

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ISABELA MARIA DE ASSIS

MODELAGEM DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA VIRTUAL PARA  
CONTROLE DE UM INVERSOR FONTE DE TENSÃO

Campo Grande - MS

Dezembro, 2018

ISABELA MARIA DE ASSIS

**MODELAGEM DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA VIRTUAL PARA  
CONTROLE DE UM INVERSOR FONTE DE TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como exigência para obtenção do grau de  
Bacharelado em Engenharia Elétrica da Uni-  
versidade Federal de Mato Grosso do Sul –  
UFMS.

Orientador: Prof. Dr. Luigi Galotto Junior

Campo Grande - MS

Dezembro, 2018

# MODELAGEM DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA VIRTUAL PARA CONTROLE DE UM INVERSOR FONTE DE TENSÃO

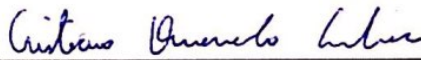
Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:



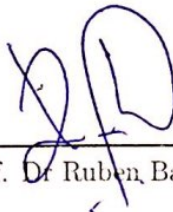
---

Prof. Dr. Luigi Galotto Junior  
Orientador



---

Prof. Dr. Cristiano Quevedo Andrea



---

Prof. Dr. Ruben Barros Godoy

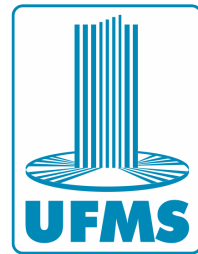
Campo Grande MS

13 de dezembro de 2018



Serviço Público Federal  
Ministério da Educação

**Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul**



### **DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE**

Isabela Maria de Assis, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado de Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº 2.248.381 e CPF nº 045.258.931-25, declaro que o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado, com o título “Modelagem de uma máquina síncrona virtual para controle de um inversor fonte de tensão” é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este texto não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 13 de dezembro de 2018

Isabela Maria de Assis

Isabela Maria de Assis  
RGA 2012.2103.1910  
Curso de Engenharia Elétrica - UFMS

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Dr. Luigi Galotto Junior, pela orientação transmitida de maneira engajada, cuidadosa e pela paciência para realização deste trabalho.

Agradeço em especial aos meus amigos Hércules Cardoso, Glauber de Freitas Lima e André Acosta Amaral, pela amizade e por terem colaborado com a bibliografia, simulação e revisão do texto.

Agradeço a todos colegas, amigos e professores, que contribuíram para a construção do meu conhecimento durante os meus anos na Universidade.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar um modelo de uma máquina síncrona virtual para o controle de conversores eletrônicos de potência operando como um *synchronverter* (inversores que imitam máquinas síncronas). Isto permite controlar automaticamente o fluxo de potência ativa e reativa do sistema de forma semelhante à grupos geradores reais, assim como a regulação de tensão e frequência. Ao mesmo tempo pode contribuir em estabilidade do sistema elétrico de potência por meio da adição de inércia virtual. Foi modelado um bloco para a simulação da máquina síncrona no ambiente do MATLAB / Simulink / SimPowerSystems. Este modelo foi simulado em conjunto com um modelo de inversor fonte de tensão trifásico operando de forma isolada e, posteriormente conectada à rede elétrica. Nos resultados, verificou-se ser possível controlar o inversor em quatro diferentes condições: isolado da rede regulando tensão e frequência, isolado e sincronizando através de uma impedância virtual, conectado fornecendo potência ativa e conectado fornecendo potência ativa e reativa. Concluiu-se que este modelo permitiu controlar o inversor de forma análoga a um grupo gerador como esperado e, no futuro, poderá ser codificado em uma linguagem apropriada para sistemas embarcados permitindo sua implementação experimental em diferentes aplicações.

Palavras-chave: máquina síncrona virtual, inversor fonte de tensão, inércia virtual.

## ABSTRACT

This paper aims to present a model of a synchronous virtual machine for the control of electronic power converters operating as a synchronverter (inverters that mimic synchronous machines). This allows to automatically control the active and reactive power flow of the system similar to real generators set, as well as voltage and frequency regulation. At the same time it can contribute to the stability of the electric power system by adding virtual inertia. A block was modeled to simulate the synchronous machine in MATLAB / Simulink / SimPowerSystems environment. This model was simulated in conjunction with a three-phase voltage source inverter operating in isolation and subsequently connected to the power grid. In results, it was found the possibility of controlling the inverter in four different conditions: stand alone mode regulating voltage and frequency, synchronized with the grid through a virtual impedance, and grid-tied providing only active power and active and reactive power. In conclusion, this model allowed to control the inverter in the same way as a generator set as expected and, in the future, could be coded in a suitable language for embedded systems allowing its experimental implementation in different applications.

Keywords: virtual synchronous machine, voltage source inverter, virtual inertia.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estabilidade do Sistema Elétrico de Potência . . . . .	11
Figura 2 – Sistema governador e excitador do gerador síncrono . . . . .	14
Figura 3 – Comparação da utilização das estruturas de controle para inversores conectados ao sistema de potência a) Estrutura de controle do inversor controlado como fonte de tensão b) Estrutura compacta de controle sem a utilização de unidades dedicadas de sincronização . . . . .	15
Figura 4 – Modelo por fase do gerador síncrono conectado ao barramento infinito	18
Figura 5 – Característica $P - \delta$ de uma máquina síncrona . . . . .	19
Figura 6 – Curvas de decaimento (Droop) a) Frequência e Potência ativa b) Tensão e Potência reativa . . . . .	20
Figura 7 – Circuito de potência da máquina síncrona virtual . . . . .	22
Figura 8 – Inversor de tensão trifásico ponte completa . . . . .	23
Figura 9 – Modelo do inversor fonte de tensão trifásico ponte completa com PWM	24
Figura 10 – Detalhe do modelo do PWM . . . . .	24
Figura 11 – Diagrama de blocos do circuito de controle com regulação da potência ativa e reativa . . . . .	26
Figura 12 – Geometria dos Enrolamentos da Máquina Síncrona . . . . .	27
Figura 13 – Modelo no simulink da máquina síncrona de polos lisos . . . . .	28
Figura 14 – Implementação do modelo elétrico da máquina síncrona de polos lisos .	29
Figura 15 – Modelo do sistema de controle da frequência e da potência ativa . . . .	30
Figura 16 – Modelo do sistema de controle da tensão e da potência reativa . . . .	31
Figura 17 – Impedância virtual . . . . .	33
Figura 18 – Comportamento da velocidade angular do rotor na simulação . . . . .	36
Figura 19 – Comportamento do torque na simulação . . . . .	36
Figura 20 – Corrente de saída $i_a$ , $i_b$ e $i_c$ do inversor . . . . .	37
Figura 21 – Resultado da subtração das tensões de carga $V_a$ , $V_b$ e $V_c$ e tensões do sistema elétrico de potência $V_{ag}$ , $V_{bg}$ e $V_{cg}$ . . . . .	38
Figura 22 – Sincronismo das tensões de carga $V_a$ , $V_b$ e $V_c$ e tensões do sistema elétrico de potência $V_{ag}$ , $V_{bg}$ e $V_{cg}$ . . . . .	39
Figura 23 – Resultados da simulação do rastreamento da potência ativa $P_{set}$ de 1000 W . . . . .	40
Figura 24 – Resultados de simulação do rastreamento da potência reativa $Q_{set}$ de -200 VAR . . . . .	40



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificações dos modelos da máquina síncrona virtual e controle droop	16
Tabela 2 – Parâmetros do filtro LCL . . . . .	25
Tabela 3 – Parâmetros da impedância virtual trifásica . . . . .	33
Tabela 4 – Parâmetros da simulação . . . . .	34
Tabela 5 – Parâmetros da máquina síncrona virtual . . . . .	34
Tabela 6 – Modos de operação da máquina síncrona virtual . . . . .	35

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	10
1.1	Justificativa do trabalho . . . . .	11
1.2	Objetivos . . . . .	12
1.2.1	Objetivo Geral . . . . .	12
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	12
1.3	Organização do Trabalho . . . . .	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .	13
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	18
3.1	Gerador Síncrono conectado a barra infinita sem perdas . . .	18
3.2	Controle por curvas de decaimento (ou controle Droop) . . .	19
4	METODOLOGIA . . . . .	21
4.1	Circuito de potência da máquina síncrona virtual . . . . .	21
4.1.1	Inversor de tensão trifásico e modulação . . . . .	22
4.1.2	Dimensionamento do filtro LCL . . . . .	25
4.2	Controle do modelo dinâmico da máquina síncrona virtual . .	25
4.2.1	Modelagem matemática da máquina síncrona . . . . .	26
4.2.2	Controle da frequência e da potência ativa . . . . .	30
4.2.3	Controle da tensão e da potência reativa . . . . .	31
4.2.4	Dimensionamento da impedância virtual trifásica que imita o processo de conexão com a rede . . . . .	32
5	RESULTADOS . . . . .	34
6	CONCLUSÃO . . . . .	41
	REFERÊNCIAS . . . . .	42

## 1 INTRODUÇÃO

Após a revolução industrial, a necessidade de aumentar a produção industrial, aliada com a falta de tecnologia disponível nos séculos XVIII e XIX, foi responsável pela utilização excessiva das fontes não renováveis de energia elétrica principalmente o carvão mineral. Atualmente, a eletricidade desempenha uma função importante na sociedade e, por conseguinte, tornam-se fundamentais os estudos relacionados à geração de energia elétrica. Dentro deste cenário de evolução tecnológica, uma grande mudança se deu com a diversificação dos modos de produção de energia.

Essa diversificação é representada principalmente pelo aumento do uso de fontes de energias renováveis como a hidráulica, a solar e a eólica. Com isso, pretende-se diminuir a parcela de contribuição das fontes de energias não-renováveis, como a gerada pelos derivados do petróleo, o carvão mineral e o gás natural. As energias não renováveis mais utilizadas possuem a desvantagem de gerar poluição. Portanto, para combater os efeitos nocivos da exploração das fontes de energia não renováveis, os governos estão encorajando o setor energético a melhorar a eficiência e a usar fontes renováveis de energia em seus sistemas elétricos de potência.

Com o objetivo de melhorar a eficiência e usar fontes renováveis de energia no sistema elétrico de potência, utilizam-se as micros e minigerações distribuídas. As micros e minigerações distribuídas são unidades de geração com potência instalada menor ou igual a 5 megawatts em redes de distribuição localizadas perto dos centros de carga [1]. Exemplos de micro e minigeração distribuída são as pequenas centrais hidrelétricas, as usinas fotovoltaicas e usinas eólicas, que podem ou não serem conectadas à rede. A geração distribuída conectada ao sistema elétrico será capaz de fornecer energia dos geradores para os consumidores usando tecnologia digital para controlar e economizar energia, reduzir custos, aumentar a confiança e transparência do sistema [2].

As unidades de geração distribuída são, geralmente, conectadas ao sistema através de elementos de eletrônica de potência, conhecidos como inversores de tensão. São aparelhos que transformam uma tensão contínua na entrada em tensão alternada na saída. De acordo com a Resolução Normativa nº. 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as micros e minigerações distribuídas podem ser conectados à rede elétrica e podem fornecer energia a ela, credenciando o proprietário a receber créditos de energia da concessionária. Com relação aos procedimentos necessários para se conectar a micro e minigeração distribuída à rede da distribuidora, a ANEEL estabeleceu diversas regras que devem ser atendidas para evitar operações indevidas na rede elétrica.

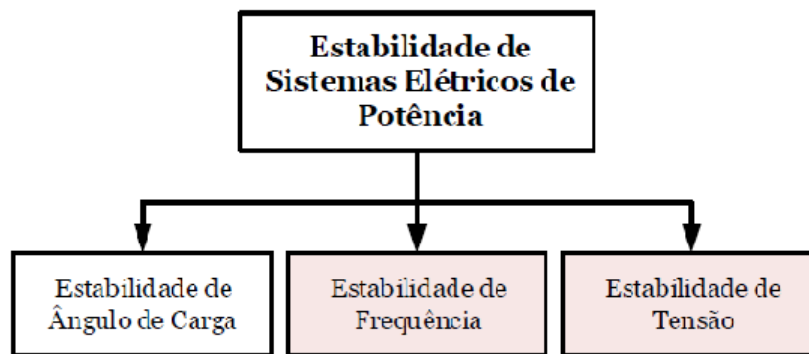
As restrições operativas do sistema, como os impactos na atuação da proteção da rede, os limites térmicos dos equipamentos, elevação da tensão e enfraquecimento da estabilidade do sistema elétrico dificultam a instalação das unidades de geração distribuída. Dessa forma, para a conexão de unidades de geração distribuída no sistema elétrico, a

dinâmica, estabilidade e segurança do sistema elétrico necessita ser reconsiderada.

## 1.1 Justificativa do trabalho

É importante que os sistemas elétricos de potência apresentem robustez com relação às possíveis perturbações que possam ocorrer. Essa estabilidade do sistema elétrico de potência está principalmente relacionada a constante de amortecimento do sistema e a inércia rotacional das máquinas síncronas de grande escala. A Figura 1, apresenta as classificações referentes à estabilidade de um sistema elétrico: estabilidade angular, estabilidade de frequência e estabilidade de tensão. Quando uma porção das máquinas síncronas são substituídas por unidades geradoras distribuídas, a inércia total do sistema decresce, comprometendo a estabilidade do sistema elétrico de potência.

