



**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS EÓLICOS  
NA PRESENÇA DE BANCOS DE BATERIAS**

**JOAO FRANCISCO LONDE DOS SANTOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS EÓLICOS  
NA PRESENÇA DE BANCOS DE BATERIAS**

**João Francisco Londe dos Santos**

Trabalho final de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

**APROVADO POR:**

---

**Prof. Francis Arody Moreno Vásquez, D.Sc. (ENE-UnB)**  
(Orientador)

---

**Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho, D.Sc. (ENE-UnB)**  
(Examinador Interno)

---

**Prof. Fernando Cardoso Melo, D.Sc. (ENE-UnB)**  
(Examinador Interno)

**Brasília/DF, 16 de fevereiro de 2023.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

LONDE DOS SANTOS, JOÃO FRANCISCO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS EÓLICOS NA PRESENÇA DE BANCOS DE BATERIAS. [Distrito Federal] 2023.

xiii, XXp., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2023).

Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Fontes renováveis

2. Gerador síncrono

3. Controle de turbinas eólicas

4. MPPT

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LONDE, J.F. (2023). Modelagem e simulação de sistemas na presença de bancos de baterias, Trabalho de Graduação, Publicação XXXX, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, XX p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: João Francisco Londe dos Santos

TÍTULO: Modelagem e simulação de sistemas na presença de bancos de baterias.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

João Francisco Londe dos Santos

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

## DEDICATÓRIA

Para minha mãe, familiares e amigos  
por demonstrarem apoio incondicional  
durante toda a minha trajetória.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, por ter moldado a pessoa que sou hoje e por todos os ensinamentos que levo na minha vida até hoje.

Agradeço aos meus familiares por todo o apoio, confiança e investimento que fizeram em mim para que pudesse chegar onde eu cheguei. Nos momentos difíceis eram vocês que estavam comigo!

Ao Rafael, Hermano e Waltinho que estiveram do meu lado nos melhores momentos da minha vida.

A Rebeca, por me aturar no dia a dia e me colocar pra cima sempre que for preciso.

Aos meus amigos do Apito: Mateus, Paulinho e Pedrinho, que estiveram comigo desde o primeiro semestre e que junto comigo sairão bem empregados da faculdade!

Aos meus amigos da Universidade: Atlético Polarizada, ENETEC, IEEE Cis, Apuama Racing e colegas do ENE. Se eu cheguei onde eu cheguei, foi por causa de vocês!

Aos meus amigos da vida: Sempre aprendi muito com todos vocês, seja no âmbito pessoal, seja no âmbito profissional. É sempre um prazer compartilhar experiências.

Agradeço, ao meu professor e orientador Francis, por ter me dado a oportunidade de aprender e muito com ele em um projeto de PIBIC que se tornou este TCC, sem a ajuda do senhor nada disso seria possível!

## RESUMO

Neste trabalho, foi realizada uma análise do comportamento de um sistema eólico conectado a rede elétrica, e acoplado de um banco de baterias no barramento de corrente contínua. Para isso, a turbina foi modelada com base na curva do coeficiente de potência e a mesma foi conectada de forma mecânica ao gerador síncrono a ímã permanente (PMSG). O terminal da máquina é conectado a um retificador de seis pulsos não controlado, seguido de um conversor boost onde seu ponto de máxima potência (MPPT) é implementado. A saída do capacitor é conectada a um inversor controlado conectado a rede, assim como o banco de baterias é conectado a um conversor buck-boost, usado para o gerenciamento do fluxo de potência. Os resultados mostram que as baterias fornecem energia para a rede quando elas estão previamente carregadas, ou absorvem potência do gerador para carregar em momentos de pouca demanda, aumentando assim a confiabilidade de sistemas eólicos.

**Palavras-chave:** Fontes renováveis; Gerador síncrono; Banco de Baterias; Gerenciamento de energia.

## ABSTRACT

This paper assesses the behavior of a grid-connected wind energy unit with a battery storage system coupled to its DC bus. For that, the wind turbine is modeled based on its power coefficient curve and it is mechanically coupled to a permanent magnet synchronous generator (PMSG). The terminal of the machine is connected to a non-controlled six-pulse rectifier followed a boost converter where maximum power point tracking (MPPT) is implemented. The output capacitor is connected to a controlled grid-connected inverter, as well as a battery bank through a buck-boost converter used for electric power management. The results show the way the battery supplies electrical energy to the grid if previously charged, or absorbs power from the generator for charging process during light demand, improving the reliability of the wind system.

**Keywords:** Renewable energy, PMSG, battery bank energy management

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iii
<b>Lista de Tabelas</b>	vii
<b>Lista de Símbolos</b>	viii
<b>Glossário</b>	xi
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do tema . . . . .	1
1.2 Objetivos do Trabalho . . . . .	5
1.3 Organização do Trabalho . . . . .	5
<b>Capítulo 2 – Fundamentação Teórica</b>	7
2.1 Turbina Eólica . . . . .	7
2.1.1 MPPT - Perturba e Observa . . . . .	9
2.2 Gerador Síncrono a Ímã Permanente . . . . .	10
2.3 Retificador Trifásico Não Controlado . . . . .	11
2.4 Conversores CC-CC . . . . .	11
2.4.1 Conversor Boost . . . . .	13
2.4.2 Conversor Buck-Boost . . . . .	14
2.5 Baterias . . . . .	15
2.6 Inversor Trifásico . . . . .	16
2.6.1 Controle do Inversor . . . . .	17
2.7 Filtro LCL . . . . .	19
2.8 Modelo médio . . . . .	21
2.8.1 Modelo médio em conversores . . . . .	21
2.8.1.1 Conversor Boost . . . . .	23



---

2.8.1.2	Conversor Buck-Boost Bidirecional . . . . .	23
2.8.2	Modelo Médio no Inversor . . . . .	24
<b>Capítulo 3 – Modelagem do Sistema</b>		<b>27</b>
3.1	Turbina Eólica . . . . .	28
3.2	Gerador de Ímã Permanente . . . . .	30
3.3	Retificador Trifásico . . . . .	31
3.4	Conversor Boost . . . . .	32
3.5	Conversor Buck-Boost . . . . .	34
3.6	Bateria . . . . .	35
3.7	Inversor . . . . .	35
3.8	Filtro LCL . . . . .	36
3.9	Rede . . . . .	37
<b>Capítulo 4 – Resultados</b>		<b>38</b>
4.1	Teste de Funcionamento do MPPT . . . . .	38
4.2	Funcionamento do Sistema sem as Baterias . . . . .	42
4.3	Teste de Carregamento e Descarregamento nas Baterias Sem a Rede Elétrica . . . . .	46
4.3.1	Teste de Carregamento das Baterias . . . . .	46
4.3.2	Teste de Descarregamento das Baterias . . . . .	50
4.4	Funcionamento do Sistema com as Baterias . . . . .	54
<b>Capítulo 5 – Conclusões</b>		<b>63</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>65</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Gráfico - OIE - 2021 e 2022 . . . . .	2
1.2	CAPACIDADE EÓLICA MUNDIAL . . . . .	3
1.3	Previsão de início de operação . . . . .	3
2.1	Fluxograma do MPPT . . . . .	9
2.2	Retificador Trifásico Não Controlado . . . . .	11
2.3	Conversor CC-CC e forma de onda da tensão de saída . . . . .	12
2.4	Ganho estático em função de D . . . . .	12
2.5	Conversor Boost . . . . .	13
2.6	Conversor Buck-Boost . . . . .	14
2.7	Conversor Buck-Boost . . . . .	14
2.8	Inversor Trifásico . . . . .	16
2.9	Condução dos transistores . . . . .	17
2.10	Inversor e Filtro . . . . .	17
2.11	Fluxograma VOC . . . . .	18
2.12	Topologia Filtro LCL . . . . .	20
2.13	Conversor Buck-Boost . . . . .	21
2.14	Representação para o modelo médio . . . . .	24
2.15	Circuito Equivalente de Eixo Direto . . . . .	26
2.16	Circuito Equivalente de Eixo de Quadratura . . . . .	26

---

3.1	Sistema Completo . . . . .	27
3.2	Turbina . . . . .	28
3.3	Potência gerada para diferentes velocidades de vento . . . . .	29
3.4	Curva de Potência da Turbina . . . . .	29
3.5	Turbina . . . . .	30
3.6	Gerador . . . . .	31
3.7	Retificador Trifásico . . . . .	31
3.8	Conversor Boost . . . . .	32
3.9	Conversor Buck-Boost . . . . .	34
3.10	Inversor . . . . .	35
3.11	Lógica de Controle do Inversor . . . . .	36
3.12	Filtro LCL . . . . .	37
4.1	Velocidade do Vento . . . . .	39
4.2	Rotação da Turbina . . . . .	39
4.3	Lambda . . . . .	40
4.4	Coefficiente de Potência $C_p$ . . . . .	40
4.5	Potência Mecânica . . . . .	41
4.6	Torque Mecânico e Eletromagnético . . . . .	41
4.7	Coefficiente de Potência . . . . .	42
4.8	Tensão Antes e Depois do Boost . . . . .	43
4.9	Frequência do Sistema . . . . .	43
4.10	Potência do Gerador . . . . .	44
4.11	Tensão da Rede . . . . .	44
4.12	Tensão da Rede . . . . .	45
4.13	Corrente da Rede em Toda a Simulação . . . . .	45

---

4.14	Corrente da Rede em uma Amostra Pequena . . . . .	46
4.15	Ciclo de Trabalho do Conversor Buck-Boost . . . . .	47
4.16	Carregamento da Bateria . . . . .	47
4.17	Coefficiente de Potência . . . . .	48
4.18	Tensão no Conversor Boost . . . . .	48
4.19	Corrente na Bateria . . . . .	49
4.20	Tensão na Bateria . . . . .	49
4.21	Corrente do Sistema . . . . .	50
4.22	Potência no Sistema . . . . .	50
4.23	Ciclo de Trabalho do Conversor Buck-Boost . . . . .	51
4.24	Carregamento da Bateria . . . . .	51
4.25	Coefficiente de Potência . . . . .	52
4.26	Tensão no Conversor Boost . . . . .	52
4.27	Corrente na Bateria . . . . .	53
4.28	Tensão na Bateria . . . . .	53
4.29	Corrente do Sistema . . . . .	54
4.30	Potência no Sistema . . . . .	54
4.31	Coefficiente de Potência . . . . .	55
4.32	Ciclo de Trabalho do Buck-Boost . . . . .	55
4.33	Potência no Boost . . . . .	56
4.34	Tensão Antes e Depois do Boost . . . . .	57
4.35	Potência . . . . .	58
4.36	Frequência do Sistema . . . . .	58
4.37	Tensão da Rede . . . . .	59
4.38	Tensão da Rede . . . . .	59

---

4.39	Corrente da Rede em Toda a Simulação . . . . .	60
4.40	Corrente da Rede em uma Amostra Pequena . . . . .	60
4.41	Carregamento da Bateria . . . . .	61
4.42	Tensão na Bateria . . . . .	61
4.43	Corrente na Bateria . . . . .	62

## LISTA DE TABELAS

3.1	Parâmetros da Turbina . . . . .	30
3.2	Parâmetros do Gerador . . . . .	31
3.3	Parâmetros do Conversor Boost . . . . .	34
3.4	Parâmetros do Conversor Buck-Boost . . . . .	34
3.5	Parâmetros da Bateria . . . . .	35
3.6	Parâmetros do Filtro LCL . . . . .	37
3.7	Parâmetros da Rede Elétrica . . . . .	37

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Velocidade de ponta de pá.
$\beta$	Ângulo de passo.
$E_c$	Energia cinética dos ventos.
$m$	Massa de ar.
$v$	Velocidade do vento.
$P_{vento}$	Potência disponível do vento.
$A$	Área varrida pelas pás.
$C_p$	Coefficiente de potência.
$\rho$	Densidade do ar.
$R$	Raio da turbina.
$\omega_r$	Frequência angular do rotor.
$P_e$	Potência perdida.
$P_u$	Potência útil.
$T_m$	Torque mecânico.
$P_{mec}$	Potência mecânica.
$C_q$	Coefficiente do conjugado.
$n_r$	Velocidade de rotação do rotor.
$f_s$	Frequência da tensão alternada nos enrolamentos do estator.
$n_p$	Número de polos.

---

$n_{\phi,r}$	Velocidade de rotação do campo magnético do rotor.
$f_r$	Frequência da tensão alternada nos enrolamentos do rotor.
$n_{\phi,s}$	Velocidade de rotação do campo magnético do estator.
$f_{re}$	Frequência da rede elétrica.
$V_{dc}$	Tensão no barramento CC.
$s$	Escorregamento.
$\omega_s$	Frequência angular síncrona.
$V_s$	Tensão no estator.
$I_s$	Corrente do estator.
$E_s$	Força eletromotriz induzida no estator.
$L_s$	Indutância do estator.
$R_s$	Resistência do estator.
$V_r$	Tensão no rotor.
$I_r$	Corrente do rotor.
$E_r$	Força eletromotriz induzida no rotor.
$L_r$	Indutância do rotor.
$R_r$	Resistência do rotor.
$L_m$	Indutância mútua
$\omega_{sl}$	Frequência angular de escorregamento.
$f_{sl}$	Frequência de escorregamento.
$\phi$	Fluxo magnético.
$k_s$	<i>stator wind factor.</i>
$N_s$	Número de enrolamentos do estator.
$\Psi$	Enlace de fluxo.



---

$S_l$	Taxa de escorregamento.
$N_r$	Número de enrolamentos do rotor.
$Z_{eq}$	Impedância equivalente do CLRo.
$R_{eq}$	Resistência equivalente do CLRo.
$X_{eq}$	Indutância equivalente do CLRo.
$P_{ag}$	<i>Air gap power.</i>
$T_{max}$	Torque máximo.
$s_{Tmax}$	Escorregamento para o torque máximo.
$P_{cu,r}$	Perdas no rotor.
$P_{cu,s}$	Perdas no estator.
$\phi_s$	Ângulo de fator de potência do estator.
$R_r$	Resistência do rotor.

## GLOSSÁRIO

CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
AC	Alternate Current
DC	Direct Current
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
PI	Controlador Proporcional - Integral
PID	Controlador Proporcional - Integral - Derivativo
PSMG	Permanent Magnet Sincronous Machine

# INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Desde o século passado, tem sido bastante evidente como a energia elétrica é o fator mais influente no desenvolvimento econômico e tecnológico no mundo. Para isso, as fontes mais utilizadas eram a hidráulica e os combustíveis fósseis e, de fato, essa realidade ainda é mantida em diversos lugares do mundo. Contudo, esse cenário vem mudando a medida que o mundo dá sinais de alerta por meio de fenômenos climáticos, como o aquecimento global (IRMAK *et al.*, 2014).

O Estudo do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 do Ministério de Minas e Energia - MME, aborda as metas globais. Nele consta a adequação para a realidade brasileira do ODS 7 - Energia acessível e limpa, estabelecendo metas nacionais e alguns indicadores que metrificam o progresso e dentre elas pode-se destacar algumas, que ilustram a demanda nacional e internacional por fontes renováveis.

A ideia central é de que até 2030 seja assegurado o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia. Além disso, visa manter elevada a participação de energias renováveis na matriz energética nacional e reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa.

De acordo com o Boletim Mensal de energia de Agosto de 2022 do Ministério de Minas e Energia – MME, a oferta interna de energia (OIE) pode ser negativa devido a menor geração de energia térmica comparado a 2021. Em contrapartida, as fontes renováveis tiveram crescimento de 2 pontos percentuais, indo de 44,7% do OIE, para

46,7%. Agora, olhando para a energia eólica separadamente, o relatório aponta que para a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) de 2022, a previsão de crescimento da matriz eólica é de mais de 13%, indo de 10,6 TWh, para 11,8 TWh. Assim, as previsões apontam para a mudança na matriz amplamente noticiada e discutida mundo a fora por conferências internacionais como a COP 27 (MASILI; RAMOS, 2021).

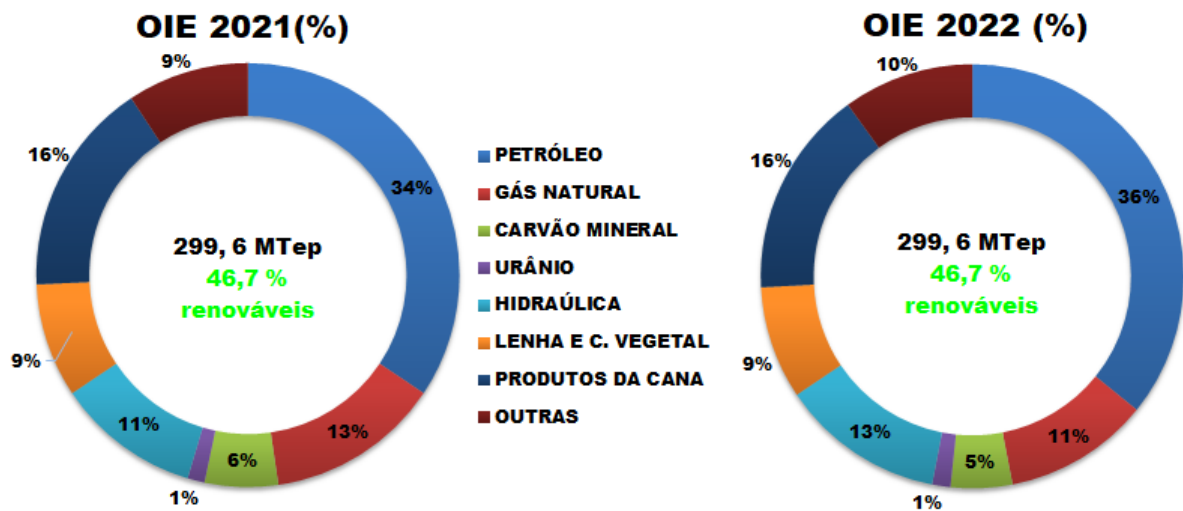
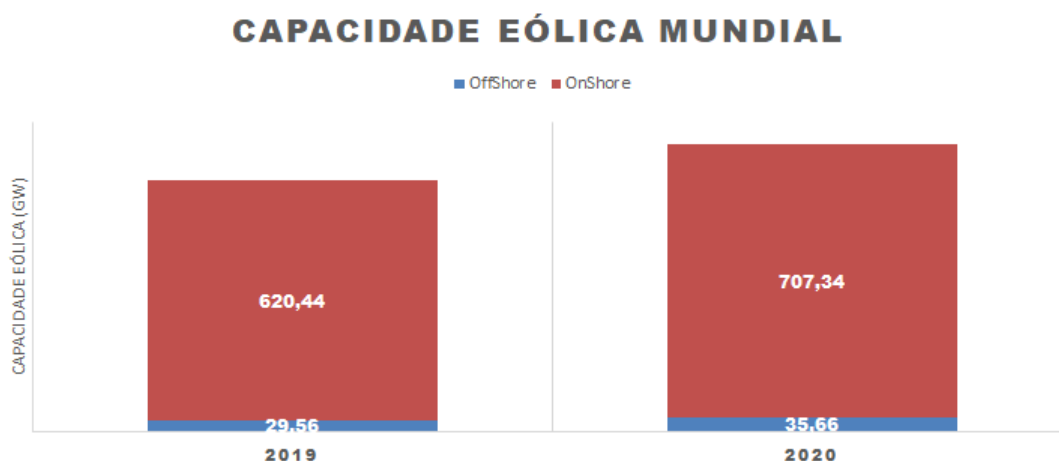


Figura 1.1. Gráfico - OIE - 2021 e 2022

Segundo o GWEC Global Wind report de 2021, 2020 foi o melhor ano da história para a indústria de geração eólica. Mais de 93 GW foram instalados, e este número representou um aumento de 58% no comparativo anual da matriz eólica mundial, o que proporcionou um salto na capacidade mundial para 743 GW instalados. 2020 também quebrou recordes nos segmentos onshore e offshore. Os mercados da Ásia do Pacífico e América instalaram 74 GW de capacidade eólica onshore, um aumento de 76% em relação a 2019. Já no mercado offshore, o crescimento foi de 6,1 GW de potência instalada, possibilitando assim que o segmento tenha uma fatia de 4,8% da capacidade eólica mundial (LEE; ZHAO, 2021).

