

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Dissertação de mestrado do curso de Engenharia Elétrica

Júlio Cezar Oliveira de Souza Lescano

**Modelagem e Simulação de uma Micro
Geração Hidroelétrica Conectada à Rede de
Energia Elétrica**

Campo Grande - MS

29 de Julho de 2022

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Dissertação de mestrado do curso de Engenharia Elétrica

Júlio Cezar Oliveira de Souza Lescano

Modelagem e Simulação de uma Micro Geração Hidroelétrica Conectada à Rede de Energia Elétrica

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMS para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Processamento Eletrônico de Energia.

Orientador: Luigi Galotto Junior

Campo Grande - MS

29 de Julho de 2022

Modelagem e Simulação de uma Micro Geração Hidroelétrica Conectada à Rede de Energia Elétrica

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMS para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Processamento Eletrônico de Energia.

Banca Examinadora:

PROF. DR. LUIGI GALOTTO JUNIOR (ORIENTADOR), UFMS

PROF. DR. MAURO CONTI PEREIRA (EXTERNO), IFMS

PROF. DR. MOACYR AURELIANO GOMES DE BRITO, UFMS

PROF. DR. RUBEN BARROS GODOY, UFMS

Campo Grande - MS

29 de Julho de 2022

Agradecimentos

A meus familiares, Neuza Oliveira de Souza Lescano, Bento Lescano de Souza e Renata Lorena Oliveira de Souza Lescano, e aos amigos pelo apoio durante todo o período de pós-graduação, ao meu orientador, Luigi Galotto Junior e coorientador Naji RaJai Nasri Ama pela atenção, compreensão e sabedoria dispensadas a mim durante o período de elaboração deste projeto, e a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul pela estrutura disponibilizada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e da Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (Fundect) – CHAMADA FUNDECT N° 17/2019.

Resumo

As hidroelétricas convencionais contêm um problema ambiental e social causado pela necessidade de barragens para a criação de reservatório para, além de armazenar água - e consequentemente energia potencial hidráulica - controlar a vazão de água no bico injetor para a turbina. Uma forma de eliminar esses problemas é a geração hidrocínética, que utilizam apenas a vazão natural dos rios, análogos à geração eólica. O presente trabalho primeiramente apresenta um modelo de simulação de uma turbina hidroelétrica do tipo Pelton, utilizando dados coletados em um projeto anterior do autor.

Após o modelo gerado para a simulação, a segunda etapa do projeto consiste em elaborar um conversor de potência e um sistema de controle para a injeção de potência na rede elétrica. O sistema de geração é composto por um gerador síncrono de ímã permanente, que tem sua tensão de saída retificada, entregue a um barramento de corrente contínua, que por um inversor fonte de tensão, injeta corrente elétrica na rede. O sistema de controle é composto por: um MPPT (*Maximum Power-Point Tracking*), que afere a tensão e corrente no barramento de corrente contínua e gera a uma referência de tensão do link CC para a máxima potência do sistema turbina-gerador; um controlador de tensão do link CC, que fornece a referência para o controle de injeção de corrente elétrica na rede; e pelo PLL (*Phase-Locked Loop*), que produz a modulante para o inversor fonte de tensão.

O presente projeto tem outra importante contribuição, que consiste na análise da operação da turbina hidráulica em conjunto com o gerador de ímã permanente e o retificador, onde foi possível identificar a tensão e a potência do conjunto disponível para cada valor de vazão de entrada na turbina. Destaca também os pontos de máxima potência deste sistema, em função da vazão e dos limites físicos de tensão escolhidos para a operação do inversor de tensão a ser conectado à rede elétrica.

Por fim, as análises foram repetidas com uma turbina de eixo horizontal, para a validação e aplicação do método, demonstrando a facilidade da metodologia proposta, que pode subsidiar futuros desenvolvimentos e implementações práticas.

Palavras-chave: micro geração, hidrocínética, coeficiente de potência, on-grid.

Lista de ilustrações

Figura 1 –	Esquemático do Sistema Apresentado.	10
Figura 2 –	Modelo <i>simulink/matlab</i> da turbina e gerador Soderfors com controle de velocidade de rotação.	12
Figura 3 –	Ilustração da esquemática do sistema de controle e proteção.	13
Figura 4 –	Circuito Elétrico do projeto de Kerdtuad et al. (2018)	14
Figura 5 –	Circuito Elétrico do projeto de Rajagopal e Singh (2011)	15
Figura 6 –	Circuito Elétrico do projeto de Rathore e Singh (2014)	16
Figura 7 –	Imagem da turbina do projeto de Tian et al. (2016)	17
Figura 8 –	Exemplo de curva característica do sistema $C_p \times \lambda$	21
Figura 9 –	Inversor de tensão monofásico.	28
Figura 10 –	Diagrama de Blocos do PLL.	30
Figura 11 –	Bancada com a turbina Pelton	31
Figura 12 –	Dados $C_p \times \omega$ obtidos para a turbina Pelton.	33
Figura 13 –	Dados normalizados e modelo da turbina em regime permanente.	34
Figura 14 –	Subsistema para a simulação da turbina em regime permanente.	35
Figura 15 –	Dados $C_p \times \lambda$ e modelo da turbina de eixo horizontal.	36
Figura 16 –	Parâmetros do Gerador Síncrono de ímã permanente.	38
Figura 17 –	Configuração do bloco do retificador.	39
Figura 18 –	Configuração do bloco do inversor de tensão.	40
Figura 19 –	Curvas características do sistema hidráulico apresentado para uma vazão fixa.	42
Figura 20 –	Diagrama de blocos do MPPT simulado no <i>simulink/matlab</i>	43
Figura 21 –	Diagrama de Blocos do sistema de controle.	44
Figura 22 –	Diagrama de Bode do sistema de controle de tensão	46
Figura 23 –	Diagrama de Bode do sistema de controle de corrente.	47
Figura 24 –	Diagrama de Blocos do PLL simulado no <i>simulink/matlab</i>	48
Figura 25 –	Sistema simulado no <i>Simulink/MATLAB</i>	50
Figura 26 –	Resultados no período de 6 segundos.	51
Figura 27 –	Gráfico do sinal do PLL sincronizado.	52
Figura 28 –	Transitórios da malha de controle da corrente da rede I_g	53
Figura 29 –	Transitórios da malha de controle da corrente da rede I_g , com a tensão em escala.	53
Figura 30 –	Gráficos de potência e eficiência no tempo.	54

Figura 31 –	Diagrama da simulação do sistema para obtenção da curva característica.	55
Figura 32 –	Curvas características de operação do sistema em regime permanente.	57
Figura 33 –	Gráficos no tempo de tensão e eficiência.	59
Figura 34 –	Gráficos de Corrente $I_g(A) \times$ Tempo (s).	60
Figura 35 –	Curvas características de operação do sistema com a turbina de eixo horizontal.	62