Figura 1 – Estabilidade do Sistema Elétrico de Potência



Fonte: [3] Adaptado

Uma maneira de estabilizar a frequência e tensão da rede é adicionar uma inércia virtual ao sistema elétrico de potência. Esse controle é feito tradicionalmente por meio das máquinas síncronas de grande escala. Essas máquinas têm uma alta inércia rotacional e, portanto, são capazes de absorver distúrbios que ocorrem no sistema. O *layout*, as propriedades e a estratégia operacional das redes elétricas, assim como o potencial de equilibrar automaticamente déficits de energia entre as diferentes áreas da rede foram diretamente relacionados à propriedade dinâmica das máquinas síncronas.

Portanto, para contornar o problema do enfraquecimento da estabilidade causada pelas micros e minigerações distribuídas sem inércia, adiciona-se uma inércia virtual ao sistema elétrico de potência por meio da reprodução das características de uma máquina síncrona inseridas em inversores de tensão. O trabalho a seguir aborda a modelagem de uma máquina síncrona virtual para controle de um inversor fonte de tensão, controlando automaticamente o fluxo de potência ativa e reativa do sistema por meio da adição de inércia virtual ao sistema elétrico de potência.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Utilizar um modelo mecânico e elétrico de um grupo gerador com máquina síncrona com a finalidade de inserir o controle em um inversor fonte de tensão para que opere como um grupo gerador síncrono virtual (*virtual synchronous generators* ou, também conhecido como *Synchronverter*).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a revisão bibliográfica e a fundamentação teórica da máquina síncrona virtual e do controle por curvas de decaimento (ou controle droop).
- Analisar e elaborar o modelo dinâmico de uma máquina síncrona virtual em diagrama de blocos para permitir a simulação.
- Comprovar a eficácia do modelo elaborado por meio de simulações.
- Aplicar em simulação o modelo elaborado como método de controle de inversores isolados e conectados à rede elétrica.

## 1.3 Organização do Trabalho

No Capítulo 1, encontra-se a introdução ao trabalho, as justificativas e motivações, o objetivo geral e os objetivos específicos.

No Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica dos modelos de máquina síncrona virtual e tipos de controle.

No Capítulo 3, encontra-se a fundamentação teórica do gerador síncrono conectado a barra infinita sem perdas e controle por curvas de decaimento (ou controle droop).

No Capítulo 4, é feita a modelagem da máquina síncrona virtual.

No Capítulo 5, são mostrados os resultados da implementação do sistema de controle proposto.

No Capítulo 6, são feitas as considerações finais sobre o trabalho.

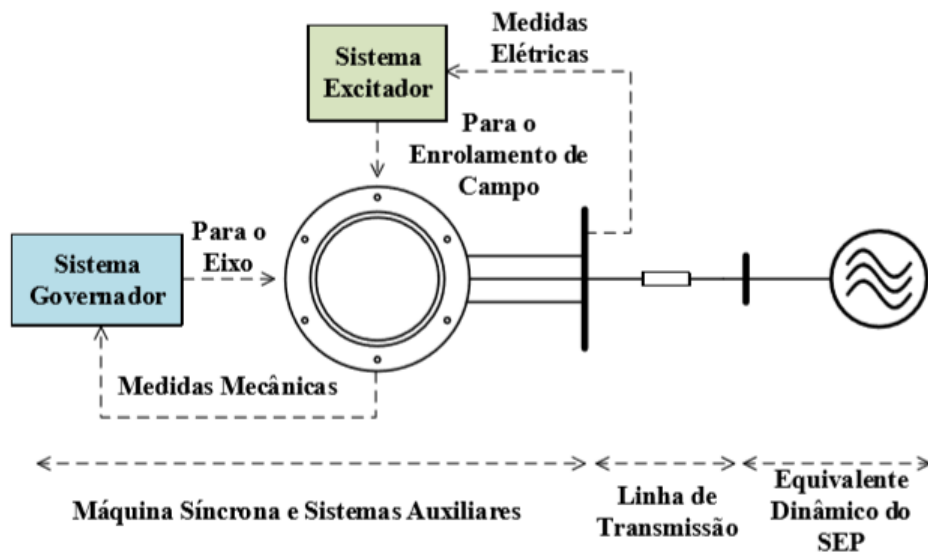
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A frequência do sistema de potência é regulada pelas máquinas síncronas de grande porte. Isto acontece pois os geradores síncronos estão acoplados eletromecanicamente no sistema elétrico de potência, e como consequência operam na mesma frequência. Essas máquinas síncronas possuem uma alta inércia rotacional sendo então capazes de absorver distúrbios do sistema. Na operação regular do sistema elétrico de potência, os conjugados elétricos e mecânicos tendem a se igualar naturalmente. Porém, a partir de um dado limite, o aumento da diferença angular acarreta em uma redução da potência transferida, aumentando mais a diferença angular devido a um torque acelerante onde a potência elétrica não se iguala com a potência mecânica. A instabilidade angular do sistema está relacionada com uma perturbação em que não é possível estabelecer novamente o sincronismo com o sistema.

A máquina síncrona pode ser controlada por meio do torque mecânico e da corrente de campo. Quando se varia uma das entradas, ou ambas, a potência ativa, a potência reativa, a frequência e a tensão terminal também variam. Quando o torque mecânico da máquina síncrona conectada à rede é alterado, ocorrem pequenas variações na velocidade, ou seja na frequência. O gerador síncrono conectado a rede, por apresentar impedância nula, a tensão terminal é fixa e não pode ser controlada pela corrente de campo. Portanto, para a máquina síncrona conectada a rede, a frequência do sistema e a tensão terminal são mantidas aproximadamente constantes, enquanto que, as potências ativas e reativas da máquina podem ser controladas [4].

Na Figura 2 é apresentado um gerador síncrono, com dois sistemas auxiliares - Governador e Excitador, também conhecidos como sistemas de Regulação de Velocidade e de Regulação de Tensão, respectivamente. A função do sistema excitador é regular a magnitude da tensão do barramento controlando assim a tensão de excitação da máquina. O sistema governador regula a frequência do sistema de potência, controlando a entrega de energia mecânica ao eixo da máquina [5].

Figura 2 – Sistema governador e excitador do gerador síncrono



Fonte: [5]

Neste contexto, para evitar o aumento de amplitude de variações de frequência em sistemas de energia com a presença de unidades de geração não inerciais foi proposto o conceito da máquina síncrona virtual. O primeiro trabalho com esse tema, foi publicado em inglês por Beck e Hesse em 2007 [6]. Desde então, outros trabalhos utilizando o conceito de Máquina Síncrona Virtual com diferenças na aplicação e implementação foram publicados. Este trabalho discorre um panorama da máquina síncrona virtual existentes na literatura. Assim como, o método de controle droop largamente utilizado em aplicações de microrredes (*microgrids*) e sistemas isolados da rede.

O conceito da máquina síncrona virtual surgiu como uma alternativa de controle de conversores de potência operando conectados ao sistema de potência. Esse controle foi especialmente desenvolvido para proporcionar uma inércia virtual, contribuindo para a inércia total do sistema elétrico. Também é possível permitir a operação conectada e desconectada ao sistema sem mudanças nos parâmetros, estruturas e controle. Para o conversor operar com todas estas funcionalidades é necessário utilizar um mecanismo de sincronização.

A máquina síncrona virtual não depende da utilização dos convencionais *phase-locked-loops* (PLLs) para a sincronização com o sistema de potência. É possível fazer a integração das funções de sincronização, regulação de tensão e frequência, no controlador de potência, resultando na capacidade de sincronizar com o sistema de potência sem a necessidade de uma unidade dedicada de sincronização. As topologias são detalhadas na Figura 3. Portanto, reduz o tempo necessário para sincronização, aumenta a precisão da sincronização e reduz a complexidade do sistema de controle.

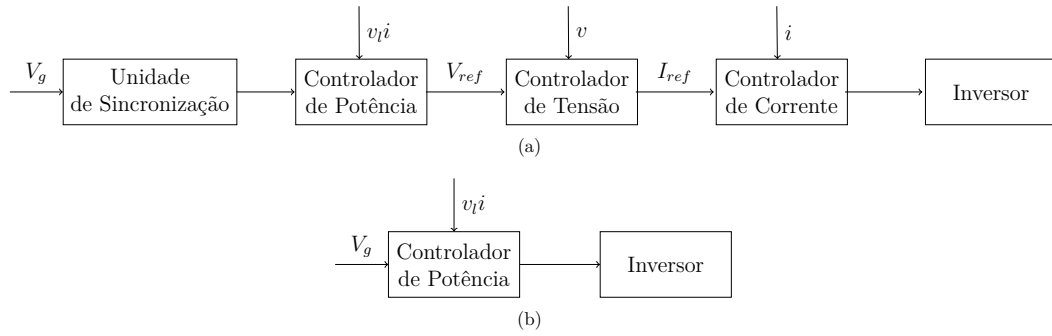


Figura 3 – Comparação da utilização das estruturas de controle para inversores conectados ao sistema de potência a) Estrutura de controle do inversor controlado como fonte de tensão b) Estrutura compacta de controle sem a utilização de unidades dedicadas de sincronização

As implementações de máquinas síncronas virtuais existentes na literatura são modelos das máquinas síncronas que geram os sinais de controle internos. Existem diversos tipos de modelos com diferentes graus de complexidade que baseiam-se na interação com o conversor de potência. Existem dois tipos predominantes de topologias utilizadas que dependem se o modelo da máquina fornece referência de corrente, discutidas em [7] e [8], ou referência de tensão para o conversor, apresentadas em [9] e [10]. O modelo utilizado neste trabalho oferece referência de tensão para um inversor fonte de tensão (*voltage source inverter - VSI*).

O modelo específico e os parâmetros da máquina síncrona dependem da aplicação e da exatidão esperada. Porém, a simulação da inércia e do amortecimento das oscilações eletromagnéticas são comuns nas topologias. Além disso, os parâmetros escolhidos para a implementação da máquina síncrona virtual não são limitados pelo parâmetro físico de uma máquina síncrona real, portanto esses parâmetros podem ser especificados no sistema de controle para apresentar o comportamento desejado. São propostas pela literatura cinco classificações de implementação de máquina síncrona virtual e controle droop, que apresentam grande similaridade com o conceito da máquina síncrona virtual. Essas classificações são resumidas na Tabela 1.



Tabela 1 – Classificações dos modelos da máquina síncrona virtual e controle droop

<b>Ordem do Modelo da Máquina Síncrona Virtual</b>	<b>Avaliação</b>
7ª ordem - Modelo completo da máquina síncrona.	Representa a dinâmica total da máquina síncrona. Pode apresentar uma quantidade complexa de detalhes não relevantes dependendo da aplicação.
5ª ou 4ª ordem - Utiliza o modelo de ordem reduzida da máquina síncrona (2ª ou 3ª ordem) combinada com dinâmica mecânica	Comum considerar apenas os enrolamentos do estator. A amplitude da tensão é obtida no laço de potência reativa.
2ª ordem - Equação da oscilação e amplitude de tensão fornecidas pelo laço de controle de potência reativa	Utiliza o conceito de sincronização sem PLL. Modelo de implementação simples que pode ser combinado com qualquer tipo de controle de conversor.
1ª ordem - Emulação da inércia com a potência (ou a corrente) de saída calculada a partir da tensão da rede.	Não opera isoladamente. Depende do PLL para obter a referência de frequência do sistema elétrico de potência.
Controle Droop para microrredes	Possui semelhança com o conceito de máquina síncrona virtual. Modela principalmente o efeito da máquina primária para a potência ativa e da impedância síncrona para a potência reativa. Extensa literatura disponível.

Fonte: [11] Adaptado

A estrutura de controle droop para conversores e a máquina síncrona virtual que fornece referência de tensão na saída apresentam similaridades quando se assume uma ordem reduzida do modelo da máquina síncrona virtual e tanto a frequência do sistema elétrico de potência quanto a referência da potência ativa são consideradas constantes. A verificação da equivalência é feita em [11]. Os parâmetros do controlador droop podem ser interpretados como a inércia e constante de amortecimento da máquina síncrona virtual. O controle droop é uma abordagem bastante utilizada em operações paralelas e compartilhamento de carga entre conversores de potência devido à sua simplicidade e robustez [12].

