, onde V_a , V_b e V_c representam as amplitudes das fases a, b e c.	28
Figura 17 – Saídas dos PLL's para condições ideais da rede. A partir do ângulo de fase(preto) uma onda senoidal é criada(azul) e sincronizada ao sinal de referência V_a (vermelho).	28
Figura 18 – Saídas dos PLL's da Figura 17 ampliada em um cruzamento de sinais.	29
Figura 19 – Sinais de entrada com tensões desequilibradas.	29
Figura 20 – Saídas dos PLL's para sinais de entrada com tensões desequilibradas. A partir do ângulo de fase(preto) uma onda senoidal é criada(azul) e sincronizada ao sinal de referência V_a (vermelho).	30
Figura 21 – Saídas dos PLL's da Figura 20 ampliada em um cruzamento de sinais.	30
Figura 22 – Sinais de entrada com a presença do 5º e 7º harmônico.	31
Figura 23 – Saídas dos PLL's para sinais de entrada com presença de harmônicos. A partir do ângulo de fase(preto) uma onda senoidal é criada(azul) e sincronizada ao sinal de referência V_a (vermelho).	31
Figura 24 – Saídas dos PLL's da Figura 23 ampliada em um cruzamento de sinais.	31
Figura 25 – Sinais de entrada com redução de 30% da amplitude.	32

Figura 26 – Saídas dos PLL's para sinais de entrada com afundamento de tensão. A partir do ângulo de fase(preto) uma onda senoidal é criada(azul) e sincronizada ao sinal de referência V_a (vermelho).	33
Figura 27 – Saídas dos PLL's da Figura 26 ampliada em um cruzamento de sinais.	33

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores de referência. Fonte: Retirado de (1).	6
Tabela 2 – Nomes das variáveis. Fonte: Retirado de (1).	7
Tabela 3 – Limites de distorção harmônica total. Fonte: Retirado de (2).	8
Tabela 4 – Classificação das variações de tensão de curta duração. Fonte: Retirado de (1).	9

Lista de abreviaturas e siglas

PLL	Phase Locked Loop
SRF	Synchronous Reference Frame
GD	Geração Distribuída
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>DTT</i>	Distorção Harmônica Total da Tensão
<i>DIT_h</i>	Distorção Harmônica Individual Total
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
<i>THD</i>	Distorção Harmônica Total
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
ATT	Afundamento Temporário de Tensão
<i>FD</i>	Fator de Desequilíbrio
VCO	Oscilador Controlado por Tensão
pu	Sistema por Unidade

Lista de símbolos

v	Vetor tensão trifásico
θ	Ângulo de fase
w_{ff}	Referência da frequência angular da rede
w	Frequência da rede
ζ	Fator de amortecimento
w_n	Frequência natural do sistema
$i_{\alpha\beta}$	Vetor corrente no sistema referencial estacionário
$v_{\alpha\beta}$	Vetor tensão no sistema referencial estacionário
v_{qd}	Vetor tensão no sistema referencial girante síncrono

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	3
3	DISTÚRBIOS ASSOCIADOS À QUALIDADE DE ENERGIA ELÉ- TRICA	5
3.1	Distorção Harmônica	5
3.1.1	Normas da ANEEL	6
3.1.2	Recomendações Técnica IEEE-519-1992	7
3.2	Afundamentos de Tensão	8
3.2.1	Normas da ANEEL	9
3.2.2	Recomendações Técnicas do IEEE 1159-1995	10
3.3	Desequilíbrios de Tensão	10
3.3.1	Normas da ANEEL	11
3.3.2	Recomendações Técnicas do IEEE 519 - 1992	11
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
4.1	PLL (Phase Locked Loop)	13
4.2	Transformação de Clarke	14
4.3	Transformação de Park	15
5	CIRCUITO PLL BASEADO NO SISTEMA DE COORDENADAS SÍNCRONO	16
5.1	Princípios Operacionais do SRF - PLL	16
5.2	Projeto dos Ganhos do Controlador PI	18
5.2.1	Análise de estabilidade e resposta dinâmica	19
6	CIRCUITO PLL BASEADO NA TEORIA DAS POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA INSTANTÂNEAS (TEORIA PQ)	22
6.1	Princípios Operacionais do q - PLL	22
7	RESULTADOS DE SIMULAÇÕES	26
7.1	Condições Ideais de Rede	28
7.2	Desequilíbrio de Tensão	29
7.3	Distorções Harmônicas	30
7.4	Afundamentos de Tensões	32

8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
	Referências	35

1 Introdução

A utilização de sistemas de geração de energia elétrica, baseados em fontes de energia alternativa, cada vez mais tem sido integrados aos sistemas de geração de energia elétrica de vários países. Esse crescimento ocorre devido aos benefícios técnicos e econômicos que esse tipo de sistema fornece. Como exemplos desses benefícios pode-se citar:

- minimizar a necessidade de implantação de redes de transmissão;
- redução da emissão de poluentes.

Nos sistemas baseados em fontes primárias do tipo eólica e fotovoltaica, comumente são utilizados conversores estáticos de potência para a interligação direta a rede elétrica de energia. Para a adequada operação deste dispositivo, dentre outros requisitos, é necessário rastrear a fase da componente fundamental de sinais de tensões e/ou correntes. Há na literatura vários trabalhos de estudos de algoritmos com função de detectar a fase do sinal. Para a estimativa desse ângulo existem métodos diretos, de malha aberta, e os métodos de malha fechada conhecidos como PLL's.

O PLL (Phase Locked Loop) é um sistema de sincronização cuja função é gerar um sinal de sincronismo em fase com o sinal da componente fundamental do sinal de entrada (3). Os requisitos de desempenho de um PLL são o erro de fase em regime permanente, a velocidade de resposta a distúrbios de frequência, fase e amplitude das tensões de entrada, a imunidade a harmônicos e no caso trifásico a imunidade ao desbalanceamento de fases. Logo o circuito PLL deve ser capaz de determinar o ângulo de fase do sinal mesmo para diversas distorções presentes no sistema elétrico.

Nos sistemas trifásicos, além da detecção das informações de amplitude e ângulo de fase de cada fase, é necessário analisar o deslocamento angular entre as fases, bem como a sequência das mesmas. Em aplicações de sistemas de potência, algoritmos de PLL's trifásicos têm como objetivo detectar a fase e as sequências positivas e negativas do sinal, por isso eventualmente nas saídas dos PLL's trifásicos apresentam blocos detectores de sequência positiva e negativa.

As técnicas mais utilizadas para sincronização em sistemas trifásicos são baseadas em PLL's. Neste trabalho é apresentado dois modelos de PLL's. Cada um dos modelos tem características diferentes de implementação: o primeiro modelo é o SRF - PLL (Synchronous Reference Frame PLL) que transforma o vetor tensão trifásico do referencial trifásico abc para o referencial girante dq. O segundo modelo é o q - PLL que é baseado na teoria de potências ativa e reativa instantânea. Para analisar os desempenhos dos

PLL's em estudo são apresentados resultados de simulações do funcionamento para condições ideais e não ideais de rede, para este último caso as simulações são realizadas na presença de distúrbios ocorridos por distorções harmônicas, afundamentos de tensões e desequilíbrio de tensão no sinal.

2 Qualidade de Energia Elétrica

As questões relacionadas à conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica podem ser divididas em aspectos técnicos e aspectos de normas e regulações. Em relação às normas e regulações, a geração fotovoltaica está submetida às resoluções sobre geração distribuída (GD) e geração elétrica convencional.

Com a expansão do sistema de geração de energia a partir da interconexão da GD com a rede elétrica faz-se necessário o estabelecimento de um conjunto de padrões e normas técnicas que favoreça a manutenção da qualidade de energia e da confiabilidade da rede. As normas técnicas voltadas para conexão da GD com a rede elétrica trazem diversos benefícios tanto para as concessionárias quanto para os produtores de energia.

São diversos os parâmetros elétricos analisados pelas normas, como exemplos, pode-se citar faixa de variação da tensão e frequência, níveis máximos de harmônicos de tensão e corrente, sistemas de proteção, dentre outros.

A crescente percepção e mediatização dos problemas da qualidade da energia elétrica (QEE) e o seu potencial impacto na competitividade das empresas, exige um maior esclarecimento de todas as partes com responsabilidades no setor elétrico, desde o produtor até ao utilizador final, passando pelo operador de rede, fabricantes de equipamento, bem como pelas entidades governamentais e de regulação.

A qualidade de energia elétrica é um tema que tem sido abordado com bastante preocupação no cenário de distribuição de energia elétrica. Neste cenário, consumidores e concessionárias de energia dividem responsabilidades que são pontuadas por normas específicas. De acordo com (4) um problema de qualidade de energia é definido como um desvio de tensão, corrente ou frequência, que resultem em falha ou mau funcionamento de equipamento. Alguns dos principais distúrbios associados à qualidade de energia são apresentados abaixo:

- distorção harmônica;
- elevação de tensão;
- afundamentos de tensão;
- ruídos;
- flutuação de tensão;
- desequilíbrio de tensão;
- variação de frequência.

Dentre as principais categorias de distúrbios que degradam a qualidade de energia elétrica é dada ênfase nesse trabalho a distorção harmônica, afundamentos de tensão e desequilíbrio de tensão.

3 Distúrbios Associados à Qualidade de Energia Elétrica

3.1 Distorção Harmônica

A qualidade da energia elétrica vem sofrendo uma contínua e crescente deterioração em razão do aumento das componentes harmônicas oriundas de cargas não lineares. O avanço da Eletrônica de Potência e a diminuição dos custos de fabricação contribuíram para o aumento do número de equipamentos como Soft-Starters, Inversores, dentre outros, sendo que esses equipamentos somados às pontes retificadoras são os maiores geradores de distorção harmônica no meio industrial (5).

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

Quando presentes, os harmônicos somam-se a componente fundamental e distorcem o sinal senoidal. A Figura 1 ilustra um exemplo de distorção harmônica de tensão, ocasionada pela presença da 5^a, 7^a e 11^a harmônica.

