

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LEONARDO SALVI

ESTUDO DO GERADOR SÍNCRONO VIRTUAL SINCRONIZADO À REDE

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM - RS
2020**

LEONARDO SALVI

ESTUDO DO GERADOR SÍNCRONO VIRTUAL SINCRONIZADO À REDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.

Orientador: Prof. Cássio Luciano Baratieri

ERECHIM - RS

2020

LEONARDO SALVI

ESTUDO DO GERADOR SÍNCRONO VIRTUAL SINCRONIZADO À REDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.

Erechim, 07 de dezembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Orientador)
URI Erechim

Eng. Me. Anderson José Balbino (Examinador)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Esp. Glênio Rigoni (Examinador)
URI Erechim

Dedico este trabalho aos meus pais

RESUMO

O presente trabalho concerne ao estudo de Geradores Síncronos Virtuais (VSG) conectados à rede. Uma revisão de literatura a respeito dos métodos de VSG desenvolvidos, seu princípio de funcionamento e objetivo, bem como os demais componentes inseridos no contexto de geração distribuída são especificados. Em seguida são apresentados os procedimentos metodológicos, tais como modelagem matemática do VSG, a modulação PWM para geração das ondas senoidais a serem inseridas na rede e a implementação de um método de conexão à rede a fim de sincronizar os componentes com as tensões geradas pelo VSG. Para tal foi utilizado o método PLL para conexão à rede, foram utilizadas para compensação de tensão, sincronismo e controle de velocidade do gerador. Para validação e simulação do sistema proposto usou-se o *software* PSIM®. Por fim, são apresentados os resultados das simulações do VSG, da modulação PWM e as correntes e tensões no ponto de conexão. Como resultado o sistema se mostrou capaz de gerar as tensões e correntes necessárias para manter um fluxo de potência desejado na rede, apresentando um leve erro enquanto operava isolado da mesma, porém uma implementação prática é possível. No entanto, o erro apresentado quando conectado à rede foi maior, devido ao controle de potência em malha aberta.

Palavras-chave: Gerador Síncrono Virtual. PWM. Conexão à rede.

ABSTRACT

The present work concerns the study of Virtual Synchronous Generators (VSG) connected to networks. A literature review regarding the VSG methods developed, their operating principle and objectives, as well as other components inserted in the context of distributed generation are specified. In addition, methodological procedures are presented, such as mathematical modeling of VSG, PWM modulation to generate sine waves to be inserted in the network and the implementation of a method of connection to the network in order to synchronize components with voltages generated by the VSG. For this, the PLL method was used to connect to the grid, they were used for voltage compensation, synchronism and generator speed control. PSIM® software was used for validation and simulation of the proposed system. Finally, results of VSG simulations, PWM modulation, currents and voltages at the connection point are presented. As result, the system proved to be capable of generating voltages and currents necessary to maintain a desired power flow in the network, presenting a slight error while operating isolated from it, however a practical implementation is possible. Nevertheless, the error presented when connected to a network was greater, due to the open loop power control.

Keywords: Virtual Synchronous Generator. PWM. Grid conecction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vista esquemática de geradores síncronos trifásicos: (a) dois polos e (b) quatro polos.....	16
Figura 2 – VSYNC desenvolvido no <i>European Research Framework</i>	18
Figura 3 – Primeira metodologia de VSG desenvolvido pela IEPE.....	18
Figura 4 – Método 2 desenvolvido pela IEPE.....	19
Figura 5 – Conceito de VSG desenvolvido pela KHI.....	19
Figura 6 – VSG desenvolvido na Osaka University.....	20
Figura 7 – Sistema governador desenvolvido pela Osaka University.....	20
Figura 8 – Topologia de um inversor trifásico.....	21
Figura 9 – Formas de onda <i>Single Pulse Width Modulation</i>	23
Figura 10 – Formas de onda <i>Multiple Pulse Width Modulation</i>	24
Figura 11 – Formas de onda SPWM.....	25
Figura 12 – Diagrama de blocos SF-PLL.....	26
Figura 13 – Diagrama de blocos PQ-PLL.....	27
Figura 14 – Diagrama de blocos DSRF-PLL.....	27
Figura 15 – Diagrama de blocos SSI-PLL.....	28
Figura 16 – Diagrama de blocos SSI-PLL.....	29
Figura 17 – Diagrama de blocos DDSRF-PLL.....	29
Figura 18 – Conceito de um VSG.....	31
Figura 19 – Circuito equivalente de um gerador síncrono.....	32
Figura 20 – Modelo implementado no <i>software</i> de simulação.....	34
Figura 21 – Malha de controle de sincronismo.....	35
Figura 22 – Circuito de cálculo do valor RMS.....	36
Figura 23 – Malha de controle de tensão.....	36
Figura 24 – Malha de controle de rotação.....	36
Figura 25 – Circuito inversor.....	37
Figura 26 – Circuito PWM.....	39
Figura 27 – Sincronismo à rede.....	41
Figura 28 – Sistema desenvolvido.....	43
Figura 29 – Tensão induzida no gerador.....	45
Figura 30 – Tensão de fase no estator.....	46
Figura 31 – Erros de rastreamento e compensação nas malhas de controle.....	46
Figura 32 – Corrente de fase do gerador no tempo de conexão à rede.....	47
Figura 33 – Corrente de fase do gerador no aumento de potência.....	48
Figura 34 – Tensão induzida do gerador, tensão de fase do gerador e tensão no ponto de conexão.....	48
Figura 35 – Tensão modulante do braço do inversor.....	49
Figura 36 – Vista aproximada da tensão modulada pelo PWM.....	50
Figura 37 – Partida do gerador e sincronismo das tensões.....	51

Figura 38 – Potências e tensões no ponto de conexão com a rede	52
Figura 39 – Comparação de potência tensão e velocidade de rotação com demanda de reativo indutivo.....	52
Figura 40 – Comparação de potência tensão e velocidade de rotação com demanda de reativo capacitivo	53
Figura 41 – Corrente de geração de de rede no momento de conexão com a rede	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de comparação de métodos PLL.....	30
Tabela 2 – Tabela de parâmetros.	44
Tabela 3 – Tabela de parâmetros do gerador.	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VSG	<i>Virtual Synchronous Generator</i>
SOGI	<i>Second-order Generalized Integrator</i>
VISMA	<i>Virtual Synchronous Machine</i>
IEPE	<i>Institute of Electrical Power Engineering</i>
KHI	<i>Kawasaki Heavy Industries</i>
PLL	<i>Phase-locked loop</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
SV	<i>Space Vector</i>
SHE	<i>Selective Harmonic Eliminated</i>
SPWM	<i>Single Pulse Width Modulation</i>
SF	<i>Synchronous Frame</i>
DSRF	<i>Double Synchronous Reference Frame</i>
SSI	<i>Sinusoidal Signal Integrator</i>
PCC	Ponto de Conexão Comum
DSOGI	<i>Double Second Order Generalized Integrator</i>
DDSRF	<i>Decoupled Double Synchronous Reference Frame</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Coeficiente de atrito mecânico [N.m.s]
E_a	Tensão induzida fase a [V]
E_b	Tensão induzida fase b [V]
E_c	Tensão induzida fase c [V]
J	Coeficiente de momento de inércia mecânica [kg.m ²]
I_a	Corrente armadura a [A]
I_b	Corrente armadura b [A]
I_c	Corrente armadura c [A]
L_s	Indutância de fase [H]
R_s	Resistência de fase [Ω]
V_a	Tensão no estator a [V]
V_b	Tensão no estator b [V]
V_c	Tensão no estator c [V]
v_{ab}	Tensão ab [V]
v_{bc}	Tensão bc [V]
v_{ca}	Tensão ca [V]
v_{ag}	Tensão fase a ao terra [V]
v_{bg}	Tensão fase b ao terra [V]
v_{cg}	Tensão fase c ao terra [V]
v_0	Tensão modulada PWM [V]
V_{cc}	Tensão barramento [V]
ω'	Velocidade angular [rad/s]
θ'	Posição angular [rad]
ϕ	Fluxo magnético [Wb]
ω	Velocidade de rotação [rad/s]
θ	Ângulo de rotação [rad]
L	Indutor [H]
C	Capacitor [F]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Gerador síncrono	15
2.2 Gerador Síncrono Virtual	16
2.2.1 Conceito VSYNC	17
2.2.2 Conceito <i>Institute of Electrical Power Engineering</i>	17
2.2.3 Conceito <i>Kawasaki Heavy Industries</i>	19
2.2.4 Conceito Osaka University	19
2.3 Inversor	20
2.3.1 Modulação <i>Pulse Width Modulation</i>	22
2.3.1.1 Single Pulse Width Modulation	22
2.3.1.2 Multiple Pulse Width Modulation	23
2.3.1.3 Sinusoidal Pulse Width Modulation	23
2.3.1.4 Space Vector	24
2.4 Conexão à Rede	25
2.4.1 Synchronous Frame - Phase-Locked Loop	26
2.4.2 PQ-PLL	26
2.4.3 Double Synchronous Reference Frame-PLL	27
2.4.4 Sinusoidal Signal Integrator-PLL	28
2.4.5 Double Second Order Generalized Integrator-PLL	28
2.4.6 Decoupled Double Synchronous Reference Frame-PLL	28
3 METODOLOGIA	31
3.1 Modelagem do gerador síncrono	31
3.2 Inversor	36
3.3 Conexão à rede	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 Sistema VSG conectado à rede	42
4.1.1 Simulação do VSG	44
4.1.2 Simulação PWM	49
4.1.3 Conexão à rede	50
5 CONCLUSÕES	55

5.1 Perspectivas Futuras	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Segundo Krause, Wasynczuk e Pekarek (2012), aproximadamente toda a energia elétrica gerada é proveniente de geradores síncronos de grande porte, geralmente, instalados em grandes centrais geradoras como a hidroelétrica e a termoeletrica. Conforme Boldea (2016), esses geradores são capazes de manter energia cinética em caso de distúrbios ou de mudanças bruscas na geração, permitindo que o sistema amortecia transitórios após uma perturbação, resultando num sistema equilibrado.

Nos últimos anos, com o aumento da preocupação ambiental e também como forma de suprir a elevada demanda de energia elétrica da sociedade moderna, surgiram fontes de energias alternativas como a fotovoltaica e a eólica, as quais passaram a ter um papel fundamental na geração distribuída (LI et al., 2017) .

Um efeito negativo da ampla utilização de sistemas distribuídos, apontado por Driesen e Visscher (2008), ocorre quando grande parte dos geradores síncronos é substituída por sistemas não síncronos. No caso, o sistema elétrico perde significativa parte da capacidade de amortecer distúrbios elétricos, contribuindo para uma elevada variação de frequência na rede, o que pode deixá-la instável. Essa instabilidade, de acordo com Boldea (2016), ocorre devido a uma não injeção de energia balanceada em um intervalo de tempo adequado. Outro grande desafio está em sincronizar o inversor com a rede e mantê-lo sincronizado.

Tendo em vista a atualidade do assunto, bem como a sua relevância, o presente trabalho tem como objetivo o estudo de um Gerador Síncrono Virtual (do inglês, *Virtual Synchronous Generator* (VSG)) aplicado na geração distribuída. Primeiramente, será realizada a revisão de literatura sobre as metodologias utilizadas nos sistemas VSG, o princípio de funcionamento de um gerador síncrono real, o sistema de inversor utilizado nas fontes alternativas e alguns métodos de conexão à rede. Posteriormente, será modelado e simulado cada parte do sistema de maneira independente, utilizando o *software* PSIM® para efetuar as simulações. Por fim, na apresentação dos resultados obtidos, será possível demonstrar que o sistema consegue gerar as tensões necessárias para estabelecer a conexão com a rede elétrica.

1.1 Objetivos

Os objetivos geral deste trabalho é aplicar a metodologia de gerador síncrono virtual em um sistema de geração distribuída simplificado. Para atender o objetivo principal, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as proposições de geradores síncronos virtuais;
- Definir um sistema de processamento de energia baseado em geração distribuída;
- Definir e modelar o gerador síncrono;
- Investigar os métodos de conexão à rede;
- Validar de modo computacional e independente cada parte do sistema.
- Implementação de um sincronismo com a rede;
- Implementação do sistema mecânico do gerador;
- Implementação de malhas de controle;
- Inserção de uma inércia virtual;
- Validar de modo computacional do sistema.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma revisão de literatura a respeito dos conceitos básicos dos dispositivos que compõem o VSG, as metodologias propostas para este sistema, o inversor utilizado para transformar a energia gerada pelas fontes distribuídas e aplicá-las na rede elétrica, a modulação a ser utilizada e alguns métodos de conexão com a rede elétrica.

Algumas das literaturas pesquisadas para este trabalho como em Chen et al. (2011), que utilizou o conceito de VSG por controle de histerese a fim de controlar os requisitos de potência em uma rede trifásica por meio de uma inércia virtual. Younis et al. (2015), propôs a sincronização de uma rede monofásica antes da conexão com a rede para que rastreasse a frequência da mesma sem a utilização de um PLL. Em sua tese Ashraful Islam (2017) investigou os modelos matemáticos dos VSG's e os modelos de controle para gerar uma inércia virtual em uma rede ilhada. Já o trabalho de Li e Chen (2019), com o intuito de conectar o VSG de maneira suave à rede e reduzir a corrente no PPC, utilizou o método *Second-Order Generalized Integrator*(SOGI) sem o bloco do PLL e demonstrou que esse método não afeta a qualidade da potência.

2.1 Gerador síncrono

De acordo com Krause, Wasynczuk e Sudhoff (2010), grande parte da energia elétrica gerada no mundo é proveniente de geradores síncronos, sejam eles movidos por turbinas a vapor, hidráulica ou eólica e são a principal fonte utilizada para converter energia mecânica em energia elétrica.

Segundo Chapman (2013), os geradores síncronos possuem esta definição pois a frequência elétrica produzida por eles está vinculada à velocidade mecânica de rotação. O rotor é constituído de um eletroímã e o campo magnético aponta para qualquer direção na qual o rotor for posicionado. A taxa, onde o campo magnético rotaciona, está atrelada com a frequência elétrica do estator.

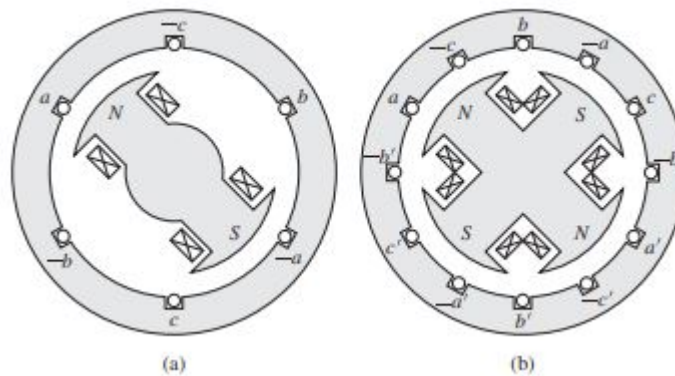
O campo magnético de um gerador síncrono é produzido no rotor, que pode ser composto por um ímã permanente ou eletroímã obtido quando se aplica uma corrente CC. No rotor estão localizados os enrolamentos de campo que produzem o campo magnético principal e, no estator, estão os enrolamentos de armadura, nos quais a tensão principal é induzida (CHAPMAN, 2013).

Para gerar uma tensão trifásica existe, no estator um enrolamento equilibrado, ou seja, uma fase está deslocada em 120° da outra, como pode ser visto na Figura 1. Para um gerador

síncrono, o fluxo no entreferro depende do módulo da corrente de excitação no enrolamento de campo e também do valor da corrente de armadura (TORO, 1994).

Ao fornecer potência elétrica para uma carga, a corrente de armadura cria no entreferro um fluxo magnético na velocidade síncrona. Esse fluxo reage ao fluxo criado pela corrente de campo resultando em um conjugado eletromecânico a partir da tendência que esses dois campos têm a se alinharem. Esse conjugado opõe-se à rotação e, para mantê-la, é inserido um torque mecânico, possibilitando assim, a conversão de energia mecânica em elétrica (UMANS, 2014).

Figura 1 – Vista esquemática de geradores síncronos trifásicos: (a) dois polos e (b) quatro polos



Fonte: Adaptado de Umans (2014)

2.2 Gerador Síncrono Virtual

Conforme Bevrani, Ise e Miura (2014), diferentemente das enormes usinas de geração de energia convencional que possuem geradores síncronos, a geração eólica possui um gerador com a velocidade variável do vento e a geração fotovoltaica não possui nenhum. Com a disseminação da geração distribuída, a ausência do gerador síncrono causa um aumento na instabilidade da rede. Uma forma encontrada para sanar esse problema veio através da criação de uma inércia virtual, onde se faz uso de um armazenamento de energia de curto tempo em conjunto com um inversor e métodos de controle.

De acordo com Driesen e Visscher (2008), o gerador se comporta de maneira “virtual” por um curto período de tempo, porém é necessário que possuam algumas características tais como:

- Prevenir instabilidades na rede e *blackouts* devido a elevada variação de frequência causada por uma geração distribuída;

- Manter a segurança da rede em condições de falha;
- Estabelecer uma base para a conexão em baixa tensão, em áreas com geração descentralizada.

O conceito de geradores síncronos surgiu em 2007 através de diversos grupos de pesquisa como o *European Research Framework* com o conceito de VSYNC, o conceito *Virtual Synchronous Machine*(VISMA) pelo *Institute of Electrical Power Engineering*(IEPE) na Alemanha, o VSG da *Kawasaki Heavy Industries* (KHI) e a *Osaka University* ambos no Japão (ISE; BEVRANI, 2016).

2.2.1 Conceito VSYNC

De acordo com Ise e Bevrani (2016) Loix et al. (2009) nesse conceito a unidade de armazenamento de energia é conectada na rede por um inversor e um filtro LCL (indutor, capacitor). O controle do VSG produz uma corrente de referência a ser utilizada no controlador de corrente. O *Phase-locked loop* (PLL) usa a tensão terminal V_g para produzir uma mudança de frequência. Além disso, fornece um ângulo de fase de referência da parte rotativa do controlador dq para o inversor (ISE; BEVRANI, 2016; LOIX et al., 2009) .

