

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

Rafael Fragoso Fernandes

IMPLEMENTAÇÃO DE UM DSOGI-PLL EM TEMPO DISCRETO

Alegrete
Dezembro 2020

Rafael Fragofo Fernandes

IMPLEMENTAÇÃO DE UM DSOGI-PLL EM TEMPO DISCRETO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva

Alegrete

Dezembro 2020

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

F363i Fernandes, Rafael Fragoso
Implementação de um DSOGI-PLL em tempo discreto / Rafael
Fragoso Fernandes.
65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2020.
"Orientação: Guilherme Sebastião da Silva".

1. Método de sincronia para rede elétrica trifásica. 2.
Transformação Bi linear - Método de Tustin. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

RAFAEL FRAGOSO FERNANDES

IMPLEMENTAÇÃO DE UM DSOGI-PLL EM TEMPO DISCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de dezembro 2020.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Jumar Luís Russi
UNIPAMPA

Eng. Gerson Evandro de Oliveira Sena
UNIPAMPA



Documento assinado eletronicamente por **JUMAR LUIS RUSSI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/12/2020, às 14:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **GUILHERME SEBASTIAO DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/12/2020, às 15:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Assinado eletronicamente por **GERSON EVANDRO DE OLIVEIRA SENA, Técnico em Eletroeletrônica**, em 06/12/2020, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0418002** e o código CRC **0BEF71B9**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550
Telefone: (55) 3422-8400

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por terem feito de mim a pessoa que sou hoje.

À minha namorada Joyce, por estar sempre ao meu lado compartilhando todos os momentos.

À minha família, por todo apoio, carinho e admiração em mim depositados.

Ao professor Dr. Guilherme Sebastião da Silva, pelas orientações, ensinamentos e amizade.

Aos colegas, por todos os desafios que juntos superamos ao longo do curso.

*"A única maneira de fazer um bom trabalho é amando o que você faz. Se você ainda não encontrou, continue procurando. Não se desespere. Assim como no amor, você saberá quando tiver encontrado."
(Steve Jobs)*

RESUMO

Para a correta operação de conversores ativos de energia, a sincronização adequada com a rede elétrica é fundamental. Desta forma, este trabalho aborda a implementação em tempo discreto de um DSOGI-PLL (Dual Second Order Generalized Integrator - Phase Locked Loop). São abordados os conceitos nos quais o método é baseado, e posteriormente seu funcionamento. O modelo discreto é então obtido utilizando transformação bilinear, ou método de Tustin, e o mesmo é simulado. Logo são apresentados os resultados da simulação, onde o sistema é submetido à uma rede elétrica operando em condições normais, com variação de frequência, com desequilíbrio de tensão e por último com afundamento de tensão.

Palavras-chave: discretização, DSOGI-PLL, transformação bilinear, método de Tustin

ABSTRACT

For the correct operation of active energy converters, proper synchronization with the electrical network is essential. Thus, this work addresses the implementation in discrete time of a DSOGI-PLL (Dual Second Order Generalized Integrator - Phase Locked Loop). The concepts on which the method is based are discussed, and later its operation. The discrete model is then obtained using bilinear transformation, or Tustin's method, and it is simulated. Soon the results of the simulation are presented, where the system is submitted to an electrical network operating under normal conditions, with frequency variation, with voltage imbalance and lastly with voltage sinking.

Keywords: discretization, DSOGI-PLL, bilinear transformation, Tustin method

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Transformada de Clarke	20
Figura 2 – Fasores Desequilibrados	22
Figura 3 – Fasores de Sequência	23
Figura 4 – Transformada de Park	26
Figura 5 – Estrutura genérica de um PLL	27
Figura 6 – Integração trapezoidal	29
Figura 7 – Estrutura do DSOGI-PLL	31
Figura 8 – Estrutura do Integrador Generalizado de Segunda Ordem - SOGI	32
Figura 9 – Resposta em frequência $D(s)$	33
Figura 10 – Resposta em frequência $Q(s)$	33
Figura 11 – Estrutura SOGI-PSC	34
Figura 12 – SFR-PLL	34
Figura 13 – Simulação 1 - Tensões de entrada	40
Figura 14 – Simulação 1 - Tensões $\alpha\beta$	40
Figura 15 – Simulação 1 - Tensões $\alpha^+\beta^+$	41
Figura 16 – Simulação 1 - Tensões $V_d^+V_q^+$	41
Figura 17 – Simulação 1 - Ângulo θ' estimado	42
Figura 18 – Simulação 2 - Tensões de entrada	43
Figura 19 – Simulação 2 - Tensões $\alpha\beta$	43
Figura 20 – Simulação 2 - Tensões $\alpha^+\beta^+$	44
Figura 21 – Simulação 2 - Tensões $V_d^+V_q^+$	44
Figura 22 – Simulação 2 - Ângulo θ' estimado	45
Figura 23 – Simulação 3 - Tensões de entrada	46
Figura 24 – Simulação 3 - Tensões $\alpha\beta$	46
Figura 25 – Simulação 3 - Tensões $\alpha^+\beta^+$	47
Figura 26 – Simulação 3 - Tensões $V_d^+V_q^+$	47
Figura 27 – Simulação 3 - Ângulo θ' estimado	48
Figura 28 – Simulação 4 - Tensões de entrada	49
Figura 29 – Simulação 4 - Tensões $\alpha\beta$	49
Figura 30 – Simulação 4 - Tensões $\alpha^+\beta^+$	50
Figura 31 – Simulação 4 - Tensões $V_d^+V_q^+$	50
Figura 32 – Simulação 4 - Ângulo θ' estimado	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	17
1.2	Justificativa	17
1.3	Estrutura do TCC	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Transformada de Clarke	19
2.2	Componentes Simétricas	21
2.3	Transformada de Park	25
2.4	Malha de Captura de Fase	26
2.5	Controladores em Tempo Discreto	27
2.5.1	Transformação bilinear ou método de Tustin	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	DSOGI-PLL	31
3.2	Discretização do Sistema	35
4	RESULTADOS	39
4.1	Simulação 1 - Regime permanente	40
4.2	Simulação 2 - Variação de frequência	42
4.3	Simulação 3 - Desequilíbrio de tensão	45
4.4	Simulação 4 - Afundamento de tensão	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
	REFERÊNCIAS	55
	ANEXOS	57
	ANEXO A – ALGORITMO IMPLEMENTADO NO SOFTWARE MATLAB	59

1 INTRODUÇÃO

Os avanços das tecnologias da eletrônica de potência, têm proporcionado um crescimento de dispositivos mais eficientes e econômicos conectados a rede elétrica, dispositivos estes, que melhoram o rendimento e a confiabilidade de processos, sejam eles comerciais ou industriais.

Por outro lado, estes dispositivos de processamento eletrônico, não apresentam um comportamento de corrente perfeitamente senoidal, e quando conectados à rede elétrica, acabam ocasionando distúrbios e conseqüentemente a perda de qualidade da rede. Os distúrbios que mais se destacam nesse caso são: as distorções harmônicas, os desequilíbrios de tensão e a variação de frequência no sistema.(TRISTÃO, 2014)

Para que os conversores operem de maneira correta, é necessário que os mesmos tenham a capacidade de realizar a sincronização com a rede, mesmo em condições onde o funcionamento da rede apresente condições de baixa qualidade e falhas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar a implementação em tempo discreto de um método de sincronização com a rede elétrica, para ser utilizado em um conversor de energia (retificador trifásico ativo) obtendo as expressões que descrevem o método e testando um algoritmo que realize as operações necessárias para o correto funcionamento.

1.2 JUSTIFICATIVA

A questão mais importante para conectar conversores ativos de energia à rede elétrica, é seu método de sincronização.(RODRIGUEZ et al., 2006)

Sendo o método de sincronização que dita o comportamento do conversor, se o mesmo não for adequando às condições que a rede apresenta, dependendo da potência do mesmo, perturbações severas podem ser introduzidas na rede ou ainda, causar danos permanentes no próprio dispositivo.

Buscando um método capaz de operar com tolerância à distorções harmônicas, oscilações de frequência e variações de níveis de tensão, foi escolhido para o desenvolvimento deste trabalho o método denominado DSOGI-PLL. Este método é abordado em (NETO, 2015), e demonstrado que o mesmo apresenta desempenho satisfatório quando submetido aos requisitos mencionados anteriormente.

1.3 ESTRUTURA DO TCC

O trabalho é desenvolvido conforme descrito a seguir:

- Capítulo 2 - É feita uma revisão bibliográfica sobre os temas pertinentes para compreensão do trabalho.
- Capítulo 3 - É abordado o funcionamento de cada etapa do método de sincronização escolhido, sendo apresentadas as equações e características relevantes para o mesmo. Além disso é demonstrado como foi feito o processo de discretização do modelo e suas respectivas expressões matemáticas.
- Capítulo 4 - São demonstrados os resultados da simulação do sistema discreto implementado.
- Capítulo 5 - São apresentadas as considerações sobre o trabalho, a contribuição do mesmo e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A compreensão dos artifícios matemáticos, utilizados na estrutura do método escolhido, é de fundamental importância. Neste sentido, para melhorar a compreensão do estudo, serão abordados os temas de mudança de referencial e a decomposição sinais de sistemas trifásicos desequilibrados.

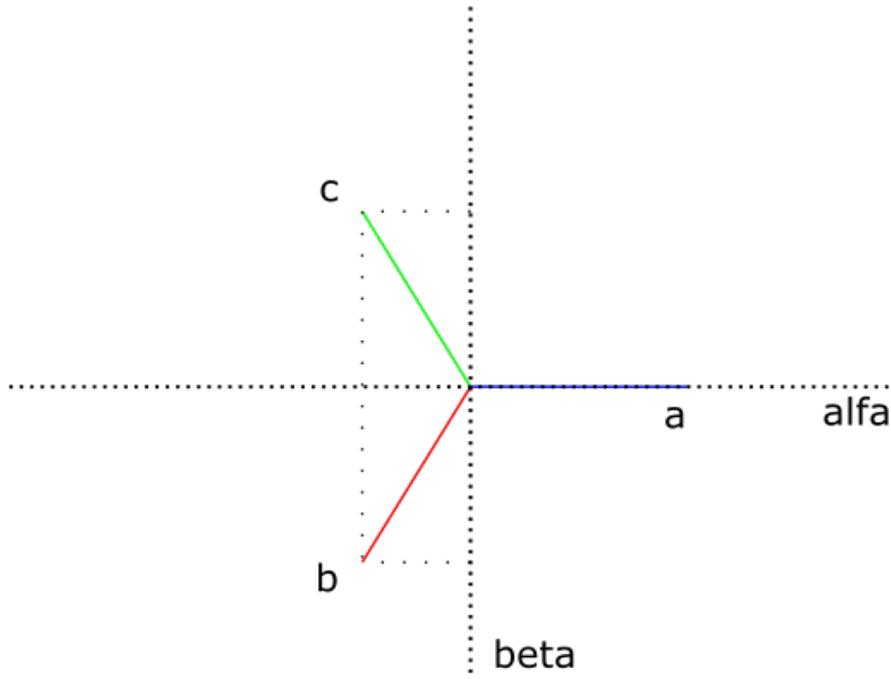
Uma vez que o método escolhido é baseado em PLL (Phase Locked Loop), ou malha de captura de fase, também será abordado o funcionamento básico de uma estrutura deste tipo, desta forma, introduzindo os conceitos chaves para o entendimento do trabalho.

2.1 TRANSFORMADA DE CLARKE

A transformada de Clarke muda as grandezas de um sistema trifásico referenciado nas coordenadas naturais abc para o sistema de coordenadas $\alpha\beta$.(CLARKE, 1950)

Os vetores do sistema abc são projetados sobre os eixos $\alpha\beta$ conforme ilustrado na figura 1.