Sumário

1	Introdução	9
1.1	Contextualização	9
1.2	Visão geral do sistema apresentado	9
1.3	Objetivos	11
1.3.1	Objetivo geral	11
1.3.2	Objetivos Específicos	11
1.4	Organização do trabalho	11
2	Revisão Bibliográfica - Estado da Arte	12
3	Fundamentação Teórica	20
3.1	Micro geração — Fontes primárias	20
3.1.1	Energia Eólica	20
3.1.2	Energia hidráulica	22
3.2	Modelagem baseada em dados - Regressão linear	24
3.3	Gerador síncrono de ímã permanente	26
3.4	Eletrônica de potência	26
3.4.1	Retificadores	26
3.4.2	Inversor fonte de tensão	27
3.5	Controladores	28
3.5.1	MPPT - Rastreamento do ponto de máxima potência	28
3.5.2	Controlador PI - Proporcional e Integral	29
3.5.3	PLL — Malha de Sincronismo de Fase	29
4	Metodologia	31
4.1	Modelagem das Turbinas	31
4.1.1	Modelagem da turbina Pelton	31
4.1.2	Aplicação do modelo na simulação.	35
4.1.3	Modelagem da turbina de eixo horizontal	35
4.2	Dimensionamento do gerador	36
4.3	Dimensionamento do conversor - retificador e inversor	38
4.4	Projeto dos sistemas de controle	41
4.4.1	MPPT	41
4.4.2	Controladores de tensão e corrente	43
4.4.3	Projeto do controlador de tensão no link CC	45
4.4.4	Projeto do controlador de corrente injetada na rede	46

4.4.5	PLL	47
5	Resultados de simulação	50
5.1	Resultados com a turbina Pelton como máquina primária.	50
5.1.1	Resultados em regime transitório.	50
5.1.2	Resultados em regime permanente.	55
5.2	Resultados com a turbina de eixo horizontal.	58
5.2.1	Resultados em regime transitório.	58
5.2.2	Resultados em regime permanente.	60
	Conclusão	63
5.3	Trabalhos Futuros e Considerações	64
	Referências	65

1 Introdução

1.1 Contextualização

O aumento dos investimentos nas matrizes de energias renováveis ocorre em todo o mundo devido a questões ambientais. No Brasil, a geração hidrelétrica se destaca, ocupando em torno de 60% da matriz de produção de energia elétrica (EPE, 2021) e também geração distribuída fotovoltaica (ASSAD; BATISTA, 2018) vem tendo um crescimento tem sido exponencial. As hidrelétricas predominantes têm impactos ambientais relevantes, pois necessitam de barragem e reservatórios de grande área. Este é um requisito importante a ser considerado na escolha do local para novas instalações, que são profundamente dependentes das características geográficas. Portanto, são inviáveis para gerações distribuídas, mesmo com recursos hídricos disponíveis. Para essas aplicações, o aproveitamento da energia cinética dos rios (sem represas de água) de forma distribuída apresenta boas expectativas de viabilidade. (TROULLAKI et al., 2019; RANA; MEENA, 2018).

Os geradores hidrocínéticos dispensam o acúmulo de massa de água, pois são dimensionados para a vazão do rio (ROY, 2005). Como não possui reservatório, não possui controle de vazão, fazendo com que a energia produzida dependa diretamente da vazão do rio. Em épocas de seca, há redução da capacidade energética produzida, devendo ser utilizadas em complemento a rede elétrica ou a uma microrrede (RAJAGOPAL; SINGH, 2011; RATHORE; SINGH, 2014). Estes geradores também são categorizados como geração distribuída, por isso possuem todas as vantagens relacionadas.

Este trabalho desenvolveu um modelo de um sistema de geração hidrocínética, que pode ser utilizado para analisar e projetar o conjunto turbina-gerador-conversor, e o controle adequado para cada aplicação. Os limites da topologia do conversor são analisados com o modelo em simulações exaustivas off-grid.

1.2 Visão geral do sistema apresentado

A Figura 1 mostra a visão geral do sistema com os principais blocos de controle para operação conectada à rede. A turbina foi modelada com base em dados reais de uma configuração experimental. O sistema está operando com PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) e um conversor usual de dois estágios.

O PMSG trifásico foi escolhido por sua simplicidade e alta densidade de potência, considerando a faixa de tensão de operação. Um retificador trifásico é conectado à saída do gerador e possui um filtro LC passa-baixa na saída para reduzir a ondulação de tensão

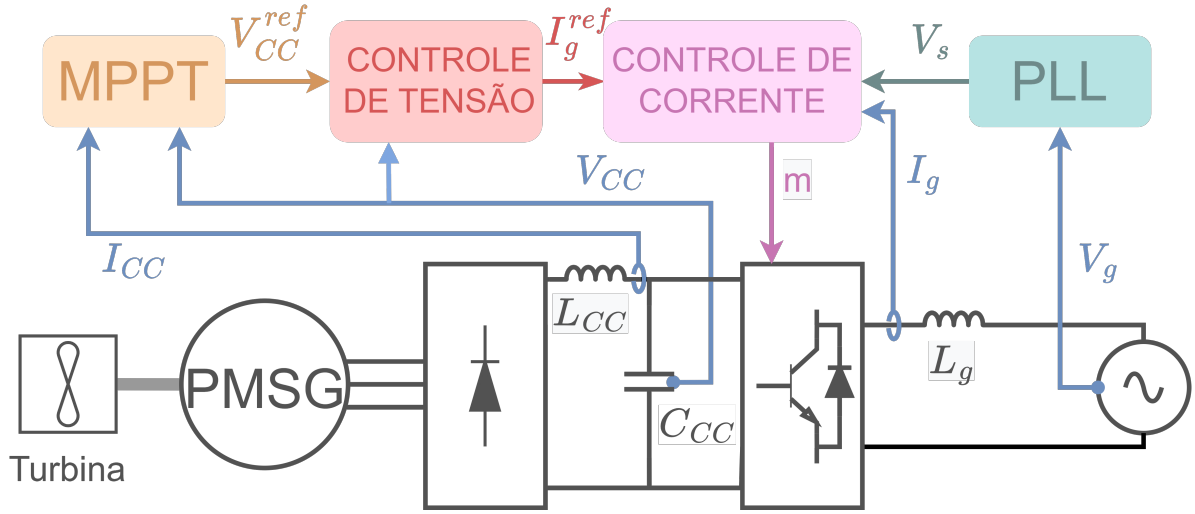


Figura 1 – Esquemático do Sistema Apresentado.

do barramento CC.

Os sinais de tensão do barramento CC V_{CC} e corrente I_{CC} são usados para o MPPT que usa a estratégia P&O (*Perturb and Observe*). A saída do MPPT será a referência de tensão V_{CC}^{ref} para o sistema de controle de tensão do barramento CC. Além disso, a saída do controle de tensão é a referência I_g^{ref} para o controle de corrente da rede, que também utiliza o sinal de referência V_s dado pelo PLL.

O link CC é a entrada de um inversor fonte de tensão monofásico (VSI) controlado pelo sistema de controle de corrente para modular a corrente da rede através do indutor de acoplamento L_g .

Todos os componentes do modelo foram projetados de acordo com os seguintes requisitos do sistema na [Tabela 1](#).

Tabela 1 – Requisitos do Sistema

Variável	Descrição	Valor
V_g^{RMS}	Tensão da Rede RMS	127 V
f_g	Frequência da rede	60 Hz
P_M^{max}	potência máxima mecânica	1 kW
v_f^{max}	velocidade máxima da água	15 m/s
v_f^{min}	velocidade mínima da água	10 m/s

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é modelar e simular um sistema de uma micro geração hidrocinética conectado à rede elétrica (on-grid).