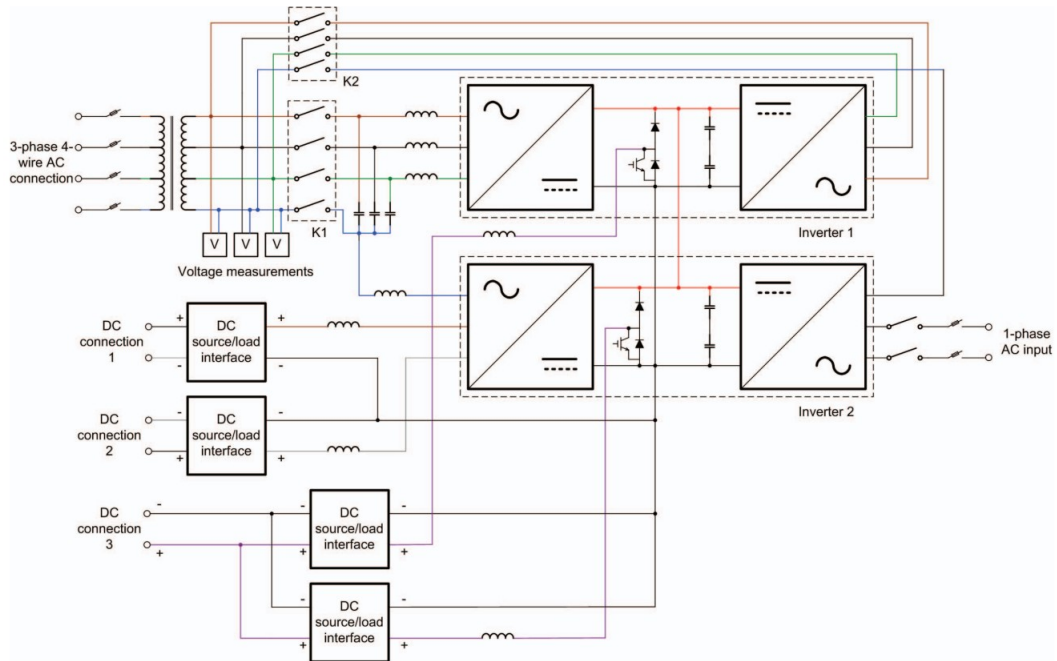
A Figura 2 mostra a topologia de um sistema VSYNC. De acordo com Loix et al. (2009), o sistema é composto por dois inversores trifásicos com módulos *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBTs), sendo que cada um compartilha o mesmo barramento Corrente Contínua (CC). Para conectar uma rede trifásica de Corrente Alternada (CA) é utilizado as três meia ponte do primeiro inversor e a meia ponte do segundo inversor.

2.2.2 Conceito *Institute of Electrical Power Engineering*

Nesse conceito é implementado um modelo ideal e linear de uma máquina síncrona para produzir uma corrente de referência ao controle de histerese de um inversor. A tensão da rede é medida e, usando um gerador síncrono modelado, a corrente de referência é produzida aciona o inversor por meio do controle de histerese. E_p é a tensão de referência semelhante a força eletromotriz de um gerador síncrono e o torque mecânico virtual (T_m) se assemelha ao torque do gerador. Adicionou-se um algoritmo para compensar pequenos distúrbios e melhorar a qualidade da tensão na rede (ISE; BEVRANI, 2016) .

Esse sistema possui dois métodos (Chen et al., 2012). O Método 1, apresentado na

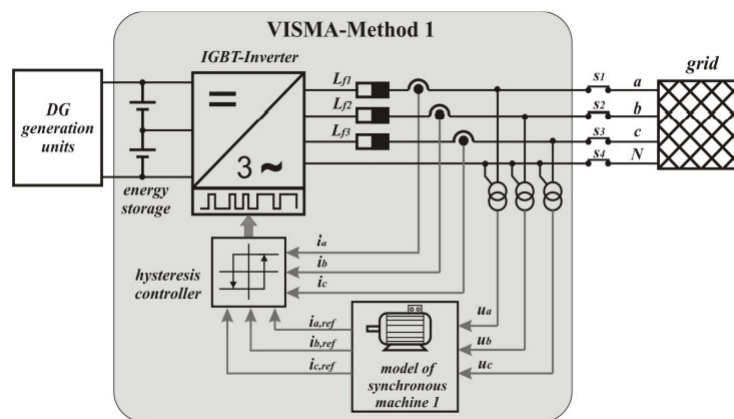
Figura 2 – VSYNC desenvolvido no *European Research Framework*



Fonte: Adaptado de Loix et al. (2009)

Figura 3, mede em tempo real a tensão da rede para fornecer ao VSG os parâmetros para que o controlador entregue, ao estator, as correntes necessárias à rede, naquele determinado tempo.

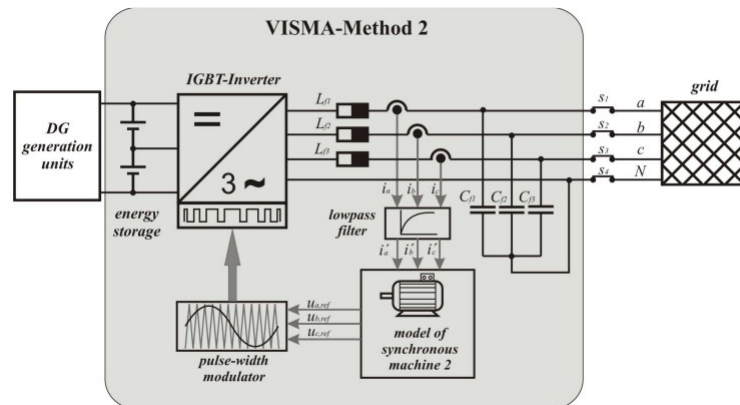
Figura 3 – Primeira metodologia de VSG desenvolvido pela IEPE



Fonte: Adaptado de Chen et al. (2012)

No Método 2, Figura 4, as correntes são medidas e é calculada a tensão de referência. As correntes são enviadas a uma modulação PWM que gerará os sinais aos inversores. O indutor (L_f) e o capacitor (C_f) são usados como filtros para harmônicas. O filtro passa-baixa deve ser aplicado com o intuito de reduzir distúrbios nas correntes e assim evitar erros no processo de cálculo do método.

Figura 4 – Método 2 desenvolvido pela IEPE

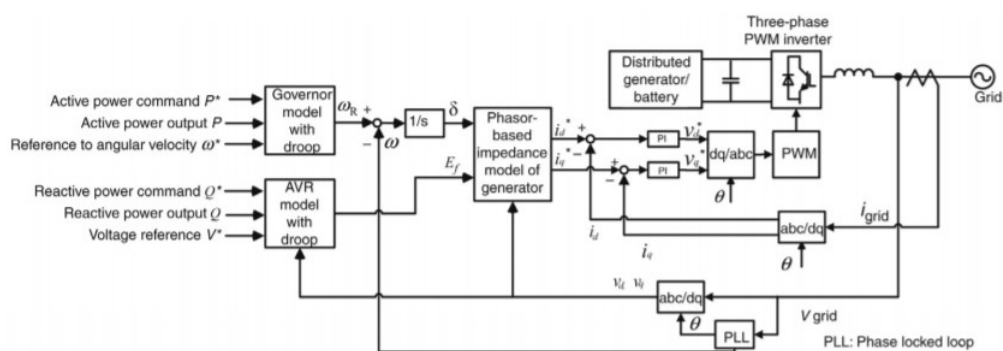


Fonte: Adaptado de Chen et al. (2012)

2.2.3 Conceito Kawasaki Heavy Industries

Nessa metodologia se faz uso do diagrama de fase do gerador síncrono para produzir uma corrente de referência, onde a relação entre tensão e corrente de fase é algébrica. Um ângulo δ é produzido por um *governor* que envia um comando com a potência ativa, e também, realimenta o sinal de referência à velocidade angular. O regulador de tensão produz a força eletromotriz da potência reativa realimentando a tensão de referência (ISE; BEVRANI, 2016; HIRASE et al., 2013).

Figura 5 – Conceito de VSG desenvolvido pela KHI



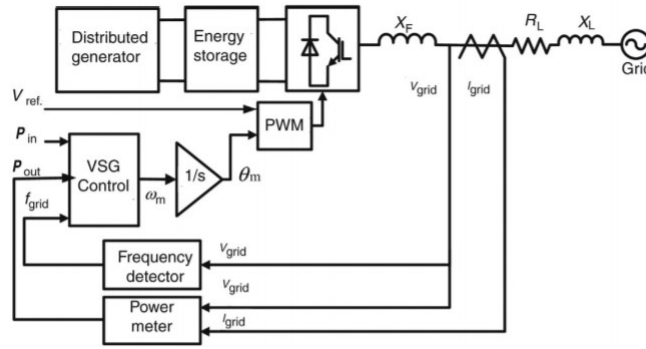
Fonte: Adaptado de Hirase et al. (2013)

2.2.4 Conceito Osaka University

Utiliza o conceito da equação de balanço do gerador síncrono, fazendo uso dos sinais medidos de corrente e tensão nos terminais do gerador virtual, sendo que a potência e a frequência

podem ser calculadas. O modelo que rege é mostrado na Figura 6 e é implementado para ajustar a potência de saída baseada na frequência (ISE; BEVRANI, 2016; SAKIMOTO; MIURA; ISE, 2011).

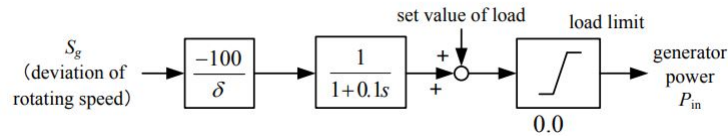
Figura 6 – VSG desenvolvido na Osaka University



Fonte: Adaptado de Sakimoto, Miura e Ise (2011)

A frequência na rede é detectada pelo bloco PLL. A Figura 7, mostra que ω_m é calculado e enviado para o integrador, onde o ângulo de fase é produzido. A V_{ref} determina a magnitude de tensão no terminal do inversor, implementando um controlador e resultando em uma tensão regulada e uma potência reativa no terminal do VSG. O ângulo de fase e a magnitude de tensão são usados como referência ao VSG gerando pulsos ao inversor. Os valores de inércia (J) e coeficiente de amortecimento (D) determinam as constantes de tempo. De acordo com Ise e Bevrani (2016) e com Sakimoto, Miura e Ise (2011), a seleção de um valor adequado para eles é trabalhosa.

Figura 7 – Sistema governador desenvolvido pela Osaka University



Fonte: Adaptado de Sakimoto, Miura e Ise (2011)

2.3 Inversor

Segundo Shrestha (2016), o inversor é um dispositivo de eletrônica de potência utilizado para converter energia CC em CA. A energia CC é fixa, no entanto, a CA é variável. Altera-se a tensão de saída do inversor ao se mudar o ganho, que é definido como a razão da tensão de

pico da saída CA pela tensão CC de entrada, de modo que o inversor consiga emular a tensão e a frequência a serem fornecidas.

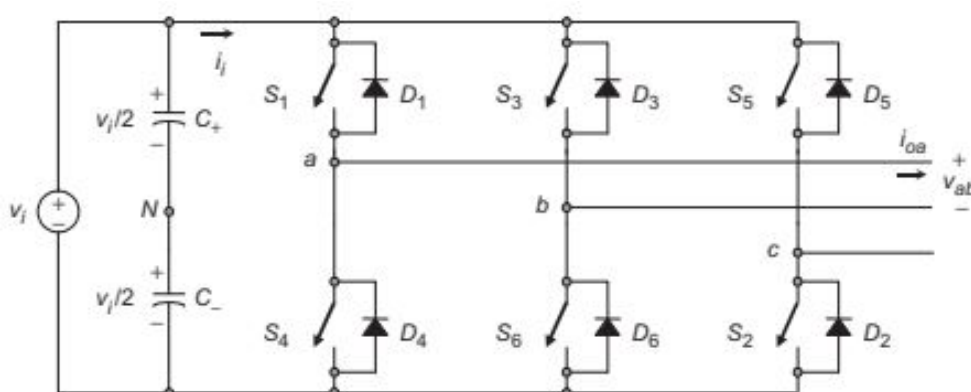
Para Rashid (2017), a principal aplicação do inversor trifásico é fornecer uma tensão, onde amplitude, frequência e fase sejam sempre controladas, sendo que o inversor é composto por chaves e diodos. A geração das formas de onda ocorre de maneira rápida, e são formadas por componentes fundamentais que se comportam como uma onda senoidal pura e contém harmônicas. A modulação geralmente se baseia nas técnicas *carrier-based* como *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM), *Space Vector* (SV) e *Selective Harmonic Eliminated* (SHE).

Rashid (2017) diz que para o inversor operar de forma adequada é necessário seguir algumas regras:

- As chaves do mesmo braço não podem ser acionadas simultaneamente;
- Deve ser adicionado um diodo em antiparalelo a cada chave a fim de fornecer um caminho para a corrente da carga;
- Na prática, deve-se levar em consideração um *dead time* em cada chave, para evitar que mais de uma chave do mesmo braço seja acionada.

Para aplicações de média e alta potência são utilizados inversores trifásicos onde amplitude, fase e frequência das tensões são compatíveis. A topologia básica para inversores trifásicos é mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Topologia de um inversor trifásico



Fonte: Adaptado de Rashid (2017)

2.3.1 Modulação *Pulse Width Modulation*

Na eletrônica de potência a conversão de tensão, corrente ou frequência é dada pelo uso de chaves eletrônicas baseadas em semicondutores. Essas chaves operam em dois níveis: abertas ou fechadas.

Peddapelli (2017) diz que uma maneira de acionar essas chaves é a utilização de PWM. Essa técnica é uma das mais pesquisadas na área da eletrônica de potência por mais de três décadas.

As modulações têm como princípio a criação de um trem de pulsos que tem a mesma média fundamental de uma onda de referência. A principal dificuldade é que esse trem de pulsos também contém harmônicas indesejadas, devendo ser minimizadas. Além disso, para qualquer metodologia PWM o objetivo principal é identificar o tempo em que cada chave ficará ligada. Isso cria a tensão ou a corrente de saída desejada (baixa frequência) (D. Grahame Holmes, 2004).

De acordo com Peddapelli (2017), existem diversos tipos de técnicas para a modulação PWM. A diferença entre elas está nos métodos que são implementadas, mas em todas as técnicas o objetivo é gerar uma tensão de saída e, com o auxílio de filtros, resultará em uma senoide de qualidade adequada, com frequência e magnitude desejada.

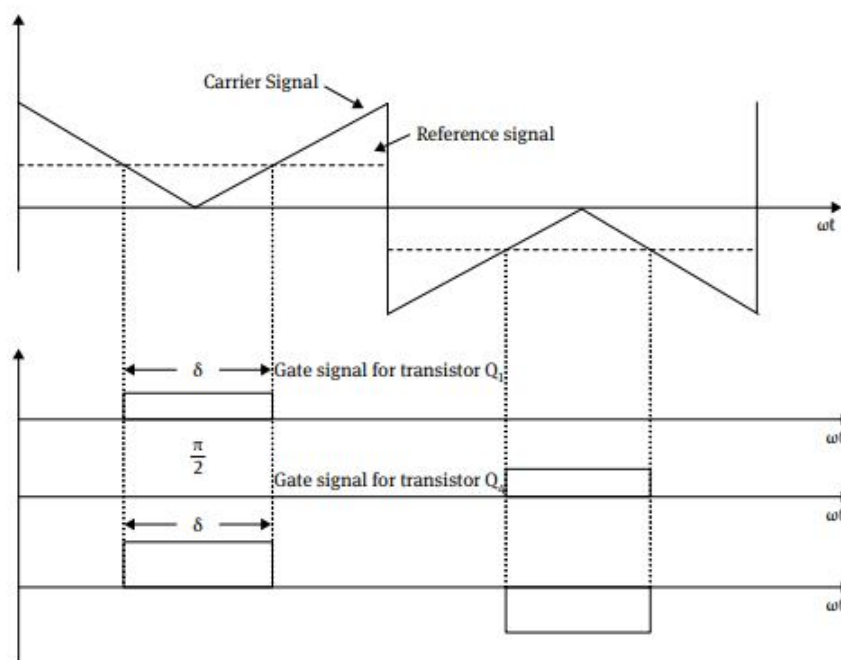
Algumas das técnicas utilizadas para a modulação PWM serão descritas a seguir.

2.3.1.1 *Single Pulse Width Modulation*

Nessa técnica a largura do pulso varia e há apenas um pulso pela metade, por ciclo. Quando o sinal de referência retangular e a onda triangular são comparados, os sinais de bloqueio são gerados. A frequência do sinal de referência determina a frequência fundamental da tensão de saída (PEDDAPELLI, 2017)

A vantagem dessa técnica é não possuir harmônicas pares, pois existe uma simetria entre a tensão de saída e as enésimas harmônicas, podendo ser eliminadas caso suas larguras de pulso sejam iguais a $2\pi/n$. Como desvantagem a tensão de saída possui uma grande quantidade de harmônicas. Na Figura 9, tem-se os formatos de ondas para essa técnica.