Figura 1 – Transformada de Clarke



Fonte: Próprio autor

Observando as projeções de abc pode-se deduzir as expressões que representam as componentes α e β .

$$\alpha = a - b \cos \frac{\pi}{3} - c \cos \frac{\pi}{3} = a - b \frac{1}{2} - c \frac{1}{2} \quad (2.1)$$

$$\beta = -b \cos \frac{\pi}{6} + c \cos \frac{\pi}{6} = -b \frac{\sqrt{3}}{2} + c \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.2)$$

Para um sistema trifásico equilibrado com a , b e c tensões senoidais:

$$a = V \sin(\omega t) \quad (2.3)$$

$$b = V \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.4)$$

$$c = V \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.5)$$

Substituindo as equações 2.3, 2.4 e 2.5 em 2.1 e 2.2 têm-se:

$$\alpha = V \sin(\omega t) - \frac{V}{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{V}{2} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{3}{2}V \sin(\omega t) \quad (2.6)$$

$$\beta = -\frac{\sqrt{3}}{2}V \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2}V \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{3}{2}V \cos(\omega t) \quad (2.7)$$

O sistema abc original é representado em $\alpha\beta$ de acordo com as equações 2.6 e 2.7, note que as amplitudes são 1,5 vezes a amplitude original e estão defasados por $\frac{\pi}{2}$. Para que não ocorra essa variação de amplitude, as componentes devem ser multiplicadas por $\frac{2}{3}$ tornando a transformação invariante em amplitude. Assim é definida a $T_{\alpha\beta}$ como matriz de transformação de Clarke conforme 2.8.

$$v_{\alpha\beta} = [T_{\alpha\beta}] [V_{abc}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

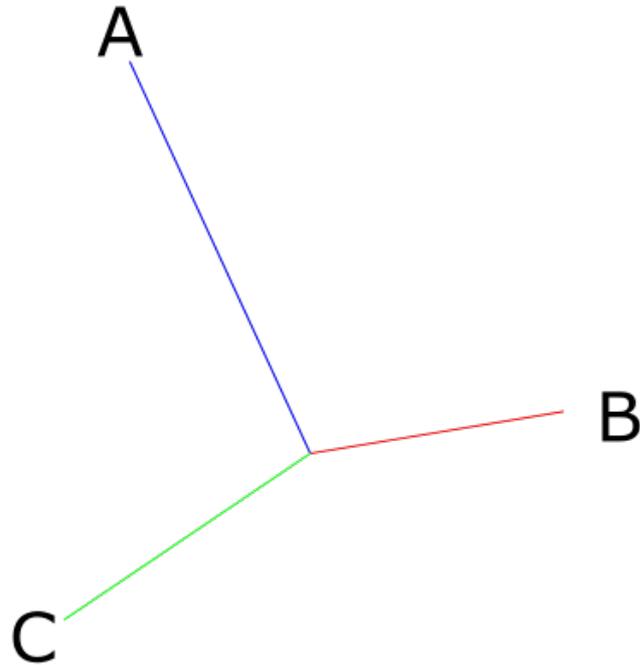
A matriz de transformação de Clarke apresenta ainda uma terceira linha que representa o a componentes γ , porém esta não é objeto de interesse para este trabalho e por este motivo foi ocultada, sendo a matriz expressa em 2.8 um caso particular.

2.2 COMPONENTES SIMÉTRICAS

A teoria das componentes simétricas de Fortescue, mostra que um sistema trifásico desequilibrado, pode ser decomposto em três sistemas trifásicos equilibrados, denominados sequência zero, sequência positiva e sequência negativa, respectivamente. (FORTESCUE, 1918)

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} \widehat{V}_a \\ \widehat{V}_b \\ \widehat{V}_c \end{bmatrix} = V^0 + V^+ + V^- = \begin{bmatrix} \widehat{V}_a^0 \\ \widehat{V}_b^0 \\ \widehat{V}_c^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \widehat{V}_a^+ \\ \widehat{V}_b^+ \\ \widehat{V}_c^+ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \widehat{V}_a^- \\ \widehat{V}_b^- \\ \widehat{V}_c^- \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

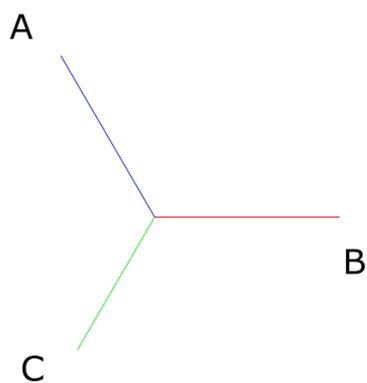
Figura 2 – Fasores Desequilibrados



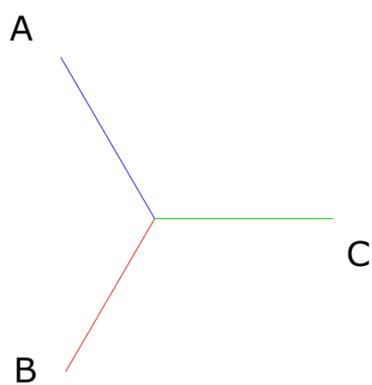
Fonte: Próprio autor

Os fasores da sequência zero são iguais. Já os fasores de sequência positiva possuem a mesma magnitude, mesma sequência de fase dos fasores originais e estão defasados entre si em $2\pi/3$ radianos. Os fasores da sequência negativa, possuem magnitude iguais, também estão defasados em $2\pi/3$ radianos e possuem sequência de fase inversa aos fasores originais.

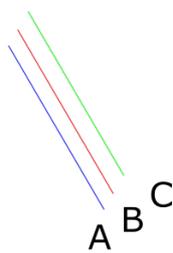
Figura 3 – Fasores de Sequência



(a) Sequência positiva



(b) Sequência negativa



(c) Sequência zero

Fonte: Próprio autor

Sabendo que ao multiplicar α por um fasor qualquer, sendo $\alpha = e^{-\frac{2}{3}j}$, o mesmo é defasado em $2\pi/3$ radianos, pode-se escrever:

$$\widehat{V}_b^+ = \alpha \widehat{V}_a^+ \quad (2.10)$$

$$\widehat{V}_c^+ = \alpha^2 \widehat{V}_a^+ \quad (2.11)$$

$$\widehat{V}_b^- = \alpha^2 \widehat{V}_a^- \quad (2.12)$$

$$\widehat{V}_c^- = \alpha \widehat{V}_a^- \quad (2.13)$$

$$\widehat{v}_a^0 = \widehat{v}_b^0 = \widehat{v}_c^0 \quad (2.14)$$

Realizando a manipulação matemática adequada, é possível obter as componentes de sequência positiva e negativa a partir das componentes originais do sistema conforme mostram as equações 2.15 e 2.16:

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_a^+ \\ \widehat{V}_b^+ \\ \widehat{V}_c^+ \end{bmatrix} = [T_+] [V_{abc}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 & \alpha \\ \alpha & 1 & \alpha^2 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{V}_a \\ \widehat{V}_b \\ \widehat{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_a^- \\ \widehat{V}_b^- \\ \widehat{V}_c^- \end{bmatrix} = [T_-] [V_{abc}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{V}_a \\ \widehat{V}_b \\ \widehat{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Porém, como já mencionado na seção anterior, um sistema referenciado nas coordenadas abc pode ter seu sistema de coordenadas transformados para o referencial $\alpha\beta$ pela transformação de Clarke. Combinando $T_{\alpha\beta}$ e T_+ pode-se obter $T_{\alpha\beta}^+$ a partir de V_{abc} conforme mostra a equação.

$$\begin{aligned} V_{\alpha\beta}^+ &= [T_{\alpha\beta}] [V_{abc}^+] \\ &= [T_{\alpha\beta}] [T_+] [V_{abc}] \\ &= [T_{\alpha\beta}] [T_+] [T_{\alpha\beta}]^{-1} V_{\alpha\beta} \\ &= [Q] V_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Obtendo assim a seguinte expressão para Q :

$$Q = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$$

O operador q definido em 2.18 tem por finalidade defasar o sinal em $\frac{\pi}{2}$, isto quer dizer que para obter-se os sinais $V_{\alpha\beta}^+$, são necessários os sinais originais $V_{\alpha\beta}$ e seus respectivos sinais em quadratura. Aplicando 2.18 em 2.17 pode-se expressar as componentes como mostrado em 2.19.

$$v_{\alpha}^+ = \frac{1}{2}(v_{\alpha} - qv_{\beta}) \quad (2.19)$$

$$v_{\beta}^+ = \frac{1}{2}(qv_{\beta} + v_{\alpha})$$

2.3 TRANSFORMADA DE PARK

A transformação de Park consiste em realizar a mudança de variáveis do referencial estacionário, ou referencial $\alpha\beta$, para o um referencial rotativo cujos os eixos recebem os nome de d e q .(PARK, 1929)

Através da figura 4 pode-se estabelecer a relação entre as componentes dos dois sistemas, expressando a componente de eixo direto d e a componente de quadratura q em função das componentes $\alpha\beta$.

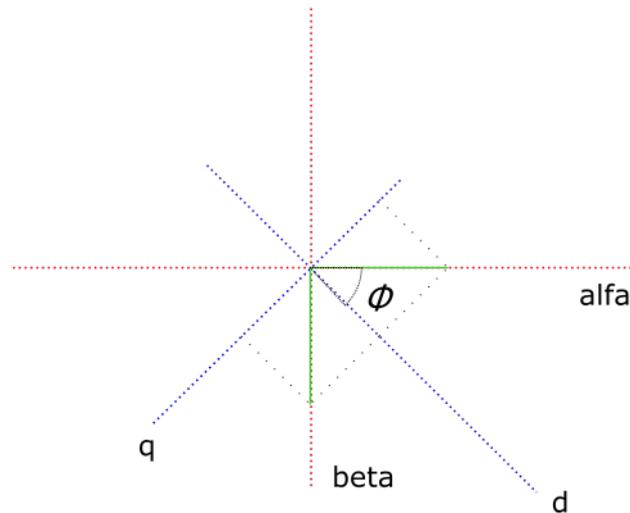
$$\begin{aligned} v_d &= v_{\alpha} \cos \phi + v_{\beta} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \\ &= v_{\alpha} \cos \phi + v_{\beta} \sin \phi \\ v_q &= -v_{\alpha} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) + v_{\beta} \cos \phi \\ &= -v_{\alpha} \sin \phi + v_{\beta} \cos \phi \end{aligned} \quad (2.20)$$

O ângulo entre a componente de eixo direto d e a componente α corresponde ao ϕ da equação 2.20. Assim quando a frequência do sinal transformado for igual a velocidade angular do sistema dq , as componentes resultantes tornam-se constantes no tempo.

De forma matricial têm-se:

$$V_{dq} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = T_{dq} v_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Figura 4 – Transformada de Park



Fonte: Próprio autor

2.4 MALHA DE CAPTURA DE FASE

Um PLL (phase locked loop) ou malha de captura de fase, consiste em uma malha fechada de controle que têm objetivo de gerar um sinal de saída em fase com o sinal de entrada. (NEVES, 2016)

A figura 5 mostra a estrutura de um PLL genérico.