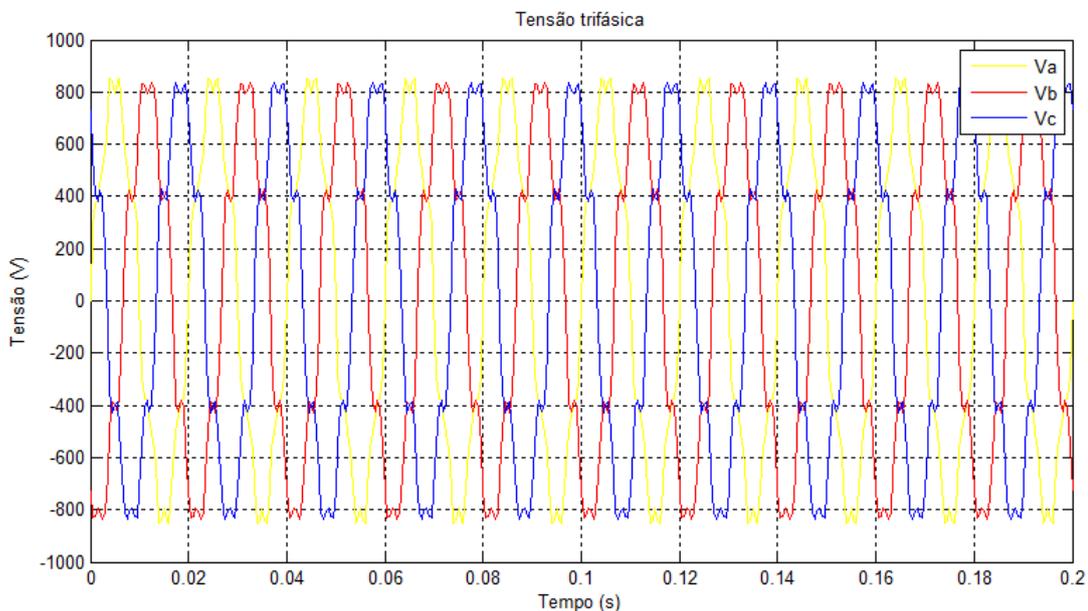


Figura 1 – Sinal de tensão trifásica com presença de harmônicos.

O gráfico da Figura 1 apresenta a forma de onda distorcida resultante da soma das componentes harmônicas ao sinal da componente fundamental, onde a frequência da fundamental é de 50 Hz.

No intuito de reduzir e controlar os impactos causados pela poluição harmônica no sistema de distribuição, entidades como o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) procuram propor recomendações técnicas e normas estabelecendo limites para a distorção harmônica. A principal finalidade desse tópico é apresentar as normas e resoluções referentes à distorção harmônica em redes elétricas de distribuição.

3.1.1 Normas da ANEEL

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no documento "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, modulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica" propõe valores limites para a distorção harmônica da tensão no sistema de distribuição.

Pode-se ver na Tabela 1 os valores de referência globais para as distorções harmônicas totais de tensão.

Tabela 1 – Valores de referência. Fonte: Retirado de (1).

Tensão nominal do barramento	Distorção harmônica total de tensão
$V_N \leq 1kV$	10%
$1kV < V_N \leq 13.8kV$	8%
$13.8kV < V_N \leq 69kV$	6%
$69kV < V_N \leq 230kV$	3%

Para o cálculo da distorção harmônica total da tensão ($DTT\%$) e distorção harmônica individual de tensão de ordem h ($DIT_h\%$) são utilizadas as expressões 3.1 e 3.2.

$$DIT_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad (3.1)$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (3.2)$$

Pode-se ver na Tabela 2 os nomes referentes a cada variável.

Tabela 2 – Nomes das variáveis. Fonte: Retirado de (1).

Identificação da grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT_h %
Distorção harmônica total de tensão	DTT %
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	H
Ordem harmônica máxima	h_{max}
Ordem harmônica mínima	h_{min}
Tensão fundamental medida	V_1

3.1.2 Recomendações Técnica IEEE-519-1992

A recomendação IEEE - 519 - 1992 (2) produzida pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), estabelece limites de distorção harmônica. Os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no ponto de acoplamento comum (PAC). A ideia fundamental é que não interessa ao sistema de distribuição o que ocorre em uma determinada instalação, mas sim a influência desta nos demais consumidores conectados ao sistema (5).

A Tabela 3 apresenta limites de distorção harmônica total para diferentes tensões medidas no PAC. O conceito de distorção harmônica total (THD) pode ser aplicado no cálculo da tensão ou da corrente. Para o caso da distorção harmônica total da tensão o cálculo é definido pela expressão 3.3.

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\% \quad (3.3)$$

onde:

V_h - amplitudes das componentes harmônicas individuais (valor eficaz);

h - ordem das harmônicas;

V_n - tensão fundamental medida (valor eficaz).

Tabela 3 – Limites de distorção harmônica total. Fonte:
Retirado de (2).

Tensão no barramento no PAC (V_n)	Distorção harmônica total da tensão
$V_n \leq 69kV$	5%
$69kV < V_n \leq 161kV$	2.5%
$V_n > 161kV$	1.5%

3.2 Afundamentos de Tensão

O afundamento de tensão é um dos mais importantes distúrbios que afetam a qualidade de energia elétrica (QEE), sendo responsável por maior parte dos prejuízos financeiros relatados pela indústria quando o assunto em discussão é QEE. De acordo com a ANEEL no documento PRODIST (1) o afundamento de tensão cai na categoria de variação de tensão de curta duração que tem por definição desvios significativo no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. A Figura 2 ilustra um exemplo de um afundamento de tensão no sistema trifásico.

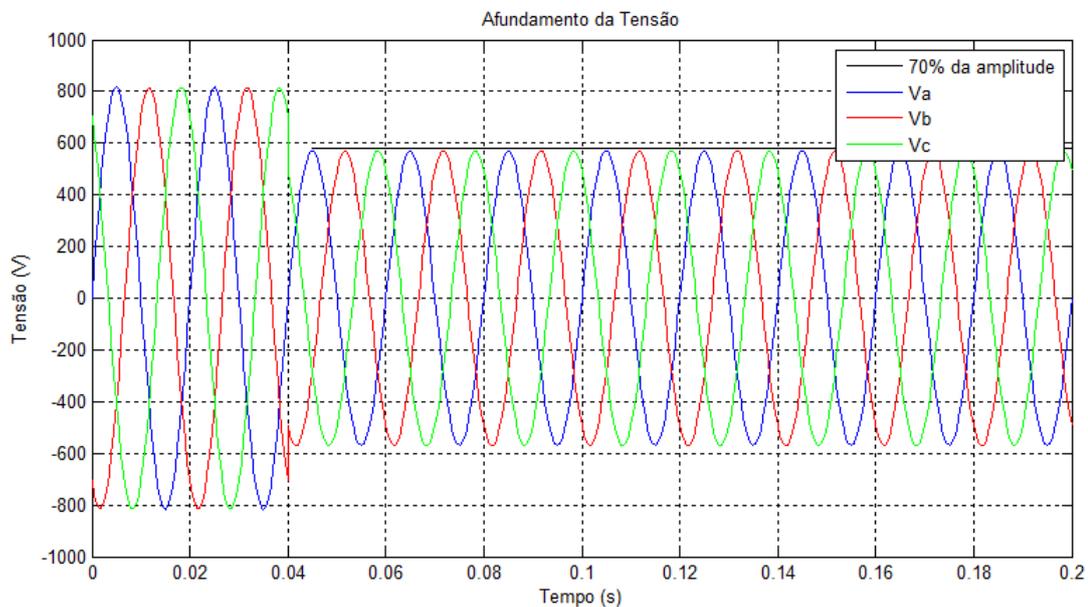


Figura 2 – Afundamento de tensão no sistema trifásico.

Afundamentos de tensão, são tipicamente causados por faltas em algum lugar do sistema. O afundamento ocorre sobre uma área significativa enquanto a falta estiver mantida na rede. Tão logo a falta seja removida pelo sistema de proteção, a tensão retorna ao normal na maior parte do sistema, exceto na linha específica ou seção da rede que estiver com defeito (6).

A seguir serão apresentadas normas e resoluções referentes a afundamentos de tensão em redes elétricas de distribuição.

3.2.1 Normas da ANEEL

De acordo com o PRODIST - modulo 8 da ANEEL, o afundamento de tensão é considerado uma Variação de tensão de curta duração e pode ser dividida em dois tipos:

- AMT - Afundamento Momentâneo de Tensão: É um decréscimo entre 0.1 e 0.9 pu do valor eficaz da tensão nominal, com duração entre 1 ciclo e 3 segundos.
- ATT - Afundamento Temporário de Tensão: É um decréscimo entre 0.1 e 0.9 pu do valor eficaz da tensão nominal, com duração entre 3 segundos a 1 minuto.

As variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação das variações de tensão de curta duração. Fonte: Retirado de (1).

Classificação	Denominação	Duração da variação	Amplitude da tensão
Variação momentânea de tensão	Interrupção momentânea de tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0.1 pu
	Afundamento momentâneo de tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0.1 e inferior a 0.9 pu
	Elevação momentânea de tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1.1 pu
Variação temporária de tensão	Interrupção temporária de tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0.1 pu
	Afundamento temporário de tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0.1 e inferior a 0.9 pu
	Elevação temporária de tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1.1 pu

3.2.2 Recomendações Técnicas do IEEE 1159-1995

Segundo a norma do IEEE 1159 - 1995, os afundamentos de tensão é um decréscimo entre 0.1 e 0.9 pu do valor eficaz da tensão nominal. Dependendo da duração, essas variações podem ser consideradas instantâneas (0.5 a 30 ciclos), momentâneas (30 ciclos a 3 segundos) ou temporárias (3 segundos a 1 minuto). Caso a tensão caia abaixo de 0.1 pu, considera-se a ocorrência de interrupção de tensão.

3.3 Desequilíbrios de Tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. Essas alterações são definidas na literatura como:

- tensões com amplitudes diferentes por fases;
- defasagem angular entre as fases diferentes de 120° elétricos;
- ou ainda quando ocorrem as duas condições simultaneamente citadas acima.

A Figura 3 ilustra um exemplo de desequilíbrio de tensão, onde as amplitudes por fase são diferentes.

