



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Elétrica

**MATHEUS BERNARDES SOARES**

**ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM PARQUES EÓLICOS**

Uberlândia  
2018

**MATHEUS BERNARDES SOARES**

**ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM PARQUES EÓLICOS**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Luiz Carlos Gomes de Freitas

---

Assinatura do Orientador

Uberlândia  
2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado além da vida e saúde, a chance de chegar até aqui e a oportunidade de continuar lutando pelos meus sonhos.

Agradeço a meus pais Valdir e Maurísia por me mostrarem o caminho correto a ser seguido, pela educação que me deram desde o dia em que nasci, por me acolherem nos momentos mais difíceis, e acima de tudo, ensinar que independente da classe social, se tivermos humildade e esforço podemos alcançar nossos sonhos.

A meu irmão Gustavo por ser um exemplo de pessoa, amigo para todos os momentos. Saiba que sempre estarei ao seu lado.

Agradeço também a minha namorada Érika, pelo companheirismo e apoio durante todo este tempo.

A todos professores que tive na minha trajetória como aluno, sem dúvida foram ímpares na minha formação profissional e pessoal. Em especial ao professor Luiz Carlos Gomes de Freitas, pela amizade, confiança e apoio durante a minha graduação.

Aos amigos incríveis que fiz nestes últimos cinco anos de faculdade, que também lutam incansavelmente pelos seus sonhos.

E por fim, a todos meus familiares e amigos que de perto ou distante me apoiaram.

## RESUMO

Devido ao crescimento exponencial dos parques eólicos no sistema elétrico brasileiro, este trabalho tem como objetivo principal propor uma forma de reduzir a intermitência do fornecimento de energia elétrica, no que se refere a parques eólicos. Para cumprir com tal objetivo, primeiramente será apresentado o princípio de funcionamento básico das turbinas eólicas, e posteriormente, os conversores utilizados. Por fim, será proposto uma forma de carga e descarga do sistema de armazenamento de energia, onde a potência a ser injetada na rede pode ser especificada através da corrente elétrica. Tal facilidade é importante para o operador, pois dispõe a oportunidade de injetar a energia na rede em momentos oportunos, e também, garantir o fornecimento de energia do sistema de geração.

## **ABSTRACT**

Due to the exponential growth of wind farms in the Brazilian electricity system, this work has as main objective to propose a way to reduce the intermittent supply of electric power, as far as wind farms are concerned. In order to comply with this objective, the basic operating principle of the wind turbines will be introduced first, and later the inverters used. Finally, it will be proposed a discharge load from the energy storage system, where the power to be injected into the network can be specified through the electric current. This facility is important for the operator, since it provides the opportunity to inject the energy in the network at opportune moments, and also, guarantee the power supply of the generation system.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de turbina eólica de 3 pás. ....	11
Figura 2: Arranjo de sistema eólico utilizado. ....	13
Figura 3: Retificador não controlado. ....	16
Figura 4: Retificador semi - controlado. ....	16
Figura 5: Retificador controlado. ....	16
Figura 6: Circuito conversor Boost. ....	18
Figura 7: Primeira etapa de operação. ....	19
Figura 8: Segunda etapa de operação. ....	19
Figura 9: Formas de onda, modo de condução contínua. ....	20
Figura 10: Inversor trifásico. ....	23
Figura 11: Tensão de linha VAB. ....	24
Figura 12: Tensão de acionamento das chaves S1 e S4. ....	24
Figura 13: Tensão de acionamento das chaves S3 e S6. ....	25
Figura 14: Tensão de acionamento das chaves S5 a S2. ....	25
Figura 15: Conteúdo harmônico da tensão de linha VAB. ....	26
Figura 16: Portadora e moduladoras. ....	27
Figura 17: Circuito comparador. ....	28
Figura 18: Pulsos na chave S1. ....	28
Figura 19: Inversor trifásico alimentando carga indutiva. ....	29
Figura 20: Corrente de linha fase A [Amp]. ....	29
Figura 21: Velocidade do motor em RPM. ....	30
Figura 22: Distorção harmônica da corrente de linha. ....	30
Figura 23: Filtro LCL monofásico. ....	31
Figura 24: Exemplo de diagrama de Bode. ....	32
Figura 25: Características da bateria Chumbo-Ácido. ....	34
Figura 26: Características da bateria íon-Lítio. ....	35
Figura 27: Sistema de armazenamento de energia. ....	36
Figura 28: Resposta da planta o compensador PI. ....	38
Figura 29: Boost com tensão de saída controlada. ....	39
Figura 30: Tensão de saída. ....	39
Figura 31: Resposta da planta com o compensador PI. ....	40
Figura 32: Circuito de potência e sistema de controle. ....	41
Figura 33: Tensão de saída. ....	41
Figura 34: Circuito de potência e sistema de controle. ....	42
Figura 35: Corrente de linha controlada. ....	42
Figura 36: Sistema implementado. ....	43
Figura 37: Diagrama unifilar simplificado. ....	44
Figura 38: Sistema como um todo injetando energia na rede. ....	46
Figura 39: Corrente injetada na rede pelo sistema. ....	46
Figura 40: Tensão do barramento CC. ....	46
Figura 41: Corrente injetada na rede pelo parque eólico e sistema. ....	47
Figura 42: Tensão do banco de baterias. ....	47
Figura 43: Taxa de distorção harmônica da corrente injetada na rede. ....	48
Figura 44: Sistema armazenando energia. ....	49
Figura 45: Tensão aplicada no banco de baterias. ....	49
Figura 46: % de carga do banco de baterias. ....	50
Figura 47: Tensão no barramento CC. ....	50
Figura 48: Corrente de entrada do retificador. ....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites para distorções harmônicas de corrente.....	33
Tabela 2: Distorção harmônica individual de tensão.....	33
Tabela 3: Dados do conversor Boost.....	38
Tabela 4: Dados do conversor Buck.....	40
Tabela 5: Dados da turbina.....	44
Tabela 6: Dados do gerador.....	44
Tabela 7: Dados mecânicos da turbina.....	45
Tabela 8: Dados dos conversores eletrônicos.....	45
Tabela 9: Dados do banco de baterias.....	45
Tabela 10: Valores de referência para os conversores.....	45

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

ONS – Operador Nacional do Sistema elétrico.

P&D – Programa de Pesquisa e Desenvolvimento.

SIN – Sistema Interligado Nacional.



## SUMÁRIO

<b>1.0 - INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2.0 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE AS TURBINAS EÓLICAS</b> .....	11
<b>2.1 – CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA EM ENERGIA MECÂNICA</b> .....	11
<b>2.2 – CONVERSÃO DE ENERGIA MECÂNICA EM ENERGIA ELÉTRICA</b> .....	12
<b>2.2.1 – GERADOR SÍNCRONO</b> .....	13
<b>2.2.2 – RETIFICADOR</b> .....	15
<b>2.2.3 – CONVERSOR CC/CC BOOST</b> .....	18
<b>2.2.3.1 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO</b> .....	18
<b>2.2.3.2 – ESPECIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS PASSIVOS</b> .....	21
<b>2.2.4 – INVERSOR</b> .....	23
<b>2.2.4.1 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO</b> .....	23
<b>2.2.4.2 – MODULAÇÃO SENOIDAL</b> .....	26
<b>2.2.4.3 – FORMAS DE ONDA COM CARGA INDUTIVA</b> .....	29
<b>2.2.5 – FILTROS</b> .....	30
<b>2.2.6 – CRITÉRIOS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA</b> .....	32
<b>2.3 – TIPOS DE BATERIAS</b> .....	34
<b>2.3.1 – BATERIAS DE CHUMBO – ÁCIDO</b> .....	34
<b>2.3.2 – BATERIAS DE ÍONS – LÍTIO</b> .....	35
<b>2.4 – CONVERSORES PROPOSTOS PARA CARGA E DESCARGA DO BANCO DE BATERIAS</b> .....	36
<b>2.4.1 – CONVERSOR BOOST</b> .....	37
<b>2.4.2 – CONVERSOR BUCK</b> .....	39
<b>2.4.3 – INVERSOR</b> .....	41
<b>3.0 – SIMULAÇÃO DO SISTEMA E RESULTADOS</b> .....	43
<b>3.1 – SISTEMA INJETANDO ENERGIA NA REDE</b> .....	43
<b>3.2 – SISTEMA ARMAZENANDO ENERGIA</b> .....	48
<b>4.0 – CONCLUSÃO</b> .....	50
<b>4.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	51
<b>5.0 – REFERÊNCIAS</b> .....	52

## 1.0 - INTRODUÇÃO

A presença de fontes de energia renováveis no Brasil, principalmente eólica e solar, é um fato que merece destaque para as entidades que operam, regulamentam e planejam o setor elétrico brasileiro. A importância destas fontes de energia é tamanha que vários órgãos, como ANEEL e ONS, já estão trabalhando em parceria com diversas universidades, através de programas de pesquisa e desenvolvimento P&D's [1], para estudar a melhor forma de inserir e operar estas fontes de energia intermitentes ao SIN.

Tal investimento por parte dos órgãos citados acima, ocorre principalmente em consequência da mudança de perfil da geração de energia elétrica no SIN, à custa do aumento das fontes intermitentes, como eólica e solar, e da construção de usinas com pequenos reservatórios, na região norte do país [2]. Sendo assim, apesar de a geração de energia elétrica tender a crescer com as fontes intermitentes de energia, do ponto de vista operacional, não é prudente planejar um sistema elétrico que será inteiramente sensível às variações climáticas.

Com o intuito de reduzir o impacto destas fontes na confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, uma proposta que está em evidência é sobre o armazenamento de energia em parques eólicos e solares. A finalidade do sistema de armazenamento de energia nestes parques seria armazenar a energia que é gerada nas fontes intermitentes e despachá-la em um momento oportuno, facilitando o planejamento de despacho de carga e aumentando a confiabilidade no fornecimento de energia.

Diante do cenário apresentado acima, o trabalho aqui apresentado tem como propósito iniciar os estudos dos fenômenos presentes na conversão de energia eólica em energia elétrica, e também, através de simulações computacionais, mostrar um sistema eólico com armazenamento de energia conectado à rede. É importante salientar que alguns pontos do tema extrapolam os conceitos que são apresentados na graduação, e que tais pontos serão fatalmente estudados em trabalhos futuros, por exemplo, a integração do sistema de controle da turbina com o controle de energia a ser injetada/armazenada pelo arranjo proposto.

Para explorar os conceitos apresentados na graduação e dar os primeiros passos em direção ao objetivo, a ênfase do trabalho será nos conversores, e por

fim, verificar a funcionalidade do controle de corrente do inversor, que por sua vez, será de suma importância para definir a potência a ser injetada na rede.

## **2.0 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE AS TURBINAS EÓLICAS**

Sabe-se que a energia eólica é a energia cinética presente nos ventos, e que as turbinas eólicas são instrumentos que empregam as técnicas da engenharia para realizar a conversão de energia eólica em energia mecânica e/ou elétrica. Para realizar tal finalidade descrita, existem várias configurações de turbinas eólicas, cada uma com sua particular vantagem e desvantagem, sendo que um dos critérios que definem a configuração são as particularidades do local de instalação da mesma.

Neste trabalho, será dado enfoque nas turbinas de três pás (Figura 1), devido ao maior rendimento na conversão de energia eólica em elétrica e maior utilização em aplicações com finalidade de conexão com a rede elétrica.



*Figura 1: Exemplo de turbina eólica de 3 pás.*

### **2.1 – CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA EM ENERGIA MECÂNICA**

A energia contida nos ventos, depende da densidade do ar, velocidade e área em que será realizada a conversão de energia, no caso das turbinas eólicas, a área varrida pelas pás da turbina. Desta maneira, a potência disponível no vento é definida pela equação a seguir [3]:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1)$$

Onde:

- $P_w$  – Potência disponível no vento [Watts].
- $\rho$  – Densidade do ar [Kg/m<sup>3</sup>].
- $V$  – Velocidade do vento [m/s].

Sendo assim, uma vez definida a potência disponível no vento, é necessário definir a potência que de fato estará presente no eixo da turbina. Para tal finalidade, será utilizado o coeficiente de Beltz, que relaciona os parâmetros construtivos e operacionais da turbina, para determinar o seu rendimento. Uma vez definido o rendimento da turbina, pode-se determinar a potência mecânica no eixo:

$$P_{mec} = P_w \cdot C_p \quad (2)$$

Onde:

- $P_{mec}$  – Potência mecânica no eixo da turbina [Watts].
- $C_p$  – Coeficiente de Beltz.

## 2.2 – CONVERSÃO DE ENERGIA MECÂNICA EM ENERGIA ELÉTRICA

A conversão de energia mecânica em elétrica, pode ser realizada através de geradores síncronos ou geradores de indução, sendo que cada um destes possui um arranjo de funcionamento específico, isto é, conjunto gerador e conversores eletrônicos distintos. Diante de vários arranjos, neste trabalho será adotada a configuração da Figura 2, onde se tem uma turbina acionando um gerador síncrono. Devido à intermitência da turbina no acionamento do gerador, se faz necessária a utilização de conversores eletrônicos para manter a tensão e frequência terminal do aerogerador constante, uma vez que estes parâmetros são importantes para a conexão com a rede elétrica.

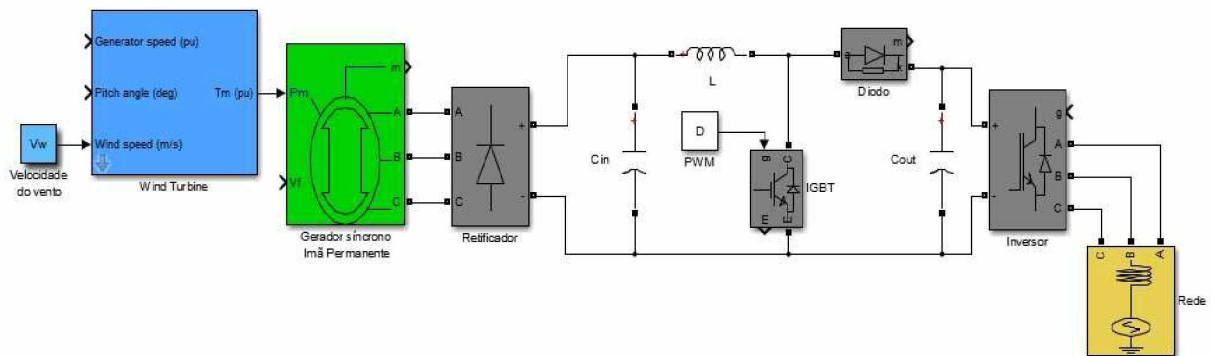


Figura 2: Arranjo de sistema eólico utilizado.

## 2.2.1 – GERADOR SÍNCRONO

Os geradores síncronos são vastamente utilizados em sistemas eólicos, tanto os geradores síncronos de rotor bobinado quanto de imã permanente, sendo que a diferença entre os dois está na forma de excitação. Na máquina de rotor bobinado, o enrolamento de campo, situado no rotor, é alimentado por uma fonte de corrente contínua, produzindo uma corrente que gera um fluxo constante no entreferro da máquina, desta maneira, quando o rotor é acionado na velocidade síncrona, inicia a presença de um campo magnético girante no entreferro da máquina, que por sua vez induz uma tensão nos enrolamentos do estator. Na máquina de imã permanente, a única diferença é a presença de ímãs no rotor, que produzem fluxo constante.

Dentre os dois tipos de geradores citados acima, o mais utilizado é o de rotor bobinado, isto ocorre devido à produção do gerador de imã permanente ainda ser significativamente mais cara [4].

Um grande ponto que deve ser destacado neste item, é a relação entre a frequência e amplitude da tensão terminal do gerador com a velocidade de acionamento do rotor. Tal ponto deve ser analisado cuidadosamente, pois a turbina que aciona o gerador funciona de forma intermitente, e este evento causa efeitos que devem ser analisados e solucionados.

Para comprovar que a frequência e amplitude da tensão terminal estão relacionadas com a velocidade de giro do rotor, deve-se chegar em uma equação matemática que relaciona a tensão terminal com a velocidade de giro do rotor. Para isso, segue-se o raciocínio:

De acordo com a lei de Faraday, a tensão induzida em uma espira é dada por:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

Onde:

- $\phi$  - O fluxo magnético [Weber].
- $e$  - Tensão induzida na bobina [Volts].

Considerando que o fluxo que corta as espiras do estator possui um comportamento conforme a função cosseno:

$$\phi(t) = \phi_m \cdot \cos(\omega_{el} \cdot t) \quad (4)$$

Onde:

- $\omega_{el}$  – Velocidade angular elétrica do eixo do fluxo magnético.
- $\phi_m$  – Fluxo máximo [Weber].

Substituindo a equação (4) em (3), temos que;

$$e = -\frac{d[\phi_m \cdot \cos(\omega_{el} \cdot t)]}{dt}$$

$$e = \phi_m \cdot \omega_{el} \cdot \sin(\omega_{el} \cdot t) = e_m \cdot \sin(\omega_{el} \cdot t) \quad (5)$$

Analisando a equação (5), verifica-se que o valor máximo que a tensão induzida no estator assume depende da velocidade angular elétrica que, por sua vez, possui uma relação direta com a velocidade angular mecânica:

$$\omega_{el} = P \cdot \omega_{mec} \quad (6)$$

Onde:

- $P$  – Número de polos da máquina.
- $\omega_{mec}$  – Velocidade angular mecânica [RPM].
- $\omega_{el}$  – Velocidade angular elétrica [RPM].

E por último, a frequência da tensão induzida no estator:

$$f = \omega_{el} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \quad (7)$$

Onde:

- $f$  – Frequência da tensão induzida [Hz].

Assim, através de (7), nota-se que a frequência da tensão induzida no estator também está relacionada com a velocidade angular do eixo da máquina. Tal fato, evidencia que em turbinas eólicas a tensão terminal do gerador possui amplitude e frequência que variam com a velocidade do rotor e, conseqüentemente, com a velocidade do eixo da turbina.