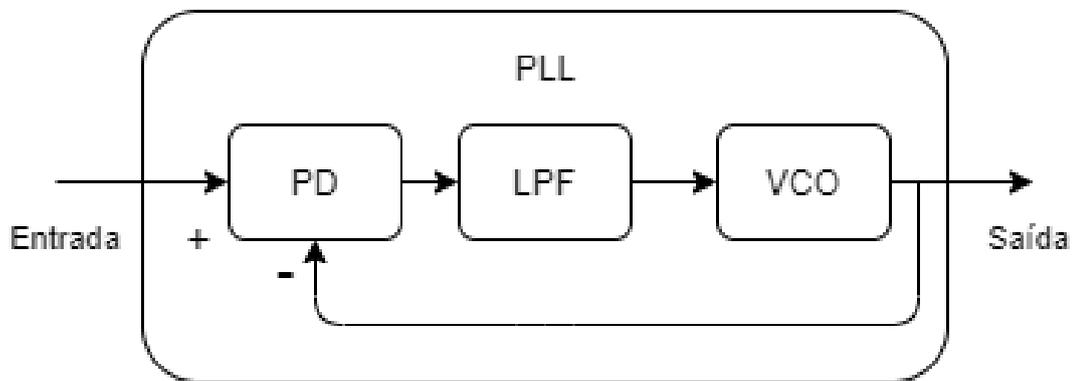
Basicamente o bloco detector de fase (phase detector - PD) usa a realimentação negativa do sinal de saída em conjunto com o sinal de entrada para gerar a diferença de fase.

Em seguida, esta diferença é passada por um filtro passa baixa (low pass filter - LPF), que tem por objetivo eliminar a diferença entre os sinais, e idealmente, rejeitar perturbações contidas no mesmo.

A saída do LPF é usada no oscilador controlado (voltage controlled oscillator - VCO) para gerar um sinal oscilante em fase com o sinal de entrada.

Por fim a saída do VCO é usada para fechar a malha de controle retornando ao bloco PD.

Figura 5 – Estrutura genérica de um PLL



Fonte: Próprio autor

2.5 CONTROLADORES EM TEMPO DISCRETO

Para realizar a implementação de um sistema de controle em tempo contínuo, as variáveis do modelo são determinadas por componentes físicos, desta forma a complexidade de tais controladores, depende da complexidade do arranjo dos componentes e da precisão dos mesmos.

Por outro lado, os controladores digitais são implementados em forma de rotinas computacionais, assim tanto a implementação quanto futuras alterações no modelo, se tornam relativamente mais fáceis.

Para ser implementado no formato digital, os controladores descritos em tempo contínuo devem ter sua representação equivalente em tempo discreto, uma vez que os computadores executam as tarefas em períodos específicos de acordo com a sua configuração.

Basicamente existem duas maneiras de realizar o projeto de controladores discretos:

- Utilizando aproximações discretas do projeto realizado no tempo contínuo por meio da transformada de Laplace;
- Diretamente no domínio discreto por meio da transformada Z;

O primeiro modo consiste em obter as funções de transferência em Z , aproximadas, a partir da função de transferência no domínio S . No segundo modo, o controlador é projetado diretamente no domínio Z .(CASTRUCCI, 2018)

Existem vários métodos para aproximar uma função do domínio contínuo para o domínio discreto, entre elas pode-se citar: aproximação retangular pra frente, aproximação retangular para trás e aproximação trapezoidal.

Sendo a aproximação trapezoidal escolhida para o desenvolvimento deste trabalho, a mesma será esplanada a seguir.

2.5.1 TRANSFORMAÇÃO BILINEAR OU MÉTODO DE TUSTIN

A transformação bilinear ou método de Tustin, consiste em aproximar a integral através da área do trapézio.

Conforme demonstrado em (CASTRUCCI, 2018), considerando a função de transferência de um integrador:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s} \quad (2.22)$$

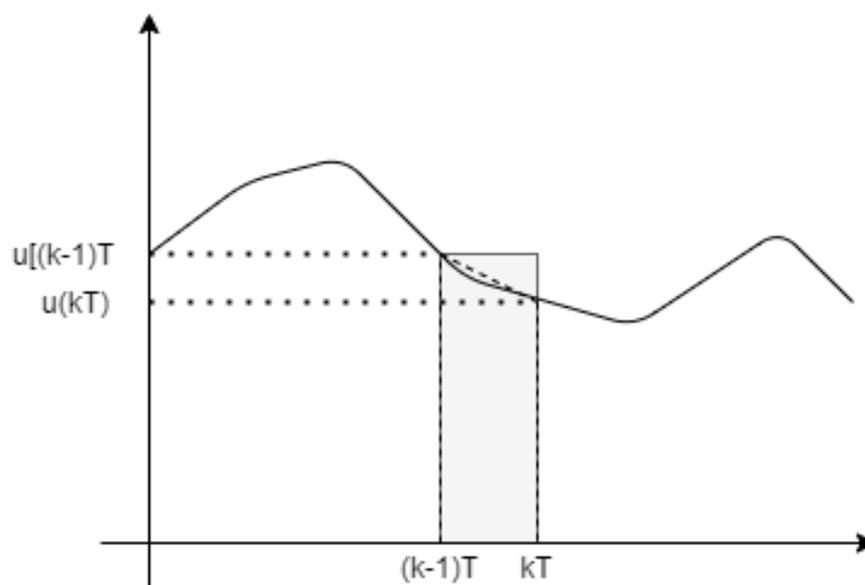
A equação diferencial 2.23 representa a função de transferência 2.22.

$$\frac{dy(t)}{dt} = u(t) \quad (2.23)$$

Ao integrar a equação 2.23 considerando um período de amostragem T , ou seja, de $(k-1)T$ a kT , obtem-se:

$$y(kT) - y[(k-1)T] = \int_{(k-1)T}^{kT} u(t) dt. \quad (2.24)$$

Figura 6 – Integração trapezoidal



Integrando o segundo membro da equação 2.24 conforme ilustrado na figura 6, obtém-se:

$$y(kT) - y[(k-1)T] = T \left(\frac{u(kT) + u[(k-1)T]}{2} \right). \quad (2.25)$$

Após aplicar a transformada Z na equação 2.25, obtém-se:

$$Y(z) - z^{-1}Y(z) = T \left(\frac{U(z) + z^{-1}U(z)}{2} \right). \quad (2.26)$$

Assim,

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{T}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{1}{\frac{2(z-1)}{T(z+1)}}. \quad (2.27)$$

Logo as equações 2.22 e 2.27, são equivalentes, se:

$$s = \frac{2(z-1)}{T(z+1)}. \quad (2.28)$$

Desta maneira, para obter um modelo equivalente no tempo discreto, a partir de um modelo em tempo contínuo no plano s , basta substituir a variável s conforme a equação 2.28.

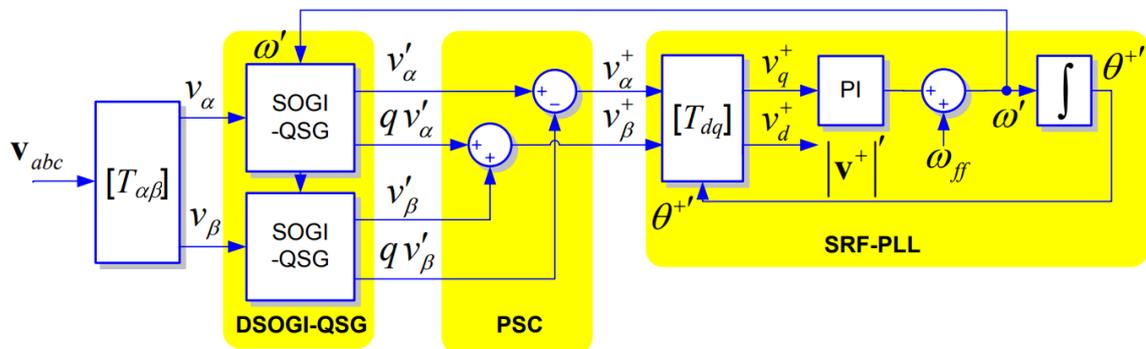
3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritas as etapas de funcionamento do método de sincronização intitulado DSOGI-PLL e, posteriormente, sua discretização utilizando a aproximação de Tustin.

3.1 DSOGI-PLL

O método de sincronização é denominado Dual Second Order Generalized PLL (DSOGI-PLL) e sua estrutura completa é apresentada na figura 7.

Figura 7 – Estrutura do DSOGI-PLL



Fonte: (RODRIGUEZ et al., 2006)

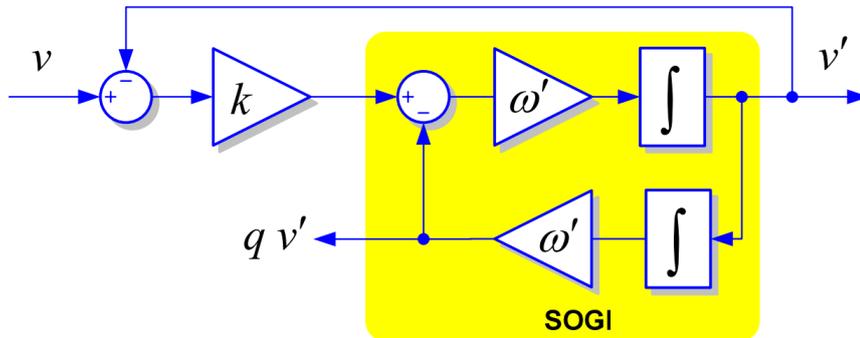
A primeira etapa é uma transformação de Parke, realizando a mudança de coordenadas do referencial natural abc para o referencial estacionário $\alpha\beta$.

A segunda etapa é responsável por realizar a geração dos sinais originais $\alpha\beta$ e seus respectivos equivalentes em quadratura. Para isso um bloco denominado DSOGI-QSG é implementado.

Uma das propriedades do DSOGI-SQG, além de atuar como um filtro passa-baixa para a sequência positiva, é sua capacidade de atenuar harmônicos de ordem elevada, o que garante robustez na operação em redes com distorção harmônica. (TRISTÃO, 2014)

A estrutura do SOGI é apresentada na figura 8.

Figura 8 – Estrutura do Integrador Generalizado de Segunda Ordem - SOGI



Fonte:(RODRIGUEZ et al., 2006)

O bloco possui uma entrada v , que recebe o sinal, duas saídas v' e qv' , que correspondem respectivamente ao sinal filtrado e seu equivalente em quadratura. A variável K representa um ganho responsável por ajustar a seletividade do SOGI e w' representa a frequência estimada da rede.

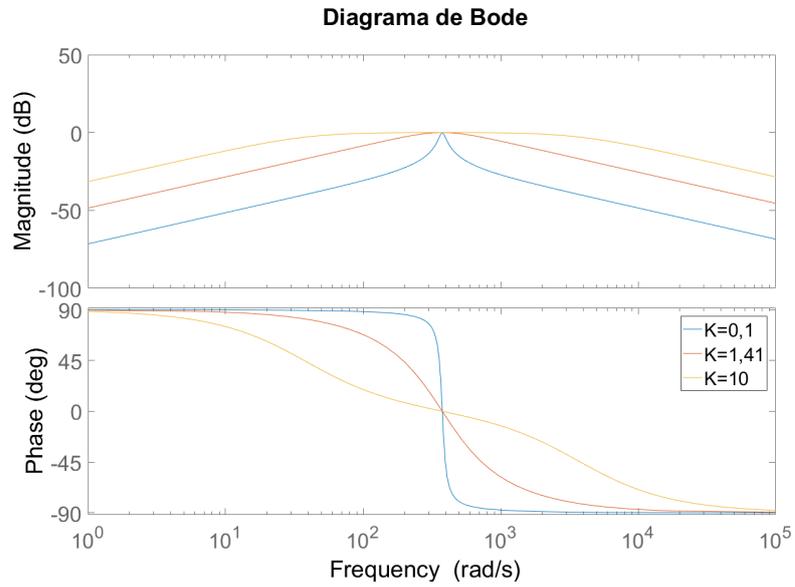
O ajuste de k é crucial para o desempenho do SOGI, pois aumentando-o, mais rápido é o tempo de acomodação e menor a seletividade do filtro, porém como demonstrado em (RODRIGUEZ et al., 2006), $K = \sqrt{2}$ produz uma resposta criticamente amortecida com um resultado satisfatório de filtragem.