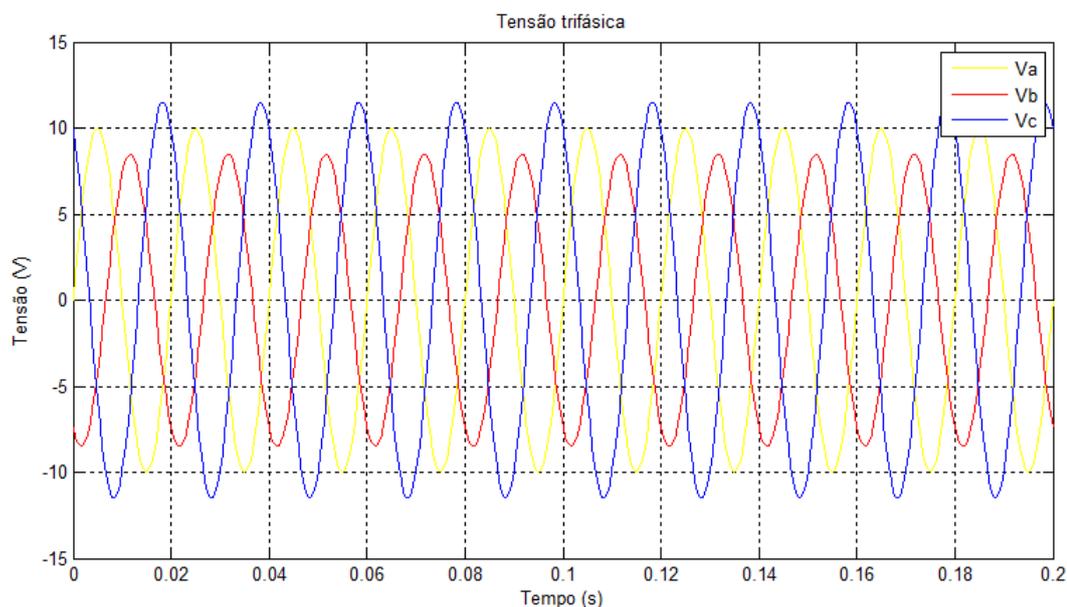


Figura 3 – Tensão trifásica desequilibrada.

Sabe-se que a presença de cargas trifásicas desequilibradas conectadas a um sistema trifásico causa um desequilíbrio de tensão, uma vez que as correntes absorvidas nas três fases não são simétricas, isto é, não são iguais em módulo nem tão pouco defasadas de

120°. Outro fator que provoca o aparecimento do desequilíbrio de tensão é a existência de linhas de transmissão mal transpostas, pois as características elétricas destas linhas não serão uniformes no seu percurso.

Os efeitos provocados por um sistema elétrico com a presença de desequilíbrios de tensão estão associados a sobreaquecimentos, mau funcionamento e/ou falhas dos dispositivos de proteção e redução da vida útil dos equipamentos.

3.3.1 Normas da ANEEL

O desequilíbrio de tensão é tratado pelo modulo - 8 do PRODIST elaborado pela ANEEL, e seu cálculo é realizado de acordo com a expressão 3.4 abaixo.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (3.4)$$

onde:

FD - fator de desequilíbrio;

V_- - magnitude de tensão de sequência negativa (RMS);

V_+ - magnitude de tensão de sequência positiva (RMS).

Alternativamente, pode-se utilizar a expressão abaixo, que conduz a resultados em consonância com a formulação anterior:

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (3.5)$$

sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (3.6)$$

onde V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são magnitudes das tensões trifásicas de linha (RMS).

O valor de referência para o fator de desequilíbrio (FD) estabelecido pela ANEEL é de 2%. Esse valor serve para referência do planejamento elétrico em termos de QEE.

3.3.2 Recomendações Técnicas do IEEE 519 - 1992

Segundo o IEEE o fator de desequilíbrio de tensão (FD) pode ser obtido por uma relação que expressa a maior diferença entre as tensões de linhas medidas e o somatório das mesmas. A equação 3.7 abaixo mostra como o cálculo é realizado.

$$FD\% = \frac{3(V_{max} - V_{min})}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}} \times 100 \quad (3.7)$$

onde:

V_{max} - maior valor dentre os módulos das tensões trifásicas;

V_{min} - menor valor dentre os módulos das tensões trifásicas;

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} - Módulo das tensões de linha trifásicas.

De acordo com IEEE - 519 - 1992, o valor de referência para o fator de desequilíbrio (FD) é limitado em 2%, valores superiores a esse pode afetar equipamentos elétricos.

4 Fundamentação Teórica

Nesta unidade serão apresentados conceitos teóricos sobre PLL, transformação de Clarke e transformação de Park. Esses conceitos são de fundamental importância para a implementação dos algoritmos de sincronização trifásico apresentado neste trabalho.

4.1 PLL (Phase Locked Loop)

O PLL (Phase Locked Loop) é um sistema de sincronização cuja função é gerar um sinal de sincronismo em fase com o sinal da componente fundamental do sinal de entrada (3).

Existem diversos tipos de algoritmos de PLL's. Na Figura 4 é ilustrado uma configuração em blocos proposta por (7) onde é apresentada uma estrutura básica desse tipo de sistema.

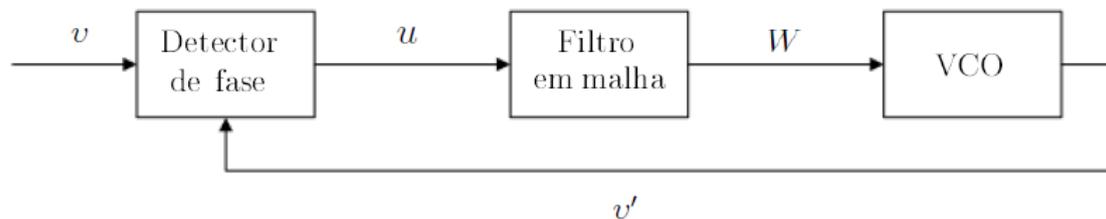


Figura 4 – Estrutura básica de um PLL.

- Detector de fase - Tem como função a geração de um sinal de erro proporcional à diferença de fase entre o sinal de entrada, v e o sinal gerado internamente pelo PLL, v' .
- Filtro em malha - Este bloco apresenta uma característica de filtragem com função de remover distúrbios indesejáveis que possam afetar o comportamento do VCO. Tipicamente, este bloco é constituído por um filtro passa baixa de primeira ordem ou um controlador PI.
- Oscilador Controlado por Tensão (VCO) - Gera um sinal de saída, cuja frequência varia em torno de uma frequência central w_c de acordo com a saída do filtro em malha.

4.2 Transformação de Clarke

A transformação de Clarke é uma operação linear de grande utilidade para simplificação e o aumento de robustez de sistemas PLL trifásicos (3). Esta operação consiste de uma transformação matricial de tensões ou correntes trifásicas do referencial cartesiano abc para o referencial estacionário $\alpha\beta 0$.

As equações 4.1 e 4.2 representam a transformação direta e inversa de Clarke para um sistema trifásico de tensões na sequência abc .

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Uma vantagem de se aplicar a transformação de Clarke é separar a componente de sequência zero das componentes trifásicas abc . Como os eixos α e β não contribuem para a componente de sequência zero, se o sistema trifásico de tensões for equilibrado a mesma pode ser eliminada das operações matriciais.

As equações 4.3 e 4.4 abaixo representa uma forma reduzida da transformação direta e inversa de Clarke para o caso de sistema trifásico com tensões equilibradas.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Observa-se a respeito da transformação de Clarke que:

- a operação matricial de transformação para as componentes $\alpha\beta 0$ varia de acordo com o tipo de sequência a ser transformada.
- assim como ocorre com a representação em abc com vetores unitários, os valores instantâneos representados nos dois eixos estacionários, quando somados, apresentam um fasor em módulo constante e que gira na frequência da rede trifásica que foi transformada (3).

- as componentes de Clarke estarão defasadas de 90° para todos os valores instantâneos transformados das componentes em abc .
- as operações matriciais também são válidas para as correntes do sistema trifásico adotado.

4.3 Transformação de Park

A transformação de Park consiste em converter um sistema do referencial estacionário $\alpha\beta 0$ em um sistema de referencial girante síncrono $dq0$, cujas componentes resultantes são quantidades contínuas. O sincronismo é obtido garantindo que as componentes $dq0$ girem a velocidade angular igual à frequência presente na rede.

As equações 4.5 e 4.6 representam a forma reduzida da transformação direta e inversa de Park na ausência da componente de sequência zero da tensão.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta') & \sin(\theta') \\ -\sin(\theta') & \cos(\theta') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta') & -\sin(\theta') \\ \sin(\theta') & \cos(\theta') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

onde θ' é a posição angular do referencial girante dq .

A operação matricial de transformação para as componentes dq varia de acordo com o eixo (d ou q) que se deseja estabelecer o sincronismo. Na equação 4.5 acima o sincronismo é obtido com o eixo d .

Para o caso em que a componente de sequência zero da tensão está presente, obtém-se a equação 4.7 referente à transformação direta de Park.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta') & \sin(\theta') & 0 \\ -\sin(\theta') & \cos(\theta') & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

As operações matriciais realizadas acima também são válidas para as correntes do sistema trifásico.

5 Circuito PLL Baseado no Sistema de Coordenadas Síncrono

5.1 Princípios Operacionais do SRF - PLL

O circuito PLL baseado no sistema de coordenadas síncrono (SRF - PLL - Synchronous Reference Frame PLL) utiliza os conceitos de transformação de coordenadas apresentada na seção anterior para detectar e rastrear a frequência e o ângulo de fase de um conjunto de tensões ou correntes de um sistema elétrico trifásico.

A ideia básica do circuito PLL é um sistema de realimentação com um controlador PI de rastreamento do ângulo de fase. Um SRF - PLL transforma o vetor tensão trifásico do referencial trifásico abc para o referencial girante dq , utilizando as transformações de Clarke e de Park. Na Figura 5 é apresentado um modelo do SRF - PLL proposto por (8).

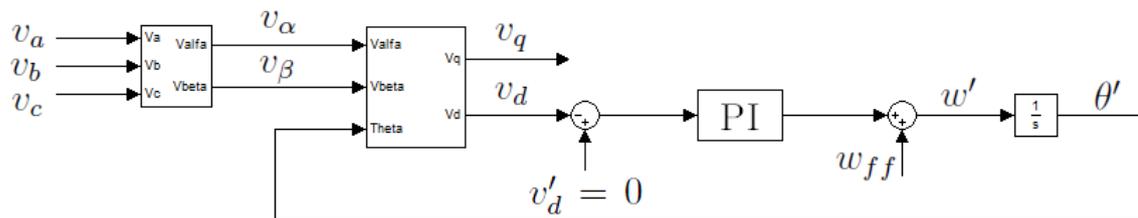


Figura 5 – Diagrama de blocos básico do SRF - PLL.

Tomando um vetor tensão trifásico na frequência fundamental da rede, dado por

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin(\theta) \\ V_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_m \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

onde $\theta = \omega t$. Podemos representar o vetor tensão da expressão 5.1 no referencial estacionário $\alpha\beta$ usando uma forma reduzida da transformação de Clarke, resultando na equação abaixo

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin(\theta) \\ V_m \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

onde a matriz $[T_{\alpha\beta}]$ é representada por

$$[T_{\alpha\beta}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Depois de realizada a transformação, a matriz $[v_{\alpha\beta}]$ representa dois sinais que transportam apenas informações sobre o ângulo de fase de uma das três fases da rede elétrica, neste caso v_α . A transformação $[T_{\alpha\beta}]$ foi escalonada por $2/3$ de modo a detectar a amplitude do sinal de entrada senoidal em vez do módulo do vetor de entrada.