Sabe-se que tanto para alimentação de cargas isoladas quanto para conexão com a rede elétrica, é necessário manter os valores de tensão e frequência em uma faixa aceitável pelas cargas, ou pelas normas que regem a conexão com a rede. Através disso, percebe-se que é necessário e prudente utilizar uma forma de conversão de energia que propicie uma tensão com amplitude e frequência controlável, e que possa atender os requisitos necessários para conexão com a rede elétrica. Para tal fim, a luz da eletrônica de potência, utiliza-se de um sistema de conversão CA/CC (retificador) e CC/CA (inversor) e algumas técnicas de controle.

### **2.2.2 – RETIFICADOR**

Os retificadores ou conversores CA/CC de onda completa, são circuitos eletrônicos utilizados para converter uma forma de onda alternada em contínua, tanto em circuitos de baixa potência quanto a circuitos de alta potência. Estes conversores são divididos em três categorias: retificadores controlados, semi-controlados e não controlados, sendo que a diferença entre eles está na possibilidade de controle do valor médio da tensão de saída Figura 3, 4 e 5.

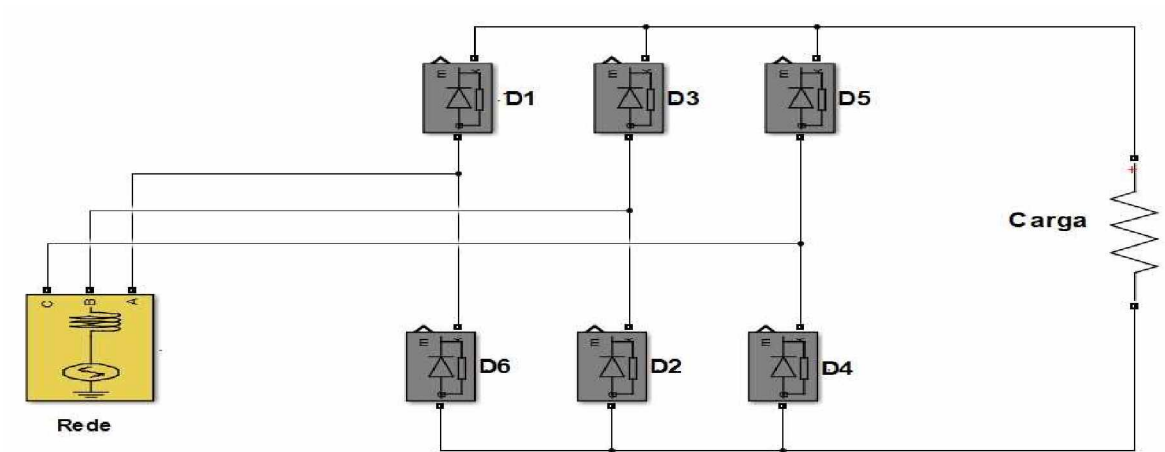


Figura 3: Retificador não controlado.

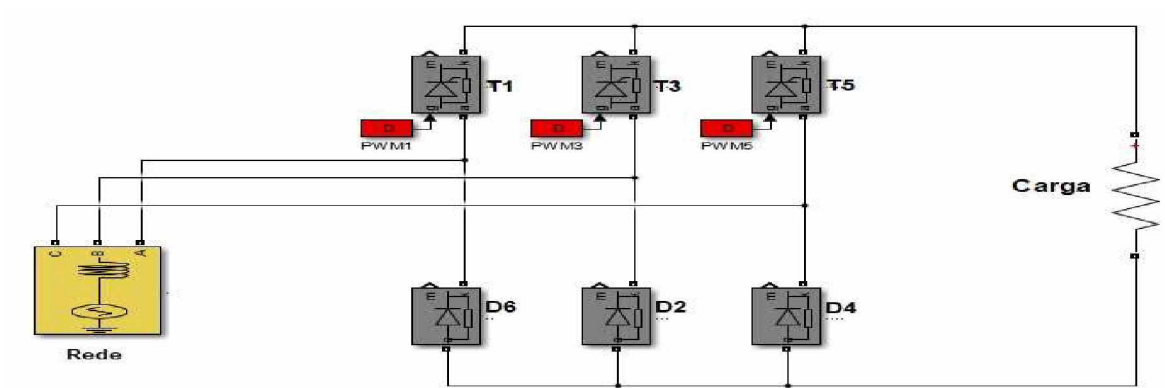


Figura 4: Retificador semi - controlado.

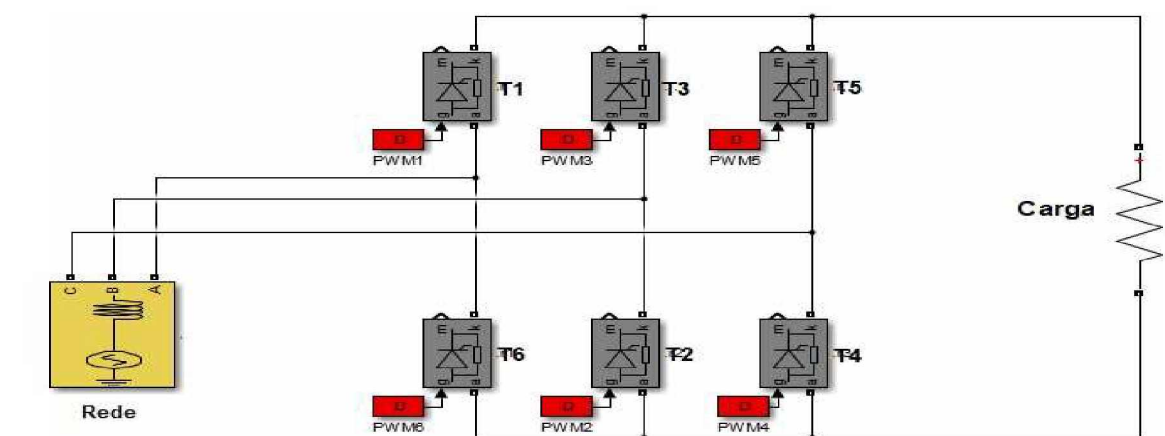


Figura 5: Retificador controlado.

Neste trabalho será utilizado os retificadores trifásicos não controlados a seis pulsos, devido a utilização de chaves eletrônicas (diodos) que possuem robustez para processar alto nível de potência [5], e possuem um custo benefício mais



atrativo, quando comparado às outras chaves eletrônicas, como tiristores, IGBT's, MOSFET's, dentre outras chaves controladas.

O retificador trifásico não controlado, é o retificador mais simples dentre os apresentados, e isto se dá devido a sua comutação natural, que ocorre através da tensão instantânea da fonte de alimentação do retificador. Em outras palavras, considerando que a fonte é trifásica, equilibrada e simétrica, cada diodo irá conduzir por 120°, sempre em pares, e na sequência apresentada na Figura 3, D1D2, D2D3, D3D4, D4D5, D5D6, D6D1, justificando os “seis pulsos”.

Para quantificar o valor médio da tensão de saída do retificador, pode-se utilizar a seguinte equação:

$$V_{med} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) \quad (8)$$

Onde:

- $V_{med}$  – Tensão média na saída do retificador.
- $T$  – Período da forma da tensão de saída.
- $v(t)$  – Tensão instantânea de entrada.

Desta forma, o valor da tensão média na saída do retificador pode ser determinado por:

$$V_{med} = \frac{1}{\frac{\pi}{6}} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \cos(\omega t) d(\omega t)$$
$$V_{med} = (3\sqrt{3}V_m)/\pi \quad (9)$$

Onde:

- $V_m$  – É a tensão de pico de fase [Volts].
- $V_{med}$  – Tensão média na saída do retificador [Volts].

Através da equação 9, nota-se que a tensão média de saída de um retificador trifásico de seis pulsos depende da tensão de pico da fonte de alimentação. Sendo assim, no caso de sistemas eólicos, em que a tensão de saída do gerador será uma tensão de amplitude e frequência que oscilam com a variação da velocidade angular do eixo da turbina, é notável que a tensão média de saída do retificador também irá variar com a intermitência do acionamento do gerador.

Percebendo a variação da tensão média de saída do retificador, e a necessidade de ter a tensão de entrada no barramento CC do inversor o mais constante possível, é prudente utilizar um conversor CC/CC para solucionar esta questão.

## 2.2.3 – CONVERSOR CC/CC BOOST

### 2.2.3.1 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Através da tradução do próprio nome deste conversor, já se subentende qual é a sua principal função. O conversor Boost tem como principal objetivo fornecer uma tensão de saída maior que a tensão de entrada, característica esta que justifica sua utilização e necessidade, no que se refere ao acoplamento entre o retificador e o inversor. É importante ressaltar a importância da especificação da malha de controle deste conversor, seja para operar como fonte de corrente ou para operar como fonte de tensão, pois o conversor Boost que possui a responsabilidade de mitigar o efeito da variação de tensão na saída do retificador no barramento CC do inversor.

O circuito do conversor Boost está ilustrado na Figura 6, e seu princípio de operação será apresentado a seguir.

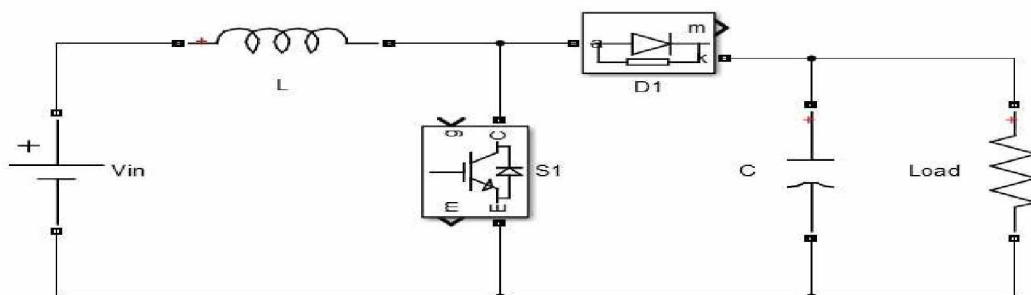


Figura 6: Circuito conversor Boost

A primeira etapa de operação se inicia quando a chave S1 fecha, proporcionando um caminho de menor impedância para corrente, que por sua vez cresce e flui através do indutor L e da chave S1, figura 7.

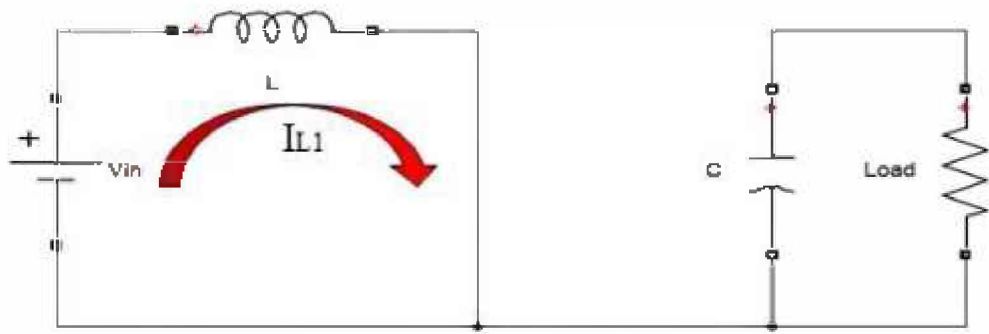


Figura 7: Primeira etapa de operação.

A segunda etapa de operação se inicia quando a chave S1 abre. Neste momento, a tensão de entrada  $V_{in}$  e a tensão no indutor  $L$  se somam, polarizando o diodo positivamente e forçando a sua condução, proporcionando a circulação de corrente pelo diodo D1, carga e aumento de energia no capacitor  $C$  (Figura 8).

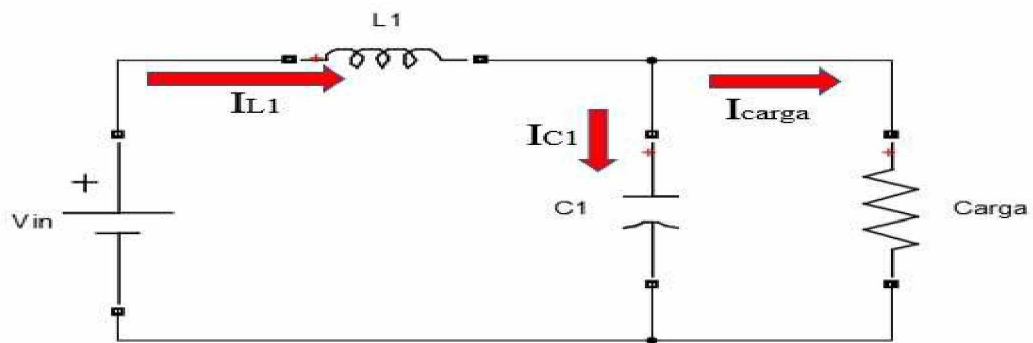


Figura 8: Segunda etapa de operação.

As respectivas formas de onda, considerando que o conversor irá operar em modo de condução contínua, são apresentadas na Figura 9.

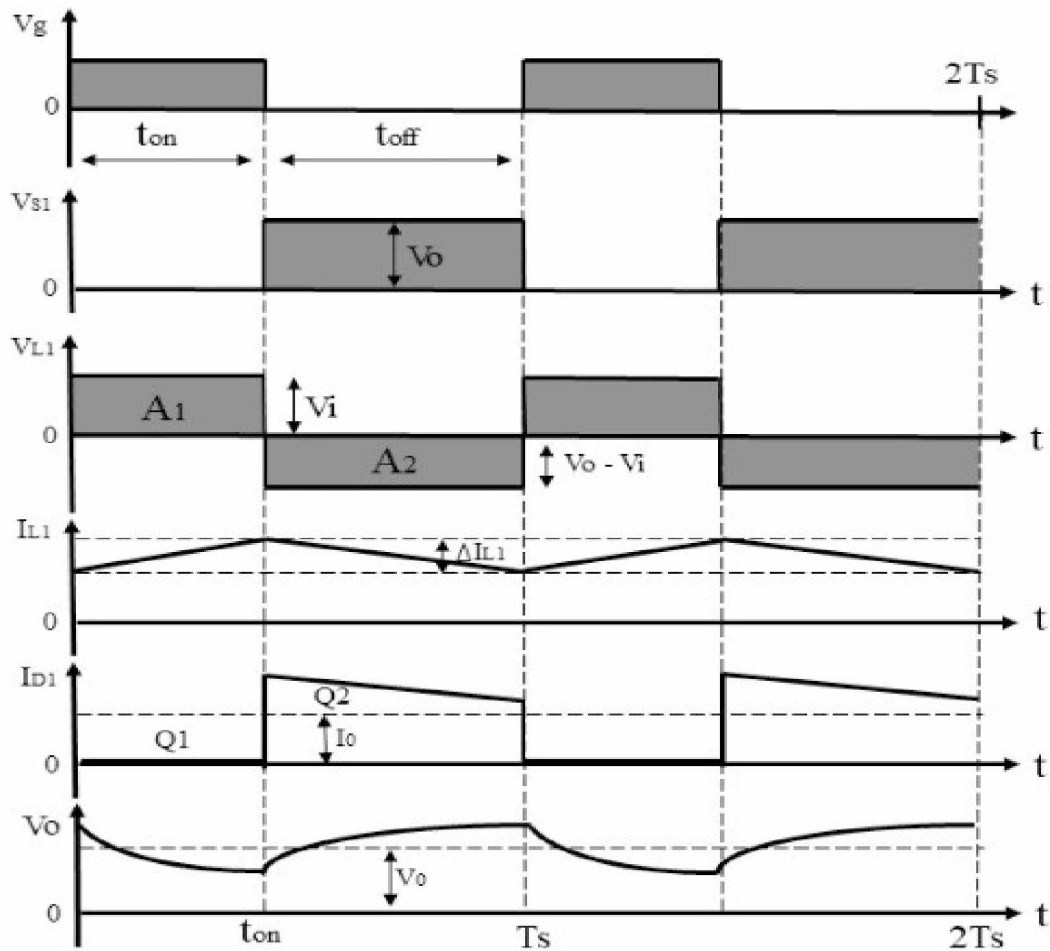


Figura 9: Formas de onda, modo de condução contínua.

Para que o conversor opere em modo de condução contínua, a integral da tensão no indutor, durante o período  $T_s$ , deve ser nula [4], desta forma;

$$V_{in}.t_{on} = (V_o - V_{in}).t_{off} \quad (10)$$

Onde:

- $V_{in}$  – É a tensão de entrada do conversor [Volts].
- $V_o$  – É a tensão de saída do conversor [Volts].
- $t_{on}$  – É o tempo em que a chave S1 fica fechada [Segundos].
- $t_{off}$  – É o tempo em que a chave S1 fica aberta [Segundos].
- $T_s$  – Período de comutação [Segundos].

Definindo o conceito de razão cíclica como sendo a razão entre o tempo em que a chave S1 está fechada e o período de comutação;

$$D = ton/Ts \quad (11)$$

Em que:

- $D$  – Razão cíclica varia de 0 a 1.

Aplicando a definição de razão cíclica na equação 10, tem-se que;

$$Vo/Vin = 1/(1 - D) \quad (12)$$

Através da equação 12, nota-se que, considerando o conversor ideal, o ganho de tensão do conversor Boost está diretamente relacionado com o tempo de condução da chave S1 e o seu período de comutação.

### 2.2.3.2 – ESPECIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS PASSIVOS

Referente à especificação dos componentes passivos, é necessário especificar um indutor que seja capaz de manter a variação de corrente, ou *ripple* de corrente, em um valor que seja aceitável. Da mesma forma, também é necessário especificar um capacitor que mantenha a variação de tensão, ou *ripple* de tensão, em valores aceitáveis.

Em relação a especificação da indutância, será apresentada uma equação para o respectivo cálculo, de forma que o conversor opere em modo de condução contínua.

Considerando que a tensão em um indutor é expressa por:

$$VL1 = L1. dIL1/dy$$

Transformando a equação acima em uma equação diferencial, tem-se:

$$\Delta VL1 = L1. \left( \frac{\Delta IL1}{\Delta t} \right)$$

Para que o conversor opere em modo de condução contínua, a corrente no indutor não pode chegar a zero no tempo em que a chave S1 está aberta (*toff*), Figura 9.

$$\Delta IL1 = \frac{\Delta VL1}{L1} . \Delta t = \frac{(Vo - V)}{L1} . toff \quad (13)$$

$$toff = Ts - ton = Ts - D.Ts$$

$$t_{off} = T_s \cdot (1 - D) \quad (14)$$

Substituindo as equações 12 e 14 na equação 13, tem-se:

$$L = D \cdot (1 - D) \cdot V_o \cdot T_s \cdot \frac{1}{\Delta I_{L1}} \quad (15)$$

Finalmente, através da equação 15, pode-se especificar um valor de indutância a partir da oscilação de corrente, que por sua vez é definido em projeto.

