

## **Modelagem e controle de uma máquina síncrona virtual.<sup>1</sup>**

*LIMA, Tayrine de Carvalho<sup>2</sup>*

*Centro Universitário Academia - UniAcademia*

*SILVA JUNIOR, Dalmo Cardoso da<sup>3</sup>*

*Centro Universitário Academia - UniAcademia*

### **RESUMO**

Este trabalho tem como objeto principal a modelagem e o controle de um conversor estático de forma a operar como uma máquina síncrona quando visto pela rede elétrica. O estudo apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica afim de introduzir conceitos de conversores estáticos de tensão CC – CA, ditos inversores, máquina síncrona e máquina síncrona virtual bem como, as equações que as regem. Em seguida, é feita a modelagem no ambiente MATLAB/Simulink de um conversor operando como uma máquina síncrona. A metodologia apresenta a forma como as chaves do inversor são disparadas e a regulação de potência ativa e potência reativa. A proposta deste trabalho é apresentar a máquina síncrona virtual como método de controle de um conversor estático, garantindo à carga as mesmas características encontradas na rede usualmente. A simulação foi realizada para o modo de ilha, ou seja, para a situação onde não há presença da rede elétrica. Pelos resultados apresentados, concluiu-se que a metodologia de controle utilizada no inversor é eficiente, a partir das curvas de tensão, corrente, potência e frequência extraídas da simulação.

**Palavras-chave:** Máquina Síncrona Virtual. *Off grid*. Inércia Virtual. Inversor.

### **1. INTRODUÇÃO**

A pesquisa por alternativas energéticas através de fontes renováveis tem ganhado espaço pelo mundo inteiro. Isso se deve à necessidade de reduzir os impactos ambientais e colaborar com a matriz energética dos países com soluções

---

<sup>1</sup> Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Academia - UniAcademia, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Graduanda em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Academia - UniAcademia.

<sup>3</sup> Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia - UniAcademia.

sustentáveis e economicamente viáveis. A geração solar e eólica são as principais fontes alternativas para a geração de energia elétrica (PACHECO, 2006).

Com a vasta extensão do território nacional e a distância entre as usinas geradoras e os centros consumidores, torna-se preciso construir longas linhas de transmissão e distribuição que, devido ao custo do projeto, encarecem e dificultam a ampla difusão das grandes centrais geradoras. Portanto, a geração distribuída torna-se solução para aproximar a geração e os consumidores, reduzindo o custo de implementação e distribuição de energia elétrica (ANDRADE, 2019).

A geração distribuída (GD) é parte integrante das novas tecnologias relacionadas às *smart grids* (redes inteligentes) que contam com a interligação de todas as fontes geradoras – centrais hidrelétricas e termoeletricas convencionais, energia solar e eólica, armazenadores (baterias) - e consumidoras – plantas industriais, veículos elétricos, residências, comércios, hospitais, entre outras - comunicando-se entre si e com o sistema de controle de modo a fornecer e consumir energia (LOPES, YONNA & FERNANDES, 2015).

Conforme Resolução Normativa da ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro está apto a gerar energia elétrica para o consumo próprio como também para fornecer o excedente à concessionária a partir de fontes renováveis. Define-se assim as micro e minigerações distribuídas como centrais geradoras com potência instalada de até 75 kW e de 75 kW a 5 MW, respectivamente, conectadas à rede de distribuição através das unidades consumidoras, revisada pela Resolução Normativa nº 687/2015 (ANEEL).

A GD possui como vantagens, em relação à geração centralizada ou convencional, a redução na perda de energia devido às linhas de transmissão, o aumento da estabilidade no serviço de energia elétrica, diminuição dos problemas ambientais, redução no custo de fornecimento de eletricidade e o maior alcance de consumidores rurais, podendo trabalhar conectada à rede ou isolada (ilhada). Em ambos os casos, faz-se necessário o controle do sistema devido ao regime intermitente de geração e a diminuição da inércia nas micro e minigerações. Quando um sistema opera conectado à rede, a mesma impõe a frequência e tensão necessária, ou seja, as tensões e frequência de referência são fornecidas pelo sistema de distribuição (SERRA, 2019). Já o sistema operando ilhado, ele próprio precisa

gerar e controlar sua tensão e, quando trabalhando em corrente alternada, sua frequência (SERRA, 2019).

Assim, tendo em vista a atual situação do sistema elétrico de potência (SEP), a geração distribuída torna-se alternativa para sanar deficiências do SEP, abrangendo o maior número de pessoas que fazem uso de eletricidade, uma vez que permite a proximidade da geração com o centro consumidor.

### 1.1. OBJETIVO

A implementação da geração distribuída necessita da conexão dessa com a rede de distribuição. Essa conexão é realizada por meio de um conversor eletrônico de potência CC-CA, denominado inversor. Esse mesmo conversor pode, além de proporcionar a conexão com a rede elétrica, reduzir os danos causados ao sistema devido a inserção de cargas não lineares que acarretam o surgimento de componentes harmônicos e inclusão de potência reativa à rede (SILVA JUNIOR, 2017).

Os conversores podem ser classificados em três formas diferentes: conversores alimentadores de rede, de suporte à rede e os formadores de rede (GUIMARÃES, 2019). Neste trabalho, será abordado os conversores formadores de rede de maneira a determinar a frequência e a amplitude da tensão, utilizando uma malha de controle apropriada.

O sistema de geração de energia elétrica atual é composto, predominantemente, por máquinas síncronas, os chamados geradores. Os geradores síncronos possuem como característica a capacidade de sincronizar a frequência a partir do controle de velocidade, permitindo a conexão com a rede e com outros geradores (MELLO, 2018).

Com a inserção de fontes alternativas no sistema elétrico, surge a necessidade de conectá-las entre si e à rede. Dessa forma, a implementação de uma máquina síncrona virtual como forma de controlar o inversor a ponto da rede elétrica perceber as características de uma máquina síncrona real.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é apresentar um modelo de máquina síncrona virtual (VSM) para controlar um inversor, comprovando por meio de simulações no software MATLAB/Simulink as funcionalidades desta comunicação

entre a GD e a rede, gerando a inércia necessária ao sistema e devolvendo o equilíbrio das gerações convencionais para as gerações distribuídas.

Dessa forma, o presente trabalho apresenta:

- Modelagem da máquina síncrona virtual: serão expostas as equações mecânicas e elétricas de uma máquina síncrona real para implementação;
- Modelagem de um sistema com VSM;
- Simulação da resposta do sistema ao uso de uma máquina síncrona virtual.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo, serão apresentados os conversores CC-CA e a máquina síncrona. Com base nesses conceitos, será possível construir a metodologia para alcançar os objetivos deste trabalho.

### **2.1. IMPORTÂNCIA DA ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E DOS INVERSORES**

As pesquisas por novas fontes alternativas de energia, como os painéis solares e as turbinas eólicas, têm ganhado forças e os avanços tecnológicos facilitado a inserção destes no sistema elétrico de potência (FELDMANN, 2020). Essas fontes de geração, geralmente, não possuem características inerciais dos geradores convencionais, sendo necessário malhas de controle baseadas em conversores estáticos de potência para devolver ao sistema a segurança, confiabilidade e estabilidade (FELDMANN, 2020). A eletrônica de potência auxilia a transferência de potência das fontes para a carga, mesmo que essas sejam diferentes (MOHAN, 2014). Dessa forma, a eletrônica de potência tem grande importância para as implementações de energia elétrica que visam a sustentabilidade.