O ângulo de fase θ é rastreado através da sincronização do vetor tensão ao longo do eixo d ou q no referencial cartesiano girante. A transformação entre os referenciais é realizada usando a transformação de Park. Neste trabalho optou por sincronizar o vetor tensão com o eixo q utilizando a matriz de transformação abaixo

$$[T_{qd}] = \begin{bmatrix} \sin(\theta') & \cos(\theta') \\ -\cos(\theta') & \sin(\theta') \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

onde θ' é o ângulo de fase de saída estimado pelo PLL. Realizando a transformação de referenciais temos

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \end{bmatrix} = [T_{qd}] \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\theta - \theta') \\ -V_m \sin(\theta - \theta') \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

A posição angular do referencial dq é controlada pela malha de realimentação que regula a componente d em zero. Se $v_d = 0$, então o vetor tensão é sincronizado ao longo do eixo q e a frequência estimada w' está bloqueada na frequência w do sistema. Isto resulta em um ângulo de fase estimado θ' que é igual ao ângulo de fase θ . No regime a componente q descreverá a amplitude da tensão de entrada senoidal V_m e seu ângulo de fase é determinado pela saída da malha de realimentação θ' .

Quando $\theta' \approx \theta$ tem-se que o argumento da função senoidal da componente v_d torna-se muito pequeno de modo que podemos aproximar v_d para:

$$v_d = -V_m(\theta - \theta') = K(\theta - \theta') \quad (5.6)$$

E a estrutura da Figura 5 pode ser simplificada, como ilustrado na Figura abaixo.

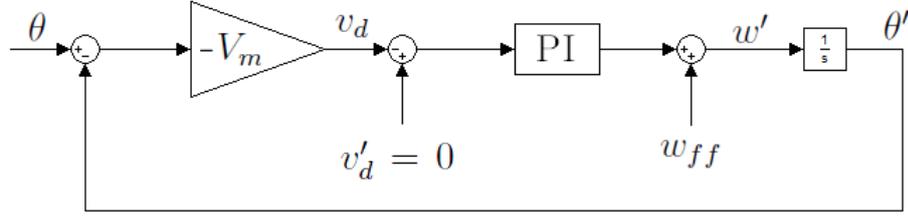


Figura 6 – Modelo linearizado do SRF - PLL no domínio da frequência.

No projeto do filtro de malha (Loop Filter) deve se buscar um bom compromisso entre a filtragem do sinal amostrado e a estabilidade do sistema (9). Neste trabalho optou-se por um controlador PI cuja função de transferência é dada por:

$$H(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (5.7)$$

onde K_p e K_i representam os ganhos do controlador PI.

A razão para adicionar a frequência w_{ff} (referência da frequência angular da rede) na entrada do integrador é acelerar o tempo de reconhecimento do circuito. Ou seja, o circuito integrador inicia o processo em torno de uma frequência central.

5.2 Projeto dos Ganhos do Controlador PI

São os valores dos ganhos do controlador PI que determinam a dinâmica e a eficácia do sistema (10). Por isso, seu projeto deve ser analisado de acordo com as condições nas quais o PLL será aplicado (10).

Existem diversos métodos para projetar o controlador PI com ganhos K_p e K_i . Para este trabalho foi utilizado o método canônico para sistemas de segunda ordem.

O sistema da figura 6 constitui o modelo linearizado do PLL que poderá ser analisado com base na teoria convencional de controle que evidenciam consequências e características de comportamento do PLL decorrentes de ajustes de controladores PI.

Para início da análise do modelo, são escritas as funções de transferência de malha aberta e de malha fechada do sistema, considerando $K = 1$ na equação 5.6 para simplificação dos cálculos temos.

$$H_{ma}(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{1}{s} \right) \quad (5.8)$$

$$H_{mf}(s) = \frac{H_{ma}(s)}{1 + H_{ma}(s)} \quad (5.9)$$

$$H_{mf}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \quad (5.10)$$

Considerando-se as atribuições feitas na equação 5.11, podemos reescrever a equação 5.10 e observar que a mesma é uma típica função de transferência para um sistema de segunda ordem com zero.

$$w_n = \sqrt{K_i}, \quad \zeta = \frac{K_p}{2\sqrt{K_i}} \quad (5.11)$$

$$H_{mf}(s) = \frac{2\zeta w_n s + w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (5.12)$$

Então os ganhos do controlador PI podem ser projetados como:

$$K_p = 2\zeta w_n, \quad K_i = w_n^2, \quad (5.13)$$

onde w_n [rad/s] é a frequência natural do sistema em malha fechada e ζ é o fator de amortecimento (que varia usualmente entre 0 e 1).

Logo conhecendo algumas condições gerais de operação do sistema, pode se prover um bom ajuste para o desempenho desejado.

5.2.1 Análise de estabilidade e resposta dinâmica

Através da ferramenta Matlab R2014b, os diagramas de Bode (resposta em frequência), a resposta ao degrau, e o lugar das raízes foram desenvolvidos com o objetivo de analisar a estabilidade e a dinâmica do sistema PLL em estudo para diferentes condições de projeto.

Os ganhos do controlador PI foram determinados a parti de simulações sucessivas em que se buscou um compromisso entre desempenho de respostas transitórias, estabilidade do sistema e erros de estimação pequenos para todos os testes. Estes ganhos uma vez determinados foram utilizados para os demais testes.

Utilizando o método canônico de segunda ordem, pode se observar o comportamento do sistema nas Figuras 7, 8, 9 e 10, para $w_n = 4.3538$ rad/s e $\zeta = 0.0442$.

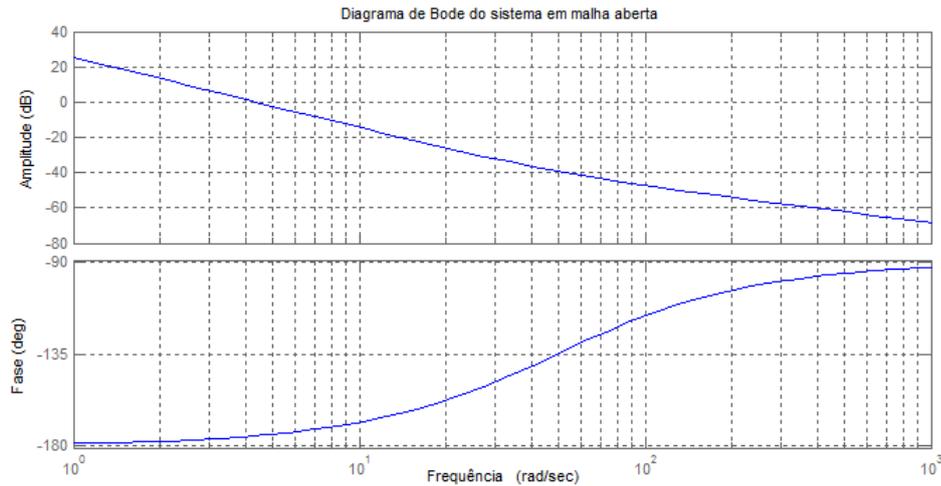


Figura 7 – Diagrama de Bode do sistema em malha aberta para $w_n = 4.3538$ e $\zeta = 0.0442$.

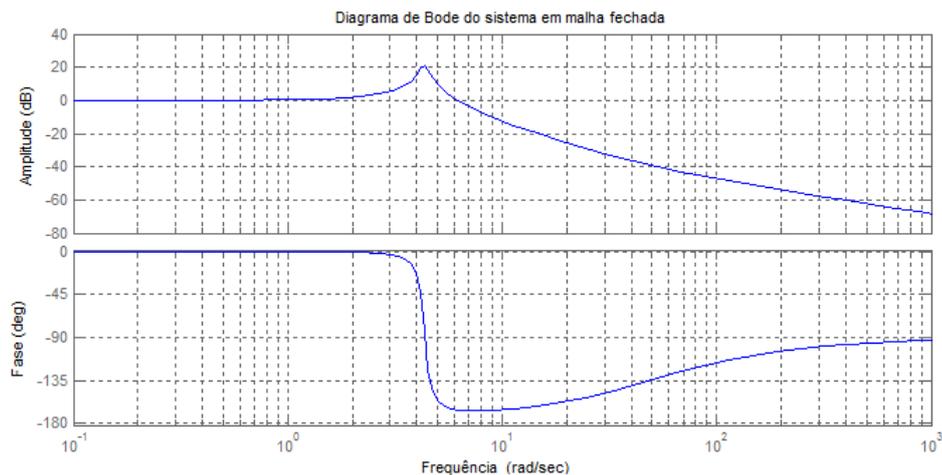


Figura 8 – Diagrama de Bode do sistema em malha fechada para $w_n = 4.3538$ e $\zeta = 0.0442$.

Na Figura 8 pode se observar a característica de filtragem do sistema em seu diagrama de Bode em malha fechada. Para a Figura 9, nota-se que não há erro de regime. Por fim na Figura 10, tem se o lugar das raízes para o sistema, onde se pode perceber a alocação de zeros e pólos próximos a origem. Além disso nota se também a estabilidade do sistema pelo fato de não haver raízes no semiplano direito do gráfico.

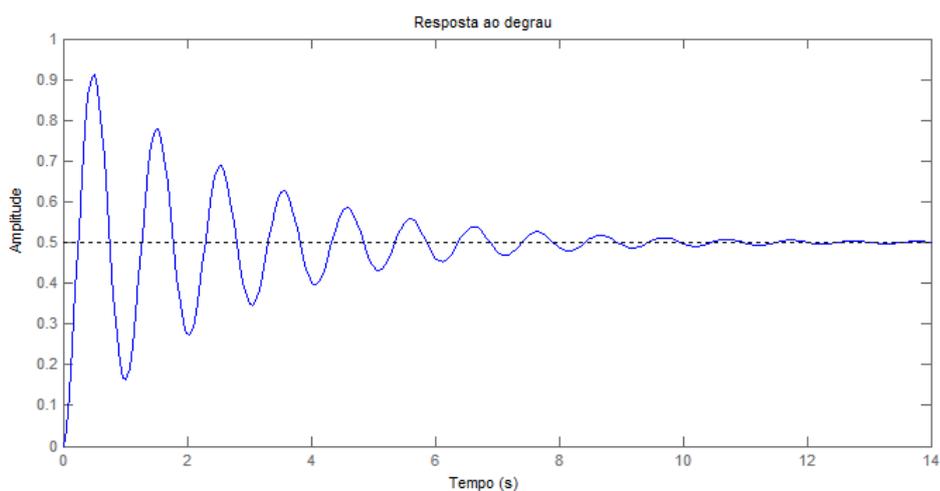


Figura 9 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada para $w_n = 4.3538$ e $\zeta = 0.0442$.

