

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
CAMPUS TIMÓTEO**

Fernanda Cristina de Souza Morais

**ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO NO SIMULINK DA TOPOLOGIA DE  
UM INVERSOR DESDOBRADOR DE CORRENTE PARA  
GERADORES EÓLICOS DE PEQUENO PORTE**

**Timóteo**

**2019**

**Fernanda Cristina de Souza Morais**

**ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO NO SIMULINK DA TOPOLOGIA DE  
UM INVERSOR DESDOBRADOR DE CORRENTE PARA  
GERADORES EÓLICOS DE PEQUENO PORTE**

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Computação do Campus Timóteo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Rodrigo Gaiba de Oliveira

Timóteo

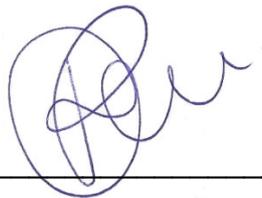
2019

Fernanda Cristina de Souza Morais

ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO NO SIMULINK DA TOPOLOGIA DE  
UM INVERSOR DESDOBRADOR DE CORRENTE PARA  
GERADORES EÓLICOS DE PEQUENO PORTE

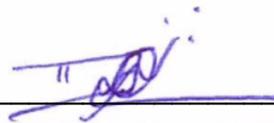
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia de Computação  
do Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais, campus Timóteo, como requisito  
parcial para obtenção do título de Engenheiro de  
Computação.

Trabalho aprovado. Timóteo, 10 de Julho de 2019:



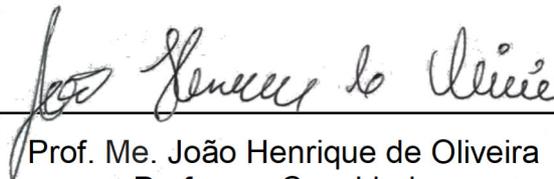
---

Prof. Dr. Rodrigo Gaiba de Oliveira  
Orientador



---

Prof. Dr. Elder de Oliveira Rodrigues  
Professor Convidado



---

Prof. Me. João Henrique de Oliveira  
Professor Convidado

Timóteo  
2019

# Agradecimentos

Primeiramente à Deus, que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitária, mas também em todos os momentos.

Agradeço à minha mãe Isabel, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

Agradeço ao meu orientador, prof. Rodrigo Gaiba de Oliveira, pelo apoio e incentivo com relação ao desenvolvimento do trabalho.

Sou grato ao CEFET-MG como instituição, assim como aos professores, servidores e colegas que lá conheci, por terem feito parte da minha vida por tanto tempo.

*“Os grandes navegadores  
devem sua reputação aos temporais e tempestades.”  
Epicuro*

# Resumo

Este trabalho apresenta uma simulação de um inversor desdobrador de corrente em um sistema eólico de pequeno porte, com o intuito de verificar seu funcionamento e comparar a sua eficiência com o inversor *push-pull*. Primeiramente, foi introduzido a importância do desenvolvimento de inversores de potência, pois os mesmos são os componentes mais suscetíveis a falhas em um sistema de geração de energia elétrica. Após a implementação do inversor desdobrador de corrente, foram realizados testes do mesmo em relação aos principais perfis de ventos encontrados na literatura técnica sobre o tema, que são rampa, rajada e degrau, tanto ascendentes quanto descendentes, validando seu funcionamento em um sistema eólico completo para geração de energia elétrica. Posteriormente, foi implementado um perfil de velocidade constante, com valores incrementados de 1m/s a 12m/s, onde foram coletadas as potências de entrada e saída do inversor desdobrador de corrente e do inversor *push-pull*, verificando-se ao final a eficiência dos mesmos, para cada parte da operação. O inversor *push-pull* apresentou uma maior eficiência em relação ao inversor desdobrador de corrente, mas em relação ao volume e peso, o inversor desdobrador de corrente se mostrou mais compacto, devido ao maior número de enrolamentos que o inversor *push-pull* necessita.

**Palavras-chave:** energia eólica, inversor estático, simulação computacional.

# Abstract

This work presents a simulation of the current splitter inverter in a small wind system, in order to verify its operation and compare its efficiency with the push-pull inverter. First, the importance of developing power inverters was introduced, as they are the most susceptible to failure components in a power generation system. After the implementation of the current splitter inverter, it was tested in relation to the main wind profiles found in the bibliography, which are ramp, gust, rung, ascending and descending, validating its operation in a complete wind system. Subsequently, a constant velocity profile was implemented, with values from 1m/s to 12m/s, where the input and output power of the current splitter inverter and the push-pull inverter were collected, verifying their efficiency for each part of operation. The push-pull inverter has a higher efficiency compared to the current splitter inverter, but in terms of volume and weight, the proposed inverter is more compact due to the larger number of windings that the push-pull inverter needs.

**Keywords:** wind energy, static inverter, computer simulation.

# Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Variação de energia no inversor desdobrador de corrente. . . . .	43
Tabela 5.2 – Variação de energia no inversor <i>push-pull</i> . . . . .	43

# Lista de abreviaturas e siglas

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GPC	Conversor de energia
MPPT	Seguidor do ponto de máxima potência
PWM	Modulação por largura de pulso
CSI	Inversor fonte de corrente
PSMG	Gerador síncrono à ímãs permanente

# Lista de símbolos

<i>CC</i>	Corrente contínua
<i>CA</i>	Corrente alternada
<i>GWh</i>	Gigawatt-hora
<i>Hz</i>	Hertz
<i>V</i>	Volt
<i>m/s</i>	Metros por segundo
<i>W</i>	Watt

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Justificativa	12
1.2	Problema	13
1.3	Objetivo	13
1.4	Objetivos específicos	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>15</b>
2.1	Introdução a geração de energia eólica	15
2.2	Aerogeradores de pequeno porte	16
2.3	Inversores eólicos	18
2.4	Mecanismo de controle	18
2.5	Comportamento aleatório do vento	19
<b>3</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>20</b>
3.1	Inversor <i>push-pull</i>	20
3.2	Inversor desdobrador de corrente	21
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>22</b>
4.1	Modelagem do aerogerador	23
4.2	Modelagem do inversor	23
4.3	Turbina eólica de pequeno porte	25
4.4	Estratégia de modulação	25
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>27</b>
5.1	Resultado dos perfis de vento	27
5.1.1	Operação em rampa	27
5.1.2	Operação em sub-rampa	30
5.1.3	Operação em rajada	32
5.1.4	Resultado em sub-rajada	34
5.1.5	Operação em degrau	37
5.1.6	Resultado em sub-degrau	39
5.2	Resultado em relação a eficiência	42
5.3	Análise dos resultados	44
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>45</b>
6.1	Trabalhos futuros	45
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>47</b>
	<b>APÊNDICE A – INICIALIZA</b>	<b>50</b>

	<b>APÊNDICE B – SIMULAÇÃO MATLAB . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>B.1</b>	<b>Simulação do aerogerador . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>B.2</b>	<b>Simulação do inversor com o conversor . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>B.3</b>	<b>Simulação do controlador do inversor . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>B.4</b>	<b>Simulação dos tipos de vento . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>B.5</b>	<b>Simulação do inversor push-pull . . . . .</b>	<b>56</b>
<b>B.6</b>	<b>Código de geração dos gráficos . . . . .</b>	<b>57</b>
B.6.1	Velocidade do vento . . . . .	57
B.6.2	Velocidade da turbina . . . . .	57
B.6.3	Tensão . . . . .	57
B.6.4	Corrente . . . . .	57

# 1 Introdução

*"A dúvida é o princípio da sabedoria."(Aristóteles)*

Os debates sobre sustentabilidade ambiental passaram por um crescimento significativo após o texto da “Declaração de Estocolmo sobre o Meio Ambiente Humano” (ABRACAVE, 2002) em 1972. Nesse documento, foram apresentados que os recursos naturais devem ser utilizados de forma a evitar seu esgotamento e assegurar a todos o uso do mesmo, introduzindo a ideia de que o ser humano tem como a obrigação preservar o meio ambiente. Em 1992, no Rio de Janeiro, ocorreu a “Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento” onde estimulou novos acordos, como a Agenda 21, Convenção da Biodiversidade e a Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas (OZKAN; HAVA, 2014).

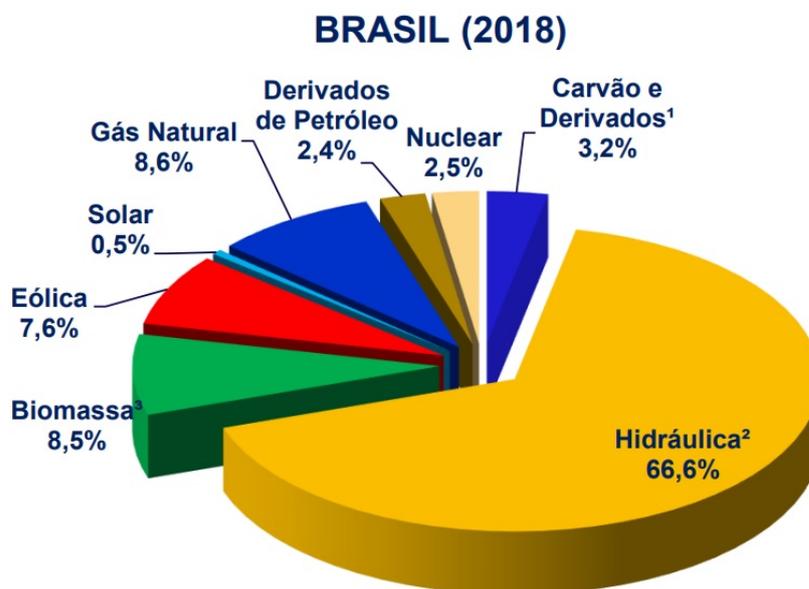
As mudanças climáticas geradas pelos padrões atuais de produção e consumo de energia, baseada em fontes fósseis, geram emissões de poluentes locais (gases de efeito estufa). Devido, principalmente, às mudanças climáticas, foram impulsionados estudos de demandas energéticas limpas, ou seja, energia proveniente de fontes não poluentes (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Além disso, os extensos modelos de rede elétrica para países desenvolvidos, estão longe de ser um modelo que a sociedade moderna precisa, visto que muitos casos não geram confiança suficiente em sua estabilidade, principalmente, após a multiplicação desenfreada de aparelhos eletrônicos domésticos e industriais. Como o crescimento da demanda é muitas vezes maior que a geração, tendo como efeito colateral, apagões breves ou longos, quedas repentinas de corrente, entre os outros problemas (ANELL, 20014). Neste cenário, as energias renováveis aparecem como uma alternativa em reduzir os efeitos ambientais, como também suprir as demandas por energia elétrica (BERMANN, 2008).

Os sistemas de geração de energias renováveis tiveram grandes avanços em relação a geração de energia domiciliar, com o intuito de diminuição dos custos do mesmo (PRASAD; JAIN; AGARWAL, 2008), entretanto, os conversores de potência tradicionais para conexão do sistema eólico na rede elétrica (do inglês, grid power converter - GPC) (TEODORESCU; LISERRE; RODRIGUEZ, 2011) não acompanharam esses avanços. Ainda são os dispositivos dos sistemas de energias mais susceptíveis a falhas (BORGES, 2018). Estas falhas, conforme apontado em Borges (2018), estão associadas principalmente a problemas com os capacitores eletrolíticos e, em menor escala, com os interruptores, onde normalmente pode ocorrer curto de braço no estágio CC-CA. Para solucionar as falhas e aumentar a confiabilidade dos sistemas de energias renováveis, pesquisadores têm se dedicado à busca por novas topologias, controles e circuitos auxiliares, que possam melhorar a robustez dos GPCs utilizados em equipamentos comerciais. Porém, muitas dessas soluções são inviáveis para aplicações industriais, uma vez que o baixo custo de fabricação do GPC é um fator essencial para que novas topologias possam ser fabricadas em escala industrial. Com isso, observa-se uma tendência à adoção de GPCs que não utilizem transformadores e que possuam interruptores com comutação em baixa frequência, os quais comutam em sincronia com a tensão da rede.

O uso de interruptores comutando em baixa frequência trazem ainda outro benefício para o GPC, que é uma maior eficiência. Uma vez que a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis tem caráter intermitente, por depender de fenômenos da natureza, a alta eficiência deste tipo de inversor torna-se de extrema importância para a obtenção de um melhor aproveitamento da fonte de energia e, conseqüentemente, para que o sistema se torne economicamente viável (PRASAD; JAIN; AGARWAL, 2008).

O consumo energético nacional representa 83,3% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável, com destaque para a geração hidráulica, que pode ser visto no cenário da Figura 1.1, extraído dos dados da pesquisa do Balanço Energético Nacional, onde apresentou uma expansão de 0.5% na comparação com o ano de 2017 e 2018, no balanço energético publicado em 2019. Neste mesmo documento, foi destacado o aumento da participação da geração de energia eólica, distribuída no cenário nacional, onde alcançou a 48.475GWh, equivalente a um aumento de 14,4% em relação ao ano anterior, quando se atingiu 42.373GWh. Um aumento considerável, quando comparado aos 4,9% de crescimento da geração hidrelétrica, principal fonte de energia do país (EPE, 2019). Esses dados são justificados pelo valor de capital empregado, na instalação de uma usina hidrelétrica, comparada a um parque eólico, e extensão geográfica necessária para implantação de uma hidrelétrica, ou seja, necessita de uma grande fonte de recursos.

Figura 1.1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte.



Fonte: EPE (2019).

## 1.1 Justificativa

A crescente demanda de energia elétrica e a eventualidade de redução da oferta dos combustíveis tradicionais, têm incentivado pesquisas e desenvolvimento de fontes de ener-

gia alternativa (BRITO, 2013). No mercado internacional, de acordo com Borges (2018), Brito (2013), existem grandes empresas no desenvolvimento de conversores de potência, para conexão do sistema eólico na rede elétrica. Contudo, no Brasil, há uma carência no desenvolvimento de inversores. Isso pode ser verificado pela ausência de produtos de empresa nacional (BORGES, 2018).

Os inversores de frequência são dispositivos de sistemas de energias renováveis mais suscetíveis a falhas, possuindo uma vida útil entre 3 e 7 anos (OZKAN; HAVA, 2014; ANAND; GUNDLAPALLI; FERNANDES, 2014). Estas falhas geralmente estão associadas principalmente a problemas com os capacitores eletrolíticos e com as chaves (ANAND; GUNDLAPALLI; FERNANDES, 2014; LAHYANI et al., 1998; HU et al., 2013; VITORINO et al., 2017; LI et al., 2011). A motivação desta monografia é implementar o inversor desdobrador de corrente em um sistema eólico completo, verificar se este sistema é viável e comparar sua eficiência com o inversor *push-pull*.