Como visto, a geração distribuída tem seu ápice nas fontes de energias não convencionais, como eólica e solar. Tais fontes geram energia proporcional à eventos naturais – como a velocidade dos ventos e incidência dos raios solares – de modo a converter em um fluxo de energia intermitente. Ao serem conectados à rede de distribuição existente, ou até mesmo ao trabalhar isolada, essa energia sofrerá variações, impedindo o perfeito casamento com a rede existente e provocando danos

ao sistema. Exatamente neste ponto, surgem as interfaces de eletrônica de potência, permitindo controlar o fluxo de potência e trabalhar questões de segurança e eficiência nas operações (MOHAN, 2014).

A eletrônica de potência pode ser definida como o estudo da conversão eficiente e do controle de potência elétrica realizado por interruptores estáticos de uma entrada em uma saída. Os circuitos eletrônicos de potência funcionam a partir de semicondutores que, através de chaveamentos, realizam a mudança e controle de uma tensão ou corrente (HART, 2016). A manipulação dos circuitos de eletrônica de potência permitem a conversão de:

- uma entrada CC em uma saída CC de forma a possibilitar a regulação de um sinal CC (tensão ou corrente);
- uma entrada CA em uma saída CA permitindo a alteração de nível e frequência do sinal na saída;
- uma entrada CA em uma saída CC, classificados como retificadores, fazendo de dispositivos como diodos para manter a forma de onda de saída sem alternância de sinal;
- uma entrada CC em uma saída CA, a este último dá-se o nome de inversores.

Os inversores são, portanto, conversores que realizam transferência de potência de uma fonte contínua para uma fonte alternada. Os conversores estáticos CC/CA são formados por semicondutores e operam em dois estágios: corte e saturação (RAMPINELLI, 2010).

## 2.2. A MÁQUINA SÍNCRONA

Segundo o vocabulário eletrotécnico internacional, a máquina síncrona pode ser definida como “uma máquina de corrente alternada na qual a frequência da tensão induzida e a velocidade possuem uma relação constante”. As máquinas síncronas são conversores eletromecânicos que operam com velocidade síncrona a rede elétrica ao qual estão conectadas, em regime permanente (MARTINS, 2013). As máquinas síncronas, motores e geradores, são compostos por uma parte girante (rotor) e uma parte fixa (estator). No rotor, estão os enrolamentos de excitação para criação de

campo magnético e enrolamentos amortecedores para atenuar as oscilações em regime transitório. O estator possui três enrolamentos idênticos defasados em  $120^\circ$ . Uma máquina síncrona opera como motor ao receber em seus terminais corrente elétrica e converter em energia mecânica. Um gerador síncrono (GS) realiza a transformação da energia mecânica em elétrica. Este último será detalhado a seguir.

O gerador síncrono pode ser dividido em dois grupos: os de polos lisos e os de polos salientes. O primeiro, também chamado de rotor cilíndrico, é utilizado em altas velocidades de rotação e possui poucos polos. Os geradores de polos salientes são, geralmente, empregados em aplicações de baixa velocidade e possui muitos polos (MENDOZA LLERENA, 2011). Os enrolamentos amortecedores presentes nos geradores síncronos sofrem indução da corrente elétrica quando o rotor é perturbado por transitórios com variação de velocidade (MENDOZA LLERENA, 2011). Os geradores síncronos podem ser facilmente operados em paralelo com a rede e com outros GS. O paralelismo dos GS concede ao sistema maior confiabilidade, uma vez que a ausência de um não implica na total perda de potência para a carga e possibilita a retirada e/ou desligamento para manutenção. Para conectá-los, as tensões de linhas e dos GS precisará ser a mesma, com mesma sequência de fase e frequência do gerador que entrará em paralelo um pouco superior à do sistema, tendo em vista que ao acrescentar carga ao gerador ele irá perder velocidade e, conseqüentemente, diminuirá a sua frequência.

### 2.3. A MÁQUINA SÍNCRONA VIRTUAL

A máquina síncrona real, como visto anteriormente, traz para o sistema elétrico maior confiabilidade e segurança devido à sua característica inercial. A inércia do sistema se deve ao fato da possibilidade de armazenar energia cinética nas turbinas (no caso dos geradores) e, diante de uma perturbação transitória, fornecer potência elétrica, por um determinado tempo, de forma a reestabelecer o equilíbrio entre a geração e a carga (FELDMANN, 2020). Visando manter no sistema as mesmas características observadas pela geração convencional, utiliza-se a máquina síncrona virtual (do inglês, *Virtual Synchronous Machine*, VSM).

A VSM, para este trabalho gerador síncrono virtual (VSI, *Virtual Synchonverter*), é uma metodologia de controle dos inversores para emular as características

dinâmicas supracitadas de um gerador síncrono (BASONI, 2017) de forma a permitir que a rede acredite estar trabalhando com uma máquina real.

As VSM possibilitam a operação ilhada ou em sincronia com a rede, gerando tensões e frequências de referência para as microrredes e se adequando à inserção de banco de baterias para auxiliar o fornecimento de inércia (SILVA JUNIOR, 2017). As VSM podem ser modelada em parte elétrica e mecânica, como apresentado a seguir.

### 2.3.1. Parte elétrica

Seguindo a descrição da máquina síncrona e tendo como base os cálculos aplicados à geradores síncronos (SILVA JUNIOR, 2017), as seguintes equações expressam a parte elétrica de uma VSM para controlar um inversor trifásico a ser conectado à rede. É preciso ressaltar que, inicialmente, o valor de alimentação da máquina  $v_f$  corresponderá a uma entrada fixa, portanto, não será necessário trabalhá-lo.

$$M_{af} = M_f \cos(\theta) \quad (1)$$

$$M_{bf} = M_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2)$$

$$M_{cf} = M_f \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3)$$

As equações (1), (2) e (3) correspondem à indutância mútua entre a bobina do estator – idênticas com defasagem de  $120^\circ$  uma das outras conforme a sequência de fase mostrada ( $a, b, c$ ) – e a bobina do rotor que varia com ângulo  $\theta$ , onde  $M_f > 0$ .