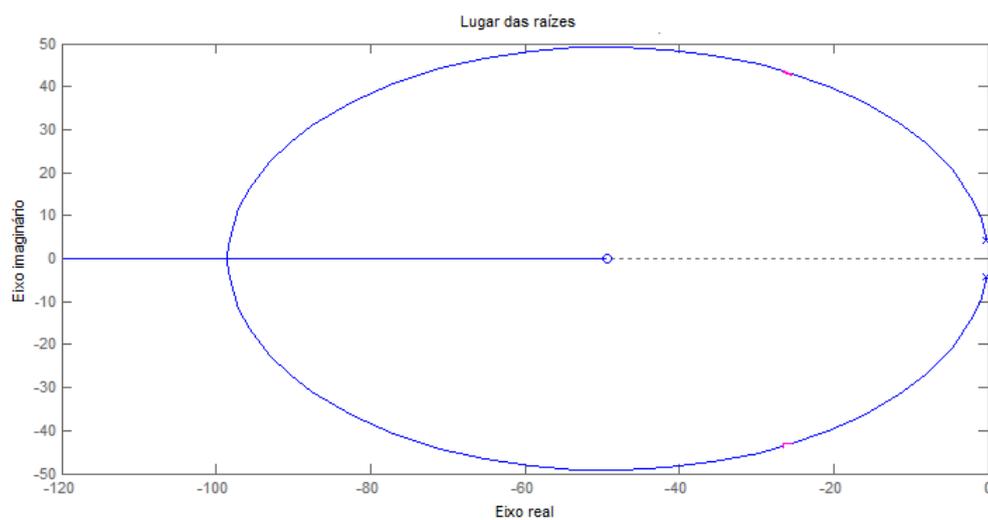


Figura 10 – Lugar das raízes do sistema em malha fechada para $w_n = 4.3538$ e $\zeta = 0.0442$.

6 Circuito PLL Baseado na Teoria das Potências Ativa e Reativa Instantâneas (Teoria pq)

6.1 Princípios Operacionais do q - PLL

O circuito q - PLL é baseado na teoria das potências ativa e reativa instantânea (teoria pq) propostas por (11) e (12). O conceito de potências ativa e reativa instantânea, válido para regime permanente e transitório, assim como para formas de ondas genéricas de tensão e corrente. As definições de potências empregadas na teoria pq são:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

onde,

p - potência real;

q - potência imaginária;

v_α, v_β - tensões no eixo estacionário $\alpha\beta$;

i_α, i_β - correntes no eixo estacionário $\alpha\beta$.

A estrutura do q - PLL é apresentada na Figura 11.

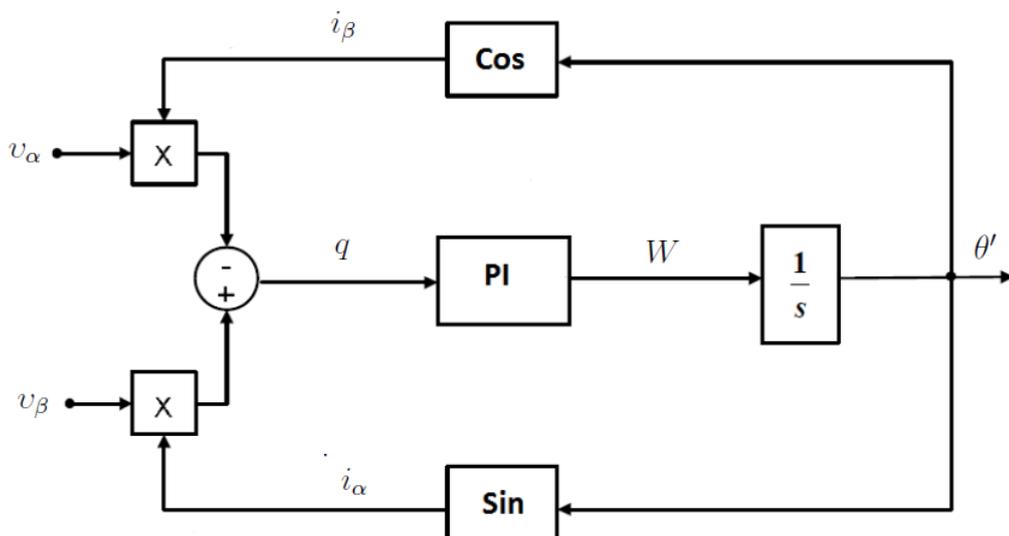


Figura 11 – Diagrama de blocos básico do q - PLL.

Para o filtro de malha deste circuito foi considerado um controlador do tipo proporcional e integral (PI). O VCO é composto de um integrador e dois blocos de funções trigonométricas, um cosseno para a geração do sinal i_β e um seno para a geração do sinal i_α .

O sinal de controle do q - PLL é a potência imaginária dada pela expressão 6.2.

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \quad (6.2)$$

As tensões v_α e v_β do sistema podem conter componentes de sequência positiva e negativa. Os sinais fictícios de corrente gerados pelo q - PLL contêm, em regime permanente, apenas a componente fundamental de sequência positiva. Dessa forma, o valor médio da potência imaginária em regime permanente será nulo, sendo que a presença de sequência negativa e/ou componentes harmônicas nas tensões da rede irão implicar em sinais oscilantes na potência imaginária (4).

Considerando o vetor tensão trifásico equilibrado, com amplitudes unitárias na frequência fundamental da rede, dado pela expressão 6.3 onde $\theta = wt$. Podemos representar o vetor tensão no referencial estacionário $\alpha\beta$ usando uma forma reduzida da transformação de Clarke, resultando na expressão 6.4, onde a matriz $T_{\alpha\beta}$ é dada pela expressão 6.5.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = [T_{\alpha\beta}] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$[T_{\alpha\beta}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Partindo do sinal de controle temos:

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \quad (6.6)$$

$$q = \cos(\theta) \sin(\theta') - \sin(\theta) \cos(\theta') \quad (6.7)$$

$$q = -\sin(\theta - \theta') = K \sin(\theta - \theta') \quad (6.8)$$

Considerando $K = 1$ para simplificar os cálculos, quando $\theta' \approx \theta$ tem-se que o argumento da função senoidal da componente q torna muito pequeno de modo que podemos aproximar q conforme a expressão 6.9.

$$q = (\theta - \theta') \quad (6.9)$$

E a estrutura da Figura 11 pode ser simplificada, como ilustrado na Figura 12.

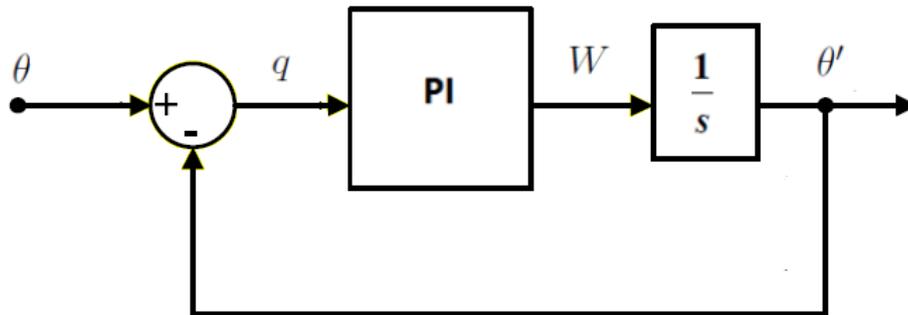


Figura 12 – Modelo linearizado do q - PLL no domínio da frequência.

As características dinâmicas do circuito q - PLL estão fortemente ligadas aos ajustes do filtro de malha, para esse trabalho foi utilizado um controlador PI cujo os ganhos foram projetados utilizando o método canônico para sistemas de segunda ordem conforme mostrado na seção anterior. Para as simulações realizadas nesse trabalho foi utilizado os mesmos ganhos para o controlador PI tanto para as simulações referentes ao circuito SRF - PLL como para as simulações referentes ao circuito q - PLL.

Como a frequência de interesse é conhecida, e que em geral não pode variar de forma significativa, pode utilizar de um artifício simples para acelerar o tempo de reconhecimento do circuito. Considera-se um valor inicial na saída do controlador, ou seja, o circuito integrador inicia o processo em torno de uma frequência central w_{ff} . Assim o circuito da Figura 11 pode ser representado conforme a Figura 13.

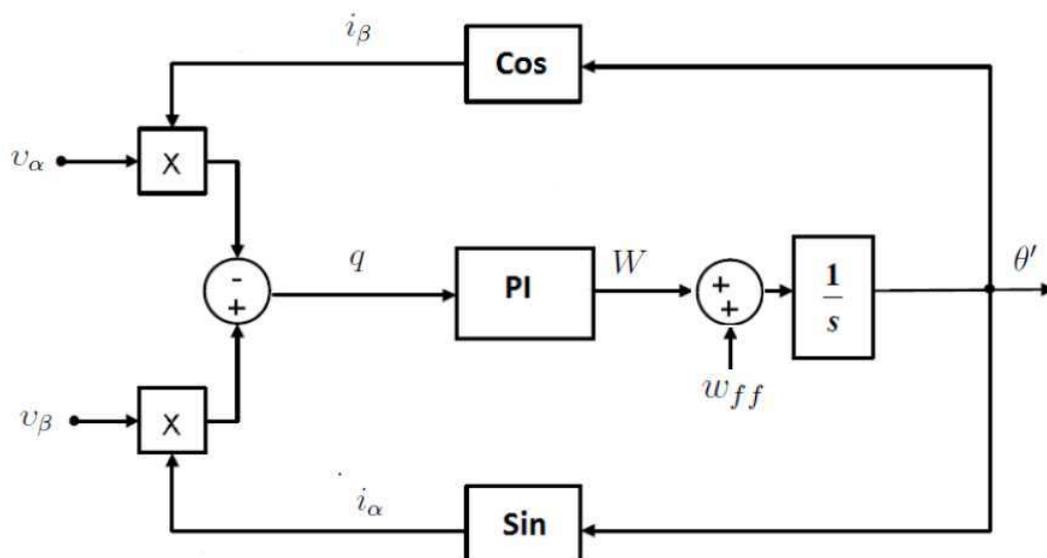


Figura 13 – Diagrama de blocos básico do q - PLL com condição inicial de frequência.