Da figura 8 obtém-se a seguinte função de transferência:

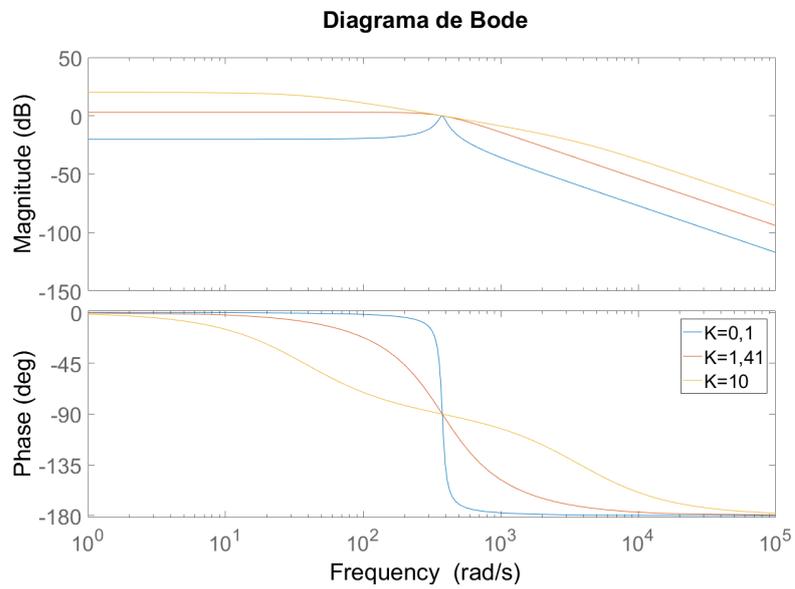
$$D(s) = \frac{v'(s)}{v(s)} = \frac{Kw's}{s^2 + Kw's + w'^2} \quad (3.1)$$

$$Q(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{Kw'^2}{s^2 + Kw's + w'^2}$$

A resposta em frequência para as funções de transferência descritas em 3.1 são apresentadas nas figuras 9 e 10.

Figura 9 – Resposta em frequência $D(s)$ 

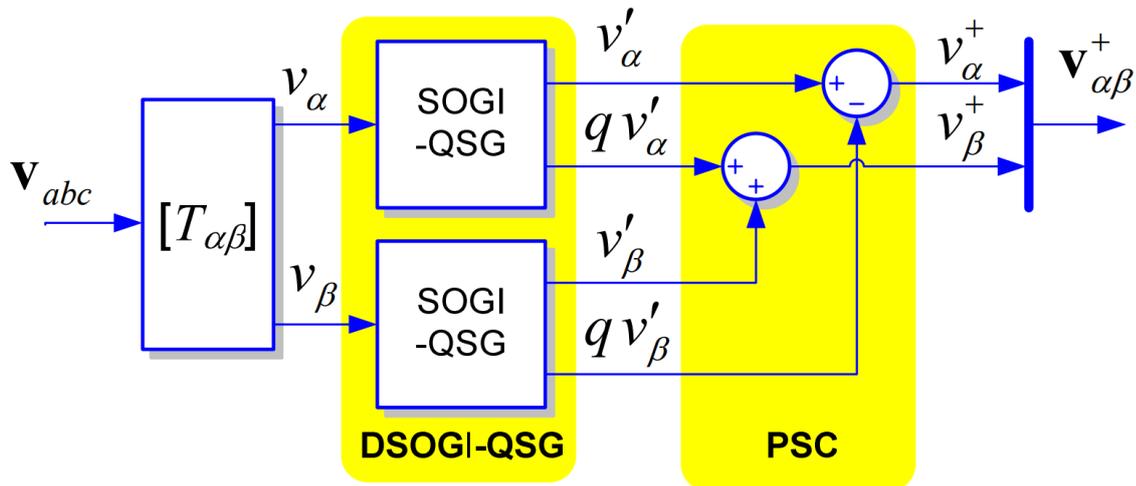
Fonte: Próprio autor

Figura 10 – Resposta em frequência $Q(s)$ 

Fonte: Próprio autor

O cálculo da sequência positiva é realizado pelo bloco PSC (Positive Sequence Calculator), através da soma apropriada dos sinais provenientes do SOGI-QSG. Dando origem assim ao subsistema denominado SOGI-PSC, conforme mostrado na figura 11.

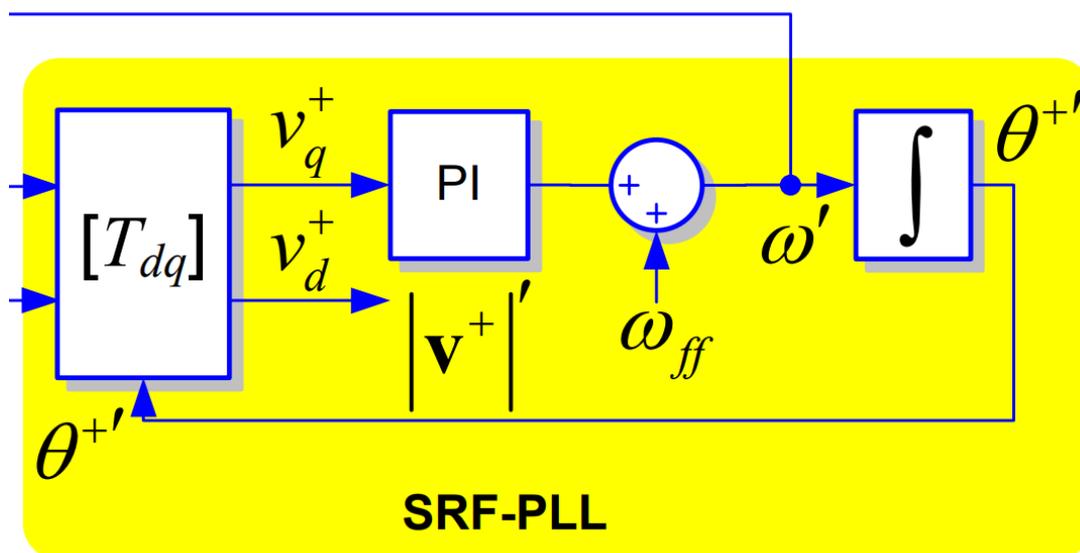
Figura 11 – Estrutura SOGI-PSC



Fonte: (RODRIGUEZ et al., 2006)

Após a obtenção dos sinais de $\alpha\beta$ em sequência positiva, estes servem de entrada para o subsistema SFR-PLL.

Figura 12 – SFR-PLL



Fonte: (RODRIGUEZ et al., 2006)

A função de transferência de malha fechada da figura 12 é dada pela seguinte equação:

$$G_{mf,pll}(s) = \frac{v_q^+ PI(s)}{s + v_q^+ PI(s)}. \quad (3.2)$$

Sabendo que a função de transferência do controlador PI é dada por:

$$PI(s) = k_{p,pll} \left(\frac{1 + s\tau_{pll}}{s\tau_{pll}} \right). \quad (3.3)$$

Substituindo 3.3 em 3.2:

$$G_{mf,pll}(s) = \frac{v_q^+ k_{p,pll} \left(\frac{1+s\tau_{pll}}{s\tau_{pll}} \right)}{s + v_q^+ k_{p,pll} \left(\frac{1+s\tau_{pll}}{s\tau_{pll}} \right)}, \quad (3.4)$$

que pode ser reescrita na forma canônica como:

$$G_{mf,pll}(s) = \frac{2\xi w_n s + w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2}, \quad (3.5)$$

fornecendo assim:

$$w_n = \sqrt{\frac{v_q^+ k_{p,pll}}{\tau_{pll}}}, \quad (3.6)$$

e também:

$$\xi = \frac{\sqrt{v_q^+ k_{p,pll} \tau_{pll}}}{2}. \quad (3.7)$$

Para projetar os parâmetros do controlador PI , busca-se um bom desempenho dinâmico no processo de sincronização além de uma boa filtragem, contudo atender as duas situações simultaneamente não é possível. Assim uma boa relação entre as características é obtida, quando $\xi = \sqrt{2}$. (ALMEIDA, 2011)

3.2 DISCRETIZAÇÃO DO SISTEMA

A discretização do sistema de sincronismo, consiste em obter o modelo de tempo discreto das funções de transferência que compõem o mesmo.

A obtenção do equivalente discreto foi realizada utilizando a aproximação trapezoidal ou método de Tustin, que como já descrito na seção anterior, basta substituir a

variável s pelo seguinte expressão $\frac{2(z-1)}{T(z+1)}$ em que T representa o período de amostragem escolhido.

A primeira etapa consiste na discretização do SOGI, e para isto aplica-se 2.28 em 3.1, obtendo:

$$\frac{v'(z)}{v(z)} = \frac{\frac{2Kw'}{T}(z^2-1)}{\left(\frac{2Kw'}{T} + \frac{4}{T^2} + w'^2\right)z^2 + \left(2w'^2 - \frac{8}{T^2}\right)z + \frac{4}{T^2} + w'^2 - \frac{2Kw'}{T}} \quad (3.8)$$

$$\frac{qv'(z)}{v(z)} = \frac{Kw'^2(z^2+2z+1)}{\left(\frac{2Kw'}{T} + \frac{4}{T^2} + w'^2\right)z^2 + \left(2w'^2 - \frac{8}{T^2}\right)z + \frac{4}{T^2} + w'^2 - \frac{2Kw'}{T}}$$

Aplica-se então a transformada z inversa e realiza-se o deslocamento de $k = (k - 2)$ para obter-se uma expressão em função de amostras passadas, resultando na em:

$$v'[k] = \frac{\left(\frac{8}{T^2} - 2w'^2\right)v'[k-1] + \left(\frac{2Kw'}{T} - \frac{4}{T^2} - w'^2\right)v'[k-2] + \frac{2Kw'}{T}(v[k] - v[k-2])}{\frac{2Kw'}{T} + \frac{4}{T^2} + w'^2} \quad (3.9)$$

$$qv'[k] = \frac{\left(\frac{8}{T^2} - 2w'^2\right)qv'[k-1] + \left(\frac{2Kw'}{T} - \frac{4}{T^2} - w'^2\right)qv'[k-2] + Kw'^2(v[k] - 2v[k-1] + v[k-2])}{\frac{2Kw'}{T} + \frac{4}{T^2} + w'^2}$$

Já para a estimativa da sequencia positiva, os sinais v' e qv' devem ser obtidos conforme 3.10.

$$v_{\alpha}^{+}[k] = v'_{\alpha}[k] - qv'_{\beta}[k] \quad (3.10)$$

$$v_{\beta}^{+}[k] = qv'_{\alpha}[k] + v'_{\beta}[k]$$

Para discretizar o SFR-PLL, basicamente é necessário aplicar a transformação bilinear no controlador PI e no integrador que compõem o mesmo.

Considerando a função de transferencia do PI

$$\frac{X(s)}{V_q^{+}(s)} = k_p \left(\frac{1 + s\tau}{s\tau} \right) \quad (3.11)$$

Aplicando a transformação bilinear em 3.3, obtém-se:

$$\frac{X(z)}{V_q^{+}(z)} = \frac{k_p + k_p\tau \frac{2(z-1)}{T(z+1)}}{\tau \frac{2(z-1)}{T(z+1)}} \quad (3.12)$$

novamente aplicando a transformada z inversa e realizando o deslocamento de $k = (k - 1)$ para novamente obter a expressão em termos de amostras passadas, têm-se:

$$X[k] = \frac{(k_p T + 2k_p \tau) V_q^+[k] + (k_p T - 2k_p \tau) V_q^+[k-1] + 2\tau X[k-1]}{2\tau} \quad (3.13)$$

O integrador é descrito conforme a equação 3.14.

$$\frac{\theta(s)}{\Omega(s)} = \frac{1}{s} \quad (3.14)$$

Aplicando a transformação bilinear obtém-se:

$$\frac{\theta(z)}{\Omega(z)} = \frac{T(z+1)}{2(z-1)}, \quad (3.15)$$

e por fim aplicando a transformada z inversa e realizando o deslocamento de $k = (k - 1)$ para novamente obter a expressão em termos de amostras passadas, têm-se:

$$\theta[k] = \frac{T}{2} (w[k] + w[k-1]) + \theta[k-1] \quad (3.16)$$

Após a discretização de todos os blocos que compõem o método, o mesmo pode ser montado em um algoritmo para que os cálculos sejam realizados de forma iterativa.