Para o fluxo, tem-se (4), (5), (6) e (7):

$$\Phi_a = Li_a - Mi_b - Mi_c + M_{af}i_f \quad (4)$$

$$\Phi_b = Li_b - Mi_a - Mi_c + M_{bf}i_f \quad (5)$$

$$\Phi_c = L i_c - M i_a - M i_b + M_{cf} i_f \quad (6)$$

$$\Phi_f = M_{af} i_a + M_{bf} i_b + M_{cf} i_c + L_f i_f \quad (7)$$

onde  $i_f$  corresponde à corrente de excitação do rotor,  $\Phi_f$  o fluxo no rotor e as correntes  $i_a, i_b$  e  $i_c$  são de cada uma das fases do estator. Assim, com simplificações matriciais, o fluxo pode ser escrito como:

$$[\Phi] = L_s [i] + M_f i_f [\widetilde{\cos} \theta] \quad (8)$$

onde  $L_s$  corresponde à soma da autoindutância com a indutância mútua, tanto para o estator quanto para o rotor e a matriz de correntes e cossenos é escrita como em (9) e (10):

$$[i] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[\widetilde{\cos} \theta] = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 2.3.2. Parte mecânica

A parte mecânica da máquina síncrona é regida pela equação que envolve o momento de inércia  $J$ , a velocidade angular  $w_m$ , o torque mecânico  $T_m$ , o torque eletromagnético  $T_e$  e o fator de amortecimento  $D_p$ , da seguinte maneira:

$$J w_m = T_m - T_e - (D_p w_m) \quad (11)$$

Baseado nos cálculos desenvolvidos em (SILVA JUNIOR, 2017), pode-se relacionar o torque eletromagnético com a indutância mútua e a corrente trifásica da máquina, a saber:

$$T_e = M_f i_f \langle [i], [\widetilde{\sin} \theta] \rangle \quad (12)$$

Assim como visto na parte elétrica,  $[\widetilde{\sin} \theta]$  corresponde à matriz de senos e  $\langle [i], [\widetilde{\sin} \theta] \rangle$  equivale ao produto interno entre a matriz corrente e a matriz de senos.

$$[\widetilde{\sin} \theta] = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Para o caso de  $i_f$  ser constante, a equação pode ser reescrita como:

$$T_e \dot{\theta} = \langle [i], [e] \rangle \quad (14)$$

onde  $[e]$  corresponde à força contra eletromotriz resultante do movimento do rotor e definida por:

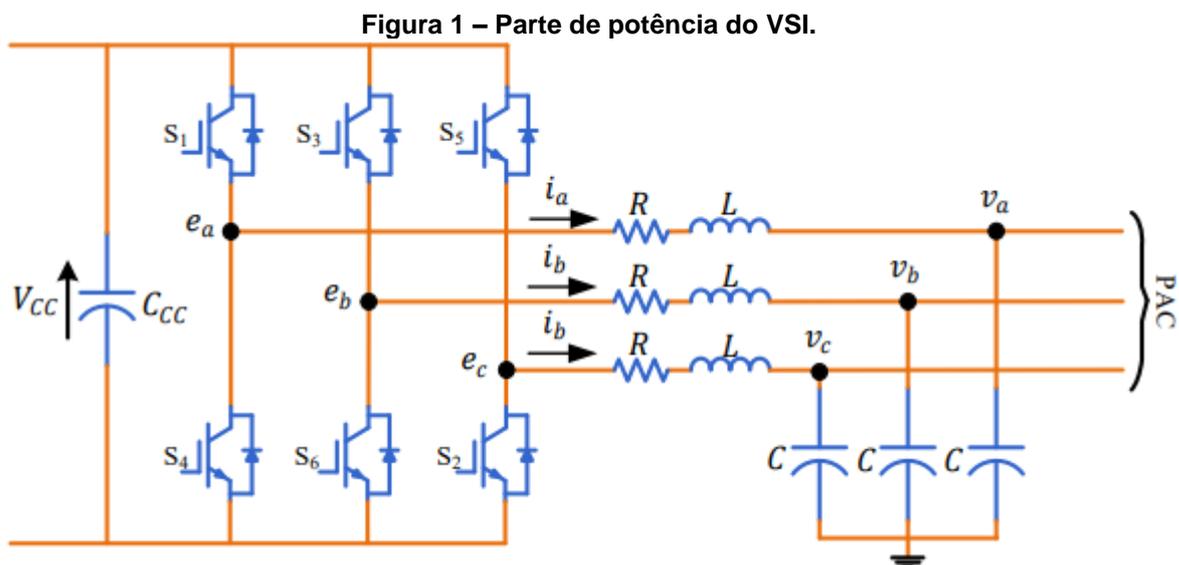
$$[e] = M_f i_f \dot{\theta} [\widetilde{\sin} \theta] - M_f \frac{di_f}{dt} [\widetilde{\cos} \theta] \quad (15)$$

### 2.3.3. Parte de potência

A parte de potência consiste na associação dos componentes do gerador síncrono aos componentes elétricos de um circuito de forma que: as impedâncias dos enrolamentos do estator do VSI são representadas pelo filtro RLC na saída do conversor. As tensões no ponto de acoplamento comum (PAC) correspondem às tensões nos terminais da máquina síncrona. Adotando  $i_f$  constante, como geralmente ocorre, a relação observada em (15) pode ser reescrita como:

$$[e] = M_f i_f \dot{\theta} [\widetilde{\sin} \theta] \quad (16)$$

Sendo assim, a Figura 1 apresenta o esquemático da parte de potência do sistema, onde são identificados as tensões e correntes, o filtro RLC e o Ponto de Acoplamento Comum (PAC).



Fonte: Silva Junior, 2017.

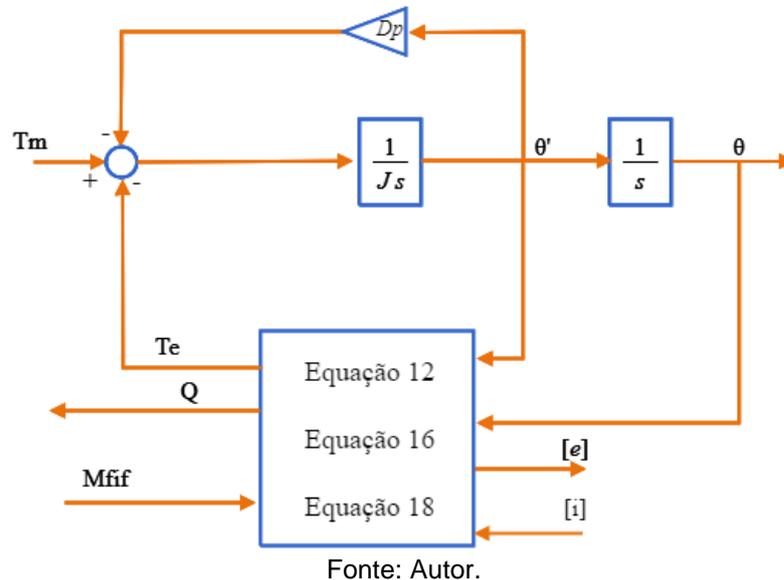
### 2.3.4. Parte eletrônica

A parte eletrônica trata-se das equações de potência ativa e reativa utilizadas para regular as potências de uma máquina síncrona virtual. Dessa forma, utilizando conceitos apresentados por (SILVA JUNIOR, 2017), define-se as potências ativa e reativas em (17) e (18), respectivamente.

$$P = \dot{\theta} M_f i_f \langle [i], [\sin \theta] \rangle \quad (17)$$

$$Q = -\dot{\theta} M_f i_f \langle [i], [\cos \theta] \rangle \quad (18)$$

A Figura 2 consiste na implementação da parte eletrônica do VSM através de diagrama de blocos. A implementação no software MATLAB/Simulink é realizada a partir da Figura 2, onde ocorre o controle do inversor, uma vez que a tensão de saída  $[e]$  é a ação de controle e esta irá determinar a sequência de chaveamento do inversor.