## 1.2 Problema

Os conversores de geração de energia renováveis condicionam a fonte de energia adequadamente para atender aos requisitos da rede. O GPC faz parte integrante de qualquer sistema geração distribuída, onde depende da magnitude e tensão das características das fontes. Dependendo do número de estágios, os GPCs podem oferecer maior grau de liberdade (mais variáveis de controle), permitindo fácil implementação de várias funções de controle (por exemplo, MPPT, compensação de potência reativa, filtragem ativa de potência, etc.) (TEODORESCU; LISERRE; RODRIGUEZ, 2011; SAEIDABADI et al., 2015).

Apesar das vantagens oferecidas pelos GPCs de vários estágios, a presença de grandes números de fases de potências (número de chaves), prejudica a eficiência geral, a confiabilidade do sistema, além de aumentar o custo. Embora um estágio único ofereça opções de controle reduzidas, essas configurações têm as vantagens de baixo custo, alta eficiência e confiabilidade. (TEODORESCU; LISERRE; RODRIGUEZ, 2011; SAEIDABADI et al., 2015; BORGES, 2018).

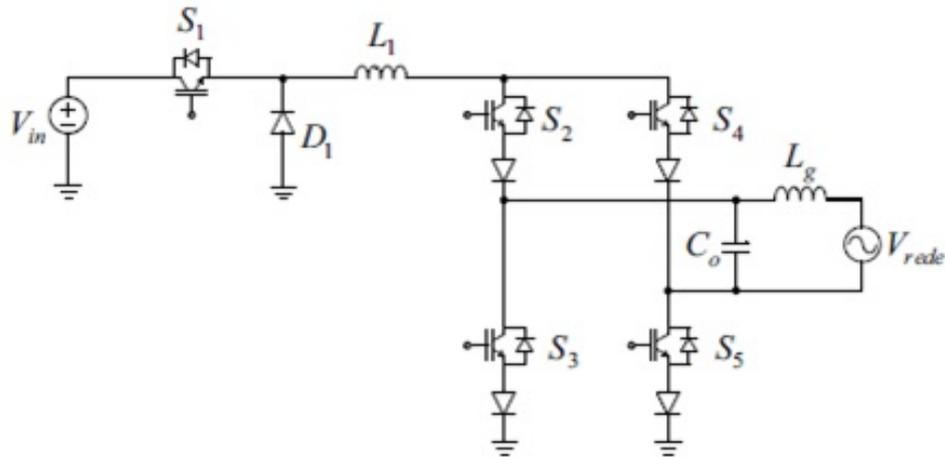
A topologia a ser implementada é apresentada em somente três trabalhos na bibliografia de acordo com (BORGES, 2018), no entanto não possui referencial teórico na bibliografia da implantação deste inversor em um sistemas eólico completo, voltado para aerogeradores de pequeno porte. Com isso, o problema a ser solucionado é testar se a topologia do inversor desdobrador de corrente, com comutação na frequência de rede (60Hz), funciona de uma forma eficiente num sistema completo de geração de energia eólica.

## 1.3 Objetivo

O objetivo principal é realizar a análise de uma topologia de inversor desdobrado de corrente apresentado na Figura 1.2, voltado para aerogeradores de pequeno porte conectado à rede elétrica. Este trabalho irá utilizar uma estratégia de modulação em que o interruptor S1 é comutado em alta frequência, enquanto os interruptores do CSI comutam em sincronia com

a rede elétrica. Essa modulação será semelhante a usada por Borges (2018). Ao fim da pesquisa, espera-se que topologia apresente melhor robustez, devido ao número de chaveamento reduzidos, também, ao menor número de chaves.

Figura 1.2 – Inversor conectado à rede elétrica.



Fonte: (BORGES, 2018).

## 1.4 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta monografia podem ser resumidos em:

1. Implementar a topologia do inversor desdobrador de corrente na simulação de um sistema eólico completo.
2. Realização de testes minuciosos, para análise do desempenho da turbina normalmente encontrado na área acadêmica como:
  - a) Teste em degrau;
  - b) Teste em rampa;
  - c) Teste em rajada senoidal.
3. Coletar a potência gerada e eficiência do inversor *push-pull* e o desdobrador de corrente, variando a velocidade de 1m/s a 12m/s em regime constante.
4. A partir dos resultados obtidos, realizar a análise de desempenho do sistema, verificando se a implementação do inversor é viável.

## 2 Referencial teórico

*“Um bom começo é a metade”.*  
*Aristóteles*

A física pode ser definida como o estudo da natureza, entendendo como tudo existe no universo, separado, da própria existência do ser humano. Neste conceito, existem situações que são suscetíveis de serem vistos ou sentidos, e que podem ser comparados com outros de uma forma em que se possa expressar numericamente essa relação, agrupando as em espécie ou classe, chegando ao conceito de grandeza (RODRIGUES, 2014).

De acordo com Rodrigues (2014), são exemplos de grandezas fundamentais o tempo, o espaço, a massa, a intensidade de corrente elétrica, a temperatura absoluta e a intensidade luminosa. Ao fazer a relação entre elas, surge a necessidade de definir um conceito geral que possa expressar essas relações de uma forma sistemática, para que seja possível estudá-las e explorá-las de acordo com as nossas necessidades. A esse conceito dá-se o nome de energia. Energia pode ser conceituada como a capacidade de produzir ou realizar um trabalho. A energia não se cria do nada, ela já existe no nosso universo e o que ocorre é a sua transformação de uma forma para outra ou outras (RODRIGUES, 2014).

### 2.1 Introdução a geração de energia eólica

Todas as fontes renováveis de energia possuem na sua origem uma das quatro fontes primárias de energia existentes na natureza, sendo elas segundo Boyle (1996), a energia cinética, associada aos corpos em movimento, a energia potencial, vinculada a gravidade, a energia eletromagnética, associada a união atômica das partículas, por fim, a energia nuclear, armazenada no núcleo atômico (CAMPOS, 2004).

O termo eólico tem origem do latim “aeolicus”, relativo à “Eólo”, o que significa “Deus dos ventos” na mitologia grega. A força dos ventos é uma fonte de energia já conhecida e utilizada há milhares de anos para obter energia (RODRIGUES, 2014). A energia do vento, assim como a da água, foi uma das fontes de energia mais utilizadas pelo homem para realizar trabalho desde os primórdios da civilização. A energia eólica é a energia que provém do vento, ou seja, é a energia obtida a partir do movimento de uma massa de ar, que nada mais é do que a mistura de diversos gases, principalmente nitrogênio e oxigênio (TIBOLA et al., 2009). O primeiro uso da energia eólica de que se tem conhecimento é a utilizada nos barcos a vela. Um dos primeiros índices da história da energia eólica foi restos de um barco a vela encontrado em um túmulo sumeriano, datado de 4000 a.C. (MARQUES et al., 2004), segundo Dunn (1986), há registros de moinhos de vento no Japão em 2000 a.C. e na Babilônia, 1700 a.C.

O equipamento destinado a realizar a conversão de energia eólica em elétrica e denominado aerogerador. O conjugado mecânico é produzido quando vento ao incidir sobre as pás da turbina, movimentando-as. Com isso a turbina captura parte da energia cinética contida

no vento, converte em energia mecânica rotacional e transmite a um gerador elétrico. O giro do rotor do gerador, associado a um fluxo magnético, induz tensão nos terminais do estator, permitindo o fornecimento de energia elétrica (ESPARTA; LUCON; UHLIG, 1972).

Os sistemas eólicos são divididos em dois tipos de sistemas: os isolados e os conectados à rede elétrica. O sistema isolado é composto por aerogerador, inversor, carregador e banco de baterias. Este é adequado para instalações em áreas rurais, em que a rede elétrica dificilmente chega até o consumidor. O sistema eólico conectado à rede elétrica é composto por aerogerador e um conversor. A pequena quantidade de equipamentos o torna simples e robusto. Porém, a ausência do banco de baterias resulta na falta de energia para o consumidor e desperdício de geração em casos de falha na rede elétrica (ESPARTA; LUCON; UHLIG, 1972).

## 2.2 Aerogeradores de pequeno porte

Um sistema destinado a converter energia cinética, contida no fluxo de ar, em energia elétrica é denominado aerogerador. De acordo com a posição do rotor, existem dois tipos de tecnologias fundamentais, para as turbinas eólicas (turbinas de eixo vertical e turbinas de eixo horizontal) (ACKERMANN et al., 2005). A turbina de eixo vertical tem a vantagem de poder interceptar o vento independente da direção e a desvantagem de que os ventos capturados, por estar perto do solo, tem pouca energia e alta turbulência. As turbinas de eixo horizontal tem a vantagem de que captura os ventos, com grande quantidade de energia e pouca turbulência, devido a mesma ser instalado no topo de uma torre, mas tem como desvantagem que devem ser constantemente orientadas para posicionar o eixo do rotor em sentido contrário ao fluxo de ar. Na prática, como o rendimento energético é mais importante, as turbinas de eixo horizontal são as mais empregadas (AGUILAR et al., 2016). O funcionamento básico de um aerogerador pode ser descrito como:

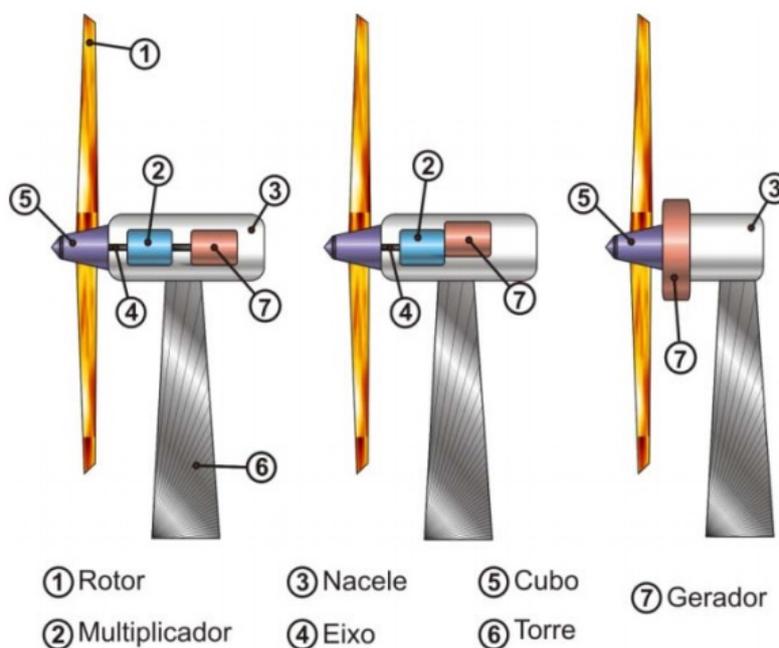
- O vento incide sobre as pás exercendo uma força de rotação, ou seja, um conjugado mecânico responsável por arrastá-las. Significa que, a turbina capta parte da energia cinética e a converte em energia mecânica rotacional (BAINY et al., 2015);
- A rotação faz com que um eixo da turbina ligado a uma caixa de engrenagens (a que constitui o acoplamento mecânico) gire à baixa velocidade. Essa última depende da área varrida pelas pás e do regime de vento (o que determina a capacidade de geração) (BAINY et al., 2015);
- A saída da caixa de engrenagens está conectada ao eixo do gerador e tem por objetivo elevar a velocidade de rotação, adequando-a à velocidade de rotação do gerador, a qual depende do número de polos do gerador, da frequência da rede e de aspectos técnicos (BAINY et al., 2015);
- Essa rotação juntamente com campos eletromagnéticos fazem com que o gerador produza energia elétrica (BAINY et al., 2015);

- Finalmente, a energia elétrica é entregue ao sistema elétrico via transformador e subestação (BAINY et al., 2015).

No início da utilização da energia eólica, surgiram turbinas de vários tipos com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de indução, gerador síncrono, e outras configurações. Com o passar do tempo foi consolidado o projeto de turbinas eólicas com as características de eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não flexível. A tendência atual é a combinação das duas técnicas de controle de potência (*stall* e *pitch*) em pás que podem variar o ângulo de passo para ajustar a potência gerada, sem, contudo, utilizar esse mecanismo continuamente (GISLASON, 2000). Ambas as turbinas são formadas, basicamente, por três componentes:

- Rotor: No rotor encontram-se as pás e o cubo. No caso dos aerogeradores de pequeno porte, as pás são fixas sem nenhum tipo de controle, diferentemente dos aerogeradores de grande porte, onde as pás possuem controle de passo;
- Nacele: É o local onde estão a maioria e os mais importantes componentes da turbina. No caso dos aerogeradores de pequeno porte, é o local onde se encontram o gerador elétrico, sistema de proteção e a cauda. Dependendo do tipo de gerador, é necessário o uso de caixa de transmissão (*gearbox*), a qual possui a função de amplificar a velocidade de rotação do eixo proveniente das pás, para melhor funcionamento do gerador;
- Torre: A torre é responsável por sustentar e proteger os cabos que transmitem a energia gerada pela turbina até os dispositivos de condicionamento de potência.

Figura 2.1 – Principais componentes de uma turbina eólica.



Fonte: (TIBOLA et al., 2009).

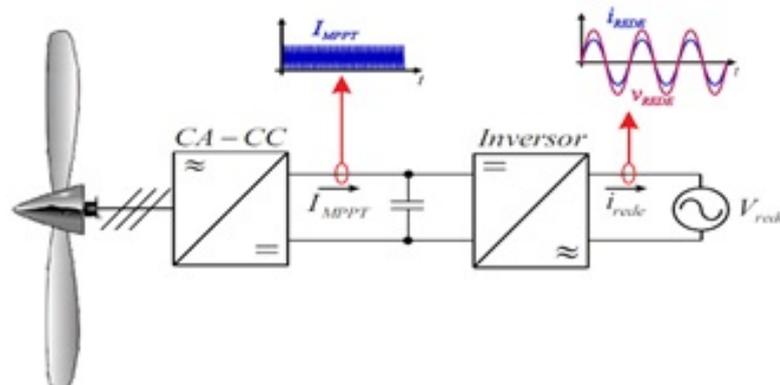
## 2.3 Inversores eólicos

O equipamento utilizado para condicionar a energia proveniente de geradores elétricos conectados a turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos ou até mesmo bancos de baterias, transferindo a energia desses elementos para a rede elétrica, é chamado de conversor. Estes aparelhos empregados em energias renováveis normalmente possuem um ou dois estágios de conversão de energia (BORGES, 2018).

O conversor é responsável por adequar a energia da fonte renovável para ser injetada na rede elétrica, ao mesmo tempo, extrair a maior potência disponível na mesma, realizando o chamado MPPT (BORGES, 2018).

O princípio de funcionamento do inversor é transformar corrente contínua (CC), em corrente alternada (CA), além de transformar a tensão gerada pelos geradores eólicos e baterias até os 110V, 220V, ou outra tensão utilizada por um aparelho elétrico. Os geradores eólicos, em princípio, fornecem energia em corrente alternada (CA), sendo necessário transformar essa energia em corrente contínua (CC), por intermédio de um retificador (PACHECO, 2006). Podemos observar na Figura 2.2, em que a corrente proveniente do primeiro estágio MPPT foi condicionada para ser introduzida na rede elétrica iREDE.