Figura 9 – Formas de onda *Single Pulse Width Modulation*



Fonte: Adaptado de Peddapelli (2017)

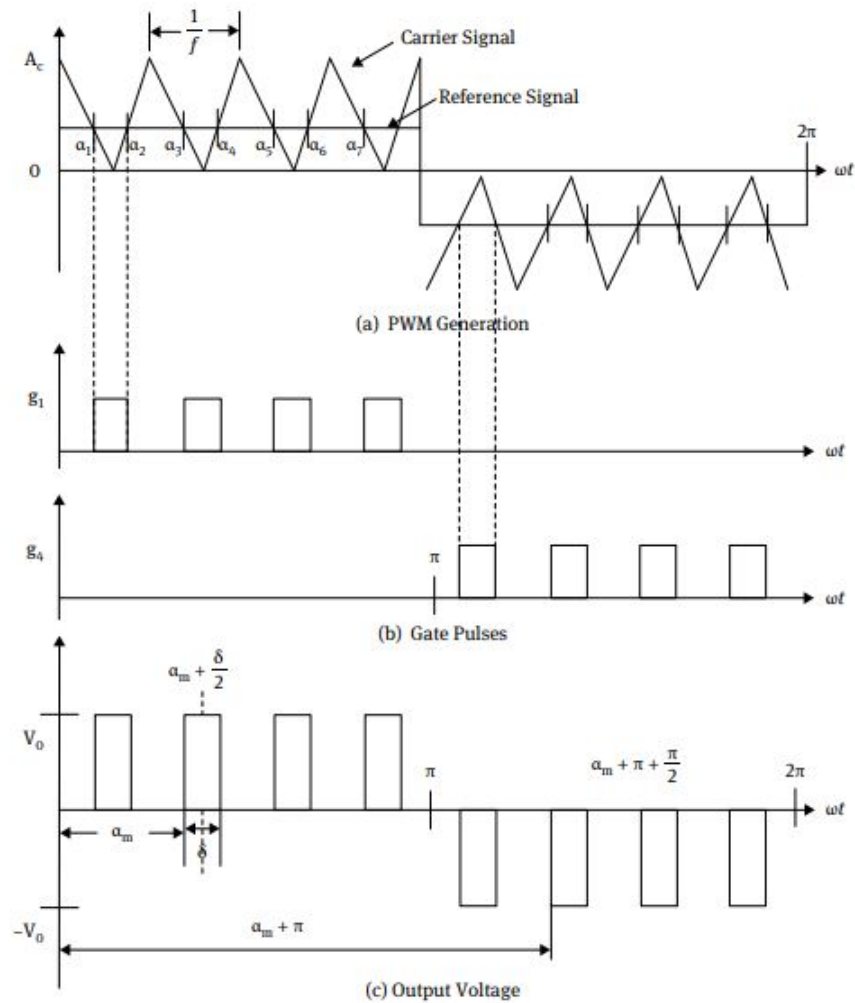
2.3.1.2 *Multiple Pulse Width Modulation*

De acordo com Peddapelli (2017) nessa técnica vários pulsos equidistantes são gerados. O uso desses vários pulsos, em cada meio ciclo da tensão de saída, faz com que o conteúdo das harmônicas seja reduzido. As amplitudes das harmônicas de ordem inferior são reduzidas, no entanto, a componente fundamental da tensão de saída é menor e as amplitudes das harmônicas de ordem superior aumentam significativamente, havendo perdas de comutação. Tem-se na Figura 10, os formatos de onda para essa técnica de modulação.

2.3.1.3 *Sinusoidal Pulse Width Modulation*

Segundo Peddapelli (2017), o SPWM refere-se à geração de saídas PWM com onda senoidal como sinal de modulação. Nesse método de modulação, as instâncias ligada e desligada dos sinais PWM podem ser determinadas pela comparação de um sinal de referência com uma onda triangular de alta frequência. A frequência da tensão de saída pode ser determinada pela frequência da onda de modulação.

A amplitude de pico da onda moduladora determina o índice de modulação e, por sua vez, controla o valor RMS da tensão de saída. Quando o índice de modulação é alterado, o valor RMS da tensão de saída também muda. Essa técnica melhora significativamente o fator de distorção

Figura 10 – Formas de onda *Multiple Pulse Width Modulation*

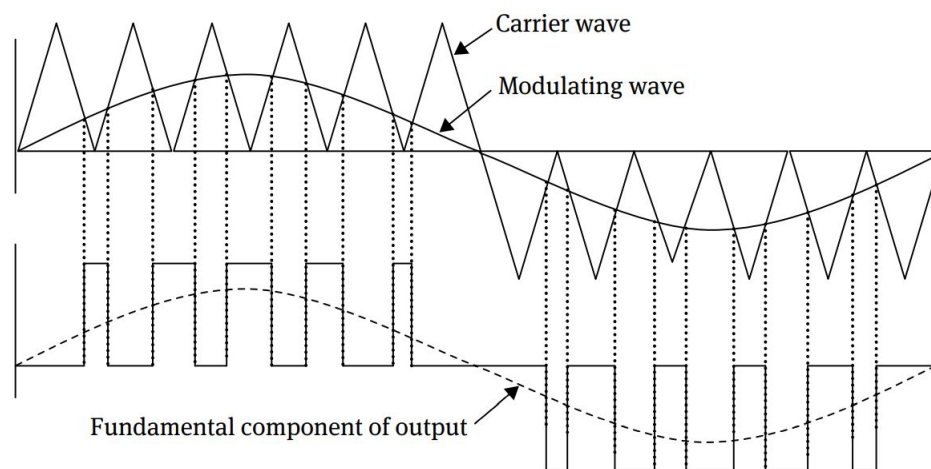
Fonte: Adaptado de Peddapelli (2017)

em comparação com outras formas de modulação multifásica e elimina todas as harmônicas menores ou iguais a $(2n - 1)$, onde n é definido como o número de pulsos por meio ciclo da onda senoidal. A tensão de saída do inversor contém harmônicas. No entanto, as harmônicas vão para a faixa em torno da frequência da portadora e seus múltiplos (PEDDAPELLI, 2017). Os formatos de onda para essa técnica são apresentados na Figura 11.

2.3.1.4 Space Vector

Nesse método é utilizado uma tensão de saída aproximada, em que os três vetores de saída mais próximos dos nós do triângulo possuem o vetor de referência no diagrama do vetor espacial do inversor. Quando o vetor de referência muda de uma região para outra, pode-se induzir uma mudança abrupta no vetor de saída nesse caso se faz necessário calcular as sequências e o tempo de comutação para cada alteração do local da tensão de referência (PEDDAPELLI, 2017)

Figura 11 – Formas de onda SPWM



Fonte: Adaptado de Peddapelli (2017)

Segundo Marian P. Kazmierkowski, Ramu Krishnan, Frede Blaabjerg (2002), essa técnica se tornou popular por sua simplicidade. Ainda de acordo com o autor, um conversor trifásico de dois níveis fornece oito níveis possíveis de acionamento das chaves.

2.4 Conexão à Rede

Os métodos de conexão à rede, segundo Teodorescu, Liserre e Rodríguez (2011), devem ser cuidadosamente projetados e controlados para que se obtenha o melhor desempenho do sistema a ser utilizado, sendo a sincronização com as tensões trifásicas da rede um dos aspectos mais importantes. O conversor conectado à rede é sensível a distúrbios e seu sistema de controle pode acabar perdendo as referências dos sinais nesses períodos, o que pode ocasionar o acionamento dos sistemas de proteção do equipamento. O conversor pode trabalhar para atenuar os distúrbios e os efeitos indesejados. Para tal o conversor do sistema de sincronismo deve estar precisamente calibrado e o sistema de controle deve reagir de acordo com qualquer condição de operação.

Ainda de acordo com Teodorescu, Liserre e Rodríguez (2011), o sistema de conexão trifásico deve ser devidamente projetado para rejeitar harmônicas de ordem elevada e identificar as sequências dessas componentes de maneira rápida e precisa.

Para que os sistemas de energia renovável sejam conectados à rede elétrica existente, é necessário levar em consideração alguns fatores importantes. Para Pinto (2014), na conexão do sistema eólico na rede, o fluxo de potência é modificado elevando a tensão naquele ponto de interface. É essencial observar a potência de curto circuito do sistema, a potência no ponto de

conexão, o fator de potência e os eventuais distúrbios causados na rede.

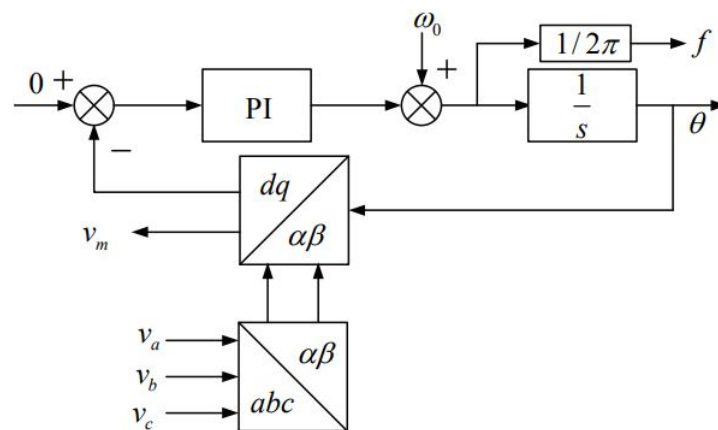
Conforme Jamil, M. Kothari, D. P. Rizwan (2018), os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como isolados ou conectados à rede. Nos conectados à rede, devido a proliferação desse sistema, houve um aumento na preocupação com a qualidade do inversor a ser adotado para que a energia inserida se mantenha com os parâmetros adequados de harmônicas e *flicker*. É importante que a faixa de tensão do inversor esteja de acordo com a tensão e a frequência da rede. Também é necessário que o inversor consiga melhorar a frequência, a potência reativa e que possa detectar falhas presentes na rede a qual está inserido.

Algumas dos métodos de sincronismo à rede serão abordados a seguir.

2.4.1 Synchronous Frame - Phase-Locked Loop

O método por *Synchronous Frame*-PLL ou SF-PLL é utilizado em sistemas trifásicos (GUO; WU; GU, 2011). Na Figura 12, o método é apresentado e, conforme Teodorescu, Liserre e Rodríguez (2011), o vetor de tensão abc é transformado no modelo dq utilizando a Transformada de Park. De acordo com Guo, Wu e Gu (2011), a posição angular é detectada pelo PLL como referência para o vetor tensão. O controlador PI define os valores de tensão para os eixos de quadratura e direto.

Figura 12 – Diagrama de blocos SF-PLL



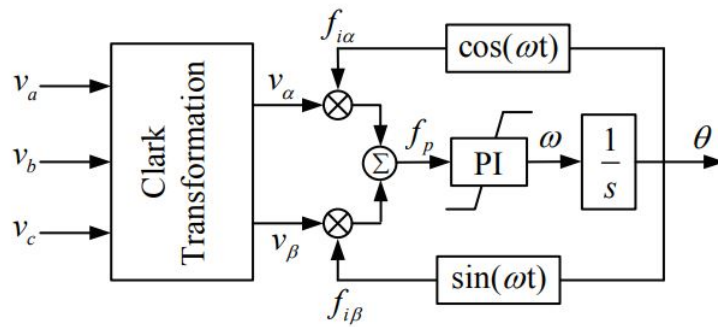
Fonte: Adaptado de Guo, Wu e Gu (2011)

2.4.2 PQ-PLL

Rolim, Da Costa e Aredes (2006), aponta que um dos problemas para projetos de circuitos PLL é a dificuldade de rastrear a sequência positiva da frequência, bem como, seu ângulo de

fase de maneira contínua e precisa, mesmo quando a tensão apresentar desequilíbrios. Para solucionar o problema, mesmo na presença de harmônicas ou sequência negativa desbalanceada, é necessário uma sincronização baseada nas potências real e imaginária. Na Figura 13, é apresentado o diagrama de blocos do método PQ-PLL.

Figura 13 – Diagrama de blocos PQ-PLL

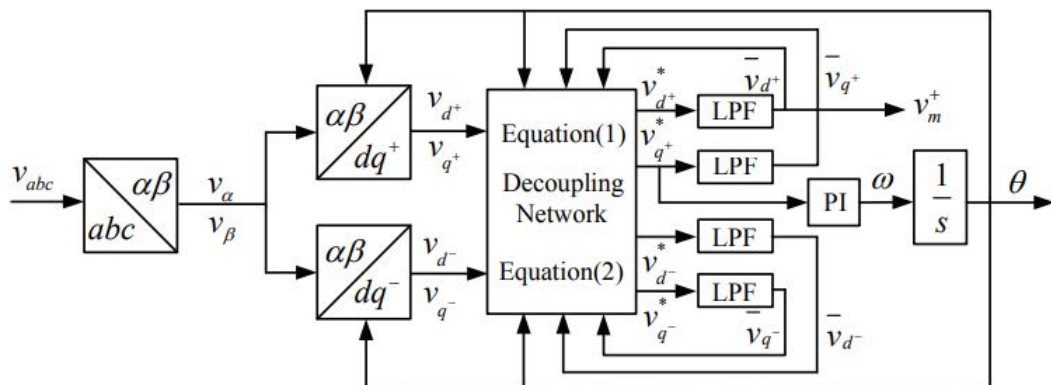


Fonte: Adaptado de Guo, Wu e Gu (2011)

2.4.3 Double Synchronous Reference Frame-PLL

O *Double Synchronous Reference Frame-PLL* (DSRF-PLL) é constituído de duas referências rotativas: a sequência $dq + 1$ rotacionando para o lado positivo com velocidade ω' , a qual a posição angular é θ' e a sequência $dq - 1$ com a velocidade $-\omega'$ e a posição angular $-\theta'$. Com esse método, ao invés de ser necessário o uso de filtros para atenuar oscilações de 2ω , é possível cancelar essas oscilações do PLL e obter uma estimativa da sequência positiva da componente (TEODORESCU; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011). Na Figura 14, é apresentado o diagrama de blocos do método DSRF-PLL.

Figura 14 – Diagrama de blocos DSRF-PLL

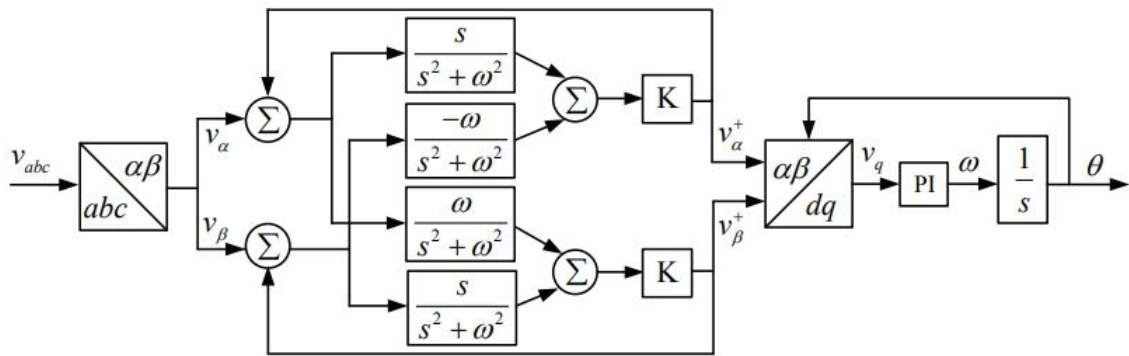


Fonte: Adaptado de Guo, Wu e Gu (2011)

2.4.4 Sinusoidal Signal Integrator-PLL

O *Sinusoidal Signal Integrator-PLL* (SSI-PLL) extrai a sequência positiva do SF-PLL, no entanto, opera com tensões distorcidas e desbalanceadas. A constante K controla a resposta do filtro PLL com sinal é escolhido pelo detector. Caso a tensão no Ponto de Conexão Comum (PCC) seja conhecida a detecção pode ser eliminada. A principal vantagem desse método é sua robustez com relação a distorções na tensão (GUO; WU; GU, 2011; YUAN et al., 2002; BOJOI et al., 2004), mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de blocos SSI-PLL



Fonte: Adaptado de Guo, Wu e Gu (2011)

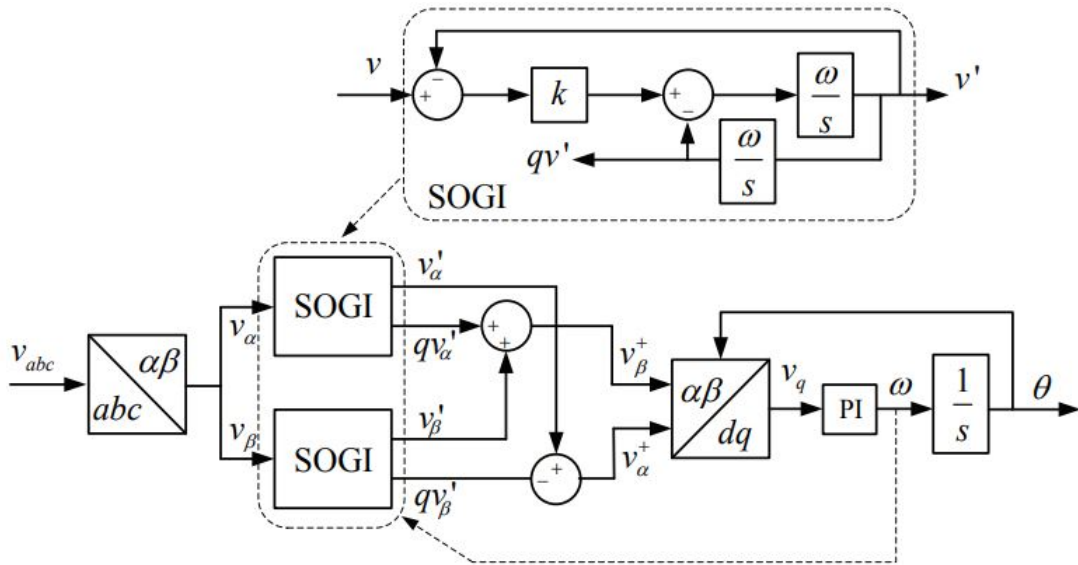
2.4.5 Double Second Order Generalized Integrator-PLL

Assim como o SSI-PLL, esse método extrai a sequência positiva do SF-PLL, mas utiliza um integrador de segunda ordem para implementar o sinal de quadratura, podendo assim, fornecer informações precisas para a sincronização da rede e ser estendido para sistemas monofásicos (GUO; WU; GU, 2011; RODRÍGUEZ et al., 2006a; RODRÍGUEZ et al., 2006b; CIOBOTARU; TEODORESCU; BLAABJERG, 1990). A Figura 16, mostra o diagrama de blocos para essa metodologia.