**Figura 2 – Parte eletrônica do VSI.**


### 3. METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo modelar um inversor para trabalhar como uma máquina síncrona virtual. A máquina síncrona virtual (VSM) carrega consigo as características contidas na máquina síncrona, como já foi exposto, de modo a devolver ao sistema a inércia mediante as variações sofridas.

O modelo matemático da máquina síncrona, tendo em vista sua operação como um gerador síncrono, e seu princípio de funcionamento foi apresentado no capítulo anterior de forma simplificada e objetiva, de modo a construir as bases para o controle de um inversor.

Neste trabalho será adotado uma máquina síncrona de rotor liso, onde não há enrolamentos amortecedores no rotor, com um par de polos por fase, sem corrente de Foucault e efeitos de saturação magnética no núcleo de ferro, como pode ser encontrado em (SILVA JUNIOR, 2017).

O presente trabalho realizado utilizou o software MATLAB/Simulink para implementar o modelo e simular as principais formas de onda obtidas na saída para a rede elétrica.

As equações para controle do inversor foram retiradas da modelagem matemática de uma máquina síncrona operando como gerador, apresentada nas seções 2.3.2 e 2.3.3.

### 3.1. DISPARO DAS CHAVES DO INVERSOR

O inversor trifásico fonte de tensão utilizado neste trabalho e apresentado na Figura 1 é composto por seis interruptores semicondutores IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, em português, Transistor Bipolar com Gatilho Isolado). O conversor CC-CA trifásico possui três braços formados por um par de IGBT e diodo conectados em antiparalelo, dando a cada conjunto o controle de uma fase.

O par de IGBTs de cada fase é controlado de modo a permitir que em um dado momento apenas um deles esteja conduzindo enquanto o outro está bloqueado. O chaveamento complementar real permite também um estado onde ambos IGBTs estejam em corte para impedir que o capacitor CC entre em curto circuito (ALMEIDA, 2011).

O método de controle do inversor trifásico fonte de tensão é baseado na implementação de uma VSM. Dessa forma, a sequência de chaveamento do inversor é determinada pela tensão injetada em cada braço do componente, regida por (16), resultado do movimento do rotor de uma máquina síncrona, defasada em 120°.

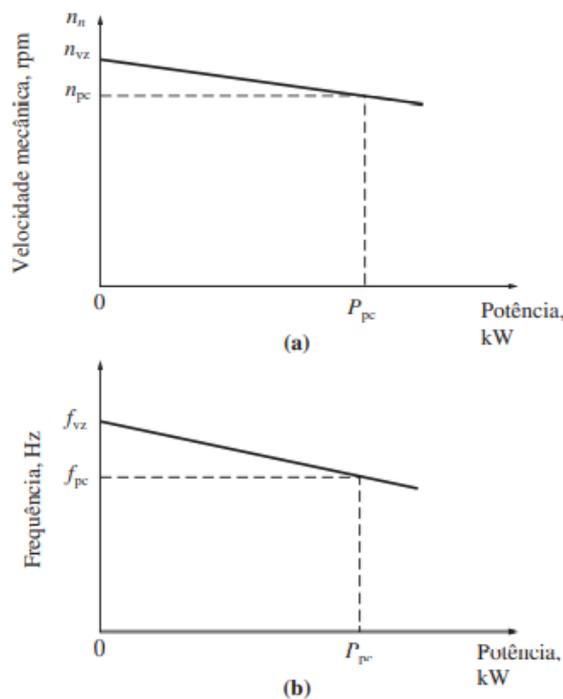
### 3.2. REGULAÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA

Um gerador síncrono possui como característica a frequência elétrica produzida em sincronia ou proporcional à velocidade de rotação mecânica de um gerador (CHAPMAN, 2013). A velocidade se relaciona com a frequência através de (19). Já a potência, se relaciona de maneira inversa: o aumento da potência reduz a velocidade (CHAPMAN, 2013). A Figura 3 apresenta um gráfico da velocidade mecânica versus potência elétrica e, por consequência de (19), o gráfico relação entre a frequência e a potência.

$$f_e = \frac{n_{sm}P}{120} \quad (19)$$

onde  $n_{sm}$  corresponde à velocidade do gerador,  $f_e$  é a frequência e  $P$  é o número de polos.

**Figura 3 – Relação da velocidade (a) e frequência (b) com a potência ativa.**



Fonte: Chapman, 2013.

Quando um gerador síncrono trabalha em paralelo é necessário garantir e administrar a variação da potência entregue de acordo com a frequência da rede (CHAPMAN, 2013). Essa variação se dá pela queda de frequência (do inglês, *frequency dropping*), de forma a aumentar a potência mecânica através do aumento da velocidade de rotação mediante a queda da velocidade mecânica, fruto do aumento da demanda de potência ativa pelo sistema (SILVA JUNIOR, 2017). Essa regulação de potência ativa (torque) é realizada na VSM comparando a velocidade angular virtual  $\dot{\theta}$  com a frequência angular de referência  $\dot{\theta}_{ref}$  e multiplicando a diferença pelo coeficiente de amortecimento devido ao atrito  $D_p$ , que exerce a função do coeficiente de queda de frequência, definido em (20).

$$D_p = \frac{\Delta T}{\Delta \dot{\theta}} \quad (20)$$

onde  $\Delta T$  equivale à variação do torque e  $\Delta \theta$  a da velocidade.

A inércia virtual é obtida através da multiplicação do coeficiente de amortecimento pela constante de tempo do circuito da queda de frequência. Uma das vantagens da inércia virtual é que esta pode ser bem menor que a dos geradores síncronos reais (SILVA JUNIOR, 2017).

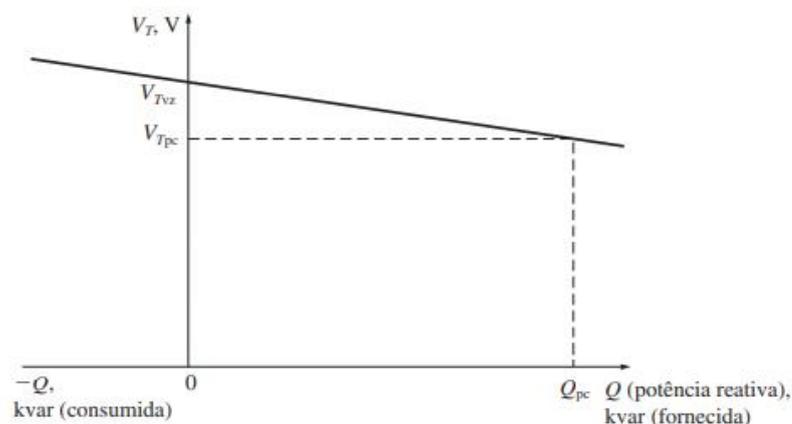
### 3.3. REGULAÇÃO DA POTÊNCIA REATIVA

De maneira semelhante à regulação da potência ativa, a regulação da potência reativa se dá através da relação de um ganho de tensão com a variação da tensão terminal, como pode ser visto em (21).

$$D_q = \frac{\Delta Q}{\Delta v} \quad (21)$$

Para a regulação da potência reativa utiliza-se a queda de tensão, relacionado por (21), onde é possível calcular o coeficiente de queda de tensão  $D_q$ . A variação da potência reativa ocorre quando há variação na carga, aumentando ou reduzindo a tensão terminal. A Figura 4 apresenta a relação gráfica da variação de tensão pela variação de potência reativa.