Figura 2.2 – Funcionamento básico do conversor CC-CA.



Fonte: (BORGES, 2018).

## 2.4 Mecanismo de controle

As turbinas eólicas são projetadas para fornecer potência nominal, de acordo com a velocidade do vento, prevalente, ou seja, a velocidade média nominal que ocorre com mais frequência durante um determinado período. De maneira que estão previstas variações na velocidade do vento, a turbina deve ser equipada com dispositivos que permitam limitar a potência e rotação, para evitar esforços excessivos aos componentes mecânicos e/ou elétricos, quando há ocorrência de ventos de elevadas intensidades e melhorar o rendimento em outras velocidades, aumentando o intervalo de funcionamento do sistema eólico (RAMOS; SEIDLER, 2011).

Velocidades muito alta podem provocar danos nas pás e nos outros componentes da turbina. O dispositivo de controle limita o funcionamento da turbina até uma velocidade de corte, conhecida como *cut-out*, que fica em torno de 20 a 25m/s. Nesse momento o mecanismo de proteção é ativado, com a finalidade de desligar a turbina para que não haja riscos ao rotor e à estrutura do sistema. Por outro lado, velocidades baixas fazem a turbina gerar potência muito baixas e são insuficientes para a partida do gerador. A velocidade inicial de funcionamento da turbina, conhecida como velocidade de acionamento ou *cut-in*, está em torno de 3 a 5m/s. Dessa forma, a operação da turbina fica limitada ao intervalo entre a velocidade, de acionamento e a velocidade de corte. Para valores fora desse intervalo, a potência gerada é nula. A medida que a velocidade do vento aumenta, gerando mais eletricidade, atingindo a potência nominal a mesma é mantida constante (LEITE; FALCÃO; BORGES, 2006).

## 2.5 Comportamento aleatório do vento

A variação anual de velocidade de vento é importante para estudos de viabilidade, de implantação de usinas eólicas e estudos de confiabilidade dos parques eólicos, porque fornece um conhecimento do regime local dos ventos, sendo a variação neste caso, bem menor do que a variação sazonal.

Para a análise do comportamento do vento num determinado local, é necessário o conhecimento de registros de velocidade de vento, durante longos períodos de tempo. Assim, é comum simular os distúrbios aos quais as turbinas eólicas podem estar sujeitas no período de operação. Suas contingências nas fontes primárias classificam como rampas ascendentes e descendentes de vento e rajadas senoidais (LEITE; FALCÃO; BORGES, 2006).

As variações que o vento pode apresentar são definidas como variações de curta duração, diárias, sazonais e anuais. As variações de curta duração são aquelas que ocorrem em intervalos de segundos, tais como as turbulências e as rajadas de vento. Elas não são utilizadas em estudos de viabilidade de implantação, nem em estudos de confiabilidade e estimativa de geração de um sítio. A sua relevância está associada aos estudos estruturais, bem como às variações de tensão e frequência em estudos de estabilidade (LEITE; FALCÃO; BORGES, 2006).

As variações diárias e sazonais são importantes para uma estimativa do suprimento da demanda de um sistema elétrico. Por exemplo, sabendo-se que na maioria das vezes a velocidade do vento é maior durante o dia, que durante a noite, se o pico de carga do sistema ocorrer durante o dia, ele pode ser suprido tanto pelas usinas convencionais, desempenhando o papel de geração de base, quanto pelas usinas eólicas existentes, desempenhando o papel de geração de ponta (LEITE; FALCÃO; BORGES, 2006).

## 3 Estado da arte

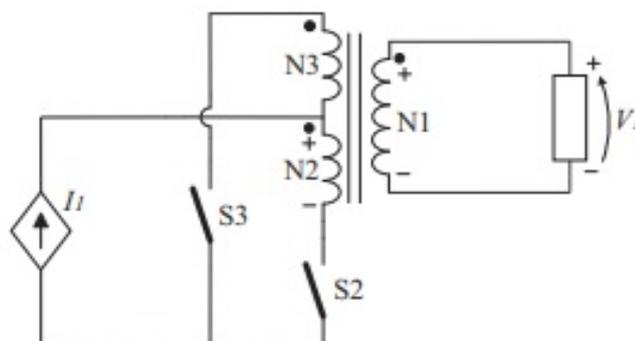
Um inversor é um conversor CC-CA, ou seja, é um dispositivo eletrônico capaz de converter corrente contínua em corrente alternada, com base em algoritmos de comutação dos interruptores totalmente controlados que o constitui. Os inversores podem ser do tipo fonte de tensão ou fonte de corrente, mas existem diversas topologias baseadas nos mesmos princípios, como inversores multinível. As principais topologias empregadas são o inversor ponte completa e *push-pull* (RODRIGUES, 2014).

O inversor ponte completa, conhecido em inglês por *full-bridge inverter*, é a topologia mais empregada atualmente no mercado para alta potência. O mesmo é um conversor com característica estática de um abaixador de tensão, por esse motivo, a tensão do barramento de entrada do inversor tem que ser superior à tensão de pico da rede elétrica. Apesar do mesmo ser consolidado na indústria, essa topologia apresenta algumas desvantagens, como um filtro de saída que é volumoso e pesado. A necessidade de circuito de pré-carga dos capacitores do barramento e o uso de tempo morto em alta frequência também são desvantagens desta topologia, por diminuírem a confiabilidade do inversor. Existem algumas variações dessa topologia, por exemplo, com o objetivo da redução da emissão de modo comum, porém essas variações aumentam a quantidade de interruptores e elevam a complexidade da sistema e os custos (RODRIGUES, 2014).

### 3.1 Inversor *push-pull*

De acordo com Silva et al. (1998), o inversor *push-pull* foi patenteado por Clarke em 1976, como uma estrutura inicialmente de um conversor CC-CC. As principais características deste conversor são a isolamento galvânica e a possibilidade de utilizar múltiplas saídas, devido a presença do transformador. Sua estrutura básica é apresentada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Estrutura básica de um conversor *push-pull* alimentado em corrente.



Fonte: Búrigo et al. (2016).

Este conversor é usualmente recomendado para potências entre 500W e 2000W, e baixas tensões na entrada. Para potências mais elevadas, o transformador torna-se caro e aumenta o custo total do conversor. Além disso, os interruptores são submetidos ao dobro da tensão de entrada (BÚRIGO et al., 2016).

Assim como em Búrigo et al. (2016), o inversor *push-pull*, usado como método de comparação neste trabalho, opera em baixa frequência (60Hz). Este inversor é responsável por transformar a corrente contínua em uma corrente alternada.

O conversor *push-pull* é empregado atualmente para baixas potências e baixas frequências, porque a tensão nas chaves é igual ao dobro da tensão de entrada e usa um transformador com ponto médio. Seu modelo mais empregado na indústria é o modulado por pulso único, com o objetivo de alimentar cargas críticas, onde a forma de onda não é muito importante. O conversor possui dois interruptores e seu comando é simples, mas não garante na saída tensão constante para variações de carga, além de não compensar variações da fonte de entrada.

## 3.2 Inversor desdobrador de corrente

O inversor desdobrador de corrente tem um grande diferencial, pois trabalha com um número reduzido de chaves e pode comutar tanto em baixa com em alta frequência. Na bibliografia não existe uma avaliação do funcionamento deste inversor em um sistema de aerogerador completo, analisando os resultados dos perfis de ventos e a eficiência do mesmo. Porém, alguns autores que utilizaram esse inversor em análise de comutação em sistemas eólicos (BORGES, 2018), condicionamento da energia fotovoltaica (SAEIDABADI et al., 2015), o denominam de inversor universal para conexão com a rede elétrica (PRASAD; JAIN; AGARWAL, 2008).

O registro da implementação do inversor em sistemas eólicos por Borges (2018) evidenciava a técnica utilizada para comutação de braço do inversor de corrente.

O uso do inversor proposto para energia fotovoltaica é apresentado em Saeidabadi et al. (2015). Nesta proposta, o inversor fotovoltaico possui um único estágio, onde o conversor é capaz de realizar o rastreamento de máxima potência, como também moldar a corrente para injetá-la na rede elétrica. Para tanto, o autor utiliza o conversor *Buck* para realizar o *MPPT* enquanto a modulação PWM senoidal é realizada no inversor para impor o comportamento da corrente.

Em Prasad, Jain e Agarwal (2008), o inversor desdobrador de corrente é denominado inversor universal para conexão com rede elétrica, pelo fato de trabalhar nos modos *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*, dependendo da modulação que é utilizada no conversor.

As três pesquisas mencionadas anteriormente não evidenciaram o funcionamento do inversor nos perfis de ventos encontrados na literatura e sua eficiência em relação a outro inversor empregado na bibliografia.

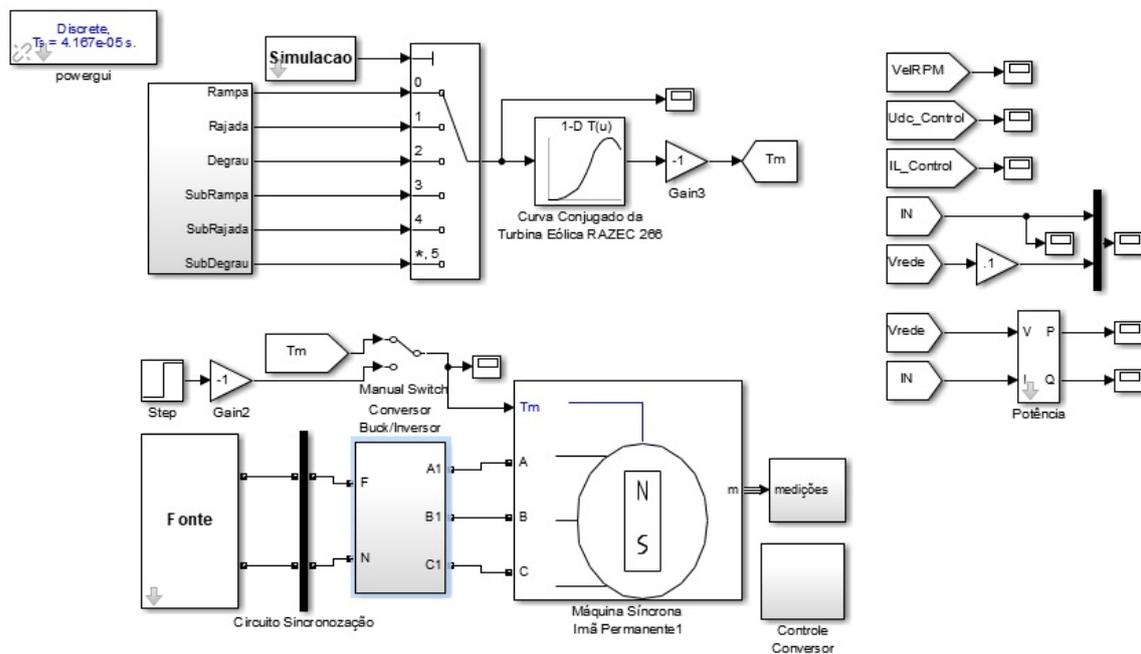
## 4 Desenvolvimento

Dentre os objetivos previstos neste trabalho, realizou-se inicialmente um estudo bibliográfico sobre a importância da utilização de fontes limpas de energia, inversores e aerogeradores de pequeno porte. Posteriormente, foi implementado o modelo de simulação computacional no ambiente MATLAB® / MathWorks®, onde serão destacadas as particularidades principais do sistema.

A plataforma do Simulink® utiliza uma interface gráfica simples, representando o sistema por diagramas de blocos, no qual cada bloco representa uma operação matemática de entrada e saída, que chama-se função de transferência do bloco, mais especificamente, os componentes de biblioteca Simscape™, Specialized Technology.

O sistema foi desenvolvido e testado com o objetivo de proporcionar um ambiente de simulação mais representativo de um cenário real. Ao longo dos testes, as condições podem ser variadas de acordo com os tipos de ventos. A topologia geral do sistema eólico simulado está detalhada na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Topologia do sistema eólico simulado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

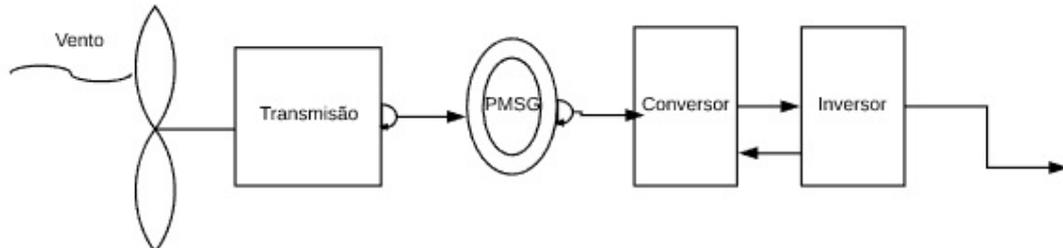
## 4.1 Modelagem do aerogerador

Em relação à geração de energias renováveis, observou-se um crescimento da utilização de máquinas de ímãs permanentes em diversos segmentos de atividades industriais (MANGA et al., 2017). Os principais aspectos que contribuem de forma significativa para evolução são os materiais magnéticos aplicáveis e as geometrias empregadas em projetos inovadores. Neste contexto, estudos, como Bianchi e Bolognani (2002), evidenciaram a prática de combinar diferentes técnicas construtivas, permitindo que esta modalidade de máquina elétrica venha apresentando evolução crescente quanto a seu desempenho. Isto inclui a redução de perdas e aumento da relação torque/peso, como de forma específica mostrada por Hanitsch (1989).

No campo da geração de energia eólica os PMSG são uma boa opção, isto é dado pela evolução significativa nos últimos anos, devido ao seu tamanho limitado e menor impacto ambiental (OLIVEIRA, 2016).

Neste trabalho, foi implementado um modelo de aerogerador conectado a rede do tipo PMSG, juntamente com um conversor que abaixa o nível de tensão de entrada (conversor *Buck*) e um inversor desdobrador de corrente, com estratégia de modulação simples. O modelo do sistema PMSG é apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Aerogerador PMSG



Fonte: Elaborado pelo autor.