1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelagem da turbina (Pelton).
- Simulação do modelo acoplado ao gerador.
- Dimensionamento, modelagem e simulação dos conversores e do sistema de controle.
- Simulação integrada do sistema completo em regime permanente e transitório.
- Utilização do modelo desenvolvido para simulação de outra categoria de turbina.

1.4 Organização do trabalho

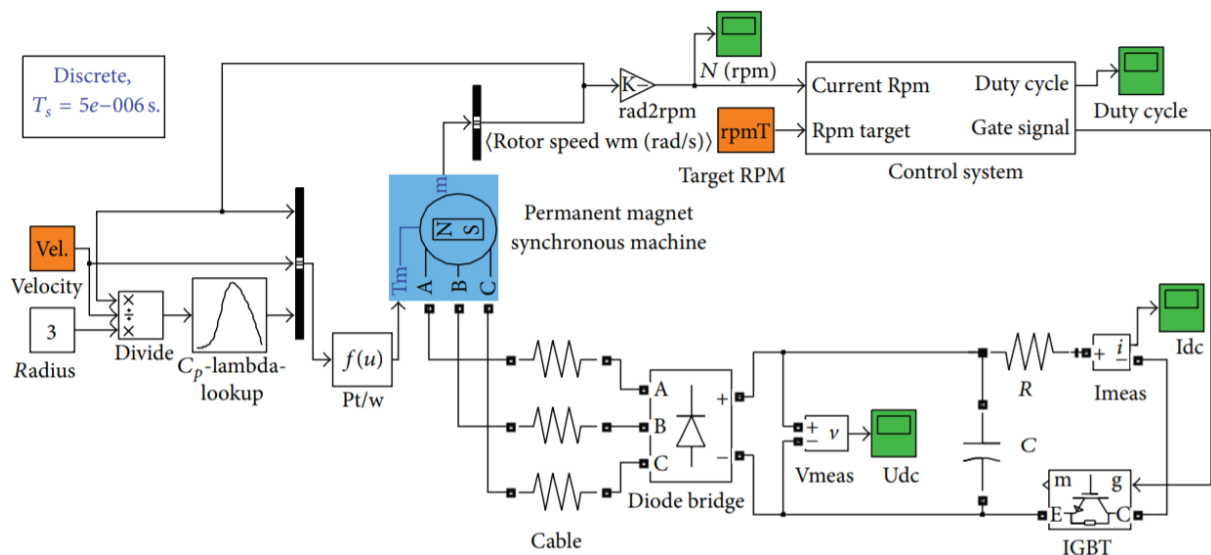
- **Capítulo 2:** é apresentada uma revisão de literatura focada em micro geração hidrocinética e em suas características, como o tipo da turbina, sistema de controle utilizado, e se integrado ou não à rede.
- **Capítulo 3:** apresenta a fundamentação teórica, contendo as teorias, os conceitos e os métodos para o desenvolvimento desse projeto.
- **Capítulo 4:** são apresentadas as etapas requeridas para o desenvolvimento da metodologia.
- **Capítulo 5:** são apresentados os gráficos e resultados do trabalho.
- **Capítulo 6:** nele encontram-se as conclusões referente aos resultados obtidos e propostas de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica - Estado da Arte

Yuen, Apelfrojd e Leijon (2013) desenvolvem um sistema de controle para conversor de energia hidrocínética, que foi usado numa estação experimental a ser implementada no Rio Dalalven, na cidade de Söderfors, na Suécia. O projeto utiliza uma turbina hidrocínética de eixo vertical, conectado a um gerador de ímã permanente, um sistema de controle, e uma estação terrestre para a qual a energia é entregue. O sistema de controle tem como variável de entrada a rotação do eixo turbina/gerador, e de saída o sinal de controle do interruptor IGBT. Foi desenvolvido para operar a turbina e gerador de diferentes maneiras, permitindo experimentos para caracterizar a configuração, bem como identificar e avaliar diferentes estratégias de controle, visando conseguir manter uma velocidade de rotação especificada, além de permitir a implementação de diferentes algoritmos de controle.

O modelo para a simulação (Figura 2) utiliza um formato similar aos utilizados em turbinas eólicas. Uma curva $C_p(\lambda)$ é gerada, sendo a curva característica da Turbina. A variável λ , é a relação das velocidades na ponta da pá, pois relaciona a velocidade d'água com a velocidade de angular. E C_p é o coeficiente de relação de transferência de potência hidráulica para potência mecânica.

Figura 2 – Modelo *simulink/matlab* da turbina e gerador Soderfors com controle de velocidade de rotação.

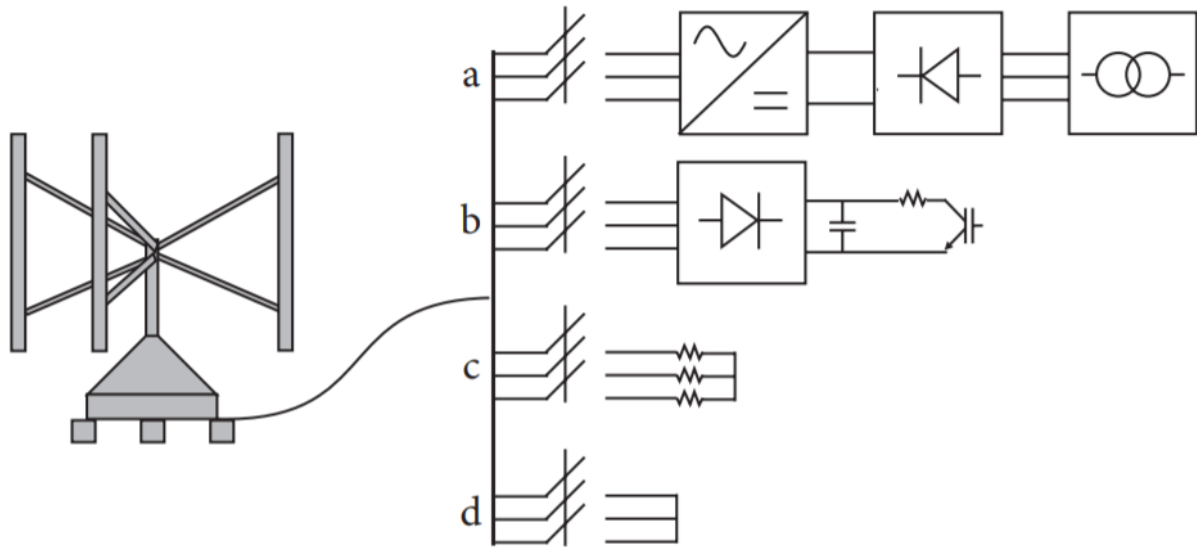


Fonte: (YUEN; APELFROJD; LEIJON, 2013).

O projeto também possui um sistema de conexão de segurança e emergência para o sistema de controle. Como pode ser observado na Figura 3, a turbina e o gerador estão conectados por um eixo. As três fases do gerador podem ser conectadas a diferentes partes

do sistema de controle, onde: (a) mostra a inicialização (da direita para a esquerda), onde uma fonte CC alimenta um inversor controlado para iniciar a máquina; (b) é o controle regular de carga; (c) é um freio de emergência de carga e (d) é o freio de curto.

Figura 3 – Ilustração da esquemática do sistema de controle e proteção.