Para especificar o capacitor, é razoável assumir que o capacitor absorve todo *ripple* de corrente na segunda etapa de operação do conversor ( $t_{off}$ ), e descarrega na primeira etapa de operação ( $t_{on}$ ). Seguindo este raciocínio, a carga que o capacitor fornece no seu período de descarga pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} Q_1 &= C \cdot \Delta V_o \\ \Delta V_o &= Q_1 / C \end{aligned} \quad (16)$$

Onde:

- $Q_1$  – Carga fornecida pelo capacitor no período de descarga.
- $\Delta V_o$  – Variação de tensão na saída do conversor.
- $C$  – Capacitância [Farad].

Considerando que a corrente elétrica que o capacitor fornece para carga na primeira etapa de operação é a variação de carga em um intervalo de tempo, pode-se calcular a carga fornecida pelo capacitor em função da corrente de saída:

$$Q_1 = I_o \cdot \Delta V_o \quad (17)$$

Onde:

- $I_o$  – Corrente de saída.

Substituindo as equações 11 e 17 em 16, tem-se;

$$C = Q_1 / \Delta V_o = I_o \cdot \frac{t_{on}}{\Delta V_o} = (V_o \cdot D \cdot T_s) / (R \cdot \Delta V_o) \quad (18)$$

Através da equação 18, pode-se especificar um valor de capacitância partindo de um valor pré-definido de oscilação de tensão.

## 2.2.4 – INVERSOR

Os inversores são conversores eletrônicos que realizam a conversão de tensão contínua em tensão alternada. É importante ressaltar que existem várias configurações de inversores: dois níveis, três níveis, multinível, e que são projetados para alimentar uma carga de forma isolada, ou para operar em paralelo com a rede elétrica. Sendo assim, cada configuração possui sua particular vantagem e desvantagem, sendo que os principais critérios de escolha são as necessidades do projeto e o custo-benefício.

### 2.2.4.1 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Neste trabalho será estudado o inversor trifásico (figura 10) com modulação a dois níveis, onde há apenas dois níveis de tensão a serem aplicados na saída do inversor.

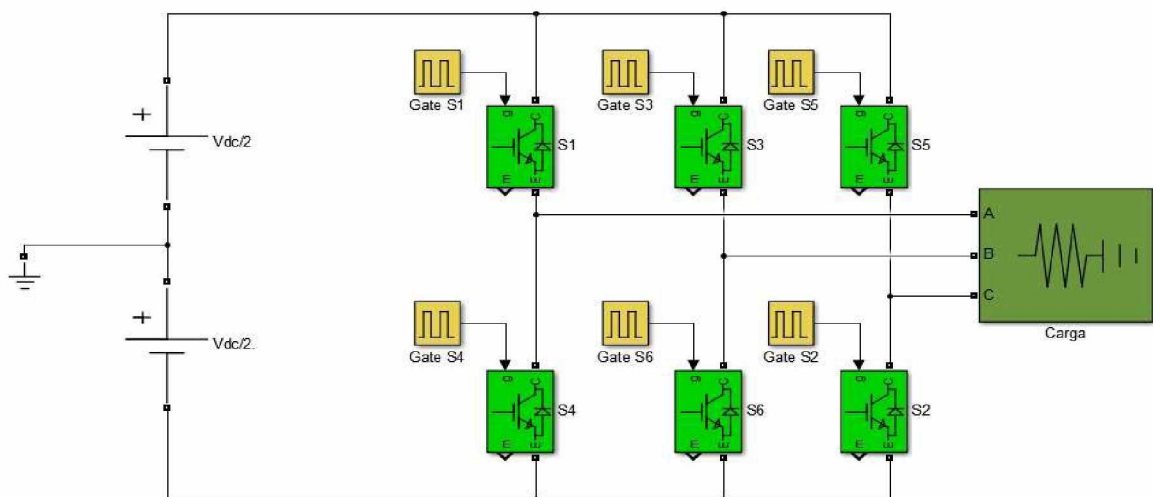


Figura 10: Inversor trifásico.

Observando o circuito do inversor acima, percebe-se que para cada braço, é necessário habilitar uma chave por vez, para que não ocorra curto-circuito no barramento CC, portanto, conclui-se que as chaves S1 e S4 devem possuir uma defasagem de  $180^\circ$  no seu acionamento, assim como nas chaves S3-S6 e S5- S2.

Como a finalidade do inversor é fornecer uma tensão trifásica e equilibrada, é necessário que as três fases possuam uma defasagem de  $120^\circ$ .

Pode-se observar as formas de onda dos sinais de acionamento das chaves e a tensão de linha (Figura 11, 12, 13 e 14).

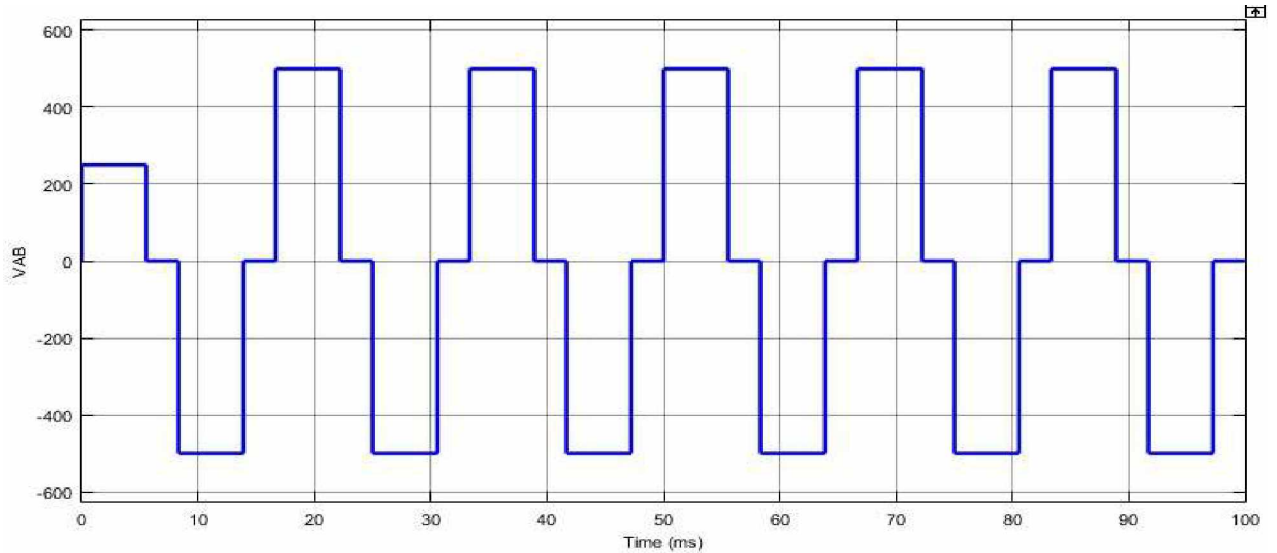


Figura 11: Tensão de linha VAB.

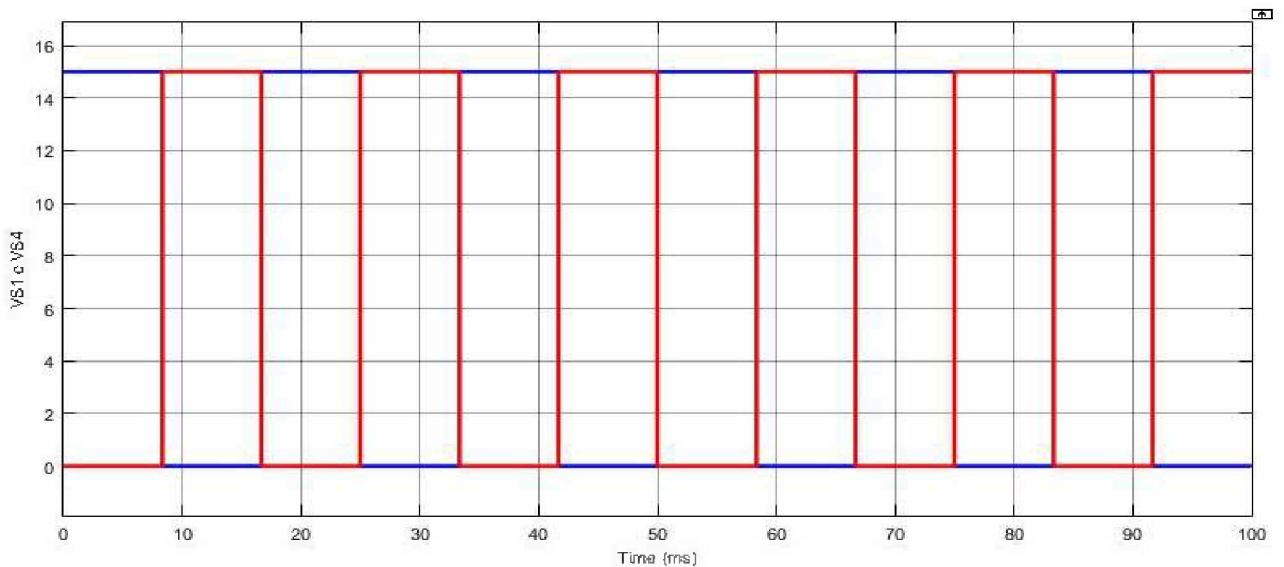


Figura 12: Tensão de acionamento das chaves S1 e S4.



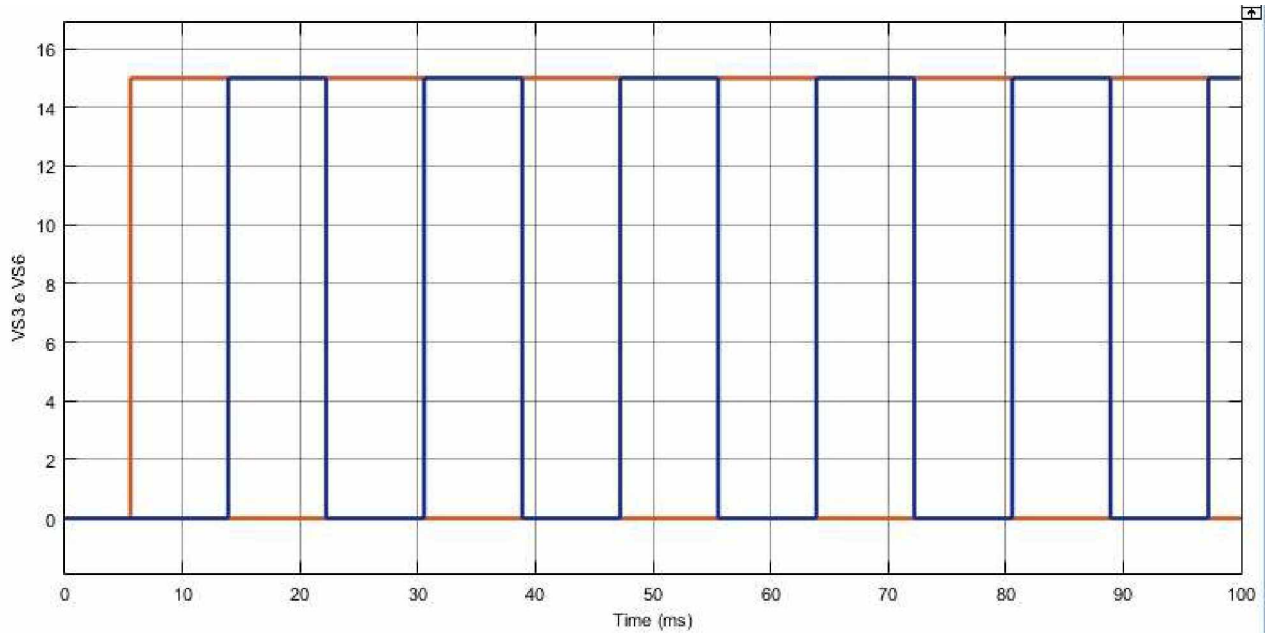


Figura 13: Tensão de acionamento das chaves S3 e S6.

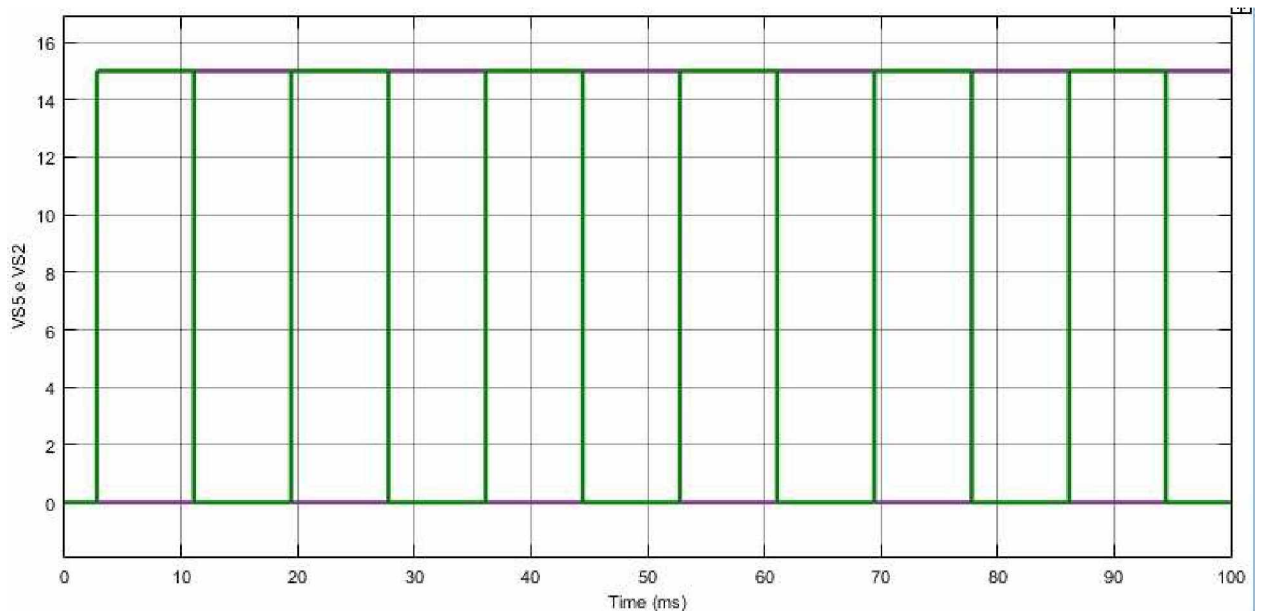


Figura 14: Tensão de acionamento das chaves S5 a S2.

Observa-se através da figura 11, no gráfico da tensão de linha VAB, que a tensão é alternada com frequência de 60 Hz, porém possui um alto conteúdo harmônico (Figura 15), distanciando esta forma de onda de uma senóide. As harmônicas presentes nesta forma de onda podem ser verificadas através da seguinte série de Fourier [7].

$$V_{AB} = \sum_{n=1,5,7,11,13...}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \frac{4 \cdot V_{dc}}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{6}\right) \cdot \sin n \cdot \left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{6}\right) \quad (19)$$

$$VBC = \sum_{n=1,5,7,11,13...}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \frac{4 \cdot Vdc}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{6}\right) \cdot \sin n \cdot \left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (20)$$

$$VCA = \sum_{n=1,5,7,11,13...}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \frac{4 \cdot Vdc}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{6}\right) \cdot \sin n \cdot \left(\omega \cdot t + \frac{5\pi}{6}\right) \quad (21)$$

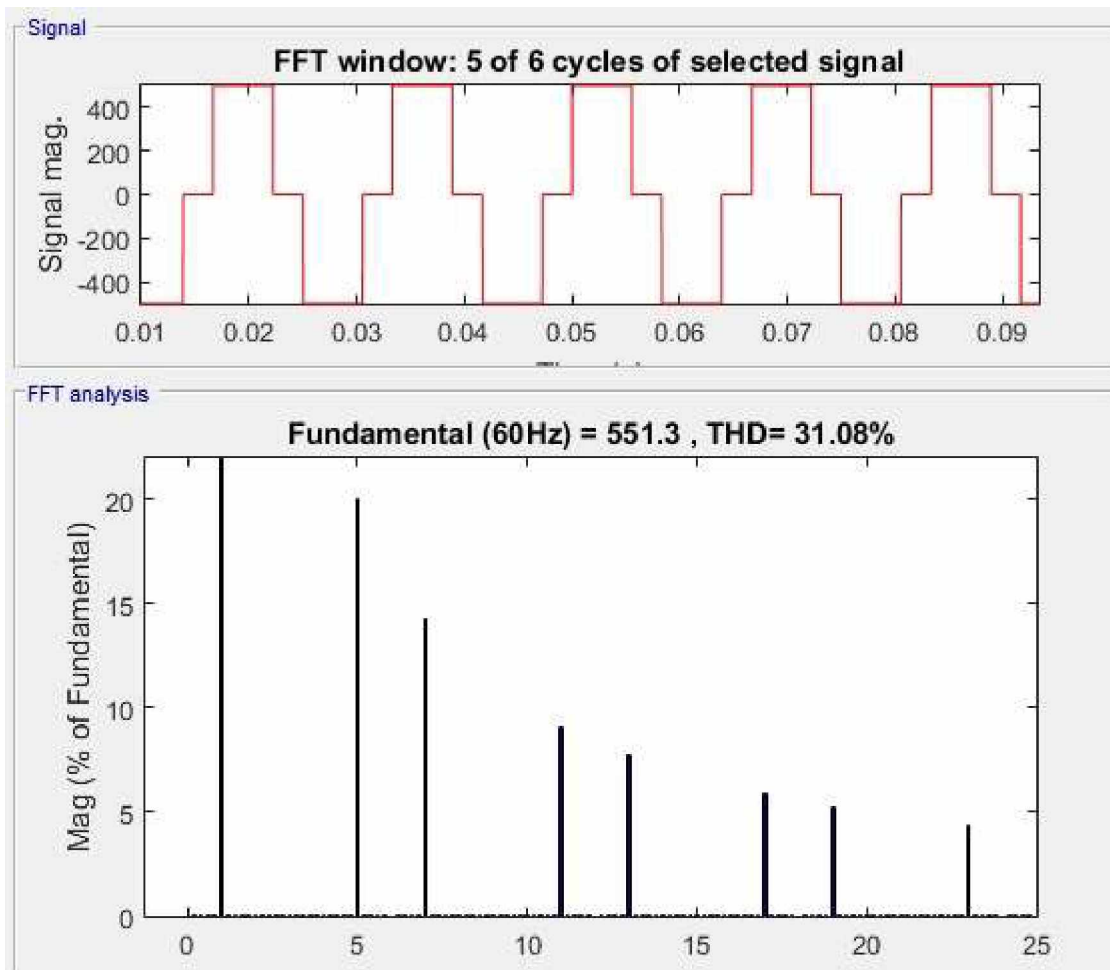


Figura 15: Conteúdo harmônico da tensão de linha VAB.