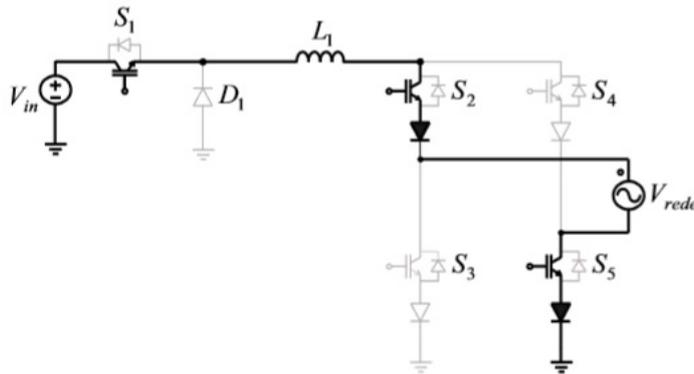
## 4.2 Modelagem do inversor

O conversor proposto é baseado em um inversor de fonte de corrente de estágio único. Uma das vantagens significativas do conversor proposto é a capacidade de conectar com nível de tensão mais baixo do que o valor da tensão de pico da rede, assim como não há necessidade de banda morta para comutação, aumentando a confiabilidade do mesmo. Em mau funcionamento das chaves, a fonte de tensão CC não entra curto-circuito e, como resultado, o conversor e a fonte não serão queimados. Este conversor possui quatro modos de operação: corrente positiva injeção, injeção de corrente negativa, magnetização do indutor e a desmagnetização da carga do indutor.

O inversor possui quatro etapas de operação que são duas para o semiciclo positivo e duas para o semiciclo negativo da rede elétrica. Os circuitos similares das duas primeiras

etapas são idênticos aos circuitos das duas últimas. A primeira etapa de operação podemos considerar que a tensão de rede está no semiciclo positivo com isso o interruptor  $S_1$  está em condução (magnetização do indutor), ou seja a fonte de entrada fornece energia tanto para a rede elétrica como para o indutor.

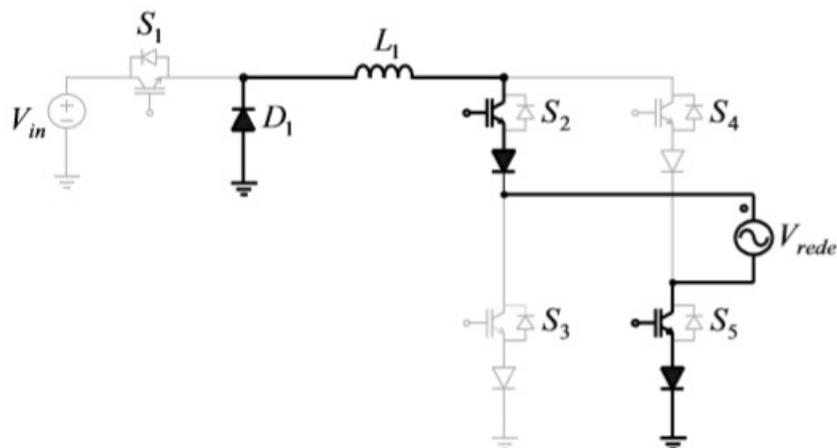
Figura 4.3 – Estado topológico para primeira etapa de operação.



Fonte: (BORGES, 2018).

A segunda etapa de operação, ocorre quando há o bloqueio do interruptor  $S_1$ . Consequentemente o bloqueio de corrente para o inversor, o qual para manter a continuidade do fluxo de corrente,  $D_1$  entra em condução, ou seja inverte a polaridade do indutor (desmagnetização).

Figura 4.4 – Estado topológico para segunda etapa de operação.



Fonte: (BORGES, 2018).

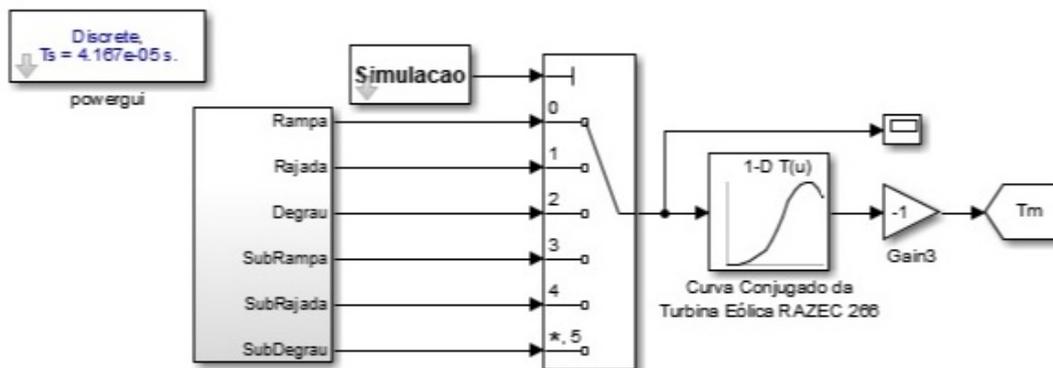
A terceira etapa de operação se inicia após o bloqueio de todos interruptores, onde ocorre a transição do semiciclo positivo para o semiciclo negativo. Comutação chamada de “tempo morto”, no entanto não será apresentada pois seu tempo de duração é muito curto em relação ao período da rede elétrica, não causando, portanto, efeitos na análise do circuito.

Após o tempo morto, durante o semiciclo negativo da rede, os interruptores S2 e S5 permanecem bloqueados, enquanto S3 e S4 são comandados a conduzir. No entanto não serão apresentados pois estas etapas são idênticas às duas primeiras, respectivamente.

### 4.3 Turbina eólica de pequeno porte

O equipamento utilizado para obtenção de energia contida nas massas de ar foi uma turbina eólica de eixo vertical de pequeno porte. O modelo utilizado como referencia foi a simulação da turbina eólica RAZEC-266, com potência nominal de 1kW, projetado para turbinas eólicas de pequeno porte. O bloco lógico usado na plataforma Matlab/Simulink é apresentado na Figura 4.5, onde se destaca a possibilidade de selecionar seis tipos diferentes de velocidade de vento incidente, para que o conjugado mecânico produzido pela turbina eólica possa ser testado em vários pontos de operação.

Figura 4.5 – Modelo da turbina eólica de eixo horizontal RAZEC-266



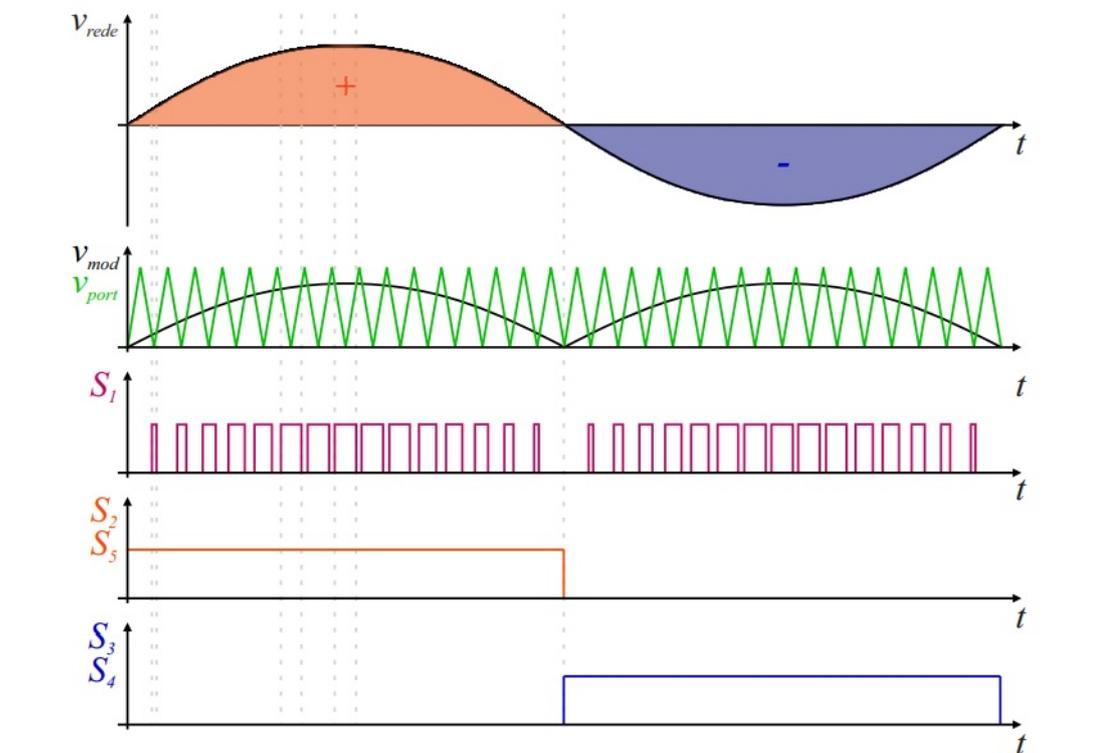
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.4 Estratégia de modulação

A implementação de uma estratégia de modulação é de extrema importância, devido há grande quantidade de semicondutores na topologia. Uma modulação inadequada geraria uma perda de eficiência e confiabilidade do inversor (BORGES, 2018).

A modulação usada foi a mesma implementada por Borges (2018), sendo a PWM senoidal para o interruptor S1, que opera em alta frequência. Nos demais interruptores o acionamento é realizado de forma sincronizada com a rede elétrica. No momento que ocorre a inversão da polaridade da mesma, S3 e S4 entram em condução, enquanto S2 e S5 são bloqueados, realizando o desdobramento da corrente do indutor. Em vista disso, o inversor pode ser chamado de desdoblador de corrente. O desdoblamento de corrente é mais evidente ao observar a Figura 4.6, onde se mostra a corrente durante sua passagem pelo indutor e, também, no instante em que é injetada na rede elétrica. Durante a passagem da corrente por zero, acontece a comutação de braço, na qual se utiliza a técnica de tempo morto, em que todos os interruptores do inversor são bloqueados.

Figura 4.6 – Estratégia de modulação utilizada no inversor proposto



Fonte: (BORGES, 2018).

## 5 Resultados

Os resultados deste trabalho estão separados em três seções, de acordo com os objetivos específicos apresentados anteriormente. Na primeira parte foram utilizados os perfis de referência de velocidades de vento, sendo quatro perfis considerados próximos da velocidade real dos ventos, que são rajada, rampa, sub-rajada e sub-rampa e, também, dois perfis irreais, constituídos dos degrau e sub-degrau, possibilitando uma análise da resposta da estratégia de controle e operação do sistema em condições extremas. A segunda seção apresenta o resultado do levantamento de eficiência do inversor desdobrador de corrente e do inversor *push-pull*, para todo o intervalo de operação. Posteriormente, a partir dos dados coletados das simulações, foi realizada uma estimativa de eficiência em relação aos inversores implementados no Simulink e, na última seção, são apresentadas as análises.

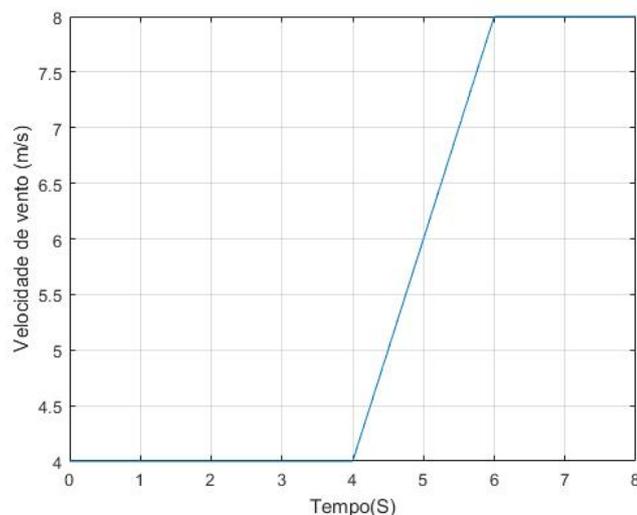
### 5.1 Resultado dos perfis de vento

Os perfis de velocidade do vento, necessários para a simulação computacional do sistema de geração, foram implementados no Simulink.

#### 5.1.1 Operação em rampa

Inicialmente, serão apresentados os resultados com a variação de vento em rampa, como mostra na Figura 5.1, onde nos primeiros instantes o vento inicia com velocidade de 4m/s e sofre uma variação até o valor final de 8m/s.

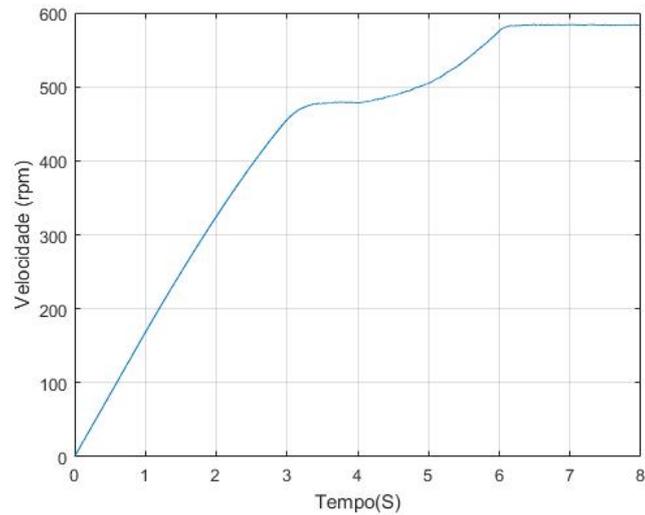
Figura 5.1 – Velocidade de vento incidente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva de velocidade mecânica da turbina eólica é mostrada na Figura 5.2, onde pode ser vista a rotação da turbina operando, inicialmente, na velocidade de 490rpm e, aproximadamente, após 2 segundos (duração da variação em rampa), se estabiliza em 590rpm, no mesmo instante em que o perfil em rampa se mantém com a velocidade constante.

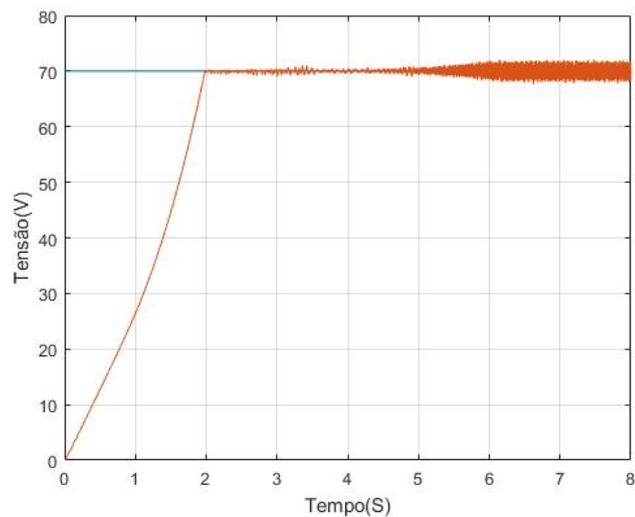
Figura 5.2 – Velocidade de rotação da turbina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.3 ilustra o comportamento da tensão do barramento CC, onde pode ser observado claramente que a tensão se mantém controlada, próxima do valor de referência, em todos os instantes da simulação.