De acordo com o Relatório de Acompanhamento da Expansão da Oferta (Ralie) publicado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a previsão é de 157 novas usinas eólicas entrem em operação comercial no ano de 2023, totalizando 5845,26 MW de potência. Agora olhando os dados até 2029, as perspectivas são ainda mais animadoras, tendo em vista que, até o momento, estão previstas para entrar em operação comercial, 443 usinas, que totalizam novos 16229,20 MW de potência elétrica [Atualizado



**Figura 1.2.** CAPACIDADE EÓLICA MUNDIAL

pela ANEEL em 14 de novembro de 2022 e disponível em <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao> - Ralie - Acompanhamento da Expansão da Geração.].



**Figura 1.3.** Previsão de início de operação

É notório como o vento tem ocupado um lugar relevante na matriz energética de diversos países, como o Brasil. Isso porque a diversidade geográfica permite que o potencial eólico e a irradiância solar é bastante presentes em diversas regiões. Assim, as turbinas eólicas e os painéis fotovoltaicos vem sendo implantados em escala residencial, assim como em maiores escalas que podem inclusive serem conectadas a sistemas de distribuição e transmissão, dependendo da potência gerada (CARCANGIU; MONTISCI, 2012).

Apesar disso, alguns pontos devem ser considerados considerados quando tratamos

da energia do vento. O fato da demanda por esse tipo de construção não ser difundido em larga escala, se deve a dificuldade de prever e mensurar tanto a velocidade do vento, como sua direção, criando assim muita turbulência. Sendo assim, a geração de energia encontra uma série de dificuldades no caminho, pois tais eventos são responsáveis pela energia altamente intermitente que flui nos geradores utilizados no processo (ACCETTA *et al.*, 2016).

Entre os geradores mais relevantes em sistemas eólicos, as máquinas de indução duplamente alimentadas apresentam um baixo custo pois a potência especificada dos conversores é muito menor que a potência nominal do gerador. Contudo, a sua topologia é mais complexa pois tem enrolamentos tanto nos seus circuitos de estator e do rotor. Entretanto, os geradores síncronos de ímãs permanentes, que também precisam de conversores para sua conexão com a carga, ou com a rede elétrica, são mais simples e podem funcionar sem conexão com a rede elétrica (IBRAHIM; FAWAZ, 2018).

Vale destacar que o grande avanço nos sistemas de geração se deve as inovações tecnológicas no campo da eletrônica de potência, a medida que o uso de conversores de potência, como retificadores (CC-CA), inversores(CA-CC), cicloconversores(CA-CA) e toda a família de conversores CC-CC (buck, boost, buck-boost), tem crescido muito. Essa expansão torna viável diversas implementações, como por exemplo o algoritmos de Rastreamento do Ponto Máximo de Potência (MPPT), controle do fluxo de energia em direção as baterias e redução de oscilações na corrente e na tensão. (BICZEL *et al.*, 2007)

Por outro lado, com o passar dos anos, o uso de bancos de baterias para armazenamento de energia, acoplado a sistemas de geração, se mostrou uma estratégia muito viável quando buscamos melhorar a qualidade da energia. As baterias como um todo, funcionam baseado na demanda por carga, na energia fornecida pela rede principal e na energia contida nas baterias. Dessa forma, os bancos atuam em momentos que a demanda é maior que o fornecimento da rede, e são carregados quando a demanda é menor que a energia que está sendo fornecida, o que demanda maior sustentabilidade ao sistema. (POZO; POZO, 2017).

Nesse contexto, tendo em vista a matriz energética brasileira e a demanda global

crescente por fontes de energias renováveis, o estudo de tais formas de geração utilizando ferramentas como os bancos de baterias se tornará cada vez mais necessário ao fazer uma avaliação no que diz respeito ao gerenciamento de energia nesses sistemas.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo central do trabalho é estudar a operação de sistemas eólicos que fazem uso de geradores síncronos a ímã permanente. A avaliação será feita mediante a modelagem e simulação dos componentes do sistema. Os objetivos seguem listados:

- Apresentar de forma completa, toda a modelagem aerodinâmica da turbina de geração eólica.
- Descrever detalhadamente o funcionamento do gerador síncrono a ímã permanente.
- Avaliar o funcionamento do sistema com componentes como o Banco de Baterias, MPPT, lógica de controle e demanda da rede elétrica.
- Discutir o impacto que cada componente tem no sistema, e realizar discussões sobre seu uso.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

- No capítulo 2, será apresentado o funcionamento e a composição do PMSG, assim como a explicação das equações da turbina eólica e o conceito de MPPT.
- No capítulo 3, será apresentado o desenvolvimento da modelagem do sistema, incluindo a modelagem matemática da turbina e do gerador elétrico.
- No capítulo 4, será feita a exposição e discussão dos resultados avaliando os vários cenários de atuação, analisando o impacto de cada componente na operação do sistema.

- No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões após as discussões feitas, assim como a proposta de trabalhos futuros.



# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sistema eólico em questão é composto por uma turbina, gerador síncrono, conversores de potência, sistema de controle para maximizar a potência e um sistema de integração com a rede elétrica composto por um inversor e um filtro LCL. Os conversores de potência e o inversor são tradicionalmente simulados por modelos chaveados por pulsos PWM, visando a redução do tempo de simulação, serão detalhados os modelos médios correspondentes. Essa representação por modelo médio, tem sua modelagem dada no espaço de estados.

## 2.1 TURBINA EÓLICA

As turbinas eólicas. Elas são responsáveis por converter a energia de movimento do vento em energia de movimento de rotação da turbina. Em seguida, um gerador elétrico acoplado no eixo de transmissão é utilizado para realizar a conversão dessa energia cinética. A potência da turbina pode ser dada pela taxa de variação da energia cinética que flui por ela.

$$P_{vento} = \frac{dE_c}{dt} \quad (2.1)$$

Já a energia cinética que flui pela turbina, depende apenas da massa de ar que flui através da turbina, e da sua respectiva velocidade.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2)$$

Assim, substituindo 2.2 em 2.1 obtém-se:

$$P_{vento} = \left(\frac{1}{2}\right) \frac{dm}{dt} v^2 \quad (2.3)$$

Ainda da equação 2.3, é possível definir o fluxo de massa em função da densidade  $\rho$ , a área de secção transversal da superfície de controle do escoamento e da variação da posição em relação ao tempo que pode ser definida como a velocidade.

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho A v \quad (2.4)$$

Assim, é possível definir Potência do vento substituindo a equação 2.4 em 2.3 e temos:

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.5)$$

Uma turbina não consegue converter mais que 59,3% da energia cinética em energia mecânica. Assim, é possível definir o coeficiente de potência  $C_p$  e seu valor máximo é igual a 0,59. Entretanto, os valores de  $C_p$  são tipicamente menores que 0,59. A operação do sistema eólico com o máximo  $C_p$  está sujeito à presença de um esquema de controle capaz de maximizar a extração de potência eólica (MPPT) (LÓPEZ-GARCIA *et al.*, 2014). Quando parâmetros como durabilidade e força da turbina são incorporados, é possível definir uma função para o  $C_p$ , que pode ser descrita em termos de  $\lambda$  (relação da velocidade da ponta das pás). Dessa forma, a potência da turbina pode ser definida por:

$$P_{aproveitada} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.6)$$

O  $\lambda$  por sua vez, pode ser definido pela relação entre a velocidade da ponta da pá  $\omega_{wt}$ , o raio da turbina  $R$  e a velocidade do vento  $v$

$$\lambda = \frac{\omega_{wt} R}{v} \quad (2.7)$$

Por fim, é possível representar o torque mecânico aplicado ao gerador, em termos de  $\lambda$ ,  $\beta$  e velocidade do vento:

**Figura 2.1.** Fluxograma do MPPT

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.8)$$

Ou em termos da potência mecânica e da velocidade do eixo  $w_r$ ,

$$T_m = \frac{P_{mec}}{\omega_r} \quad (2.9)$$

### 2.1.1 MPPT - Perturba e Observa

A potência extraída por uma turbina eólica depende de fatores como a velocidade do vento, o raio da turbina e a rotação do gerador. Porém, dois fatores centrais podem ser observados para que seja possível maximizar a potência extraída, a tensão e a corrente do sistema. Com base no uso do uso de conversores chaveados de potência (conversor buck, boost e buck-boost), responsáveis por elevar ou abaixar a tensão do sistema, é possível alterar seu ciclo de trabalho. Dessa forma, devido a intempéries climáticas como chuva e variações na velocidade do vento, há a necessidade de controlar os parâmetros de tensão e corrente do sistema, para que a potência extraída do conversor seja máxima. Esse controle é feito por meio de algoritmos de MPPT, como por exemplo o Perturba e Observa.

O método do Perturba e Observa consiste em aumentar ou diminuir a tensão de entrada do conversor e analisar como a potência do sistema se altera. Caso a potência cresça, continuamos alterando a tensão nesse sentido, mas caso o resultado seja negativo, inverte-se o sentido da perturbação (se aumentou, passa a diminuir). Assim que o ponto de máxima potência é alcançado, o sistema mantém as oscilações em torno do ponto de máxima potência determinado (LOPES G., 2020).

## 2.2 GERADOR SÍNCRONO A ÍMÃ PERMANENTE

O geradores síncronos de ímã permanente funcionam apenas com a rotação do rotor são capaz de induzir tensão no estator. Esses geradores são constituídos por um elevado número de polos, fato este que tira a necessidade de utilização de caixas multiplicadores de velocidade.

Uma presença de menos partes móveis na composição do sistema, implica em uma confiabilidade mais elevada e menos necessidade de manutenções, o que torna o gerador síncrono de ímã permanente uma solução que economiza insumos, mão de obra e reduz o tempo em que a máquina fica fora de operação (OLIVEIRA, 2018).

Para o gerador síncrono de ímã permanente, as equações que definem sua resposta dinâmica podem ser expressadas no referencial dos eixos direto e em quadratura, que são resultado da aplicação da transformada de park.

$$v_{sd} = -R_s i_{sd} + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (2.10)$$

$$v_{sq} = -R_s i_{sq} + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_e \psi_d \quad (2.11)$$

Onde  $v_{sd}$  e  $v_{sq}$  são os parâmetros de tensão dos eixos direto e de quadratura do estator, respectivamente. As correntes  $i_{sd}$  e  $i_{sq}$  são as correntes de eixo direto e quadratura do estator, respectivamente.  $R_s$  é a resistência dos enrolamentos do estator. A velocidade angulares elétrica de rotação do rotor, é indicada por  $\omega_e$ . Os fluxos magnéticos dos eixos do gerador,  $\psi_d$  e  $\psi_q$  são modelados pelas seguintes equações:

$$\psi_d = -L_d i_{sd} + \psi_m \quad (2.12)$$

$$\psi_q = -L_q i_{sq} \quad (2.13)$$

sendo  $L_d$  e  $L_q$  as respectivas indutâncias do gerador, e  $\psi_m$ , o fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes. A potência ativa que pode ser gerada, e o torque eletromagnético que interage com o torque mecânico da turbina, são definidas, respectivamente,

como:

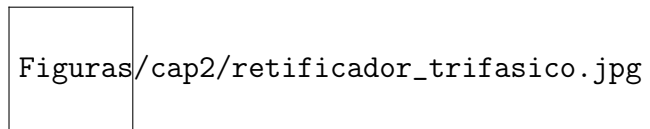
$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad (2.14)$$

$$T_{em} = \frac{3p}{2}[\psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_q i_d] \quad (2.15)$$

### 2.3 RETIFICADOR TRIFÁSICO NÃO CONTROLADO

Os retificadores trifásicos não controlados são responsáveis por realizar a conversão de corrente alternada em corrente contínua. Quando comparado ao conversor monofásico, é possível perceber que, no trifásico, as oscilações são menores, o que facilita a filtragem dessas ondas.

O retificador trifásico é composto por uma ponte de 6 diodos conectados conforme a Figura 2.2 e representados pelos símbolos  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ . As fontes  $V_A, V_B$  e  $V_C$  geram corrente alternada que serão barradas parcialmente nos diodos. Os diodos 1, 2 e 3 permitem a passagem de corrente positiva, enquanto que os diodos 4, 5 e 6 permitem a passagem possibilitando assim a chega de corrente CC na carga  $V_L$ .



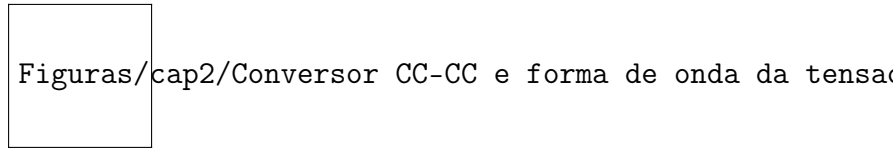
**Figura 2.2.** Retificador Trifásico Não Controlado

Considerando uma saída senoidal e equilibrada do gerador, a tensão na saída do retificador será equivalente ao valor RMS da tensão de saída do gerador. Tal valor é proveniente da média da função senoidal gerada.

### 2.4 CONVERSORES CC-CC

Os conversores CC são sistemas compostos por elementos passivos, como indutores e capacitores, que regulam a potência transferida pelo conversor, e por semicondutores de potência que operam como interruptores. Estes em alguns casos podem ser representados por transistores de potência chaveados por pulsos PWM.

O funcionamento básico dos conversores é dado pela Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Conversor CC-CC e forma de onda da tensão de saída

Da Figura 2.3, é possível definir o intervalo de comutação sendo:

$$T_s = \frac{1}{F_s} \quad (2.16)$$

Tem-se que  $F_s$  é a frequência de de comutação. Ainda é possível definir o ciclo de trabalho (duty-cycle)  $D$ , como sendo o a razão entre o intervalo de condução  $T_{on}$  e o intervalo de comutação  $T_s$

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (2.17)$$

De forma geral, é possível definir a tensão de saída dos conversores como sendo

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} V_i dt = V_i \frac{T_{on}}{T_s} \quad (2.18)$$

Substituindo 2.17 em 2.18, obtém-se

$$V_o = DV_i \quad (2.19)$$

E assim, é possível definir o ciclo de trabalho em função do ganho estático do conversor

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (2.20)$$

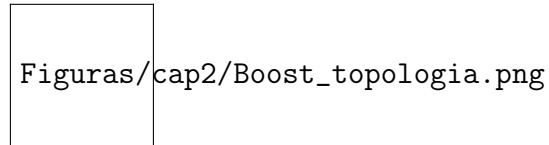
Este ganho é ilustrado pela Figura 2.4



**Figura 2.4.** Ganho estático em função de D

### 2.4.1 Conversor Boost

O conversor Boost, também conhecido como conversor Step-Up, é responsável por aumentar a tensão de saída em relação a tensão de entrada.



**Figura 2.5.** Conversor Boost

O funcionamento desse conversor pode ser descrito em duas etapas conforme a Figura 2.3:

- Tensão de entrada positiva ( $V_i > 0$ ): A chave  $S$  fecha e passa a conduzir corrente. O indutor é magnetizado pela fonte  $V_i$
- Tensão de entrada negativa ( $V_i < 0$ ): A chave  $S$  abre, o diodo  $D$  passa a conduzir corrente, e em decorrência disso, a fonte  $V_i$  e o indutor  $L$  fornecem energia ao sistema, de forma a aumentar a tensão.

A relação de tensões e ciclo de trabalho é definida com base na equação 2.18, fazendo a consideração de que a tensão média no indutor deve ser zero. Assim, para o caso do boost, a relação de tensões é:

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (2.21)$$

sendo  $V_o$  e  $V_i$  as respectivas tensões de entrada e saída do conversor, e  $D$  o respectivo ciclo de trabalho.

O conversor conta em sua topologia com um capacitor e um indutor, que são modelados por duas equações

$$L = \frac{V_i k}{f \Delta i} \quad (2.22)$$

$$C_o = \frac{i_{out} k}{f \Delta V_C} \quad (2.23)$$

Sendo  $V_i$  e  $V_o$  as respectivas tensões de entrada e saída do conversor,  $V_C$  a tensão sobre o capacitor,  $k$  o ciclo de trabalho, e  $\Delta i$  a máxima variação de corrente do indutor e  $f$  é a frequência de chaveamento do transistor (RASHID, 2017).

#### 2.4.2 Conversor Buck-Boost

O conversor Buck-Boost bidirecional é um equipamento capaz de aumentar e diminuir a tensão. Para a aplicação de baterias, o equipamento possibilita fluxo bidirecional capaz de aumentar e diminuir a tensão, a depender da necessidade. Ele é composto por dois transistores, um indutor e um capacitor, no qual é comum conectar uma fonte, como por exemplo os bancos de baterias.

Figuras/cap2/Buckboost\_topologia.png

**Figura 2.6.** Conversor Buck-Boost

O conversor operando de forma ideal, tem os comandos de seus transistores mostrados abaixo:

Figuras/cap2/buck\_boost\_grafico.png

**Figura 2.7.** Conversor Buck-Boost

O funcionamento desse conversor pode ser descrito em duas etapas:

- Corrente no indutor em direção ao capacitor  $i_L > 0$ : A potência é transferida da fonte  $V_s$  para a fonte conectada as saídas do capacitor.
- Corrente no indutor em direção ao nó dos transistores  $i_L < 0$ : A potência é transferida da fonte conectada ao capacitor, para a fonte  $V_s$ .

O dimensionamento de seus componentes internos, assim como as tensões de entrada e saída, é feito por meio das equações (V.; R., 2018)



$$V_{out} = \frac{V_s D}{1 - D} \quad (2.24)$$

$$L = \frac{V_s k}{f \Delta i_L} \quad (2.25)$$

$$C = \frac{D * i_c}{\Delta V_{out}} \quad (2.26)$$

sendo  $V_s$  a tensão de entrada e  $V_{out}$  a tensão de saída ou tensão no capacitor.  $D$  é o ciclo de trabalho, e  $\Delta i_L$  a máxima variação de corrente do indutor,  $f$  é a frequência de chaveamento do transistor e  $i_c$  a corrente que percorre o capacitor (BARBI, 2015).

## 2.5 BATERIAS

Existem vários tipos de modelos de bateria, sendo que as baterias chumbo-ácido são amplamente utilizadas em sistemas elétricos, pois elas tem baixo custo e se adaptam facilmente a sistemas de geração distribuída. Além disso, baterias estacionárias apresentam durabilidade por longos períodos e suportam vários ciclos de carga e descarga, muito importante para fontes não constantes como as turbinas eólicas. As baterias também podem operar de forma bidirecional, fornecendo potência para a rede em momentos de alta demanda em que só o gerador não é capaz de suprir, e na contrapartida, absorvendo potência em momentos de baixa demanda energética.

A fim de dimensionar o banco de baterias, se faz necessário determinar a quantidade de energia a ser armazenada pelo banco, que está diretamente relacionado a demanda energética do restante da rede em um momento em que a geração eólica seja interrompida. Além disso, devemos olhar para o tempo de reação da bateria, pois é ele o responsável pelo tempo que a bateria irá segurar a tensão na rede elétrica.

A energia a ser armazenada no banco é definida por:

$$E_a = E_c D \quad (2.27)$$

Onde  $E_c$  é a energia consumida pela bateria em um ciclo de 1 dia, expresso em  $W.h$  e  $D$  é a quantidade de dias sem geração de energia.

Para o caso de um banco de baterias conectado a um barramento CC, adota-se a tensão do banco como sendo igual a tensão no barramento.

$$V_{banco} = V_{barramento} \quad (2.28)$$

A capacidade de carga do banco de baterias é definida por:

$$C_{banco} = \frac{E_a}{V_{banco}} \quad (2.29)$$

Na equação 2.29, tem-se  $C_{banco}$  expresso em  $A.h$ (ampére-hora),  $V_{banco}$  em volts, e  $E_a$  em  $W.h$ .

Por fim, pode-se definir a energia armazenada em função da energia consumida e da profundidade da descarga:

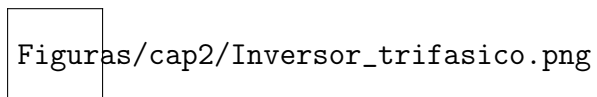
$$E_a = \frac{E_c}{P_d} \quad (2.30)$$

Onde  $E_a$  é a energia armazenada no banco de baterias em  $W.h$ ,  $E_c$  é a energia consumida em  $W.h$  e  $P_d$  é a profundidade de descarga permitida.

## 2.6 INVERSOR TRIFÁSICO

Os inversores são conversores destinados a controlar o fluxo de energia entre uma fonte de tensão CC e uma carga que opera em corrente alternada mono ou polifásica. O inversor é responsável por sincronizar o sistema eólico com a rede, o que inclui regular o da tensão de saída e da frequência.