#### 2.2.4.2 – MODULAÇÃO SENOIDAL

Dentre os vários tipos de modulação, neste trabalho será utilizado a modulação senoidal, onde se utiliza três senóides com defasagem de  $120^\circ$  (moduladora) e uma onda triangular (portadora). As senóides são utilizadas como referência, isto é, a tensão de saída do inversor deve se aproximar da senóide de referência, e a triangular é utilizada para comparação.

Para relacionar os valores de pico e frequência das ondas moduladora e portadora, existem algumas relações importantes, que são fundamentais, pois é a partir da comparação destas duas formas de onda que são gerados os pulsos que acionam as chaves semicondutoras.

$$M = V_{mpk}/V_{trpk} \quad (22)$$

Onde:

$V_{mpk}$  – Tensão de pico da moduladora (senóide) [Volts].

$V_{trpk}$  – Tensão de pico da portadora (triangular) [Volts].

$M$  – Razão de modulação.

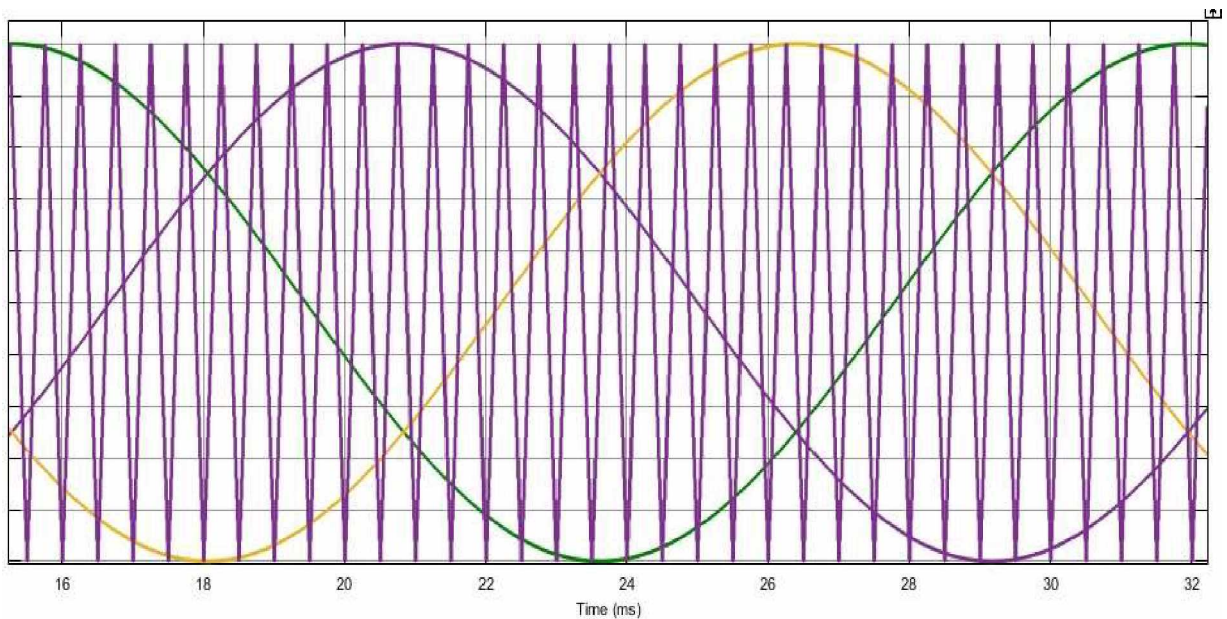


Figura 16: Portadora e moduladoras.

Para gerar os pulsos que irão acionar as chaves semicondutoras, é utilizado um circuito comparador (Figura 17), onde se compara a onda portadora com as moduladoras, sendo uma moduladora referência para sua respectiva fase (Figura 16).

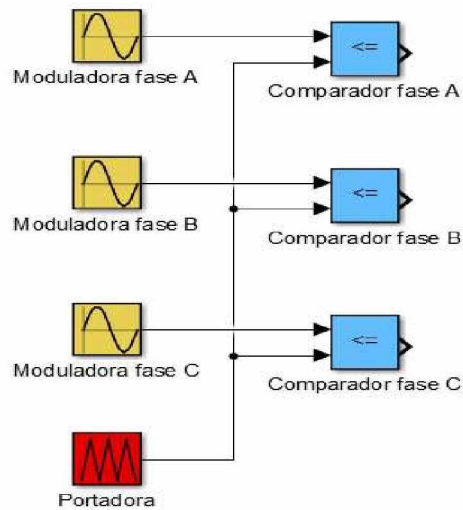


Figura 17: Circuito comparador.

Devido à importância de não acionar as chaves do mesmo braço ao mesmo tempo, os sinais de acionamento destas chaves devem ser opostos, isto significa que quando a tensão no *gate* da chave S1 estiver diferente de zero, a tensão na chave S4 deve ser zero. Para garantir que não haverá curto-circuito em nenhum dos três braços devido ao acionamento de ambas as chaves de um mesmo braço, é prudente inserir um tempo morto entre o tempo que S1 leva para abrir e o tempo que S2 leva para fechar, por exemplo.

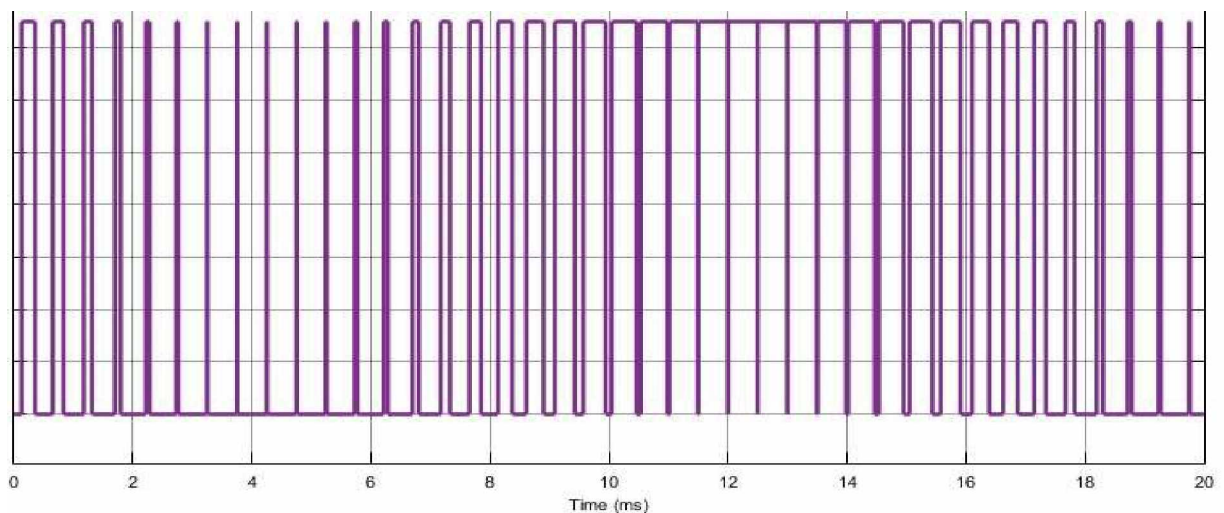


Figura 18: Pulsos na chave S1.

Comparando a modulação senoidal com a modulação vetorial, nota-se que a modulação senoidal, apesar de sua maior simplicidade de implementação, possui um índice de modulação menor, isto é, menor aproveitamento do barramento CC. No que se refere a modulação vetorial, apesar de exigir um maior esforço

computacional, as perdas por comutação são significativamente menores, fato este que é importante para aplicações com alto processamento de potência.

### 2.2.4.3 – FORMAS DE ONDA COM CARGA INDUTIVA

O arranjo de inversor apresentado na figura 19 é comum em locais onde é necessário o controle de velocidade de motores de indução, situação bastante comum em plantas industriais. No caso da alimentação de motores, os quais são cargas indutivas, o próprio motor pode ser considerado como um filtro, devido à sua própria indutância.

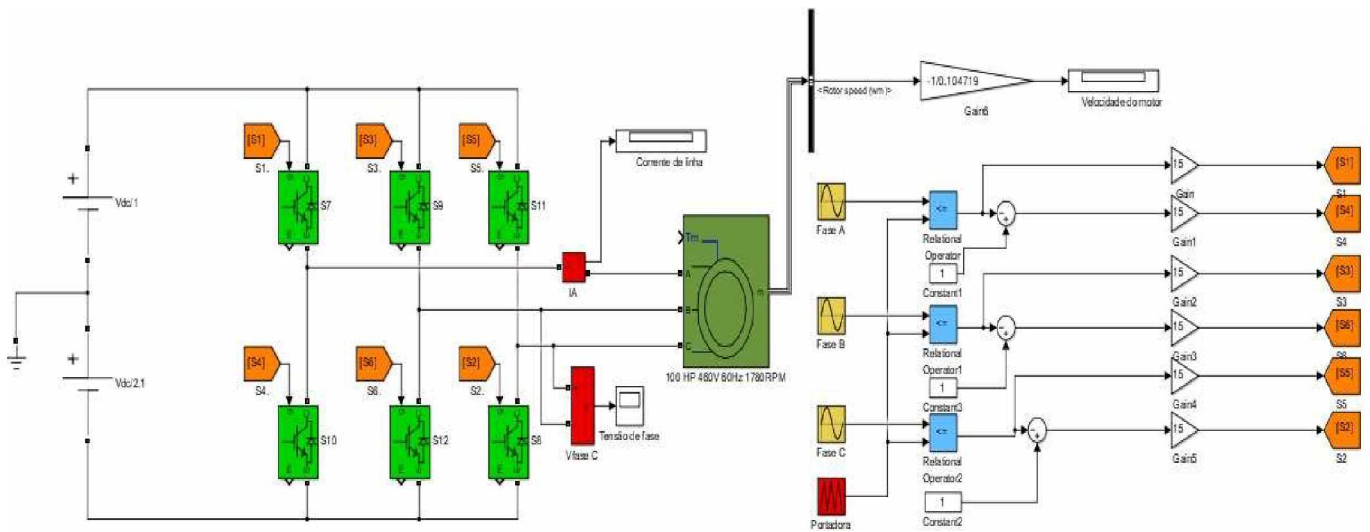


Figura 19: Inversor trifásico alimentando carga indutiva.

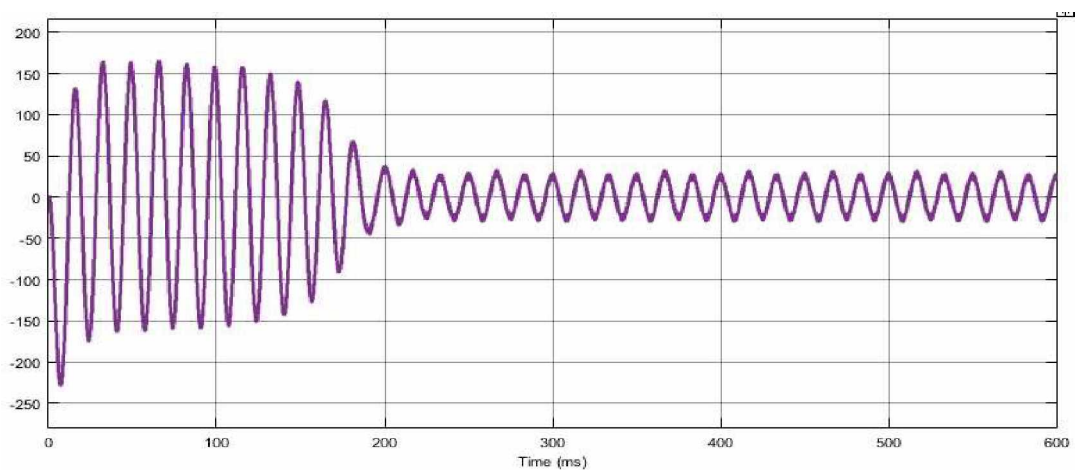


Figura 20: Corrente de linha fase A [Amp].

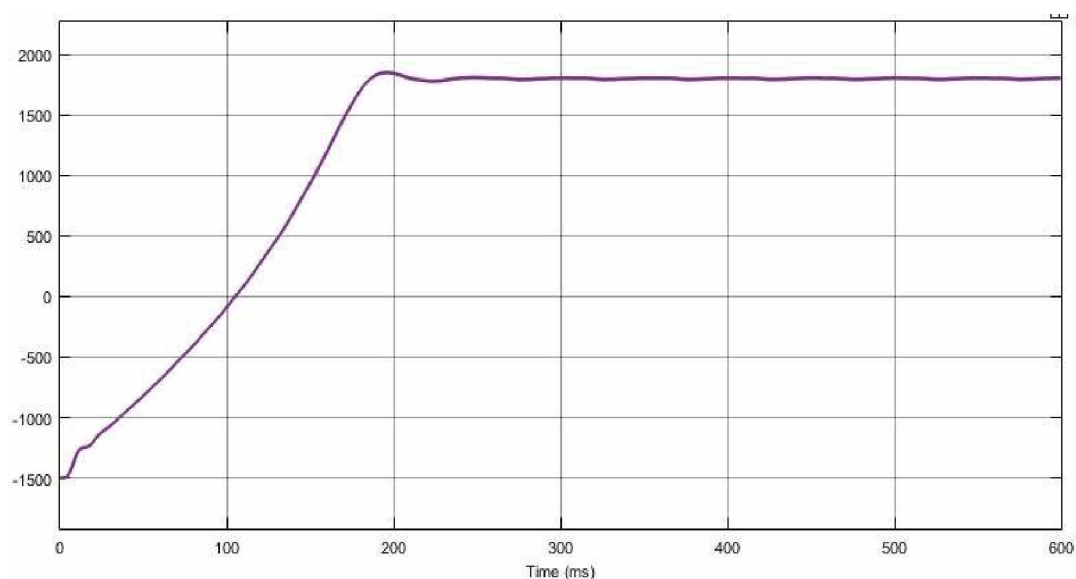


Figura 21: Velocidade do motor em RPM.

A distorção harmônica da corrente de linha pode ser verificada na Figura 22.

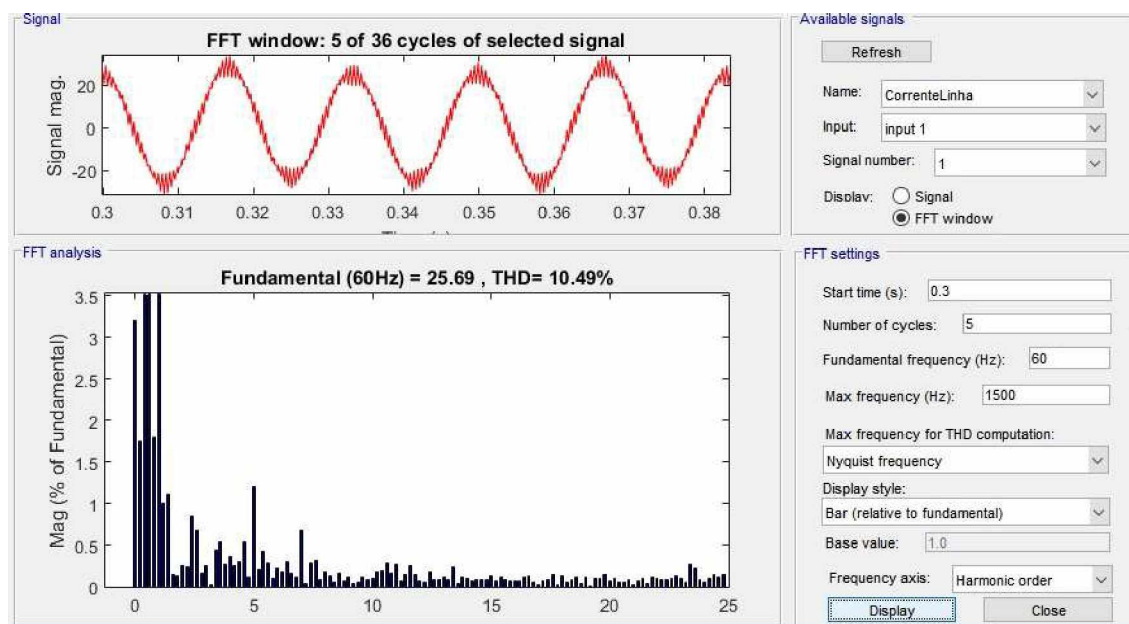


Figura 22: Distorção harmônica da corrente de linha.

## 2.2.5 – FILTROS

Observando a figura 22, nota-se que o conteúdo harmônico da corrente é relativamente alto. No caso de inversores conectados à rede elétrica, é necessário seguir alguns limites referentes à distorção harmônica total de corrente e tensão, sendo que estes limites são estabelecidos pelas normas vigentes no local onde será instalado o sistema.

Para reduzir o conteúdo harmônico da corrente e tensão do inversor visto pela rede, é usual utilizar filtros do tipo L, LC ou LCL. Assim, para definir qual tipo de



filtro será utilizado, deve-se levar em consideração o nível de atenuação que é necessário para a aplicação, tempo de resposta, espaço e preço.

Este trabalho dará foco ao filtro LCL (Figura 23), por possuir o maior o maior nível de atenuação.

Para especificação do filtro LCL, será tomado como base alguns critérios importantes [8].