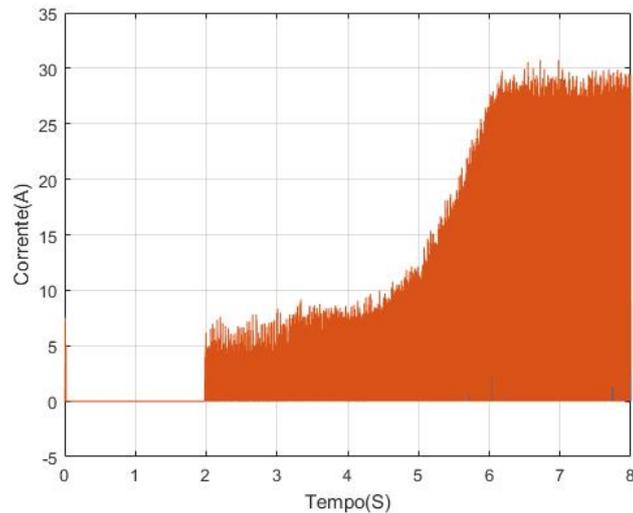
Figura 5.3 – Tensão do barramento CC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.4 apresenta o comportamento da corrente do indutor nos mesmos moldes da tensão do barramento CC, onde se observa um aumento significativo no valor da corrente do indutor, em função do transitório de rampa realizado, necessário para manter o sistema operando dentro dos limites especificados.

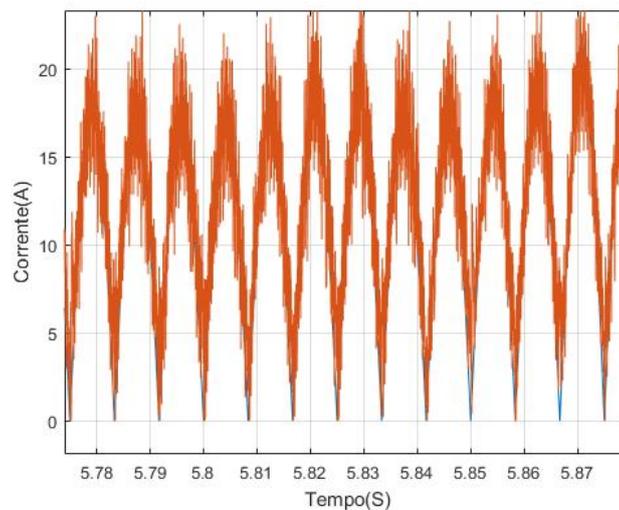
Figura 5.4 – Corrente do indutor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5.5, pode-se observar uma ampliação do comportamento da corrente do indutor, no instante em que se inicia a operação da rampa. Neste caso, pode-se observar também o correto seguimento dos respectivos valores de referência, evidenciando o adequado funcionamento das malhas de controle.

Figura 5.5 – Corrente do indutor ampliada.

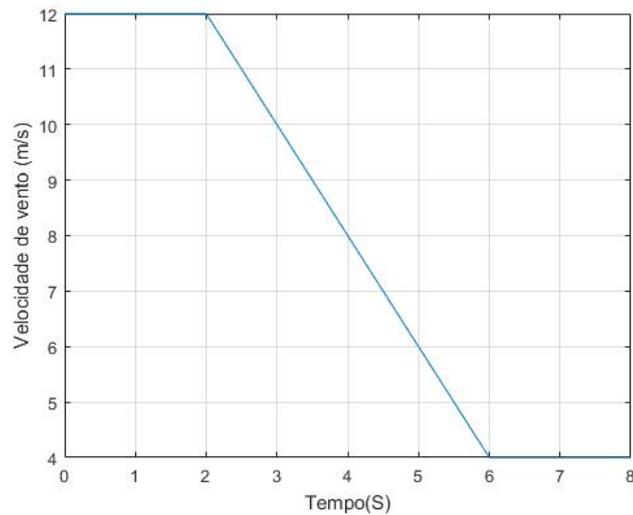


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.2 Operação em sub-rampa

A operação em sub-rampa pode ser definida simplesmente como uma desaceleração constante em rampa da velocidade de vento incidente. Na Figura 5.6 pode ser observado o comportamento do vento num perfil sub-rampa, onde a velocidade se inicia em 12m/s, com um declínio até se manter a 4m/s.

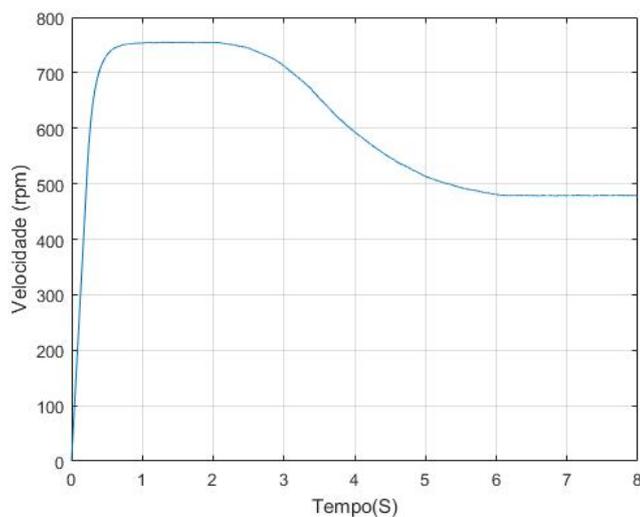
Figura 5.6 – Velocidade de vento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.7 apresenta a velocidade de rotação da turbina, com o comportamento de ventos de uma sub-rampa, onde pode-se analisar que inicialmente a velocidade está em aproximadamente 750rpm e, após o transitório, se estabiliza a 550rpm.

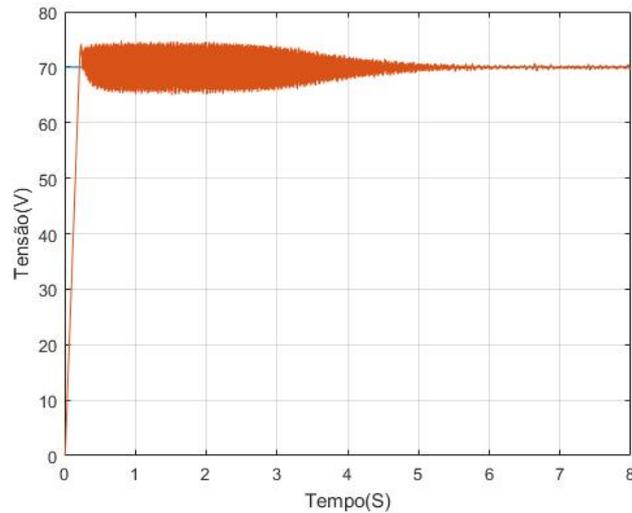
Figura 5.7 – Velocidade de rotação da turbina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos resultados permite observar na Figura 5.8 que a tensão do barramento CC está totalmente controlada em seu valor de referência. Com a finalidade do sistema operar de forma suave e segura, os controladores de corrente do indutor e tensão no barramento CC foram projetados para evitar transitórios indesejados, tanto no momento de conexão com a rede, quanto durante operação em regime permanente.

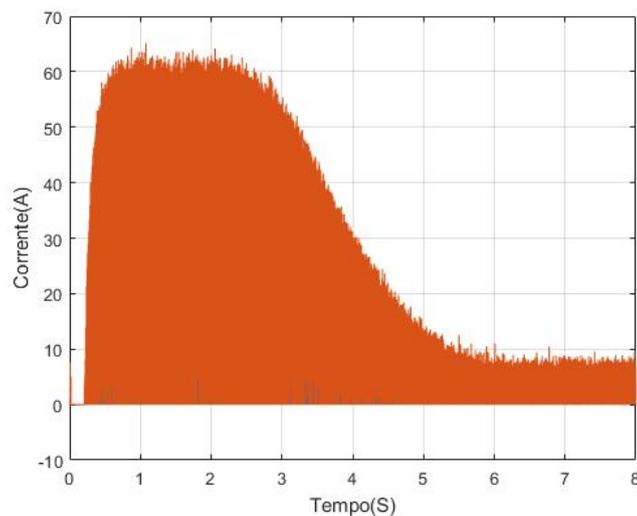
Figura 5.8 – Tensão do barramento CC.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na análise do cenário de uma variação de vento incidente em sub-rampa, observa-se uma velocidade inicial superior, com um declínio acentuado até se manter constante. Na Figura 5.9, pode ser observada que os valores iniciais de corrente no indutor são proporcionalmente superiores aos instantes finais, para manter o sistema controlado durante o transitório.

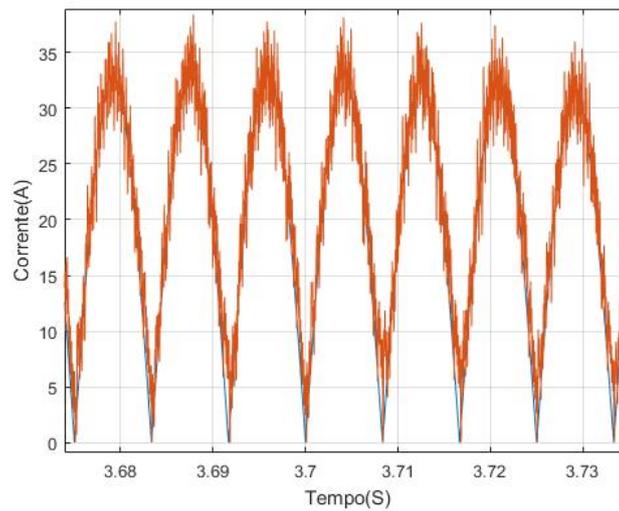
Figura 5.9 – Corrente do indutor.



Fonte: Elaborado pelo autor

O comportamento da corrente do indutor, no instante que o sistema está operando em uma velocidade de vento inicialmente de 10m/s, é apresentado na Figura 5.10. Neste caso, pode-se observar o correto seguimento dos respectivos valores de referência, evidenciando o adequado funcionamento das malhas de controle.

Figura 5.10 – Corrente do indutor ampliada.

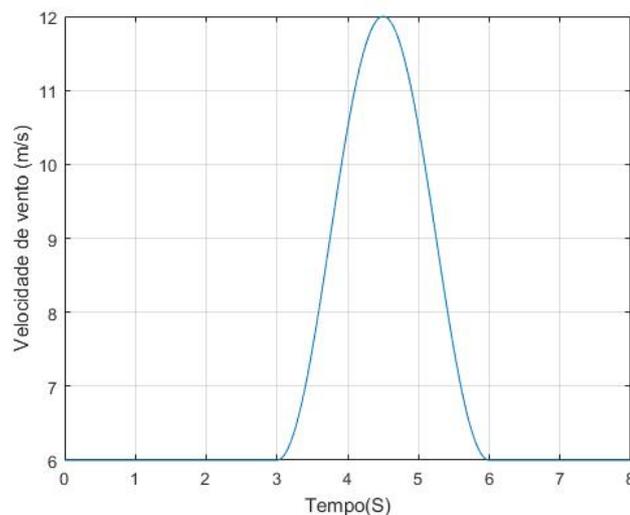


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.3 Operação em rajada

Para simulação de uma rajada, um valor constante em 6m/s é adicionado a uma variação senoidal, que possui um pico de 12m/s, como pode ser observado na Figura 5.11.

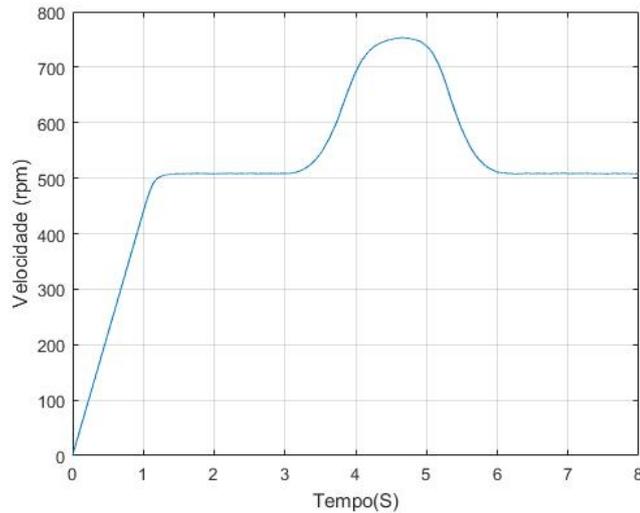
Figura 5.11 – Velocidade de vento incidente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entre os perfis de velocidade do vento incidente, a variação em rajada pode ser considerada a mais próxima da realidade, que uma turbina eólica pode ser submetida. A Figura 5.12 apresenta o transitório de velocidade rotacional da turbina, onde há uma rápida aceleração e a desaceleração da turbina nos instantes de tempo que ocorreu a variação senoidal, aproveitando toda energia disponível.

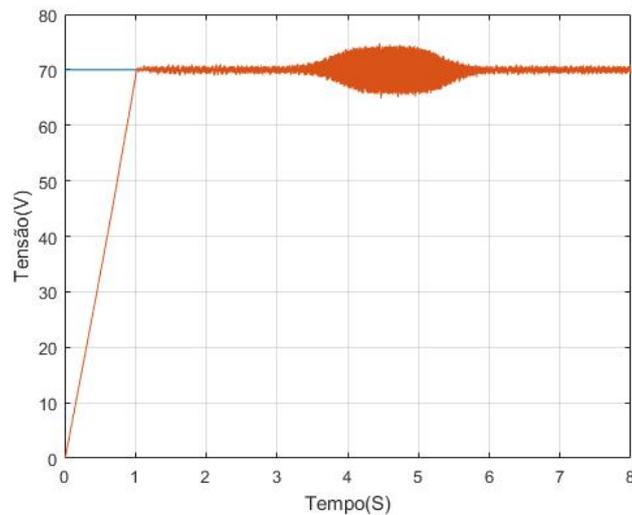
Figura 5.12 – Velocidade de rotação da turbina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

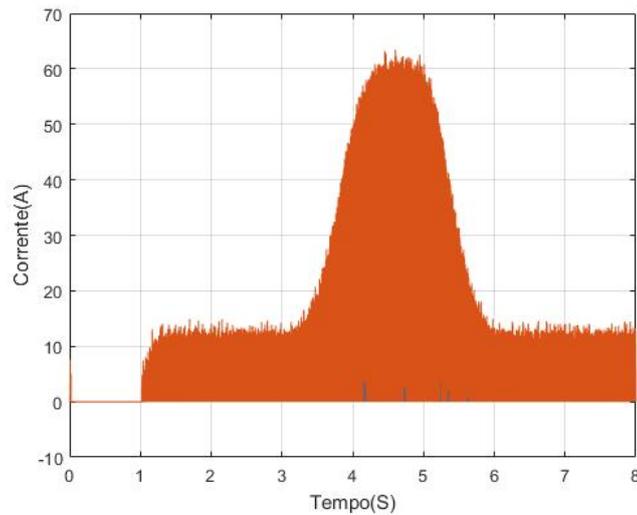
Os valores de tensão e corrente podem ser observados nas Figuras 5.13 e 5.14, respectivamente, onde ilustram o excelente comportamento das malhas de controle, onde pode-se analisar que ambos se mantiveram no referencial.