O modelo implementado neste trabalho é de quarta ordem com um controle de excitação e um governador típico de grupos geradores, semelhante ao princípio do controle droop. Em razão do controle droop apresentar uma resposta dinâmica rápida, o controle droop foi utilizado em conjunto com o conceito da máquina síncrona virtual, que é

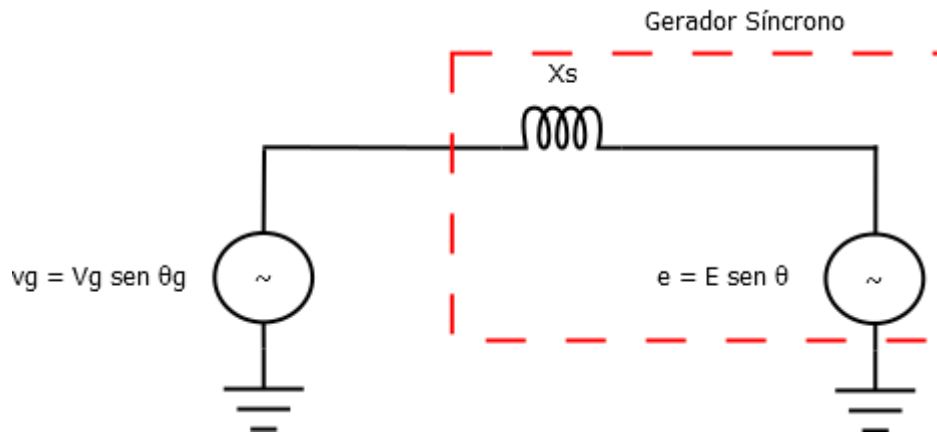
responsável por uma resposta dinâmica mais lenta por meio da adição de uma inércia virtual no sistema elétrico. O controle pode operar em diferentes modos: desconectado da rede (*stand-alone* ou *off-grid*), em sincronismo ainda desconectado da rede, e conectado à rede (*grid-tied* ou *grid-connected*). Os detalhes deste modelo e do controle serão melhor explicados nos próximos capítulos.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Gerador Síncrono conectado a barra infinita sem perdas

O modelo por fase do gerador síncrono é mostrado na Figura 4. Para entender o modelo da máquina síncrona e sua transferência de potência entre barras para uma linha puramente indutiva é necessário entender a Equação 1, Equação 2 e a Equação 3.

Figura 4 – Modelo por fase do gerador síncrono conectado ao barramento infinito



Fonte: Autoria própria

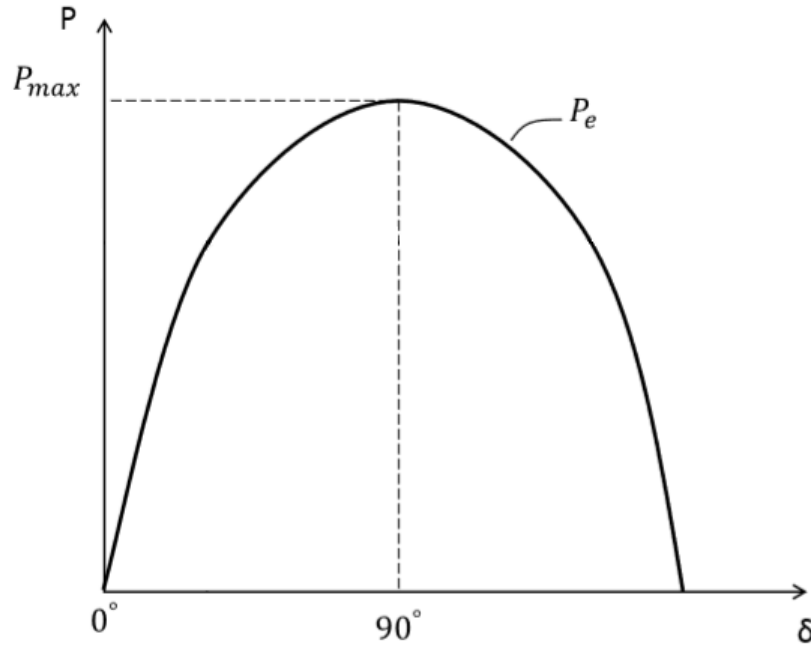
$$P = \frac{3V_g E}{2X_s} \sin(\theta - \theta_g) \quad (1)$$

$$Q = \frac{3V_g}{2X_s} [E \cos(\theta - \theta_g) - V_g] \quad (2)$$

$$\delta = \theta - \theta_g \quad (3)$$

A potência ativa gerada é representada por  $P$  e a potência reativa por  $Q$ . O valor de pico da tensão da barra é definida por  $V_g$ ,  $E$  é o valor de pico da tensão induzida que é controlada pela tensão de excitação ou outra grandeza proporcional a ela,  $\theta_g$  é o ângulo da tensão do sistema e  $\theta$  é o ângulo da tensão do gerador síncrono,  $X_s$  é a reatância síncrona do gerador e  $\delta$  é o ângulo da potência, que é controlado pelo torque da máquina primária. A Equação 1 e a Equação 2 apresentam o fator  $1/2$  pois  $V_g$  e  $E$  são valores de pico.

Na Figura 5 é mostrada a curva característica potência - ângulo da máquina síncrona, onde  $P_e$  é a potência elétrica fornecida pela máquina. Deve-se observar que a medida que a potência elétrica aumenta, o ângulo  $\delta$  aumenta. Essa condição é válida somente para ângulos menores que  $90^\circ$ . Quando o ângulo for igual a  $90^\circ$ , temos a máxima potência ativa que pode ser fornecida pela máquina síncrona ao barramento infinito. Quando a potência elétrica atinge um valor superior a  $P_{max}$  não haverá condição de equilíbrio, a máquina síncrona acelera o que ocasiona sua instabilidade.

Figura 5 – Característica  $P - \delta$  de uma máquina síncrona

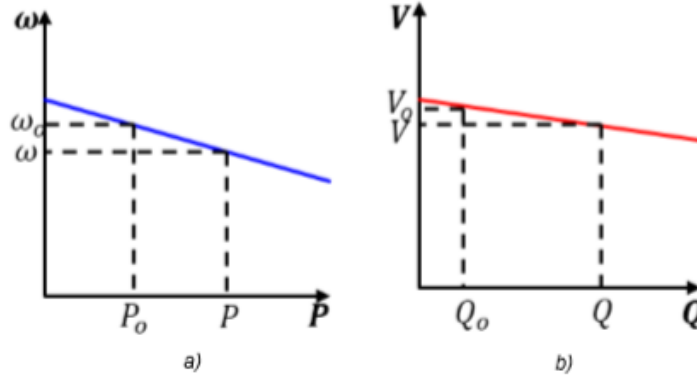
Fonte: [3]

Quando  $E$  é controlado para ser igual a  $V_g$  e  $\theta$  igual  $\theta_g$  não existe troca de potência ativa e reativa entre o gerador síncrono e o sistema elétrico de potência. Essa condição não é comum na operação do sistema de potência, porém quando satisfeita é possível conectar e desconectar o gerador do sistema sem transitórios significativos. Portanto, este conceito é utilizado na conexão e desconexão da máquina síncrona virtual com o sistema elétrico de potência.

### 3.2 Controle por curvas de decaimento (ou controle Droop)

O controle por curvas de decaimento (ou controle droop) imita as características dos grupo geradores síncronos conectados ao sistema elétrico de potência, utilizando as relações entre a potência ativa  $P$  e a frequência  $f$  e entre a potência reativa  $Q$  e a magnitude de tensão  $V$ , para compartilhar a energia ativa e reativa entre eles [13]. O controle droop ajusta a frequência e a magnitude de tensão em resposta a uma mudança de potência ativa  $P$  ou reativa  $Q$  através das curvas de decaimento (Figura 6).

Figura 6 – Curvas de decaimento (Droop) a) Frequência e Potência ativa b) Tensão e Potência reativa



Fonte: [14]

A frequência do conversor é determinada por um ganho droop  $D_p$ , pela potência ativa medida  $P$  e pelo ponto de referência ajustado de potência ativa  $P_0$  e de frequência  $\omega_0$ . O coeficiente  $D_p$  é então definido pela Equação 4:

$$D_p = -\frac{P - P_0}{\omega - \omega_0} = -\frac{\Delta P}{\Delta \omega} \quad (4)$$

A tensão do conversor é determinada por um ganho droop  $D_q$ , pela potência reativa medida  $Q$  e pelo ponto de referência ajustado de potência reativa  $Q_0$  e de tensão  $V_0$ . O coeficiente  $D_q$  é então definido pela Equação 5:

$$D_q = -\frac{Q - Q_0}{V - V_0} = -\frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (5)$$

## 4 METODOLOGIA

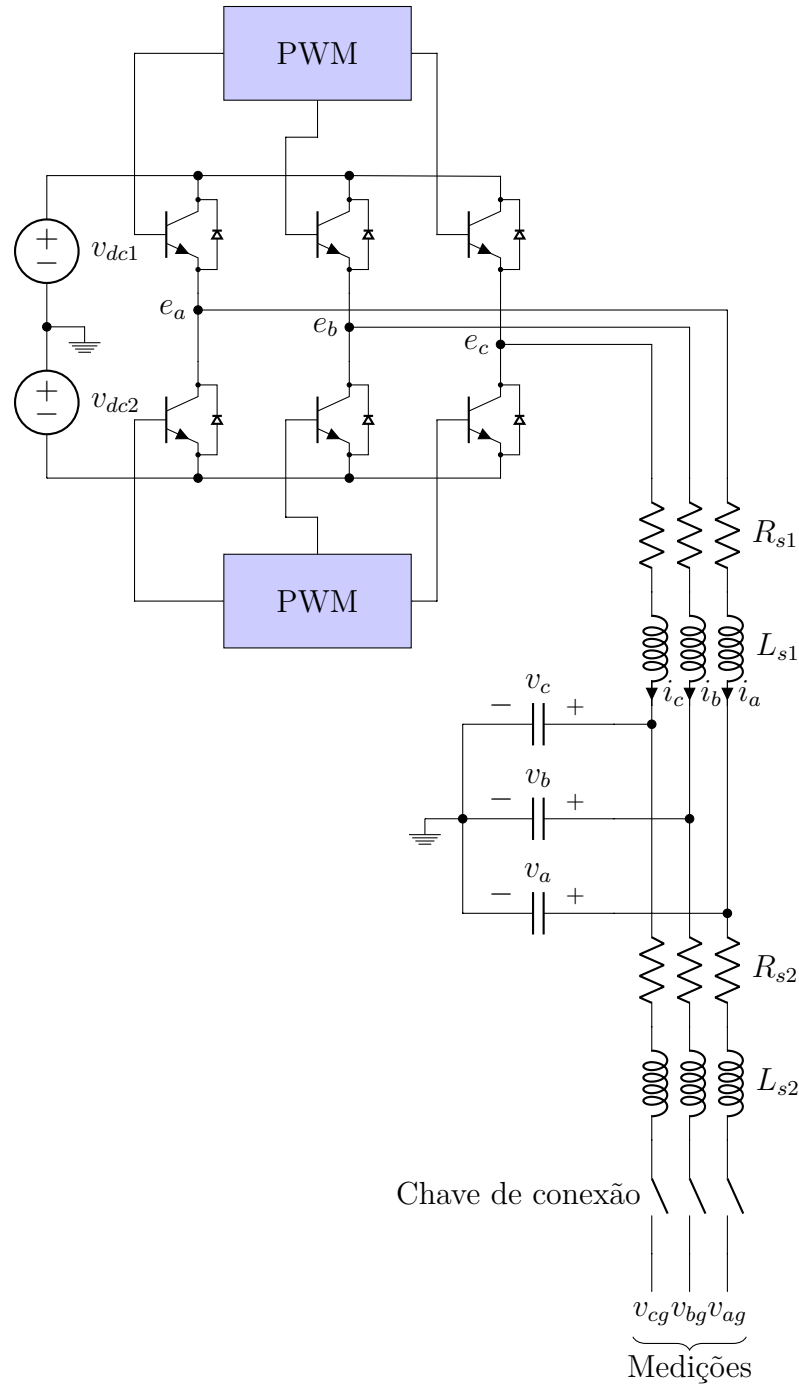
Neste capítulo, é detalhado como implementar a máquina síncrona virtual. Um inversor trifásico ponte completa foi utilizado para converter tensão contínua em tensão alternada trifásica. Os três braços do inversor são controlados por um PWM (*pulse width modulation*) senoidal. Foi utilizado um filtro LCL para reduzir as ondulações da tensão e da corrente causadas pelo chaveamento em alta frequência e também para possibilitar a conexão à rede elétrica.

Na operação conectada à rede elétrica, a impedância do sistema foi incluída na fonte trifásica que fornece as tensões de fase  $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  e  $V_{cg}$ . A máquina síncrona virtual apresentada neste trabalho possui um circuito de potência trifásico e um sistema de controle composto pelo modelo da máquina síncrona.

### 4.1 Circuito de potência da máquina síncrona virtual

O circuito de potência trifásico é composto por um inversor VSI bem conhecido, com o filtro LCL e uma chave de conexão com a rede. O circuito de potência é detalhado na Figura 7. Foi utilizado um link CC aterrado com os capacitores em estrela para permitir a modulação PWM convencional sem distorções. Diferentes topologias de potência ou tipos de modulação podem ser testados em outros trabalhos. Inclusive, diferentes fontes de alimentação podem ser pensadas para o link CC em aplicações como painéis fotovoltaicos em *string*, saídas de conversores CC/CC ou banco de baterias, por exemplo. Neste trabalho, foi escolhida uma topologia de potência básica por não ser o foco principal do trabalho e para manter aberta a sua expansão à diferentes aplicações.