4 RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir, foram obtidos através de simulações no software MATLAB por meio de um *script*.

A tabela 1 mostra os parâmetros utilizados na simulação.

Tabela 1 – Parâmetros da simulação

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão de pico da rede (fase)	V_{abc}	311 v
Frequência da rede	f	60 Hz
Frequência de amostragem	f_s	5 KHz
Ganho proporcional SOGI	K	$\sqrt{2}$
Frequência de referência	ω_{ff}	376.99
Fator de amortecimento do controlador <i>PI</i>	ξ	$\sqrt{2}$
Ganho proporcional do controlador <i>PI</i>	k_p	4.24
Constante de tempo do controlador <i>PI</i>	τ	0.0015

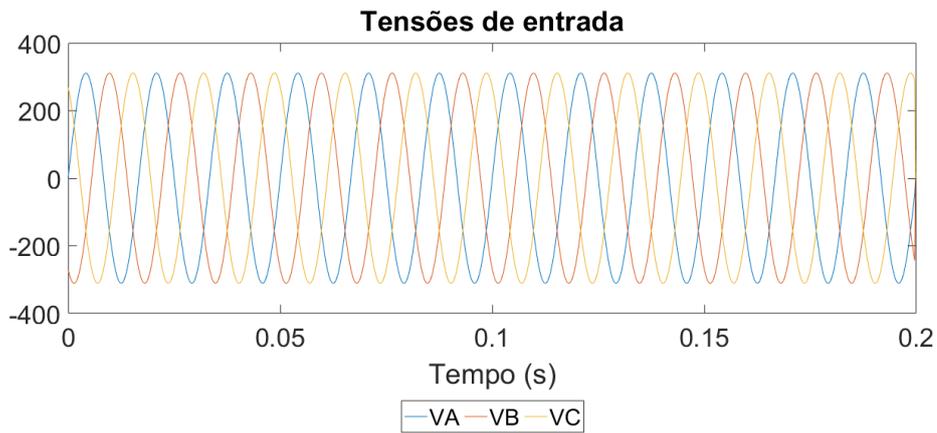
Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir são mostrados os resultados obtidos na simulação.

4.1 SIMULAÇÃO 1 - REGIME PERMANENTE

A figura 13 mostra o resultado da amostragem das tensões de rede, nesta simulação é utilizado uma rede trifásica com condições ideais de operação.

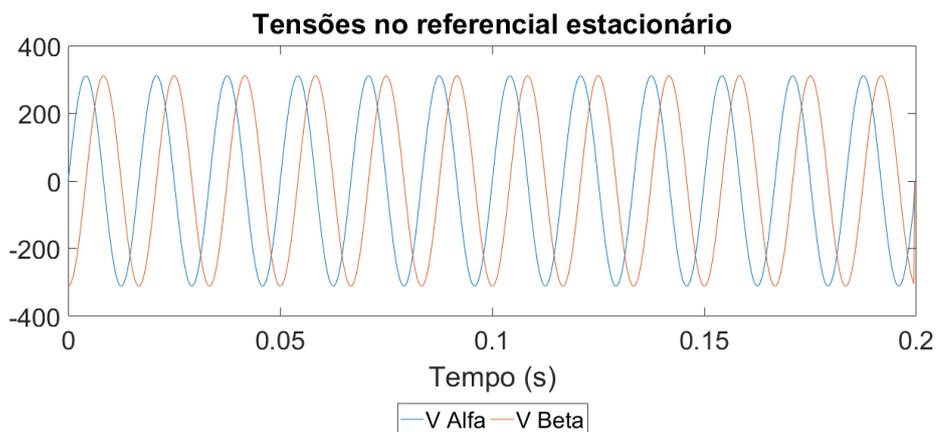
Figura 13 – Simulação 1 - Tensões de entrada



Fonte: Próprio autor

A figura 14 mostra as tensões obtidas no referencial estacionário, ou seja, resultado da transformada de Clarke.

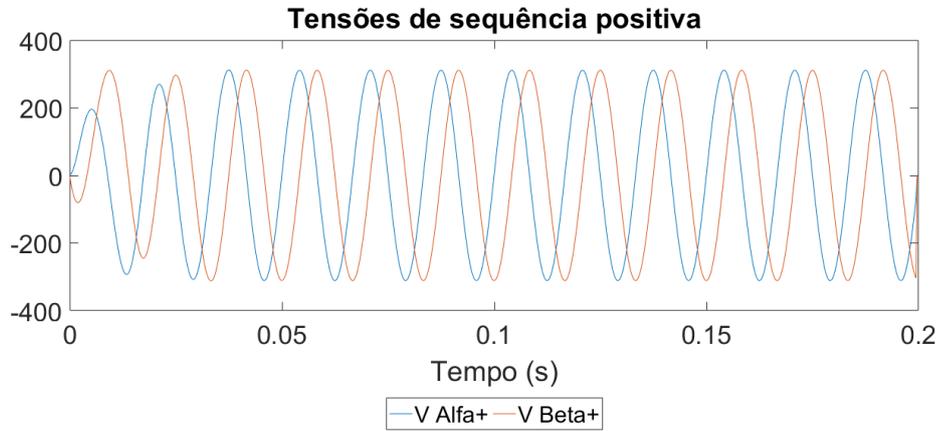
Figura 14 – Simulação 1 - Tensões $\alpha\beta$



Fonte: Próprio autor

As tensões de sequência positiva, obtidas pelo bloco *PSC* são mostradas na figura 15.

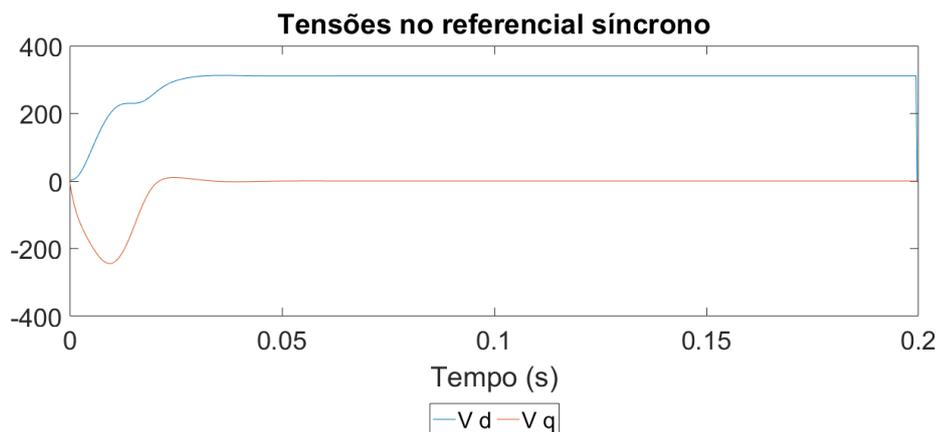
Figura 15 – Simulação 1 - Tensões $\alpha^+\beta^+$



Fonte:Próprio autor

A figura 16 mostra o resultado da transformação de Park, ou seja, as tensões de sequência positiva no referencial síncrono. Pode-se observar que o sistema leva um tempo menor que 0,05 segundos para estabilizar.

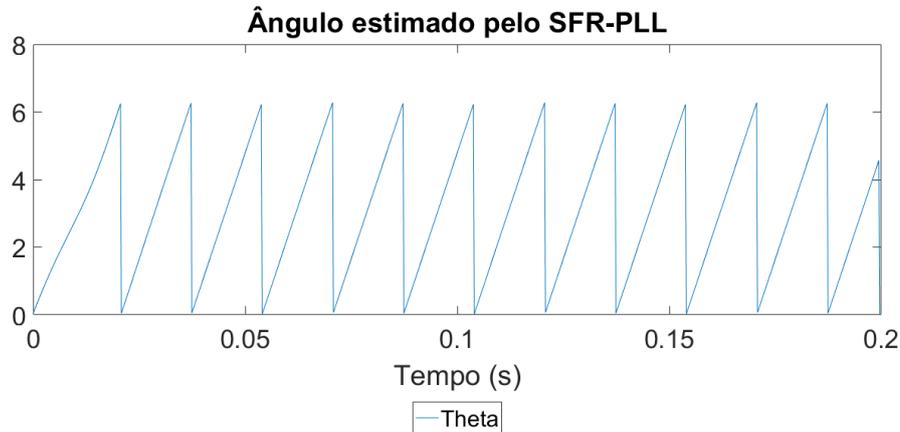
Figura 16 – Simulação 1 - Tensões $V_d^+V_q^+$



Fonte:Próprio autor

E por fim a figura 17 mostra o ângulo estimado pelo algoritmo de sincronização.

Figura 17 – Simulação 1 - Ângulo θ' estimado



Fonte:Próprio autor

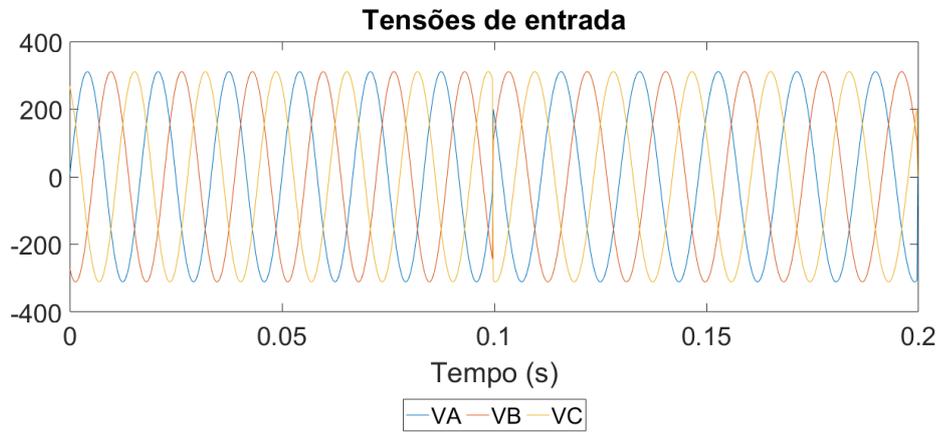
Após o período de estabilização, que têm duração de aproximadamente um ciclo, mantém a sincronização de maneira satisfatória.

4.2 SIMULAÇÃO 2 - VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

A simulação com variação de frequência, visa observar o comportamento do algoritmo quando submetido à uma mudança na frequência das tensões da rede, desta forma no instante $t = 0.1$ segundos, a mesma foi alterada de 60 Hz para 54 Hz, ou seja, uma variação de 10 %.

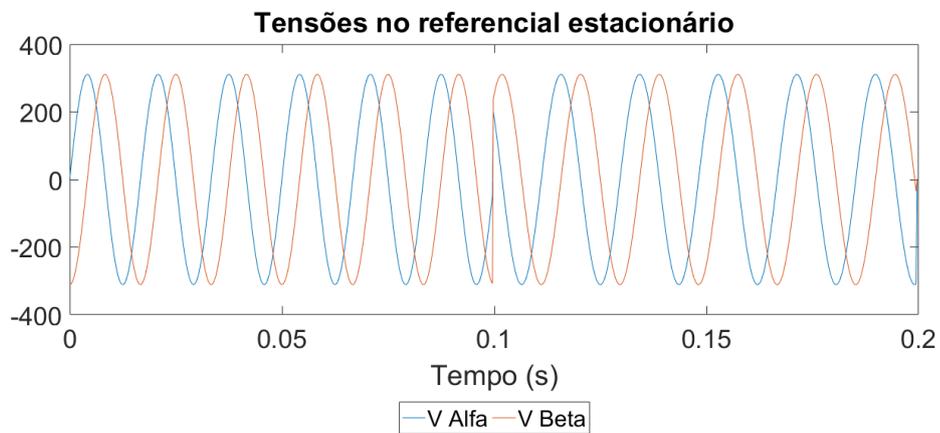
A figura 18 exibe as amostras das tensões da rede.