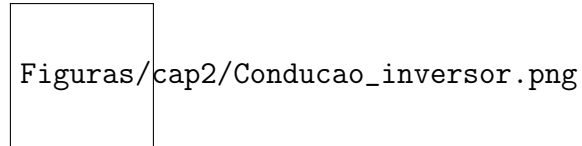
Em sua topologia trifásica, os inversores são compostos por 6 transistores conectados em ponte, de forma que cada ponto de intersecção central parte uma das fases do sistema.



**Figura 2.8.** Inversor Trifásico

Os transistores são comandados segundo o diagrama representado na Figura 2.9. Em cada instante existem 3 interruptores em condução, 2 no grupo positivo e 1 no

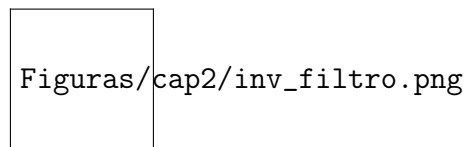
negativo ou vice-versa. Cada interruptor é mantido habilitado durante  $180^\circ$ , ocorrendo uma comutação a cada  $60^\circ$ .



**Figura 2.9.** Condução dos transistores

Os inversores são conversores de tensão ou VSC (voltage source converter). Nesses conversores, a tensão de entrada é mantida constante e a tensão de saída é imposta pela rede elétrica. Entretanto, a forma de onda da corrente da carga, assim como sua magnitude, depende da natureza da impedância da carga.

Esses conversores, normalmente, são acompanhados de filtros compostos por capacitores ou indutores responsáveis por contrabalancear a potência reativa consumida dentro dos conversores durante o processo de conversão e conseqüentemente filtrar componentes indesejadas do sistema. A topologia inversor + filtro é mostrada na Figura 2.10(ABBAS, ).



**Figura 2.10.** Inversor e Filtro

### 2.6.1 Controle do Inversor

Para o controle de inversores conectados a rede, é comum encontrar modelos que utilizam a técnica de controle de tensão orientada (VOC). Esse modelo leva em conta a transformação das variáveis do modelo estacionário  $abc$  para o modelo direto e quadratura  $dq$  e tem seu fluxograma descrito na Figura (ABBAS, )

**Figura 2.11.** Fluxograma VOC

Inicialmente, a fase da tensão  $\theta_g$  é medida pelo PLL. Este valor será usado na transformação de variáveis do modelo estacionário  $abc$  para o modelo síncrono  $dq$ . Ao assumir que as tensões da rede são balanceadas ( $v_{ag}$ ,  $v_{bg}$  e  $v_{cg}$ ), é possível obter  $v_\alpha$  e  $v_\beta$  pela transformação  $abc/dq$ .

$$v_\alpha = \frac{2}{3}(v_{ag} - \frac{1}{2}v_{bg} - \frac{1}{2}v_{cg}) = v_{ag} \quad (2.31)$$

$$v_\beta = \frac{2}{3}(\frac{\sqrt{3}}{2}v_{bg} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{cg}) = \frac{\sqrt{3}}{3}(v_{ag} + 2v_{bg}) \quad (2.32)$$

Assim, é possível definir o ângulo da tensão ( $\theta_g$ ):

$$\theta_g = \tan^{-1} \frac{v_\beta}{v_\alpha} \quad (2.33)$$

As equações 2.31 e 2.32 mostram que a tensão na fase C não é necessária. Além disso, as tensões da rede podem conter harmônicas. Nestes casos, o PLL é utilizado na detecção dos ângulos.

No sistema estão presentes 3 loops de controle de feedback. Dois para as correntes nas coordenadas  $dq$  e um para a tensão DC  $V_{dc}$ . As correntes  $i_d$  e  $i_q$  são as componentes ativas e reativas do sistema. Deixando a componente de eixo direto está alinhada com o vetor tensão da rede e em contrapartida, a tensão de eixo direto da rede é igual a sua magnitude ( $v_{dg} = v_g$ ), e a tensão resultante no eixo de quadratura é igual a zero ( $v_{qg} = \sqrt{(v_g)^2 - (v_{dg})^2}$ ). Assim, é possível definir a potência ativa e reativa.

$$P_g = \frac{3}{2}(v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg}) = \frac{3}{2}v_{dg}i_{dg} \quad (2.34)$$

$$Q_g = \frac{3}{2}(v_{qg}i_{dg} - v_{dg}i_{qg}) = \frac{3}{2}v_{dg}i_{qg} \quad (2.35)$$

Dessa forma, é possível se obter a corrente  $(i_{qg})^*$ :

$$i_{qg}^* = \frac{Q_g^*}{-1,5v_{dg}} \quad (2.36)$$

Onde  $Q_g^*$  é a referência para a potência reativa que pode ser definida como zero para um fator de potência unitário, e definida com valores positivos e negativos a depender da aplicação.

A corrente de referência do eixo direto  $i_{dg}^*$  é gerada pelo controlador PI e é responsável pelo controle da tensão DC ( $v_{dc}$ ) do sistema. Quando o inversor opera no estado estável, a tensão DC ( $v_{dc}$ ) é mantida constante, em um valor definido pelo valor de referência  $v_{dc}^*$  que pode ser definida em termos de uma tensão de referência de 1 pu e do índice de modulação  $m_a$ , assumindo o valor de 0,8 em condições nominais de operação:

$$v_{dc}^* = \frac{\sqrt{6} \cdot V_{ail}}{m_a} = \frac{\sqrt{6}}{0,8} = 3.06pu (V_{ail} = 1pu) \quad (2.37)$$

Os valores gerados fluem então para os controladores PI que vão gerar tensões nos eixos dq. Essas passaram pela transformada abc/dq inversa, gerando assim os componentes que vão determinar o valores do PWM do sistema. (WU, )

## 2.7 FILTRO LCL

É comum que em inversores chaveados por PWM existam correntes harmônicas de ordem elevada. Isso acontece devido a uma frequência de chaveamento muito alta, necessária para o correto funcionamento do inversor. Assim, se faz cada vez mais comum a utilização de filtros na saída dos inversores, com o intuito central de atenuar o sinal e reduzir o impacto de tais distorções de corrente e tensão. Vale ressaltar que lógicas de controle do tipo VSC dependem da implementação de um filtro na saída.

Os filtros LCL, de 3° ordem são compostos em sua topologia original por 2 indutores e 1 capacitor. Eles usualmente se destacam, em relação aos demais filtros, pois atenuam melhor as harmônicas geradas pelo inversor. Além disso, esse tipo de filtro produz menos distorções de corrente e de potência reativa do sistema (AHMED; WILLIAMS, ).

Figuras/cap2/LCL.png

**Figura 2.12.** Topologia Filtro LCL

Para o dimensionamento do filtro, inicialmente, define-se a impedância e a capacitância base:

$$Z_b = \frac{(E_n)^2}{P_n} \quad (2.38)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_g Z_b} \quad (2.39)$$

Neste caso,  $E_n$  é a tensão da rede,  $P_n$  a potência ativa e  $\omega_g$  é a frequência da rede. Assim, considerando que a maior variação do fator de potência seja de 5%, pode-se considerar que a capacitância do filtro será de  $C_f = 0,05.C_b$ .

Ao observar a corrente no filtro, é possível definir a máxima variação da mesma, para tal, será usado o a tensão DC de ligação  $V_{DC}$ , a frequência de chaveamento  $f_{sw}$  e a indutância  $L_1$ .

$$\Delta I_{Lmax} = \frac{V_{DC}}{6f_{sw}L_1} \quad (2.40)$$

Assim, é possível determinar a indutância  $L_1$  a partir da escolha da variação máxima de corrente.

$$L_1 = \frac{V_{DC}}{6f_{sw}\Delta I_{Lmax}} \quad (2.41)$$

Já para  $L_2$ , os parâmetros usados são o fator de atenuação  $k_a$ , que varia de 0 a 1, a capacitância do filtro  $C_f$  e a frequência angular de chaveamento  $\omega_{sw}$ .

$$L_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{(k_a)^2} + 1}}{C_f(\omega_{sw})^2} \quad (2.42)$$

Definidos os parâmetros do filtro, ainda é necessário observar a frequência de ressonância. Esta deve se manter maior que 10 vezes a frequência da rede  $f_g$  e menor que a metade da frequência de chaveamento. Caso contrário, pode ocorrer ressonância nas frequências de chaveamento ou da rede. (REZNIK M.GODOY SIMÕES, )

$$10f_g < f_{res} < 0,5f_{sw} \quad (2.43)$$

Figuras/cap2/media\_movel.png

Figura 2.13. Conversor Buck-Boost

## 2.8 MODELO MÉDIO

Muitas aplicações de controle são analisadas em baixa frequência, e por conta disso, efeitos de chaveamento podem ser negligenciados por se comportarem como parasitas do sistema. O utilização de modelo por médio se faz necessária para transformar um modelo descontínuo em um modelo invariante no tempo.

Tendo em vista que um dos objetivos dos conversores é reduzir as oscilações dos sinais de saída, a utilização dos modelos médios relacionam o ciclo de trabalho  $D$ , com o a tensão de saída do conversor, por meio da média móvel do sinal de tensão.

Considerando o sinal  $f(t)$ , tem-se que sua média móvel é dada pela equação:

$$\langle f(t) \rangle_0(t) = \frac{1}{T} \cdot \int_{t-T}^{T_{on}} f(\tau) d\tau \quad (2.44)$$

Uma propriedade importante da média, é que a derivada no tempo de uma média variável é igual a média variável da derivada do sinal. Sendo assim, a derivação no tempo e a média móvel são comutativas:

$$\frac{d}{dt} \langle f(t) \rangle_0(t) = \left\langle \frac{d}{dt} f(t) \right\rangle_0(t) \quad (2.45)$$

### 2.8.1 Modelo médio em conversores

Sabe-se que os elementos passivos do circuito são lineares e invariantes no tempo. Assim, as relações tensão corrente são dadas:

- Indutor  $L$ :  $v(t) = L \cdot \frac{d}{dt} i(t)$
- Capacitor  $C$ :  $i(t) = C \cdot \frac{d}{dt} v(t)$

- Resistor R:  $v(t) = R.i(t)$

Pela propriedade da equação 2.45, tem-se que as relações de tensão e corrente são as mesmas após suas médias. Assim, os valores de R, L e C não se alteram depois da média e conseqüentemente a configuração de um circuito composto por elementos passivos não se altera após a média.

O modelo médio pode ser obtido a partir das equações e leis que estabelecem o comportamento do circuito. O modelo analítico leva em consideração as equações topológicas do conversor.

Um conversor no modelo chaveado pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^N (A_i.x + B_i.e).h_i \quad (2.46)$$

Neste caso, o conversor comuta entre N configurações.  $A_i$  e  $B_i$  são matrizes  $n \times n$  de estado e  $n \times p$  matrizes de entrada, respectivamente, correspondentes a configuração  $i$ .  $x$  é o vetor de estado de dimensão  $n$  e  $e$  é o vetor de fontes independentes de dimensão  $p$ .

Ao aplicar a média na equação 2.46, e a propriedade 2.45, obtém-se:

$$\frac{d\langle x \rangle_0}{dt} = \left\langle \sum_{i=1}^N (A_i.x + B_i.e).h_i \right\rangle_0 \quad (2.47)$$

Ao rearranjar a equação 2.47, segundo o princípio da linearidade da média móvel, obtém-se:

$$\frac{d\langle x \rangle_0}{dt} = \left\langle \sum_{i=1}^N (A_i.h_i).x \sum_{i=1}^N (b_i.h_i).e \right\rangle_0 \quad (2.48)$$

Realizando algumas simplificações, tem-se:

$$\frac{d\langle x \rangle_0}{dt} \approx \left\langle \sum_{i=1}^N (A_i.h_i) \right\rangle \langle x \rangle \left\langle \sum_{i=1}^N (b_i.h_i).e \right\rangle \langle e \rangle_0 \quad (2.49)$$

Logo, é possível descrever um conversor como:



$$\frac{d\langle x \rangle_0}{dt} = A_m \cdot \langle X_0 \rangle + B_m \cdot \langle e_0 \rangle \quad (2.50)$$

Onde as matrizes  $A_m$  e  $B_m$  são dependentes da entrada e do estado  $x$ , ou seja, não são as matrizes de estado e entrada. (ARAUJO, )

### 2.8.1.1 Conversor Boost

Para o conversor Boost representado pela Figura 3.8, é possível obter o seguinte par de equações:

$$\langle V_c(1 - D) \rangle_0 \approx \langle V_c \rangle \cdot \langle (1 - D) \rangle_0 = \langle V_c \rangle_0 \cdot (1 - \alpha) \quad (2.51)$$

$$\langle i_L(1 - D) \rangle_0 \approx \langle i_L \rangle \cdot \langle (1 - D) \rangle_0 = \langle i_L \rangle_0 \cdot (1 - \alpha) \quad (2.52)$$

$V_c$  equivalente a tensão  $V_o$ ,  $i_L$  a corrente que percorre o indutor  $L$  e  $\alpha$  o tempo de ciclo correspondente ao valor médio do sinal  $D$ . (ARAUJO, )

### 2.8.1.2 Conversor Buck-Boost Bidirecional

Para o conversor Buck-Boost bidirecional representado na Figura 2.6, é possível obter o seguinte par de equações: (BARBI, 2015)

$$\frac{d\langle V_c \rangle}{dt} = \frac{\langle i_L \rangle}{C} - \frac{\langle V_c \rangle}{R \cdot C} \quad (2.53)$$

$$\frac{d\langle i_L \rangle}{dt} = \frac{4 \cdot V_s}{V_s - \langle V_c \rangle} \cdot f \cdot \langle i_L \rangle - \frac{\langle V_c \rangle}{L} - \frac{V_s}{L} \quad (2.54)$$

Onde  $V_c$  é do capacitor ou tensão de saída,  $i_L$  a corrente que percorre o indutor  $L$ ,  $V_s$  é a tensão de entrada,  $f$  é a frequência de chaveamento dos transistores,  $R$  é um parâmetro para a carga conectada ao capacitor e  $C$  representa a capacitância.

Dessa forma, para o sistema em regime permanente e considerando as seguintes relações:

$$\frac{\langle i_L \rangle}{dt} = \frac{\langle V_c \rangle}{dt} = 0 \quad (2.55)$$

$$G = \frac{V_c}{V_s} \quad (2.56)$$

$$i_L = \frac{V_c}{R} \quad (2.57)$$

$$f = 2f_s \quad (2.58)$$

Onde  $G$  é o ganho estático do conversor e  $f_s$  é a frequência de comutação do conversor, é possível juntar as equações 2.53 e 2.54, obtendo:

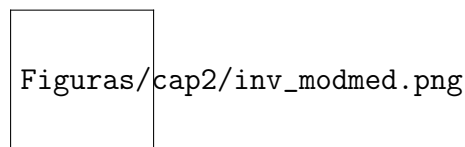
$$\frac{4.L.f}{R}.G = 1 - G^2 \quad (2.59)$$

Isolando  $G$ :

$$G = \sqrt{\left(\frac{8.L.f_s}{R}\right)^2 + 1} - \frac{4.L.f_s}{R} \quad (2.60)$$

## 2.8.2 Modelo Médio no Inversor

Na representação do inversor por modelo médio, é possível, apenas para título de representação, modelá-lo por uma contraparte contínua que contém um lado CC e um lado CA.



**Figura 2.14.** Representação para o modelo médio

Para a Figura 2.14,  $i_{dc}$  e  $V_{dc}$  são a corrente e a tensão CC que entram no inversor,  $\vec{i}_{abc}$  corresponde ao vetor das três correntes que saem do inversor  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ . Por fim,  $\vec{F}_m$  é o vetor de modulação do sistema, adotado com base na lógica de controle desejada.

Pela Figura 2.10, possível escrever as equações de tensão e corrente.

$$v_{ca} = i_a(R_f + L_f \frac{d}{dt}) + v_{fa} \quad (2.61)$$

$$v_{cb} = i_b(R_f + L_f \frac{d}{dt}) + v_{fb} \quad (2.62)$$

$$v_{cc} = i_c(R_f + L_f \frac{d}{dt}) + v_{fc} \quad (2.63)$$

As mesmas podem ser reescritas em sua forma matricial:

$$[v_c] = [R_f][i] + [L_f] \frac{d}{dt} [i] + [v_f] \quad (2.64)$$

A transformada dq0 é mostrada a seguir:

$$[x_{qd0}] = [P][x_{abc}] \quad (2.65)$$

Onde a matriz P é dada por:

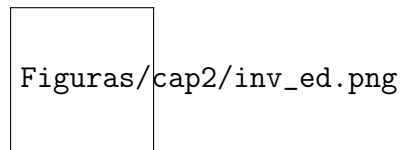
$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\theta) & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

Multiplicando o sistema de equações 2.64 pela matriz P 2.66, é possível obter o par de equações para eixo direto e quadratura:

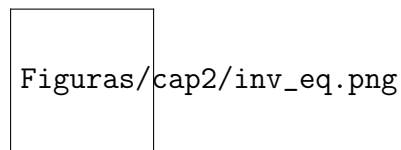
$$v_{cd} = R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} - w_g L_f i_q + v_{fd} \quad (2.67)$$

$$v_{cq} = R_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} - w_g L_f i_d + v_{fq} \quad (2.68)$$

Assim, é possível representar o inversor a partir de seus circuitos equivalentes de eixo direto e eixo de quadratura.



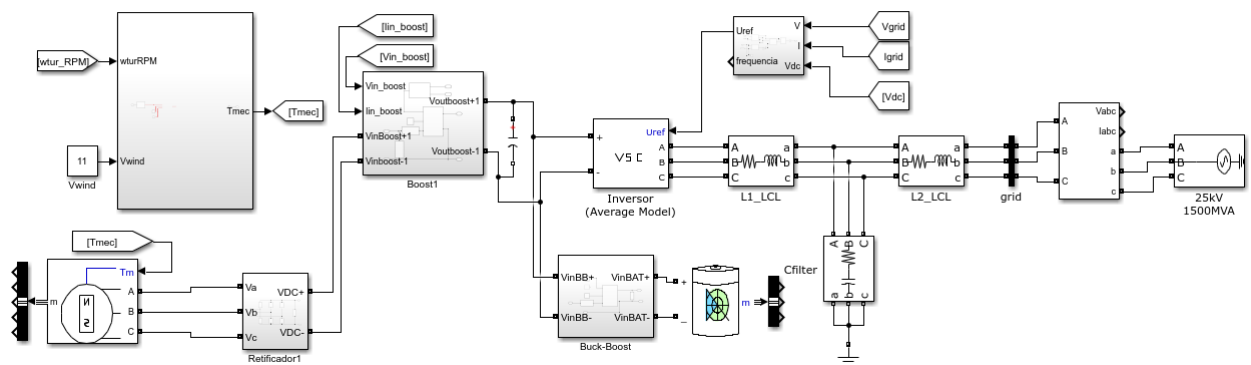
**Figura 2.15.** Circuito Equivalente de Eixo Direto



**Figura 2.16.** Circuito Equivalente de Eixo de Quadratura

## MODELAGEM DO SISTEMA

O sistema eólico foi inteiramente modelado utilizando o software MATLAB/SIMULINK. Nele, foi possível modelar cada um dos componentes do sistema, selecionar os valores dos elementos internos do circuito e observar graficamente os resultados obtidos das simulações. Assim, o modelo completo do sistema é apresentado na figura 3.1.



**Figura 3.1.** Sistema Completo

Tem-se uma turbina eólica cuja saída é o torque mecânico imposto ao gerador síncrono de ímãs permanentes. Este por sua vez tem sua tensão retificada e segue para um conversor boost. Após o conversor, parte da energia segue para uma bateria acoplada a um conversor buck-boost bidirecional que gerencia o fluxo de energia para as baterias. Já a outra parcela de energia flui para o inversor trifásico que torna a corrente alternada novamente e segue para o filtro LCL. Após o filtro, a tensão chega a uma fonte que realiza o papel de rede elétrica modelada como um equivalente de Thévenin.

### 3.1 TURBINA EÓLICA

Para a modelagem da turbina eólica, foram adotados alguns parâmetros como a velocidade do vento, o raio a turbina e a densidade do ar. Também foram utilizados alguns valores de referência de uma curva de potência típica de turbinas eólicas como valor máximo do  $C_p$  e  $\lambda$  ideal.