2.4.6 Decoupled Double Synchronous Reference Frame-PLL

A Figura 17, mostra o diagrama de blocos do *Decoupled Double Synchronous Reference Frame-PLL* (DDSRF-PLL) sendo que essa metodologia permite oscilações no sinal para que sejam obtidas as referências dq_m e dq_n . Ao se definir n e m , a rede separa a informação

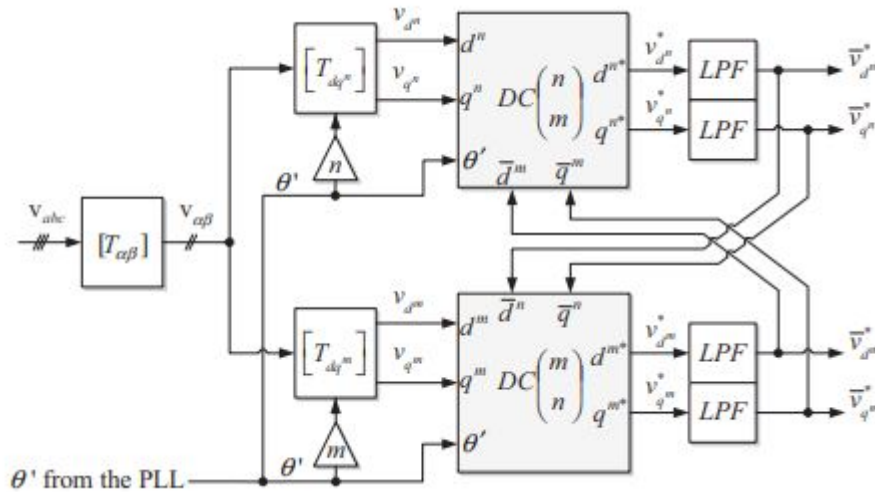
Figura 16 – Diagrama de blocos SSI-PLL



Fonte: Adaptado de Guo, Wu e Gu (2011)

dos eixos positivos e negativos tanto para a tensão quanto para a corrente em sistemas trifásicos desequilibrados, tornando-o útil nesse tipo de rede (TEODORESCU; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011).

Figura 17 – Diagrama de blocos DDSRF-PLL



Fonte: Adaptado de Teodorescu, Liserre e Rodríguez (2011)

De acordo com Guo, Wu e Gu (2011), por existir diversos métodos de conexão à rede, a escolha do melhor método torne-se difícil. O autor, acaba por sugerir alguns requisitos para deixar a tarefa mais simples, tais como: levar em consideração amplitude, fase, frequência do sinal de entrada, estimar os sinais positivos das sequências positiva e negativa e filtros ativos em condições de rede desbalanceada. Guo, Wu e Gu (2011), apresentaram a Tabela 1 afim de

Tabela 1 – Tabela de comparação de métodos PLL.

	Simplicidade do design	Adaptação e banda de frequência	Sensibilidade a distorção	Sensibilidade a desbalanceamento	Operação Monofásica
SF-PLL	Bom	Médio	Médio	Ruim	
PQ-PLL	Médio	Médio	Médio	Ruim	
DSRF-PLL	Médio	Médio	Bom	Bom	
SSI-PLL	Médio	Médio	Bom	Bom	Bom
DSOGI-PLL	Médio	Médio	Bom	Bom	Bom
EPLL	Médio	Médio	Bom	Bom	Bom
3MPLL	Médio	Médio	Bom	Bom	
Q-PLL	Médio	Médio	Bom	T	Bom
RPLL	Médio	Médio	Bom	T	Bom
PPLL	Médio	Bom	Bom	Bom	Bom
ALC-PLL	Médio	Médio	Bom	T	Bom
MR-PLL	Médio	Médio	Bom	T	Bom
APLL	Médio	Médio	Bom	Bom	Bom
ZCD	Bom	Ruim	Ruim	Ruim	Bom
SV	Médio	Ruim	Médio	Ruim	
WLSE	Médio	Médio	Bom	Bom	

Fonte: Adaptado de Guo, Wu e Gu (2011)

facilitar a tarefa de escolha da melhor opção para conexão à rede que contém outros métodos além dos citados neste trabalho.

A Tabela 1, apresenta comparativo da dificuldade de implementação das diferentes metodologias de PLL, das sensibilidades a distorções, das sensibilidades a desbalanceamentos de tensão e do grau de implementação para uma rede monofásica. A letra "T" classifica a possibilidade teórica dos PLLs para dada operação.

É possível perceber que, mesmo aumentando a complexidade dos métodos, isso não garante um melhor aproveitamento em todos os aspectos ou mesmo a possibilidade de execução. Também é demonstrado que os PLLs monofásicos com métodos de componentes simétricos, em teoria, podem ser adotados em redes trifásicas, pois extraem o componente fundamental das sequências positivas ou negativas desse tipo de sistema.

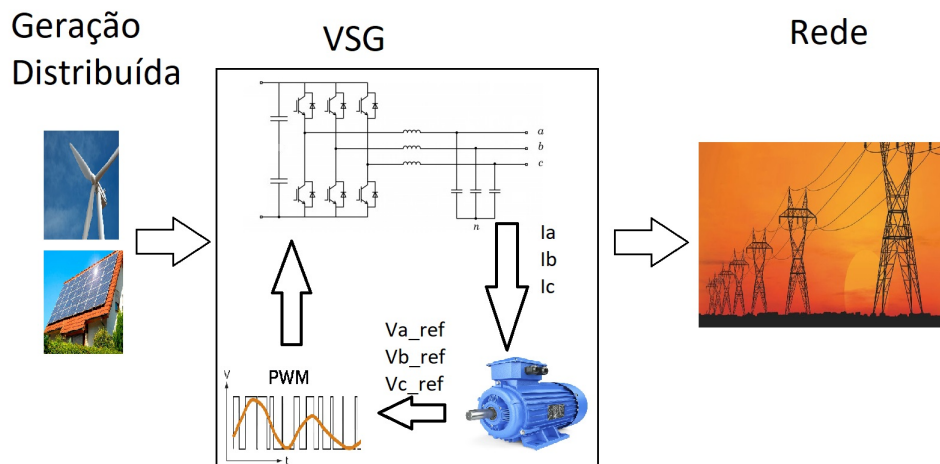
3 METODOLOGIA

A revisão bibliográfica permitiu identificar, na literatura, as metodologias utilizadas atualmente para o VSG. Logo, para este trabalho, foi utilizado o método apresentado por Chen et al. (2012). Nessa abordagem é efetuada a detecção das correntes de saída do inversor que irá excitar o gerador, enquanto que o PWM fornecerá os sinais de chaveamento do inversor. Há ainda uma série de capacitores e indutores que filtram harmônicas do sistema. A utilização do filtro passa-baixa serve para uma redução dos distúrbios da rede.

Nas seções seguintes, é descrito o modelo matemático do gerador, a modelagem computacional do sistema de VSG, a modulação PWM e o método de conexão à rede para o sistema proposto.

A Figura 18 mostra que esse conceito de VSG começa detectando as correntes da rede, essas excitam o gerador, que por sua vez, gera a tensão que será modulada pelo PWM acionando assim as chaves do inversor. Por fim, o inversor sintetiza as tensões geradas, as mesmas são filtradas de harmônicas pelo filtro LC e sincronizadas à rede.

Figura 18 – Conceito de um VSG



Fonte: Autor

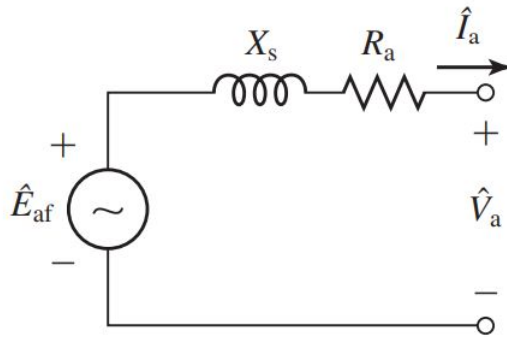
3.1 Modelagem do gerador síncrono

Conforme Chapman (2013), a tensão E_a depende diretamente do fluxo ϕ da máquina, da frequência ou velocidade de rotação ω dado em rad/s e dos parâmetros de construção K da máquina. Essa relação pode ser escrita como:

$$E_a = K\phi\omega \quad (3.1)$$

O circuito equivalente de um gerador síncrono é apresentado na Figura 19. A indutância X_s é vista pela fase a partir do momento que o gerador começa a operar em regime permanente. A tensão nos terminais da máquina é a soma da tensão em R_a e da tensão induzida. Essa tensão induzida E_a pode ser obtida por meio das derivadas em relação ao tempo da corrente quando essa é igual a zero.

Figura 19 – Circuito equivalente de um gerador síncrono



Fonte: Umans, 2014

Com base no circuito equivalente e fazendo uso da Lei de Kirchhoff das tensões é possível obter-se as equações diferenciais para cada uma das fases do gerador, dadas por:

$$\begin{aligned} E_a - V_a &= I_a R_s + L_s \frac{dI_a}{dt} \\ E_b - V_b &= I_b R_s + L_s \frac{dI_b}{dt} \\ E_c - V_c &= I_c R_s + L_s \frac{dI_c}{dt} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Sendo E_a , E_b e E_c , as tensões induzidas do gerador; V_a , V_b e V_c , as tensões no estator; I_a , I_b e I_c , as correntes de fase; R_s e L_s , a resistência e a indutância em cada fase do gerador.

A dinâmica do gerador foi descrita pela equação (3.3):

$$T_{mec} - T_{elec} = \frac{1}{J} \frac{d\omega}{dt} + k d \frac{d\omega}{dt} \quad (3.3)$$

O torque mecânico é dado por T_{mec} e o torque eletromagnético por T_{elec} , J é a inércia do gerador e k o valor do coeficiente de atrito.

A potência de um gerador síncrono depende do ângulo entre o campo magnético do rotor e o campo magnético resultante. Essa dependência é denominada de ângulo de potência ou também ângulo de conjugado. É possível obter o conjugado eletromagnético produzido em função da potência e da velocidade de rotação que é dado por:

$$T_{elec} = \frac{P_{elec}}{\omega_m} \quad (3.4)$$

$$\theta = \int \omega dt \quad (3.5)$$

Com base nas equações (3.1) até (3.5) foi possível recriar o modelo do gerador e, utilizando o *software* PSIM® foi efetuado a montagem da simulação vista na Figura 20.

O gerador síncrono irá obter as correntes que estão na rede. Essas atuarão conforme descrito matematicamente na parte elétrica do gerador onde encontram-se as resistências e indutâncias de fase, bem como o derivador para a corrente. A potência elétrica gerada será então inserida no rotor da máquina.

A parte mecânica do gerador contém a inércia e o coeficiente de atrito mecânico, sendo que estes irão gerar a frequência angular. O integrador gerará a posição angular do rotor para o bloco C, denominado de defasagem do ângulo de fase, na Figura 20. No bloco C estão descritas as equações de comportamento da defasagem do ângulo de fase do gerador.

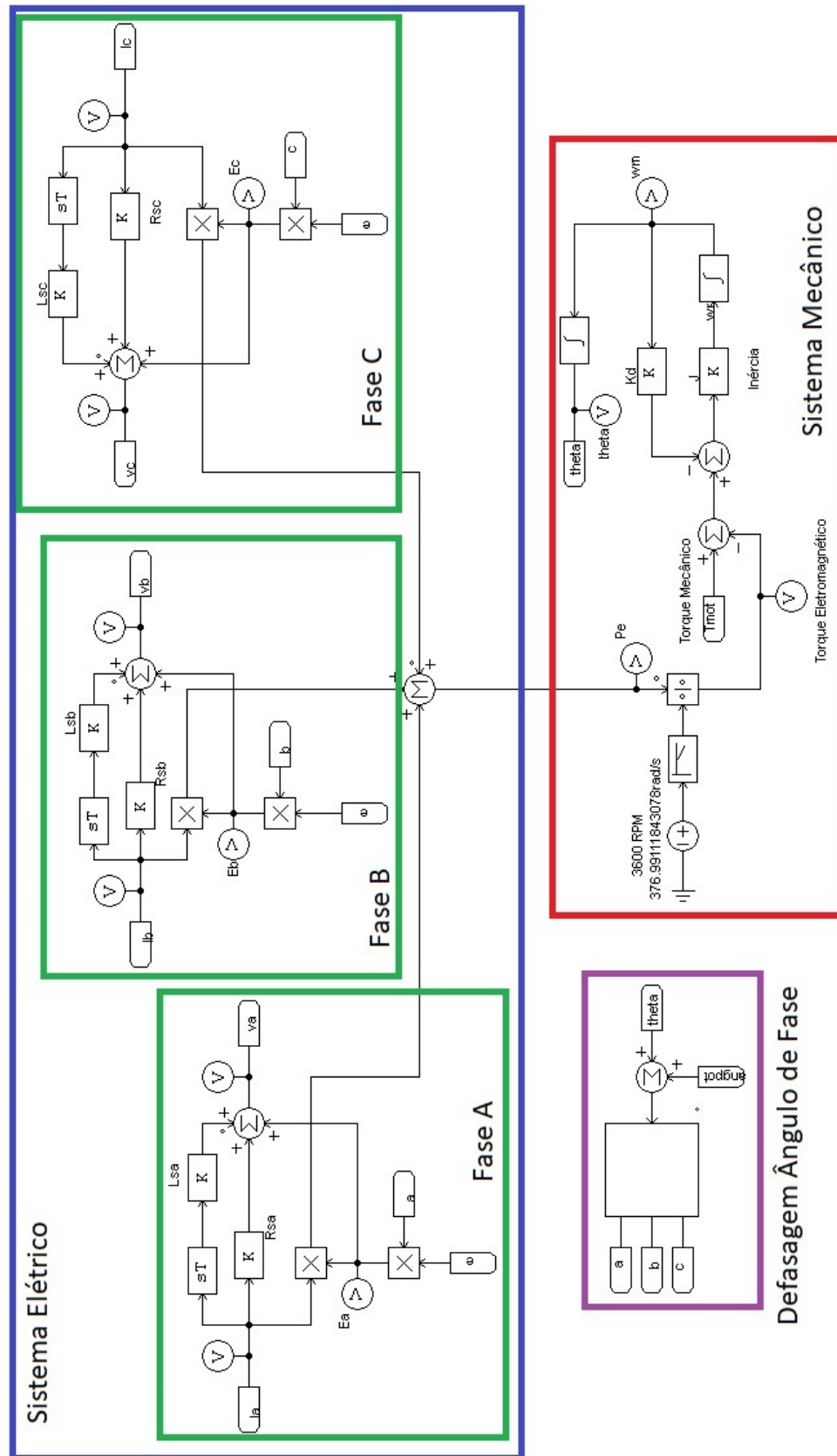
Uma alteração com relação ao trabalho apresentado em Chen et al. (2012) foi a obtenção do torque eletromagnético. Neste trabalho foi utilizado uma fonte com velocidade $376,99 rad/s$ e a presença de um filtro passa-baixa para eliminar harmônicas que possam existir, em contraste com o autor do artigo, que usa uma compensação após o amortecimento e realimenta diretamente a velocidade para a potência elétrica, gerando assim o torque eletromagnético do gerador.

O ângulo de potência é utilizado pra inserir uma defasagem entre a tensão no terminal e a tensão de fase do gerador. Essa característica indica que a tensão na rede e a corrente de excitação do gerador na rede são constantes.

Para calcular os valores necessário para a excitação virtual foi escrito um código num bloco C do *software* PSIM®. Nesse bloco é inserido os valores de potência ativa e reativa desejadas pelo controlador da rede, e o código calculará os valores para o ângulo de potência, a tensão de excitação e o torque mecânico necessário para que o sistema forneça as potências demandadas.

Os filtros passa-baixa que adquirem o sinal de corrente para o gerador, causam uma defasagem no ângulo de tensão. Após analisar a função de transferência do filtro e fazer o

Figura 20 – Modelo implementado no *software* de simulação



Fonte: Autor

diagrama de Bode do mesmo, foi constatado que essa defasagem é de aproximadamente 25° para a frequência de 60Hz. Sendo assim, essa defasagem precisou ser compensada no cálculo de fator de potência.

$$\arctg(\theta) = \frac{Q}{P} \quad (3.6)$$

$$I_a = \frac{P}{3V_a \cos(\theta)} \quad (3.7)$$

$$E_a = V_a + iX_s I_a + R_a I_a \quad (3.8)$$

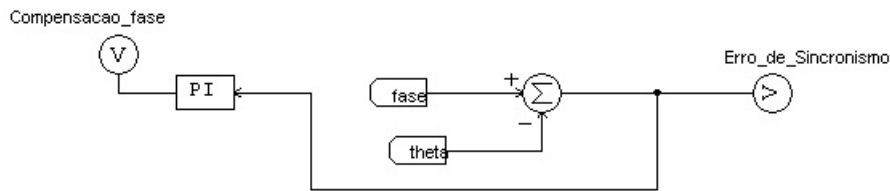
Segundo Chapman (2013), tanto o torque induzido como a potência atingem valores máximos quando δ é igual a 90°. É típico de geradores a plena carga possuírem ângulos de conjugado entre 20°-30°, a fim de manter a potência e o conjugado máximo absoluto no mínimo o dobro dos valores a plena carga.

E_{mod} é a excitação virtual da máquina, que regula a inserção da potência reativa na rede.

Para o sincronismo do gerador com a rede os erros de sincronismo e de tensão foram calculados e compensados utilizando controladores PI.