- A corrente fundamental que circula através do capacitor deve ser menor que 1% da corrente fundamental que é injetada na rede.
- A atenuação do filtro deve ser suficiente para garantir a qualidade da corrente injetada na rede.
- Os valores de indutância dos filtros devem ser escolhidos de forma que a combinação dos indutores possuam o menor tamanho possível.

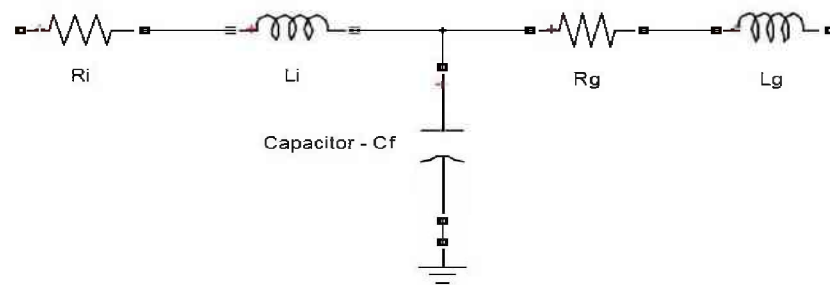


Figura 23: Filtro LCL monofásico.

### 2.2.5.1 – ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES PASSIVOS

Para especificação do capacitor pode-se utilizar a equação abaixo.

$$Cf \leq 0,01 \cdot \frac{Pn}{3 \cdot \omega \cdot Eg^2} \quad (23)$$

Onde:

$Cf$  – Capacitância [Farads].

$Pn$  – Potência nominal do inversor [Watts].

$\omega$  – Frequência fundamental [rad/seg].

$Eg$  – Tensão de fase da rede [Volts].

Para especificação dos indutores, pode-se utilizar a equação abaixo:

$$Lg = \frac{Li}{(\omega_{res}^2 \cdot Cf / 1000) \cdot Li - 1} \quad (24)$$

Onde:

$L_g$  – Indutância do lado da rede [mH].

$L_i$  – Indutância do lado do inversor [mH].

$\omega_{res}$  – Frequência de ressonância [rad/seg].

Referente à frequência de ressonância, recomenda-se que esta seja pelo menos dez vezes menor que a frequência de chaveamento.

Note que para calcular o valor do indutor do lado da rede, é necessário o valor de indutância do lado do inversor. Para reduzir o volume e peso dos indutores, é prudente escolher os mesmos de maneira que a soma das duas indutâncias seja mínima.

A dedução das equações 23 e 24 podem ser verificadas em [8].

A figura 24 apresenta o diagrama de Bode de um filtro com frequência de ressonância de 3140 rad/seg.

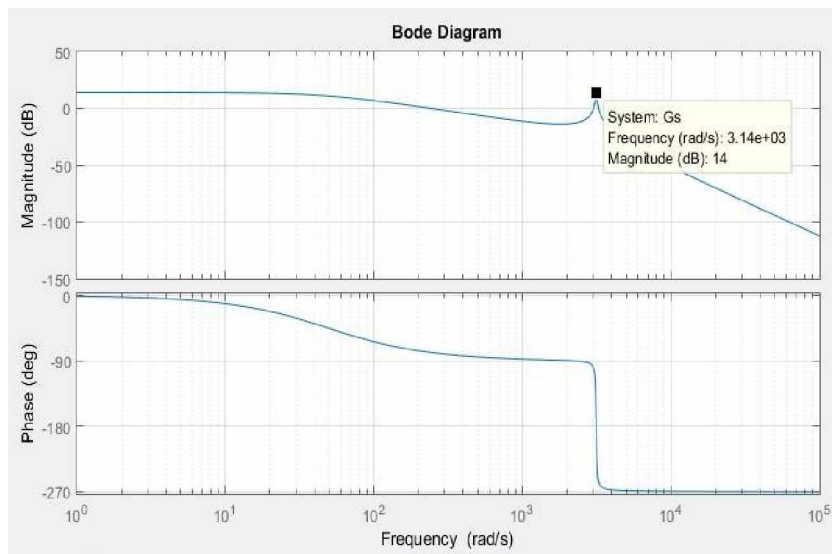


Figura 24: Exemplo de diagrama de Bode.

## 2.2.6 – CRITÉRIOS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Para garantir a qualidade da energia elétrica, e evitar os problemas que as correntes harmônicas podem vir a causar, existem limites para o conteúdo harmônico proveniente de inversores.

A tabela 1 estabelece os limites de distorção harmônica de corrente, sendo TDD (*Total Demand Distortion*) a distorção harmônica total da corrente, em % da máxima



demanda da corrente de carga correspondente à demanda máxima da carga. A tabela 2 é referente as distorções harmônicas de tensão [9].

Limites por consumidor para distorções harmônicas de corrente V < 34,5 kV						
K = I <sub>sc</sub> / I <sub>carga</sub>	Valores percentuais das correntes harmônicas					TDD (%)
	h ≤ 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	h ≥ 35	
k ≤ 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < k ≤ 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < k ≤ 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < k ≤ 1000	12	5,5	5	2	1	15
k ≥ 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Tabela 1: Limites para distorções harmônicas de corrente.

Distorção harmônica individual de tensão					
Ordem harmônica		V <sub>n</sub> < 1kV	1kV < V <sub>n</sub> < 13,8 kV	13,8 kV < V <sub>n</sub> < 69 kV	69 kV < V <sub>n</sub> < 230 kV
		Ímpares não múltiplos de 3	5	7,5	6
7	6,5		5	4	2
11	4,5		3,5	3	1,5
13	4		3	2,5	1,5
17	2,5		2	1,5	1
19	2		1,5	1,5	1
23	2		1,5	1,5	1
25	2		1,5	1,5	1
> 25	1,5	1	1	1	
Ímpares múltiplos de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	> 21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	0,5
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5
<b>Distorção total</b>		<b>10%</b>	<b>8%</b>	<b>6%</b>	<b>3%</b>

Tabela 2: Distorção harmônica individual de tensão.

## 2.3 – TIPOS DE BATERIAS

Para o armazenamento de energia, é necessário a análise crítica de qual tipo de bateria a ser utilizada. Desta maneira, algumas características devem ser observadas, como: vida útil, corrente de carga, peso, dentre outras.

A seguir, são apresentadas as vantagens e desvantagens das baterias de Chumbo – Ácido e Íon – Lítio, segundo [10].

### 2.3.1 – BATERIAS DE CHUMBO – ÁCIDO

#### Vantagens

- Baixo custo.
- Permite taxas elevadas de descarga.
- Baixa taxa de auto - descarga.

#### Desvantagens

- Baixa densidade de energia.
- Permite um número limitado de ciclos de descarga completos.
- Prejudicial ao meio ambiente, devido ao teor de chumbo.

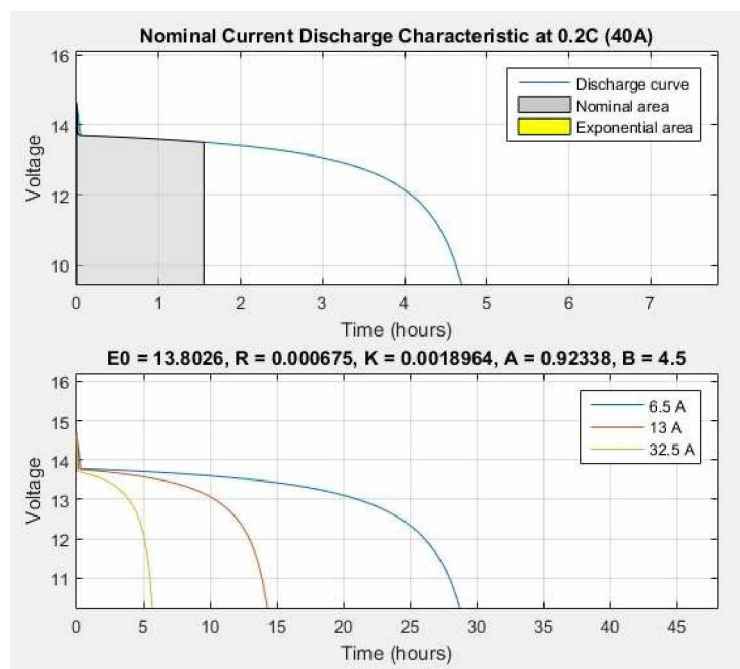


Figura 25: Características da bateria Chumbo-Ácido

## 2.3.2 – BATERIAS DE ÍONS – LÍTIO

### Vantagens

- Alta densidade de energia.
- Baixa taxa de auto - descarga.
- Baixa manutenção.

### Desvantagens

- Corrente de descarga moderada.
- Custo de fabricação elevado.
- Sujeito a envelhecimento.

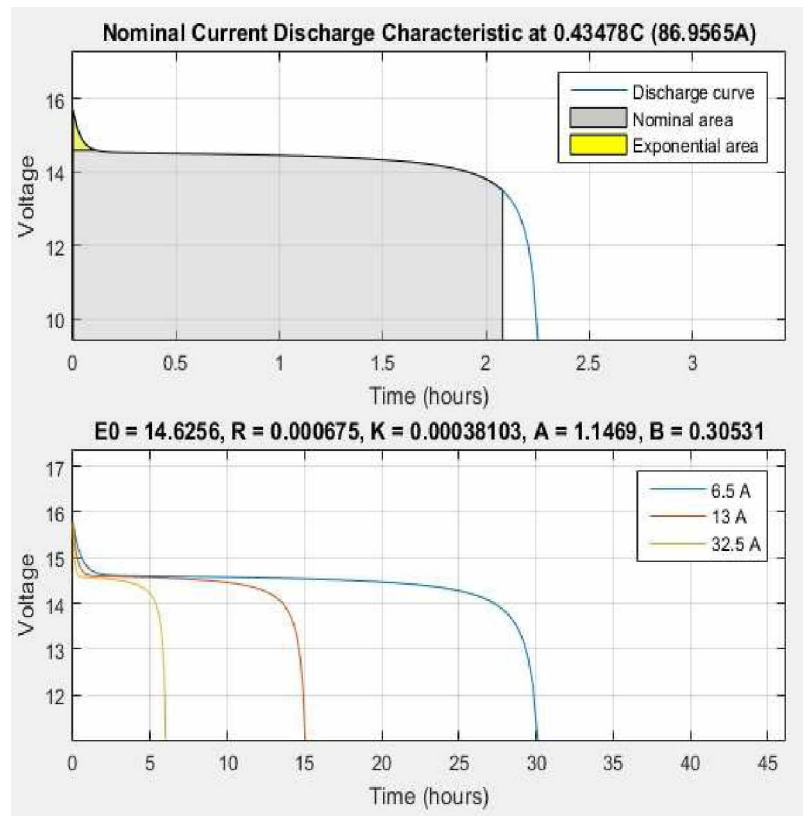


Figura 26: Características da bateria ion-Lítio.

## 2.4 – CONVERSORES PROPOSTOS PARA CARGA E DESCARGA DO BANCO DE BATERIAS

Em um sistema de armazenamento de energia, a utilização dos conversores CC/CC e CC/CA são importantíssimos para realizar e controlar a injeção de energia na rede elétrica (descarga do banco de baterias) e também para realizar o processo de carga do banco de baterias.

Desta forma, os conversores propostos para cumprir com o objetivo acima são as topologias clássicas que são apresentadas na graduação, que são os conversores Boost e Buck. Nos próximos tópicos, será dada ênfase no controle dos conversores CC/CC, uma vez que o princípio de funcionamento já foi apresentado anteriormente. Em relação ao controle do inversor trifásico, este tema será explorado em trabalhos futuros.

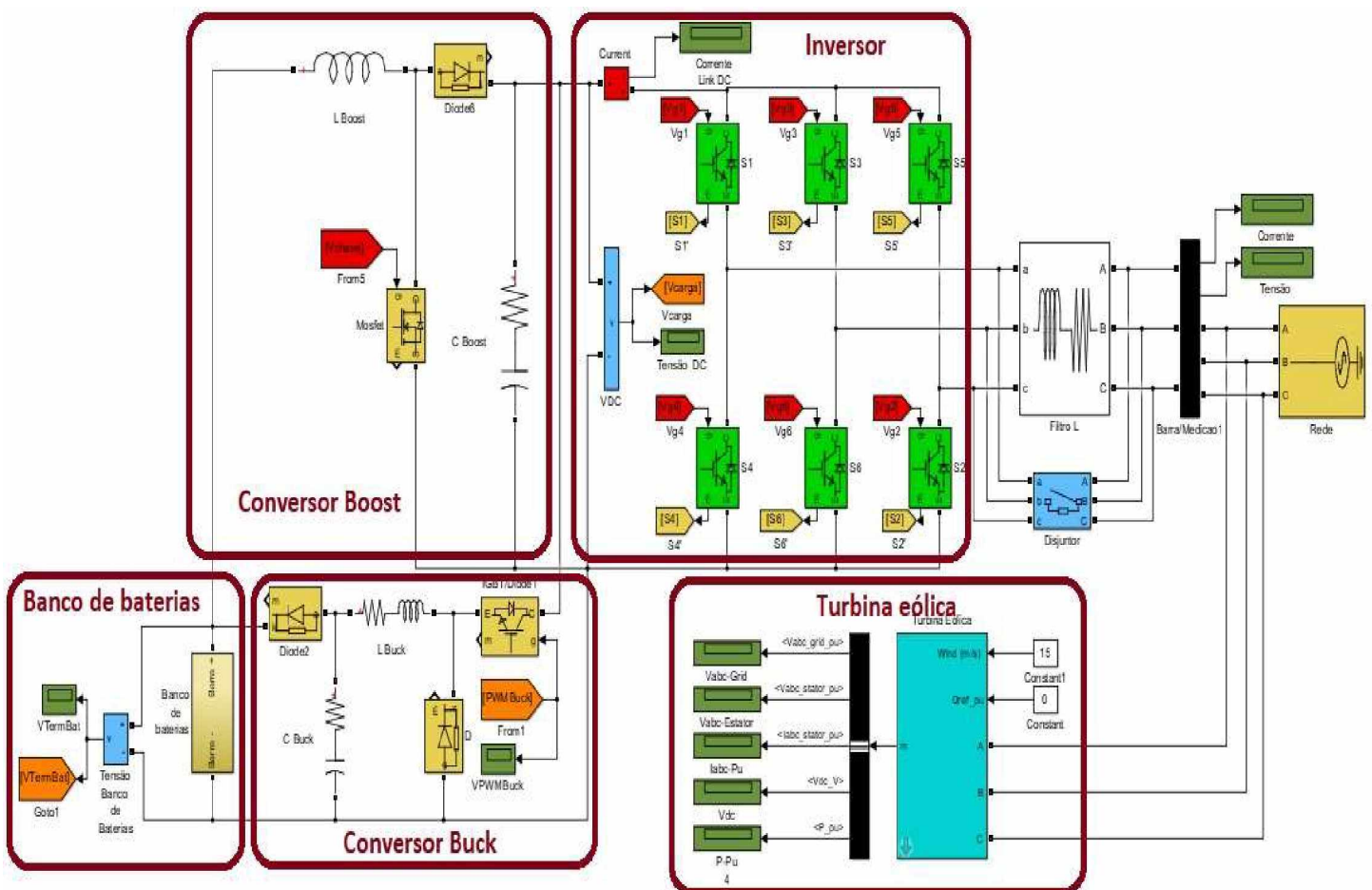


Figura 27: Sistema de armazenamento de energia.

Neste trabalho, não se optou em utilizar o conversor Buck-Boost para conversão CC/CC devido a este conversor ser unidirecional, isto é, possui um diodo que impede a circulação de corrente em ambos os sentidos. A solução deste problema seria possível substituindo o diodo do conversor Buck-Boost por uma chave controlada, entretanto, para deduzir a função transferência deste novo conversor, seria necessário utilizar técnicas de controle que não são apresentadas na graduação.

## 2.4.1 – CONVERSOR BOOST

No sistema proposto acima, o conversor Boost possui como função principal elevar a tensão do banco de baterias, e também, manter a estabilidade do barramento CC quando estiver ocorrendo a injeção de energia na rede. É interessante notar que a tensão de saída do conversor deve ser maior que o efeito de retificação provocado pela rede, devido à característica bidirecional do inversor.

Para manter a estabilidade do barramento CC, mesmo quando houver uma variação no despacho de carga do inversor, deve-se utilizar uma malha de controle que seja veloz e robusta o suficiente para atuar em momentos transitórios. Sendo assim, primeiramente, deve-se conhecer qual é a função de transferência que representa o conversor Boost, e a partir disto, projetar qual é o compensador ideal para a planta.

Segundo [6], a função de transferência do conversor Boost é dada por:

$$\frac{V_o(s)}{d(s)} = G \cdot \frac{\left(1 - \frac{s}{\omega_Z}\right)}{\left(\frac{s^2}{\omega_o^2} + \frac{s}{\varphi \cdot \omega_o} + 1\right)} \quad (25)$$

Onde:

$$G = \frac{V_1}{(1 - D)^2} \quad (26)$$

$$\omega_Z = \frac{(1 - D)^2 \cdot R_o - RL}{L} \quad (27)$$

$$\omega_o = \frac{(1 - D)}{L \cdot C} \cdot \sqrt{1 + \frac{RL}{(1 - D)^2 \cdot R_o}} \quad (28)$$

$$\varphi = \frac{(1 - D)^2 \cdot R_o + RL}{\omega_o \cdot (C \cdot R_o \cdot RL + L)} \quad (29)$$

Os dados de projeto estão indicados na tabela 3.

Dados do conversor	
Indutância ( L )	12,5mH
Capacitância ( C )	10mF
Tensão de entrada (V1)	490 Volts
Tensão de saída (Vo)	900 Volts
Razão cíclica (D)	0,26
Carga (Ro)	9 Ohm
Frequência ( f )	1kHz

Tabela 3: Dados do conversor Boost.

Como mencionado anteriormente, para definir qual é o compensador adequado para o controle da tensão, utilizou-se a ferramenta "PID Tuner – Simulink". Desta forma, o compensador que apresentou uma resposta satisfatória foi do tipo proporcional integral (PI), Figura 28.