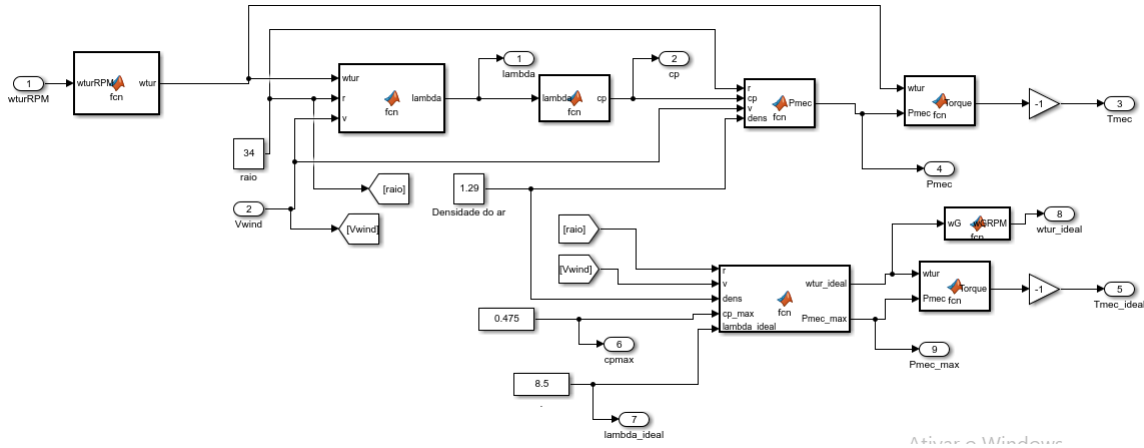


Figura 3.2. Turbina

Inicialmente, os sinais de rotação da turbina, raio e velocidade do vento são utilizados para gerar o  $\lambda$ . Este por sua vez é utilizado para a geração do coeficiente de potência  $C_p$  pela da equação 3.1.

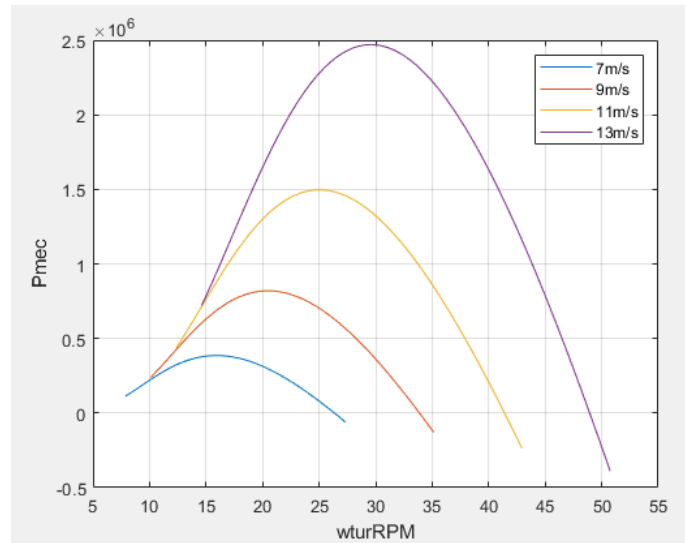
$$C_p = 0,5176 \cdot \left( \frac{116}{\lambda - 5,035} \right) \cdot e^{\frac{-21}{\lambda - 0,035}} + 0,0068 \cdot \lambda \quad (3.1)$$

O  $C_p$ , juntamente com o raio da turbina, a densidade e velocidade do vento permite obter a potência mecânica da turbina. Ao associar a potência mecânica e a velocidade de rotação, é possível definir o torque mecânico, que ao final do sistema é multiplicado por -1 para satisfazer a condição do bloco gerador do SIMULINK.

Em paralelo, com o raio da turbina, velocidade e densidade do vento, é possível realizar a associação com o  $C_{pmax}$  e  $\lambda_{ideal}$  previamente calculados, e definir a potência mecânica máxima e a velocidade de rotação ideal. Tais valores servem de referência para os valores medidos calculados.

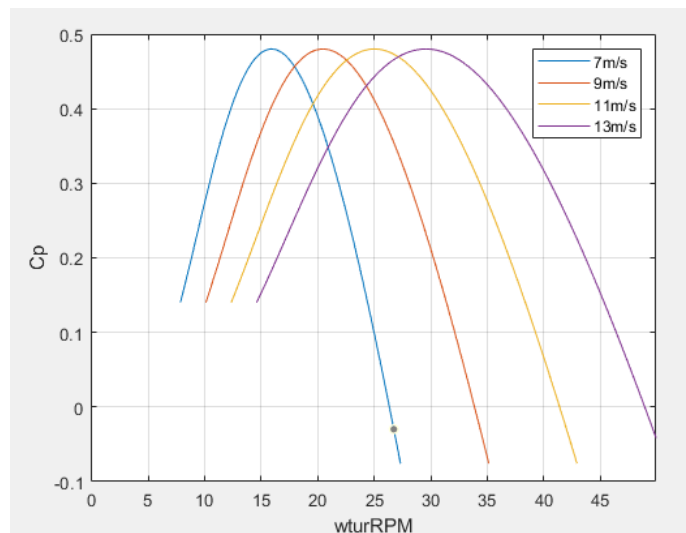
Ao fazer uso das equações 2.8 e 2.9, é possível plotar a curva de potência gerada para diferentes velocidades de vento e em função da potência mecânica  $P_{mec}$  e da rotação

da turbina  $\omega_{tur}$  em rotações por minuto. Este gráfico pode ser observado na figura 3.3



**Figura 3.3.** Potência gerada para diferentes velocidades de vento

Também é possível plotar a curva de potência da turbina para diferentes velocidades e em função do  $C_p$  e da rotação da turbina  $\omega_{tur}$ , pelas equações 2.8 e 2.9. Assim, é possível verificar que existe um valor ideal para o  $C_p$  que maximiza a potência gerada. Este gráfico pode ser observado na figura 3.4



**Figura 3.4.** Curva de Potência da Turbina

A partir daí, utilizando blocos de função do matlab, é possível observar e analisar os valores chaves de operação da turbina, como o  $C_p$ , potência mecânica,  $\lambda$  e o Torque mecânico, responsável por alimentar o gerador do sistema.

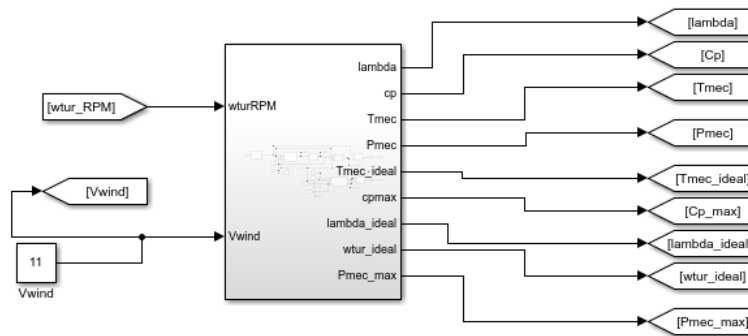


Figura 3.5. Turbina

Os valores de referência utilizados são apresentados na Tabela 3.1 e a turbina simplificada a uma caixa preta pode ser observada na figura 3.5.

**Tabela 3.1.** Parâmetros da Turbina

<b>Velocidade do Vento</b>	11 $m/s$
<b>Densidade do Ar</b>	1,29 $\frac{kg}{m^3}$
<b>Raio da Turbina</b>	34 $m$
$C_{pmax}$	0,478
$\lambda_{ideal}$	8,5

### 3.2 GERADOR DE ÍMÃ PERMANENTE

Para o gerador, foram estabelecidos os parâmetros de potência, resistência do estator, indutância de armadura, fluxo concatenado, inércia e número de polos. O simulink também permite a seleção do tipo de rotor, sendo polos salientes ou polos lisos. Para este trabalho foi utilizado o gerador de polos lisos. Também tem-se de alternativa de entrada mecânica o uso do torque ou da rotação. Neste caso foi empregado o torque, considerando o modelo da turbina eólica utilizado. Para fins de simulação, também adotou-se uma velocidade inicial do gerador. Assim, pelo Torque mecânico fornecido para a turbina, é possível modelar o gerador.



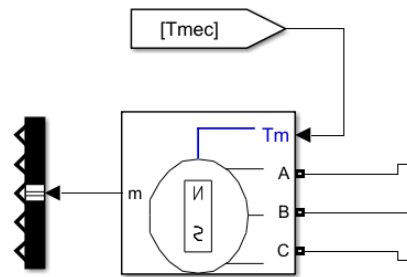


Figura 3.6. Gerador

Os valores de referência utilizados são apresentados na tabela 3.2

Tabela 3.2. Parâmetros do Gerador

Potência do Gerador	1,5MW
Resistência do Estator	0,000821Ω
Indutância de Armadura	0,00112H
Fluxo Concatenado	5,8264V.s
Inércia do Gerador	100000J
Polos do Gerador	26 Polos
Velocidade Inicial do Gerador	$2 \frac{rad}{s}$
Tipo de Rotor	Polos Lisos

### 3.3 RETIFICADOR TRIFÁSICO

Para o retificador trifásico, foram utilizados 6 diodos conectados em ponte, e um capacitor. A topologia utilizada pode ser observada na figura 3.7 e o valor da capacitância foi de 1F.

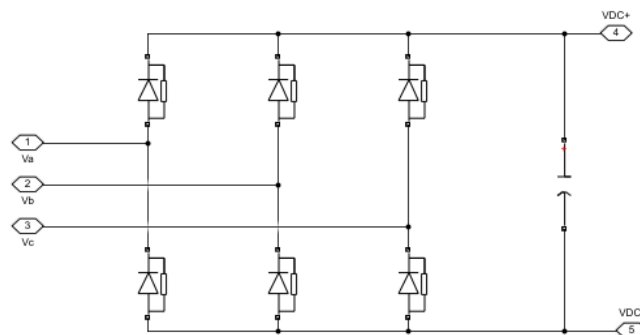


Figura 3.7. Retificador Trifásico

### 3.4 CONVERSOR BOOST

O conversor boost foi modelado com base em um bloco do simulink responsável por adaptar o conversor ao modelo médio. Além disso, o conversor é composto por um capacitor, um indutor e um sistema de MPPT perturba e observa responsável por definir o ciclo de trabalho  $D$  do conversor.

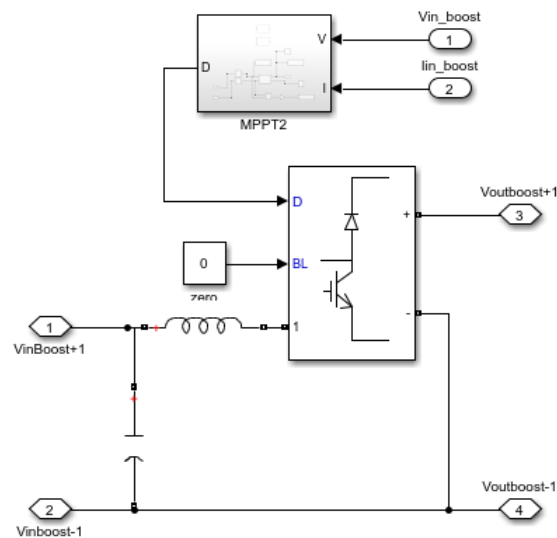


Figura 3.8. Conversor Boost

Abaixo segue o código utilizado para o MMPT:

```
function [D,P] = DutyRatio(V,I)
Dmax=0.95;
Dmin=0;
Dinit=0.6;
deltaD=0.000001;
persistent Vold Pold Dold;
dataType='double';
if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
```

```

end
P=V*I;
dV=V-Vold;
dP=P-Pold;
if dP ~ =0
    if dP < 0
        if dV<0
            D=Dold-deltaD;
        else
            D=Dold+deltaD;
        end
    else
        if dV<0
            D=Dold+deltaD;
        else
            D=Dold-deltaD;
        end
    end
end
else
    D = Dold;
end
end
if D >= Dmax || D <= Dmin
    D = Dold;
end
Vold = V;
Pold = P;
Dold = D;

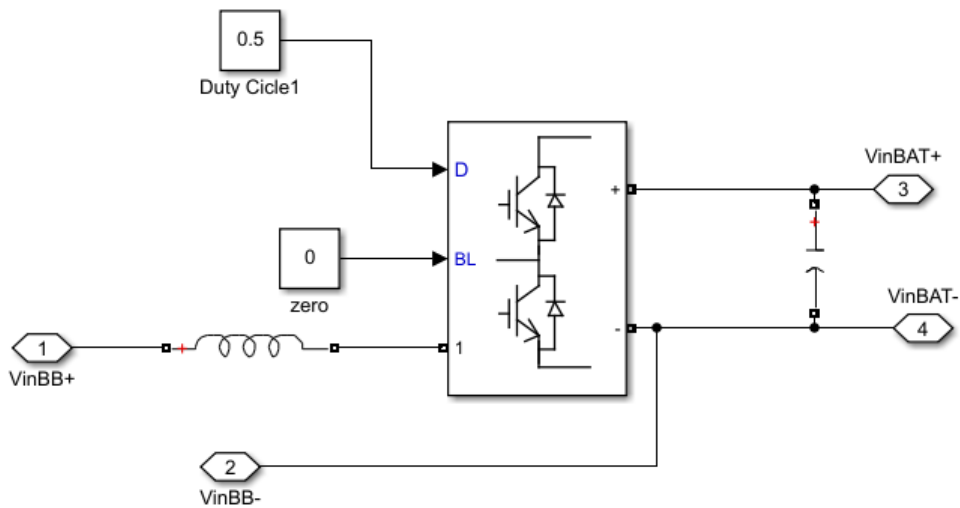
```

Os valores de referência para o capacitor e indutor são expressos na tabela 3.3.

<b>Indutância Conversor Boost</b>	$0,00385H$
<b>Capacitância Conversor Boost</b>	$0,044F$

### 3.5 CONVERSOR BUCK-BOOST

O conversor buck-boost, que precede as baterias, foi modelado por um bloco do simulink responsável por adaptar o conversor ao modelo médio. Além disso, o conversor é composto por um indutor. Para a bateria foram utilizados alguns valores de forma a verificar o funcionamento da bateria carregando e descarregando. Com base nisso, o ciclo de trabalho  $D$  do conversor foi definido.



**Figura 3.9.** Conversor Buck-Boost

Os valores de referência para o indutor e o ciclo de trabalho  $D$  são expressos na tabela 3.4.

<b>Indutância Conversor Buck-Boost</b>	$0.01H$
<b>Capacitância Conversor Buck-Boost</b>	$0.0018F$
<b>Ciclo de Trabalho <math>D</math></b>	entre 0,2 e 0,9

### 3.6 BATERIA

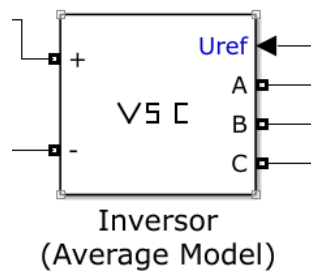
O banco de baterias foi modelado com as baterias de chumbo-ácido, muito utilizadas em sistemas elétricos. No bloco, foram definidos os parâmetros de tensão nominal, capacidade de carregamento, estado de carregamento inicial e tempo de resposta. Os parâmetros podem ser observados na tabela 3.5

**Tabela 3.5.** Parâmetros da Bateria

<b>Tensão DC</b>	700V
<b>Consumo diário</b>	300.000Wh
<b>Tempo de consumo</b>	8h
<b>Fator de Segurança</b>	1,2Wh
<b>Profundidade da Descarga</b>	0,3
<b>Estado de Carregamento Inicial</b>	45 %
<b>Tempo de Resposta</b>	0,0001s

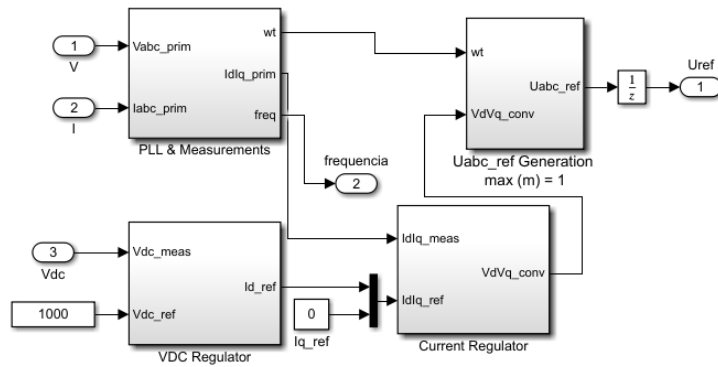
### 3.7 INVERSOR

O inversor foi modelado por um bloco do simulink responsável por adaptar o inversor convencional ao modelo médio VSC. O bloco apresentado recebe a tensão DC do capacitor, e a tensão de referência  $U_{ref}$  que vem do sistema de controle. A sua saída é a tensão trifásica sincronizada com a rede elétrica.



**Figura 3.10.** Inversor

O sistema de controle do VSC é composto por 2 conversores PI, responsáveis por regular tensão e corrente, e a malha do PLL responsável pela frequência. O sistema de controle usa como base valores de tensão da rede  $V_{grid}$ , corrente da rede  $I_{grid}$  e tensão contínua  $V_{dc}$ .



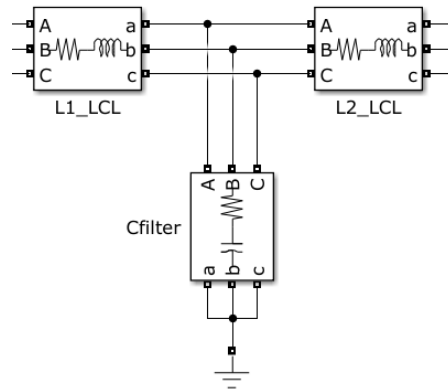
**Figura 3.11.** Lógica de Controle do Inversor

Os sinais  $V$  e  $I$  da rede chegam ao PLL que aplica a transformação de eixo abc/dq, gerando os componentes de corrente em eixo direto e quadratura. Em paralelo, o  $V_{dc}$  gera os sinais de corrente de referência de um controlador PI, pela  $V_{dc}$  do sistema, que serão comparados com os valores medidos que saem do PLL.

No regulador de corrente, os sinais de corrente em eixo dq passam novamente no controlador PI que compara os sinais medidos e sinais de referência. Os sinais de tensão em eixo dq são gerados e passam por algumas transformações, junto a frequência, gerando assim o sinal de tensão  $U_{ref}$  que realimenta o inversor.

### 3.8 FILTRO LCL

O filtro LCL é composto por três ramos trifásicos conectador em Y. Os ramos superiores são compostos cada um por um conjunto indutor resistor ligado em série. Já o ramo inferior é composto por um conjunto capacitor resistor também em série.



**Figura 3.12.** Filtro LCL

Os parâmetros utilizados podem foram explicitados na tabela

**Tabela 3.6.** Parâmetros do Filtro LCL

<b>Indutor</b> $L_1$	$3,464.10^{-5}H$
<b>Resistor</b> $R_1$	$0.205\Omega$
<b>Indutor</b> $L_2$	$3,677.10^{-7}H$
<b>Resistor</b> $R_2$	$0.05\Omega$
<b>Capacitor</b> $C$	$0,0287F$
<b>Resistor</b> $R_c$	$0,0155\Omega$

### 3.9 REDE

Por fim, a rede elétrica foi simulada por uma fonte receptora de tensão trifásica e conectada em Y. A modelagem se deu com base no valor eficaz da tensão, e da frequência da rede. Os valores podem ser observados na tabela 3.7

**Tabela 3.7.** Parâmetros da Rede Elétrica

<b>Tensão Eficaz</b> $V_{rms}$	$380V$
<b>Frequência da Rede</b> $f$	$60Hz$
<b>Resistência Interna</b>	$0.0001\Omega$
<b>Indutância Interna</b>	$0.0005H$

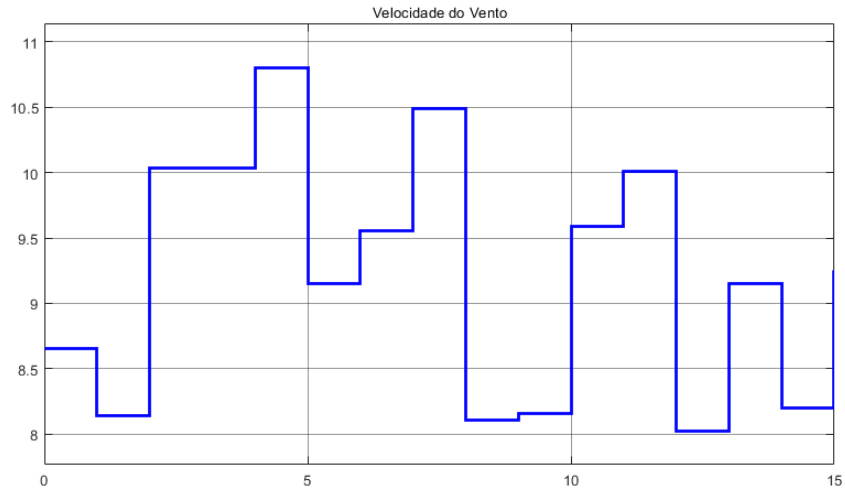
Neste capítulo serão abordadas algumas validações de componentes do sistema, assim como seu funcionamento como um todo, considerando diferentes cenários de operação e condições de testes. O MPPT será testado para garantir que está operando de acordo com o esperado. Em seguida, o sistema sem as baterias será simulado, para que seja possível avaliar o seu funcionamento antes de acoplar as baterias. Por fim, o sistema será simulado e diferentes valores de ciclo de trabalho do conversor que interliga a bateria com o barramento CC do sistema eólico.