O malha de sincronismo é obtido comparando o erro entre a fase do sincronismo com a rede e o ângulo de θ do rotor do gerador, apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Malha de controle de sincronismo

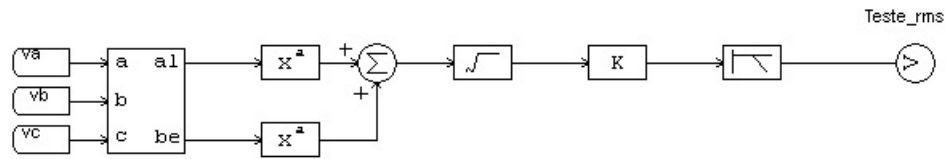


Fonte: Autor

Para a malha de controle de tensão é assumido a tensão de rede e o valor RMS. O valor de tensão RMS é obtido efetuando uma transformação de abc para $\alpha\beta$, por meio da relação matemática entre tensão média e tensão instantânea, conforme Conti (2018). O circuito para a obtenção da tensão RMS é apresentado na Figura 22. A malha de controle de tensão possui um saturador a fim de evitar oscilações muito elevadas e um sinal step desligará o circuito após o sincronismo. A malha completa pode ser visualizada na Figura 23

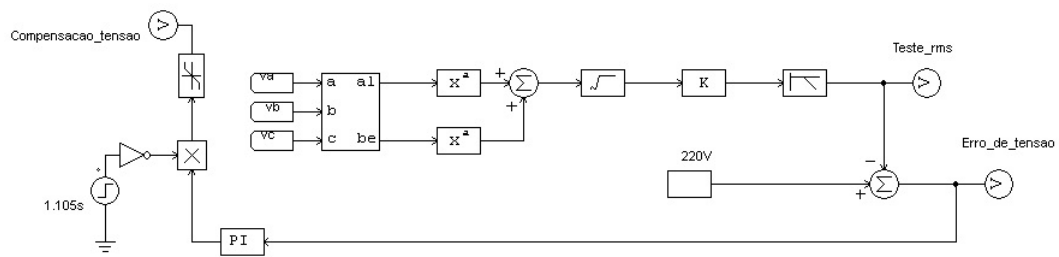
Também foi inserida uma malha de controle de velocidade em que se detecta o valor da

Figura 22 – Circuito de cálculo do valor RMS



Fonte: Autor

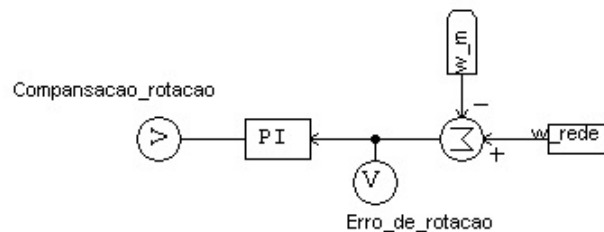
Figura 23 – Malha de controle de tensão



Fonte: Autor

velocidade angular do rotor, o qual é comparado com o da rede e compensado utilizando com um controlador PI. A malha é apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Malha de controle de rotação



Fonte: Autor

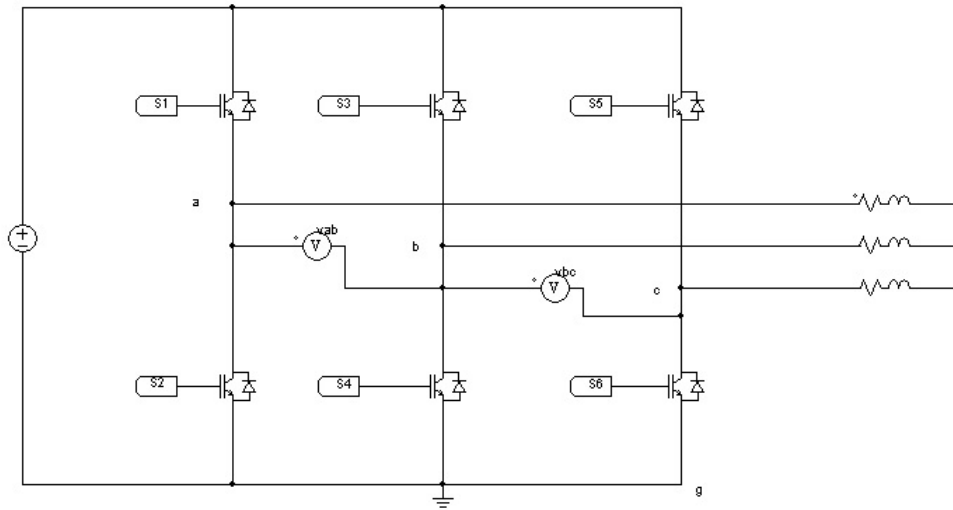
A sintonia dos ganhos dos controladores PI foi obtida de maneira empírica, observando a resposta do erro e alterando os ganhos, caso as mesmas fossem muito oscilatórias e o tempo de normalização fosse muito longo, conforme proposto em Karl e Hagglund (1995).

3.2 Inversor

Para este trabalho, o inversor proposto é do tipo trifásico, o qual possui três braços, sendo esses constituídos de duas chaves de potências cada, como mostra a Figura 25.

Para o PWM foi utilizada a metodologia abordada por Baratieri (2015), que utilizou a técnica chamada de SPWM. De acordo com Rashid (2017), para se produzir uma tensão defasada em 120° elétricos, é necessário que os sinais modulados estejam defasados em 120°

Figura 25 – Circuito inversor



Fonte: Autor

elétricos.

Partindo das equações de circuitos trifásico é possível chegar na matriz:

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} v_{ag} \\ v_{bg} \\ v_{cg} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

No entanto, quando há necessidade de obter os valores de v_{ag} , v_{bg} e v_{cg} a inversão não é possível, pois a matriz (3.9) possui uma singularidade: a terceira linha é dependente das demais linhas. Mas quando as tensões de fase não são zero, a equação pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} v_{ag} \\ v_{bg} \\ v_{cg} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

A equação (3.10) não possui singularidade. Ela é então multiplicada pela matriz inversa em ambos os lados, gerando assim uma matriz identidade. A matriz identidade é multiplicada em termos de v_{ag} , v_{bg} e v_{cg} e, ao se simplificar a matriz inversa restante, obtêm-se a matriz simplificada:

$$\begin{bmatrix} v_{ag} \\ v_{bg} \\ v_{cg} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Com a matriz (3.11) são calculadas as tensões v_{ag} , v_{bg} e v_{cg} , em função das tensões de

referência, para que o inversor sintetize as tensões de linha v_{ab} e v_{bc} . A matriz (3.11) pode ser reescrita como:

$$v_{ag} = \frac{1}{3}(2v_{ab} + v_{bc} + v_0) \quad (3.12)$$

$$v_{bg} = \frac{1}{3}(-v_{ab} + v_{bc} + v_0) \quad (3.13)$$

$$v_{cg} = \frac{1}{3}(-v_{ab} - 2v_{bc} + v_0) \quad (3.14)$$

No entanto, ainda falta calcular a tensão v_0 . Para essa tensão é utilizada a característica de funcionamento do inversor que, quando uma chave superior é fechada, essa fica com a tensão igual a da fonte e a chave inferior fica aberta. Quando a chave inferior é fechada, a tensão passa a ser igual a tensão de referência e a chave superior está aberta. Portanto, é possível chegar às seguintes relações:

$$0 \leq v_{ag} \leq V_{cc} \quad (3.15)$$

$$0 \leq v_{bg} \leq V_{cc} \quad (3.16)$$

$$0 \leq v_{cg} \leq V_{cc} \quad (3.17)$$

Com as equações (3.15) até (3.17) é possível obter as condições de acionamento das chaves nos inversores e as mesmas serão substituídas nas equações (3.12) a (3.14). Isolando os termos v_0 e a tensão de barramento (V_{cc}) obtém-se seis condições:

$$v_0 \geq -2v_{ab} - v_{bc} = C1 \quad (3.18)$$

$$v_0 \leq 3V_{cc} - 2v_{ab} - v_{bc} = C2 \quad (3.19)$$

$$v_0 \geq v_{ab} - v_{bc} = C3 \quad (3.20)$$

$$v_0 \leq 3V_{cc} + v_{ab} - v_{bc} = C4 \quad (3.21)$$

$$v_0 \geq v_{ab} + 2v_{bc} = C5 \quad (3.22)$$

$$v_0 \geq 3V_{cc} + 2v_{ab} + 2v_{bc} = C6 \quad (3.23)$$

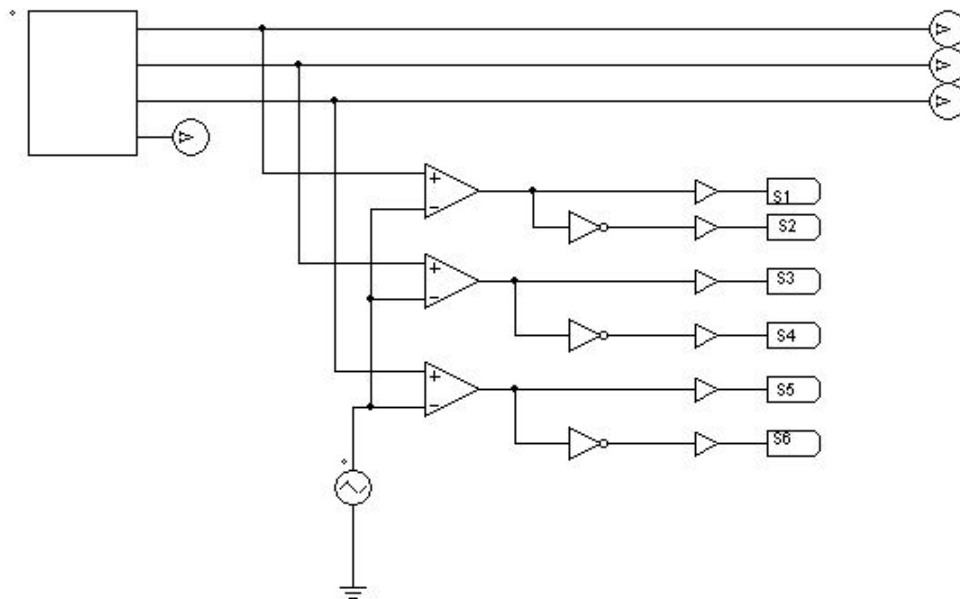
De acordo com Baratieri (2015), v_0 deve ser definido para satisfazer as restrições das equações de (3.18) até (3.23). Para tal, foi assumido a definição:

$$v_0 = \frac{\max(C1, C3, C5) + \min(C2, C4, C6)}{2} \quad (3.24)$$

A Equação (3.24) é uma restrição utilizada para gerar uma tensão triangular que é o limiar entre a tensão do barramento e a tensão que se pretende sintetizar, estando sempre no caminho médio entre os picos das ondas geradas pelas condições criadas. Com isso, o inversor não trabalha com uma modulação acima da desejada.

Após o equacionamento do PWM foi efetuada a simulação para o circuito no PSIM®, conforme a Figura 26.

Figura 26 – Circuito PWM



Fonte: Autor

O bloco C do PSIM®, na Figura 26, corresponde a saída das condições de C1 a C6, as quais correspondem aos sinais de acionamento dos IGBTs do inversor, modulando a entrada CC para uma saída CA.

Para se obter as tensões modulantes de linha, as tensões v_{ag} , v_{bg} e v_{cg} , são comparadas com uma onda triangular, gerando assim o sinal na chave do inversor.

3.3 Conexão à rede

No escopo deste trabalho foi investigado métodos de conexão à rede para um sistema de geração distribuída. Algumas literaturas, como Guo, Wu e Gu (2011) e Teodorescu, Liserre e Rodríguez (2011), afirmam que as técnicas mais utilizadas adotam a abordagem por PLL para efetuar a conexão e o sincronismo com a rede. Um dos critérios para a implementação do sincronismo à rede será a simplicidade de design do PLL.

Partindo do critério de simplicidade e também pela rede estar balanceada, adotou-se a implementação do sincronismo chamado de *Synchronous Reference Frame - PLL* (SRF-PLL), descrito em Kaura VikramBlasko (1997) e Chung (2000). Essa abordagem utiliza-se de duas transformações a fim de mudar as referências das fase de *abc* para *dq0*, dadas pelas equações (3.25), (3.26) e (3.27)

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos(\theta) \\ V \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \cos(\theta) \\ \frac{V_c - V_b}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} v_{qe} \\ v_{de} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta^*) & -\sin(\theta^*) \\ \sin(\theta^*) & \cos(\theta^*) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Utilizando o controlador PI em sua forma paralela, equação (3.28), obtém-se uma referência para as tensões em relação a tensão transformada e a mesma siga o ângulo da tensão fornecida.

$$G(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (3.28)$$

Os ganhos para o sincronismo com a rede são selecionados de acordo com a amplitude e a fase, sendo simétricos em relação a frequência da rede. Os ganhos do controlador podem ser

obtidos por meio das equações (3.29)

$$\begin{aligned}\omega_c &= \frac{1}{\alpha T_s} \\ T_{pll} &= \alpha^2 T_s \\ K_{pll} &= \left(\frac{1}{\alpha}\right)\left(\frac{1}{VT_s}\right)\end{aligned}\quad (3.29)$$

Em que T_{pll} e K_{pll} são os ganhos de amplitude e de fase respectivamente. T_s é o tempo de amostragem, α é um fator de normalização e ω_c a frequência. Entre α e o coeficiente de amortecimento ϵ existe uma relação dada por:

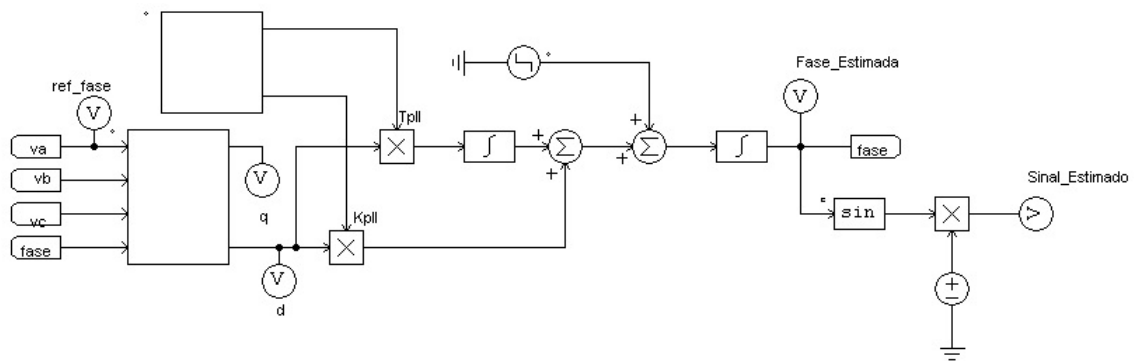
$$\epsilon = \frac{\alpha - 1}{2} \quad (3.30)$$

Ao se alterar o valor de α é possível controlar o amortecimento e a frequência do sistema. O coeficiente de amortecimento ϵ foi definido como 0,9, o tempo T_s é 0,00666 s e a tensão V é 220 V.

Os ganhos (3.29) e (3.30) foram inseridos em um bloco na linguagem C disponível no próprio PSIM®. Com a inserção dos valores de ganho e de tempo nesse bloco, o procedimento de cálculo foi facilitado e, conseqüentemente, a simulação do sistema de sincronismo com a rede.

Para a implementação do circuito de sincronismo à rede no sistema de geração foi elaborado o circuito visualizado na Figura 27.

Figura 27 – Sincronismo à rede



Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta resultados que validam os modelos do VSG, do PWM, das malhas de controle, e do sincronismo à rede apresentados previamente. Para tal foram conduzidas simulações utilizando o *software* PSIM®.

4.1 Sistema VSG conectado à rede

A Figura 28 mostra o sistema desenvolvido para este trabalho. Observa-se que para medir a potência do sistema foi utilizado medidores trifásicos, tanto para a potência ativa bem como para a potência reativa, a parte elétrica do gerador, a modulação PWM, a conexão e o sincronismo com a rede.

Nesse sistema foi desenvolvido as fases do gerador síncrono, as tensões geradas em cada uma delas, que são enviadas para um somador, a fim de gerar a potência elétrica no rotor da máquina.

O gerador gera tensões de referência para o PWM, visto no bloco de mesmo nome na Figura 28. Este, por sua vez, gera tensões moduladas que serão comparadas ao sinal da fonte triangular com a finalidade de gerar a ordem de chaveamento dos IGBTs, que estão simulando um inversor trifásico.

O chaveamento desse inversor irá gerar a tensão que será inserida na rede, sendo esta, filtrada pelos capacitores e indutores inseridos em cada fase. Após isso as potências ativas e reativas são medida e inseridas na rede.

Há um filtro passa-baixa de segunda ordem para cada uma das fases que serve para reduzir possíveis distúrbios na rede antes de inserir as correntes que alimentarão o gerador.

Como parâmetros para sua simulação Chen et al. (2012) adotou para o VSG os valores de resistência e indutância de fase como sendo $0,3 \Omega$ e $0,042 \text{ H}$ respectivamente. Os demais parâmetros são: os capacitores e indutores que atuam como filtros na rede, com valores de 4 mH e $5 \mu\text{F}$; a inércia do gerador é $0,3 \text{ kg/m}^2$; o coeficiente de atrito da máquina vale 4 N/ms ; a frequência de corte do filtro passa-baixa, tem o valor de 200 Hz ; a frequência de modulação para o PWM, é igual a 15 kHz ; e a tensão do barramento CC utilizada equivale a 540 V .

Para facilitar a identificação dos valores de projeto utilizados nesse trabalho, foram elaboradas as duas tabelas. Na Tabela 2, são apresentados os parâmetros para a rede, e a Tabela 3, apresenta os valores do gerador.