**Figura 4 – Relação da tensão com a potência reativa.**

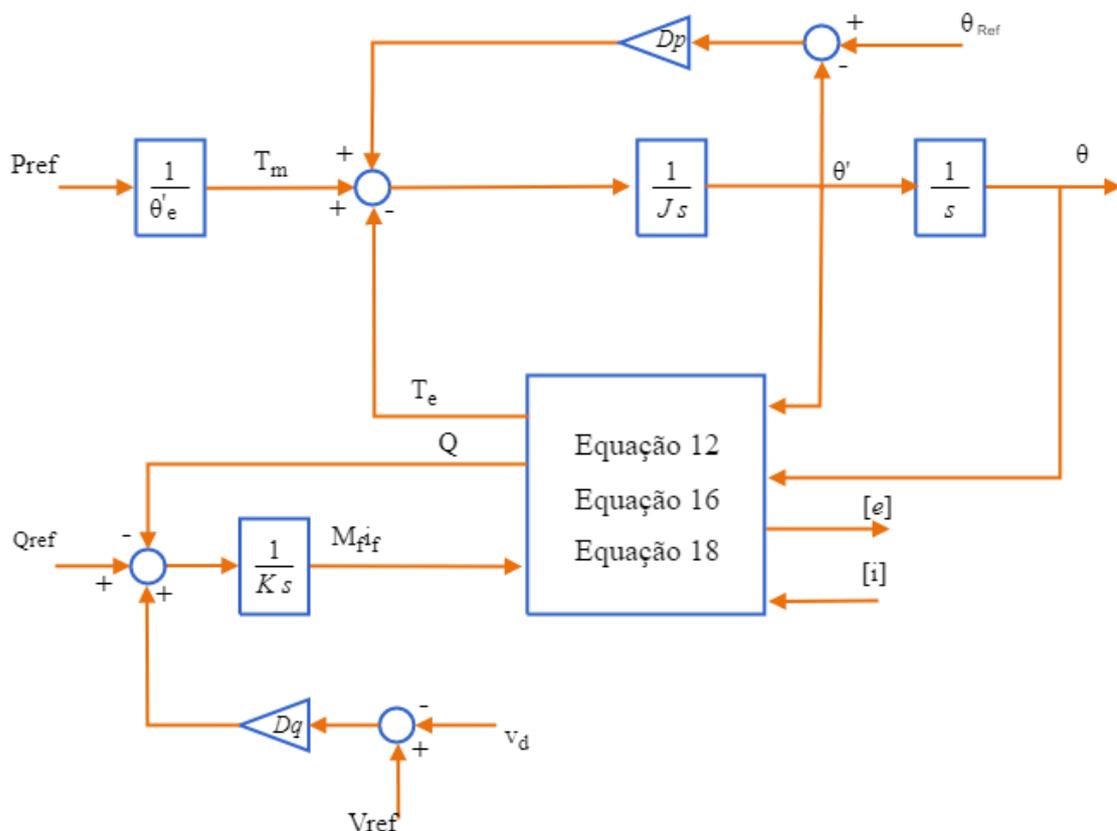


Fonte: Chapman, 2013.

A regulação ocorre comparando a tensão de referência  $v_{ref}$  e a amplitude da tensão no ponto de acoplamento  $v_d$ . Esse erro é multiplicado por  $D_q$  e em seguida acrescentado à diferença entre a potência reativa de referência  $Q_{ref}$  e a potência reativa  $Q$ , calculada a partir de (18).

A Figura 5 apresenta o diagrama para a regulação das potências. A parte superior da figura corresponde ao controle de potência ativa e a parte inferior ao controle de potência reativa. Na mesma figura ainda estão indicadas as saídas de tensão  $[e]$  para disparo das chaves do inversor.

**Figura 5 – Regulação de potência ativa e reativa da máquina síncrona virtual.**



Fonte: Autor.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos na simulação de um inversor modelado e controlado para trabalhar emulando as características de uma

máquina síncrona em modo ilhado, ou seja, o próprio inversor forma a microrrede e opera, gerenciando a potência entregue à carga.

#### 4.1. OPERAÇÃO COMO MÁQUINA SÍNCRONA VIRTUAL

Os parâmetros da simulação estão dispostos na tabela 1.

**Tabela 1:** Parâmetros da simulação.

Descrição	Valor
Coeficiente de amortecimento $D_p$	0,2026
Coeficiente de queda de tensão $D_q$	200
Constante de tempo malha de frequência $\tau_i$	2 ms
Constante de tempo malha de tensão $\tau_v$	2 ms
Frequência elétrica $\theta_e$	60 Hz
Inercia virtual $J$	0,4 ms
Parâmetro $K$	150.800
Potência ativa de referência $P_{ref}$	0 W
Potência reativa de referência $Q_{ref}$	0 VAr
Referência de frequência angular $\theta_{ref}$	377 rad/s
Referência de tensão $v_{ref}$	180 V

Fonte: Autor.

O parâmetro K corresponde ao ganho do integrador, conforme Figura 5 para gerar  $M_f i_f$ . A constante de tempo malha de tensão pode ser estimada a partir de (22).

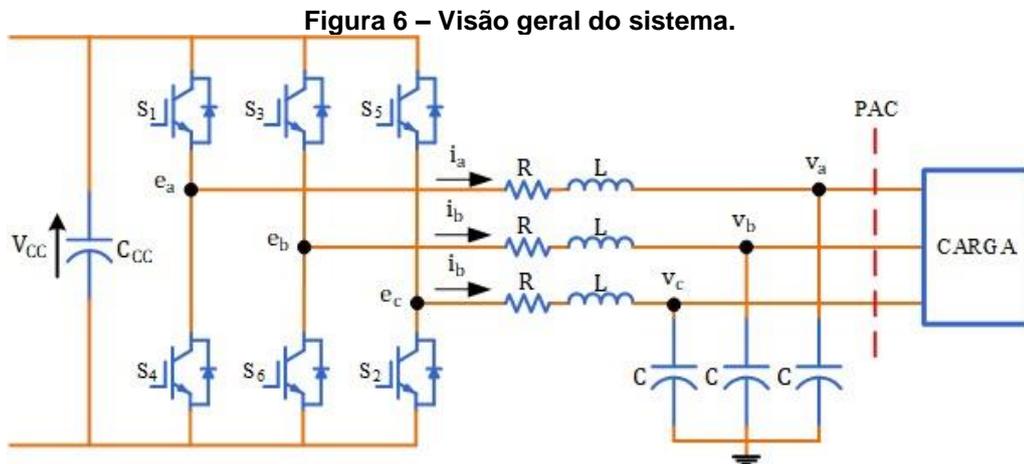
$$\tau_v = \frac{K}{\dot{\theta} D_q} \quad (22)$$

A constante de tempo da malha de frequência está relacionada com o coeficiente de amortecimento e a inércia, conforme (23).

$$J = \tau_f D_p \quad (23)$$

Para realizar a simulação do inversor como máquina síncrona virtual operando como formador de rede, utilizou-se apenas a alimentação do barramento CC, de forma a generalizar a fonte de geração de energia, vez que a fonte primária não é o foco do

trabalho. A figura 6 apresenta a visão geral do sistema, formado pelo inversor, o filtro de saída e a carga.