Figura 5.13 – Tensão do barramento CC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

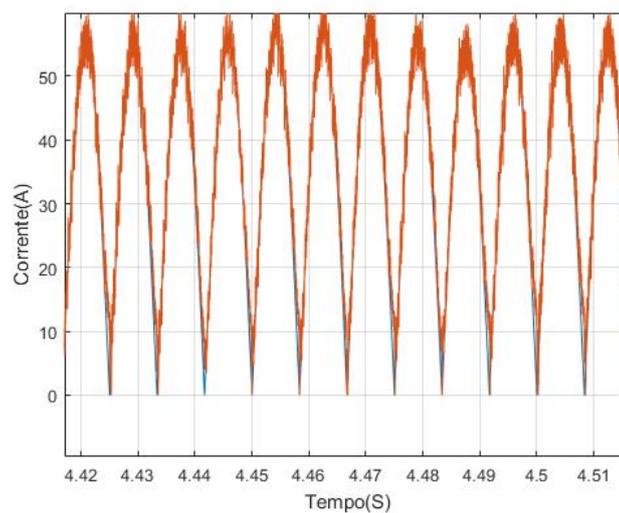
Figura 5.14 – Corrente do indutor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.15 ilustra o comportamento da corrente do indutor no instante máximo em que ocorre a rajada senoidal, ilustrando que o sistema de geração continua fornecendo potência ativa para a rede mesmo durante o rápido transitório. Pode-se observar o corrente seguindo a referência de corrente, evidenciando o adequado funcionamento do sistema.

Figura 5.15 – Corrente do indutor ampliada.



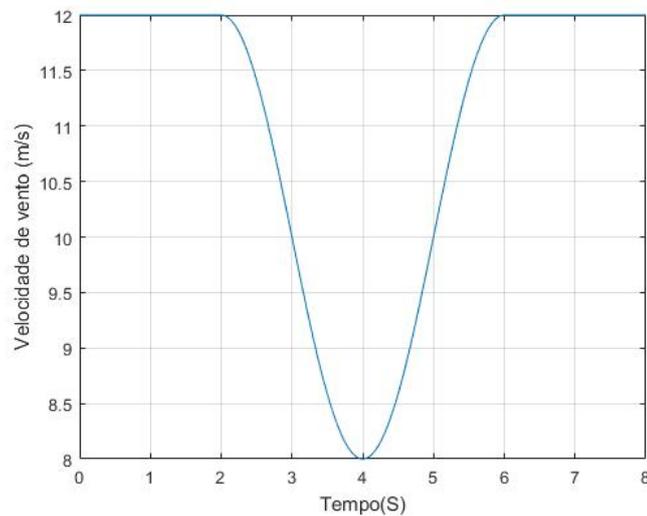
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.1.4 Resultado em sub-rajada

A operação em sub-rajada é caracterizada na Figura 5.16, onde mostra a velocidade do vento durante a ocorrência de uma sub-rajada, podendo observar que a velocidade se inicial

é de 12m/s e, após 2 segundos, ocorre uma súbita diminuição, em formato senoidal, atingindo o valor mínimo de 8m/s e, após o transitório, mantendo-se novamente constante em 12m/s.

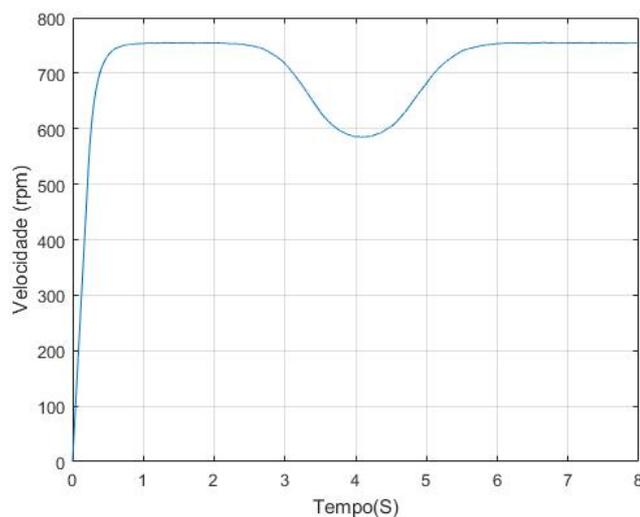
Figura 5.16 – Velocidade da turbina.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 5.17 é mostrado o resultado do comportamento da velocidade rotacional da turbina, onde se observa uma pequena diminuição na velocidade, durante o período da sub-rajada e a rápida recuperação após o encerramento do transitório.

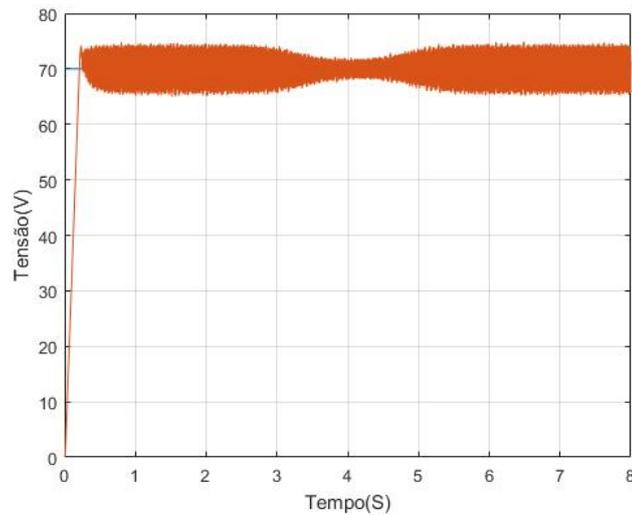
Figura 5.17 – Velocidade de rotação da turbina



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 5.18, a tensão se mantém totalmente controlado, de acordo com a sua referência, que é de 70V, mesmo no período da desaceleração ou no momento de recuperação, logo após a ocorrência da senoidal invertida.

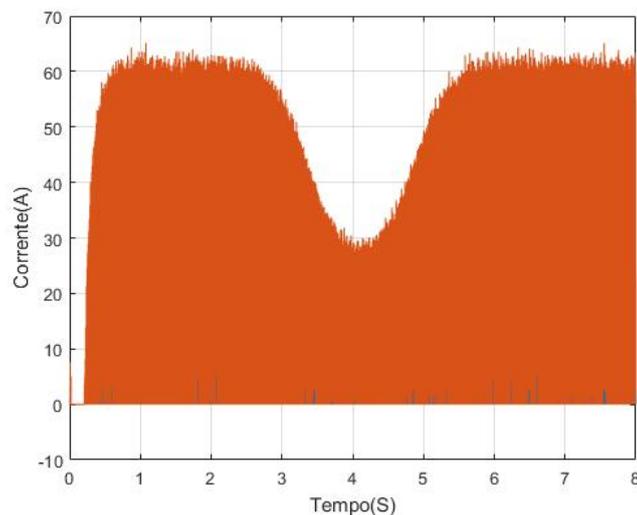
Figura 5.18 – Tensão do barramento CC.



Fonte: Elaborado pelo autor

A corrente do indutor, durante a ocorrência da sub-rajada, sofreu proporcionalmente um declínio e, posteriormente, é mantida controlada em, aproximadamente, 60A, como pode ser visto na Figura 5.19.

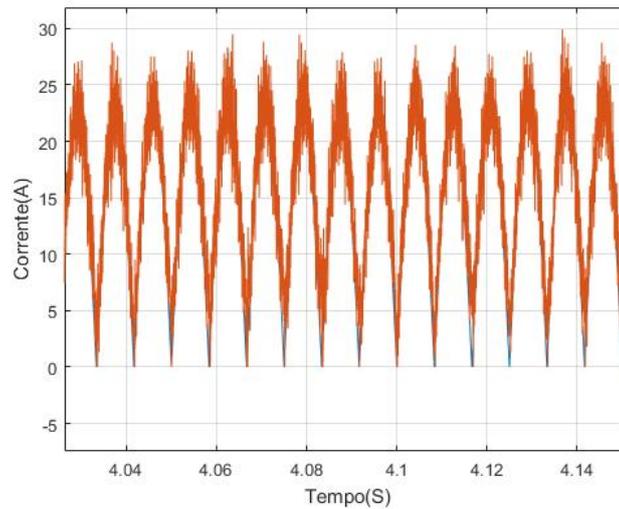
Figura 5.19 – Corrente do indutor.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 5.20 pode se analisar os valores da corrente do indutor nos instantes da sub-rajada, ou seja, nos instantes em que o sistema está operando em senoidal invertida. Neste caso, pode-se observar a forma de onda com um comportamento senoidal, evidenciando o adequado funcionamento das malhas de controle.

Figura 5.20 – Corrente do indutor ampliada.

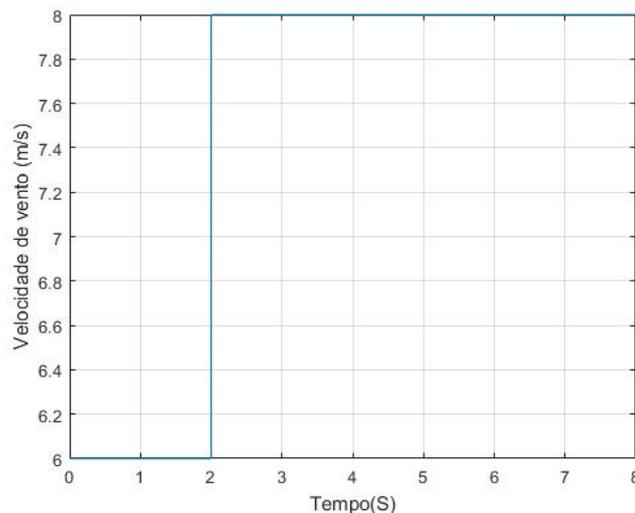


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.5 Operação em degrau

O perfil em degrau tem como finalidade avaliar os resultados em situações irreais de vento, ou seja, casos totalmente extremos. Na Figura 5.21, pode-se observar o comportamento do vento neste cenário, onde inicialmente possui uma velocidade constante de 6m/s e recebe uma abrupta aceleração, chegando a uma velocidade de 12m/s.

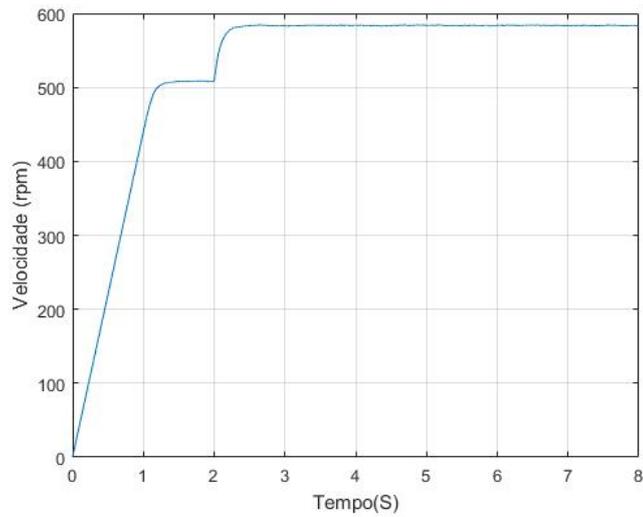
Figura 5.21 – Velocidade de vento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5.22 é apresentado o transitório provocado na velocidade rotacional da turbina eólica, onde pode ser visto o período da rápida aceleração no primeiro momento e, após, a velocidade é mantida controlada e constante novamente.

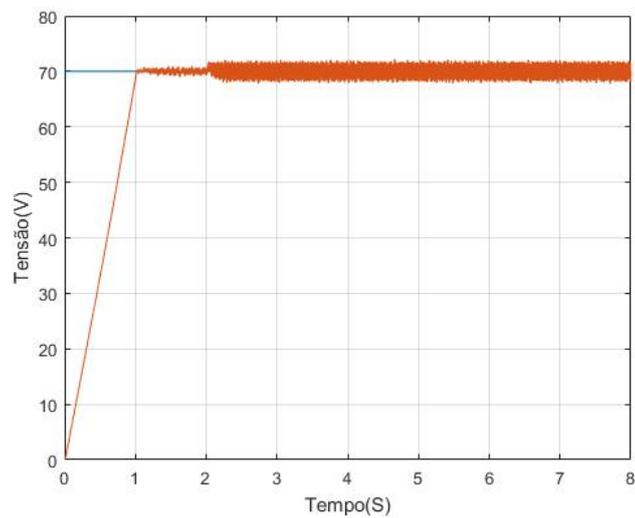
Figura 5.22 – Velocidade de rotação da turbina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

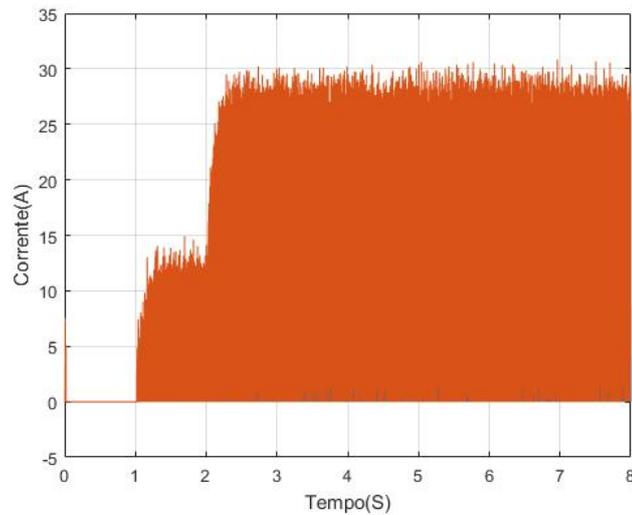
Como nas seções anteriores, os valores de tensão do barramento CC e corrente no indutor podem ser observados nas Figuras 5.23 e 5.24, respectivamente, onde ilustram o adequado comportamento das malhas de controle. As grandezas se mantiveram controladas durante todo o transitório.

Figura 5.23 – Tensão do barramento CC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

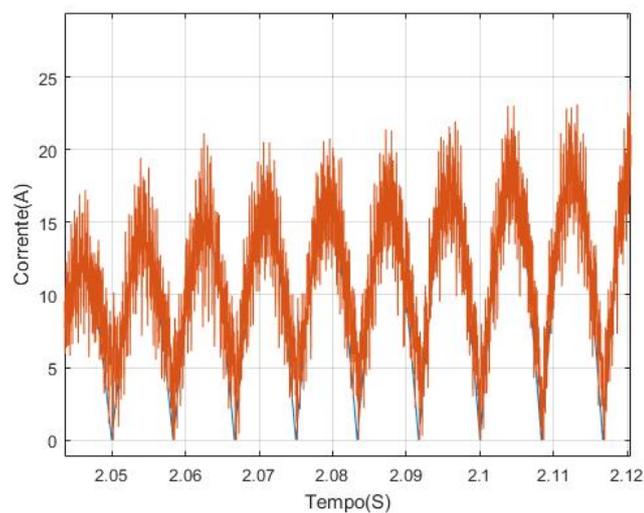
Figura 5.24 – Corrente do indutor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5.25 pode-se analisar os valores da corrente no indutor, no instante em que o sistema está operando em degrau e fornecendo potência para a rede. Neste caso, pode-se observar o correto seguimento dos respectivos valores de referência, evidenciando o adequado funcionamento das malhas de controle.