Figura 18 – Simulação 2 - Tensões de entrada



Fonte: Próprio autor

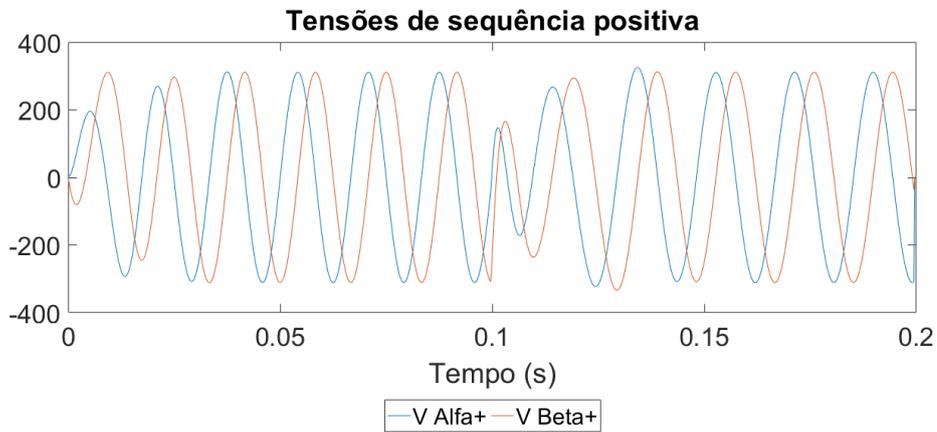
A figura 19 mostra as tensões obtidas no referencial estacionário, ou seja, resultado da transformada de Clarke.

Figura 19 – Simulação 2 - Tensões $\alpha\beta$ 

Fonte: Próprio autor

As tensões de sequência positiva, obtidas pelo bloco *PSC* são mostradas na figura 20, onde fica evidente o ponto de variação de frequência.

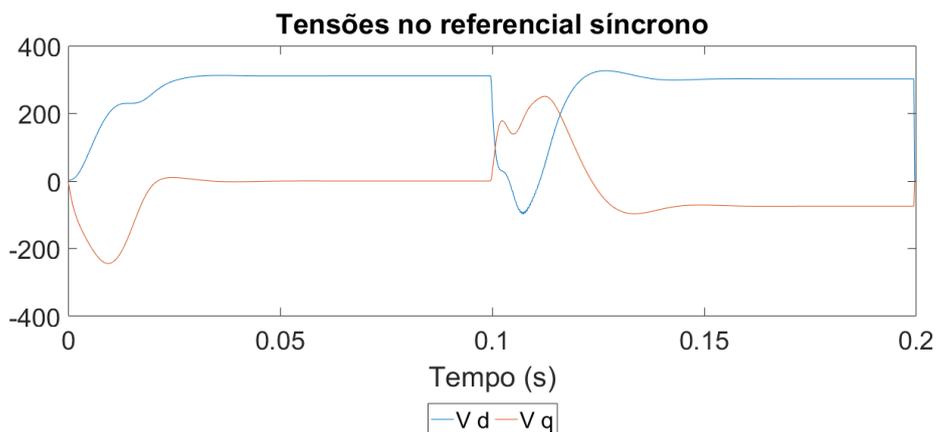
Figura 20 – Simulação 2 - Tensões $\alpha^+ \beta^+$



Fonte:Próprio autor

A figura 21 mostra o resultado da transformação de Park, ou seja, as tensões de sequência positiva no referencial síncrono. Pode-se observar aqui, que o sistema leva aproximadamente 0,05 segundos para estabilizar-se.

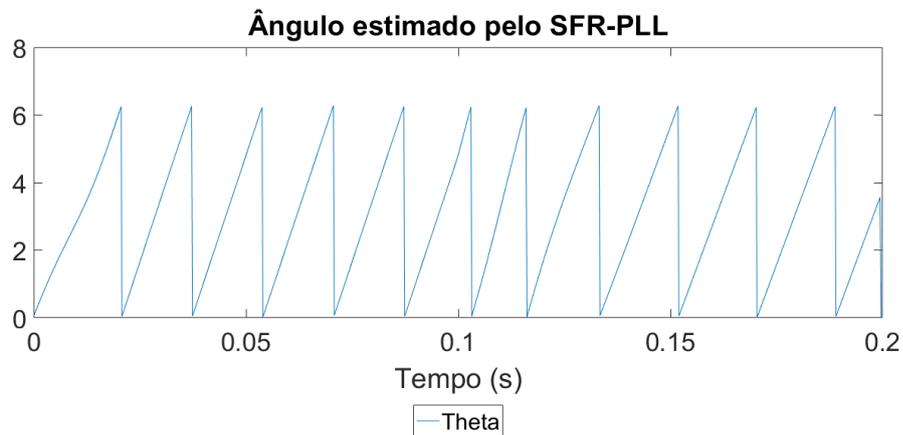
Figura 21 – Simulação 2 - Tensões $V_d^+ V_q^+$



Fonte:Próprio autor

E por fim a figura 22 mostra o ângulo estimado pelo algoritmo de sincronização.

Figura 22 – Simulação 2 - Ângulo θ' estimado



Fonte:Próprio autor

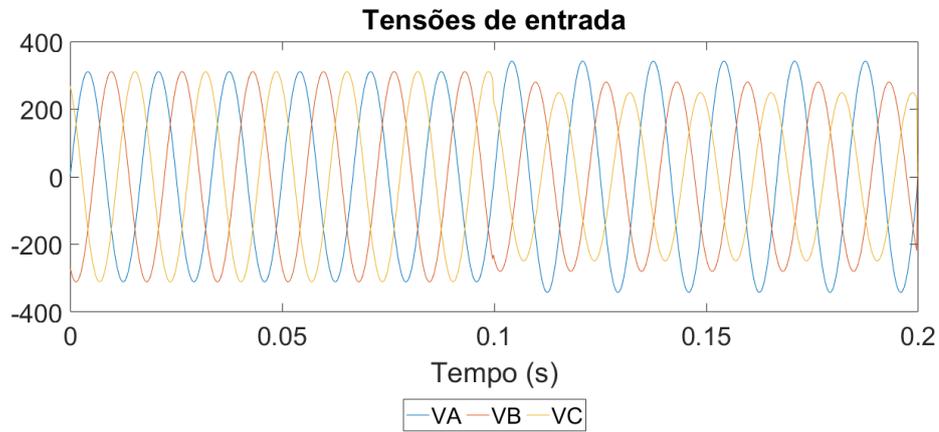
Pode-se notar que a filtragem desempenhado pelo controlador *PI* consegue rapidamente estimar o sinal após a perturbação imposta ao sistema.

4.3 SIMULAÇÃO 3 - DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

A simulação com desequilíbrio de tensão, visa observar o comportamento do algoritmo frente a uma rede desequilibrada. Para a realização desta simulação no instante $t = 01$ segundos, a rede elétrica equilibrada sofre as seguintes variações: 10 % para mais, 10 % para menos e 20 % para menos, nas fases A, B e C, respectivamente.

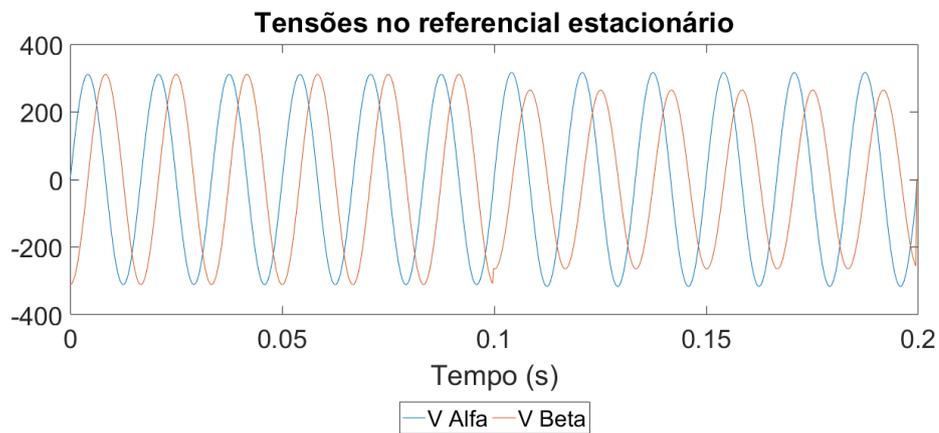
A figura 23 exhibe as amostras das tensões da rede.

Figura 23 – Simulação 3 - Tensões de entrada



Fonte: Próprio autor

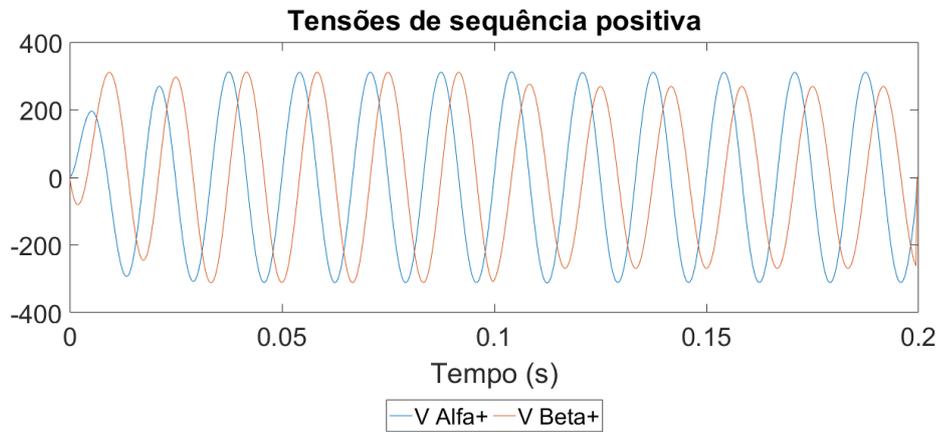
A figura 24 mostra as tensões obtidas no referencial estacionário, ou seja, resultado da transformada de Clarke.

Figura 24 – Simulação 3 - Tensões $\alpha\beta$ 

Fonte: Próprio autor

As tensões de sequência positiva, obtidas pelo bloco *PSC* são mostradas na figura 25, podendo ser observado o desequilíbrio da rede.

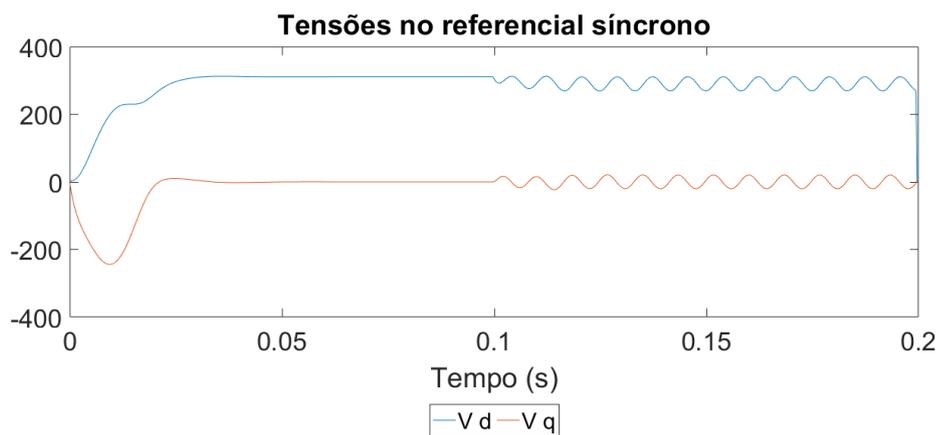
Figura 25 – Simulação 3 - Tensões $\alpha^+ \beta^+$



Fonte:Próprio autor

A figura 26 mostra o resultado da transformação de Park, ou seja, as tensões de sequência positiva no referencial síncrono. O desequilíbrio das tensões de entrada, causa uma oscilação nas componentes V_d^+ e V_q^+ , sendo as amplitudes destas proporcionais ao nível de desequilíbrio dos sinais de entrada.