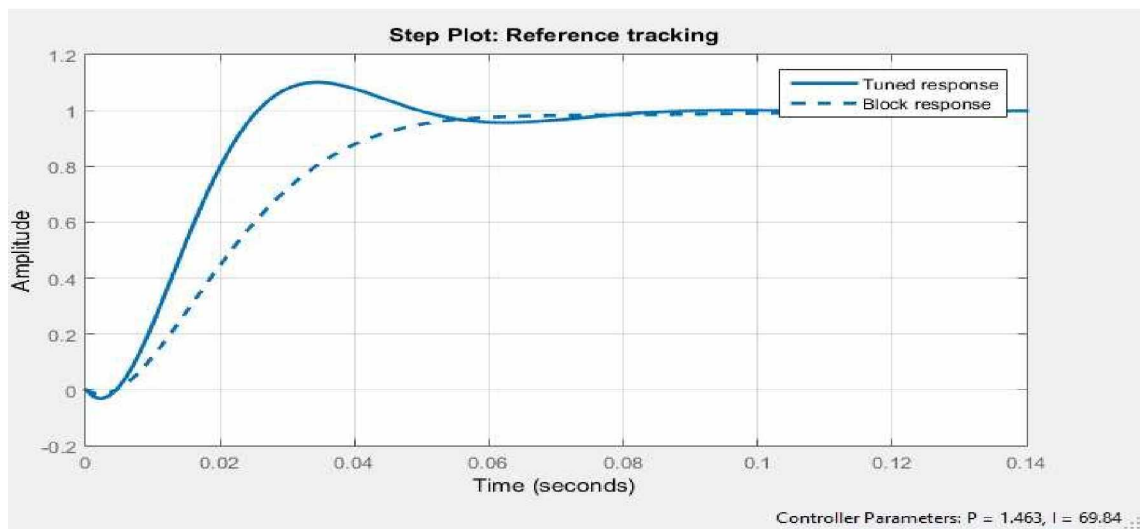


Figura 28: Resposta da planta o compensador PI.

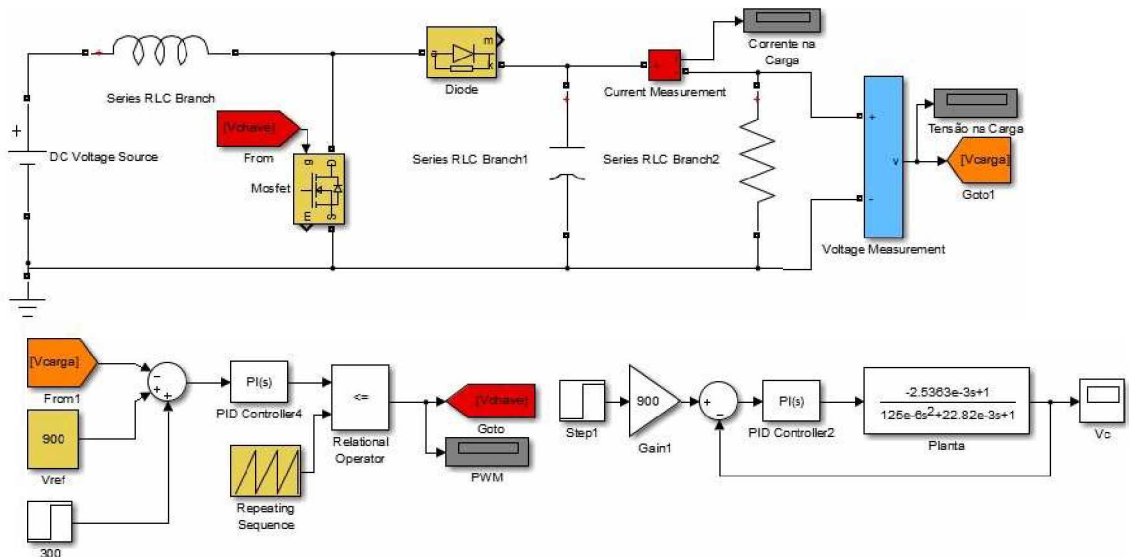


Figura 29: Boost com tensão de saída controlada.

As figuras 29 e 30 ilustram o circuito de potência e o sistema de controle, juntamente com a tensão de saída do conversor, considerando 900 Volts como referência inicial, e 1200 Volts como referência final em 0.3 segundos. Observa-se que a tensão de saída seguiu a referência.

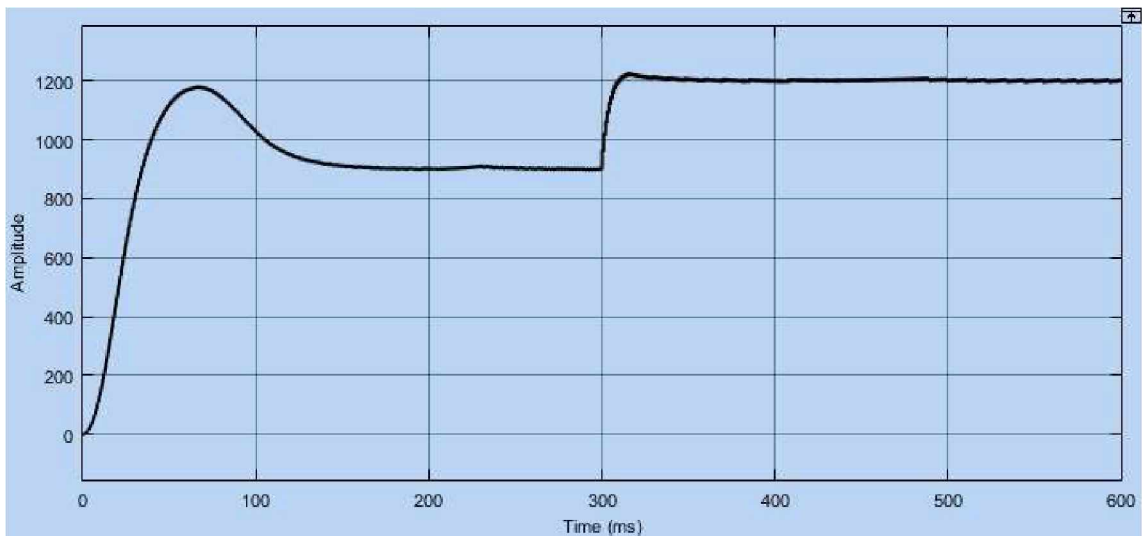


Figura 30: Tensão de saída.

## 2.4.2 – CONVERSOR BUCK

Neste sistema, o conversor Buck possui como função principal realizar a carga do banco de baterias, sendo que a estratégia é armazenar a energia do sistema eólico, para que esta possa ser despachada em um momento oportuno. Para cumprir com este objetivo, o inversor deve funcionar como retificador, e o Buck, abaixar o nível de tensão do barramento CC para um valor que seja compatível com o processo de carga das baterias.

Da mesma forma que foi destacado para o controle do conversor Boost, este item irá focar no controle do conversor Buck, pois o princípio de funcionamento já foi abordado anteriormente. Sendo assim, para realizar o controle deste conversor, foi utilizada a função de transferência mencionada em [6].

$$\frac{V_c(s)}{d(s)} = \frac{V \cdot \omega_o^2}{s^2 + 2 \cdot \rho \cdot \omega_o \cdot s + \omega_o^2} \quad (30)$$

Onde:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (31)$$

$$\rho = \frac{\left(\frac{1}{C \cdot R_o} + \frac{RL}{L}\right)}{2 \cdot \omega_o} \quad (32)$$

Os dados de projeto estão indicados na tabela 4.

Dados do conversor	
Indutância	10mH
Capacitância de entrada	10mF
Capacitância de saída	0.25mF
Tensão de entrada	622 Volts
Tensão de saída	510 Volts
Potência	90kW
Frequência	1kHz

Tabela 4: Dados do conversor Buck.

Para especificar o compensador mais adequado para esta aplicação, utilizou-se a ferramenta “PID Tuner – Simulink”. Através desta ferramenta, concluiu-se que o compensador mais adequado é do tipo proporcional integral, com os parâmetros de acordo com a Figura 31.

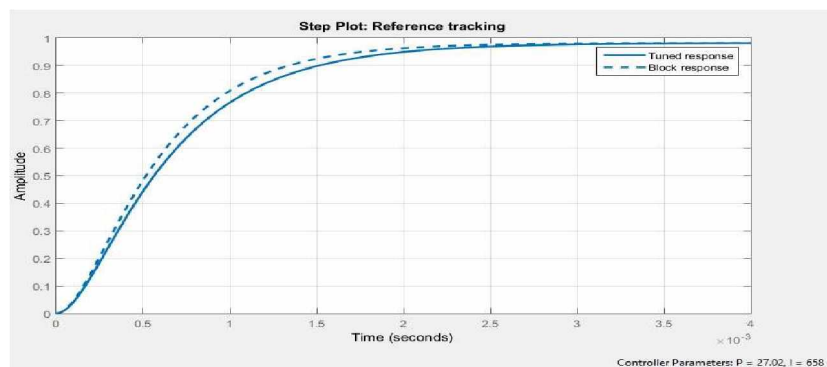


Figura 31: Resposta da planta com o compensador PI.



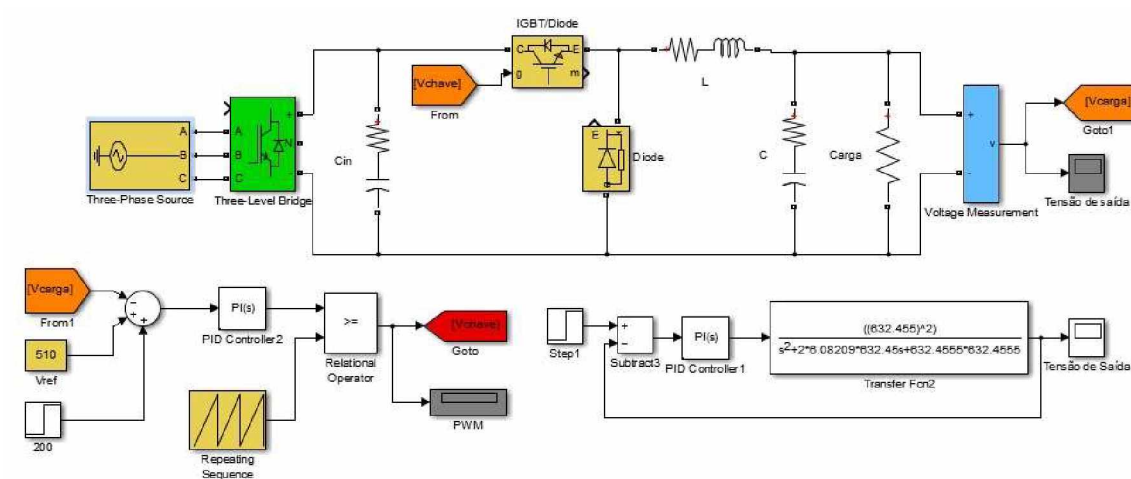


Figura 32: Circuito de potência e sistema de controle.

Uma vez especificada a malha de controle, o circuito de potência deve seguir a tensão de referência do circuito de controle. Na figura 33 é considerado 510 Volts como tensão inicial, e em seguida, aplicado um degrau de tensão na referência, com o objetivo de verificar se o controle continuará seguindo a referência imposta.

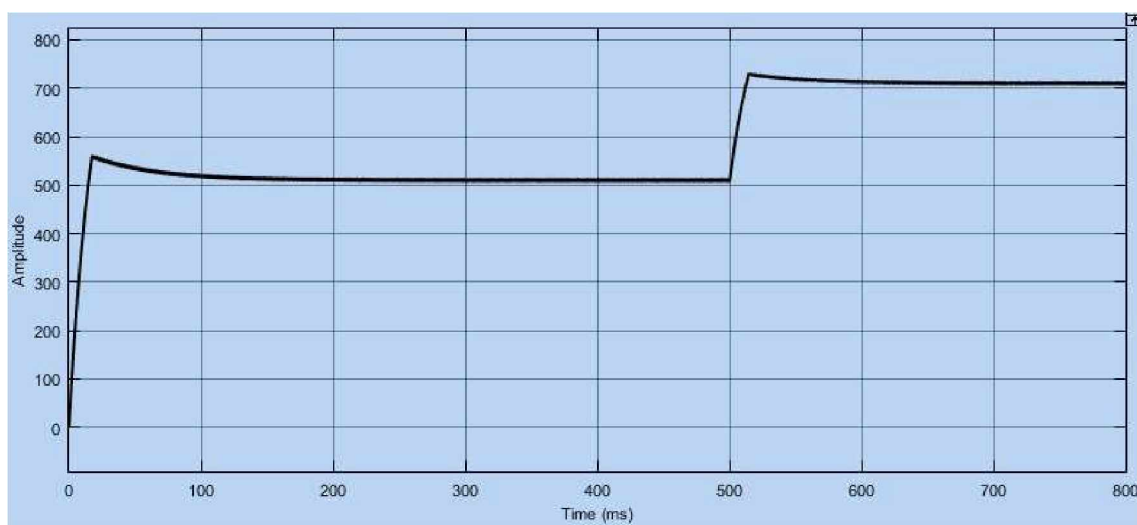


Figura 33: Tensão de saída.

### 2.4.3 – INVERSOR

Nesta aplicação, se faz uso da característica bidirecional do inversor, em que determinado momento é utilizado como retificador (carga do banco de baterias) e em outro como inversor (despacho de carga). Neste item será abordado apenas o funcionamento como inversor, porém a forma de controle será detalhada em trabalhos futuros.

Devido ao parque estar conectado a um barramento considerado infinito, isto é, tensão e frequência constantes, é viável especificar o inversor para operar como

fonte de corrente. Por conseguinte, no contexto de armazenamento de energia, considera-se como referência a corrente injetada na rede, que é proporcional à potência do banco de baterias.

Na figura 34, pode-se notar que a referência do inversor é a corrente  $I_{redeREF}$ , e que esta referência de corrente deve ser verificada no barramento de medição, uma vez que o objetivo é controlar a corrente injetada na rede.

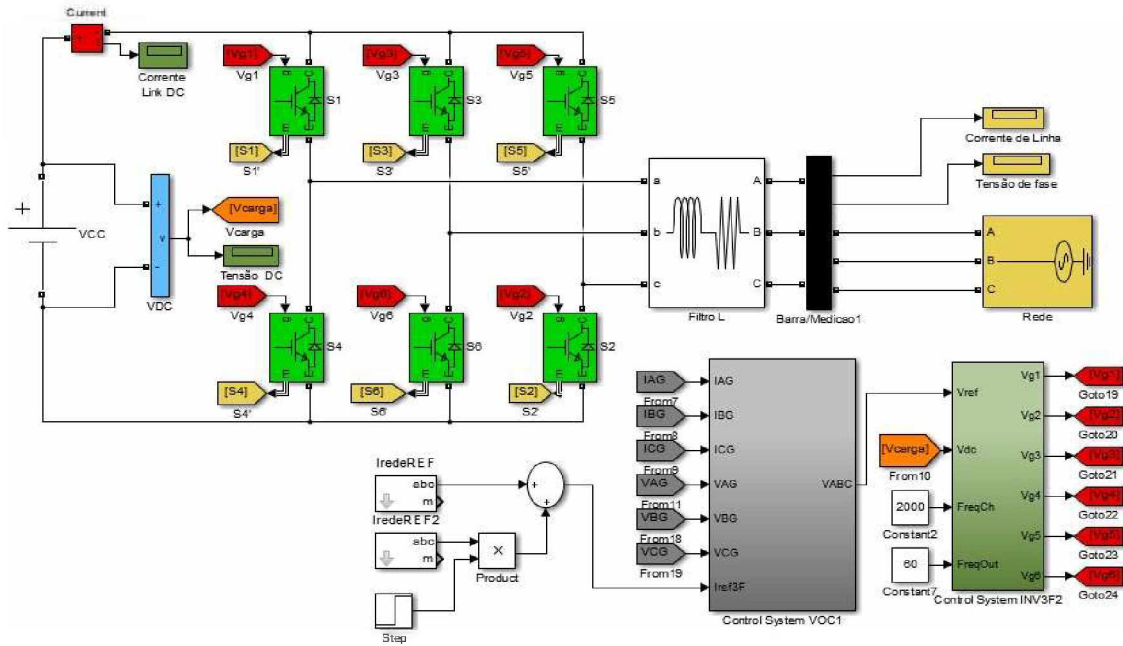


Figura 34: Circuito de potência e sistema de controle.

Observa-se que na Figura 35, a corrente de referência inicia em 100 Amperes, e em 0,55 segundos a referência de corrente passa a ser 150 Amperes, validando o controle de corrente.

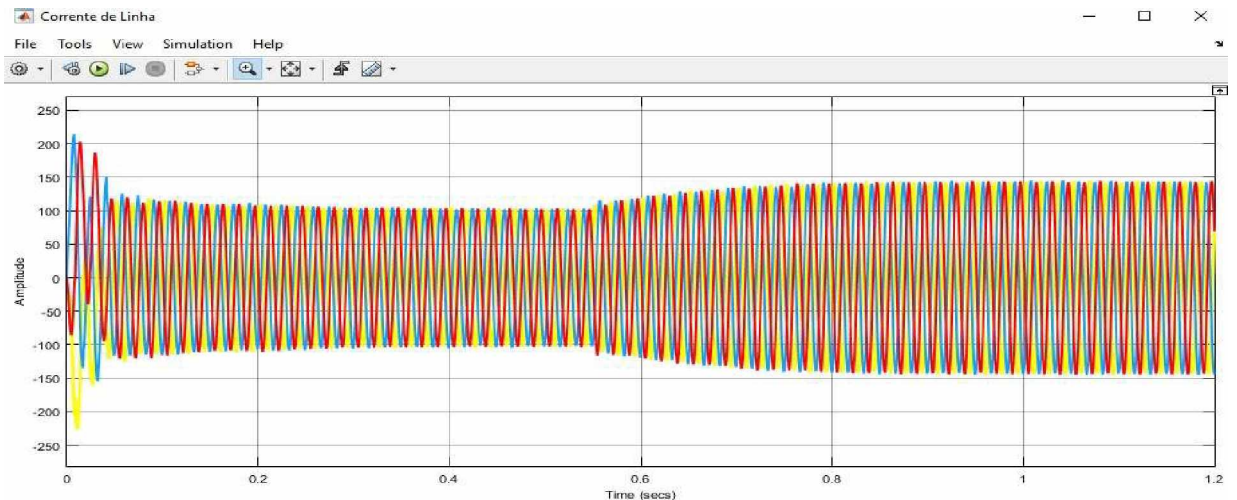


Figura 35: Corrente de linha controlada.