Figura 7 – Circuito de potência da máquina síncrona virtual

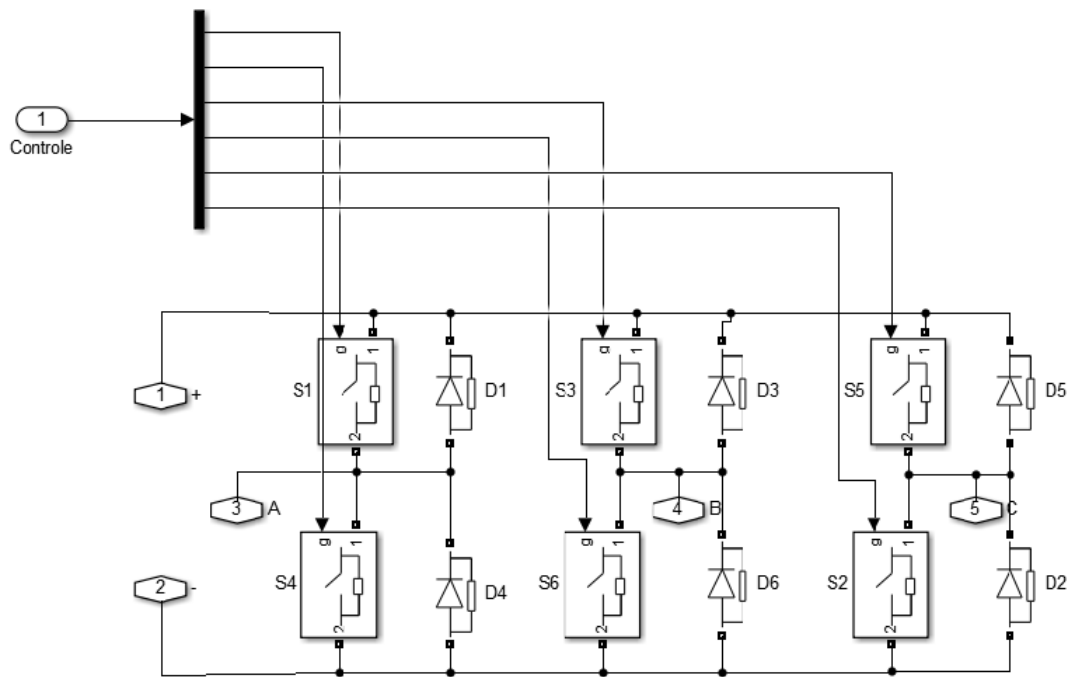


Fonte: Autoria própria

#### 4.1.1 Inversor de tensão trifásico e modulação

A estrutura do inversor trifásico ponte completa, detalhada na Figura 8, consiste de três braços simétricos onde cada um tem dois interruptores em série, cada um com diodos em anti-paralelo para permitir a circulação de correntes como é típico dos semicondutores de potência (intrínsecos ou encapsulados) para os inversores de tensão (VSI).

Figura 8 – Inversor de tensão trifásico ponte completa



Fonte: Autoria própria

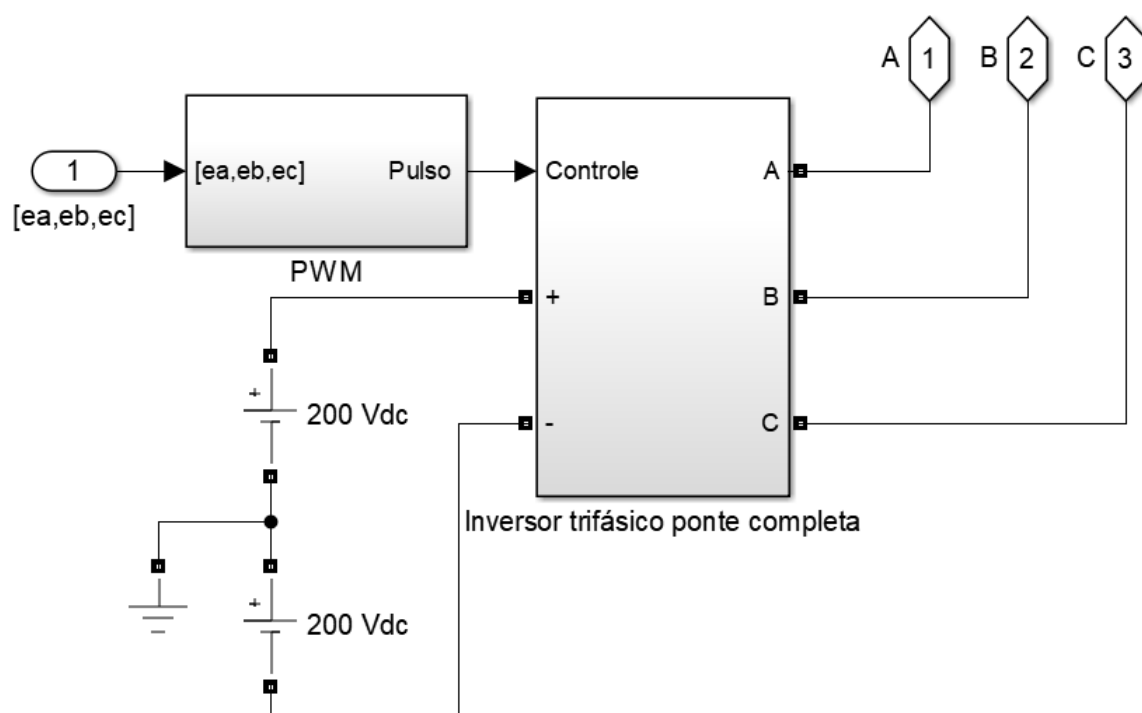
Para a simplificação da análise, no barramento CC foi utilizado a metodologia de neutro acoplado, totalizando 400 V de tensão e 200 V de tensão por braço, assim não foi necessário utilizar a metodologia de modulação vetorial. Os detalhes podem ser visto na Figura 9.

O processo de mudar e controlar o estado dos interruptores que compõem um conversor de eletrônica potência de um estado para outro é denominado modulação. O princípio da modulação PWM é a utilização de intersecções entre a onda de referência, também chamada de modulante, e entre a onda portadora. A forma de onda da saída do inversor é similar em forma a onda modulante, e as ondas portadoras geralmente tem forma de dente de serra ou triangulares.

No inversor de tensão trifásico ponte completa foi implementada um PWM senoidal, tal como o nome diz, uma onda trifásica senoidal como moduladora e uma onda triangular com frequência de 20 kHz como portadora, detalhadas na Figura 10.

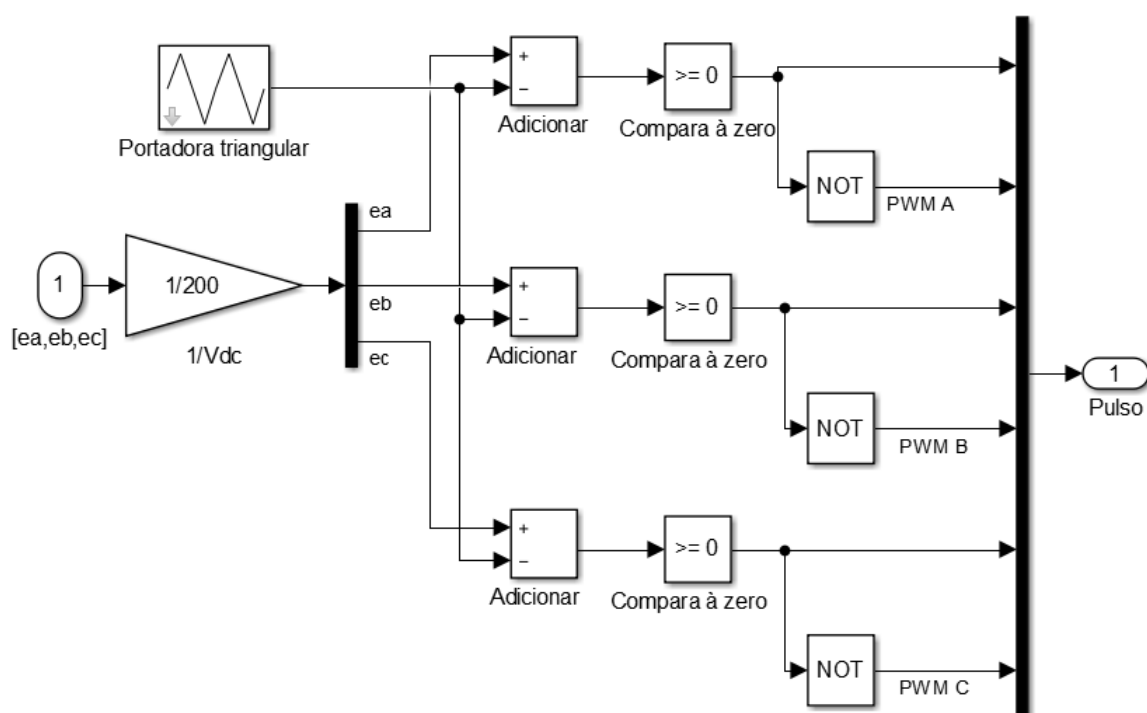


Figura 9 – Modelo do inversor fonte de tensão trifásico ponte completa com PWM



Fonte: Autoria própria

Figura 10 – Detalhe do modelo do PWM



Fonte: Autoria própria

#### 4.1.2 Dimensionamento do filtro LCL

A operação de chaves de alta frequência produz harmônicos não desejáveis na saída do inversor trifásico. Para mitigação desses harmônicos e somente a parcela referente a frequência fundamental esteja disponível na saída, é utilizado um filtro na saída do inversor.

A metodologia descrita refere-se ao projeto de um filtro para um inversor trifásico fonte de tensão, sendo que o filtro será composto por três filtros monofásicos com indutores e resistores em série e capacitores conectados em estrela (Y), caracterizando um filtro passa-baixa.

A topologia adotada foi o filtro LCL pois apresenta um comportamento mais independente das variações da rede elétrica. Os parâmetros utilizados no filtro LCL estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do filtro LCL

Parâmetro	Valores
Indutância do filtro ( $L_{s1}$ ) = ( $L_{s2}$ )	3,4 mH
Resistência do filtro ( $R_{s1}$ ) = ( $R_{s2}$ )	0,5 $\Omega$
Capacitância do filtro ( $C$ )	2 $\mu$ F

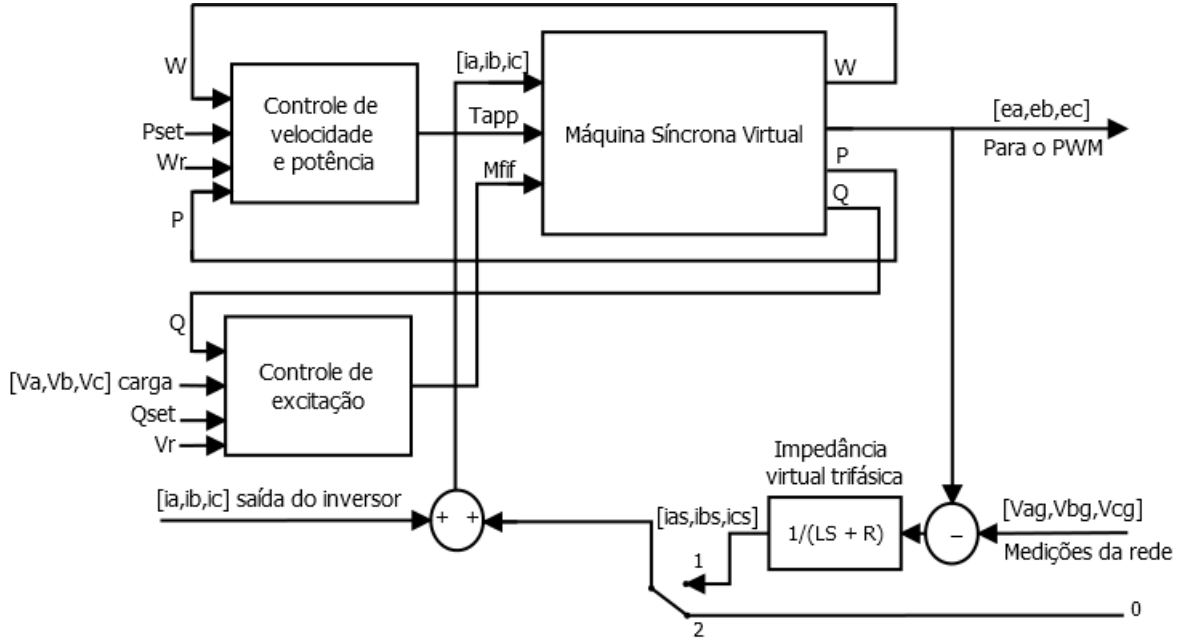
Fonte: Própria autora

Foi adotado nesse trabalho valores de indutâncias  $L_{s1}$  e  $L_{s2}$  e resistências  $R_{s1}$  e  $R_{s2}$ . Para a impedância virtual de conexão foram adotados os valores de indutância  $L$  e resistência  $R$  10 vezes maior do que a impedância real das 2 indutâncias série.

## 4.2 Controle do modelo dinâmico da máquina síncrona virtual

O sistema de controle é a parte do processamento digital de sinal que envia os sinais modulantes para o inversor. O circuito de controle possui impedância virtual trifásica, controle de velocidade e potência, controle de excitação, modelo mecânico e elétrico da máquina síncrona. O circuito de controle é detalhado na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama de blocos do circuito de controle com regulação da potência ativa e reativa



Fonte: Autoria própria

#### 4.2.1 Modelagem matemática da máquina síncrona

Neste trabalho, é adotado 1 par de polos por fase e 1 par de polos no rotor tornando assim a velocidade elétrica do campo eletromagnético igual à velocidade mecânica. O modelo matemático é de uma máquina síncrona trifásica de polos lisos, então todas as indutâncias do estator são constantes. Foi assumido que não existe efeitos de saturação magnética no núcleo ou de correntes parasitas.