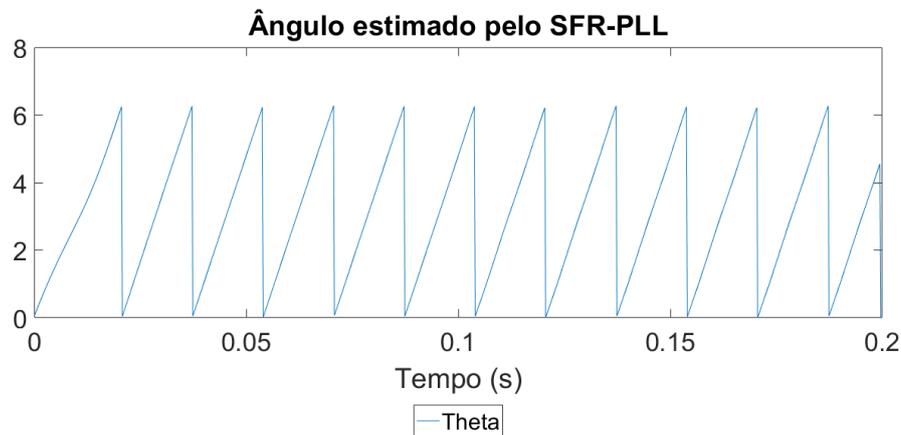
Figura 26 – Simulação 3 - Tensões $V_d^+ V_q^+$



Fonte:Próprio autor

E por fim a figura 27 mostra o ângulo estimado pelo algoritmo de sincronização.

Figura 27 – Simulação 3 - Ângulo θ' estimado



Fonte:Próprio autor

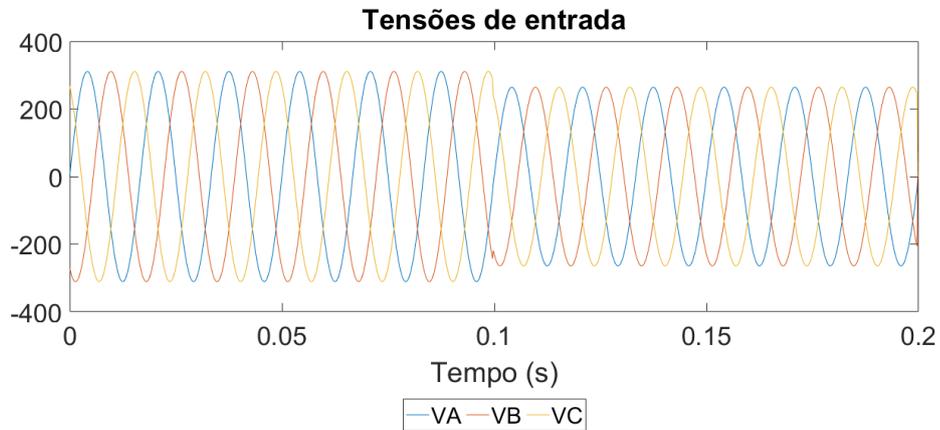
Nota-se aqui que mesmo com uma oscilações presente no sinal V_q^+ , o ângulo estimado está correto, isso se deve à ação do controlador PI realizando a filtragem e minimizando o erro do sinal.

4.4 SIMULAÇÃO 4 - AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Para observar a resposta do método à uma queda brusca nos níveis das tensões da rede, são exibidos a seguir, os resultados para uma queda de 15 % nos mesmos.

A figura 28 exibe as amostras das tensões da rede.

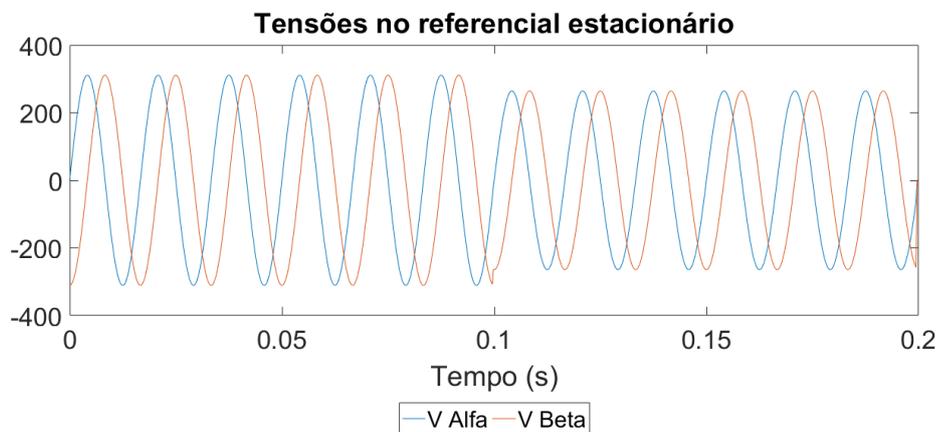
Figura 28 – Simulação 4 - Tensões de entrada



Fonte: Próprio autor

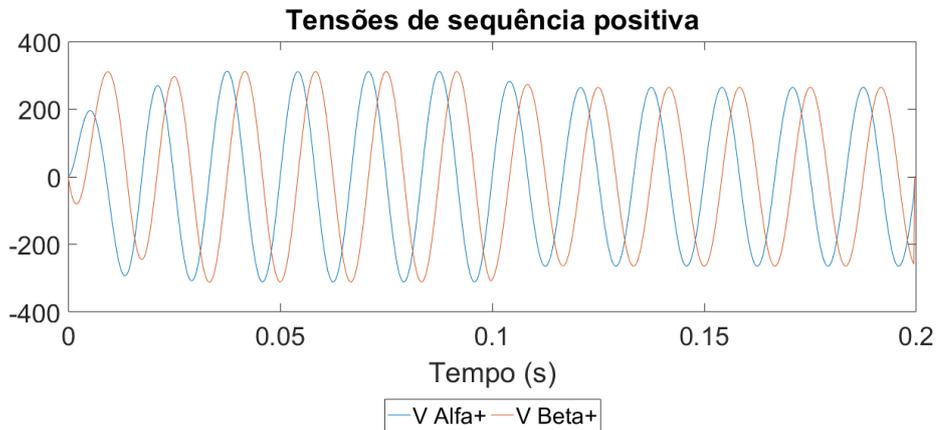
A figura 29 mostra as tensões obtidas no referencial estacionário, ou seja, resultado da transformada de Clarke.

Figura 29 – Simulação 4 - Tensões $\alpha\beta$



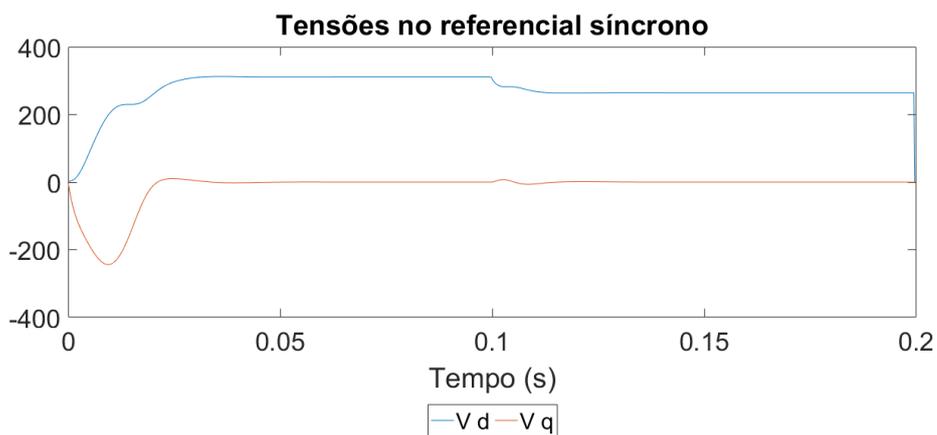
Fonte: Próprio autor

As tensões de sequência positiva, obtidas pelo bloco *PSC* são mostradas na figura 30, podendo ser observado o afundamento ocorrido no instante $t = 0,1$ segundos.

Figura 30 – Simulação 4 - Tensões $\alpha^+ \beta^+$ 

Fonte:Próprio autor

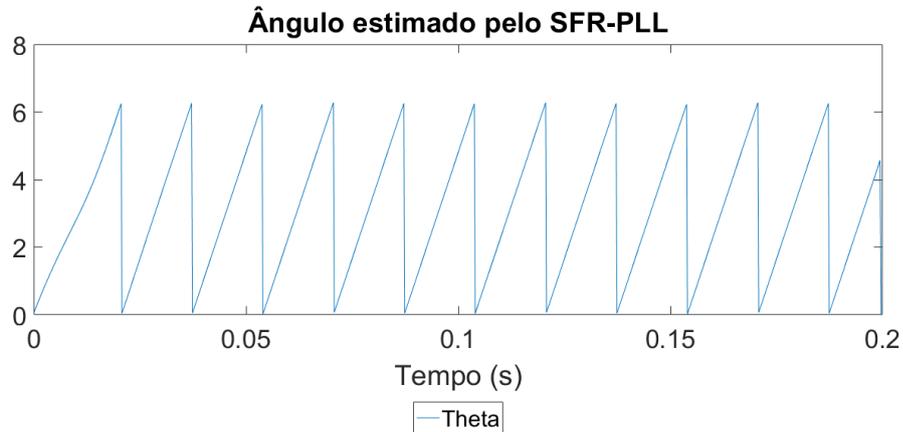
A figura 31 mostra o resultado da transformação de Park, ou seja, as tensões de sequência positiva no referencial síncrono. Neste caso, diferentemente da simulação 3, o afundamento das tensão não causa oscilações nas componentes V_d^+ e V_q^+ , apenas uma alteração proporcional na componente V_d^+ uma vez que esta representa o módulo da tensão de entrada.

Figura 31 – Simulação 4 - Tensões $V_d^+ V_q^+$ 

Fonte:Próprio autor

E por fim a figura 32 mostra o ângulo estimado pelo algoritmo de sincronização.

Figura 32 – Simulação 4 - Ângulo θ' estimado



Fonte:Próprio autor

Novamente pode ser observado que o ângulo estimado pelo algoritmo está correto, após o sinal ser filtrado, a pequena variação ocorrida na componente V_q^+ é imperceptível no valor de ângulo estimado.

As simulações mostradas neste capítulo, mostram que o método discretizado apresenta o funcionamento esperado. Foram realizados testes de variação de frequência, desequilíbrio de tensão e afundamento de tensão.

Os resultados obtidos, para as simulações de variação de frequência e afundamento de tensão, apresentaram variações pequenas nas componentes de tensões do referencial síncrono. Porém para a simulação de desequilíbrio de tensão, uma ondulação característica ficou evidente nas mesmas componentes. Entretanto, esta variação não é evidenciada no sinal do ângulo estimado, demonstrando que o controlador PI realiza a filtragem de maneira satisfatória.

Logo, pode-se concluir que o bom desempenho do método, está diretamente relacionado com o projeto dos coeficientes do controlador mencionado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de sincronização é crucial para o correto funcionamento de conversores de energia. Desta forma buscou-se na literatura um método que apresentasse resultados satisfatórios quando submetido à uma rede elétrica com condições adversas. O método DSOGI-PLL demonstrou-se apropriado para os requisitos desejados.

Cabe ressaltar que não foram objetivos deste trabalho, a avaliação dos parâmetros tanto do SOGI quanto do controlador PI , desta forma, para sistemas que necessitem de requisitos de desempenho diferente dos resultados aqui obtidos, deve ser feito um estudo e otimização dos parâmetros para que tais requisitos sejam satisfeitos.