### 4.1 TESTE DE FUNCIONAMENTO DO MPPT

De início, é importante que exista a validação do funcionamento correto do MPPT, pois este componente do sistema é essencial a medida que utilizamos conversores chaveados como o conversor Boost. A simulação teve a duração de 15 segundos.

Nesta seção, o sistema eólico modelado contemplará apenas uma resistência de 1 ohm, e a velocidade de vento será variada aleatoriamente entre 8 m/s e 11 m/s, como mostra a Figura 4.1. Isso tem como objetivo verificar a operação do algoritmo de maximização de extração de potência da turbina, implementado no conversor boost.

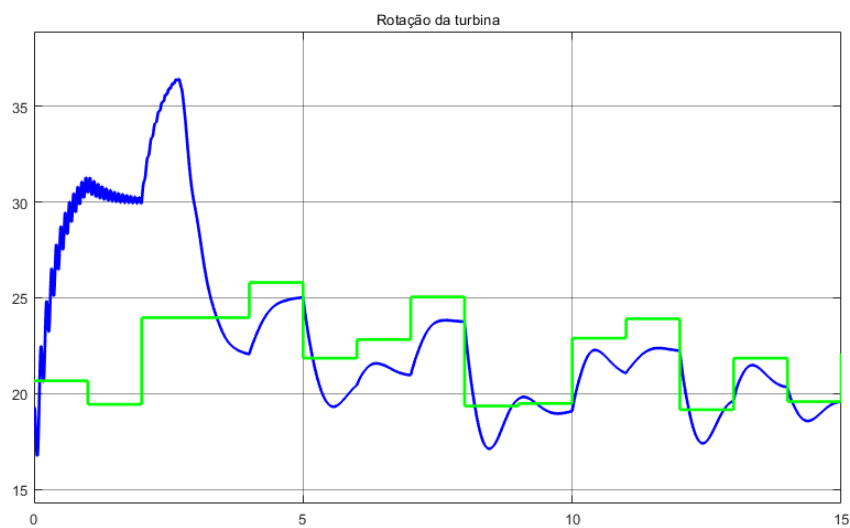




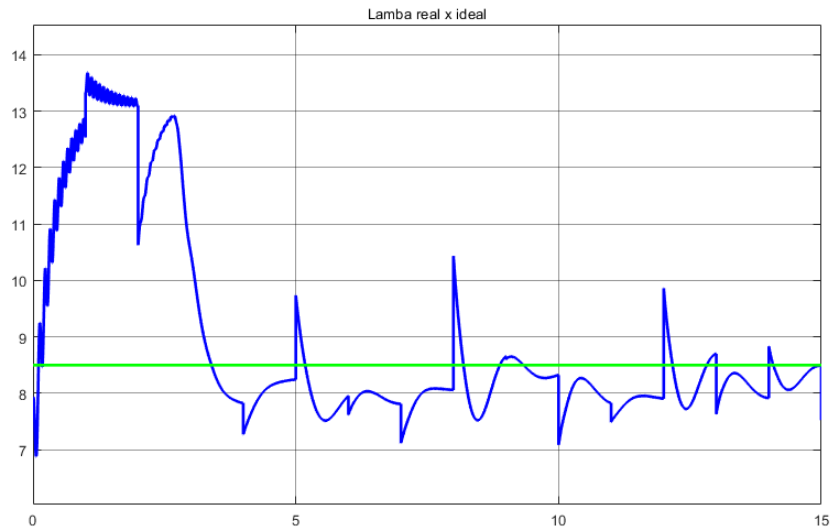
**Figura 4.1.** Velocidade do Vento

De forma a verificar o funcionamento do algoritmo MPPT, a rotação da turbina, a relação de ponta de pá e o coeficiente de potência foram monitorados, e suas respostas aparecem nas figuras 4.2 e 4.3 respectivamente.

Para as figuras 4.2 e 4.3, tem-se que as linhas em verde representam os valores ideais de referência, enquanto as linhas azuis apresentam os valores simulados. Percebe-se que ambos resultados obtidos caminham para próximo de seu valor ideal após a geração estabilizar. Sendo assim, é possível analisar o MPPT pelo Coeficiente de Potência ( $C_p$ ), os torques (mecânico e eletromagnético) e a potência mecânica.

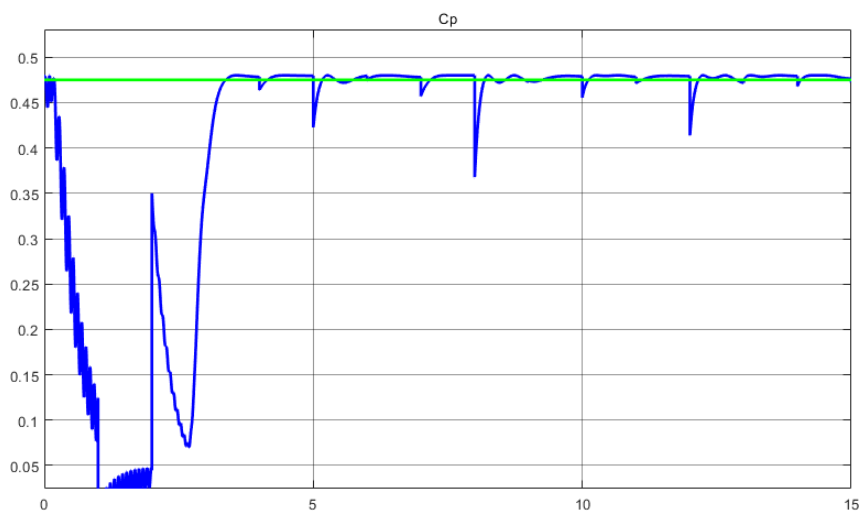


**Figura 4.2.** Rotação da Turbina

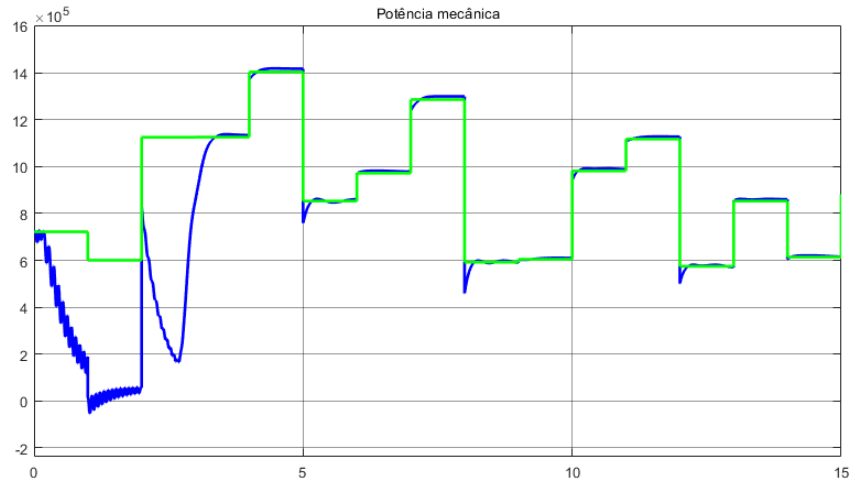


**Figura 4.3.** Lambda

As figuras 4.4 e 4.5 mostram o comportamento do  $C_p$  e da potência mecânica. Percebe-se que os valores reais em azul, caminham para valores muito próximos aos ideais, representados em verde quando a geração se estabiliza. O tempo de resposta é rápido também.



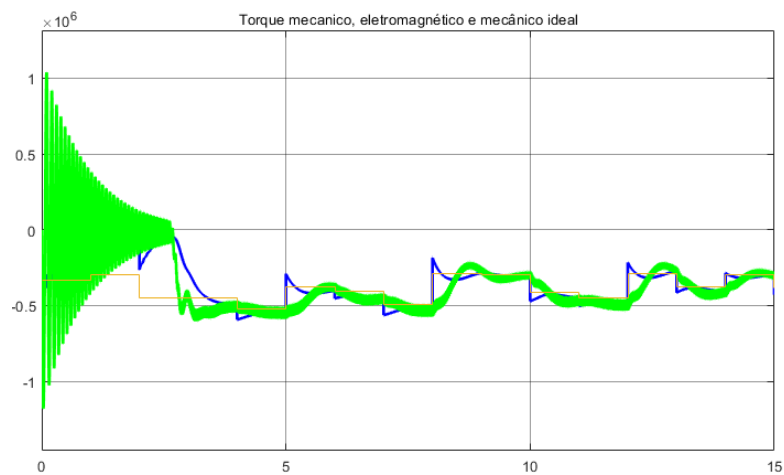
**Figura 4.4.** Coeficiente de Potência  $C_p$



**Figura 4.5.** Potência Mecânica

Por fim, ao analisar os torques, percebe-se que após a estabilização da geração, as linhas azuis e laranja andam bem próximas, o que é bom, já que representam o torque mecânico real e ideal, respectivamente. O torque eletromagnético também apresenta valores dentro do esperado após estabilizar, já que andam em linha com o torque mecânico durante a maior parte do tempo.

Sendo assim, o algoritmo de MPPT se mostra funcionando corretamente, considerando que os parâmetros de geração chave apresentados caminham muito próximo de seus valores ideais.



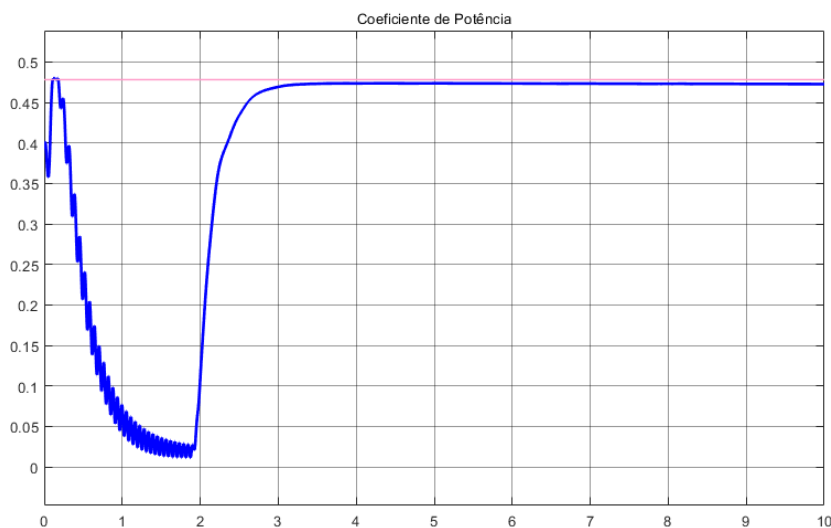
**Figura 4.6.** Torque Mecânico e Eletromagnético

## 4.2 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA SEM AS BATERIAS

Uma vez verificado o correto funcionamento do MPPT, conecta-se nos terminais do boost ao inversor, seguido do filtro LCL, conectado à rede elétrica. Neste caso, foi imposta uma velocidade de vento fixa de 11 m/s, e a simulação tem como objetivo verificar o sincronismo da fonte eólica com a rede.

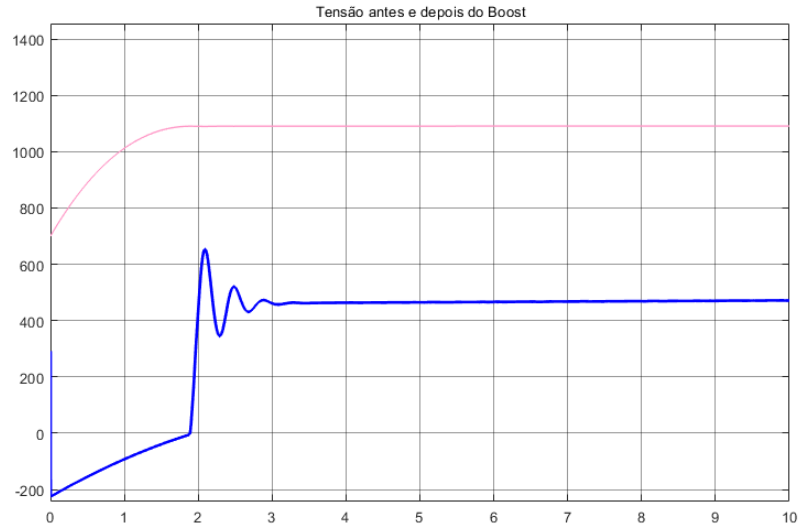
Inicialmente, foi plotada a curva do  $C_p$  da turbina, para avaliar como a mesma e o MPPT se comportam quando todo o sistema funciona em conjunto.

Percebe-se pela figura 4.7 que a turbina passa por um período de instabilidade até o sistema entrar em regime permanente. Após esse período, o  $C_p$  passa a assumir valores muito próximos ao valor ideal calculado de 0,478, o que indica que a turbina e o MPPT estão desempenhando bem seu papel.



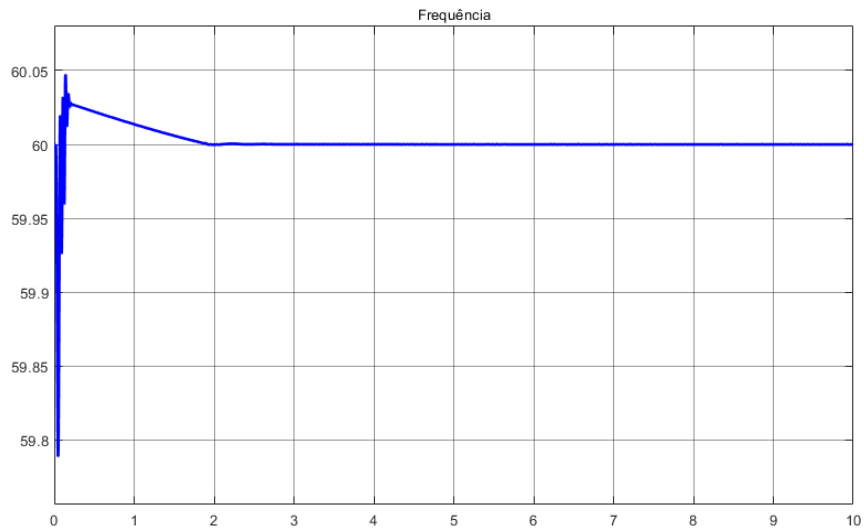
**Figura 4.7.** Coeficiente de Potência

Para o boost, serão plotadas as curvas de tensão antes e depois do conversor, para garantir que este estará elevando a tensão e reduzindo oscilações. O conversor está de fato funcionando e opera dentro dos valores parametrizados na modelagem, elevando a tensão de 460 para 1091 V. É possível perceber pela figura 4.8 que a tensão sobe durante o início do processo e passa por um transiente até se estabilizar.



**Figura 4.8.** Tensão Antes e Depois do Boost

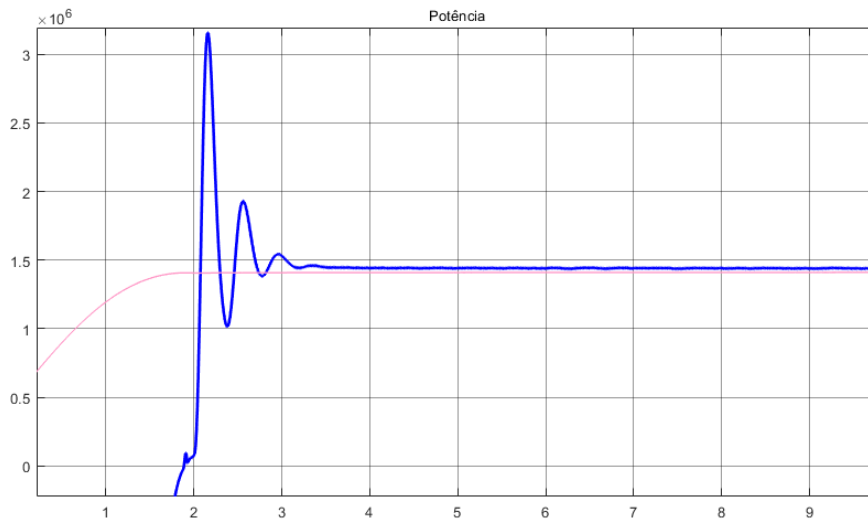
A fim de garantir que o sistema de controle não está atrapalhando o gerador e o sincronismo da rede, foi plotado, na figura 4.9, o gráfico da frequência do sistema, gerada pelo PLL do sistema de controle do inversor. É possível atestar o bom funcionamento do PLL do sistema de controle do inversor, a frequência apresenta certa oscilação no início do sistema, mas se acomoda de forma rápida no valor de 60 Hz e se mantém assim até o final.



**Figura 4.9.** Frequência do Sistema

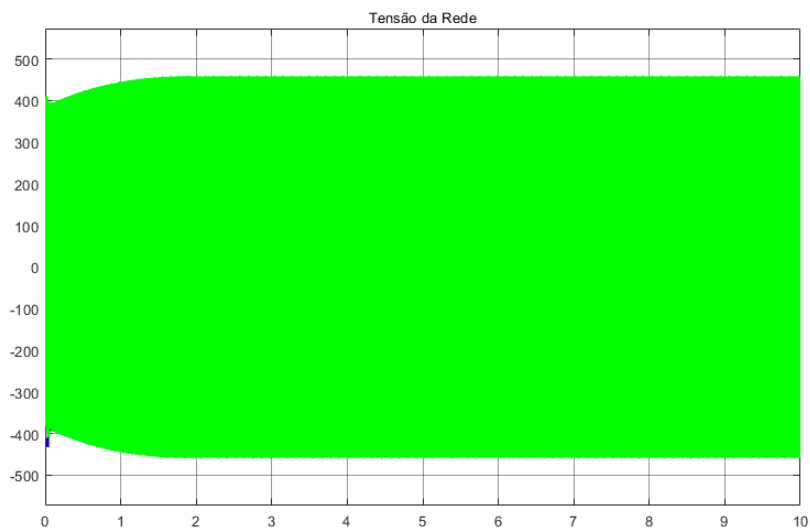
Em seguida, foi plotada a potência que entra e saí do boost, buscando mostrar aqui o correto dimensionamento dos componentes passivos. Percebe-se pela figura 4.10 que a potência antes do boost, representada em azul, apresenta um período transiente até

se estabilizar. A potência após o boost, representada em rosa, apresenta um comportamento mais suave devido a presença do conversor. Após o transiente, a potência se estabiliza em torno do valor dimensionado de  $1,5MW$  e as curvas ficam próximas, o que indica o bom dimensionamento dos componentes passivos do sistema, conservando a potência que flui dentro dele.