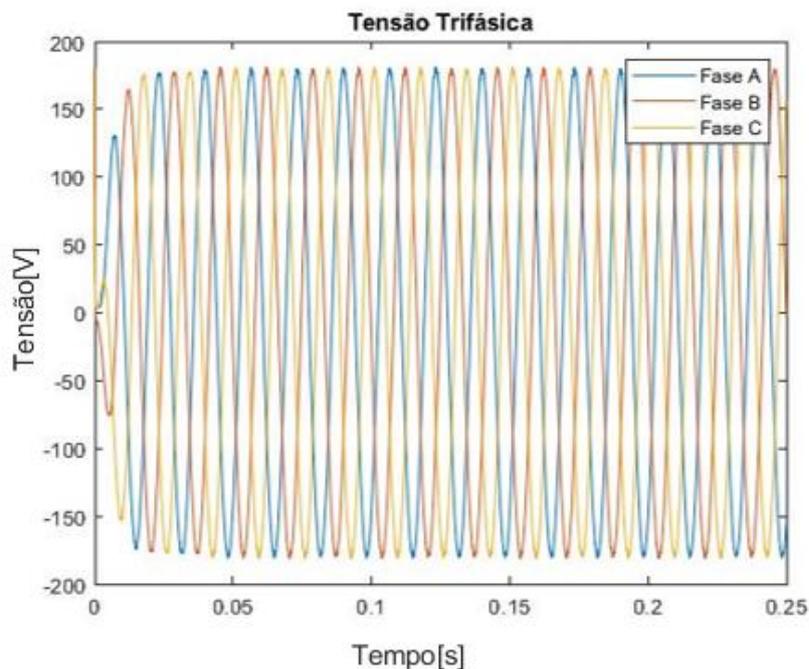


Fonte: Autor.

Os resultados obtidos foram apresentados para um sistema trabalhando no modo de ilhamento, em que não há conexão com a rede elétrica.

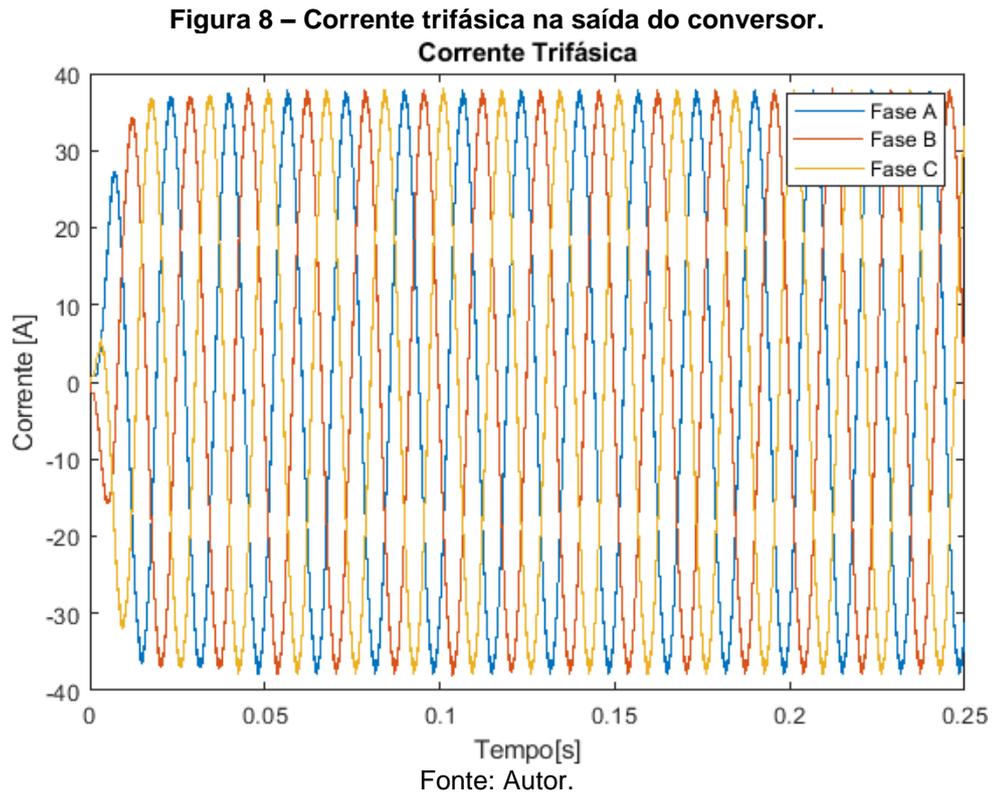
A Figura 7 apresenta a tensão trifásica no ponto de acoplamento comum e a Figura 8 a corrente injetada pelo conversor.

**Figura 7 – Tensão trifásica na saída do conversor.**



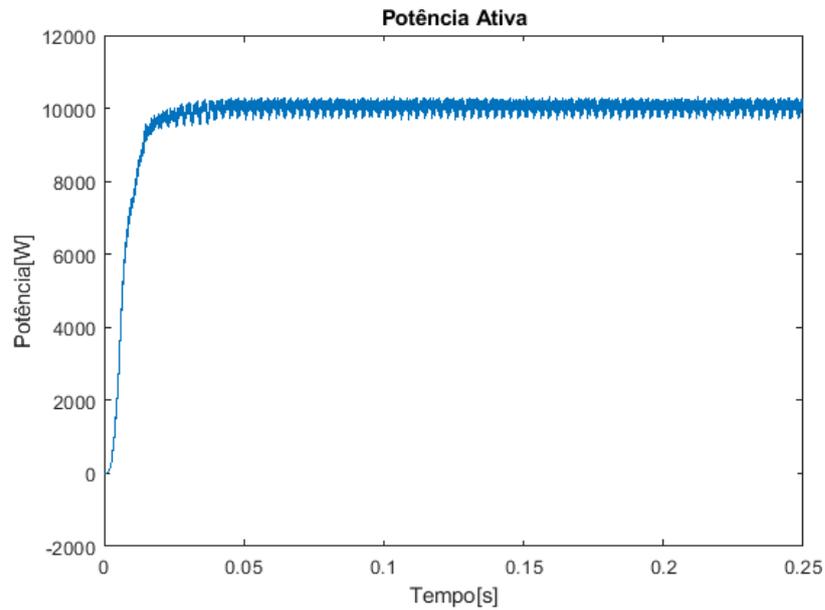
Fonte: Autor.