Foram apresentados brevemente os conceitos necessários para a compreensão do método escolhido. Foi adotada a transformação bilinear para realizar a obtenção do modelo discreto, porém existem outros métodos que podem ser explorados em trabalhos futuros, possibilitando inclusive um estudo comparativo com os resultados obtidos neste trabalho.

A implementação discreta desenvolvida neste trabalho, apresentou resultados satisfatórios. Em todas as simulações, a implementação conseguiu estimar o ângulo e sincronizar de forma adequada com os sinais de entrada, considerando assim atendido o objetivo deste trabalho.

Sugere-se como trabalho futuro, a implementação em hardware do sistema e a validação deste modelo utilizando dados reais da rede elétrica.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. Modelagem e controle de conversores estáticos fonte de tensão utilizados em sistemas de geração fotovoltaicos conectados à rede elétrica de distribuição. *Juiz de Fora*, 2011. Citado na página 35.
- CASTRUCCI, P. D. L. *Controle Automático*. [S.l.]: LTC, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- CLARKE, E. *Circuit Analysis of AC Power Systems: Symmetrical and Related Components*. [S.l.]: J. Wiley & Sons, 1950. Citado na página 19.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, IEEE*, v. 37, n. 2, p. 1027–1140, 1918. Citado na página 21.
- NETO, J. M. G. *Técnica de controle para retificadores trifásicos operando sob condições de faltas na rede elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2015. Citado na página 17.
- NEVES, M. d. S. Desenvolvimento e implementação de métodos de sincronismo aplicados a sistemas de geração distribuída. *Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro, RJ*, 2016. Citado na página 26.
- PARK, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, IEEE*, v. 48, n. 3, p. 716–727, 1929. Citado na página 25.
- RODRIGUEZ, P. et al. New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions. In: *IEEE. 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.], 2006. p. 1–7. Citado 4 vezes nas páginas 17, 31, 32 e 34.
- TRISTÃO, N. A. d. F. Método de sincronização de tensão em malha fechada para conversores trifásicos. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 31.

Anexos

ANEXO A – ALGORITMO IMPLEMENTADO NO SOFTWARE MATLAB

```
clc;
close all;
clear all;

%Janela de Simulação
freqs = 5000;
t_simulado = 0.2;
n_pontos = t_simulado*freqs;
t = 0:(t_simulado/n_pontos):(t_simulado-(t_simulado/n_pontos));

%Parâmetros das tensões

frequencia = 60;
vf = 1;
vaa = 0.85;
vab = 0.85;
vac = 0.85;
periodo = 1/frequencia;
amplitude = sqrt(2)*220;

%Parâmetros dos modelos

K = sqrt(2);
% Ganho do SOGI - criticamente amortecido
omega_ff = 2*pi*frequencia;
% Frequência de referência = frequência da rede (radianos);
Fs = freqs;
% Frequência de amostragem do sinal;
T = 1/Fs;
% Período de amostragem do sinal;

fapi = 0.7;
fnpi = 200;
K_p = (2*(2*pi*fnpi)*fapi)/amplitude;
tau = (K_p*amplitude)/((2*pi*fnpi)^2);
```

```
%Vetores de armazenamento
v_abc = zeros(3,n_pontos);
v_alfa_beta = zeros(2,n_pontos);
v_alfa_linha = zeros(2,n_pontos);
v_beta_linha = zeros(2,n_pontos);
v_alfa_beta_mais = zeros(2,n_pontos);
v_dq = zeros(2,n_pontos);
omega_estimado = zeros(1,n_pontos);
theta_estimado = zeros(1,n_pontos);
```

```
%Variáveis
```

```
v_alfa_0 = 0;
v_alfa_1 = 0;
v_alfa_2 = 0;
```

```
v_beta_0 = 0;
v_beta_1 = 0;
v_beta_2 = 0;
```

```
v_alfa_linha_0 = 0;
v_alfa_linha_1 = 0;
v_alfa_linha_2 = 0;
```

```
qv_alfa_linha_0 = 0;
qv_alfa_linha_1 = 0;
qv_alfa_linha_2 = 0;
```

```
v_beta_linha_0 = 0;
v_beta_linha_1 = 0;
v_beta_linha_2 = 0;
```

```
qv_beta_linha_0 = 0;
qv_beta_linha_1 = 0;
qv_beta_linha_2 = 0;
```

```
omega_linha_0 = 0;
omega_linha_1 = 0;
```

```
v_alfa_mais = 0;
v_beta_mais = 0;

theta_0 = 0;
theta_1 = 0;

vd_0 = 0;
vd_1 = 0;
vq_0 = 0;
vq_1 = 0;

x_0 = 0;
x_1 = 0;

%Loop de cálculo

for k=1:((n_pontos*(1/2))-1)
    v_abc(1,k)= amplitude*sin(2*pi*frequencia*t(k));
    v_abc(2,k)= amplitude*sin(2*pi*frequencia*t(k) - 2*pi/3);
    v_abc(3,k)= amplitude*sin(2*pi*frequencia*t(k) + 2*pi/3);
end

for k=((n_pontos*(1/2))):((n_pontos*(2/2))-1)
    v_abc(1,k)= vaa*amplitude*sin(vf*2*pi*frequencia*t(k));
    v_abc(2,k)= vab*amplitude*sin(vf*2*pi*frequencia*t(k) - 2*pi/3);
    v_abc(3,k)= vac*amplitude*sin(vf*2*pi*frequencia*t(k) + 2*pi/3);
end

for k=1:(n_pontos-2)
    %Simulando a leitura do conversor AD)
    va = v_abc(1,k);
    vb = v_abc(2,k);
    vc = v_abc(3,k);

    %Calculando a transformada de Clarke para o instante k
    v_alfa_0 = (0.666666*va)-(0.333333*(vb+vc));
    v_beta_0 = (0.577350*(vb-vc));
```

```

%Armazenando no vetor para gerar o gráfico
v_alfa_beta(1,k) = v_alfa_0;
v_alfa_beta(2,k) = v_beta_0;

%Calculando as variáveis da FT do SOGI
A = (8/(T^2))-(2*(omega_linha_1^2));
B = ((2*K*omega_linha_1)/(T))-((4)/(T^2))-(omega_linha_1^2);
C = (2*K*omega_linha_1)/(T);
D = (((2*K*omega_linha_1)/(T))+4/(T^2))+omega_linha_1^2);
E = K*(omega_linha_1^2);

%Sogi alfa

v_alfa_linha_0 =
((A*v_alfa_linha_1)+(B*v_alfa_linha_2)+(C*(v_alfa_0 - v_alfa_2)))/D;

qv_alfa_linha_0 =
((A*qv_alfa_linha_1)+(B*qv_alfa_linha_2)+(E*(v_alfa_0 + (2*v_alfa_1) +
v_alfa_2)))/D;

%Armazenando no vetor para gerar o gráfico
v_alfa_linha(1,k) = v_alfa_linha_0;
v_alfa_linha(2,k) = qv_alfa_linha_0;

%Sogi beta
v_beta_linha_0 = ((A*v_beta_linha_1)+(B*v_beta_linha_2)+
(C*(v_beta_0 - v_beta_2)))/D;
qv_beta_linha_0 = ((A*qv_beta_linha_1)+(B*qv_beta_linha_2)+
(E*(v_beta_0 + (2*v_beta_1) + v_beta_2)))/D;

%Armazenando no vetor para gerar o gráfico
v_beta_linha(1,k) = v_beta_linha_0;
v_beta_linha(2,k) = qv_beta_linha_0;

%PSC

v_alfa_mais = (v_alfa_linha_0 - qv_beta_linha_0);
v_beta_mais = (qv_alfa_linha_0 + v_beta_linha_0);

```

```
%Armazenando no vetor para gerar o gráfico
v_alfa_beta_mais(1,k) = v_alfa_mais;
v_alfa_beta_mais(2,k) = v_beta_mais;

%Atualização das variáveis

v_alfa_linha_2 = v_alfa_linha_1;
v_alfa_linha_1 = v_alfa_linha_0;

v_alfa_2 = v_alfa_1;
v_alfa_1 = v_alfa_0;

v_beta_linha_2 = v_beta_linha_1;
v_beta_linha_1 = v_beta_linha_0;

v_beta_2 = v_beta_1;
v_beta_1 = v_beta_0;

%Calculando a transformada de Parke para o instante k
vd_0 = (v_alfa_mais*cos(theta_1))+(v_beta_mais*sin(theta_1));
vq_0 = (v_beta_mais*cos(theta_1))-(v_alfa_mais*sin(theta_1));

%Armazenando no vetor para gerar o gráfico
v_dq(1,k) = vd_0;
v_dq(2,k) = vq_0;

%SFRPLL

x_0 = (((K_p*T)+(K_p*tau*2))*vq_0)+(((K_p*T)-(K_p*tau*2))*vq_1)-
((2*tau)*x_1)/(2*tau);
omega_linha_0 = x_0 + omega_ff;
theta_0 = ((omega_linha_0 + omega_linha_1)*(T/2))+ theta_1;

omega_estimado(k) = omega_linha_0;

if(theta_0 > 6.283185)
```

```
        theta_0 = theta_0 - 6.283185;
    end

    theta_estimado(k) = theta_0;

    x_1 = x_0;
    vd_1 = vd_0;
    vq_1 = vq_0;
    omega_linha_1 = omega_linha_0;
    theta_1 = theta_0;

end

%figure
%subplot(4,2,1);
%plot(t,v_abc)
%title('V ABC');
%subplot(4,2,3);
%plot(t,v_alfa_beta)
%title('V ALFA BETA');
%subplot(4,2,5);
%plot(t,v_alfa_linha)
%title('V SOGI ALFA');
%subplot(4,2,7);
%plot(t,v_beta_linha)
%title('V SOGI BETA');
%subplot(4,2,2);
%plot(t,v_alfa_beta_mais)
%title('V ALFA BETA +');
%subplot(4,2,4);
%plot(t,v_dq)
%title('V D Q');
%subplot(4,2,6);
%plot(t,omega_estimado)
%title('OMEGA');
%subplot(4,2,8);
```

```
%plot(t,theta_estimado)
%title('THETA');

figure('Color','white','Units','Centimeters','PaperPosition',[1 1 15 7],
'Position',[1 1 15 7],'Tag','Fig1');
plot(t,v_abc)
title('Tensões de entrada');
legend('VA','VB','VC','Location','bestoutside','Orientation','horizontal');
xlabel('Tempo (s)');

figure('Color','white','Units','Centimeters','PaperPosition',[1 1 15 7],
'Position',[1 1 15 7],'Tag','Fig1');
plot(t,v_alfa_beta)
title('Tensões no referencial estacionário');
legend('V Alfa','V Beta','Location','bestoutside','Orientation','horizontal');
xlabel('Tempo (s)');

figure('Color','white','Units','Centimeters','PaperPosition',[1 1 15 7],
'Position',[1 1 15 7],'Tag','Fig1');
plot(t,v_alfa_beta_mais)
title('Tensões de sequência positiva');
legend('V Alfa+','V Beta+','Location','bestoutside','Orientation','horizontal');
xlabel('Tempo (s)');

figure('Color','white','Units','Centimeters','PaperPosition',[1 1 15 7],
'Position',[1 1 15 7],'Tag','Fig1');
plot(t,v_dq)
title('Tensões no referencial síncrono');
legend('V d','V q','Location','bestoutside','Orientation','horizontal');
xlabel('Tempo (s)');

figure('Color','white','Units','Centimeters','PaperPosition',[1 1 15 7],
'Position',[1 1 15 7],'Tag','Fig1');
plot(t,theta_estimado)
title('Ângulo estimado pelo SFR-PLL');
legend('Theta','Location','bestoutside','Orientation','horizontal');
xlabel('Tempo (s)');
```