### 3.0 – SIMULAÇÃO DO SISTEMA E RESULTADOS

Neste tópico, será apresentada a simulação do sistema como um todo, considerando a operação do sistema de armazenamento de energia operando em paralelo com o parque eólico e a rede elétrica. Para isso, considere o sistema da Figura 36.

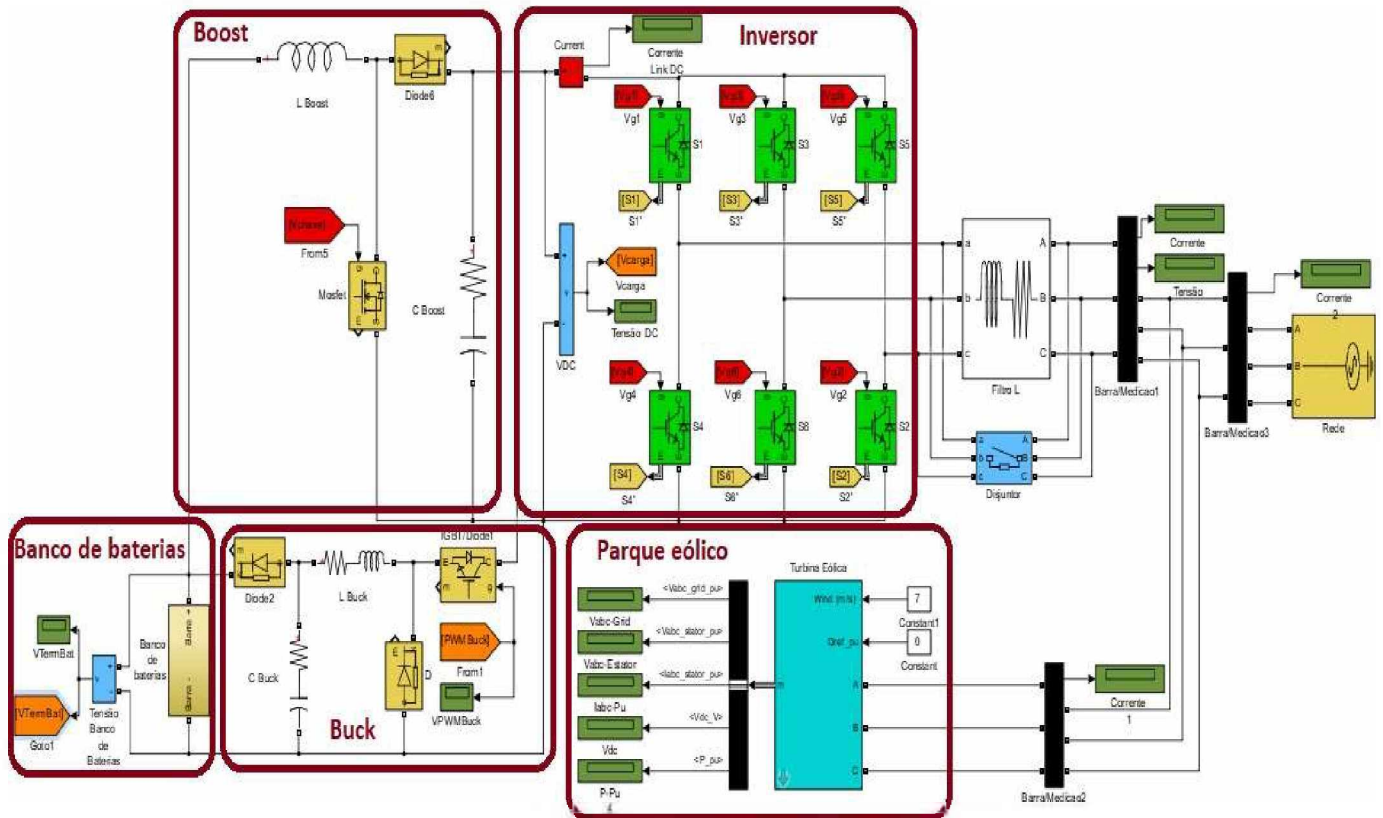


Figura 36: Sistema implementado.

Para validar o funcionamento deste sistema, serão simulados as seguintes situações.

- Sistema injetando energia na rede.
- Sistema armazenando energia.

Para cada caso acima será feito uma simulação, e em seguida, verificando se o sistema se comporta como o esperado.

#### 3.1 – SISTEMA INJETANDO ENERGIA NA REDE

Neste caso, será considerado que o banco de baterias e o parque eólico está injetando energia na rede elétrica. O objetivo principal deste tópico é verificar o somatório de potência ativa proveniente do banco de baterias e do parque eólico,

isto é, não será dado foco no fator de potência, embora este ponto seja de fundamental importância para esta aplicação.

Seguindo esta linha de raciocínio, e considerando que o banco de baterias e o parque eólico se comportam como uma fonte de corrente, uma vez que o controle impõe a potência a ser injetada na rede, pode-se considerar a Figura 37 como o circuito equivalente do sistema.

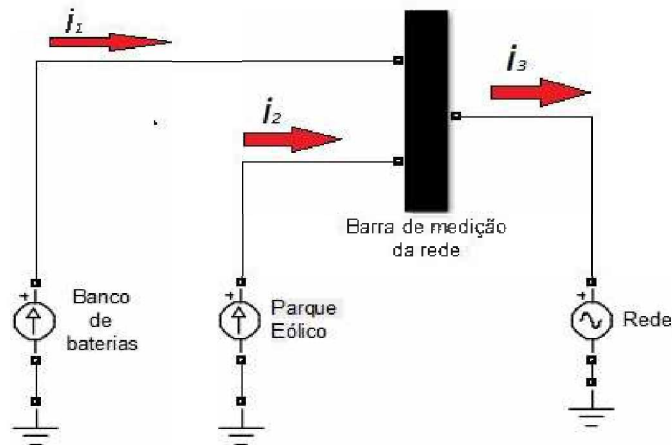


Figura 37: Diagrama unifilar simplificado.

Onde:

$I_1$  = Corrente injetada pelo sistema de armazenamento de energia.

$I_2$  = Corrente injetada pelo parque eólico.

$I_3$  = Corrente injetada na rede.

Na simulação que será apresentada, foi adotado os seguintes valores para o banco de baterias e o parque eólico.

Dados da turbina	
Potência Nominal	500 kW
Velocidade do vento para Coeficiente de potência máximo	11 m/s

Tabela 5: Dados da turbina.

Dados do gerador da turbina	
Potência Nominal	450 kW
Tensão Nominal	730 V
Frequência	60 Hz
Fator de potência	0.9

Tabela 6: Dados do gerador.

<b>Dados mecânicos</b>	
Constante de inércia da turbina	4.32 s
Rigidez do eixo referido ao lado de alta velocidade	0.3 (PU do torque nominal/rad)
Amortecimento mútuo do eixo	1.5 (PU torque nominal/PU dw)

Tabela 7: Dados mecânicos da turbina.

<b>Dados dos conversores</b>	
Indutância de acoplamento com a rede	0.5 PU (baseado na potência do gerador e da tensão nominal do conversor)
Resistência do indutor de acoplamento com a rede	0.003 PU
Potência reativa dos capacitores de filtragem (LCL)	250 kVA
Capacitor de filtragem do barramento CC	90 mF
Indutor do conversor Boost	1.2 mH
Resistência do indutor Boost	0.005 Ohm

Tabela 8: Dados dos conversores eletrônicos.

<b>Dados do banco de baterias</b>	
Número de baterias em série	34
Tensão nominal de cada bateria	13,5 Volts
Capacidade	200Ah

Tabela 9: Dados do banco de baterias.

Na Figura 33, observa-se o sistema de forma completa injetando energia na rede. Como esperado, o conversor Buck está desabilitado, visto que este funciona apenas para a carga do banco de baterias. Os valores de tensão de referência para o conversor Boost e corrente de referência para o inversor podem ser verificados na tabela 10.

<b>Valores de referência para o conversor Boost e Inversor</b>	
Tensão de referência para o barramento CC	900 [Volts]
Corrente de referência para o inversor	100 [Amperes pico]

Tabela 10: Valores de referência para os conversores.



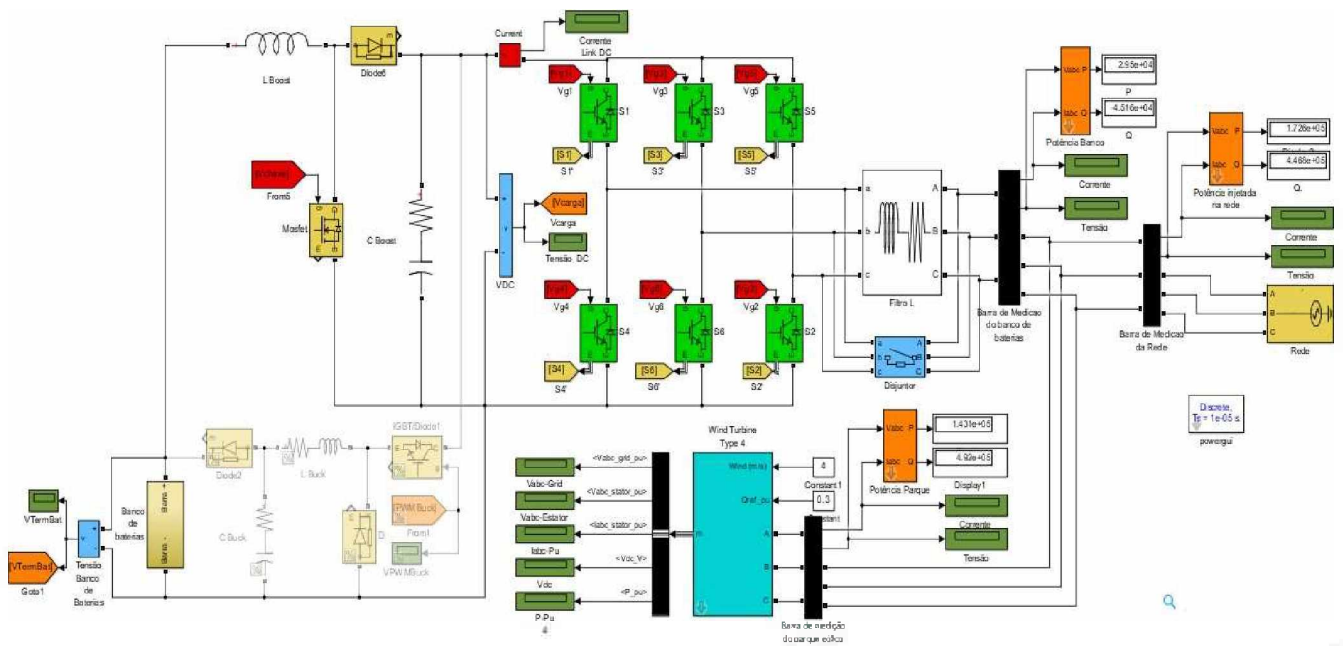


Figura 38: Sistema como um todo injetando energia na rede.

Para que haja o carregamento do barramento CC (Figura 40), foi dado um intervalo de 0.05 segundos antes de habilitar o inversor para o funcionamento. Na Figura 39, verifica-se que a corrente injetada na rede pelo inversor segue a referência mencionada na Tabela 10, e também, possui baixo valor de distorção harmônica (Figura 43).

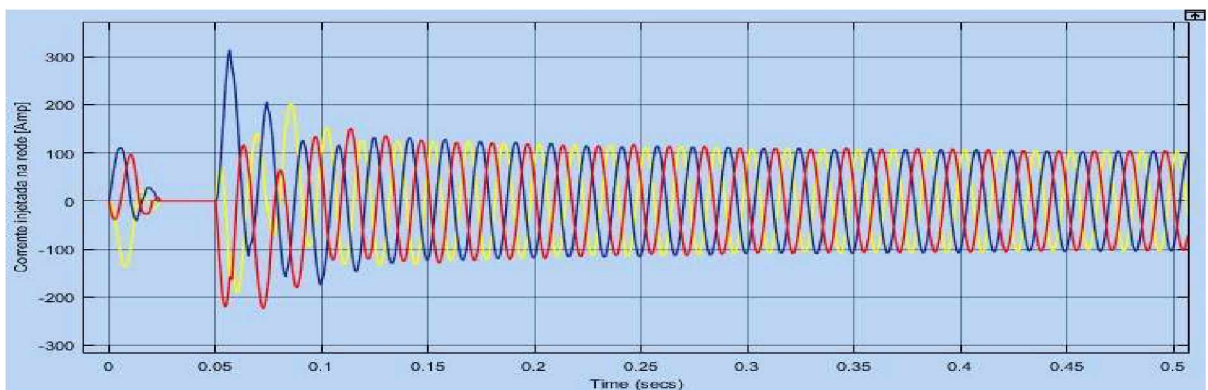


Figura 39: Corrente injetada na rede pelo sistema de armazenamento de energia.

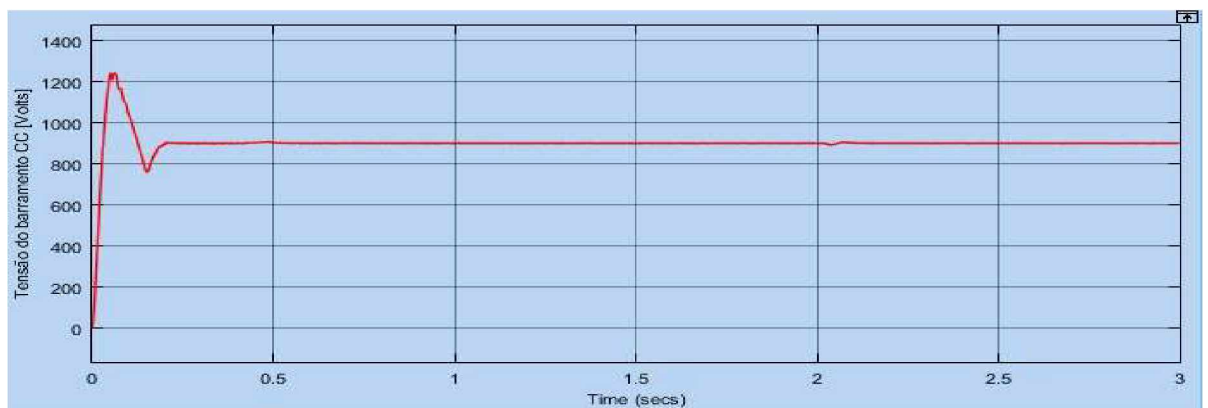


Figura 40: Tensão do barramento CC.

Devido a dinâmica do acionamento da turbina eólica, nota-se na Figura 41 que o sistema apresenta uma certa inércia a ser vencida até atingir o regime permanente. Porém, este transitório não afetou a operação do sistema de armazenamento de energia devido a conexão em paralelo com um barramento infinito.

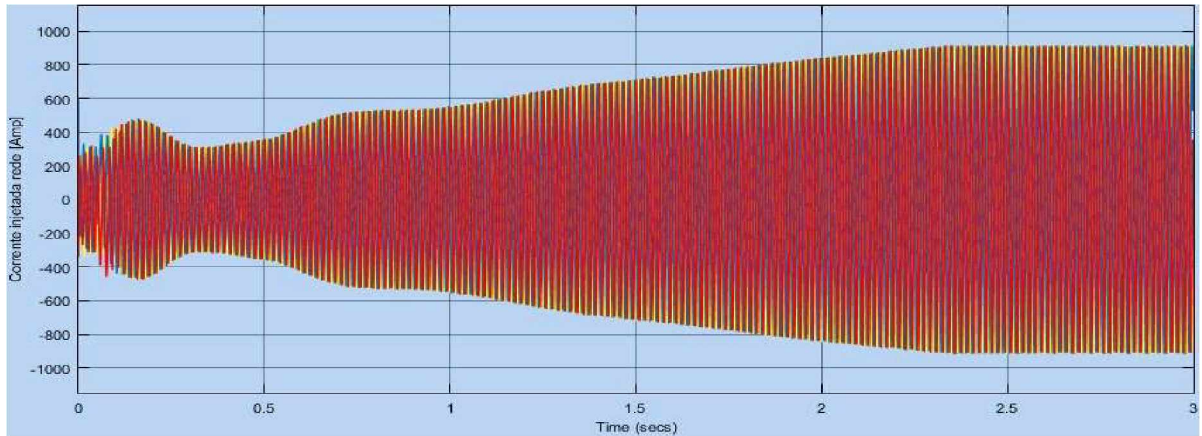


Figura 41: Corrente injetada na rede pelo parque eólico e sistema de armazenamento.

Na Figura 42, nota-se claramente a redução do valor da tensão terminal do banco de baterias, tal situação ocorre devido a simulação possuir apenas uma string de baterias, e poderia ser reduzida com aumento do número de strings em paralelo. Por efeitos de peso computacional, optou-se a utilizar apenas uma string de baterias.

Pode-se validar o somatório das potências ativas do parque eólico e do armazenamento de energia através dos medidores da Figura 38. Veja na figura 43 que a taxa de distorção harmônica da corrente injetada na rede está abaixo dos limites estabelecidos.