A figura 7 mostra a representação senoidal das tensões por fase com defasagem de  $120^\circ$  e valor de pico da tensão de fase em 180 V, como foi determinado o valor de referência.



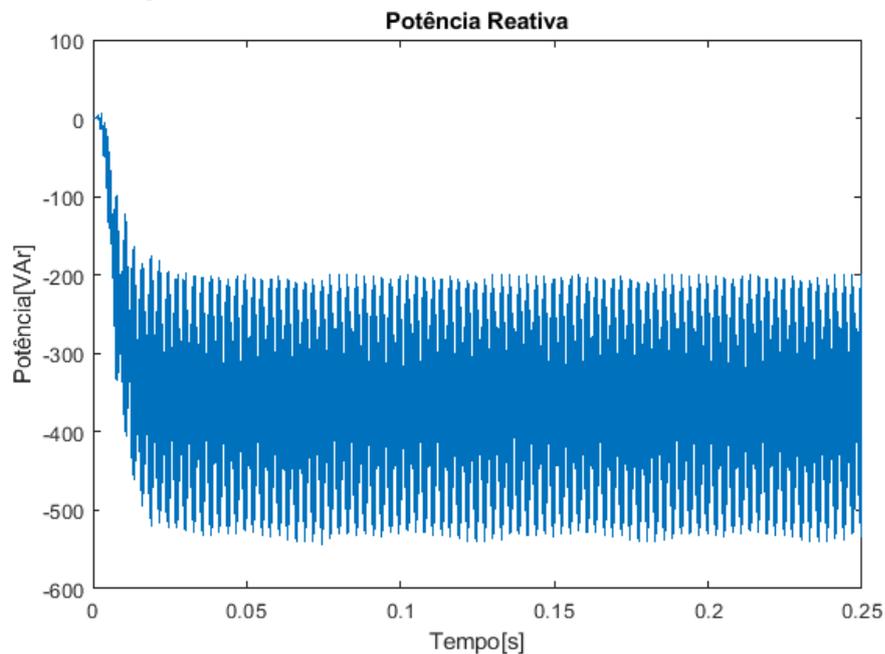
Também da simulação foi obtido valores de potência ativa e reativa, observados nas Figuras 9 e 10.

**Figura 9 – Potência ativa na saída do conversor.**



Fonte: Autor.

**Figura 10 – Potência reativa na saída do conversor.**



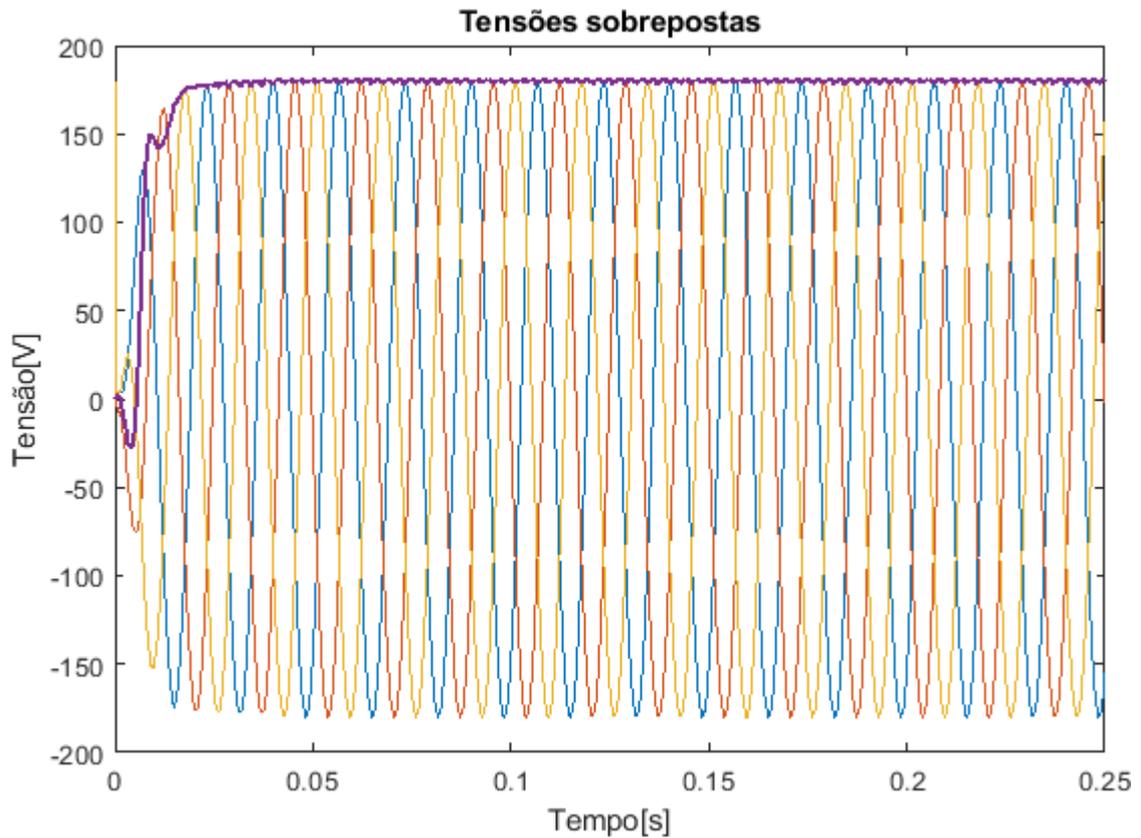
Fonte: Autor.

Alimentando uma carga de 10 kW, o conversor consome potência reativa para controlar a tensão injetada na mesma, justificando o gráfico de potência reativa apresentado na Figura 10.

De forma a garantir os valores estabelecidos para controle, a Figura 11 expressa a sobreposição da curva de tensão trifásica que a carga recebe com a

amplitude dela (curva em roxo). Dessa forma, comprovando o sistema de controle de amplitude da tensão trifásico no ponto de acoplamento comum.

Figura 11 – Sobreposição das curvas de tensão.