Para essa situação, tem-se que as frequências de entrada e saída do q - PLL são iguais.

7 Resultados de Simulações

Nesta seção serão apresentados resultados obtidos através de simulações dos circuitos de sincronismo SRF - PLL e o q - PLL, para diferentes situações de acordo com as normas do setor elétrico para a geração distribuída (GD). A ferramenta utilizada para a simulação foi o Simulink/Matlab R2014b. Nas Figuras 14 e 15 é mostrado o esquema do SRF - PLL e do q - PLL no simulink/Matlab.

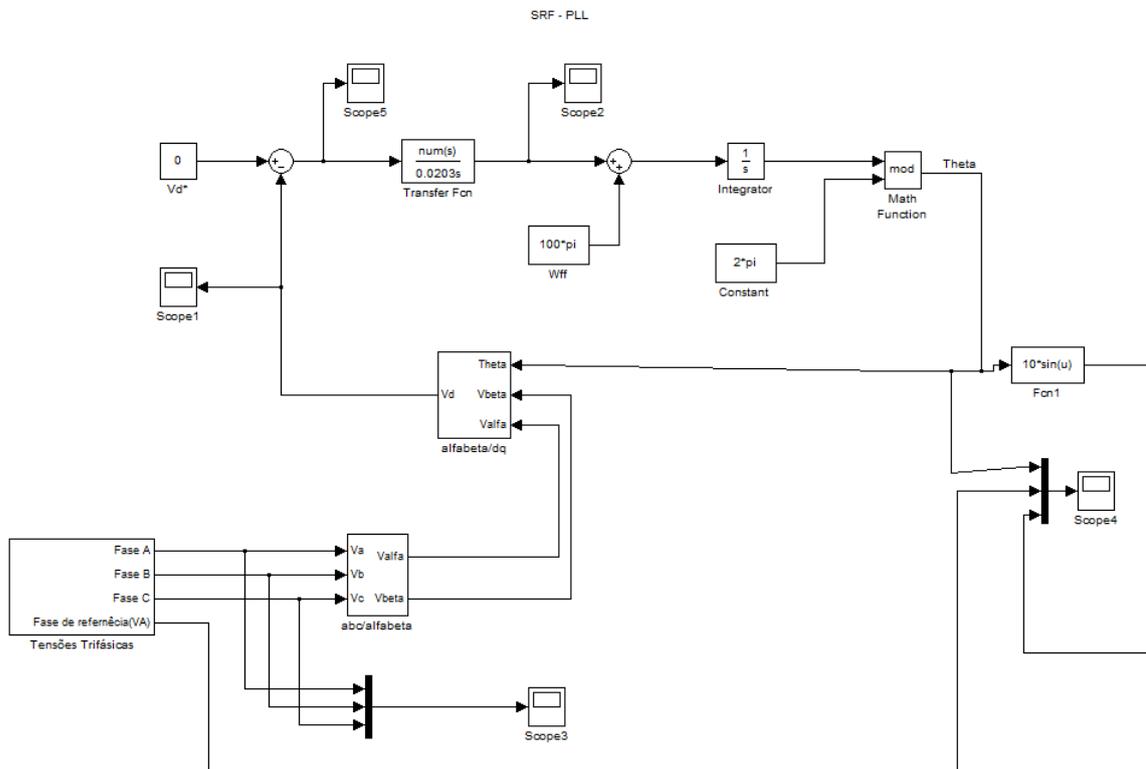


Figura 14 – Esquema do SRF - PLL no Simulink/Matlab.

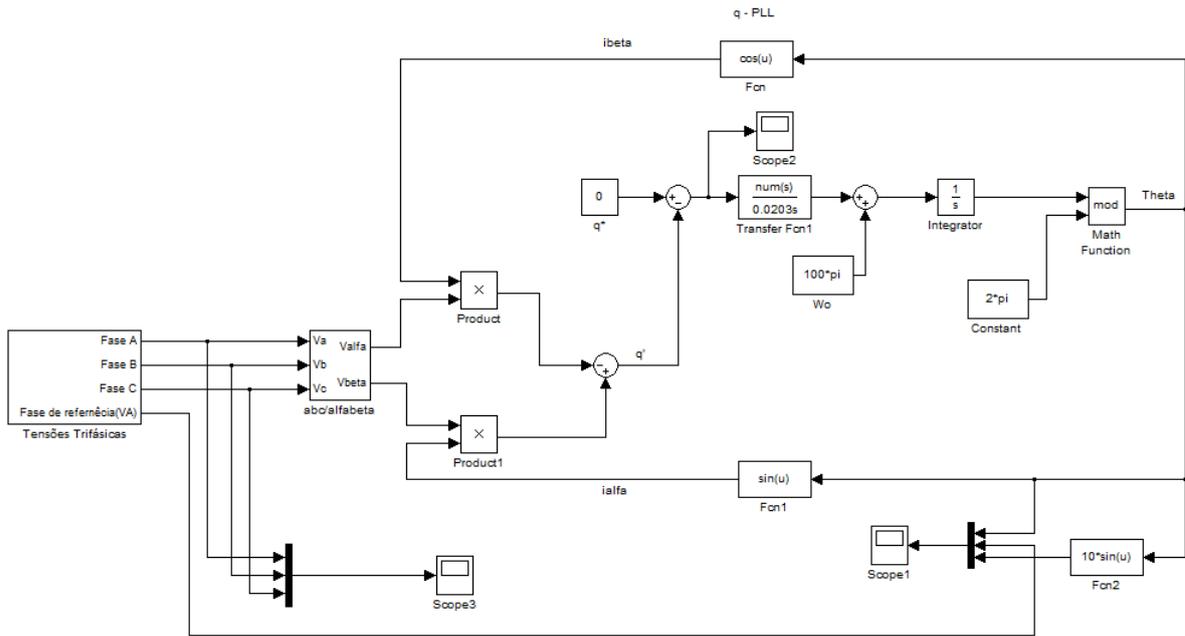


Figura 15 – Esquema do q - PLL no Simulink/Matlab.

Condições nominais de teste:

- amplitude de fase das tensões trifásicas: $V_m = 10V$;
- frequência: $f = 50Hz$;
- fase inicial: 0;
- frequência natural de oscilação: $w_n = 4.3538$;
- fator de amortecimento: $\zeta = 0.0442$;
- tempo de simulação: $t = 0.2s$.

Aplicando os valores de w_n e ζ na equação 5.13 obteremos os ganhos do controlador PI conforme mostrado abaixo. Esses ganhos foram projetados com base nos requisitos de atenuação de sinais oscilatórios e característica de resposta quando o sistema é submetido a uma perturbação de referência.

$$\begin{pmatrix} K_p = 0.3848 \\ K_i = 18.9557 \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

Para as simulações realizadas, foram consideradas as seguintes situações:

- condições ideais de rede, ou seja, as tensões de entrada são equilibradas (mesma amplitude, frequência e defasadas de 120°);
- condições não ideais de rede, quando há presenças de harmônicos, afundamentos de tensões e desequilíbrios de tensões, neste último caso amplitudes diferentes por fase.

7.1 Condições Ideais de Rede

As Figuras 16, 17 e 18 ilustram o resultado da simulação para um sistema trifásico equilibrado. A Figura 16 mostra as tensões da rede elétrica com amplitudes de $10V$ por fase e frequência de $50Hz$.

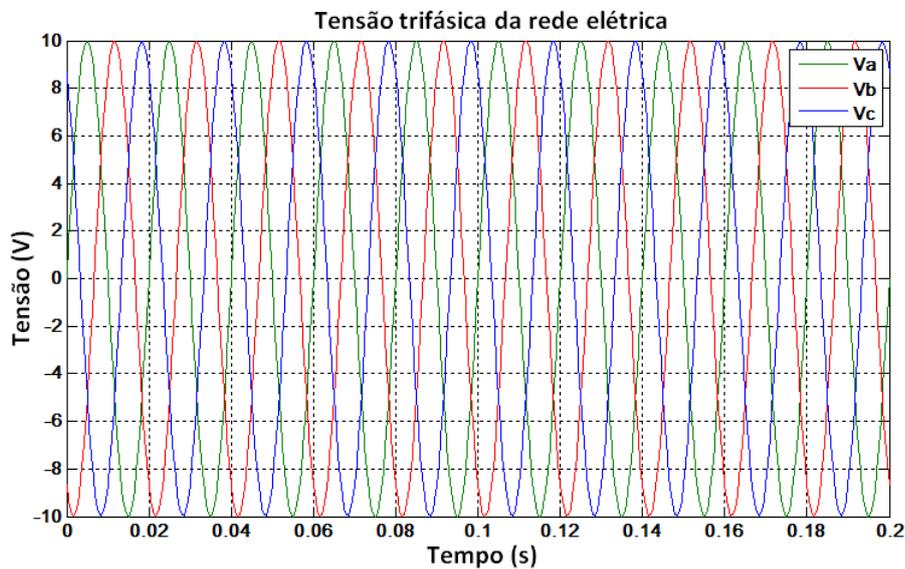


Figura 16 – Sinal de entrada com tensões equilibradas, onde V_a , V_b e V_c representam as amplitudes das fases a, b e c.