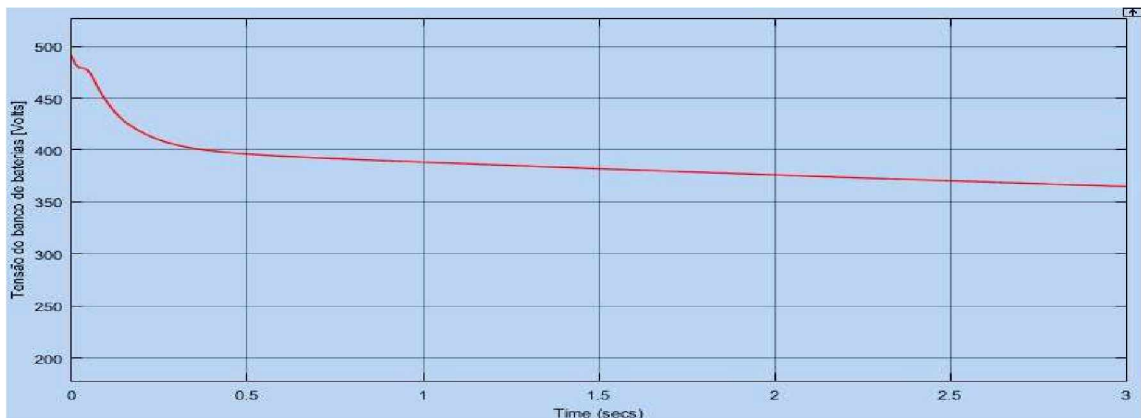


Figura 42: Tensão do banco de baterias.

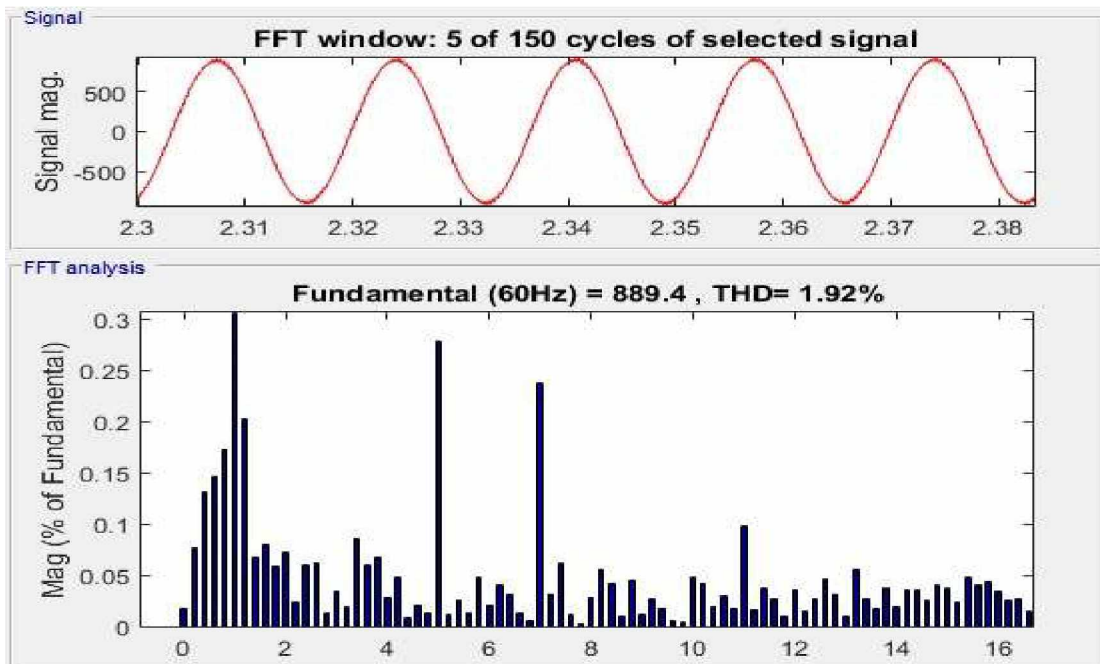


Figura 43: Taxa de distorção harmônica da corrente injetada na rede.

### 3.2 – SISTEMA ARMAZENANDO ENERGIA

A principal finalidade do armazenamento de energia, é reduzir a intermitência do parque eólico e também proporcionar a possibilidade de realizar estratégias no que se refere ao momento ideal para a comercialização de energia. Sendo assim, neste tópico será apresentado os resultados computacionais que se obtiveram na simulação do sistema.

Como apresentado no item 2.4.2, o funcionamento do sistema quando está armazenando energia ocorre através da retificação e do conversor CC/CC Buck. O conversor Buck, juntamente com a sua malha de controle, tem a função de manter a tensão terminal da bateria em um valor fixo e suficiente para manter o processo de carga.

A utilização do Disjuntor em paralelo com o filtro L (Figura 40) é necessário apenas no processo de carga do banco de baterias, evitando queda de tensão e perdas de energia na resistência interna do filtro.



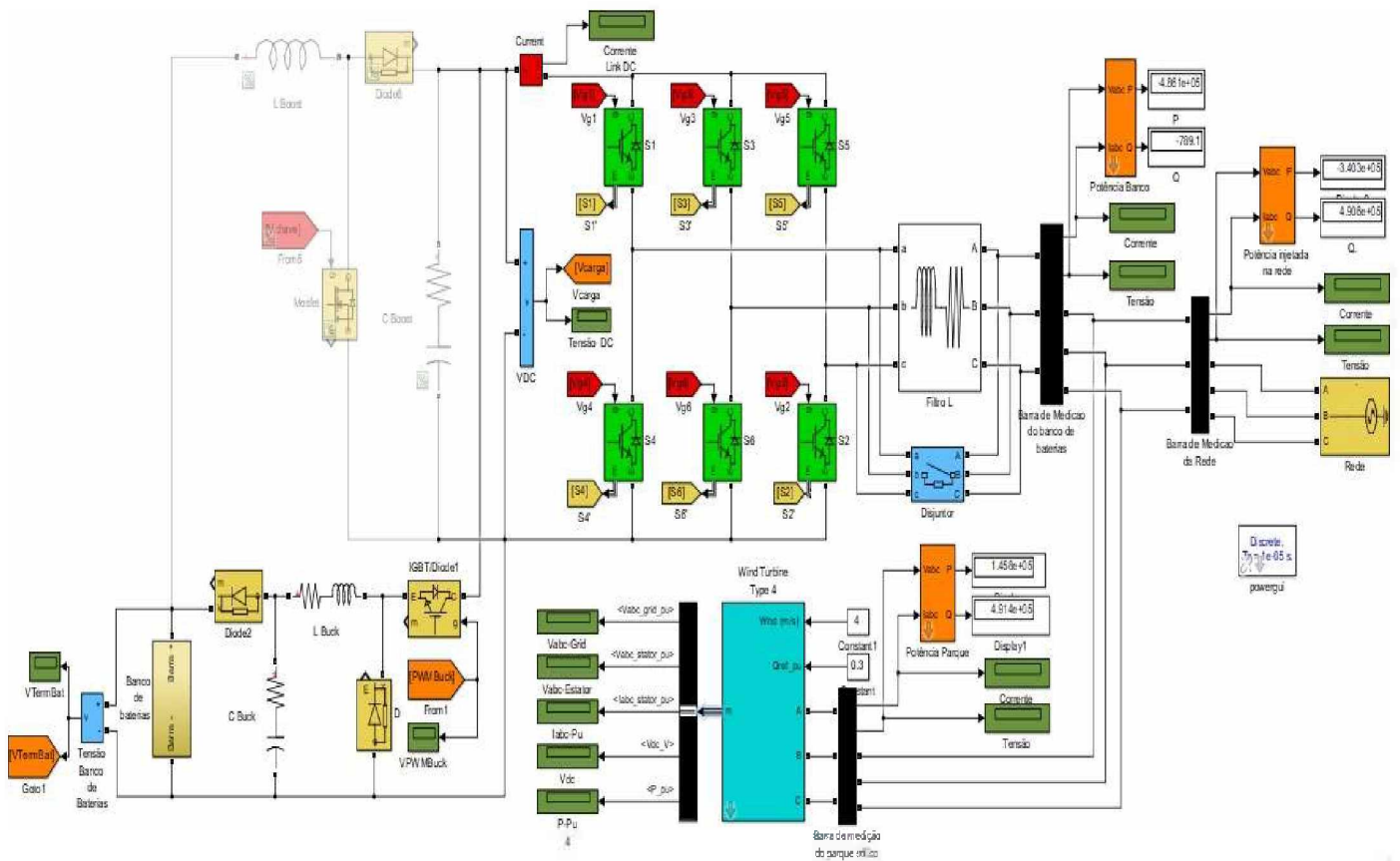


Figura 44: Sistema armazenando energia.

Na Figura 45, pode-se verificar o funcionamento da malha de controle do conversor Buck. Comparando com a Figura 33, pode-se notar que a resposta do controle quando utilizado no sistema como um todo é bastante parecida com a resposta do sistema isolado (item 2.4.2). Com a tensão terminal do banco de acordo com a Figura 45, inicia-se o processo de carga (Figura 46).

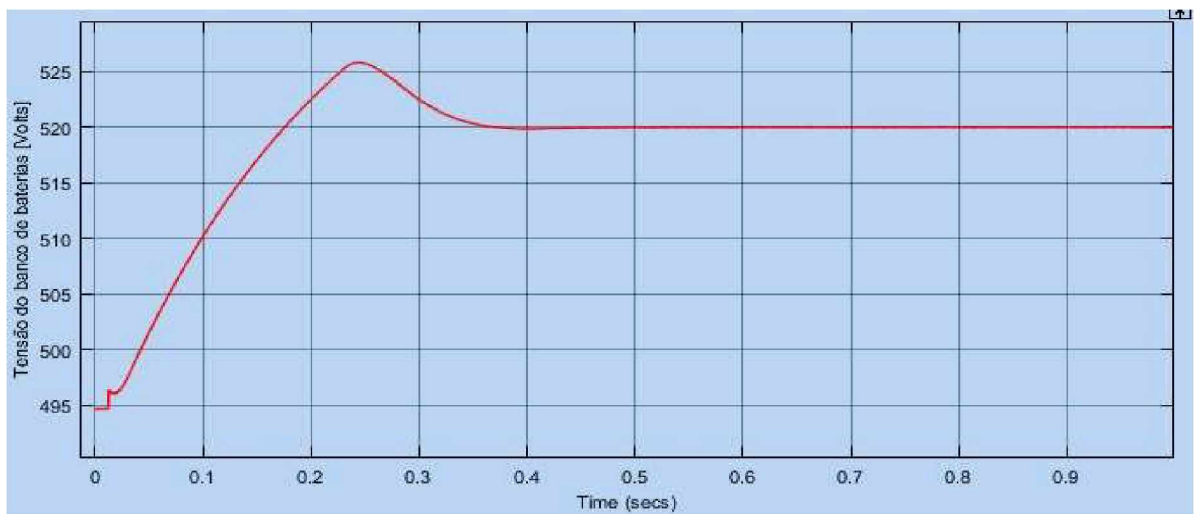


Figura 45: Tensão aplicada no banco de baterias.

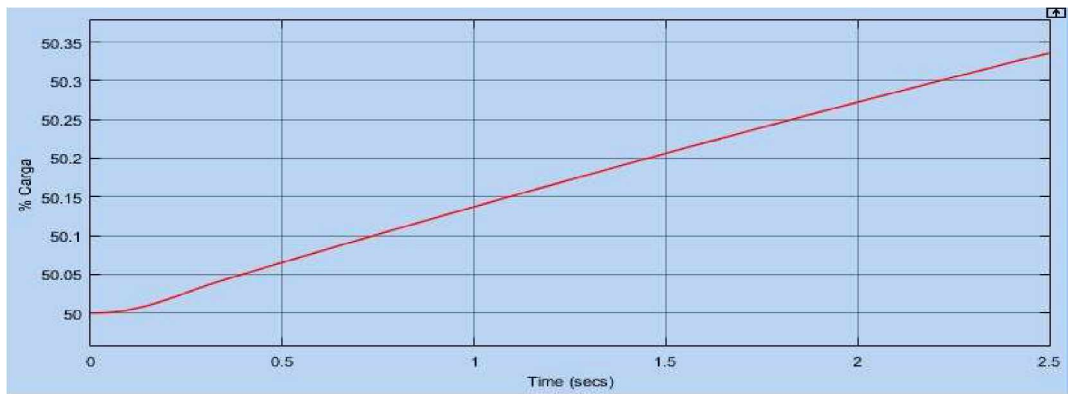


Figura 46: % de carga do banco de baterias.

As formas de onda típicas de um retificador, como tensão de saída e corrente de entrada, podem ser verificadas nas Figuras 47 e 48.

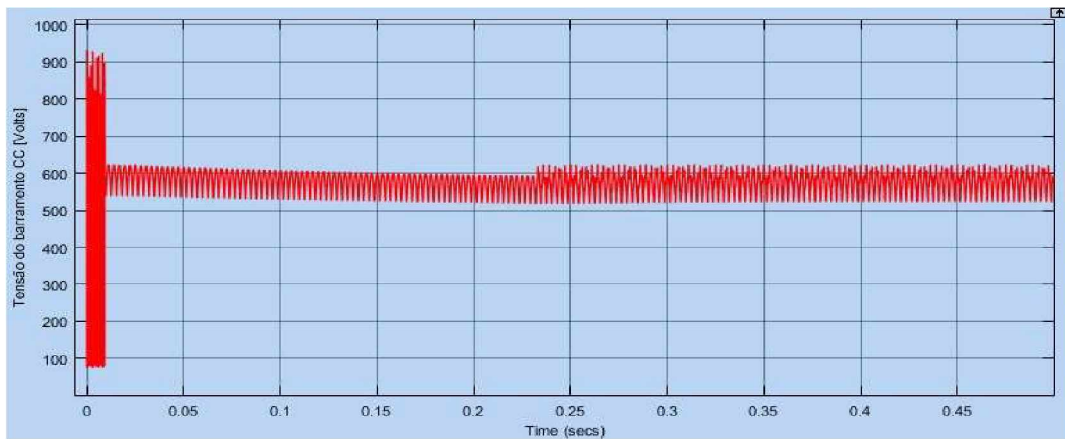


Figura 47: Tensão no barramento CC.

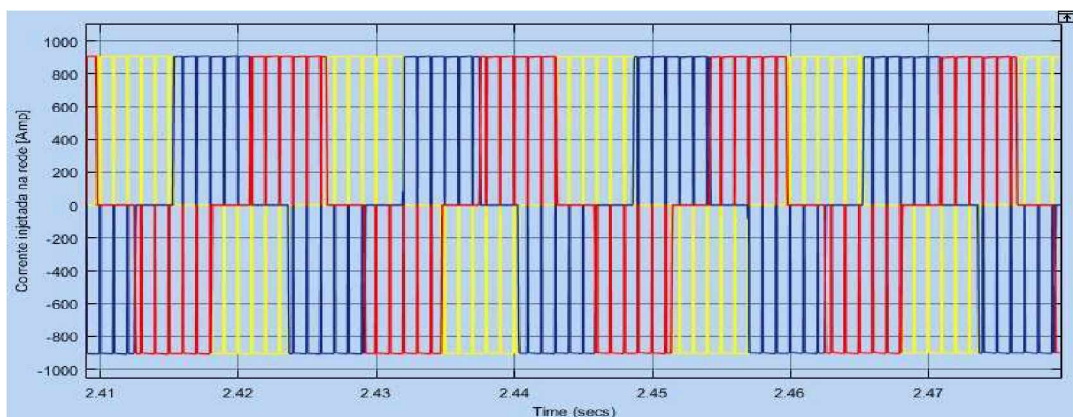


Figura 48: Corrente de entrada do retificador.

## 4.0 – CONCLUSÃO

Diante dos vários desafios presentes no sistema elétrico brasileiro, o sistema de armazenamento de energia se apresenta como uma solução para manter a

confiabilidade do fornecimento de energia, principalmente das fontes renováveis. Um fator importante e determinante nestes sistemas são as baterias utilizadas, uma vez que estas irão passar pelo processo de carga e descarga inúmeras vezes e sob condições diversas.

Por fim, a luz da eletrônica de potência e dos conceitos adquiridos durante a graduação, este trabalho vem como uma proposta de realizar o armazenamento e despacho de energia em parques eólicos.

#### **4.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

É importantíssimo ressaltar que existe vários desafios a serem vencidos para implementar um sistema que realize a compensação de energia com precisão, isto é, para que o sistema de armazenamento injete ou armazene a energia intermitente do parque ou turbina eólica. Sendo assim, visando complementar o trabalho em questão, os próximos passos seriam:

- Realizar a integração da malha de controle das turbinas eólicas com o controle do sistema de armazenamento de energia.
- Verificar quais os ciclos de carga e descarga ideais para o banco de bateria.
- Submeter a turbina ou parque eólico a variações de velocidade do vento, visando verificar a compensação de energia a ser injetada na rede pelo sistema.
- Verificar a funcionalidade de conectar o sistema de armazenamento de energia no barramento CC da turbina eólica, utilizando apenas um inversor.

## 5.0 – REFERÊNCIAS

- [1] Ribeiro, Lucas. Fontes alternativas no Programa de P&D regulado pela ANEEL. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/documents/656831/14942679/2015-10-27+WEA+-+Lucas.pdf/f12ee199-0190-44ac-b03d-4793148d94d8>> Acesso em: 22 ago.2018.
- [2] Marzano, L.G.B.; Maceira, E.P.M.; Justino. T.C.J..O impacto do aumento das fontes intermitentes na operação do sistema. Disponível em:< <https://www.osestoreletrico.com.br/o-impacto-do-aumento-das-fontes-intermitentes-na-operacao-do-sistema/>>. Acesso em: 22 ago. 2018.
- [3] Ackermann, T. et al. Wind Power in Power systems. Stockholm, Sweden: Thomas Ackermann, 2005. 675p.
- [4] Wu, B. et al. Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, 2011. 453p.
- [5] RASHID, Muhammad H. Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações. São Paulo: Makron Books, 1999. 828 p.
- [6] BARBI, Ivo. Eletrônica de potência: Modelagem de conversores CC-CC. Florianópolis: Ed. do Autor, 2015. 218 p.
- [7] Piazza, G. L., Inversor Trifásico, 53 p, Florianópolis, Santa Catarina, 2008.
- [8] S. Sen, K. Yenduri, and P. Sensarma, "Step-by-step design and control of LCL filter based three phase grid-connected inverter," in Proc. IEEE ICIT, 2014, pp. 503-508.
- [9] Norma da Cemig D ND 5.31 "Requisitos para a conexão de acessantes ao Sistema de Distribuição Cemig – Média Tensão". Belo Horizonte, p. 173, 2016.
- [10] Pereira, N. M. C. Simulação de Regimes de Carga e Descarga em Baterias. 2016. p. 128. Dissertação, Engenharia Eletrotécnica – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.