Fonte: (YUEN; APELFROJD; LEIJON, 2013).

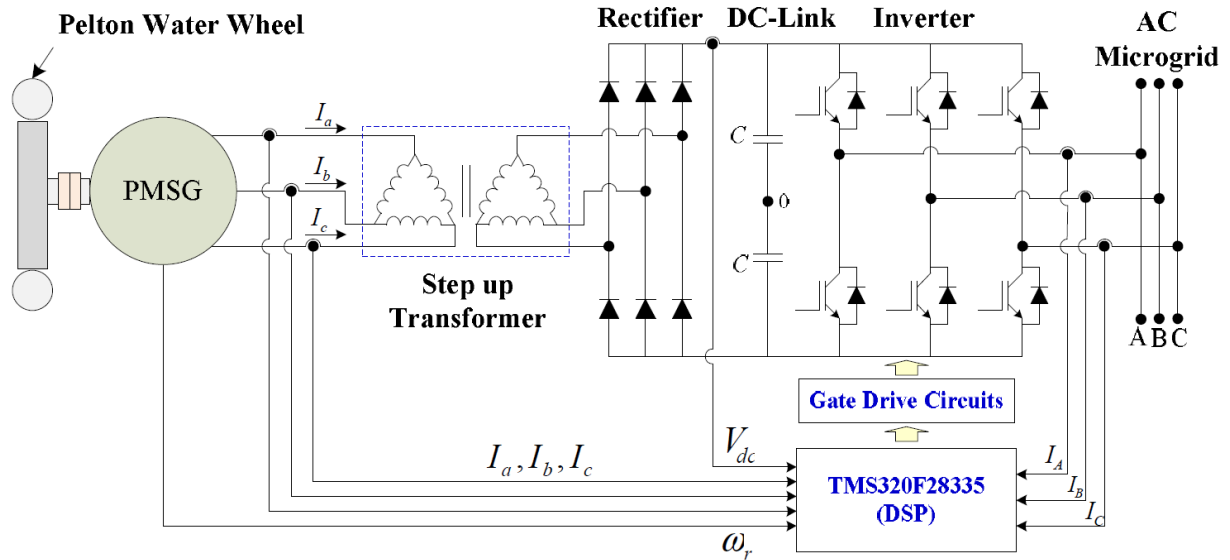
Esse projeto será usado como base para o desenvolvimento do sistema deste trabalho, utilizando a metodologia de modelagem da turbina Pelton, análoga à modelagem de turbinas eólicas, utilizando a curva $C_p(\lambda)$ característica da turbina para a simulação.

Asiful e Che (2018) propuseram-se a elaborar um gerador síncrono de ímã permanente sem núcleo desenvolvido para micro usina hidrelétrica com o uso de reservatórios de água em edifícios altos, em vez do escoamento convencional do fluxo do rio para acionar a turbina. A topologia de rotor duplo de estator único (SSDR) foi escolhida para garantir uma boa eficiência de potência. O projeto do gerador usou inicialmente o método analítico, para que os resultados analíticos sejam verificados e validados, comparando-os com aqueles obtidos através do *software ANSYS Maxwell* de análise de elementos finitos eletromagnéticos. Resultados mostram que o gerador produz um fluxo magnético de densidade de 0,7 T no plano médio dos dois rotores que é forte o suficiente para fornecer a energia necessária a uma tensão de 230 V CA e corrente de 0,87 A. A perda de núcleo zero, sendo a energia não transferida para a carga do transformado, consequentemente causando aquecimento no gerador, torna esta topologia uma boa escolha para aplicação em pequena escala.

Kerdtuad et al. (2018) estabelecem a geração de uma micro usina hidroelétrica utilizando gerador síncrono de ímã permanente e fornece energia a uma micro rede. Foi utilizada uma turbina Pelton acoplada ao eixo do gerador. O gerador é então conectado a um transformador step-up para elevar a tensão gerada. O enrolamento secundário é então

retificado por um conversor CA-CC. A tensão CC, de saída, passa então por um inversor de tensão, que possui um sistema de controle para a conexão com a rede. O trabalho tem parte analítica e experimental, onde os experimentos foram realizados, de forma que o conversor não alimenta cargas locais e opera no modo grid-tie, utilizando um protótipo. O projeto almeja subsequentemente levar as descobertas para aplicação em escala real.

Figura 4 – Circuito Elétrico do projeto de Kerdtuad et al. (2018)

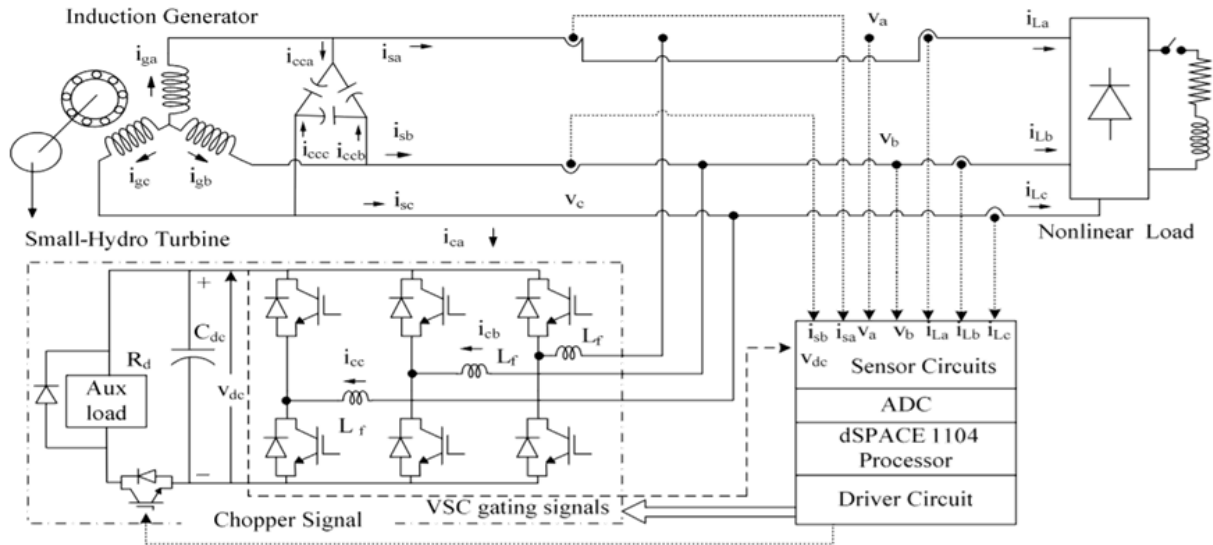


Fonte: (KERDTUAD et al., 2018).

A metodologia desse projeto sugestionou a estrutura do circuito elétrico desenvolvida neste projeto, utilizando a estrutura gerador, retificador, barramento de tensão contínua e conversor de tensão, chaveada então para a integração com a rede de energia elétrica.