A máquina síncrona é modelada em duas partes: uma elétrica e outra mecânica [15]. Os detalhes da geometria e estrutura dos enrolamentos adotados são mostrados na Figura 12.

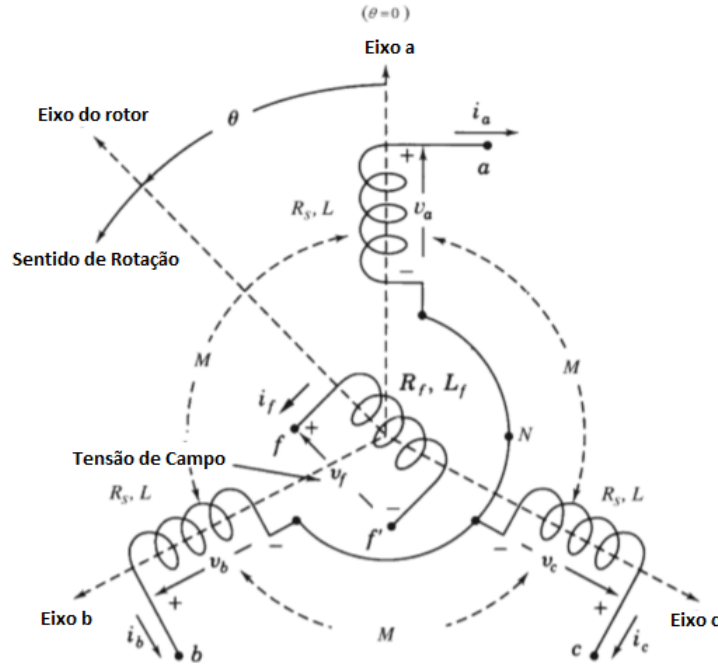
Na parte elétrica temos a interação do estator e o rotor através do fluxo. O fluxo do estator é expresso na Equação 6:

$$\Phi = L_s i + M_f i_f \cos \theta \quad (6)$$

Sendo  $L_s$  a soma da indutância própria e mútua por fase,  $M_f$  a indutância mútua entre o enrolamento de campo e do estator e  $i_f$  a corrente de excitação do rotor. A Equação 7 expressa um gerador síncrono operando sem carga:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega M_f i_f \sin \theta \\ \omega M_f i_f \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \omega M_f i_f \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Figura 12 – Geometria dos Enrolamentos da Máquina Síncrona



Fonte: [16] Adaptado

A Equação 8 é muito conhecida na literatura de estabilidade e dinâmica do sistema de potência, visto que representa a oscilação do torque do rotor.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D_p \omega \quad (8)$$

Sendo  $J$  a inércia do gerador,  $\omega$  a velocidade angular do rotor,  $T_m$  o torque mecânico,  $T_e$  o torque eletromagnético e  $D_p$  o fator de amortecimento. O torque eletromagnético do gerador síncrono é definido pela Equação 9.

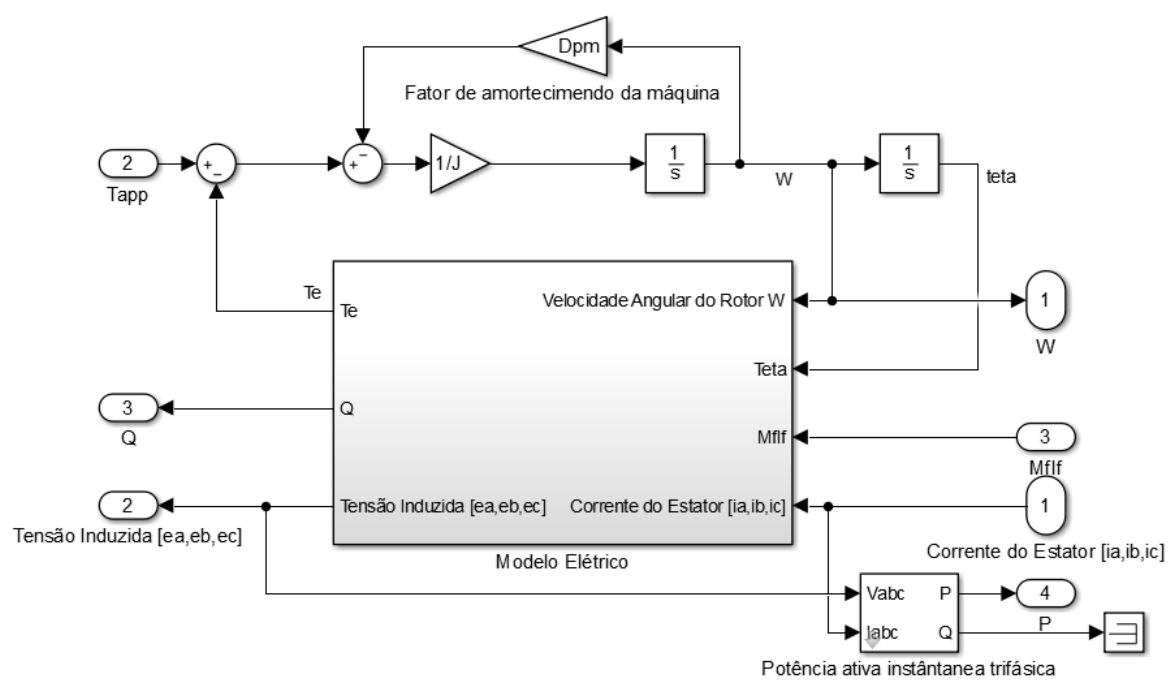
$$T_e = \begin{bmatrix} M_f i_f i_a \sin \theta \\ M_f i_f i_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_f i_f i_c \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

A potência reativa é calculada pela Equação 10.

$$Q = \begin{bmatrix} -\omega M_f i_f i_a \cos \theta \\ -\omega M_f i_f i_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ -\omega M_f i_f i_c \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

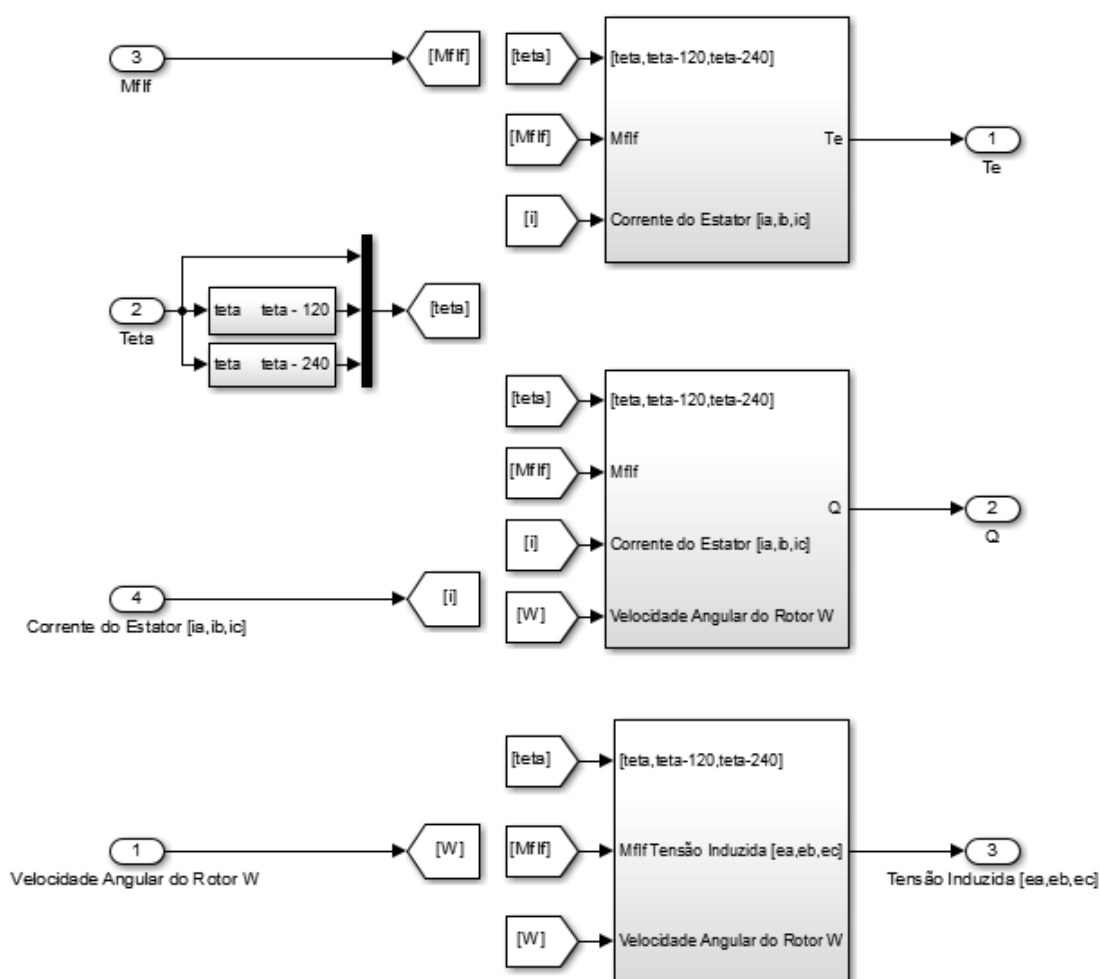
A Figura 13 mostra o interior do bloco do modelo da máquina síncrona virtual e a Figura 14 detalha o interior do bloco do modelo elétrico da máquina síncrona virtual. Os blocos da Figura 14 utilizam a Equação 7, a Equação 9 e a Equação 10 para o cálculo da tensão induzida  $e$ , torque eletromagnético  $T_e$  e potência reativa  $Q$  respectivamente.

Figura 13 – Modelo no simulink da máquina síncrona de polos lisos



Fonte: Autoria própria

Figura 14 – Implementação do modelo elétrico da máquina síncrona de polos lisos

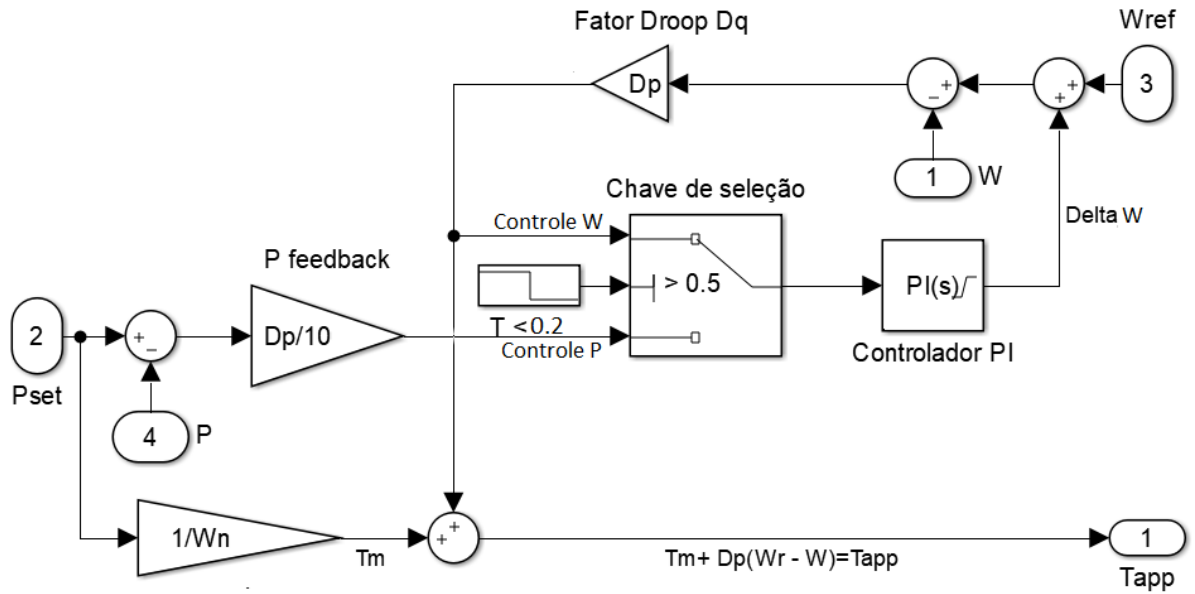


Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2 Controle da frequência e da potência ativa

O laço de controle da frequência representa uma importante propriedade dos geradores síncronos que é o compartilhamento de carga quando se varia a potência ativa entregue ao sistema de acordo com a frequência do sistema elétrico de potência. O circuito de controle é detalhado na Figura 15. Quando a demanda por potência ativa aumenta, o gerador diminui a velocidade por causa do aumento do torque eletromagnético  $T_e$  da Equação 8. Um novo equilíbrio de potência é estabelecido quando o regulador de potência da máquina primária aumenta a potência mecânica.