Ao iniciar a simulação, o gerador, primeiramente, opera de forma ilhada com potência

Figura 28 – Sistema desenvolvido

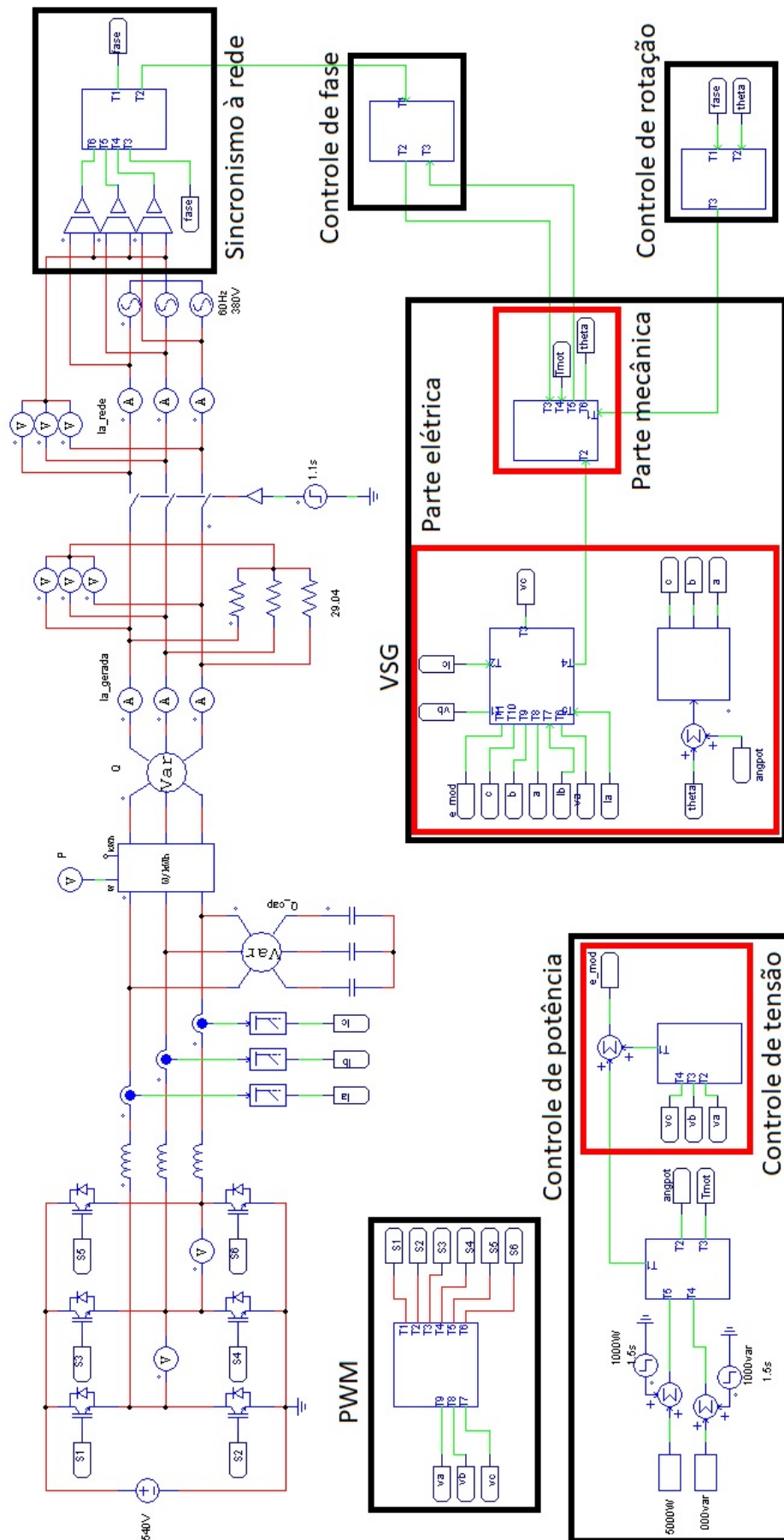


Tabela 2 – Tabela de parâmetros.

Parâmetros	Valores
Tensão CC	540V
Indutância filtro	0,004H
Capacito filtro	5 μ F
Resistência de carga	29.04 Ω
Frequência de corte	200Hz
Potência ativa	5000W
Potência reativa	0var

Fonte: Autor

Tabela 3 – Tabela de parâmetros do gerador.

Parâmetros	Valores
Resistência de fase	0,3 Ω
Indutância de fase	0,042H
Inércia	0,3 kg/m ²
Coefficiente de atrito	4N/ms
Frequência de modulação do PWM	15kHz

Fonte: Autor

ativa de 5000 W e potência reativa igual a 0 var. Após 1,1 s, uma fonte com sinal step aciona as chaves conectando o gerador à rede e, quando o tempo de simulação atingiu 1,5 s, foi inserido um aumento da potência ativa em 1000 W e da potência reativa 1000 var, em outro momento foi inserido uma potência reativa de –1000 var, simulando assim tanto a rede com capacitivo como com indutivo. Há uma resistência de carga para auxiliar a estabilização inicial do sistema antes da conexão à rede, estando associada com a potência ativa inicial que será inserida na rede.

Em um primeiro momento, será apresentado as simulações para o gerador síncrono virtual e também das malhas de controle. Posteriormente, a modulação PWM e, por último, a conexão à rede do sistema.

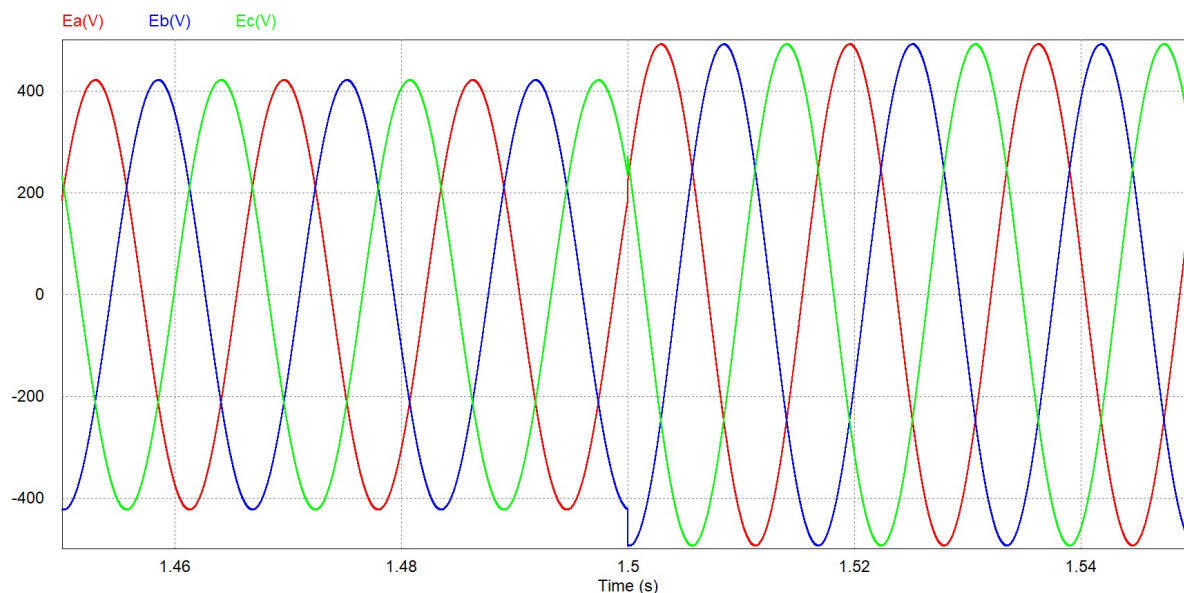
4.1.1 Simulação do VSG

Após a estipulação dos parâmetros para os elementos dessa simulação foi possível obter as formas de onda do gerador proposto para o trabalho.

A forma de onda da tensão induzida do gerador, Figura 29, se mostra estável ao longo de todo o período de simulação apresentado. O valor de pico é aproximadamente 413 V até 1,5 s, passa a ser de 492 V a partir do momento em que é exigido uma maior potência no sistema. Nota-se que durante todo período apresentado as fases estão defasadas 120° cada.

No tempo 1,5 s, quando há uma alteração no requisito de potência desejada pelo sistema, pode-se notar uma pequena oscilação na fase *b* do gerador, pois o mesmo está sincronizando com nova potência requerida.

Figura 29 – Tensão induzida no gerador.



Fonte: Autor

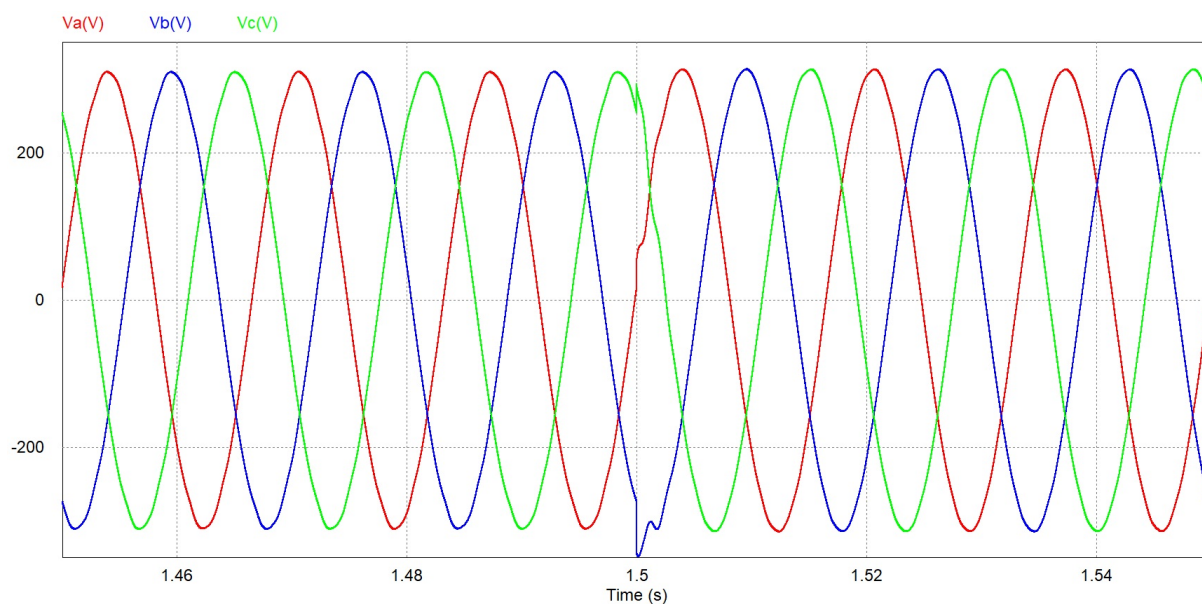
É visualizado na Figura 29, que o gerador possui defasagem entre as fases e que não há alteração entre elas. Essa defasagem ocorre devido a forma construtiva que os enrolamentos de armadura do gerador síncrono estão disponibilizados. A mesma defasagem foi implementada em um bloco C do PSIM®, na parte central direita do bloco elétrico do VSG, onde também é inserido o ângulo de potência proveniente do controlador de potência, visto no canto inferior direito na Figura 28.

A tensão no estator do gerador é vista na Figura 30. A mesma demonstra a defasagem entre as fases, cujo valor de pico é aproximadamente 310 V, porém seu valor eficaz equivale a 218 V. Nota-se uma oscilação nas fases *b* e *c* no momento em que é inserida mais potência no sistema e, logo após, as formas de onda retornam ao formato senoidal, mostrando certa robustez bem como a presença de uma inércia virtual no sistema desenvolvido.

A Figura 31 demonstra os resultados obtidos para cada uma das malhas de controle implementadas na simulação. O regime de partida apresenta o maior erro e, após um período é possível notar que os erros diminuem, conforme o sistema entra em regime permanente.

Para a malha de compensação de fase, os ganhos não podem deixar a malha muito rápida, pois se isso acontecer, o sistema deixa de ser um gerador síncrono virtual e passa a ser

Figura 30 – Tensão de fase no estator

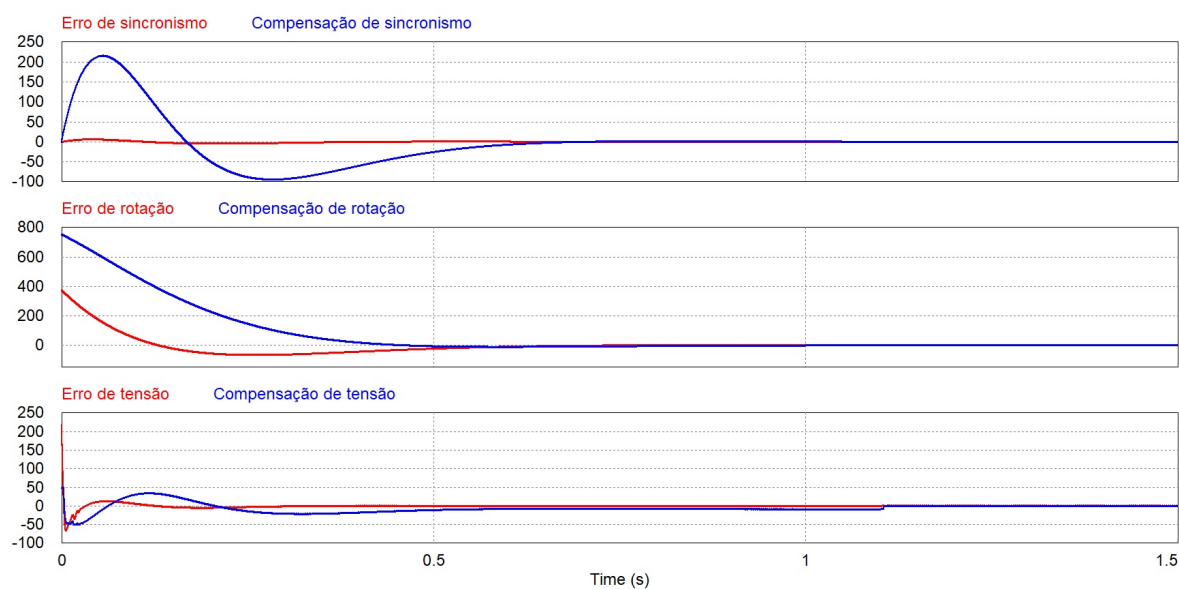


Fonte: Autor

um inversor conectado à rede.

A malha de velocidade detecta a velocidade de rotação do rotor e compara com a velocidade angular da malha de sincronismo à rede, servindo para atenuar o valor em regime permanente, caso ocorra algum erro no cálculo do torque motriz em relação a potência eletromagnética. No entanto, se seus ganhos forem muito reduzidos acabam por anular seu efeito.

Figura 31 – Erros de rastreamento e compensação nas malhas de controle



Fonte: Autor

A malha de controle de tensão compensa a magnitude da tensão induzida, influencia na

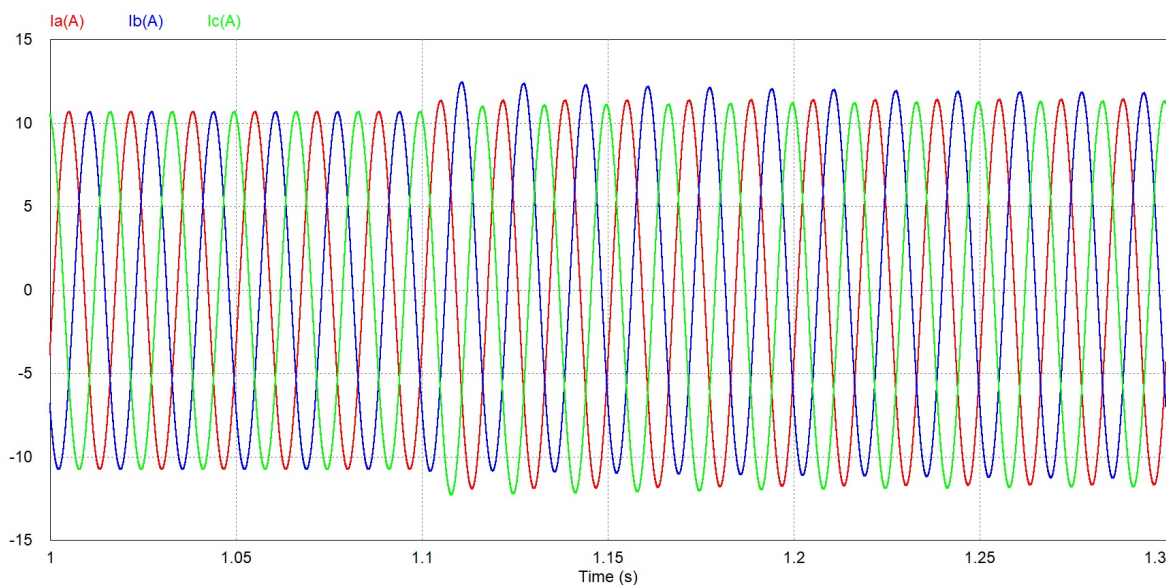
potência e é utilizada durante o período em que o sistema opera isolado. É possível perceber um erro muito pequeno presente durante o período ilhado. Quando o sistema se conecta à rede, essa malha não é mais necessária, sendo desligada e o erro passa a ser zero.

Na malha de controle de tensão, nota-se uma pequena variação até o período em que a mesma é retirada e volta a aparecer quando mais potência é inserida no sistema. Esse erro não foi possível de ser mitigado, talvez, pela falta de um método de controle mais adequado.

Alguns efeitos operacionais não foram possíveis rastrear, pois o sistema opera em malha aberta, e assim, o controle das potências ativa e reativa não foi efetuado de maneira adequada.

A Figura 32 mostra as correntes de fase no gerador. Quando o sistema opera de maneira ilhada, entre o tempo 1 s e 1,1 s, as correntes no gerador estão estáveis e defasadas 120° uma da outra. É possível perceber uma variação na amplitude das correntes no momento em que ocorre a conexão com a rede em 1,1 s, no entanto, elas se estabilizam num pequeno espaço de tempo.

Figura 32 – Corrente de fase do gerador no tempo de conexão à rede

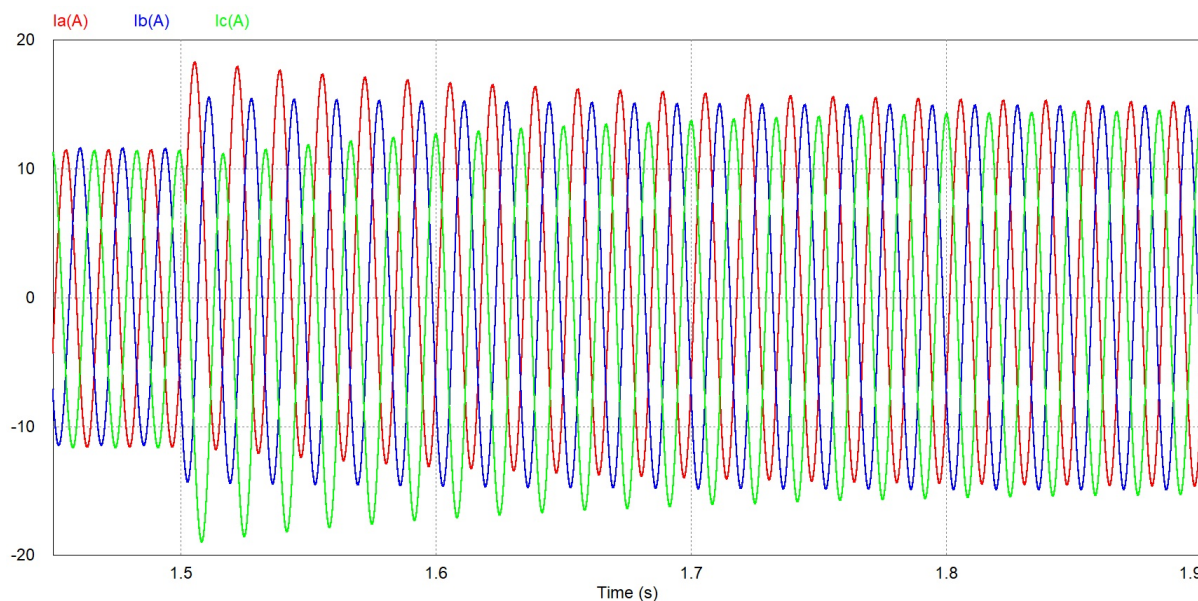


Fonte: Autor

A corrente do gerador, quando é exigido mais potência pelo controle de potência do sistema, é vista na Figura 33. É possível notar uma corrente mais elevada, devido a essa alteração de potência pelo controlador e uma estabilização da corrente conforme o mesmo supre esse requisito. Na simulação os valores de corrente atingiram 11,4 A, em comparação aos 8 A calculados e, quando a potência é aumentada, os valores de corrente ficaram em 15 A, divergindo do valor calculado de 10,4 A.