Rajagopal e Singh (2011) desenvolvem um controlador de carga eletrônico para gerador de indução off-grid para pequenos geradores hidrelétricos. Não tem foco no gerador primário, e sim na “qualidade” da energia entregue à carga, mais estável, mesmo para cargas não lineares. Utiliza um sistema para que a tensão sobressalente gerada seja retificada e conectada a um link CC, e entregue a uma carga auxiliar. O sistema de controle observa a tensão e corrente da carga, que dispara um IGBT, para que o sistema auxiliar possa drenar a energia excedente. Esse sistema visa também regular, além da tensão, a frequência do sistema, e equilibrar a carga, eliminando assim, possíveis harmônicas. Um protótipo de ELC (controlador eletrônico de carga) para um gerador de indução trifásico foi implementado, utilizando um controle baseado em equilíbrio de energia, e obteve resultados satisfatórios onde a teoria do equilíbrio foi considerada eficaz e rápida em resposta, e o barramento CC de tensão de ELC é menos sensível às perturbações de carga e se comportou como um controlador estável.

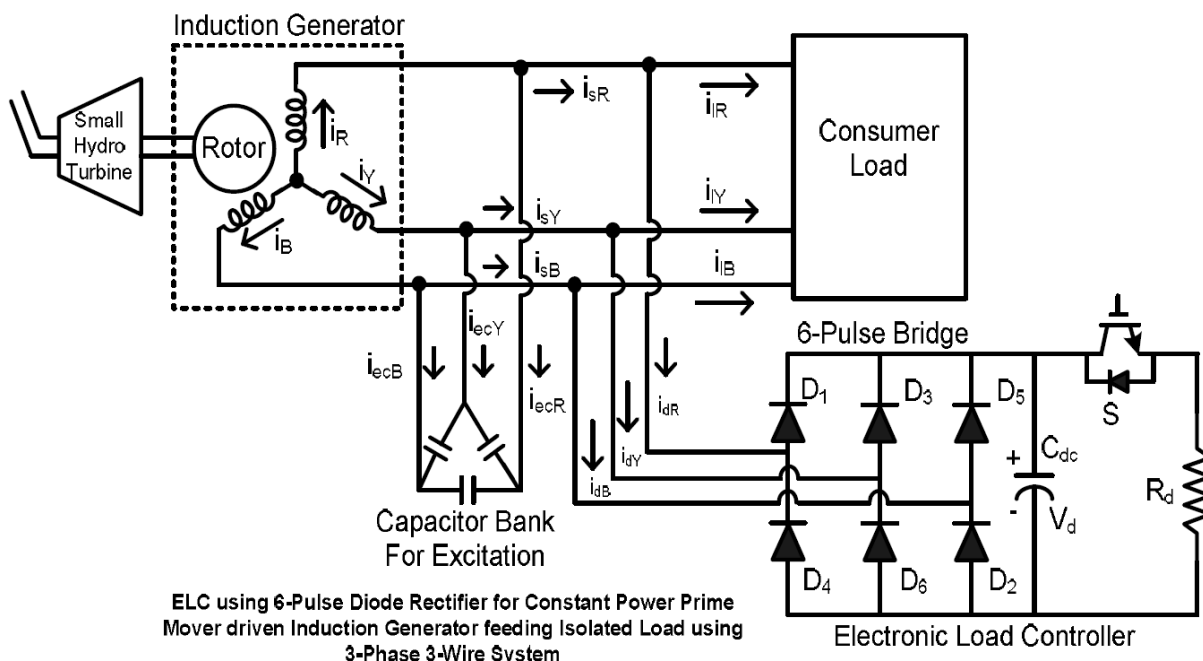
Figura 5 – Circuito Elétrico do projeto de Rajagopal e Singh (2011)



Fonte: (RAJAGOPAL; SINGH, 2011).

Rathore e Singh (2014) propõem um controle de qualidade para um gerador de indução de autoexcitação, aplicado a uma micro usina hidrelétrica com carga não linear, utilizando de transformadores estrela-triângulo e *zigzag* para minimizar os harmônicos gerados devido às cargas não lineares, com a justificativa de serem mais utilizadas em consumidores isolados, e o aumento crescente de cargas não lineares. O mecanismo de controle para balanceamento de carga consiste em um controlador de carga eletrônico, para comutar a carga de despejo conforme a quantidade de carga dos consumidores em determinado momento nos terminais do gerador. O sinal de feedback para o controlador será obtido da saída do retificador trifásico através do capacitor de filtro na forma de tensão do barramento CC, para compará-lo com a tensão de referência. O trabalho tem método Analítico/simulação, simulado no software *matlab*, e os resultados apresentados demonstram a utilidade de transformadores estrela-triângulo e *zigzag* no sistema de distribuição para minimizar as correntes harmônicas causadas devido à carga não linear.

Figura 6 – Circuito Elétrico do projeto de Rathore e Singh (2014)



Fonte: (RATHORE; SINGH, 2014).

Os dois projetos anteriores têm como impacto nesse trabalho o estudo da metodologia de circuito elétrico estabelecido e a necessidade de mais estudos de micro geração de turbinas hidráulicas, incorporadas à rede de energia elétrica; e levantamento de porte dos estudos dos sistemas hidráulicos de pequeno porte quanto a potência gerada e categorias de gerador utilizado.

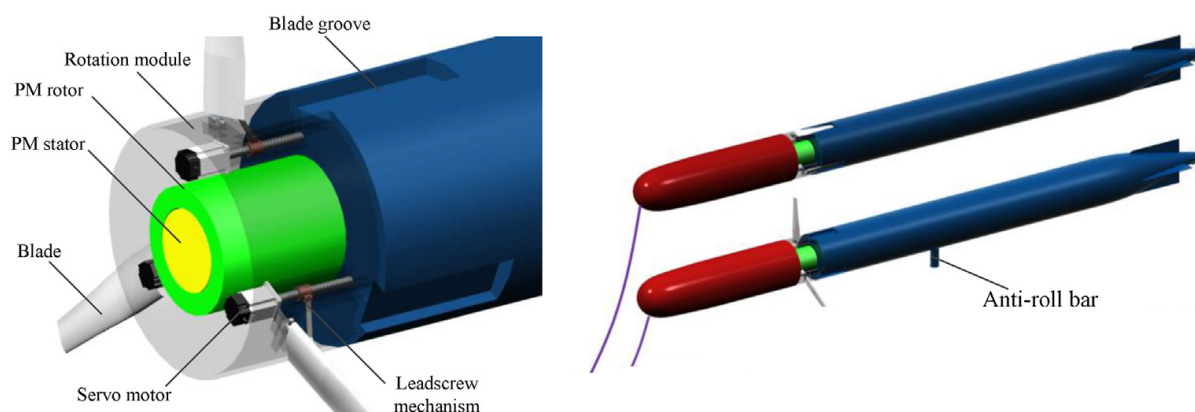
Em Troullaki et al. (2019), avalia-se o ciclo de vida de pequenas turbinas eólicas e micro usinas hidroelétricas, com a justificativa de não haver um estudo específico sobre os impactos ambientais dos materiais para a fabricação e funcionamento dos mesmos. O trabalho utilizou método teórico/analítico, e conclui, dentre as categorias analisadas, que para sistemas de micro usinas hidroelétricas a maioria dos impactos foi causado pela utilização das baterias, inversor e cabos, mas os impactos gerais foram significativamente menores do que os do sistema eólico para todas as categorias. Isso se deve ao aumento da produção de eletricidade da hidrelétrica durante sua vida útil, que opera principalmente na potência nominal, dependendo da disponibilidade do recurso, atingindo assim fatores de capacidade significativamente mais elevados do que a pequena turbina eólica. Em comparação com um pequeno gerador a gasolina, os sistemas estudados têm impactos ambientais significativamente menores em todas as categorias de impacto. Conclui-se que essas tecnologias de energia renovável fabricadas localmente, além de serem uma alternativa econômica para a produção de eletricidade em comunidades rurais, também fornecem uma solução ambientalmente sustentável quando comparadas às práticas convencionais em contextos rurais fora da rede.