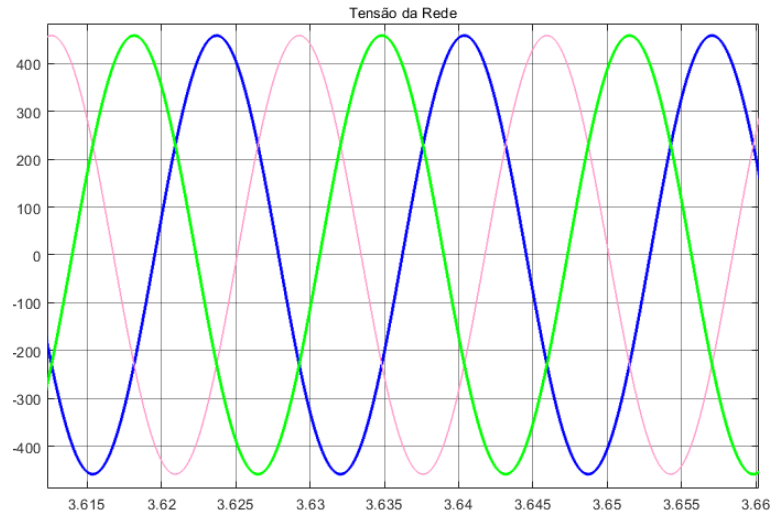


**Figura 4.10.** Potência do Gerador

Por fim, foram plotadas as tensões e correntes da rede por fase. A tensão que o sistema entrega para a rede, mostrada nas figuras 4.11 e 4.12, apresenta valores alinhados com os valores nominais utilizados. A curva apresenta formato senoidal e mantém os valores de picos equilibrados durante todo o intervalo observado.

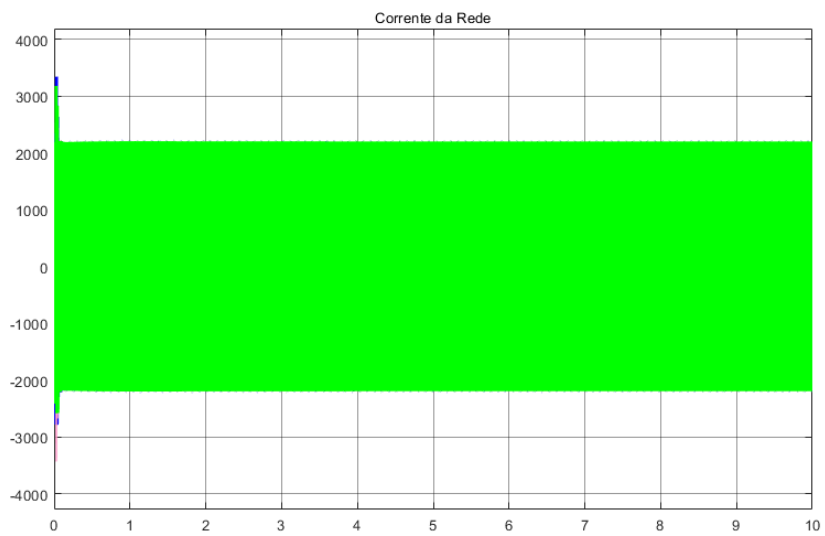


**Figura 4.11.** Tensão da Rede

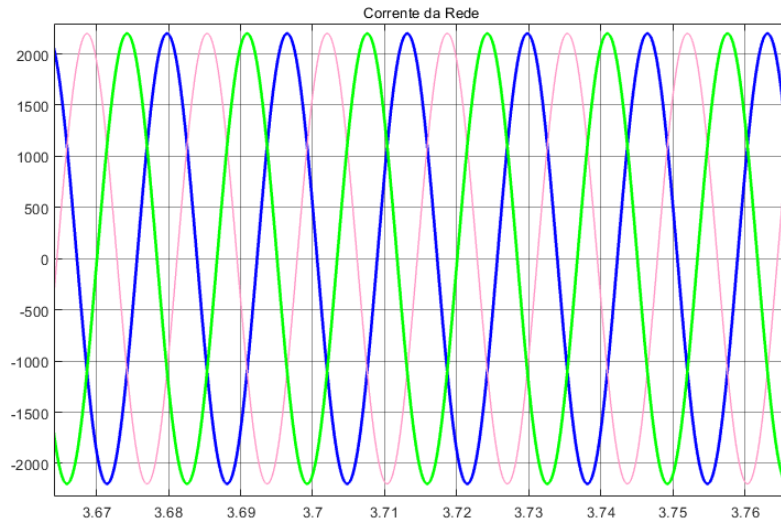


**Figura 4.12.** Tensão da Rede

As correntes, que podem ser observadas nas Figuras 4.13 e 4.14, também se aproximam dos valores nominais utilizados no dimensionamento do sistema. Elas também apresentam valores satisfatórios e equilibrados durante toda a simulação.



**Figura 4.13.** Corrente da Rede em Toda a Simulação



**Figura 4.14.** Corrente da Rede em uma Amostra Pequena

Sendo assim, percebe-se que o sistema e seus componentes estão funcionando de forma adequada quando operando de forma ilhada. A potência que flui no sistema não decai a medida que avança nos componentes. Os sinais de tensão e corrente se mantêm equilibrados em estado permanente e o PLL mantém a frequência constante durante toda a simulação.

### 4.3 TESTE DE CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO NAS BATERIAS SEM A REDE ELÉTRICA

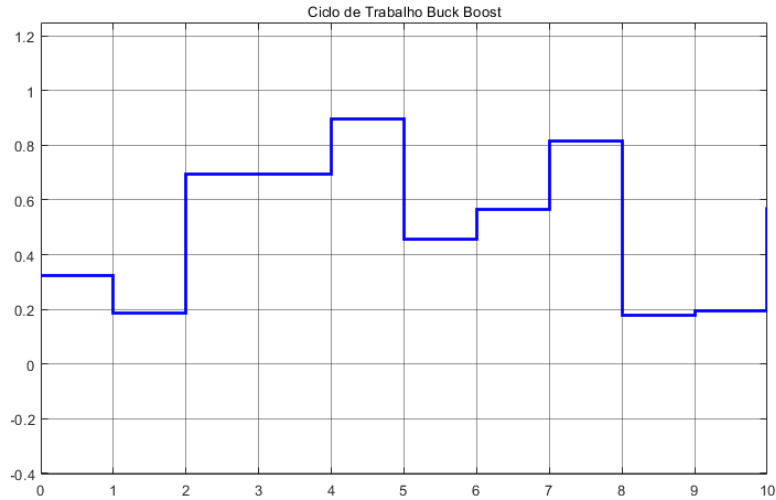
Após validado o funcionamento do MPPT, os sistema será simulado sem a presença do inversor, filtro LCL e rede elétrica. Aqui pretende-se validar a geração da turbina, o funcionamento do MPPT e a sustentação que a bateria é capaz de fornecer para uma carga puramente resistiva conectada na saída do conversor boost.

#### 4.3.1 Teste de Carregamento das Baterias

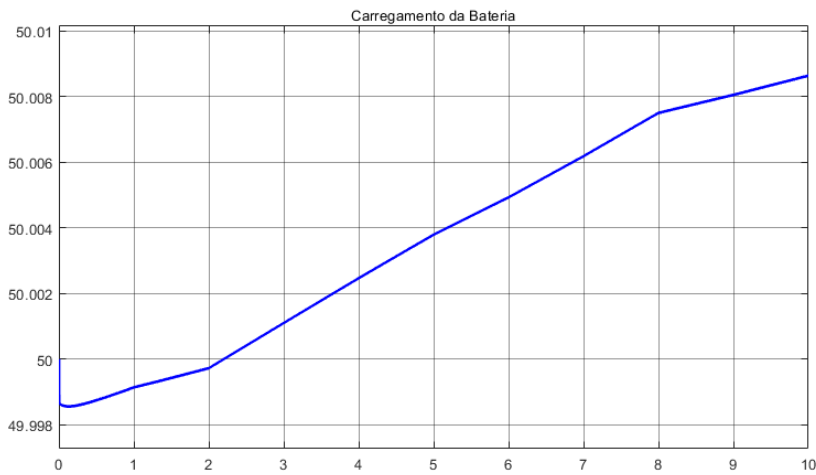
Para este caso, foram utilizados valores variados de ciclo de trabalho para o conversor buck-boost, para que seja possível analisar o comportamento das baterias em diferentes cenários. A resistência ao final do circuito foi de 0,5 ohm e o tempo e simulação observado foi de 10 segundos.



Inicialmente, observou-se as variações do ciclo de trabalho da bateria e como a curva de carregamento responde a essas mudanças. Percebe-se pelas figuras 4.15 e 4.16, que um aumento no ciclo de trabalho do conversor, causa aumento da inclinação do carregamento da bateria, ou seja, valores maiores de ciclo de trabalho fazem com que a bateria carregue mais rapidamente.

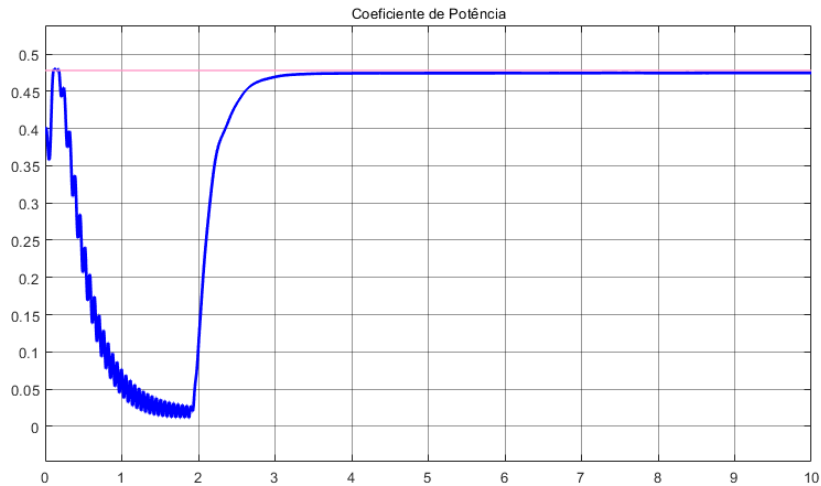


**Figura 4.15.** Ciclo de Trabalho do Conversor Buck-Boost



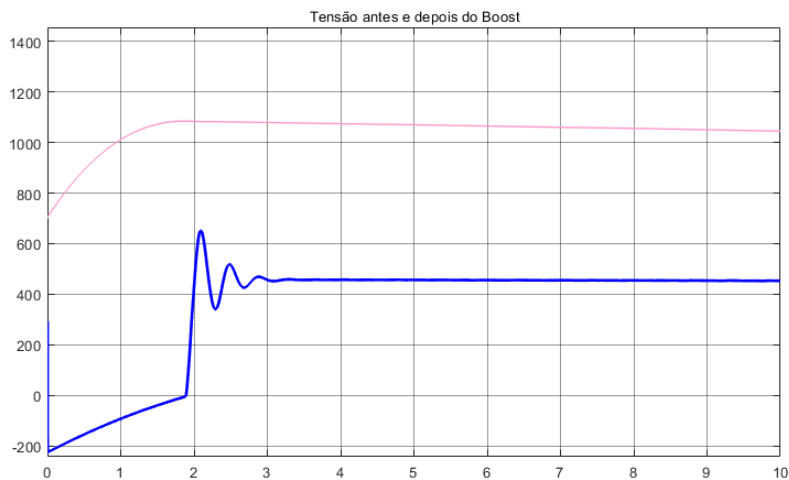
**Figura 4.16.** Carregamento da Bateria

Olhando para a curva do  $C_p$ , percebe-se que a turbina está gerando o máximo de potência e o MPPT está maximando o ganho na turbina de fato. Pela figura 4.17, nota-se que o  $C_p$  passa por uma inicialização mas em seguida passa a assumir valores muito próximos ao valor ideal indicado pela linha rosa da figura 4.17.



**Figura 4.17.** Coeficiente de Potência

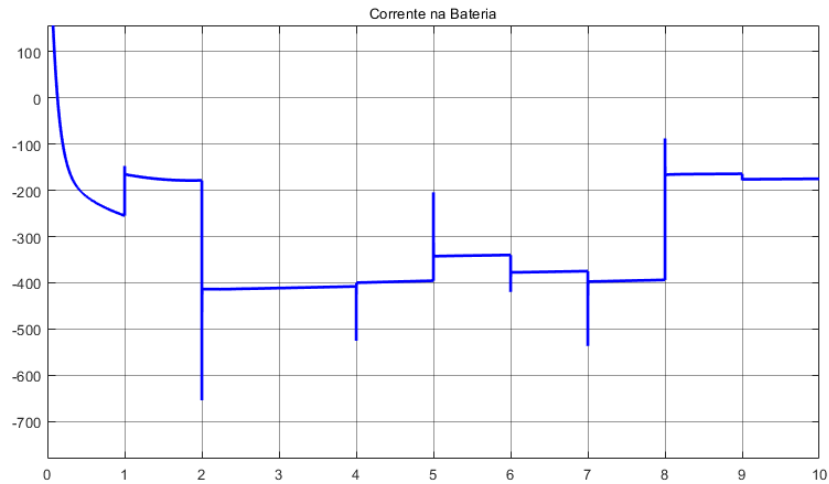
Na figura 4.18, percebe-se que o conversor cumpre com seu papel ao elevar a tensão de 400 V (linha azul), para 1100 V (linha rosa). Este também é responsável por reduzir oscilações no sinal de saída, isso fica evidente pela oscilação de inicialização do sinal de entrada, que não está presente no sinal de saída do conversor.



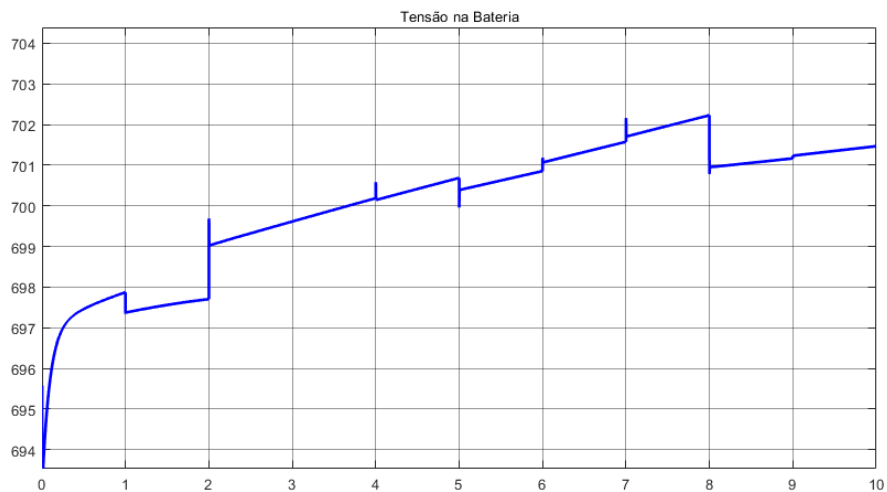
**Figura 4.18.** Tensão no Conversor Boost

Nas baterias, foram plotadas a tensão e a corrente nas figuras 4.19 e 4.20. Nota-se, comparando a curva de corrente com a figura 4.15 do ciclo de trabalho do buck-boost, que a medida que o ciclo de trabalho aumenta, a corrente na bateria também aumenta em valor absoluto, motivo que justifica o maior carregamento da bateria para ciclos de trabalho elevados. Já na tensão, percebe-se que a curva 4.20 varia muito pouco, o que pode indicar um papel fundamental da bateria na sustentação da tensão do barramento

CC do sistema.

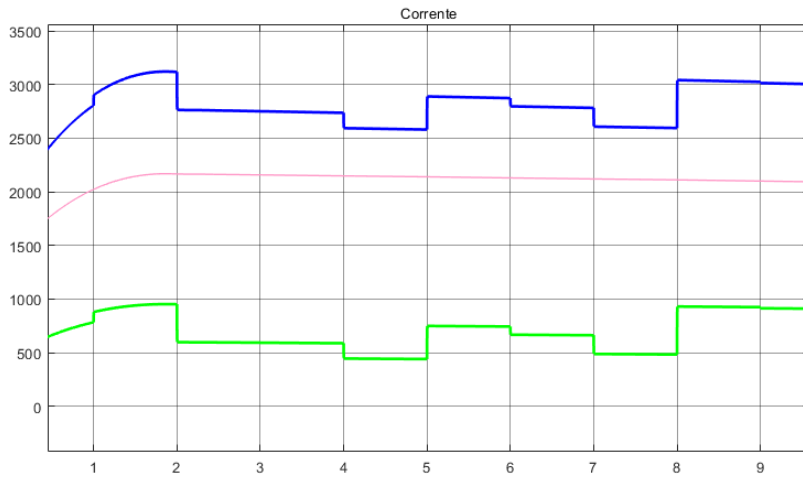


**Figura 4.19.** Corrente na Bateria

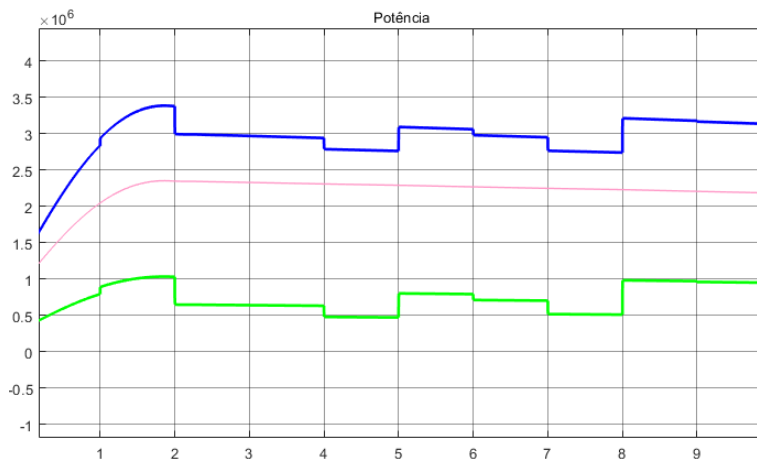


**Figura 4.20.** Tensão na Bateria

Por fim, foram observados os parâmetros de corrente e potência que fluem pelo sistema, nas figuras 4.21 e 4.22. Nas figuras, a linha azul indica a saída do conversor boost, a linha rosa o que flui para a resistência e em verde o que flui para a bateria. Percebe-se que o desenhos das curvas de corrente e potência tem formatos semelhantes. A energia que flui para a carga segue uma constante e as oscilações presentes nas outras curvas são devido as variações no ciclo de trabalho do buck-boost, que afetam apenas as curvas da bateria.



**Figura 4.21.** Corrente do Sistema



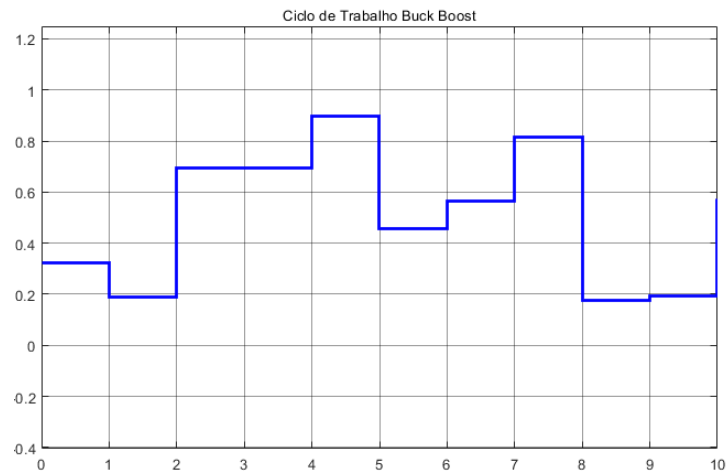
**Figura 4.22.** Potência no Sistema

### 4.3.2 Teste de Descarregamento das Baterias

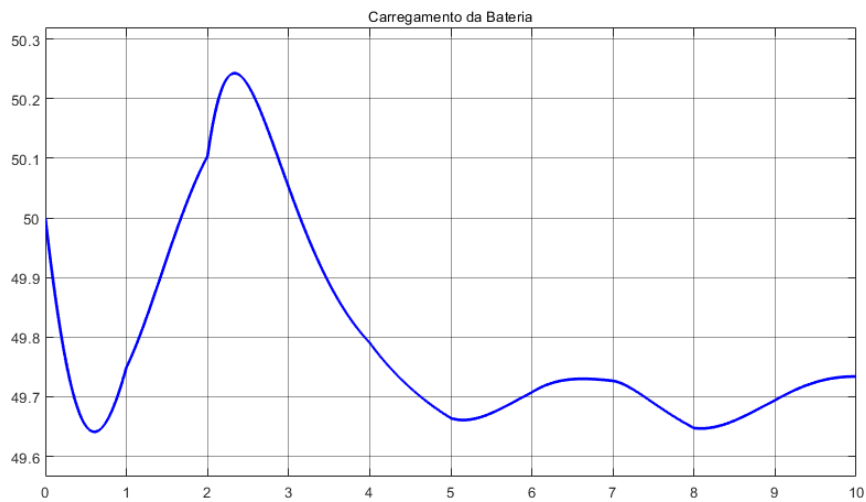
Para este caso, foram utilizados valores variados de ciclo de trabalho para o conversor buck-boost, para que seja possível analisar o comportamento das baterias em diferentes cenários. A resistência ao final do circuito foi de 0,5 ohm e o tempo de simulação observado foi de 10 segundos.