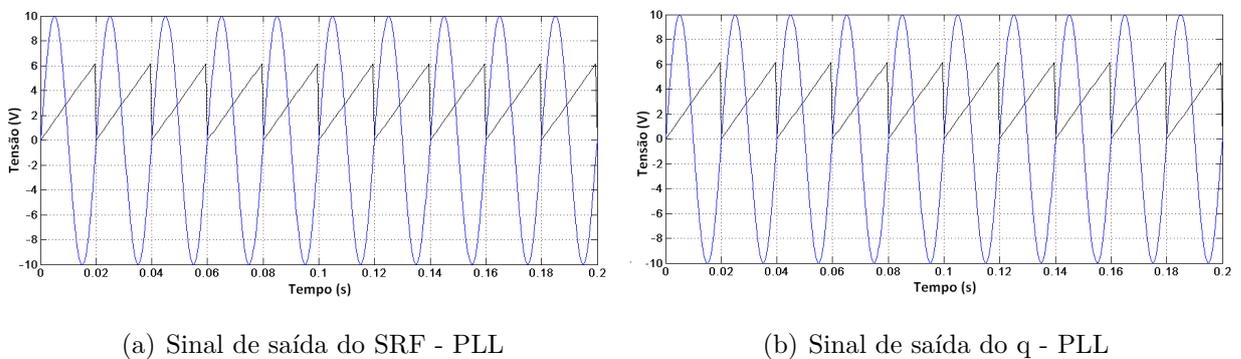
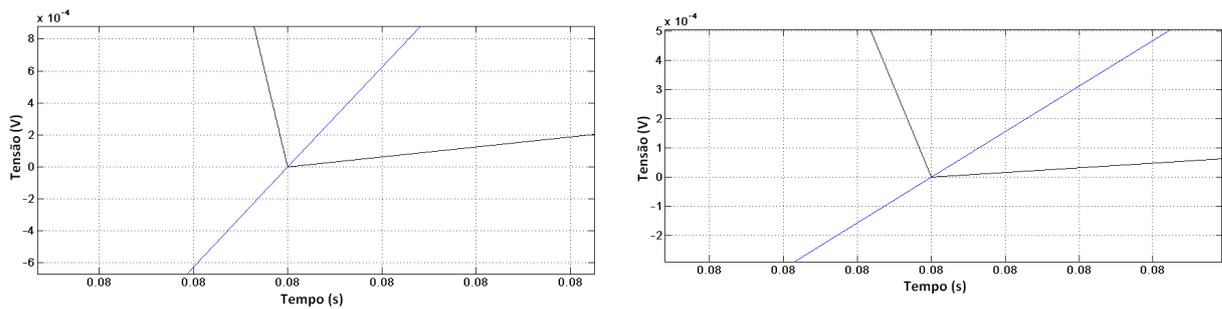


Figura 17 – Saídas dos PLL's para condições ideais da rede. A partir do ângulo de fase (preto) uma onda senoidal é criada (azul) e sincronizada ao sinal de referência V_a (vermelho).



(a) Sinal de saída do SRF - PLL

(b) Sinal de saída do q - PLL

Figura 18 – Saídas dos PLL's da Figura 17 ampliada em um cruzamento de sinais.

Conforme ilustra a Figura 17 os PLL's apresentam excelente resposta dinâmica, ou seja, resposta rápida e estável, além de controlar a fase com precisão.

7.2 Desequilíbrio de Tensão

Na Figura 19 é ilustrado sinais de entrada com desequilíbrio de tensão entre as três fases, a amplitude de V_b é $0,98V_a$ e a amplitude de V_c é $1,02V_a$. O fator de desequilíbrio (FD) é de 2,09% que é um valor próximo do máximo valor tolerado pelas normas do IEEE e da ANEEL como mostrado no tópico distúrbios associados à qualidade de energia elétrica apresentado nesse trabalho.

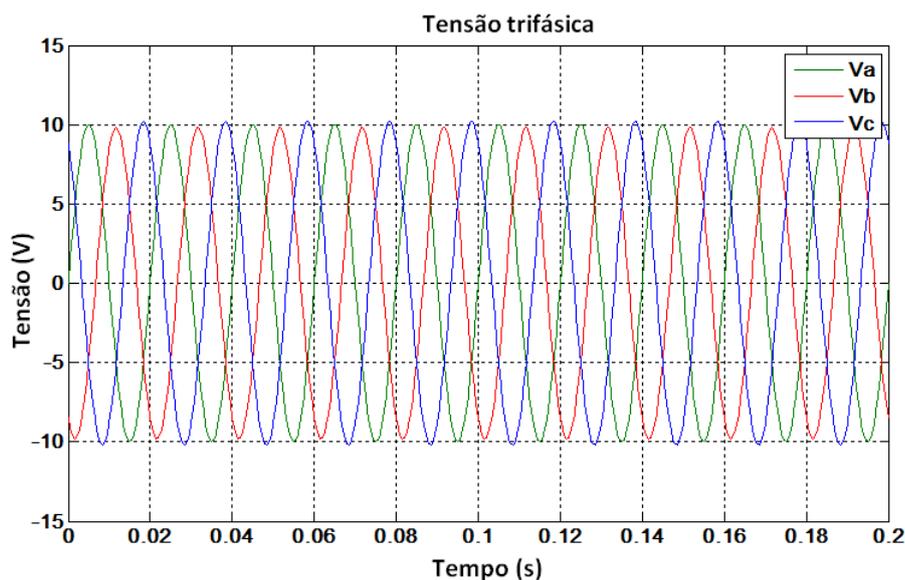


Figura 19 – Sinais de entrada com tensões desequilibradas.

Nas Figuras 20 e 21, são ilustrados os resultados da simulação para a observação do comportamento do SRF - PLL e do q - PLL.

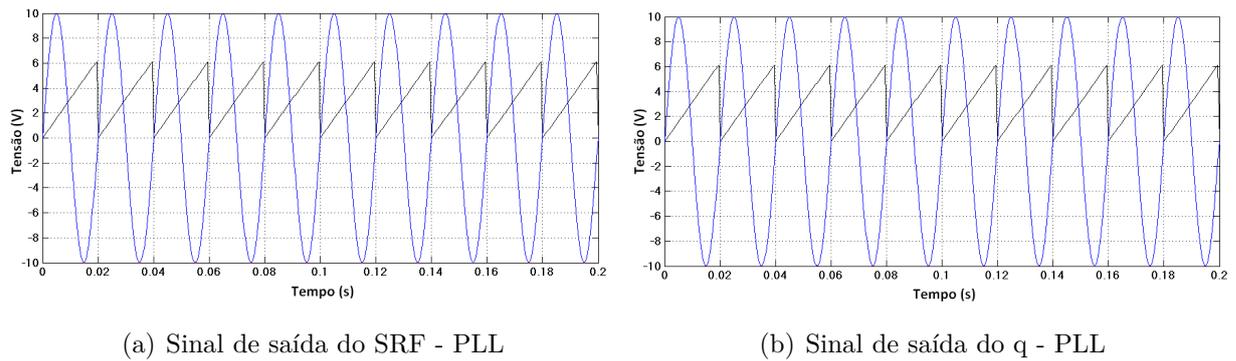


Figura 20 – Saídas dos PLL's para sinais de entrada com tensões desequilibradas. A partir do ângulo de fase (preto) uma onda senoidal é criada (azul) e sincronizada ao sinal de referência V_a (vermelho).

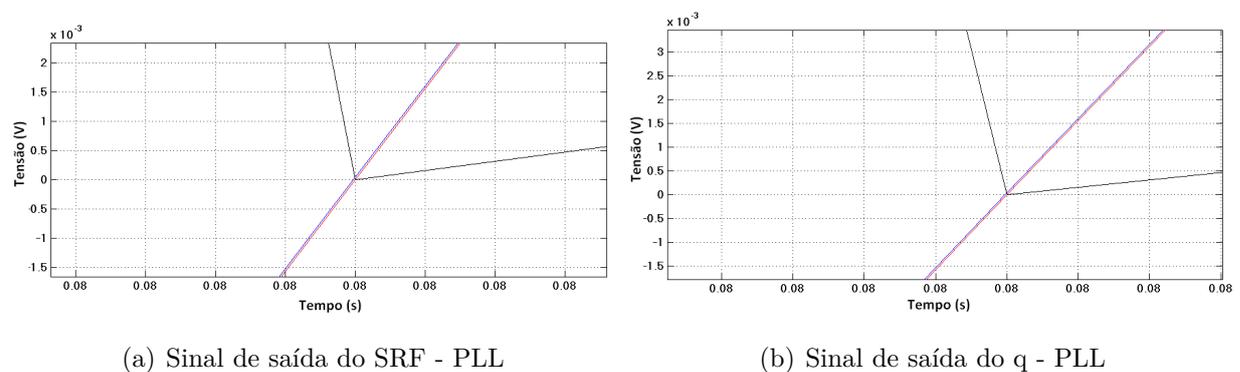


Figura 21 – Saídas dos PLL's da Figura 20 ampliada em um cruzamento de sinais.

Conforme ilustrado nas Figuras acima os PLL's foram capazes de controlar o ângulo de fase, mas com uma menor precisão se comparado com o caso da simulação para condições ideais (tensões de entrada são equilibradas).

7.3 Distorções Harmônicas

Para a execução da simulação de distorções harmônicas foram escolhidas a quinta e sétima harmônica apenas, onde o valor calculado de distorção harmônica total (DTT) é de 10%, sendo o mesmo igual ao valor máximo tolerado pela norma da ANEEL. A simulação poderia conter mais harmônicos de ordem e níveis variados.

Nas Figuras 22, 23 e 24 são apresentados os resultados da simulação, onde as harmônicas 5ª e 7ª com amplitudes de 8% e 6% de V_a , foram adicionadas aos sinais de entrada.

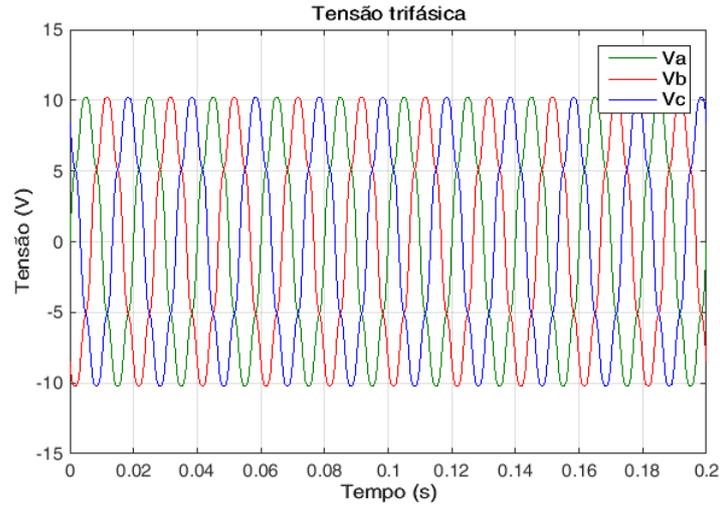
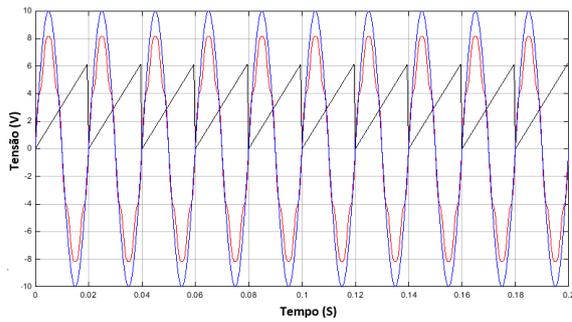
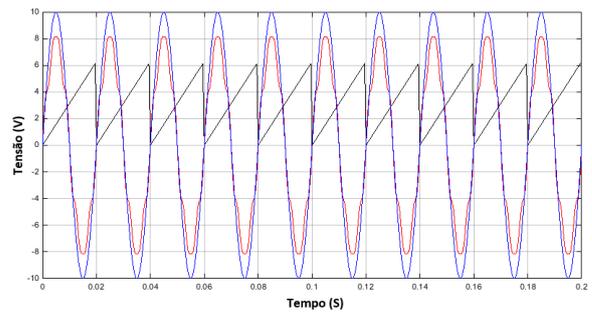


Figura 22 – Sinais de entrada com a presença do 5º e 7º harmônico.