Figura 5.25 – Corrente do indutor ampliada.

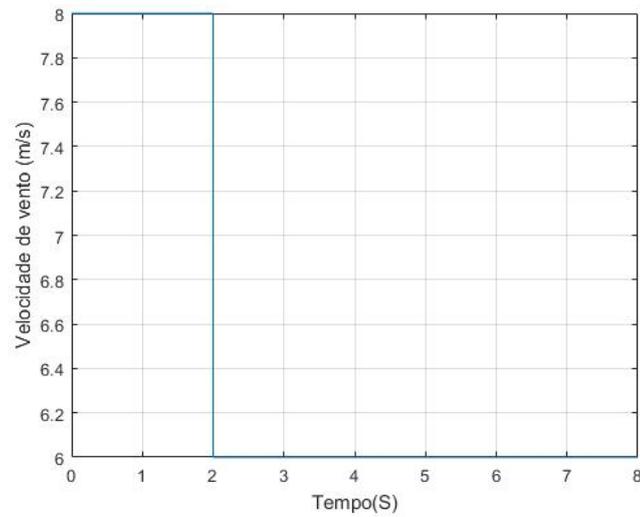


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.1.6 Resultado em sub-degrau

A Figura 5.26 mostra a variação da velocidade de vento em sub-degrau, onde o valor inicial de 8m/s e reduzido instantaneamente para 6m/s.

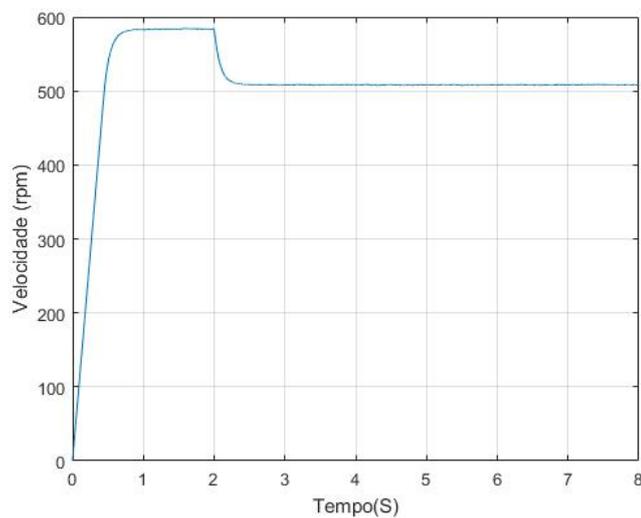
Figura 5.26 – Velocidade de vento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O impacto causado na velocidade rotacional da turbina é apresentado na Figura 5.27, onde pode ser visto que o sistema de geração tenta se adequar rapidamente aos novos valores de referência.

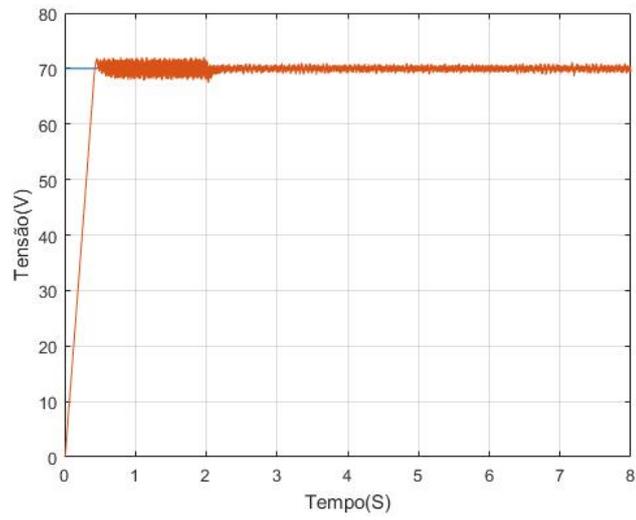
Figura 5.27 – Velocidade de rotação da turbina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

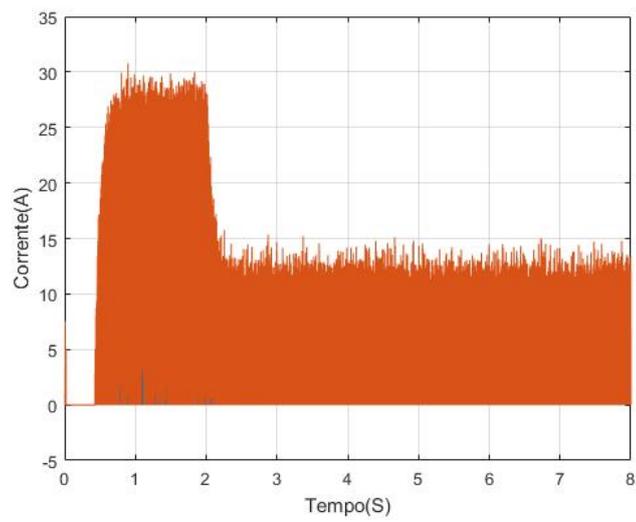
Na Figura 5.28 pode-se observar que a tensão do barramento CC se mantém entre controlada no referencial, que é de 70V com pouca oscilação em torno da referência e na Figura 5.29 é apresentada a corrente do indutor, que também é mantida controlada durante todo o transitório.

Figura 5.28 – Tensão do barramento CC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

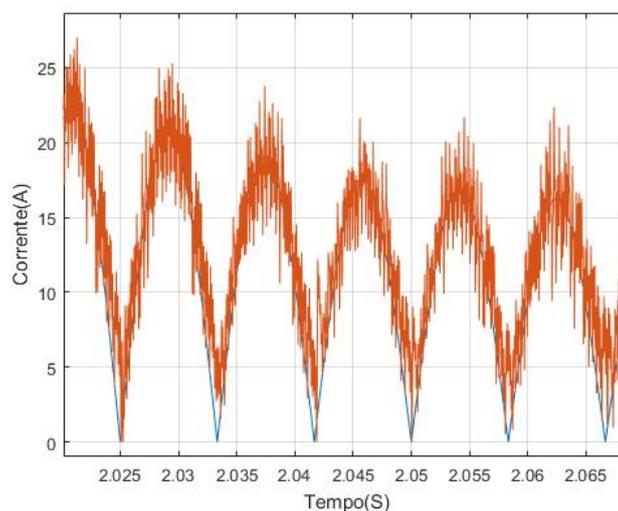
Figura 5.29 – Corrente do indutor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5.30, pode-se analisar os valores da corrente do indutor no instante em que o sistema está operando após uma transição em sub-degrau e fornecendo potência para a rede. Neste cenário crítico, observa-se o correto seguimento dos respectivos valores de referência, evidenciando o adequado funcionamento das malhas de controle.

Figura 5.30 – Corrente do indutor ampliada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.2 Resultado em relação a eficiência

O rotor é responsável por transformar energia cinética, presente nos ventos, em energia mecânica, sendo este o primeiro estágio de conversão de energia do vento em eletricidade. Os outros dois são a transmissão, que adequa as velocidades de rotação da turbina à velocidade do próprio gerador, responsável por converter a energia mecânica em energia elétrica.

O atrito entre as engrenagens geram perdas na transmissão, assim como a transmissão consome uma certa quantidade de energia. Diante disto, as perdas podem ser consideráveis em baixas potências, já que o rendimento nestes casos é menor (BORGES, 2018). Isso justifica o porquê da grande necessidade de se implementar um conversor com alta eficiência.

Para análise de eficiência dos conversores, foram coletados os valores de potência de entrada e de saída do sistema de geração, ou seja, foi retirado os valores de corrente de entrada e a corrente produzida no final (injetada diretamente na rede). Foi implementado um perfil de vento de velocidade constante com uma variação de 1m/s a 12m/s.

Os resultados das simulações foram realizados para um mesmo aerogerador, ou seja, a diferença foi a modificação apenas do inversor. A única mudança em ambos sistemas, foi que no primeiro cenário consiste o inversor desdobrador de corrente com um transformado é o segundo cenário com o inversor *push-pull*.

A Tabela 5.1 mostra a potência medida através das simulações com os ventos em velocidades constante, variada de 1m/s a 12m/s, na implementação do inversor desdobrador de corrente. Com a análise da Tabela 5.1, conseguimos extrair a média da eficiência do inversor desdobrador de corrente, que está em torno de 83,08%. O cálculo realizado foi a razão da soma total do resultado de potência obtida sobre a quantidade de variações, que no presente trabalho, foi realizado 12 diferentes pontos, como já descrito anteriormente.

Tabela 5.1 – Variação de energia no inversor desdobrador de corrente.

Velocidade (m/s)	Entrada(W)	Saída(W)	Perda(W)	Eficiência(%)
1	21	15	6	71,43
2	21	17,5	3,5	83,33
3	21	18	3	85,71
4	70	48	22	68,57
5	84	75	9	89,28
6	168	125	43	74,40
7	266	230	36	86,46
8	434	375	59	86,40
9	630	555	75	88,09
10	875	740	135	84,57
11	945	850	95	89,94
12	1015	900	115	88,66

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5.2 mostra as medições de potência obtidas de entrada e saída no aerogerador com a implementação do inversor *push-pull*, durante a variação de velocidade de 1m/s a 12m/s. Com a análise da Tabela 5.2, podemos constatar a média da eficiência do *push-pull*, que está em torno de 89,67%. Esse resultado foi obtido através da mesma fórmula do inversor desdobrador de corrente.

Tabela 5.2 – Variação de energia no inversor *push-pull*.

Velocidade (m/s)	Entrada(W)	Saída(W)	Perda(W)	Eficiência(%)
1	21	16	5	76,19
2	28	18	10	64,28
3	28	18	10	64,28
4	63	60	3	95,23
5	105	100	5	95,23
6	168	160	8	95,23
7	280	275	5	98,21
8	441	425	16	96,37
9	630	627	3	99,52
10	845	830	10	98,80
11	980	955	25	97,44
12	1050	1000	50	95,23

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3 Análise dos resultados

Este capítulo apresentou os resultados das simulações do sistema de geração eólico de pequeno porte, implementada na plataforma Matlab/Simulink. Foram detalhados dois principais testes e apresentados os resultados das simulações em perfis de vento encontrados na literatura, possibilitando uma análise da viabilidade do inversor desdobrador de corrente.

O primeiro cenário mostrou a implementação dos perfis de vento, onde todos estavam de acordo com o limite permitido, a tensão de barramento se manteve superior na referência de 70V durante a operação e a corrente do indutor se manteve a baixo de 70A, com uma onda de senoidal, ou seja, os dados de tensão de barramento CC e corrente, apresentaram conformidade em relação ao referencial.

Posteriormente foi avaliado a eficiência do inversor desdobrador de corrente em relação ao inversor *push-pull*, onde se constatou uma média de 83,08% para o inversor desdobrador de corrente e 89,67% para o inversor *push-pull*, a diferença desse resultado é justificada pois os número de dispositivos condutores do inversor desdobrador de corrente são oito, comparado ao *push-pull* que apresenta apenas dois, destes dispositivos.

O inverso desdobrador de corrente apresentou uma eficiência menor do que o *push-pull*, em relação a conservação de energia, no entanto, comparando em relação ao volume o inversor proposto é relativamente menor, por causa do número de enrolamentos empregados no sistema.

## 6 Conclusão

*“As palavras fogem quando precisamos delas e sobram quando não pretendemos usá-las.”*  
Carlos Drummond de Andrade

Nesta monografia, foi feito o estudo e a implementação no Simulink® de um inversor para realizar a conexão de um sistema eólico de pequeno porte à rede elétrica. Aspectos básicos do sistema eólico foram abordados no início do documento, para demonstrar a importância do estudo e familiarizar o leitor com a pesquisa.

O objetivo principal era implementar um inversor com elevada robustez e simplicidade, o que adequou-se ao estudo da topologia utilizada na pesquisa.

Os resultados de simulação obtidos neste trabalho comprovaram a viabilidade de utilização do inversor desdobrador de corrente implementado, em sistemas eólicos de pequena porte. Observou-se que o projeto apresentou simplicidade de construção na simulação, por ser constituído de poucos componentes, baixo custo e robustez em relação aos demais inversores do mercado.

Os resultados apresentados no Capítulo 5 ilustraram o correto funcionamento do sistema de geração. Inicialmente, foram mostrados os resultados da simulação onde através dos gráficos de tensão e corrente podemos deduzir a viabilidade do inversor em um sistema completo de aerogerador eólico de pequeno porte. A diferença dos resultados de eficiência em relação ao inversor desdobrador de corrente com o *push-pull* é justificada, pois o número de dispositivos semicondutores do inversor desdobrador de corrente apresenta oito, enquanto o *push-pull* apresenta apenas dois.

Mesmo o inverso desdobrador de corrente ter apresentado uma eficiência menor do que o *push-pull*, em relação a conservação de energia, o mesmo continua viável, pois comparando em relação ao volume o inversor proposto é relativamente menor, sendo melhor empregado em sistemas eólicos de pequeno porte.

### 6.1 Trabalhos futuros

Como sugestão de continuidade deste trabalho, alguns itens podem ser indicados, com objetivo de tornar mais perspectiveis a necessidade de investimento em inversores de baixo custo e com tecnologias nacionais. Que possam ser utilizados para suprir a atual crescente demanda de energia como foi falado no decorrer do trabalho. Sendo:

1. Implementar o inversor em um sistema de aerogerador real;
2. Implementar o inversor em um sistema de energia híbrido;

3. Realizar um estudo de custo e otimização do inversor, para viabilizar sua aplicação.
4. Realizar testes sistemáticos em relação ao inversor desdobrador de corrente a outros modelos de inversores.