Inicialmente observou-se as variações do ciclo de trabalho da bateria e como a curva de carregamento responde a essas mudanças. Percebe-se pelas figuras 4.23 e 4.24, que um aumento no ciclo de trabalho do conversor, aumenta a taxa de carregamento da bateria, mas que a medida que esta cai, a curva também responde descarregando.

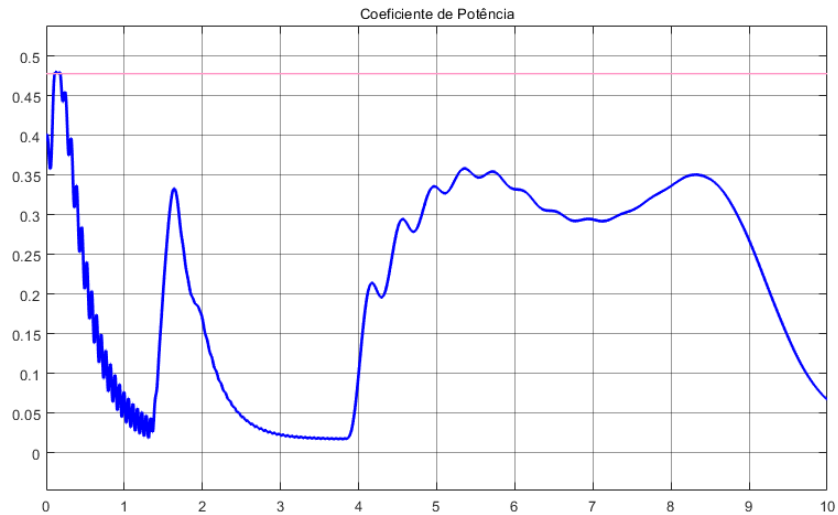
Olhando para a curva do  $C_p$ , percebe-se que na tentativa de fazer a bateria descarregar, a turbina não consegue alcançar o  $C_p$  ideal, como pode ser visto na figura 4.25.



**Figura 4.23.** Ciclo de Trabalho do Conversor Buck-Boost

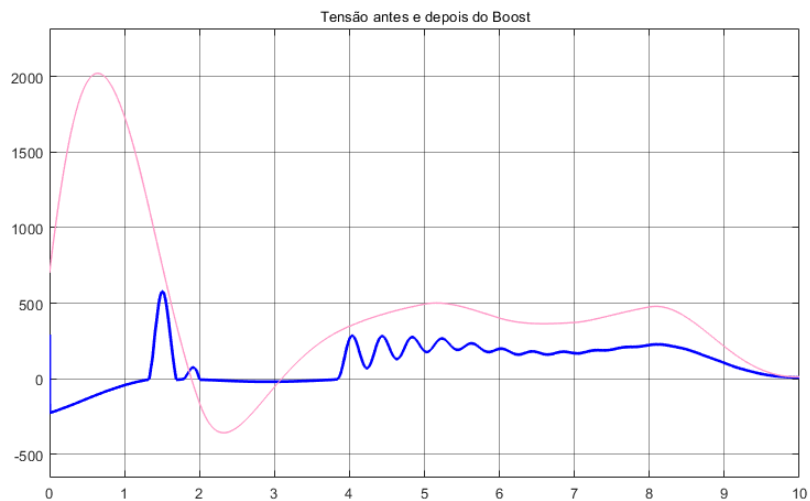


**Figura 4.24.** Carregamento da Bateria



**Figura 4.25.** Coeficiente de Potência

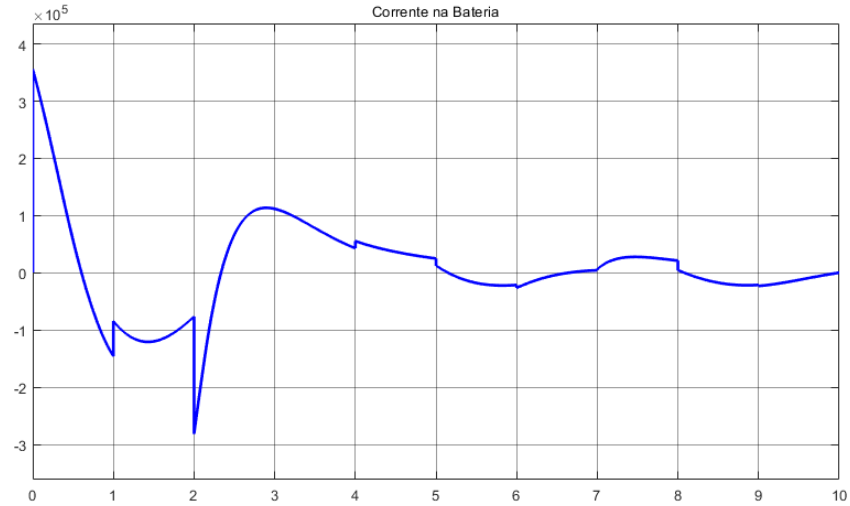
Na figura 4.26, percebe-se que o conversor não consegue cumprir bem seu papel de elevar a tensão. Ele reduz as oscilações do sistema, como podemos perceber pela curva da saída do boost (linha rosa). Mas quando se analisa os níveis de tensão na saída, percebe-se que o MPPT não está conseguindo mapear o ponto de máxima potência.



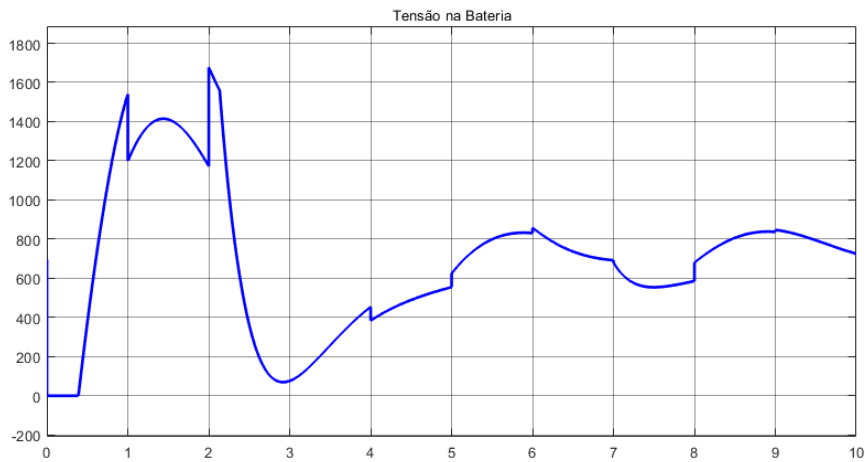
**Figura 4.26.** Tensão no Conversor Boost

Nas baterias, foram plotadas a tensão e a corrente nas figuras 4.27 e 4.28. Nota-se, comparando a curva de corrente com a figura 4.23 do ciclo de trabalho do buck-boost, que a medida que o ciclo de trabalho aumenta, a corrente na bateria também aumenta em valor absoluto, motivo que justifica o maior carregamento da bateria para ciclos de trabalho elevados e a descarga da mesma para ciclos baixos. Já na tensão, percebe-se

que a curva 4.28 varia muito mais que a curva da tensão no cenário de carregamento representada na figura 4.20. Sendo assim, para este cenário, a bateria deixa de ser uma boa sustentação para a tensão no barramento CC do sistema.

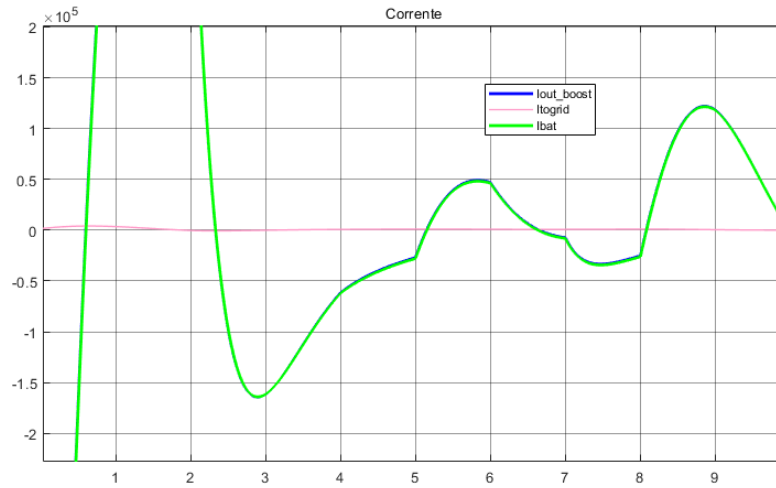


**Figura 4.27.** Corrente na Bateria

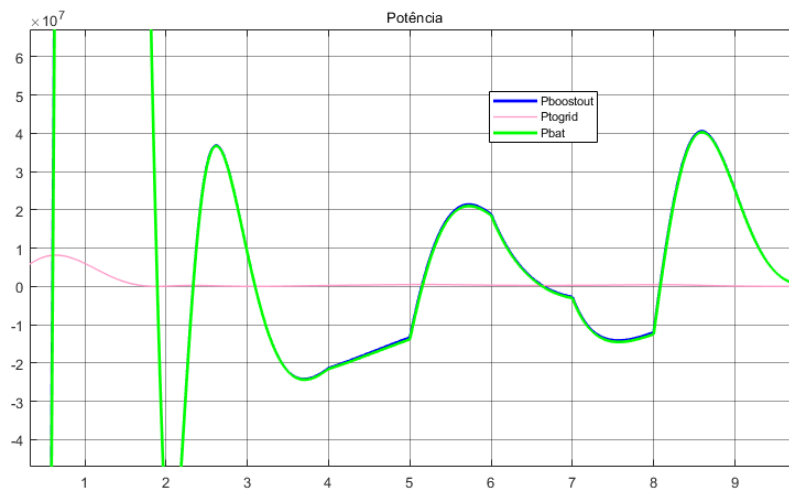


**Figura 4.28.** Tensão na Bateria

Por fim, foram observados os parâmetros de corrente e potência que fluem pelo sistema, nas figuras 4.29 e 4.30. Nas figuras, a linha azul indica a saída do conversor boost, a linha rosa o que flui para a resistência e em verde o que flui para a bateria. Percebe-se que o desenho das curvas de corrente e potência tem formatos semelhantes e se comportam de forma diferente das figuras observadas no teste da bateria carregando. Neste cenário, a potência e corrente que saem do boost e fluem em quase totalidade para as baterias.



**Figura 4.29.** Corrente do Sistema



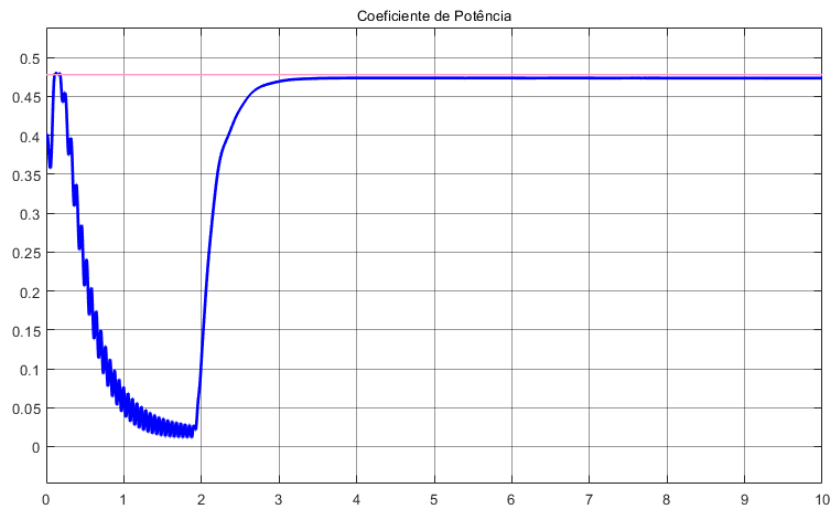
**Figura 4.30.** Potência no Sistema

#### 4.4 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA COM AS BATERIAS

Por fim, para a validação do sistema como um todo, foi simulado o sistema em sua totalidade, com a mesma topologia simulada no tópico 4.3, mas dessa vez com o conversor buck-boost bidirecional e a bateria conectada ao sistema. Para o seguinte cenário, foi inserido um gerador de valores no ciclo de trabalho do conversor buck-boost. Assim será possível observar como o sistema reage as mudanças no ciclo de trabalho do conversor. O tempo definido para essa simulação foi de 10 segundos, tempo suficiente para observar algumas mudanças do ciclo de trabalho e como o sistema se adapta a isso. Adotou-se também o valor fixo de 11 m/s para a velocidade do vento.

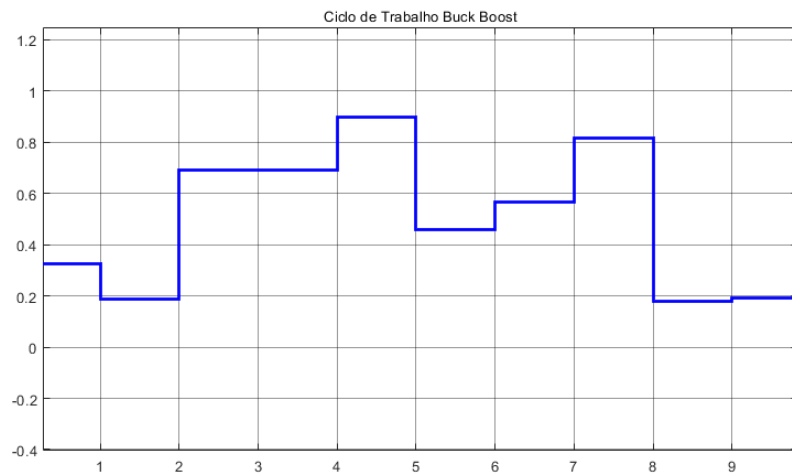


Inicialmente, foi plotada a curva do  $C_p$  da turbina para se avaliar como a mesma e o MPPT se comportam quando o sistema opera completo. Percebe-se pela figura 4.31 que a turbina passa por um período de instabilidade até o sistema entrar em regime permanente. Após esse período, o  $C_p$  passa a assumir valores muito próximos ao valor ideal calculado e não apresenta a mesma tendência de queda vista na figura 4.7, o que indica que a turbina está gerando o máximo de potência. O MPPT está de fato extraindo máxima potência do sistema e o sistema tem sustentação.



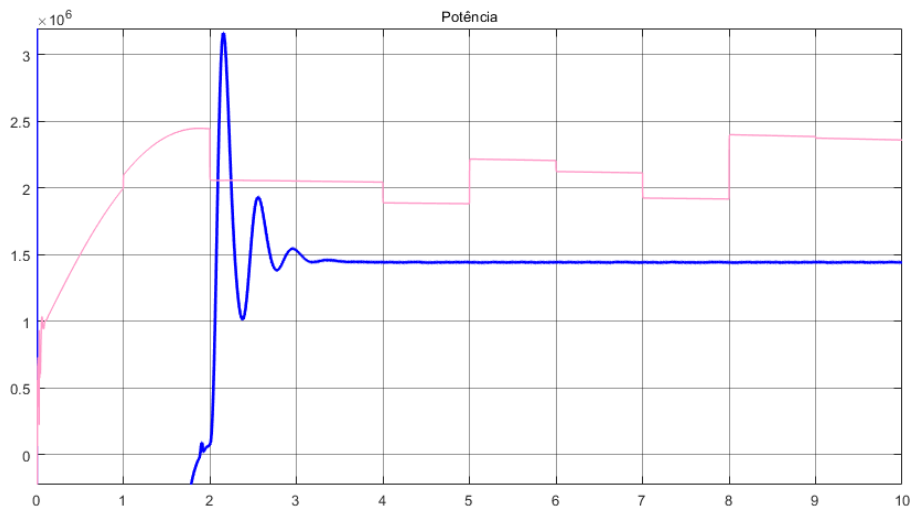
**Figura 4.31.** Coeficiente de Potência

Para o cenário, o ciclo de trabalho do conversor buck-boost variou a medida que a simulação avançava. Seus valores podem ser observados na figura 4.32. A figura mostra valores aleatórios entre 0 e 1, faixa de operação do ciclo de trabalho do conversor buck-boost.



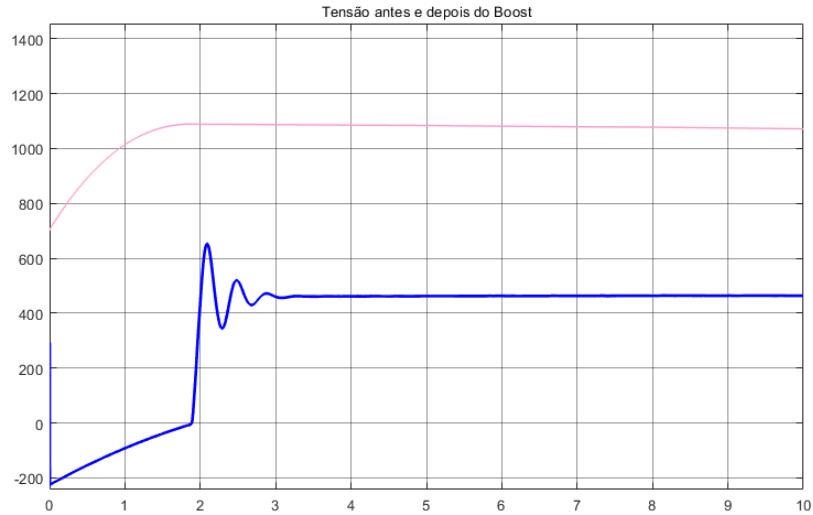
**Figura 4.32.** Ciclo de Trabalho do Buck-Boost

Tendo conhecimento da variação do ciclo de trabalho, foi possível então plotar a potência que entra e sai do conversor boost, para assim verificar que o conversor de fato eleva a tensão do sistema e mantém a potência que passa por ele. Percebe-se pelo gráfico 4.33, que a potência antes do boost, representada em azul, passa a assumir um valor estável e próximo ao  $1,5MW$  utilizado para modelar o sistema de geração. Percebe-se aqui que a potência após o boost é maior, como mostra a linha rosa da figura. Isso se deve a energia inicial armazenada em elementos passivos e na bateria que se encontram após o conversor.



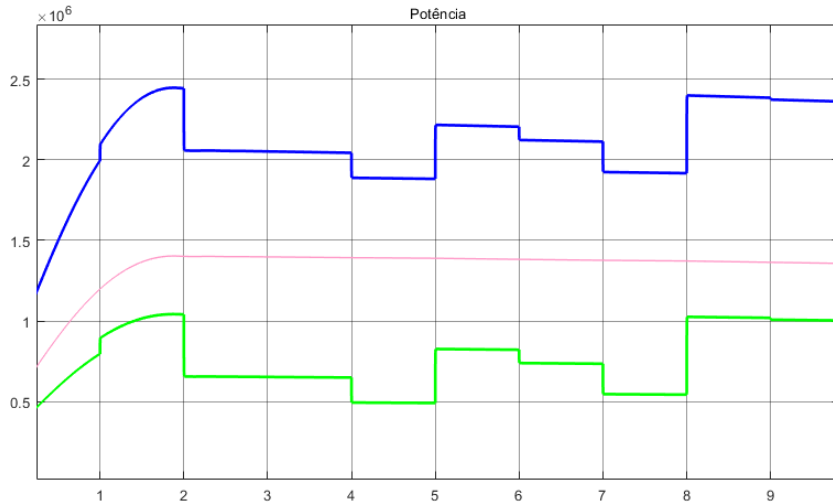
**Figura 4.33.** Potência no Boost

Ainda no boost, foram plotadas as tensões antes e depois. A tensão antes do boost está representada em azul, enquanto que a tensão após o boost está apresentada em rosa. O conversor eleva a tensão que chega para o restante do circuito, assim como reduz oscilações no sinal de tensão, como é visto na figura 4.34



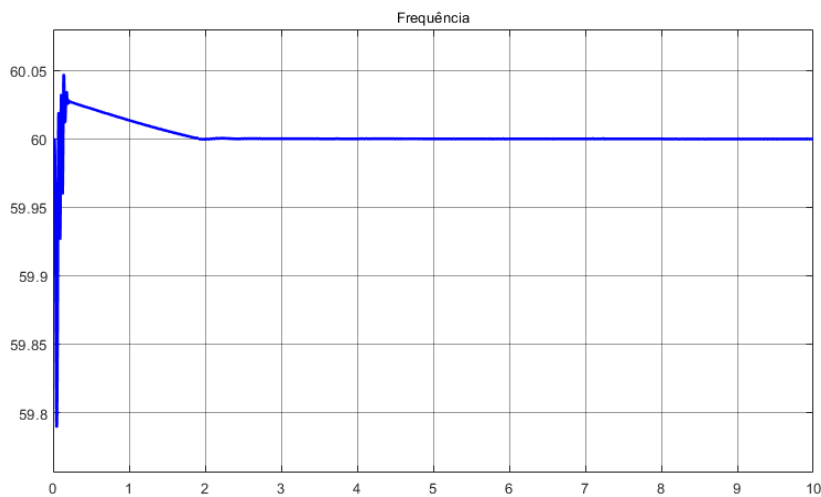
**Figura 4.34.** Tensão Antes e Depois do Boost

Em seguida, analisou-se as potências que fluem para a rede e para as baterias, de forma a mensurar o fluxo de potência para cada parte do sistema. Pela figura 4.35, é possível notar que durante a simulação, flui mais potência para a rede (curva rosa) do que para as baterias (curva verde) e que a lei de Kirchoff é respeitada, pois o somatório das potências da rede e da bateria é exatamente igual a potência em azul que sai da conversor boost. O sistema também se mostra resiliente a variações dos parâmetros, visto que as mudanças no ciclo de trabalho do conversor Buck-boost pouco altera a potência, ela responde muito rápido e não apresenta overshoot. Vale ressaltar que as linhas azul e verde apresentam formato muito similar. Isso se deve ao sistema de controle que faz com que a potência em rosa, que segue para o inversor, siga uma constante, resistente as alterações que acontecem no ramo da bateria.