Na Figura 34, são observadas a tensões induzida E_a , do estator V_a e da rede V_{rede} . Nota-se uma defasagem entre a tensão induzida e a tensão de rede, devido a presença de um ângulo

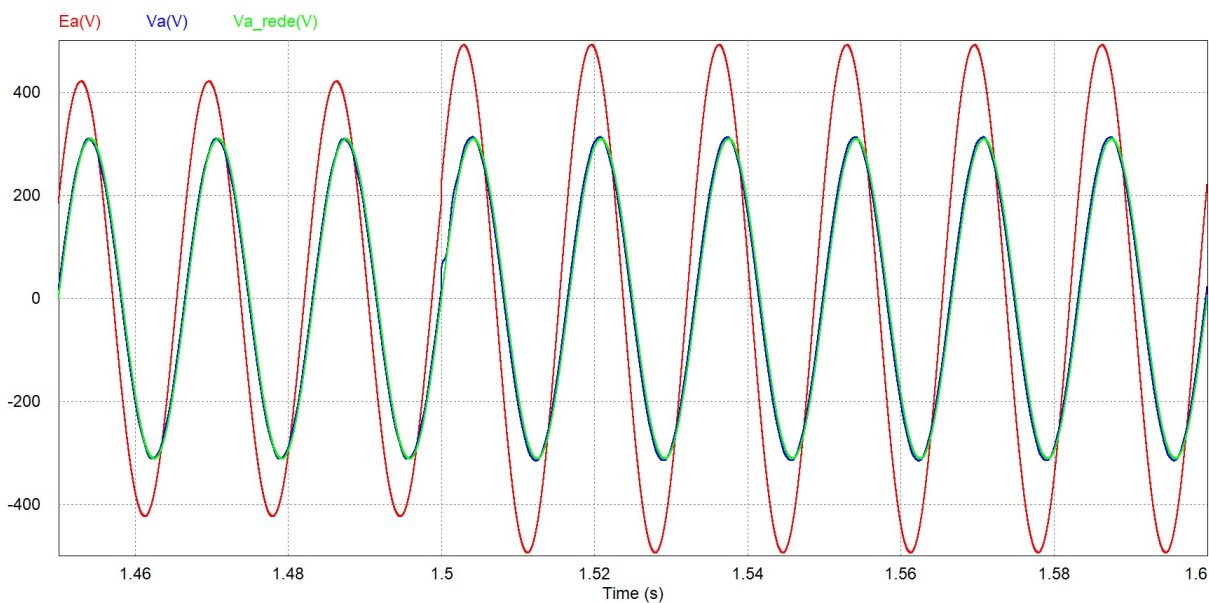
Figura 33 – Corrente de fase do gerador no aumento de potência.



Fonte: Autor

de potência na simulação do gerador. Já a tensão do estator e a tensão de rede se encontram em sincronismo, pois é com a tensão do estator que o PWM irá sintetizar e efetuar o chaveamento do inversor, inserindo assim, a tensão na rede.

Figura 34 – Tensão induzida do gerador, tensão de fase do gerador e tensão no ponto de conexão



Fonte: Autor

Foi possível perceber ao longo dessas simulações que os valores das tensões e corrente apresentaram uma leve diferença dos valores calculados, que podem não existir se o passo de

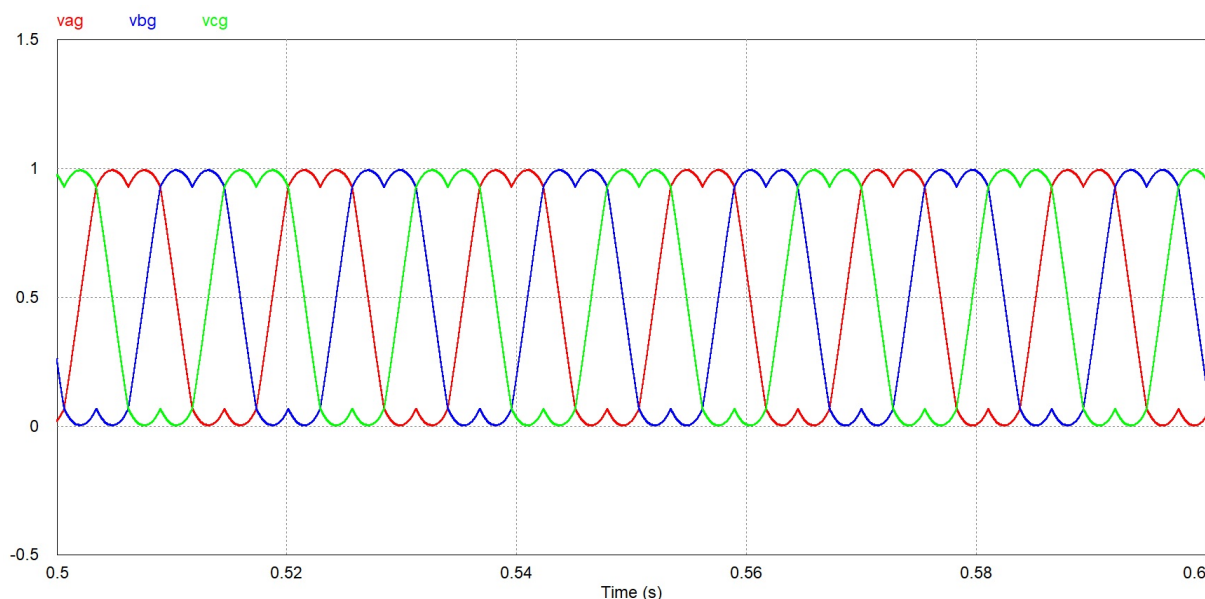
simulação for maior e alguns métodos de controle mais aprimorados forem utilizados. Já os formatos de onda para as simulações apresentadas neste trabalho estão de acordo com a literatura.

4.1.2 Simulação PWM

O PWM tem como característica criar pulsos de onda quadrada que se assemelham a uma onda senoidal. Durante o trabalho, para a modulação de uma onda senoidal, foi necessário comparar as condições criadas para o acionamento das chaves com uma onda triangular. Os IGBT's são responsáveis pelo chaveamento dos pulsos gerados convertendo a tensão CC da fonte em uma tensão CA, que será inserida na rede de distribuição.

A tensão de saída de cada fase do gerador é utilizada como referência para o bloco PWM fazer a modulação das tensões. Assim sendo, a Figura 35, mostra que as ondas v_{ag} , v_{bg} e v_{cg} satisfazem as condições criadas.

Figura 35 – Tensão modulante do braço do inversor



Fonte: Autor

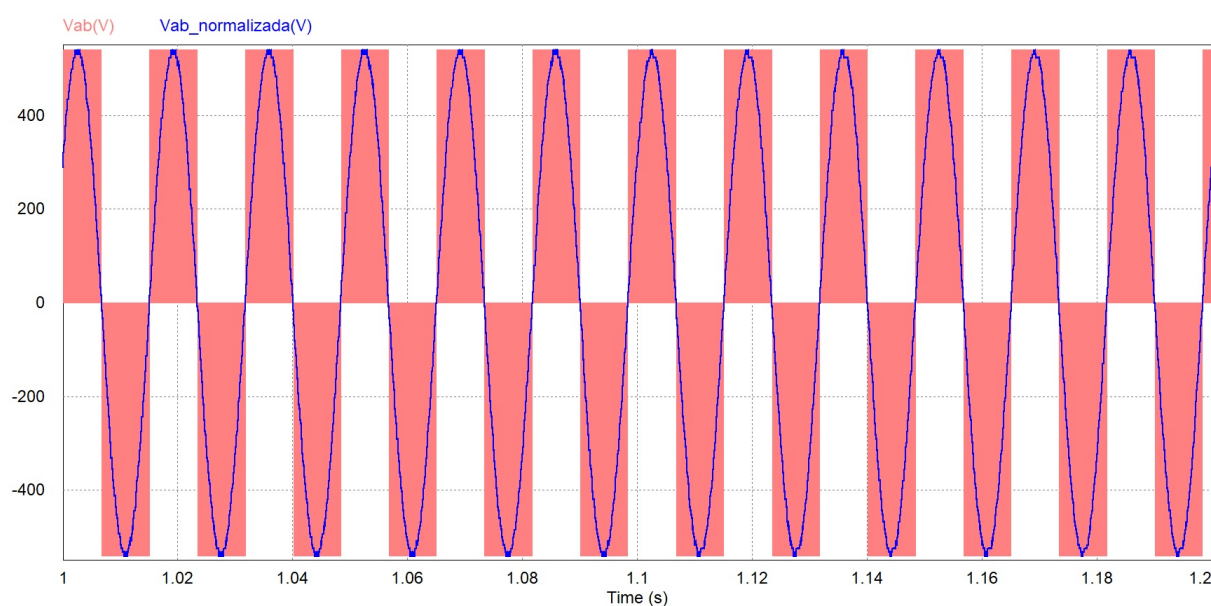
As ondas v_{ag} , v_{bg} e v_{cg} são comparadas com a onda triangular gerada por uma fonte de frequência 15kHz , produzindo assim, os pulsos para o acionamento das chaves do inversor e possibilitando a geração da onda senoidal a ser inserida na rede.

Para demonstrar que o acionamento das chaves gera pulsos que se assemelham a uma onda senoidal para a tensão V_{ab} desejada, essa foi normalizada com a mesma frequência da modulação do PWM, criando uma forma de onda senoidal. Observa-se que a tensão sintetizada

pelo circuito PWM é de aproximadamente 540V, sendo a mesma tensão do barramento CC. Ver Figura 36.

Também é possível perceber uma pequena variação na onda normalizada, o que demonstra a ocorrência de harmônicas no processo de modulação. Essas harmônicas tendem a ser eliminadas pelos capacitores e indutores presentes na rede, que tem a finalidade de filtro para as mesmas.

Figura 36 – Vista aproximada da tensão modulada pelo PWM



Fonte: Autor

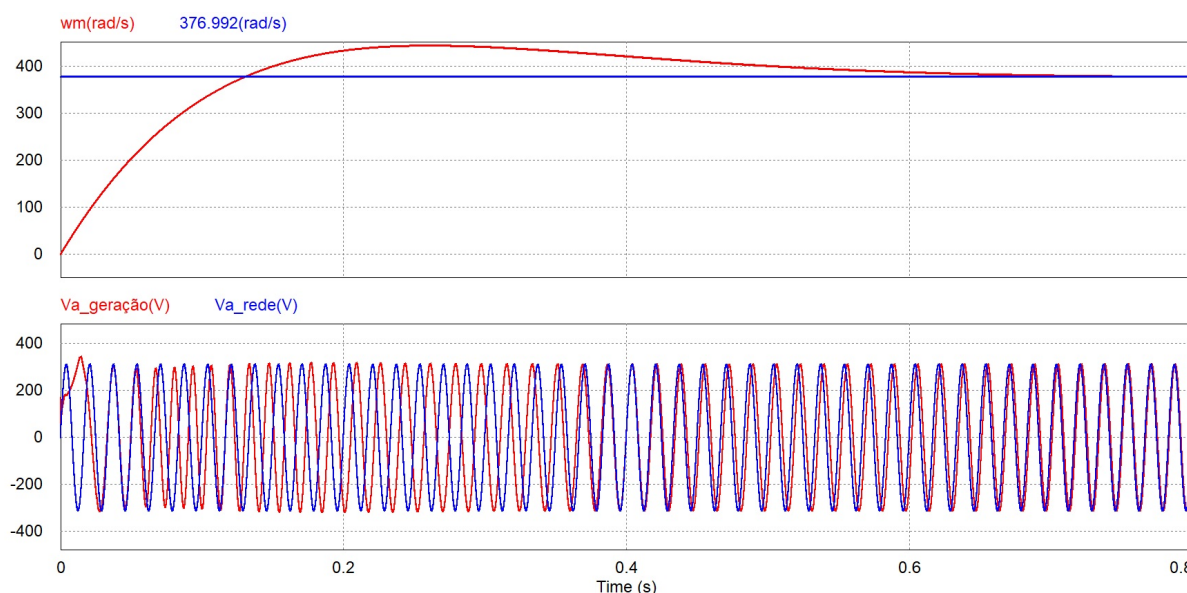
4.1.3 Conexão à rede

Após as simulações do gerador e da modulação PWM, foram efetuadas simulações do sistema integrado. O controlador de potência demanda a quantidade de ativo e reativo necessários na rede que são alterados quando a simulação atinge 1,5 s. Uma chave fica encarregada de conectar o sistema com a rede em 1,1s, antes disso, o sistema estará operando de maneira ilhada.

Na Figura 37, nota-se o comportamento do gerador e da rede durante o regime de partida. A oscilação na tensão de geração e a falta de sincronismo com a tensão na rede ocorre devido a inércia virtual no sistema mecânico do gerador. A demora até a estabilização do gerador na velocidade de sincronismo para uma frequência de rede de 60 Hz também é ocasionada pela inércia virtual.

Após decorridos 0,6 s de simulação é possível perceber que, conforme o gerador atinge a velocidade síncrona, as tensões de rede e de geração começam a sincronizar uma com a outra.

Figura 37 – Partida do gerador e sincronismo das tensões



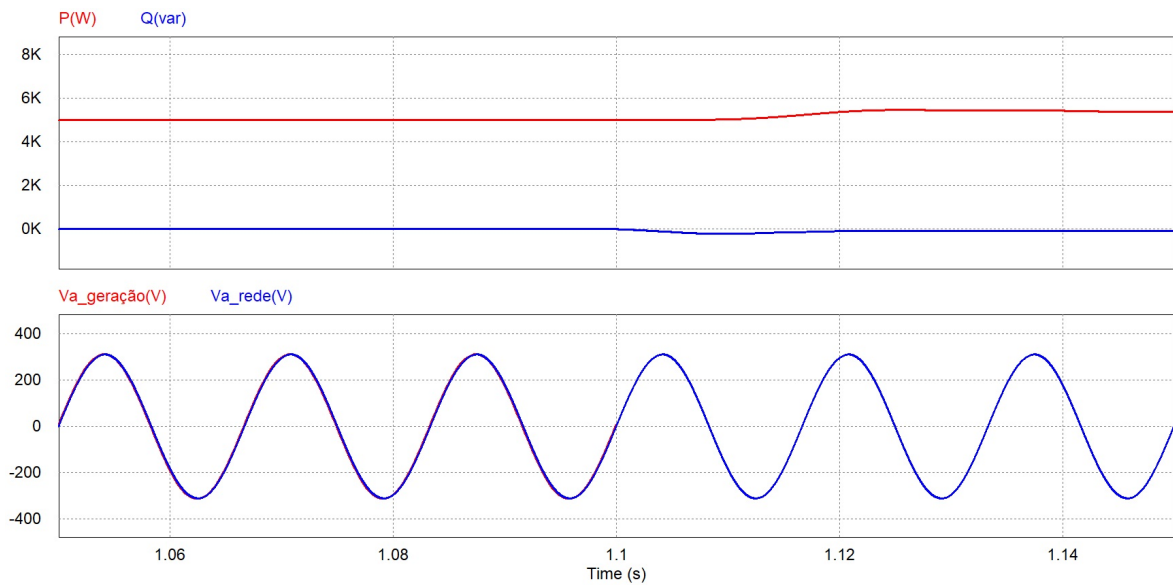
Fonte: Autor

A Figura 38 mostra o momento no qual o sistema se conecta com a rede em 1,1 s. Antes desse período de tempo, o sistema opera de maneira ilhada e nota-se que tanto a tensão da geração bem como a da rede já apresentam um sincronismo. A potência ativa simulada foi de 5011 W, um erro de 0,22%, em relação a potência ativa requerida inicialmente que era de 5000 W, significando que o sistema consegue operar de maneira ilhada sem nenhuma dificuldade. Outro ponto a se salientar, após o sistema se conectar à rede, é que a potência ativa passa a ser de 5385 W, um erro de 7,7%, em relação a potência ativa desejada. Também há presença de uma potência reativa com valor de 48 var capacitivo.

Para a potência reativa há uma leve oscilação que acaba sendo minimizada devido a uma correção de ângulo no bloco de controle de potência. Essa correção é necessária pois a presença dos filtros passa-baixa conectados à rede, que obterão as correntes para o gerador, acrescentam uma defasagem de aproximadamente 25° nos ângulos das correntes, sendo essa compensada na malha de controle de potência.

Na Figura 39, após 1,5 s, o controle de potência demanda uma alteração de potência ativa e reativa e apresenta o comportamento do gerador, das tensões e das potências. Quando se altera o requisito de potência para o sistema, observa-se uma oscilação no rotor do gerador, que é causada pela inércia virtual presente na parte mecânica do gerador. As tensões de geração e de rede não foram influenciadas e mantiveram tanto a amplitude bem como o sincronismo.