Figura 15 – Modelo do sistema de controle da frequência e da potência ativa



Fonte: Autoria própria

O mecanismo de controle de frequência droop é implementado na máquina síncrona virtual pela comparação da velocidade angular virtual  $\omega$  com a velocidade angular de referência do grid  $\omega_r$  e adição dessa diferença, multiplicado por um ganho  $D_p$ , que representa o coeficiente da frequência droop, e somado com o torque mecânico  $T_m$ . Considerando a variação do torque total que atua no rotor imaginário é dada por  $\Delta T$  e a mudança total na velocidade angular é  $\Delta\omega$ , portanto o coeficiente de frequência droop utilizado nesse trabalho pode ser escrito como na Equação 11.

$$D_p = -\frac{\Delta T}{\Delta\omega} \quad (11)$$

A diferença entre a equação Equação 11 e a Equação 4 é que uma utiliza a equação da oscilação do torque e a outra utiliza a equação da oscilação da potência respectivamente. O torque mecânico  $T_m$  é obtido do valor de referência da potência ativa  $P_{set}$  dividido pela velocidade mecânica nominal  $\omega_n$ . A constante de tempo do laço da frequência droop é

dados pela Equação 12.

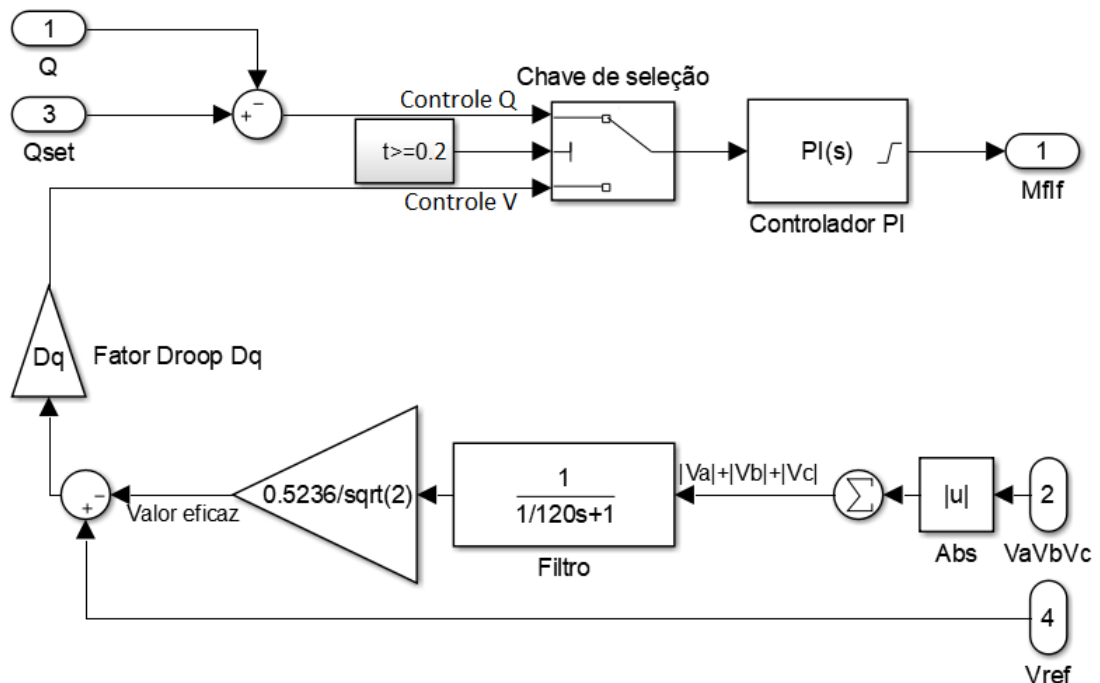
$$\tau_f = \frac{J}{D_p} \quad (12)$$

A constante de tempo  $\tau_f$  pode ser menor do que a utilizada para um gerador síncrono real pois não existe atraso de tempo do laço da frequência droop. Após a escolha da constante de tempo  $\tau_f$ , a inércia  $J$  pode ser calculada pela Equação 12. Não é necessário grandes valores de inércia pois grandes valores representam que mais energia é estocada mecanicamente. O tempo de sincronização do gerador síncrono virtual depende da inércia  $J$ . Quanto maior o valor da inércia  $J$  maior o tempo para a sincronização. Quanto menor o valor da inércia  $J$  menor o tempo para sincronização.

#### 4.2.3 Controle da tensão e da potência reativa

O coeficiente de tensão droop é dada pela Equação 5. O sistema de controle é detalhado na Figura 16. É calculado o valor médio da tensão terminal da carga  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ , posteriormente, os valores passam por um filtro passa baixa de primeira ordem, por ultimo, é dividido por raiz de 2 para assim ser obtido o valor eficaz que será subtraído da tensão de referência  $V_r$ . A diferença entre a tensão de referência  $V_r$  e o valor de pico da tensão terminal da carga  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  é o rastreamento do erro do valor de pico da tensão. Esse erro é multiplicado pelo coeficiente de tensão droop  $D_q$ , no modo de operação de ajuste de tensão, entre 0 e 0,2 segundos.

Figura 16 – Modelo do sistema de controle da tensão e da potência reativa



Fonte: Autoria própria



Um sistema de controle é projetado com o propósito de rastrear uma desejada saída, para um dado sinal de entrada como referência. O controlador proporcional integral é muito utilizado para este propósito, pois permite o ajuste do overshoot máximo, tempo de acomodação e erro em regime permanente de acordo com a saída esperada [14]. A função de transferência do PI é dada pela Equação 13, na qual  $K_p$  representa a constante proporcional do PI e  $K_i$  representa a constante integral do PI.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (13)$$

Na malha do controle da frequência, o controlador PI regula a saída do bloco da frequência droop ( $D_p$ ) e potência ativa. Contudo, na malha do controle da tensão, o controlador PI regula a saída do bloco da tensão droop ( $D_q$ ) e potência reativa, em razão da tensão ( $V_n$ ) e da frequência ( $f_n$ ) serem fixadas pela rede elétrica, desta forma o controlador atuará somente na atenuação do erro em regime permanente.

É calculado um erro entre a referência de potência reativa  $Q_{set}$  e a potência reativa  $Q$  calculada pela Equação 10, no modo de operação de ajuste de reativo, entre 0,2 segundos e 1 segundo. O resultado é multiplicado por um PI para gerar o sinal  $M_{fi}$ . A constante de tempo do laço da tensão droop é dado pela Equação 14.

$$\tau_v = \frac{K}{D_q \omega} \quad (14)$$

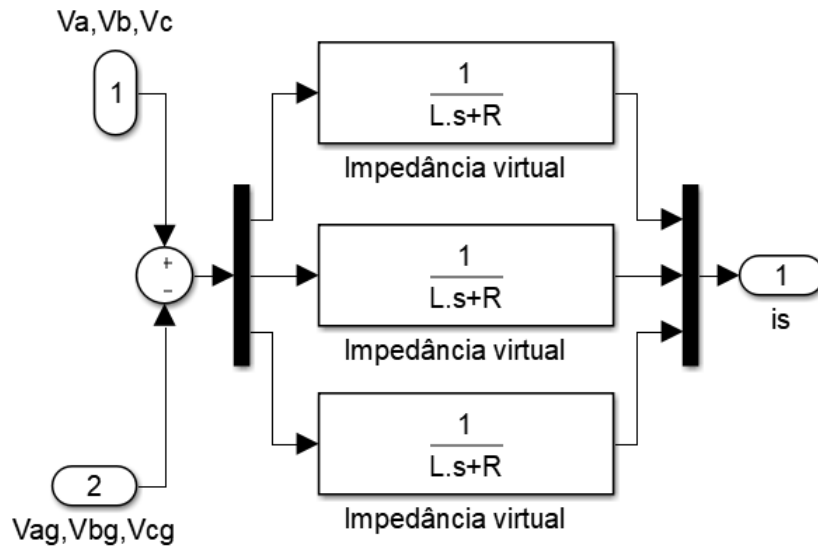
O detector de fase e de valor de pico utilizado no laço da tensão pode ser implementado de diversas maneiras. Uma maneira é a utilização de uma unidade dedicada de sincronização, como por exemplo, um *Phase-Locked Loop* (PLL). Nesse trabalho foi utilizada uma impedância virtual de conexão para sincronização e fornecimento da amplitude de tensão de referência.

#### 4.2.4 Dimensionamento da impedância virtual trifásica que imita o processo de conexão com a rede

A adição da impedância virtual faz com que a máquina síncrona virtual seja capaz de conectar, sincronizar e operar de maneira segura no sistema elétrico de potência sem precisar de uma unidade dedicada de sincronização. Uma corrente virtual  $i_s$  é gerada do erro de tensão entre a tensão na carga  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  a tensão do sistema elétrico de potência  $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  e  $V_{cg}$  e multiplicado pelo bloco da impedância virtual como mostra a Figura 17.

A corrente do circuito de controle pode ser a corrente virtual  $i_s$  somada com a corrente na carga ou somente a corrente na carga. Essas correntes são selecionadas por meio de uma chave de seleção na simulação. Os parâmetros utilizados na impedância virtual de conexão estão descritos na Tabela 3.

Figura 17 – Impedância virtual



Fonte: Própria autora

Tabela 3 – Parâmetros da impedância virtual trifásica

Parâmetro	Valores
Indutância virtual de conexão ( $L$ )	68 mH
Resistência virtual de conexão ( $R$ )	10 $\Omega$

Fonte: Própria autora

A resistência  $R$  e a indutância  $L$  da reatância síncrona virtual  $X_s$  podem assumir uma variedade de valores. Porém, pequenos valores de indutância e resistência causam grandes transitórios na corrente  $i_s$  e variações na frequência. O quociente  $R/L$  define a frequência de corte do bloco da impedância virtual, que determina a capacidade de filtrar os harmônicos da tensão do sistema elétrico de potência  $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  e  $V_{cg}$ .

Na próxima seção serão apresentados todos os resultados da simulação, primeiramente exibindo os resultados do controle antes da conexão ao sistema de potência (*stand-alone* ou *off-grid*). Em seguida será apresentado o resultado da simulação em processo de sincronismo ainda desconectado da rede; e conectado à rede (*grid-tied* ou *grid-connected*). Para os resultados de conexão com o sistema de potência serão apresentados os resultados após degrau de potência ativa e reativa.

## 5 RESULTADOS

A proposta de controle foi validada no ambiente MATLAB / Simulink / SimPowerSystems com os parâmetros das Tabelas 2, 3, 4 e 5. O solver utilizado foi o ode15s(stiff/NDF) com passo variável. O pequeno valor da inércia  $J$  e fator de amortecimento  $D_{pm}$  utilizados nessa simulação, especificados na Tabela 5, estão diretamente relacionados a robutez do sistema de controle em frente a absorção de perturbações que possam ocorrer durante o tempo total da simulação de 0 a 1 segundo.

Tabela 4 – Parâmetros da simulação

Parâmetros	Valores
Potência nominal ( $S$ )	10000 VA
Frequência da rede ( $f_n$ )	60 Hz
Tensão de linha da rede ( $V_n$ )	220 $V_{rms}$
Tensão de referência ( $V_r$ )	127 V
Tensão do Barramento CC ( $V_{cc}$ )	400 V
Indutância da rede ( $L_g$ )	12,83 mH
Resistência da rede ( $R_g$ )	0,8355 $\Omega$
Carga resistiva trifásica ( $R$ )	200 $\Omega$
Constante K ( $K$ )	199,8052
Constante proporcional do laço da frequência ( $K_{pf}$ )	1
Constante integral do laço da frequência ( $K_{if}$ )	100
Constante proporcional do laço da tensão ( $K_{pv}$ )	0,0004
Constante integral do laço da tensão ( $K_{iv}$ )	0,005

Fonte: Própria autora

Tabela 5 – Parâmetros da máquina síncrona virtual

Parâmetros	Valores
Fator de amortecimento ( $D_{pm}$ )	0,0001 $kg/s$
Inércia ( $J$ )	0,0001 $kgm^2$

Fonte: Própria autora

O inversor trifásico ponte completa foi conectado ao sistema elétrico de potência por meio de uma chave de conexão. Foi escolhido um coeficiente de frequência droop  $D_p = 0,2$  e o coeficiente de tensão droop escolhido foi  $D_q = 20$ . As constantes de tempo para os laços da frequência e da tensão do controle droop foram escolhidas, respectivamente,  $\tau_f = 0,0005$  segundos e  $\tau_v = 0,0265$  segundos. Os modos de operação da máquina síncrona virtual são especificados na Tabela 6.