**Figura 4.35.** Potência

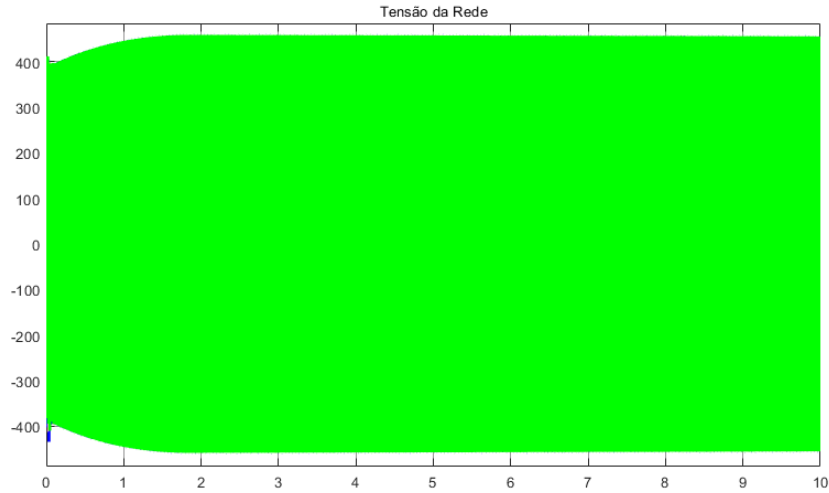
A fim de garantir que o sistema de controle não está influenciando no bom funcionamento do gerador e a sincronia da rede, foi plotado o gráfico da frequência do sistema, gerada pelo PLL do sistema de controle do inversor. É possível atestar, pela figura 4.36, o bom funcionamento do PLL do sistema, pois a frequência apresenta oscilação no estado transiente inicial, mas a oscilação cessa rapidamente e a frequência se mantém em 60 Hz até o final da simulação.



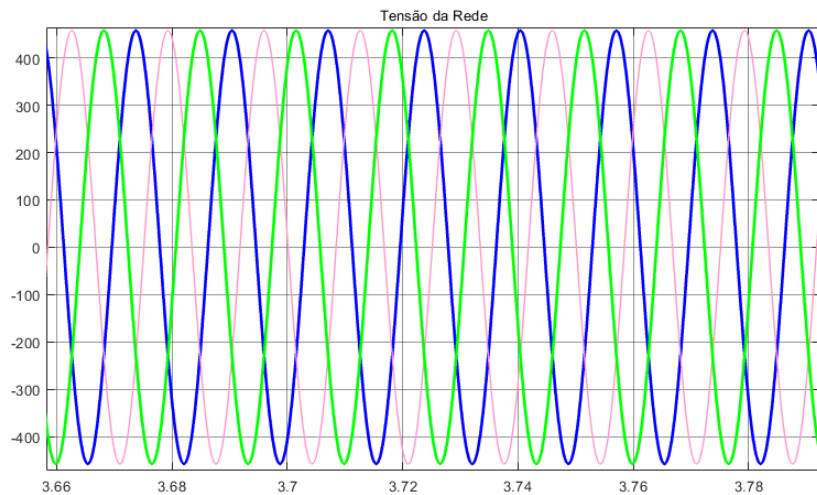
**Figura 4.36.** Frequência do Sistema

Foram plotadas as tensões e correntes da rede por fase para analisar a qualidade dos sinais gerados. A tensão que o sistema entrega para a rede, mostrada nas figuras 4.37 e 4.38, apresenta valores equilibrados e alinhados com os valores nominais utilizados

para modelar o sistema. A curva apresenta formato senoidal e mantém os valores de picos constantes e equilibrados durante todo o intervalo observado.

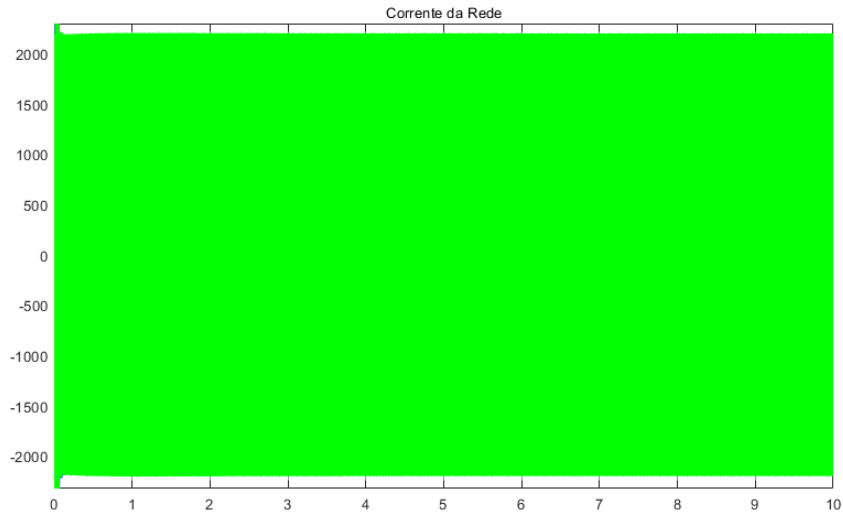


**Figura 4.37.** Tensão da Rede

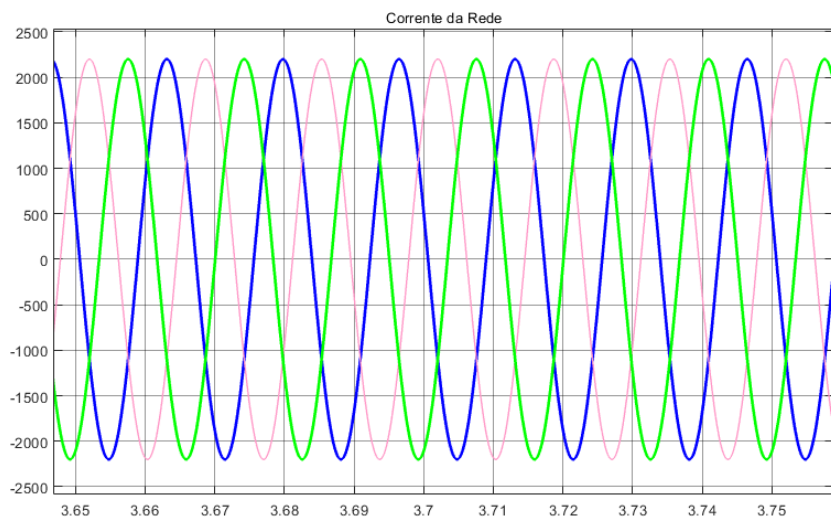


**Figura 4.38.** Tensão da Rede

A corrente que o sistema entrega para a rede, mostrada nas figuras 4.39 e 4.40, apresenta valores próximos aos valores nominais utilizados. A curva apresenta formato senoidal e mantém os valores de picos constantes e equilibrados durante todo o intervalo observado.

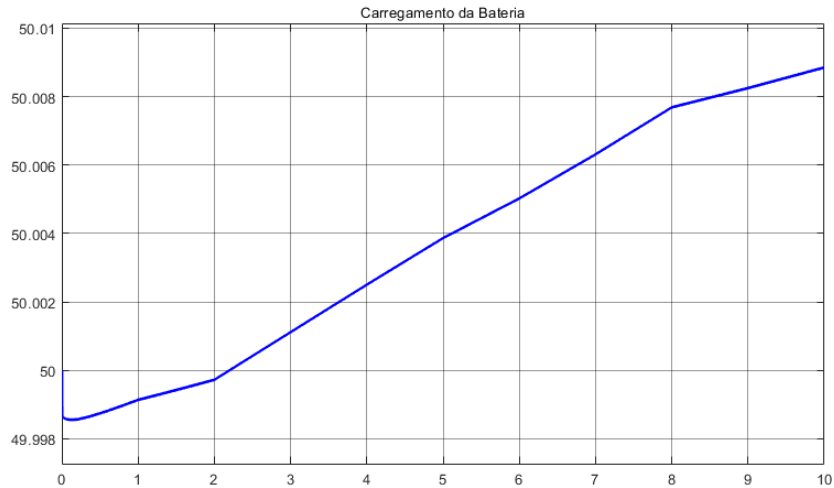


**Figura 4.39.** Corrente da Rede em Toda a Simulação



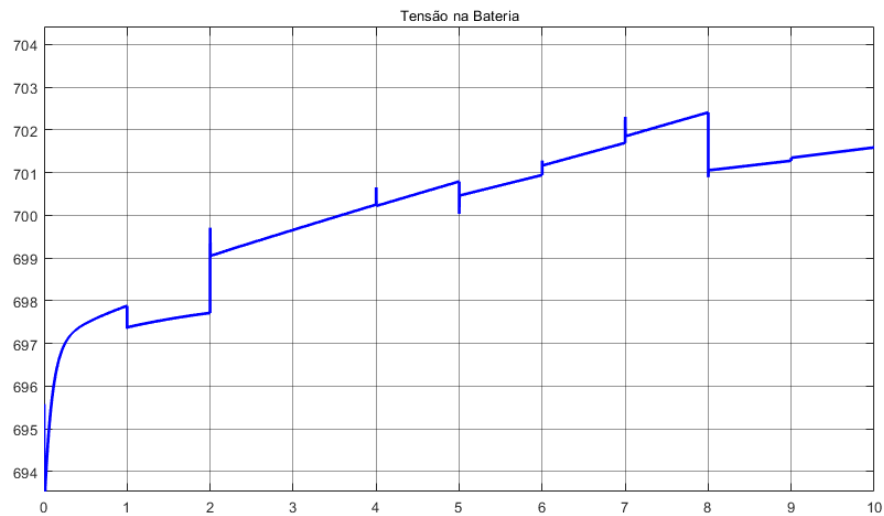
**Figura 4.40.** Corrente da Rede em uma Amostra Pequena

Por fim, os valores na bateria serão analisados. Inicialmente observou-se o estado de carregamento da bateria. Pela figura 4.41, nota-se que a bateria se mantém carregando durante toda a simulação, mas que esse valor é muito pequeno. Sendo assim, a bateria pode ser vista como um complemento ao sistema, atuando como uma fonte de tensão que pode auxiliar na manutenção da tensão no barramento CC. Nota-se também, relacionando a figura 4.41 com a figura 4.32, que a medida que o ciclo de trabalho aumenta, a inclinação da curva de carregamento da bateria aumenta também.

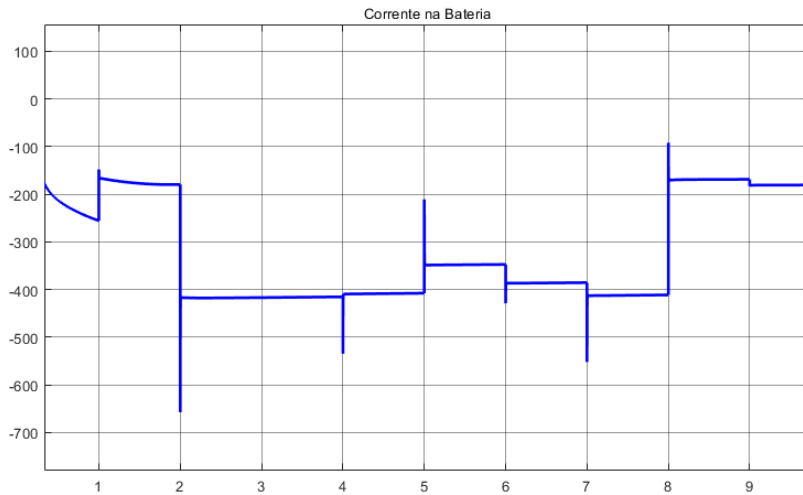


**Figura 4.41.** Carregamento da Bateria

Por fim, serão observadas a tensão e a corrente na bateria. Pelo observado nas figuras 4.43 e 4.42, percebe-se que a tensão se eleva a medida que a simulação avança, isso se deve ao sistema se adaptar a variação e precisar entregar os mesmos níveis de tensão. Já a corrente apresenta variações tanto positivas e negativas a medida que o ciclo de trabalho varia. Percebe-se que ambos os sinais apresentam overshoot, mas que o tempo de acomodação é extremamente curto também.



**Figura 4.42.** Tensão na Bateria



**Figura 4.43.** Corrente na Bateria

Sendo assim, percebe-se que para a topologia simulada, as baterias funcionam como um complemento ao gerador para manter a potência da rede e a tensão no barramento CC. Não foi possível durante o trabalho, encontrar um cenário onde a bateria descarrega energia na rede, abrindo portas para investigações futuras e possibilidades de melhoria.



# CONCLUSÕES

Neste trabalho, inicialmente, foram apresentados dados que reforçam a demanda global por fontes de energia renováveis. Em seguida, mostrou-se o crescimento da modalidade eólica de geração e o seu potencial de crescimento nos próximos anos tanto no Brasil, como no mundo. As diferentes tecnologias para a aplicação da energia eólica foram debatidas e por fim fez-se a escolha do gerador síncrono de ímãs permanentes operando junto a um banco de baterias.

No segundo capítulo, durante a fundamentação teórica, foram abordadas as topologias, as equações e curvas que regem o comportamento de cada um dos blocos utilizados no sistema. O funcionamento da turbina, do gerador, do conversores de potência, inversor e demais componentes presentes no sistema foram explicados e detalhados. Também foi introduzida a modelagem por modelos médios, uma forma de simplificar os componentes chaveados do sistema.

No terceiro capítulo, foram detalhados todos os componentes utilizados na simulação. Aqui mostra-se cada um dos blocos utilizados no SIMULINK. Também foram apresentadas algumas curvas de funcionamento da turbina, o código do MPPT e todos os parâmetros dos componentes do sistema.

No quarto capítulo, observou-se os resultados obtidos nas simulações. Inicialmente o MPPT foi testado e validado junto a uma carga resistiva e sem banco de baterias e foi atestado o seu correto funcionamento. Em seguida observou-se a bateria carregando e descarregando com apenas com uma carga resistiva conectada. Para o modo carregando, a simulação se comportou bem, onde a bateria carregou mais para ciclos de trabalho elevados. O sistema se mostrou robusto para o carregamento, respondendo bem para as mudanças realizadas durante a simulação. Porém para forçar o descarregamento da bateria, o sistema perdeu qualidade. Foram necessárias alterações nos

parâmetros internos dos conversores, que fizeram com que a turbina e o MPPT parassem de funcionar corretamente. A tensão na bateria passou a oscilar muito e a corrente deixou de fluir para a carga, fazendo com que praticamente toda a potência do sistema fosse direto para as baterias.

Por fim, foi observado o comportamento do sistema completo com as baterias. Aqui foi possível reparar o impacto real das baterias, pois as curvas de potência apresentam formas de onda muito mais estáveis e a rede elétrica sofre menos com avarias no sistema, a medida que as baterias também melhoraram a sustentação da tensão no barramento CC. Vale ressaltar o bom funcionamento do PLL do sistema de controle, pois durante a simulação a frequência do sistema manteve cravada nos 60 Hz.

Com base neste trabalho, os seguintes assuntos podem ser foco de trabalhos futuros:

- Estudo e detalhamento do sistema com diferentes geradores.
- Utilização dos modelos chaveados dos conversores de potência.
- Implementação de mais de uma forma de geração dentro do mesmo sistema.
- Alterações no sistema para que seja possível visualizar as baterias descarregando de forma estável e em sua completude.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, S. Z. Simulation, implementation and testing of three-phase controlled power inverter behavior. Citado na página 17.

ACCETTA, A.; PUCCI, M.; CIRRINCIONE, G.; CIRRINCIONE, M. On-line wind speed estimation in im wind generation systems by using adaptive direct and inverse modelling of the wind turbine. In: *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–8. Citado na página 4.

AHMED, S. F. K.; WILLIAMS, B. “passive filter design for three-phase inverter interfacing in distributed generation. Citado na página 19.

ARAUJO, T. J. Estudo de técnicas de modelagem para conversores cc-cc. Citado na página 23.

BARBI, I. *MODELAGEM DE CONVERSORES CC- CC EMPREGANDO MODELO MÉDIO EM ESPAÇO DE ESTADOS*. FLORIANOPOLIS, Brasil: [s.n.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 15 and 23.

BICZEL, P.; JASINSKI, A.; LACHECKI, J. Power electronic devices in modern power systems. In: *EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool"*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1586–1586. Citado na página 4.

CARCANGIU, S.; MONTISCI, A. A building-integrated eolic system for the exploitation of wind energy in urban areas. In: *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 172–177. Citado na página 3.

IBRAHIM, M.; FAWAZ, S. Modeling and simulation of 1.5mw wind turbine. p. 7882–7888, 01 2018. Citado na página 4.

IRMAK, E.; AYAZ, M. S.; GOK, S. G.; SAHIN, A. B. A survey on public awareness towards renewable energy in turkey. In: *2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 932–937. Citado na página 1.

LEE, J.; ZHAO, F. *Global Wind Report 2021*. [S.l.], 2021. v. 0, n. 0. Citado na página 2.

LOPES G., F. R. e. V.-F. Algoritmo de seguimento do ponto de máxima potência para sistemas fotovoltaicos considerando minimização de erro e derivada da potência. *TEMA (São Carlos) [online]*, v. 21, n. 1, p. 157–170, 2020. Citado na página 9.

LÓPEZ-GARCIA, I.; ESPINOSA-PÉREZ, G.; BUENO-LÓPEZ, M. Analysis of the power coefficient for a wind generation system. In: *2014 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES TD-LA)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. Citado na página 8.

MASILI, G.; RAMOS, E. G. *BOLETIM MENSAL DE ENERGIA de AGOSTO DE 2022*. [S.l.], 2021. v. 0, n. 0. Citado na página 2.

OLIVEIRA, J. P. J. d. Geradores síncronos a imãs permanentes aplicados a aerogeradores: modelagem, obtenção de parâmetros e validação laboratorial. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)—Universidade de Brasília*, 2018. Citado na página 10.

POZO, N.; POZO, M. Battery energy storage system for a hybrid generation system grid connected using fuzzy controllers. In: *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado na página 4.

RASHID, M. H. *POWER ELECTRONICS : CIRCUITS, DEVICES APPLICATIONS*. 3. ed. [S.l.]: PEARSON, 2017. Citado na página 14.

REZNIK M.GODOY SIMÕES, A. A.-D. S. M. M. A. Lcl filter design and performance analysis for grid interconnected systems. Citado na página 20.

V., V.; R., V. S. R. Microcontroller based bidirectional buck–boost converter for photo-voltaic power plant. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, v. 5, n. 3, p. 745–758, 2018. ISSN 2314-7172. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S231471721730017X>>. Citado na página 14.

WU, B. *POWER CONVERSION AND CONTROL OF WIND ENERGY SYSTEMS*. [S.l.: s.n.]. Citado na página 19.