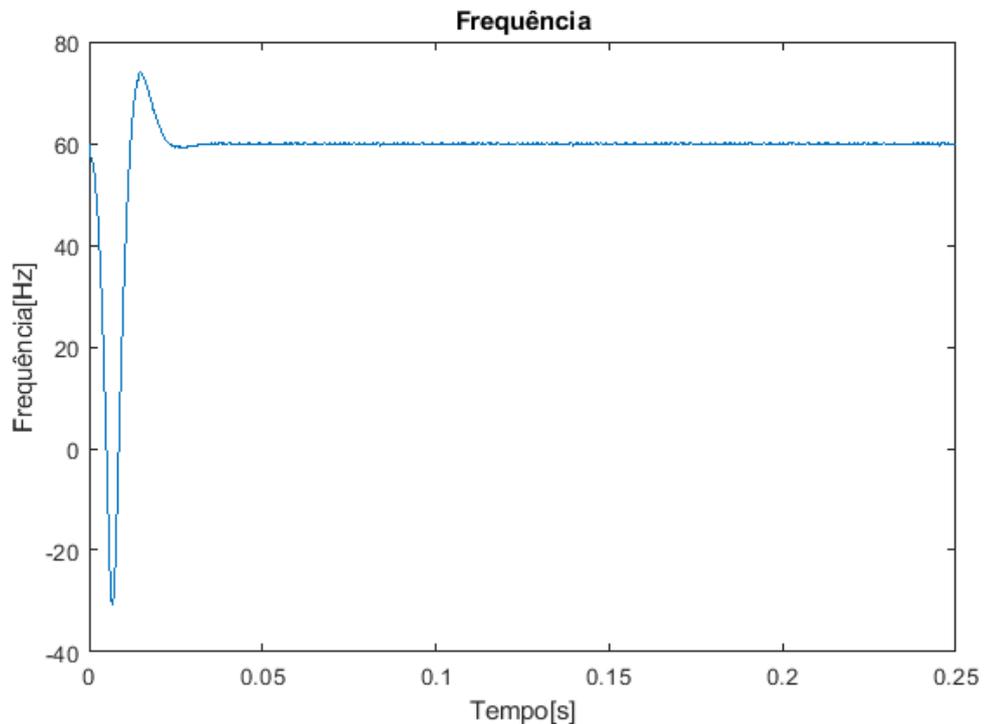


Fonte: Autor.

A curva (em roxo) que envolve as senoides trata-se da tensão em 180 V.

A frequência da rede elétrica no Brasil é 60 Hz. Mesmo no modo ilhado, o inversor precisa entregar à carga esta tensão. Pela figura 12 é possível perceber a frequência da microrrede formada pelo inversor.

Figura 12 – Frequência da rede.



Fonte: Autor.

Com os gráficos apresentados é possível perceber que os resultados obtidos pela simulação garantem à carga as mesmas características de um gerador síncrono, operando em condições nominais.

É interessante comentar que a metodologia de controle do conversor CC-CA, controlado como formador a partir da funcionalidade de imitar o comportamento de uma máquina síncrona virtual é uma das topologias de controle de formadores de rede existentes. Na literatura é possível encontrar outras topologias de controle, como o por exemplo droop control, estrutura muito utilizada para controle de formadores de rede e ainda efetivar o compartilhamento de potência entre diversos conversores que operem da mesma forma. No entanto, como trata de uma pesquisa inicial, optou-se por abordar, por hora, a máquina síncrona virtual. Outra metodologia e estruturas de controle aplicada a inversores de potência podem ser estudadas como trabalhos futuros.

---

## 5 CONCLUSÃO

A partir da modelagem da máquina síncrona virtual e sua implementação no software MATLAB/Simulink, os resultados obtidos na simulação apresentam a eficiência de um inversor operando como uma VSM para o modo ilhado, quando não há a presença da rede elétrica. A operação do inversor foi capaz de, diante de uma entrada contínua no barramento, entregar à carga tensão e corrente alternadas com frequência de 60 Hz, valor utilizado no Brasil para distribuição de energia elétrica. Vale ressaltar que a utilização de um inversor formador de rede operando como uma VSM devolve parcialmente a inércia inexistente nas fontes alternativas de energia. Como o foco do trabalho não era a modelagem de uma fonte alternativa, tais como solar fotovoltaica ou eólica, a utilização de um barramento CC satisfaz a entrada para controle do projeto. Por fim, conclui-se que a VSM emula de maneira satisfatória as características presentes no sistema elétrico de distribuição, além de garantir a inserção das fontes renováveis alternativas no SEP sem gerar danos à carga, uma vez que tem sua tensão, corrente, frequência e potências controladas pelo inversor. Para trabalhos futuros, cabe a análise do paralelismo entre a rede elétrica e o inversor, de forma a validar também os resultados para este tipo de operação. E ainda, o estudo de outras topologias de controle para conversores, operando de maneira ilhada.

---

## **ABSTRACT**

This work has as main object the modeling and the control of a static converter in order to operate as a synchronous machine when seen by the electrical network. The study initially presents a bibliographic review in order to introduce concepts of static DC - AC voltage converters, said inverters, synchronous machine and virtual synchronous machine as well as the equations that govern them. Then, a converter operating as a synchronous machine is modeled in the MATLAB/Simulink environment. The methodology presents how the inverter switches are triggered and the regulation of active and reactive power. The purpose of this work is to present the virtual synchronous machine as a control method for a static converter, guaranteeing the load the same characteristics found in the network usually. The simulation was performed for the islanding mode, that is, for the situation where there is no presence of the electrical network. From the results presented, it was concluded that the control methodology used in the inverter is efficient, based on the voltage, current, power and frequency curves extracted from the simulation.

**Keywords:** Virtual Synchronous Machine. *Off grid*. Virtual inertia. Inverter.

## **REFERÊNCIAS**

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 687/2015**.

ALMEIDA, Pedro Machado de. **Modelagem e controle de conversores fonte de tensão utilizados em sistemas de geração fotovoltaicos conectados à rede elétrica de distribuição**. 2011. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

ANDRADE, Eliana Roratto de. **Análise do impacto da geração distribuída fotovoltaica em redes de distribuição de energia elétrica de baixa tensão sob a óptica do controle de nível de tensão**. 2019.

- BASONI, Renan Corrêa et al. **Modelagem e Simulação de uma Microrrede Piloto Isolada com Provimento de Referência Através de um Gerador Síncrono Virtual**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2017.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas** 5. ed. Porto Alegre : AMGH, 2013.
- FELDMANN, Darlei et al. **Controle inercial e de frequência baseado em gerador síncrono virtual aplicado à geração fotovoltaica de grande porte para o suporte ao restabelecimento de sistemas de potência**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2020.
- HART, Daniel W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. McGraw Hill Brasil, 2016.
- LOPES, Yona; FERNANDES, Natalia; MUCHALUAT-SAADE, Débora. **Geração Distribuída de Energia: Desafios e Perspectivas em Redes de Comunicação**. 2015.
- MARTINS, Filipe José Neves. **Máquina Síncrona Virtual**. 2013. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 2013.
- MELLO, Gian Dias de. **Melhoria da resposta transitória em máquinas síncronas virtuais com controle de decaimento auxiliar via filtros de Washout**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2018.
- MENDOZA LLERENA, Maria Teresa. **Identificação de parâmetros de geradores síncronos usando métodos de ajuste de curvas e ensaio em frequência**. 2011. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. 2011.
- MOHAN, Ned. **Eletrônica de Potência: curso introdutório**. Tradução: J.R. Souza. 1 ed. Rio de Janeiro. LTC, 2014.
- PACHECO, Fabiana. Energias Renováveis: breves conceitos. **Conjuntura e Planejamento**, v. 149, p. 4-11, 2006.

RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** 2010. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010.

SERRA, Amiron Wolff dos Santos. **Projeto e Implementação de Máquina Síncrona Virtual para Melhoria no Desempenho Dinâmico de Inversores.** 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Maranhão. 2019.

SILVA JÚNIOR, Dalmo Cardoso da. **Modelagem e Controle de Funções Auxiliares em Inversores Inteligentes para Suporte a Microrredes CA - Simulação em Tempo Real com Controle Hardware In the Loop.** 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2017.