Rana e Meena (2018), estudam geradores de indução de autoexcitação aplicados a micro usinas hidrelétricas em áreas remotas, justificados pelo baixo custo e possibilidade de entrega de energia onde a rede elétrica não é possível ou disponível. O circuito apresentado consiste em uma turbina hidráulica (não especificada), um gerador de indução, um banco de capacitor para excitação e um sistema eletrônico de carga (composto por um circuito de controle, uma ponte retificadora de diodo não controlada e uma chave-IGBT). O trabalho foi realizado de forma analítico/simulado no software Matlab e discutiu as características e vantagens para a aplicação dessa categoria de gerador em micro usinas hidrelétricas, e teve como resultado principal um sistema estável com a tensão e a frequência permanecendo no limite durante as mudanças de carga. Recomenda-se esse tipo de gerador para essa aplicação por sua facilidade, simplicidade e preço.

Ambos os projetos - Troullaki et al. (2019) e Rana e Meena (2018) - são utilizados como justificativa para esse estudo, demonstrando vantagens quanto ao impacto ambiental de turbinas hidrelétricas de pequeno porte e custo, sendo o primeiro comparando com geradores eólicos de pequeno porte, e o segundo demonstrando um sistema estável com a tensão e a frequência desejada.

Já o estudo de Tian et al. (2016), tem a finalidade de projetar uma turbina hidrocinética de eixo horizontal, para fornecer energia para as Plataformas Ancoradas Submarinas de modo a estender a vida operacional. A turbina vista na Figura 7 está equipada com três pás controláveis, com diâmetro de 0,8 metros, e pode ser aberta para gerar energia e desacoplar as baterias, de modo a estender a vida útil das mesmas, e fornecer energia às plataformas no estado ancorado.

Figura 7 – Imagem da turbina do projeto de Tian et al. (2016)



Fonte: (TIAN et al., 2016).

As simulações são baseadas nas equações de Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS). O método numérico é validado usando dados experimentais existentes. Após a verificação e validação do método numérico, foi levantado um estudo sobre o efeito da posição de instalação no desempenho da turbina. Os resultados da simulação mostram

que esta turbina tem um coeficiente de potência máximo de 0,327, quando a turbina é instalada próxima à cauda da plataforma. A estrutura do fluxo próximo à lâmina e na esteira também é discutida. A partir dos dados fornecidos nesse projeto, retira-se a curva característica da turbina, onde na [seção 5.2](#), resultados do sistema integrado de injeção de potência.

A [Tabela 2](#) contém dados comparativos, seccionados em: tipos de turbinas e geradores utilizados, potência elétrica instalada, e os componentes eletrônicos de cada projeto utilizado como referência para a elaboração desse estudo. Demonstra também a pouca utilização de trabalhos on-grid de projetos de micro geração hidráulica, tendo foco principal em locais onde a rede de energia elétrica não abastece a carga local.

Tabela 2 – Comparativo entre os trabalhos revisados.

Autor	Turbina	Gerador	Potência elétrica	Conversores e máquinas elétricas	On-Grid/Off-Grid	Método
(YUEN; APELFROJD; LEIJON, 2013)	Não especificada	Gerador síncrono de ímã permanente	7500 W	Retificador, Link CC, inversor IGBT trifásico	On-Grid	Análítico/Experimental
(ASIFUL; CHE, 2018)	Kaplan - Baixa pressão Pelton - Alta queda	Gerador de ímã permanente de fluxo axial	não especificado	Não especificado	Off-Grid	Análítico elementos finitos
(KERDTUAD et al., 2018)	Pelton	Gerador síncrono de ímã permanente	1000 W	Retificador, Link CC, Inversor de tensão, Transformador	On-Grid	Análítico/Experimental
(RAJAGOPAL; SINGH, 2011)	Não especificada	Gerador de indução auto excitação	3700 W 4,4 kVAR	Retificador (para carga aux.) (Banco de capacitor para excitação)	Off-Grid	Análítico/Simulação
(RATHORE; SINGH, 2014)	Não especificada	Gerador de indução auto excitação	1491,4 W	Retificador (para bateria) (Banco de capacitor para excitação)	Off-Grid	Análítico/Simulação
(TROULLAKI et al., 2019)	Pelton turbina eólica - eixo horizontal	Gerador de ímã permanente de fluxo axial	450 W 900W	Não especificado	Off-Grid	Teórico/ Análítico
(RANA; MEENA, 2018)	Não especificada	Gerador de indução auto excitação	4000 W	Retificador (para bateria) (Banco de capacitor para excitação)	Off-Grid	Análítico/Simulação
(TIAN et al., 2016)	turbina hidrocínética de eixo horizontal	Gerador de ímã permanente	não especificado	(não especificado)	Off-Grid	Análítico/Simulação

Fonte: Autor.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Micro geração — Fontes primárias

O impacto ambiental da geração de energia elétrica provida de combustíveis fósseis gera uma grande preocupação para a busca de formas que utilizem energias mais limpas e renováveis, de modo a substituir essas formas mais agressivas ao meio ambiente e ao ser humano. Desde então, investimentos nas matrizes de energias renováveis vêm aumentando, assim como a participação dessa categoria de geração de energia em vários mercados.

Eólica, solar, biomassa e hidroelétrica são alguns exemplos de geração de energia provida de fontes mais limpas e renováveis. Além do impacto ambiental ser menor, geralmente, a eficiência de geração nestes casos também é maior, o que torna este tipo de energia mais financeiramente viável.

3.1.1 Energia Eólica

No caso de usinas eólicas, a geração de energia provém do movimento natural dos ventos diante do planeta. Através da condução do vento pelas pás, a força do vento faz as pás girarem. Essas pás estão conectadas a um eixo, que por sua vez, está conectado a um sistema de conversão de energia mecânica em energia elétrica.

Por necessitar que a força do vento seja grande o suficiente para retirar as pás da inércia, a incidência dos ventos deve ser grande, o que impede estas usinas de serem instaladas em baixas altitudes ou lugares onde existam grandes estruturas que prejudicam o fluxo de vento.

Além disso, de acordo com [Manwell, McGowan e Rogers \(2009\)](#), como a variação da velocidade do vento deve ser considerada ao longo do tempo, já que não é possível armazenar essa energia como é realizado com usinas hidrelétricas, o controle de potência do gerador é feito em cima da velocidade instantânea do vento. Esse controle pode ser passivo, conforme a modelagem das pás da usina, ou ativo, com um controlador que modifica o ângulo das pás conforme a potência entregue ao gerador.