Tabela 6 – Modos de operação da máquina síncrona virtual

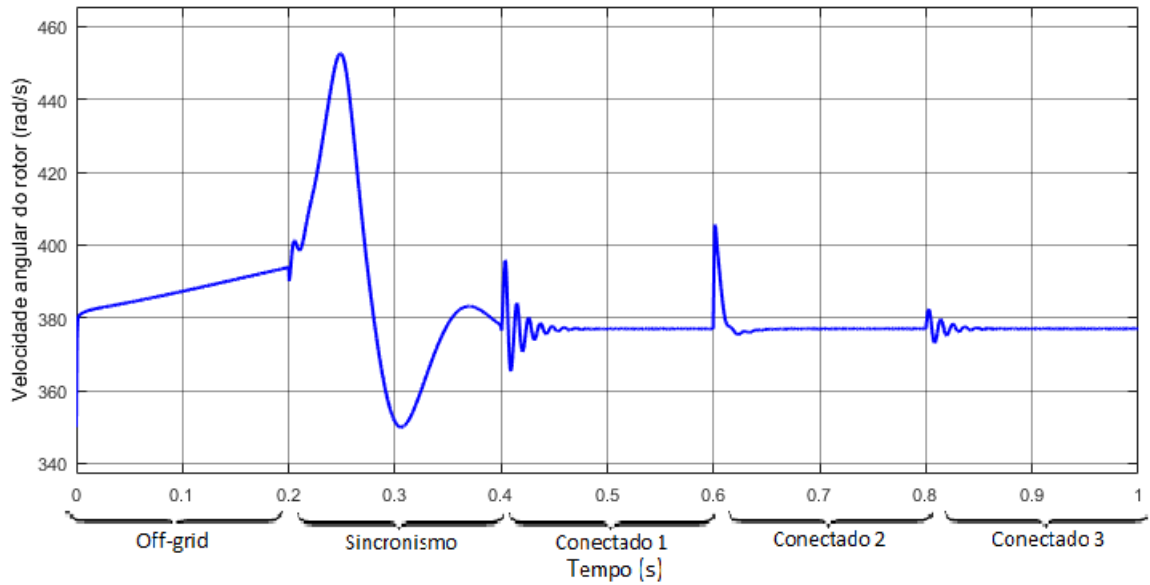
Modo	Tempo (s)	Pot. Ativa (W)	Pot. Reativa (VAr)
<i>Stand-alone</i> ou <i>off-grid</i>	0 a 0,2 s	0 W	0 VAr
Sincronismo	0,2 a 0,4 s	0 W	0 VAr
Conectado 1	0,4 a 0,6 s	0 W	0 VAr
Conectado 2	0,6 a 0,8 s	1000 W	0 VAr
Conectado 3	0,8 a 1 s	1000 W	-200 VAr

Fonte: Própria autora

A simulação começou no tempo  $t = 0$  segundo, a chave de conexão estava aberta, a chave de sincronização na posição 2, com a chave do laço da frequência na posição controle  $W$  e a chave do laço da tensão na posição controle  $V$ , os valores de  $P_{set}$  e  $Q_{set}$  são zero. Esse modo de operação é conhecido como regulagem da tensão e frequência. O valor da frequência de referência escolhida foi 61 Hz e o valor do ângulo da tensão induzida  $e_a$ ,  $e_b$  e  $e_c$  inicial foi escolhido  $90^\circ$  graus, assim, foi gerado, uma diferença frequência e de fase entre a tensão da carga  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  e a tensão da rede  $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  e  $V_{cg}$ , para posteriormente ocorrer a sincronização.

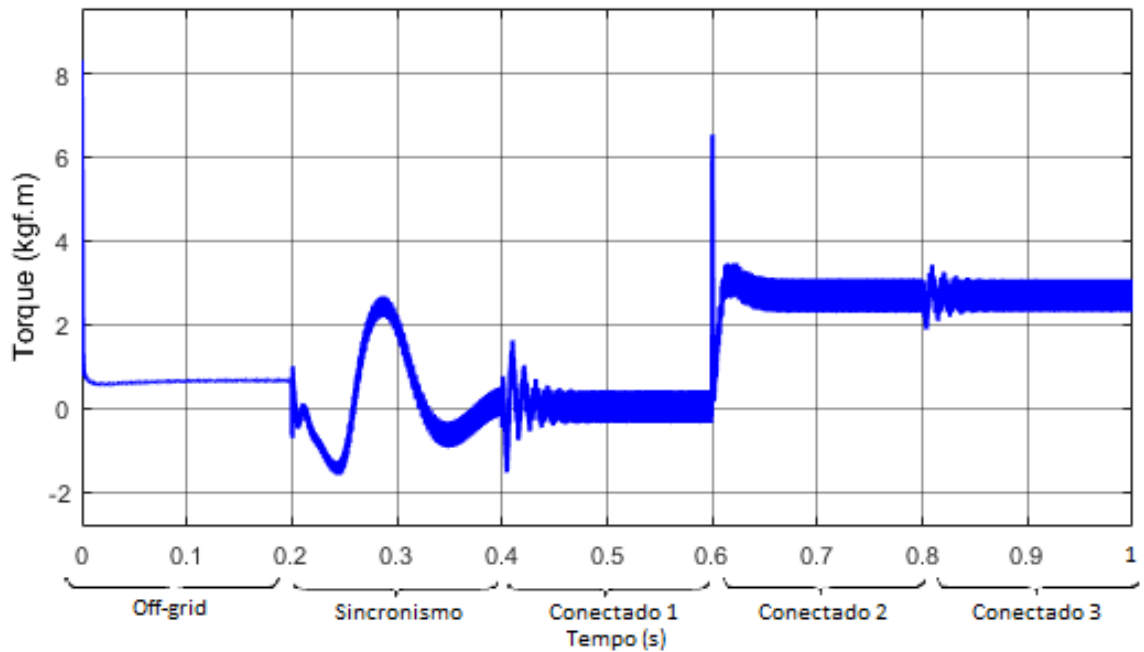
No tempo  $t = 0,2$  segundos, a chave de conexão estava aberta, a chave de sincronização na posição 1, com a chave do laço da frequência na posição controle  $P$  e a chave do laço da tensão na posição controle  $Q$ , os valores de  $P_{set}$  e  $Q_{set}$  são zero. O gerador síncrono virtual sincroniza rapidamente com a impedância virtual trifásica. A corrente virtual  $i_s$  foi somada com a corrente  $i$  da saída do inversor. A transição do valor da corrente foi suave sem grandes transitórios. Ocorreram picos de transitórios na curva da velocidade angular do rotor durante os testes. A velocidade angular do rotor e o torque apresentaram uma grande variação no valor no momento em que inicia a sincronização com a impedância virtual e com o sistema elétrico de potência. Este resultado pode ser observado na Figura 18 e na Figura 19.

Figura 18 – Comportamento da velocidade angular do rotor na simulação



Fonte: Própria autora

Figura 19 – Comportamento do torque na simulação

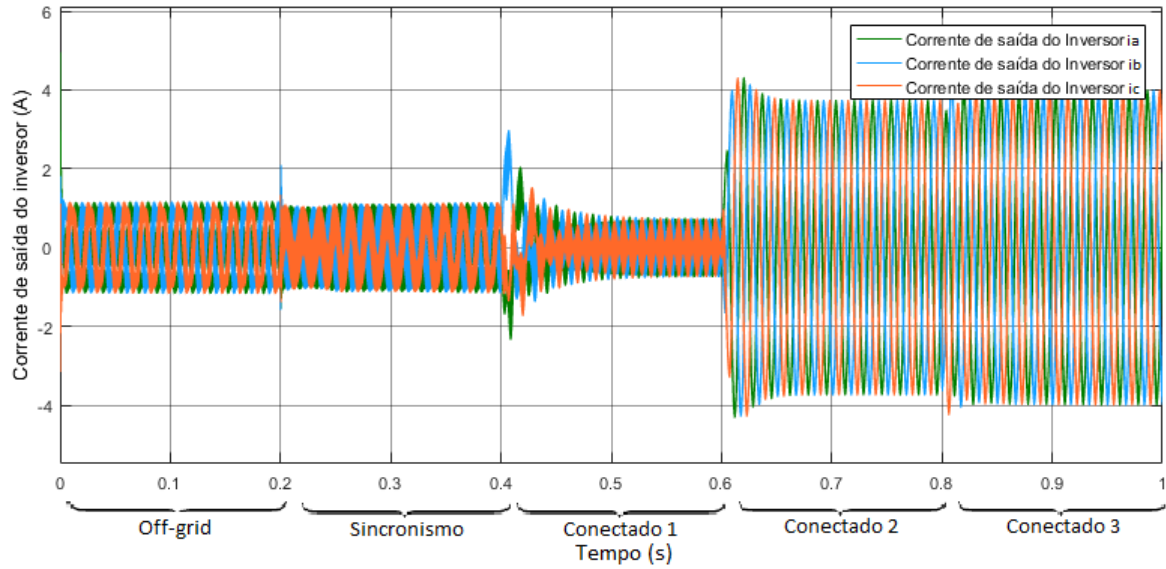


Fonte: Própria autora

No tempo  $t = 0,4$  segundos, a chave de conexão foi fechada, a chave de sincronização estava na posição 2, com a chave do laço da frequência na posição controle  $P$  e a chave do laço da tensão na posição controle  $Q$ , os valores de  $P_{set}$  e  $Q_{set}$  são zero. O gerador síncrono virtual sincroniza rapidamente com sistema elétrico de potência. A corrente virtual  $i_s$  não

foi somada com a corrente  $i$  da saída do inversor. A transição do valor da corrente de saída  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  do inversor apresentou grandes transitórios, mostradas na Figura 20.

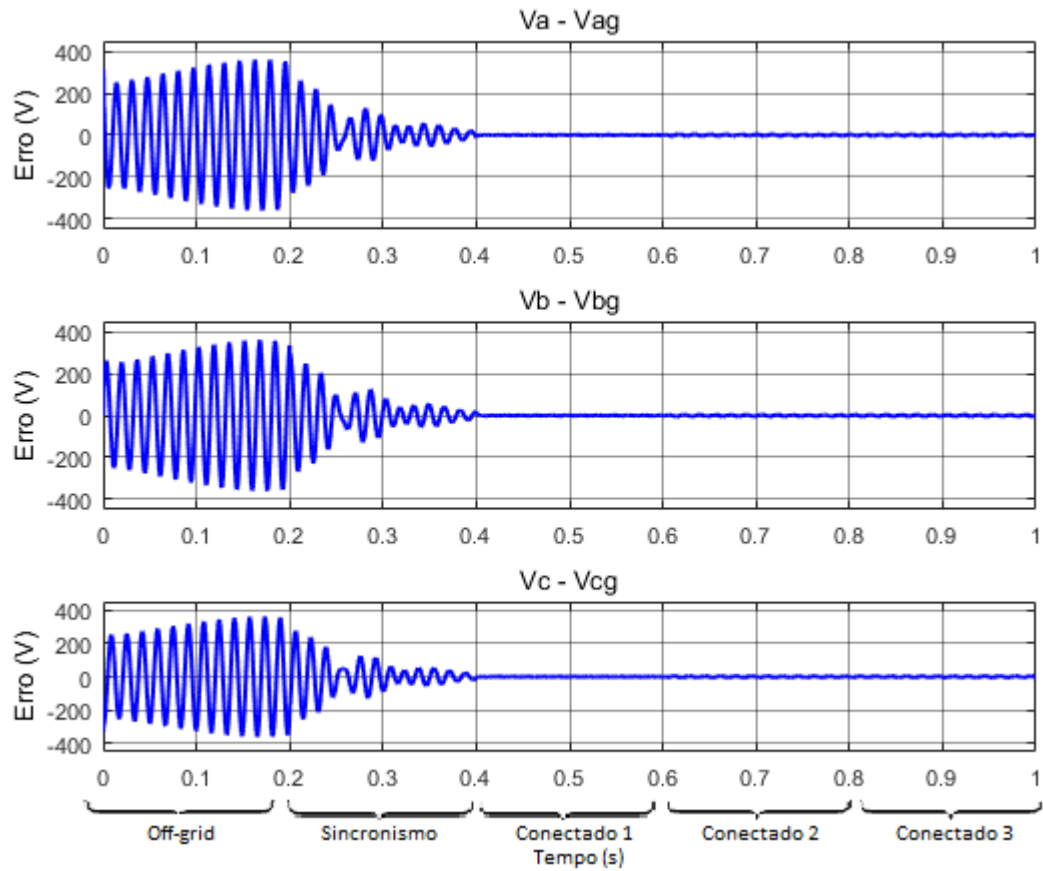
Figura 20 – Corrente de saída  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  do inversor



Fonte: Própria autora

As diferenças entre as tensões de carga  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  e tensões do sistema elétrico de potência  $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  e  $V_{cg}$  são mostradas na Figura 21.

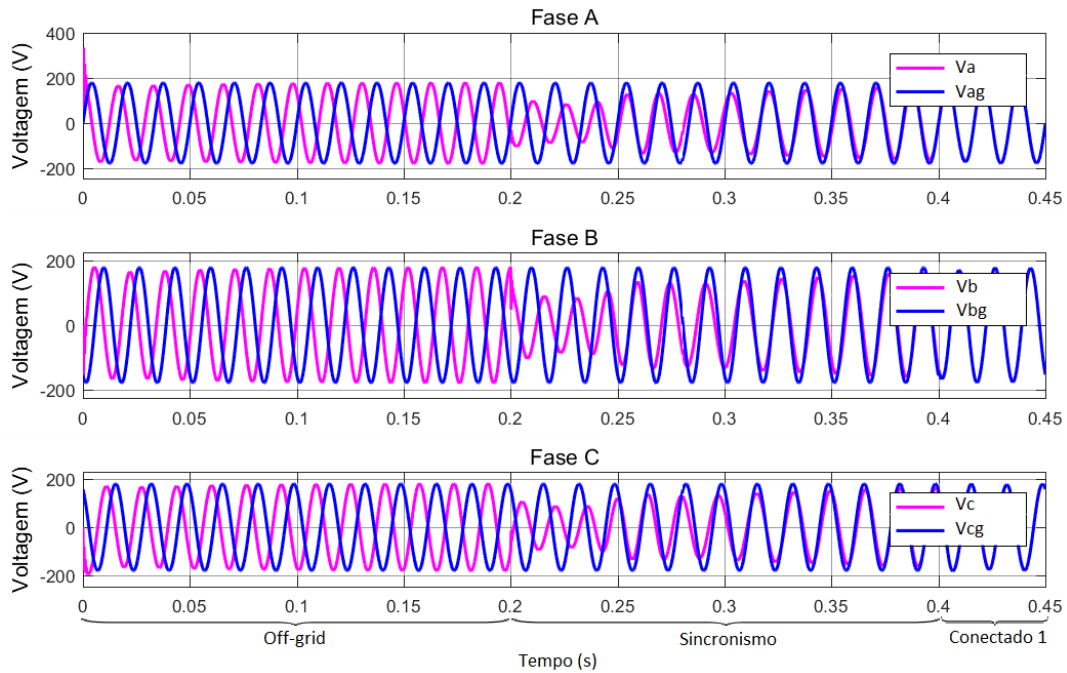
Figura 21 – Resultado da subtração das tensões de carga  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  e tensões do sistema elétrico de potência  $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  e  $V_{cg}$



Fonte: Própria autora

Antes da conexão, a diferença entre as tensões de pico a pico apresentavam um valor pequeno, possibilitando assim a conexão do gerador síncrono virtual ao sistema elétrico de potência. Na Figura 22, é mostrado a exatidão do sincronismo da forma de onda da tensão. Após a conexão, o gerador síncrono virtual rastreou a frequência do sistema elétrico de potência com muita exatidão.