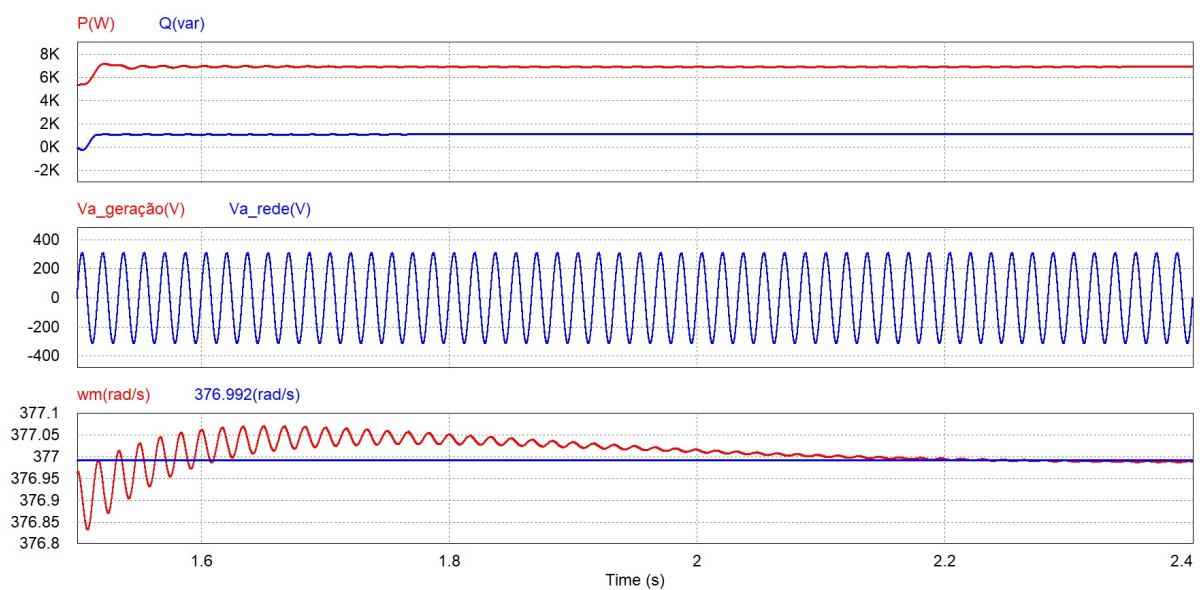
Figura 38 – Potências e tensões no ponto de conexão com a rede



Fonte: Autor

A alteração nas potências pelo controlador faz com que haja uma oscilação no rotor do gerador causando uma variação nas potências. Isso ocorre devido a presença de uma inércia virtual e, a malha de controle de velocidade faz com que essa oscilação seja atenuada em 2,2 s, assim o gerador volta a operar na velocidade síncrona. A potência ativa atingiu 6896 W, um erro de 14,9%, em relação aos 6000 W desejados. Já a potência reativa indutiva simulada foi de 1114 var, ou seja, 11,4% de erro, em relação aos 1000 var inicialmente previstos.

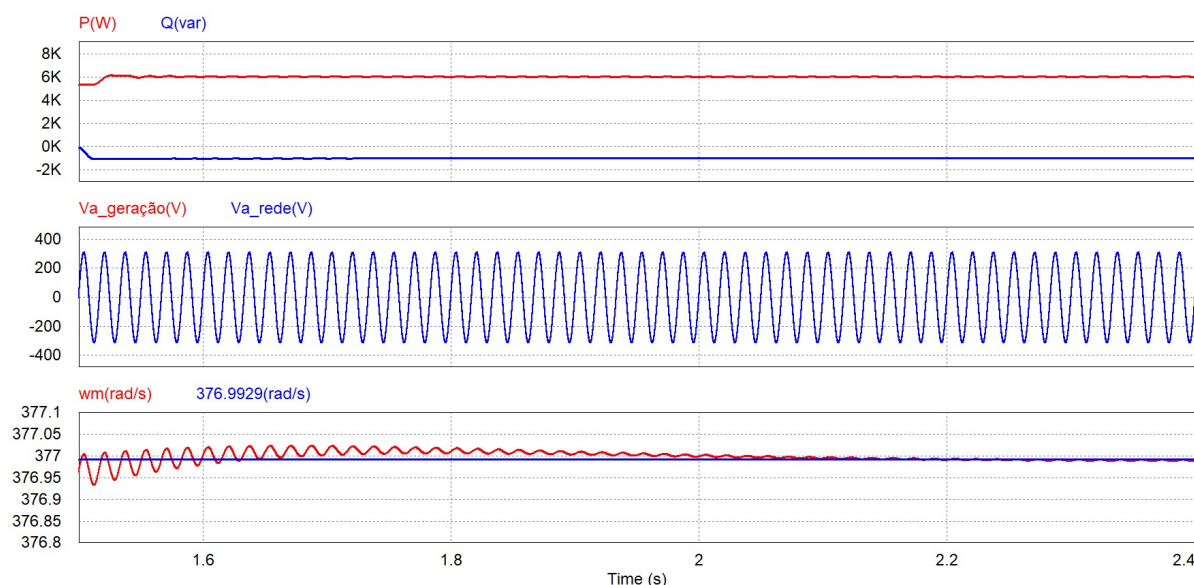
Figura 39 – Comparação de potência tensão e velocidade de rotação com demanda de reativo indutivo



Fonte: Autor

Também foi efetuada a simulação com uma potência reativa capacitiva como visualizada na Figura 40. Nota-se o mesmo comportamento na velocidade do gerador, mais uma vez demonstrando a presença de uma inércia virtual. Para esta simulação as potências demandadas pelo controlador foram de 6000 W e 1000 var capacitivo. Para a potência ativa o valor simulado foi de 6006 W, um erro de 0,1%, em relação ao que foi requisitado pelo operador. Para a potência reativa o valor obtido foi de 995 var capacitivo. Em ambos, os casos, os valores das potências, praticamente, forneceram o valor desejado.

Figura 40 – Comparação de potência tensão e velocidade de rotação com demanda de reativo capacitivo



Fonte: Autor

As diferenças nos valores de potência no período em que o gerador opera, tanto ilhado quanto conectado com a rede, e também nas alterações demandadas pelo controle de potência ocorrem devido a falta de uma malha de controle adequada, pois o sistema opera em malha aberta. Seria necessário fechar a malha de potência e projetar um controlador mais elaborado para se obter a potência desejada.

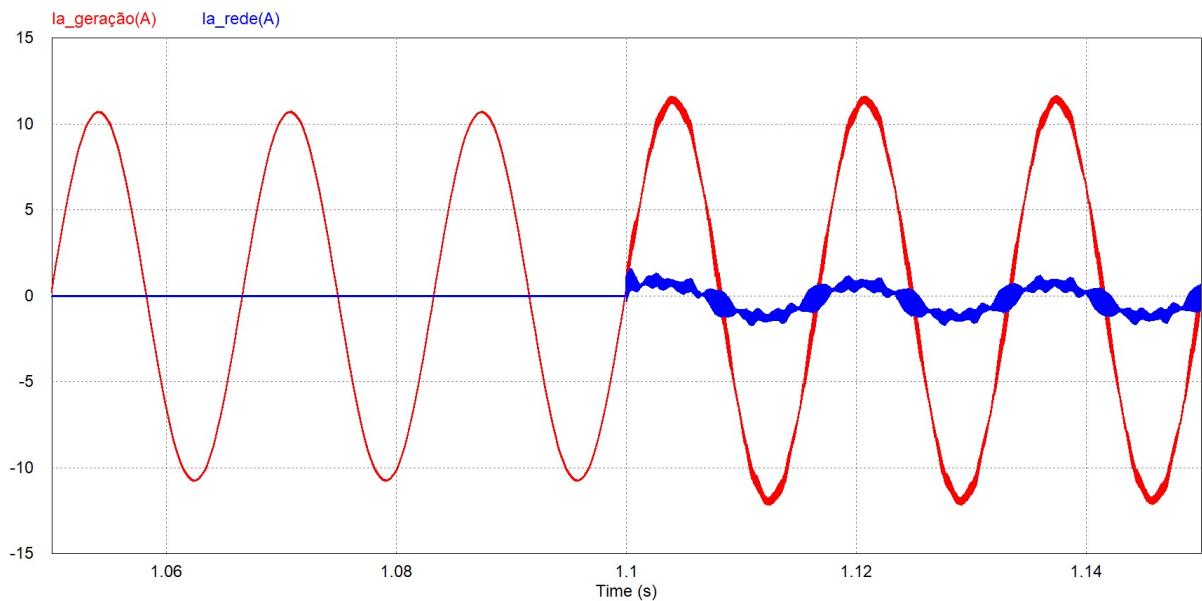
A oscilação na velocidade, quando se altera as potências do sistema, é observada nas simulações de potência indutiva e de potência capacitiva. A malha de controle para a rotação consegue compensar de forma satisfatória essa oscilação, mas o uso de um método mais robusto de controle, provavelmente, minimizará ainda mais a transição do rotor do gerador para a nova potência.

As correntes no sistema de geração e de rede são apresentadas na Figura 41. Nota-se a presença de harmônicas após a conexão com a rede em ambas as formas de ondas de corrente. Isso ocorre devido ao filtro LC não suprimir todos as harmônicas que estão circulando na rede.

Portanto, verifica-se a necessidade de um aprimoramento do filtro.

Na literatura, para a supressão dessas harmônicas de ordem elevada, se utiliza muito o filtro LCL, Dursun e Dosoglu (2018), Ise e Bevrani (2016), pois o indutor irá minimizar a impedância de conexão com a rede. Quando se deseja controlar a corrente, o último elemento precisa sempre ser um indutor, pois a grande quantidade de harmônica na rede é causada pelo capacitor como sendo o último elemento do filtro.

Figura 41 – Corrente de geração de de rede no momento de conexão com a rede



Fonte: Autor

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma revisão de literatura sobre os conceitos de VSG, inversores, modulação PWM e métodos de conexão à rede de um sistema de geração distribuída para energias renováveis. Essa revisão forneceu a base teórica para o desenvolvimento da metodologia utilizada neste trabalho.

No processo metodológico adotou-se uma das abordagens já desenvolvidas para o VSG, a qual a modelagem matemática utilizada era baseada em equações elétricas e mecânicas tradicionais de um gerador síncrono. Para o PWM, adotou-se o SPWM, a fim de simplificar a obtenção dos sinais modulantes para as chaves do inversor. No método de conexão com a rede, a simplicidade da técnica foi o fator determinante para a escolha do sincronismo à rede. Ao adotar essas abordagens de implementação mais simples, foi possível o desenvolvimento de um sistema complexo como o deste trabalho.

Constatou-se que a parte elétrica do gerador consegue gerar as tensões de fase com as devidas defasagens que servem de referência para o PWM. Esse, por sua vez, gerou pulsos para que o inversor chaveasse as tensões a serem inseridas na rede. Na parte mecânica do gerador, foi necessário a implementação de uma velocidade fixa para tornar possível a geração do torque eletromagnético.

As malhas de controle compensam os erros durante a partida do sistema. A malha de velocidade atenua as oscilações do gerador no momento que é alterado a potência. A malha de sincronismo à rede efetua a sincronização da tensão gerada com a da rede, no entanto, não foram efetuados simulações com falhas na rede. A conexão no PCC é efetuada em um determinado tempo, mas não foi efetuado simulações com o sistema sendo desligado da rede.

Há questões como harmônicas na corrente que precisam ser sanadas. É necessário a implementação de uma malha de controle para as potências, pois quando o sistema é sincronizado com a rede há uma diferença em relação a potência requerida e a simulada.

Os resultados demonstram que o sistema consegue operar de maneira isolada com pouca variação de potência. Sendo assim, o cálculo de potência está correto e é possível suprir as potências ativa e reativa com as demandas de carga que o sistema possui.

Sendo assim, pode-se concluir que os objetivos do estudo foram atendidos. O sistema proposto gerou as tensões necessárias para um sistema de geração distribuída, há a injeção de potência tanto ativa como reativa na rede bem como um sincronismo com a mesma. Isso demonstra que uma implementação prática é possível.

5.1 Perspectivas Futuras

As seguintes atividades podem ser realizadas para dar continuidade ao estudo:

- Inserir um sistema de geração fotovoltaico e/ou eólico;
- Implementação prática;
- Outros métodos de sincronismo com a rede;
- Simular falhas na rede;
- Aprimorar malhas de controle;
- Automatização do sincronismo com a rede;
- Controle de potências.

REFERÊNCIAS

- Ashraful Islam. **IMPLEMENTATION OF VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR METHODOLOGIES FOR RENEWABLE INTEGRATION**. Master of Science — Temple University Graduate Board, 2017.
- BARATIERI, C. L. **Contribuições ao controle do motor síncrono de ímã permanente com fcem não senoidal**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2015.
- BEVRANI, H.; ISE, T.; MIURA, Y. Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Elsevier Ltd, v. 54, p. 244–254, 2014. ISSN 01420615. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.07.009>>.
- BOJOI, R. et al. Improved current control strategy for power conditioners using sinusoidal signal integrators in synchronous reference frame. **PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference**, v. 6, n. 6, p. 4623–4629, 2004. ISSN 02759306.
- BOLDEA, I. **The Electric Generators Handbook, Synchronous Generators, Second Edition (CRC Press)**. [S.l.: s.n.], 2016. 1–465 p. ISBN 9781498723558.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. [S.l.: s.n.], 2013. v. 53. 680 p. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796.
- CHEN, Y. et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines. **International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives**, n. May, p. 1–6, 2011. ISSN 21555516.
- _____. Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, v. 1, n. 10, p. 734–739, 2012. ISSN 2172038X.
- CHUNG, S. K. A phase tracking system for three phase utility interface inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 15, n. 3, p. 431–438, 2000. ISSN 08858993.
- CIOBOTARU, M.; TEODORESCU, R.; BLAABJERG, F. A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator. **PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference**, v. 2, p. 469–893, 1990. ISSN 02759306.
- CONTI, D. **Plataforma de monitoramento e análise de motores de indução trifásicos**. Monografia (TCC) — Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - Campus Erechim (URI-Erechim), 2018.
- D. Grahame Holmes, T. A. L. **Electric Power Systems: Analysis and Control**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2. 64–66 p. ISSN 1540-7977. ISBN 0471234397.

- DRIESEN, J.; VISSCHER, K. Virtual synchronous generators. **IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, PES**, p. 1–3, 2008.
- DURSUN, M.; DOSOGLU, M. K. LCL Filter Design for Grid Connected Three-Phase Inverter. **ISMSIT 2018 - 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, Proceedings**, n. 3, p. 3–6, 2018.
- GUO, X. Q.; WU, W. Y.; GU, H. R. Phase locked loop and synchronization methods for gridinterfaced converters: A review. **Przegląd Elektrotechniczny**, v. 87, n. 4, p. 182–187, 2011. ISSN 00332097.
- HIRASE, Y. et al. A grid-connected inverter with virtual synchronous generator model of algebraic type. **Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)**, v. 184, n. 4, p. 10–21, 2013. ISSN 04247760.
- ISE, T.; BEVRANI, H. **Virtual synchronous generators and their applications in microgrids**. Elsevier Inc., 2016. 282–294 p. ISBN 9780128032138. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803212-1/00012-X>>.
- Jamil, M. Kothari, D. P. Rizwan, M. **Grid integration of solar photovoltaic systems**. [S.l.: s.n.], 2018. 368 p. ISBN 9781498798327.
- KARL, J.; HAGGLUND, T. **PID Controllers, 2nd Edition**. [S.l.: s.n.], 1995. 354 p. ISBN 1556175167.
- KAURA VIKRAMBLASKO, V. Vikram Kaura,. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. 1, p. 58–63, 1997.
- KRAUSE, P.; WASYNCZUK, O.; PEKAREK, S. **Electromechanical Motion Devices**. [S.l.: s.n.], 2012. ISBN 9781118296127.
- KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. D. **Analysis of Electric Machinery and Drive Systems**. [S.l.: s.n.], 2010. ISBN 9781118024294.
- LI, M. et al. A consistent dynamic response control strategy for virtual synchronous generator. **2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia, IFEEC - ECCE Asia 2017**, p. 1570–1574, 2017.
- LI, X.; CHEN, G. Synchronization Strategy for Virtual Synchronous Generator based Energy Storage System. In: **IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2019. v. 2019-Octob, p. 2512–2517. ISBN 978-1-7281-4878-6. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8927372/>>.
- LOIX, T. et al. Layout and performance of the power electronic converter platform for the VSYNC project. **2009 IEEE Bucharest PowerTech: Innovative Ideas Toward the Electrical Grid of the Future**, p. 1–8, 2009.

Marian P. Kazmierkowski, Ramu Krishnan, Frede Blaabjerg, J. D. I. **Control in Power Electronics: Selected Problems**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 7. 529 p. ISBN 0124027725.

PEDDAPELLI, S. K. **Pulse Width Modulation**. [S.l.: s.n.], 2017. 210 p. ISBN 9783110344196.

PINTO, M. O. **Fundamentos de Energia Eólica**. 2014. 347 p.

RASHID, M. H. **POWER ELECTRONICS HANDBOOK**. [S.l.: s.n.], 2017. 1522 p. ISBN 9780128114070.

RODRÍGUEZ, P. et al. Advanced grid synchronization system for power converters under unbalanced and distorted operating conditions. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)**, n. 2, p. 5173–5178, 2006.

_____. New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions. **PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference**, 2006. ISSN 02759306.

ROLIM, L. G. B.; Da Costa, D. R.; AREDES, M. Analysis and software implementation of a robust synchronizing PLL circuit based on the pq theory. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 53, n. 6, p. 1919–1926, 2006. ISSN 02780046.

SAKIMOTO, K.; MIURA, Y.; ISE, T. Stabilization of a power system with a distributed generator by a Virtual Synchronous Generator function. **8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia: "Green World with Power Electronics"**, ICPE 2011-ECCE Asia, n. 2, p. 1498–1505, 2011.

SHRESTHA, D. Virtual inertia emulation to improve dynamic frequency stability of low inertia microgrids. 2016.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. **GRID CONVERTERS FOR PHOTOVOLTAIC AND WIND POWER SYSTEMS**. [S.l.: s.n.], 2011. ISBN 9780470057513.

TORO, V. del. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [S.l.: s.n.], 1994.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kinsley**. [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 9781538658048.

YOUNIS, T. et al. Single-phase virtual synchronous generator without a dedicated synchronization unit. In: **2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)**. IEEE, 2015. v. 2016-Septe, n. 1, p. 1–6. ISBN 978-1-4799-6582-3. ISSN 02750473. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7572463/>>.

YUAN, X. et al. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 38, n. 2, p. 523–532, 2002. ISSN 00939994.