O coeficiente de potência do gerador, ou seja, a potência do rotor, é uma função da relação da velocidade do vento atual com a velocidade nominal do gerador (λ). Esta variável λ , também chamada de TSR (*Tip-Speed Ratio*), é calculada a partir da [Equação 3.1](#):

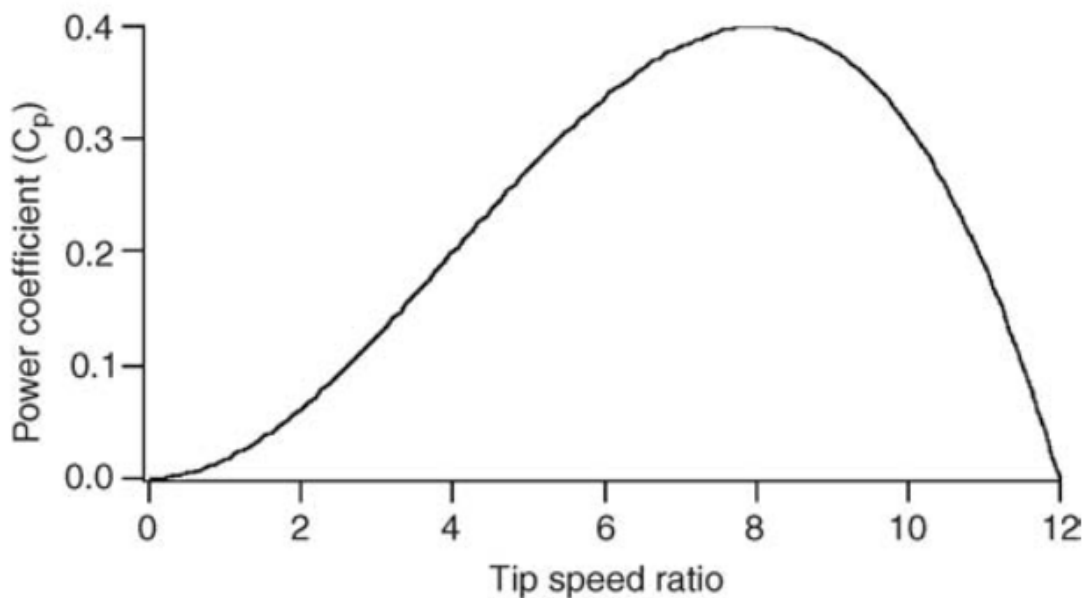
$$TSR = \lambda = \frac{(\omega \times r)}{v_f} \quad (3.1)$$

Sendo:

- ω = Rotação da Turbina;
- r = Raio da Turbina;
- v_f = Velocidade do jato d'água.

Essa relação entre potência e velocidade é utilizada para ensaiar as turbinas (conjunto de pás) e, definir para determinado caso, qual a melhor categoria de turbina para se utilizar. Um exemplo desta relação está demonstrado na [Figura 8](#).

Figura 8 – Exemplo de curva característica do sistema $C_p \times \lambda$.



Fonte: ([MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009](#)).

Em sistemas de geração de energia que transformam energia mecânica rotativa em energia elétrica, um comportamento muito desejado consiste em, onde há geração em velocidade variável, existir um bom desempenho. Um exemplo onde este comportamento é muito aplicado é nas usinas de geração eólica. Esse comportamento é desejável por dois motivos: conseguir gerar energia quando a fonte de energia (fluido) está em velocidade abaixo da velocidade de operação, e reduzir o estresse no rotor em velocidades baixas. Porém, a velocidade variável implica em mudança da frequência da tensão AC gerada.

Nestes casos, existem várias maneiras de remover este empecilho. No caso de geradores síncronos, a saída do gerador é acoplada em um retificador e então a um conversor, fornecendo tensão na frequência desejada. Em casos de geradores com baixo número de

pólos, pode-se usar uma caixa de engrenagem, como maneira de tentar aumentar a velocidade de rotação para compensar um pouco a perda, em detrimento do torque.

3.1.2 Energia hidráulica

Usinas hidrelétricas são uma das principais formas de geração de energia no Brasil. Conforme descrito por [Vilanova \(2011\)](#) e [Guerra e Youssef \(2011\)](#), usa-se como princípio de funcionamento a energia acumulada em quedas d'água, denominada como energia potencial hidráulica. Essa energia, se diz a respeito da energia acumulada em uma certa massa de água quando escorre por uma diferença de altura, transformada em energia cinética, no bico da turbina. Em usinas de grandes gerações, como se deseja o fluxo controlado de água para uma geração constante e controle da energia gerada conforme a demanda necessária, são necessárias represas como um acúmulo prévio de energia, as quais são usadas conforme o desejado pela matriz energética.

Em usinas de pequenas gerações ou micro geração, não se faz necessário esse acúmulo de massa de água, pois as usinas de menor porte são dimensionadas em razão da vazão do rio, o que gera vantagem ambiental, por não ser necessário alagar uma grande área para a usina. Também se gera vantagem elétrica à rede, pois mesmo com baixas vazões do rio, ainda é possível gerar energia, com menor potencial, porém, com menor dependência de uma única fonte. Deste modo, quando se trabalha com usinas de pequena ou micro geração, a energia considerada da massa de água é a energia cinética da vazão do rio, não há energia potencial proveniente do acúmulo em uma represa.

A equação que representa o cálculo da energia cinética é demonstrada pela [Equação 3.2](#):

$$E_{HC} = \frac{1}{2} \cdot m_f \cdot v_f^2 \quad (3.2)$$

- E_{HC} = Energia hidráulica cinética (J);
- m_f = Massa do fluido (Kg);
- v_f = Velocidade do fluido (m/s);

Que pode ser rearranjada como na [Equação 3.3](#), substituindo a massa por densidade vezes volume do bico de captação da pá ($m_f = V_u \cdot \rho$).

$$E_{HC} = \frac{1}{2} \cdot V_u \cdot \rho \cdot v_f^2 \quad (3.3)$$

Sendo:

- V_u = Volume útil de captação de fluido (m^3);
- ρ = densidade da água (kg/m^3);

Para se calcular a potência hidráulica cinética, através da taxa de variação da energia em função do tempo, substitui-se volume por área de captação de fluido da pá vezes velocidade do fluido, e velocidade do fluido por vazão dividido pela área do bico injetor, chega na [Equação 3.4](#):

$$P_{HC} = \frac{m_f \cdot v_f^2}{2 \cdot t} = \frac{1}{2} A_u \cdot \rho \cdot v_f^3 \quad (3.4)$$

Sendo:

- P_{HC} = Potência hidráulica cinética (W);
- A_u = Área útil (m^2);

A teoria básica sobre essa operação de um conversor de energia hidrocínética é muito semelhante a de uma usina eólica. As diferenças estão relacionadas com a maior densidade da água, a presença da superfície da água, turbulência e previsibilidade do recurso, para citar alguns. A turbina capta uma parte da energia na água, sendo a relação da potência hidráulica pela potência mecânica captada a eficiência dessa turbina. Sendo potência Hidráulica cinética definida pela [Equação 3.4](#). O coeficiente de potência relaciona essa potência cinética hidráulica com a potência mecânica definida pela [Equação 3.5](#):

$$P_M = m_p \cdot g \cdot l \cdot \omega \quad (3.5)$$

- P_M = Potência mecânica (W);
- m_p = Massa aferida no ensaio de Prony (m^2);
- g = Aceleração da gravidade (m/s^2);
- l = Comprimento do braço da balança de Prony (m);
- ω = Rotação do eixo (rad/s).