Figura 22 – Sincronismo das tensões de carga  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  e tensões do sistema elétrico de potência  $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  e  $V_{cg}$



Fonte: Própria autora

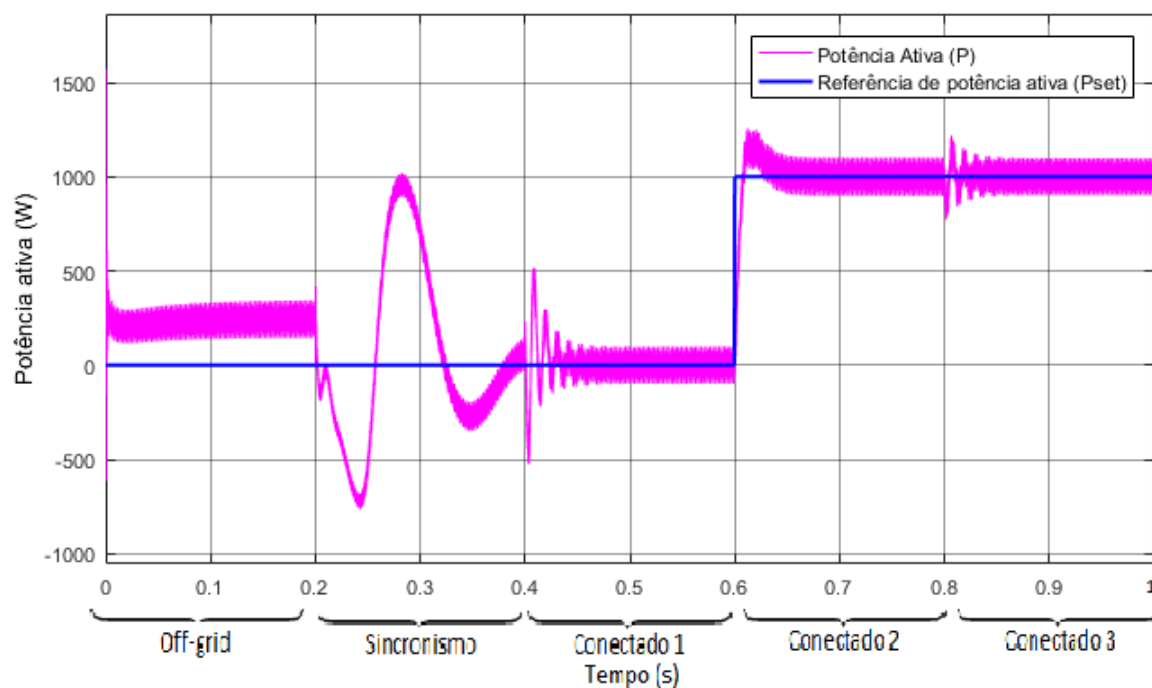
A potência ativa  $P_{set}$  de 1000 W foi aplicada em  $t = 0,6$  segundos. A potência ativa gradualmente aumentou até o valor do degrau de 1000 W. Durante esse período de transição, o gerador síncrono inicialmente retirou um pouco de potência reativa do sistema elétrico de potência, porém, depois retornou ao valor inicial de 0 VAR. Este resultado é mostrado na Figura 23.

A potência reativa  $Q_{set}$  de -200 VAR foi aplicada em  $t = 0,8$  segundos. A potência reativa gradualmente aumentou até o valor do degrau de 200 VAR capacitivo. Durante esse período de transição, a potência ativa do sistema elétrico de potência aumentou um pouco, porém, depois retornou ao valor inicial de 1000 W. Este resultado pode ser observado na Figura 24.

A dependência entre as potências ativas e reativas observadas na Figura 23 e Figura 24 é justificada pelo fato da potência ativa não depender somente do ângulo de potência, mas também da tensão. De maneira similar, a potência reativa não depende somente da tensão, mas também do ângulo de potência. Portanto, esta interdependência entre as potências ativas e reativas é intrínseca do sistema e pode ser observada na Equação 1 e Equação 2. Além disto, a simulação não foi feita com impedância de conexão puramente indutiva o que pode aumentar a dependência entre as potências ativas e reativas.

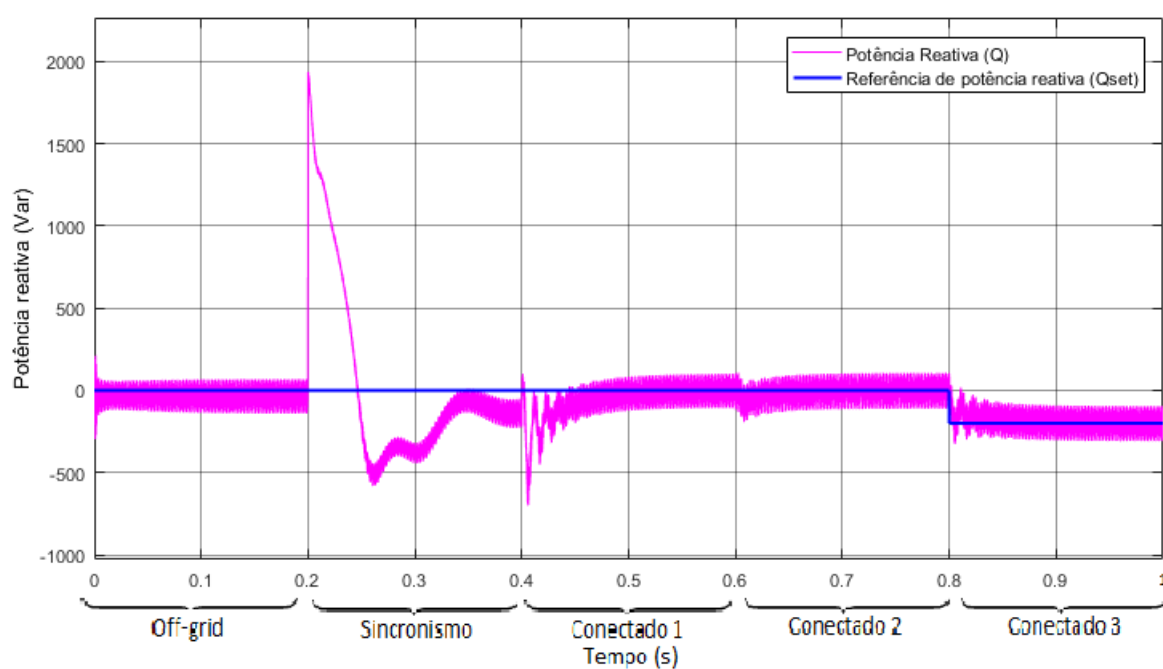


Figura 23 – Resultados da simulação do rastreamento da potência ativa  $P_{set}$  de 1000 W



Fonte: Própria autora

Figura 24 – Resultados de simulação do rastreamento da potência reativa  $Q_{set}$  de -200 VAR



Fonte: Própria autora

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a proposta de um modelo uma máquina síncrona virtual para o controle de conversores eletrônicos de potência operando como *synchronverter* (Inversores que imitam máquinas síncronas). Foi apresentada a teoria para a compreensão do controle proposto, assim como a modelagem e simulação do sistema utilizando um inversor fonte de tensão usual em diferentes condições.

Esta modelagem conseguiu resultados satisfatórios em simulação para as condições testadas. O modelo com os controles típicos de máquinas síncronas é capaz de regular uma determinada tensão e frequência operando isolado da rede (modo *off-grid*), sincronizar com o sistema elétrico de potência através de uma impedância virtual antes da conexão e rastrear a potência ativa e reativa do sistema após a conexão (modo *grid-tied*). Os resultados de simulação demonstraram a operação nestas 4 condições, mostrando os gráficos de tensão de saída e da rede, a corrente de conexão, as potências ativa e reativa e os parâmetros virtuais (torque e velocidade).

Todos os parâmetros foram sintonizados para estabilização em regime permanente em curtos intervalos de tempo na simulação para facilitar a visualização. Em casos reais, alguns parâmetros como a inércia poderão ser ajustados para tempos de resposta maiores de modo a obter resultados mais suaves ou maior estabilidade da rede. Da mesma forma, as referências de potência poderão ser suaves e em rampa assim como ocorre com grupos geradores reais.

Não existe a necessidade de incorporar uma unidade dedicada de sincronização (PLL). O controlador é simplificado com desempenho similar à operação de máquinas síncronas reais, quanto ao rastreamento de frequência e controle de potência ativa e reativa. Na literatura, a ordem do modelo apresentado é intermediário entre o mais preciso e complexo e o mais simples de menor desempenho.

Por não necessitar de PLL e nem de transformadas este modelo se torna atrativo para as aplicações propostas e para futuras comparações com outros métodos. Além disto, a reprodução do efeito inercial das máquinas síncronas pelo modelo proposto pode ser utilizado para contribuir com a estabilidade de sistemas elétricos de potência, principalmente, os sistemas de geração distribuídas e microrredes (*microgrids*), onde operam conversores em paralelo.

Futuros trabalhos poderão envolver testes de operação em tensões desbalanceadas do sistema elétrico de potência e implementação prática do controle apresentado. Outras possibilidades envolvem testes de operação em maiores potências e tensões e também com diferentes topologias de eletrônica de potência.

## REFERÊNCIAS

- 1 ANWAR, M.; MAREI, M. I.; EL-SATTAR, A. A. Generalized droop-based control for an islanded microgrid. In: IEEE. *Computer Engineering and Systems (ICCES), 2017 12th International Conference on*. [S.l.], 2017. p. 717–722.
- 2 GUERRERO, J. M. et al. Distributed generation: Toward a new energy paradigm. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, IEEE, v. 4, n. 1, p. 52–64, 2010.
- 3 ABREU, I. F. N. B. *Análise do Problema de Máxima Geração Distribuída Observando o Critério Estático da Estabilidade de Tensão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 3 2017.
- 4 ANTUNES, H. M. A. Trabalho de Conclusão de Curso, *Modelagem Matemática do Gerador Síncrono de Pólos Salientes*. 2007. Universidade Federal de Viçosa.
- 5 BROEDEL, D. *Análise da Contribuição do Uso do Gerador Síncrono Virtual como Técnica de Controle em Sistemas Elétricos de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.
- 6 BECK, H.-P.; HESSE, R. Virtual synchronous machine. In: IEEE. *Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 1–6.
- 7 CHEN, Y. et al. Investigation of the virtual synchronous machine in the island mode. In: IEEE. *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on*. [S.l.], 2012. p. 1–6.
- 8 HESSE, R.; TURSCHNER, D.; BECK, H.-P. Micro grid stabilization using the virtual synchronous machine (visma). In: *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ'09), Valencia, Spain*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 15–17.
- 9 SHINTAI, T.; MIURA, Y.; ISE, T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 29, n. 2, p. 668–676, 2014.
- 10 WU, H. et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 63, n. 7, p. 4292–4303, 2016.
- 11 D'ARCO, S.; SUUL, J. A. Virtual synchronous machines—classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids. In: IEEE. *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble*. [S.l.], 2013. p. 1–7.
- 12 GODOY, R. B. *Paralelismo de inversores monofásicos, isolados ou em conexão com a rede, com otimização da resposta dinâmica*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 3 2010.
- 13 TOUB, M. et al. A dq droop control strategy for fixed frequency vsi-based ac microgrids. In: IEEE. *2018 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA)*. [S.l.], 2018. p. 332–335.

- 14 HENRIQUE, D. P. Trabalho de Conclusão de Curso, *Análise de um Controlador Droop de Potência Integrado ao controle em modo conectado de um inversor de tensão trifásico balanceado*. 2017. Universidade de São Paulo.
- 15 LV, Z.; ZHONG, Q.-C. Control of modular multilevel converters as virtual synchronous machines. In: IEEE. *Power & Energy Society General Meeting, 2017 IEEE*. [S.l.], 2017. p. 1–5.
- 16 ZHONG, Q.-C.; WEISS, G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 58, n. 4, p. 1259–1267, 2011.