# Referências

- ACKERMANN, T. et al. *Wind power in power systems*. [S.l.]: Wiley Online Library, 2005. v. 140. Citado na página 16.
- AGUILAR, M. E. B. et al. Sintonia dos controladores para aerogeradores de velocidade variável com geradores de indução de dupla alimentação utilizando um algoritmo meta-heurístico de inteligência coletiva. Universidade Estadual do Oeste do Parana, 2016. Citado na página 16.
- ANAND, S.; GUNDLAPALLI, S. K.; FERNANDES, B. Transformer-less grid feeding current source inverter for solar photovoltaic system. *IEEE Transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 61, n. 10, p. 5334–5344, 2014. Citado na página 13.
- BAINY, R. G. et al. Análise do comportamento transitório de geradores distribuídos eólicos e fotovoltaicos conectados num mesmo alimentador. Universidade Estadual do Oeste do Parana, 2015. Citado nas páginas 16 e 17.
- BERMANN, C. Crise ambiental e as energias renováveis. *Ciência e Cultura*, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, v. 60, n. 3, p. 20–29, 2008. Citado na página 11.
- BIANCHI, N.; BOLOGNANI, S. Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted pm motors. *IEEE Transactions on industry applications*, IEEE, v. 38, n. 5, p. 1259–1265, 2002. Citado na página 23.
- BORGES, L. V. *Inversor para conexão com rede elétrica de aerogeradores de pequeno porte*. 2018. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2018. Citado nas páginas 11, 13, 14, 18, 21, 24, 25, 26 e 42.
- BOYLE, G. *Renewable energy: power for a sustainable future*. [S.l.]: Oxford University Press, 1996. v. 2. Citado na página 15.
- BRITO, M. A. G. d. Inversores integrados monofásicos e trifásicos para aplicações fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de mppt, detecção e proteção de ilha, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2013. Citado na página 13.
- BÚRIGO, L. R. et al. Estudo de um sistema para conexão de aerogeradores de pequeno porte com a rede elétrica. 2016. Citado nas páginas 20 e 21.
- CAMPOS, F. G. R. d. *Geração de energia a partir de fonte eólica com gerador assíncrono conectado a conversor estático duplo*. 2004. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2004. Citado na página 15.
- DUNN, P. *Renewable energies*. London: Peter Peregrinus Ltd, 1986. Citado na página 15.
- EPE, E. d. P. E. Balanço energético nacional 2019—relatório final. *Ministério de Minas e Energia—MME. Brasília—DF*, 2019. Citado na página 12.
- ESPARTA, A. R. J.; LUCON, O. S.; UHLIG, A. Energia renovável no Brasil. In: *X Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro*. [S.l.: s.n.], 1972. v. 26. Citado na página 16.
- GISLASON, N. E. *Horizontal axis wind turbine*. [S.l.]: Google Patents, 2000. US Patent 6,064,123. Citado na página 17.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no brasil. *Estudos avançados*, SciELO Brasil, v. 21, n. 59, p. 7–20, 2007. Citado na página 11.

HANITSCH, R. Electromagnetic machines with nd-fe-b magnets. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Elsevier, v. 80, n. 1, p. 119–130, 1989. Citado na página 23.

HU, H. et al. A review of power decoupling techniques for microinverters with three different decoupling capacitor locations in pv systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 28, n. 6, p. 2711–2726, 2013. Citado na página 13.

LAHYANI, A. et al. Failure prediction of electrolytic capacitors during operation of a switchmode power supply. *IEEE Transactions on power electronics*, IEEE, v. 13, n. 6, p. 1199–1207, 1998. Citado na página 13.

LEITE, A. P.; FALCÃO, D. M.; BORGES, C. L. Modelagem de usinas eólicas para estudos de confiabilidade. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 17, n. 2, p. 177–188, 2006. Citado na página 19.

LI, D. et al. A method of power decoupling for long life micro-inverter. In: IEEE. *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.], 2011. p. 802–807. Citado na página 13.

MANGA, L. E. O. et al. Geração eólica e aplicação de pmsg. *REVISTA INTERDISCIPLINAR DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO*, v. 4, n. 1, 2017. Citado na página 23.

MARQUES, J. et al. Turbinas eólicas: Modelo, análise, e controle do gerador de indução com dupla alimentação. Universidade Federal de Santa Maria, 2004. Citado na página 15.

OLIVEIRA, R. G. d. Desenvolvimento de tecnologia para conexão com a rede elétrica de aerogeradores de pequeno porte. 2016. Citado na página 23.

OZKAN, Z.; HAVA, A. M. Three-phase inverter topologies for grid-connected photovoltaic systems. In: IEEE. *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE-ASIA), 2014 International*. [S.l.], 2014. p. 498–505. Citado nas páginas 11 e 13.

PACHECO, F. Energias renováveis: breves conceitos. *Conjuntura e Planejamento*, v. 149, p. 4–11, 2006. Citado na página 18.

PRASAD, B. S.; JAIN, S.; AGARWAL, V. Universal single-stage grid-connected inverter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 23, n. 1, p. 128–137, 2008. Citado nas páginas 11, 12 e 21.

RAMOS, F. G.; SEIDLER, N. Estudo da energia eólica para aproveitamento em pequenos empreendimentos. *Revista Vivências*, v. 7, n. 13, p. 108–127, 2011. Citado na página 18.

RODRIGUES, R. T. G. *Inversor fonte de corrente para sistemas fotovoltaicos*. 2014. Tese (Doutorado), 2014. Citado nas páginas 15 e 20.

SAEIDABADI, S. et al. A modified grid-connected current source inverter for photovoltaic application. In: IEEE. *Power Electronics, Drives Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2015 6th*. [S.l.], 2015. p. 218–223. Citado nas páginas 13 e 21.

SILVA, F. J. N. et al. Estudo de um conversor push-pull alimentado em corrente com grameamento ativo. Florianópolis, SC, 1998. Citado na página 20.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 29. Citado nas páginas 11 e 13.

TIBOLA, G. et al. Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência. Florianópolis, SC, 2009. Citado nas páginas 15 e 17.

VITORINO, M. A. et al. Low-frequency power decoupling in single-phase applications: a comprehensive overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 32, n. 4, p. 2892–2912, 2017. Citado na página 13.

# APÊNDICE A – Inicializa

```
clear
clc
Vrede=220;
frede=60;
Afundamento de tensão
afundamento = 0.01;
t_inicial = 3;
duracao = 3;
t_final = t_inicial +duracao;

Parâmetros de simulação
T_ini=-2;
T_fin=10
T_tog=T_ini+0.005;
f_chaves=24e3
Ts=1/f_chaves;
Atraso=(f_chaves/frede)/4;

Max_vel=850;
Min_vel=800;
On_vel=400;
Off_vel=300;

R_chopper=30;
R_sync=2000;
C_sync= 1e-09;

R_rede=0.0004839;
L_rede=0.002e-3;

Z=sqrt(R_rede2 + L_rede2);
Irms=Vrede/Z;

PCC=Vrede*Irms;

Corrente de saída do conversor
```

$L = 0.48e-3;$   
 $Up\_IL = 100;$

$w1=2400;$   
 $w2=240;$

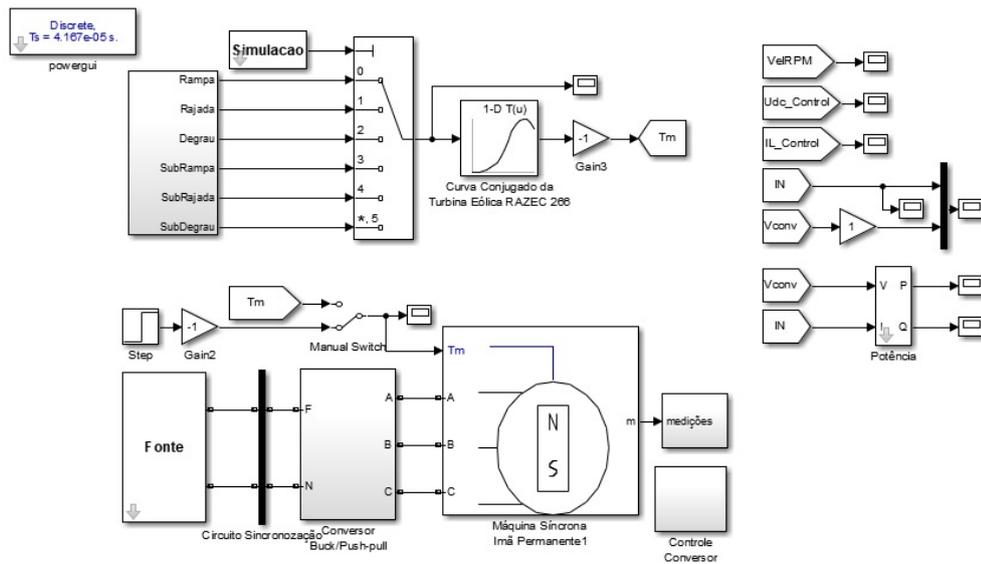
$KP\_IL = 10$   
 $KI\_IL = 20$

Tensao do barramento CC  
 $C\_Udc = 5e-3;$

$KP\_Vc = 0.01$   
 $KI\_Vc = 200$

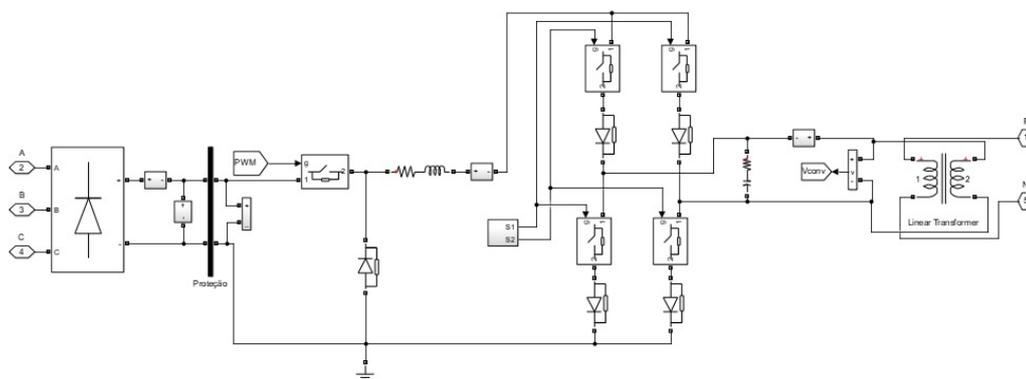
# APÊNDICE B – Simulação matlab

## B.1 Simulação do aerogerador



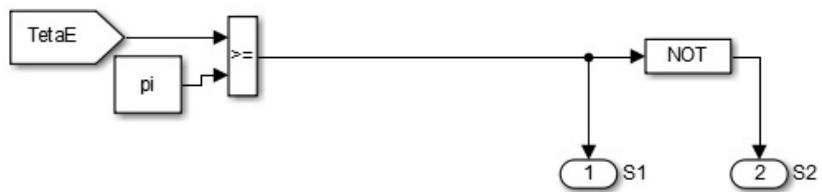
Fonte: Elaborado pelo autor

## B.2 Simulação do inversor com o conversor



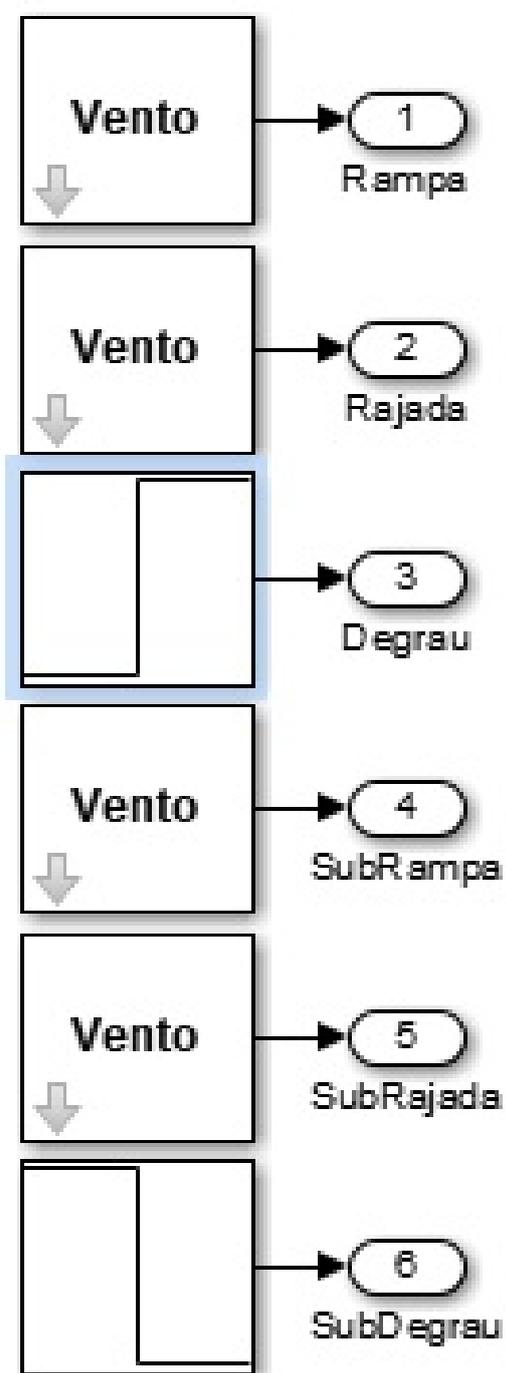
Fonte: Elaborado pelo autor

### B.3 Simulação do controlador do inversor



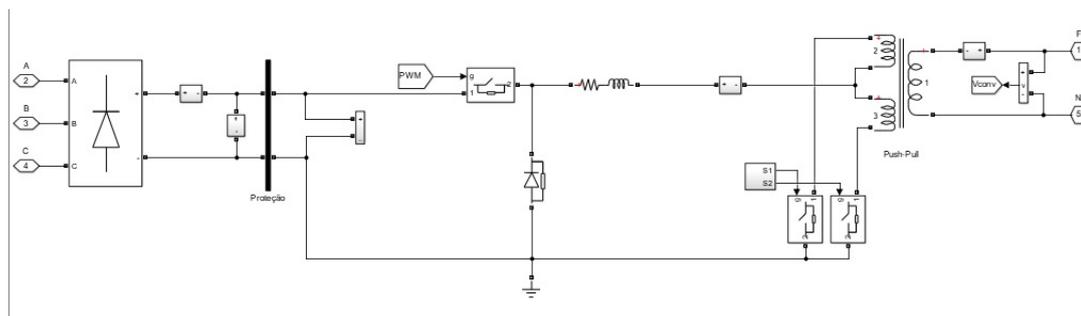
Fonte: Elaborado pelo autor

## B.4 Simulação dos tipos de vento



Fonte: Elaborado pelo autor

## B.5 Simulação do inversor push-pull



Fonte: Elaborado pelo autor

## B.6 Código de geração dos gráficos

### B.6.1 Velocidade do vento

```
plot(vento(:,1),vento(:,2));  
xlabel('Tempo(S)');  
ylabel('Velocidade de vento (m/s)');  
grid;
```

### B.6.2 Velocidade da turbina

```
plot(vel(:,1),vel(:,2));  
grid;  
xlabel('Tempo(S)');  
ylabel('Velocidade (rpm)');
```

### B.6.3 Tensão

```
plot([udc(:,2),udc(:,3)]);  
grid;  
xlabel('Tempo(S)');  
ylabel('Tensão(V)');
```

### B.6.4 Corrente

```
plot([il(:,2),il(:,3)]);  
grid;  
xlabel('Tempo(S)');  
ylabel('Corrente(A)');  
grid;
```