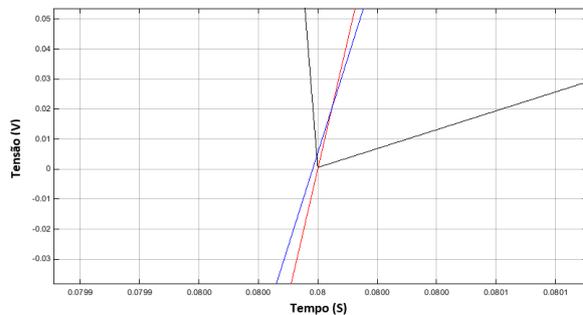


(a) Sinal de saída do SRF - PLL

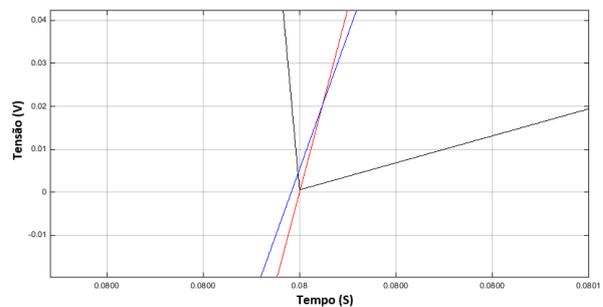


(b) Sinal de saída do q - PLL

Figura 23 – Saídas dos PLL's para sinais de entrada com presença de harmônicos. A partir do ângulo de fase (preto) uma onda senoidal é criada (azul) e sincronizada ao sinal de referência V_a (vermelho).



(a) Sinal de saída do SRF - PLL



(b) Sinal de saída do q - PLL

Figura 24 – Saídas dos PLL's da Figura 23 ampliada em um cruzamento de sinais.

Como ilustra a Figura 23, mesmo com harmônicos adicionados ao sinal de entrada os PLL's conseguiram rastrear o ângulo de fase da componente fundamental ainda com precisão. Tal como indicado os sistemas de fato trabalharam como um filtro passa-baixa havendo uma redução de harmônicos no sinal de saída em relação ao sinal de entrada.

7.4 Afundamentos de Tensões

Com o intuito de avaliar o comportamento dinâmico dos PLL's frente a variações da amplitude das tensões de entrada, considera-se agora uma situação em que há uma redução de 30% do valor original na amplitude dos sinais de entrada conforme mostra a Figura 25.

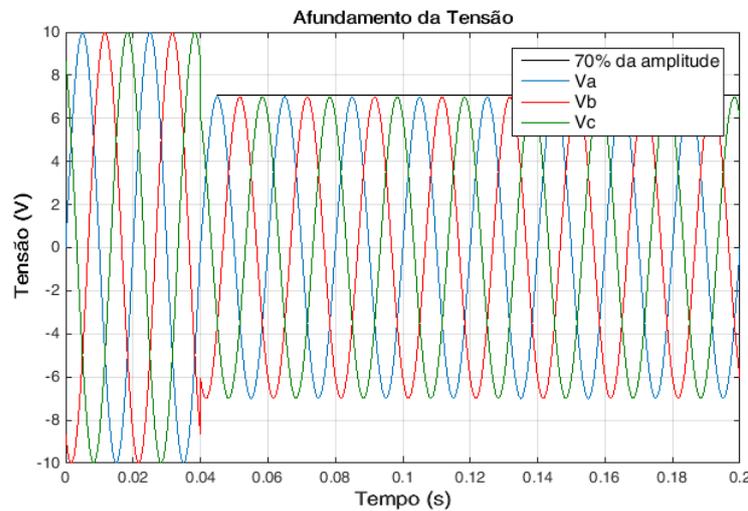
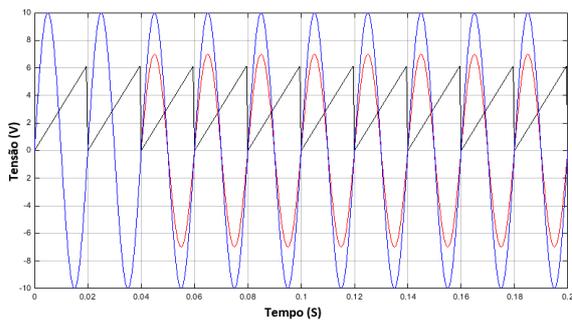
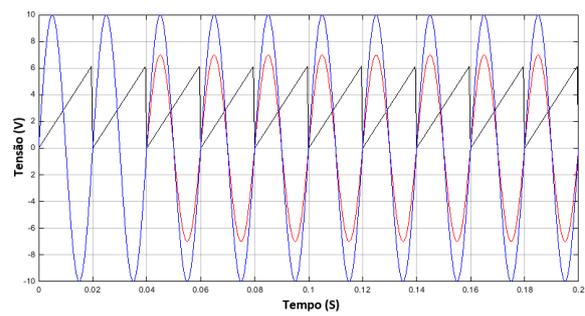


Figura 25 – Sinais de entrada com redução de 30% da amplitude.

Nas Figuras 26 e 27 são apresentados os resultados da simulação. Analisando a Figura 26, verifica-se que os circuitos SRF - PLL e o q - PLL não é afetado pela variação da amplitude do sinal de entrada, uma vez que o sinal de sincronismo mantém se em fase com a componente fundamental do sinal de referência (V_a).

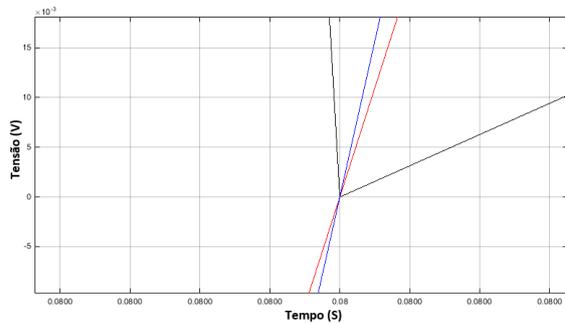


(a) Sinal de saída do SRF - PLL

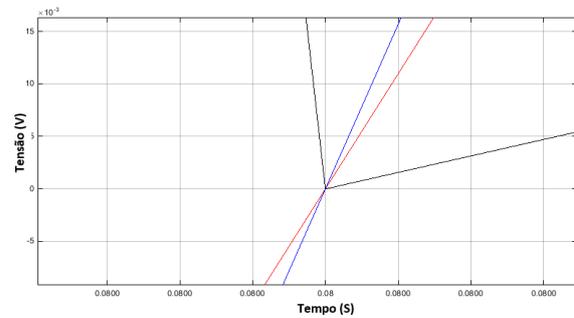


(b) Sinal de saída do q - PLL

Figura 26 – Saídas dos PLL's para sinais de entrada com afundamento de tensão. A partir do ângulo de fase (preto) uma onda senoidal é criada (azul) e sincronizada ao sinal de referência V_a (vermelho).



(a) Sinal de saída do SRF - PLL



(b) Sinal de saída do q - PLL

Figura 27 – Saídas dos PLL's da Figura 26 ampliada em um cruzamento de sinais.

8 Considerações Finais

Para as condições de simulações apresentadas neste trabalho, verificou que tanto o SRF - PLL como o q - PLL apresentam resultados precisos quanto à detecção de fase e resposta dinâmica do sistema quando a tensão da rede não é distorcida por harmônicos e/ou desbalanceamentos. Para o caso de sistemas que há presença de harmônicos ou desequilíbrios de tensão (neste caso amplitudes diferentes por fases), o SRF - PLL e o q - PLL foram capazes de rastrear o ângulo de fase do sinal, mas com uma menor precisão se comparado para o caso em que a simulação foi realizada para tensões equilibradas. Ainda assim o ângulo de fase foi controlado de forma aceitável.

Para o caso de distorções harmônicas presente no sinal de entrada os PLL's de fato funcionaram como um filtro-passa baixa e com isso ocorreu uma diminuição da influência de harmônicos no sinal de saída. Pela escolha adequada do controlador PI pode-se controlar o fator de rejeição a ruído e a velocidade de resposta do circuito.

Foi mostrado que os PLLs que utilizam o método SRF e o método da potência instantânea possuem desempenho idêntico, tanto do ponto de vista de resposta transitória quanto de rejeição a harmônicos e ao desbalanceamento de fases. Com isso, não há uma cuja escolha seja a mais apropriada para a utilização em quaisquer tipos de rede ou perturbações nas mesmas.

Referências

- 1 ELÉTRICA, A. N. D. E. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - prodist, modulo 8. 2011. Citado 5 vezes nas páginas 11, 6, 7, 8 e 9.
- 2 IEEE. Ieee std. 519 - 1992, ieee recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. june 1992. Citado 3 vezes nas páginas 11, 7 e 8.
- 3 MESQUITA, L. Estudo comparativo de algoritmos de sincronização com aplicação em eletrônica de potência. Novembro de 2011. Citado 3 vezes nas páginas 1, 13 e 14.
- 4 ORTMANN, M. Filtro ativo trifásico com controle vetorial utilizando dsp: Projeto e implementação. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 23.
- 5 NETO, A. Filtros ativos paralelos aplicados a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.
- 6 FONSECA, L. Estudo de qualidade da energia dimensionamento de um restaurador dinâmico de tensão. 2003. Citado na página 8.
- 7 TEODORESCU R.; LISERRE, M. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. [S.l.]: Ltd. Citado na página 13.
- 8 OGREN, J. Pll design for inverter grid connection. p. 44, 2011. Citado na página 16.
- 9 ALMEIDA, P. M. D. Modelagem e controle de conversores estáticos fonte de tensão utilizados em sistemas de geração fotovoltaicos conectados à rede elétrica de distribuição. p. 189, 2011. Citado na página 18.
- 10 PÁDUA, M. S. D. Técnicas digitais para sincronização com a rede elétrica, com aplicação em geração distribuída. p. 146, 2006. Citado na página 18.
- 11 AKAGI H. KANAZAWA, Y. Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components. Citado na página 22.
- 12 AKAGI H. KANAZAWA, Y. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three - phase circuits. Citado na página 22.