Na [Equação 3.6](#), as equações anteriores são combinadas com o objetivo de obter a expressão algébrica do $C_p(\lambda)$.

$$C_p(\lambda) = \frac{P_M}{P_{HC}} = \frac{m_p \cdot g \cdot l \cdot \omega}{\frac{1}{2} A_u \cdot \rho \cdot v_f^3} = \underbrace{\left(\frac{2 \cdot g \cdot l}{A_u \cdot \rho} \right)}_{\text{constantes}} \frac{m_p \cdot \omega}{v_f^3} \quad (3.6)$$

3.2 Modelagem baseada em dados - Regressão linear

Em certos estudos, a criação de um banco de dados é necessária para análise de certos comportamentos, portanto, o uso da ciência de dados e análise estatística é requerido. Ferramentas estatísticas são amplamente utilizadas em várias áreas de estudo, como engenharia, economia, biomedicina, dentre outros.

Em modelagem de sistemas dinâmicos, conforme [Paternelli \(2001\)](#), a regressão linear pode ser utilizada para encontrar correlação entre variáveis diferentes. Essa relação pode ser linear, quadrática, polinomial, etc. É necessário entender que a regressão linear não apresentará resultados exatos sobre as relações entre os fenômenos, pois estes são fenômenos físicos, enquanto a regressão apresenta uma aproximação matemática que seja aceitável nos limites delimitados.

A regressão linear pode ser simples ou múltipla. A regressão linear simples relaciona duas variáveis por duas constantes de regressão. A regressão linear simples apresenta como resultado uma equação de uma reta, como mostra a [Equação 3.7](#):

$$Y_i = w_0 + w_1 X_i \quad (3.7)$$

Onde, Y_i é a variável dependente, X_i a variável independente, w_0 a constante de regressão, que consiste no ponto onde a reta cruza o eixo Y, e w_1 o coeficiente de regressão, que determina a inclinação da reta.

A regressão linear múltipla relaciona duas variáveis em graus polinomiais maiores que 1. Portanto, existirá mais de um coeficiente multiplicando a variável independente, tornando a equação resultante em um resultado mais maleável. Quanto maior o grau da regressão, mais próximo pode ser a regressão, porém mais custosa a regressão será matematicamente. A equação padrão da regressão linear múltipla está representada na [Equação 3.8](#):

$$Y_m = x_{m,1}w_1 + x_{m,2}w_2 + \cdots + x_{m,n}w_n \quad (3.8)$$

Onde, Y_i é a variável dependente, X_i a variável independente, w_0 à w_n são coeficientes de regressão que relacionam as variáveis de modo a satisfazer o comportamento esperado dos dados.

Mesmo a equação [Equação 3.8](#), sendo polinomial, de acordo com [Rawlings, Pantula](#)

e Dickey (1998) a solução é linear em parâmetros, descrito na Equação 3.9:

$$\begin{cases} x_{1,1}w_1 + x_{1,2}w_2 + \dots + x_{1,n}w_n = y_1 \\ x_{2,1}w_1 + x_{2,2}w_2 + \dots + x_{2,n}w_n = y_2 \\ \vdots \\ x_{m,1}w_1 + x_{m,2}w_2 + \dots + x_{m,n}w_n = y_m \end{cases} \quad (3.9)$$

que pode ser escrita na seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n} \\ & & \vdots & \\ x_{m,1} & x_{m,2} & \dots & x_{m,n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

A Equação 3.10, pode ser descrita da seguinte forma matricial compacta:

$$Y_{(m \times 1)} = X_{(m \times n)} \times W_{(n \times 1)} \quad (3.11)$$

Existem várias maneiras de resolver esse problema. Uma solução envolve a pseudoinversa (Moore - Penrose), que possui seu símbolo representativo como X^+ , calculado como $X^+ = (X^T X)^{-1} X^T$. Usando a propriedade de $X^+ X = I$. Portanto:

$$X_{(n \times m)}^+ \times Y_{(m \times 1)} = X_{(n \times m)}^+ \times X_{(m \times n)} \times W_{(n \times 1)} \quad (3.12)$$

Como uma matriz multiplicada por sua pseudoinversa, é igual a matriz identidade, a equação fica reorganizada da seguinte forma:

$$X_{(n \times m)}^+ \times Y_{(m \times 1)} = W_{(n \times 1)} \quad (3.13)$$

Para fazer uma regressão polinomial com a pseudoinversa, podem ser criadas variáveis na matriz X que correspondem à ordem do polinômio desejado. Por exemplo, na Equação 3.14.

$$X = \begin{bmatrix} 0 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ 0 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^n \\ & & \vdots & & \\ 0 & x_m & x_m^2 & \dots & x_m^n \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Portanto, o resultado é uma equação paramétrica não-linear (polinomial), mas a solução é linear em parâmetros pela pseudoinversa.

3.3 Gerador síncrono de ímã permanente

Os geradores síncronos são máquinas elétricas amplamente utilizadas na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Estes geradores se caracterizam por possuir um enrolamento de campo, alimentado por uma fonte CC para produção do fluxo magnético (excitação) da máquina, e um enrolamento de armadura, onde são induzidas as tensões e circulam as correntes de carga.

Conforme descrito em [Fitzgerald e Kingsley \(2014\)](#), ao produzir o fluxo magnético CC no rotor, estando com uma rotação fixa, induz-se um campo magnético variante senoidal no enrolamento da armadura através do entreferro do gerador. A frequência deste campo magnético depende de quantos pares de polos existem no rotor, sendo que a cada vez que um par de polo passa sobre um enrolamento de campo, o campo magnético varia em um ciclo senoidal completo.

Este campo magnético variável é responsável pela tensão induzida nos enrolamentos da armadura, que terá a mesma frequência que o campo magnético, como esperado nas máquinas síncronas. Quando o gerador é conectado a uma carga elétrica, a corrente produzida, em função da tensão e do fator de potência, resulta em um conjugado induzido no eixo da máquina que é proporcional à potência ativa convertida.

Os enrolamentos de campo podem ser substituídos por ímãs permanentes nas máquinas síncronas, com algumas vantagens e desvantagens. Perde-se no controle da excitação que permite a regulação de tensão, alimentando carga isolada, ou o controle de reativo, quando conectado à rede elétrica. Porém, os ímãs permanentes no campo melhoram a densidade de potência e a confiabilidade da máquina elétrica, o que pode ser mais desejável dependendo das aplicações. Nas aplicações de baixa potência (de 1 a 10 kW) é comum o uso de geradores de ímã permanente ([Tabela 2](#)), sendo que o controle pode ser realizado por um conversor eletrônico de potência.

3.4 Eletrônica de potência

3.4.1 Retificadores

Os retificadores são amplamente utilizados nos equipamentos eletrônicos residenciais que necessitam de tensão CC para alimentação, como em fontes de alimentação de equipamentos portáteis (notebooks, smartphones, roteadores, etc.) ou nos equipamentos para alimentação dos componentes principais (televisores, balanças digitais, computadores, etc.). Os retificadores têm função de transformar uma fonte de tensão alternada (CA) em uma fonte de tensão contínua (CC).

Seguindo o conhecimento disposto em [Furlan \(2004\)](#), os retificadores podem ser de

meia onda ou de onda completa, controlados ou não-controlados. O retificador de meia onda somente transfere potência à carga em um dos semi-ciclos conforme a condução do diodo, enquanto o de onda completa opera em dois quadrantes de potência.

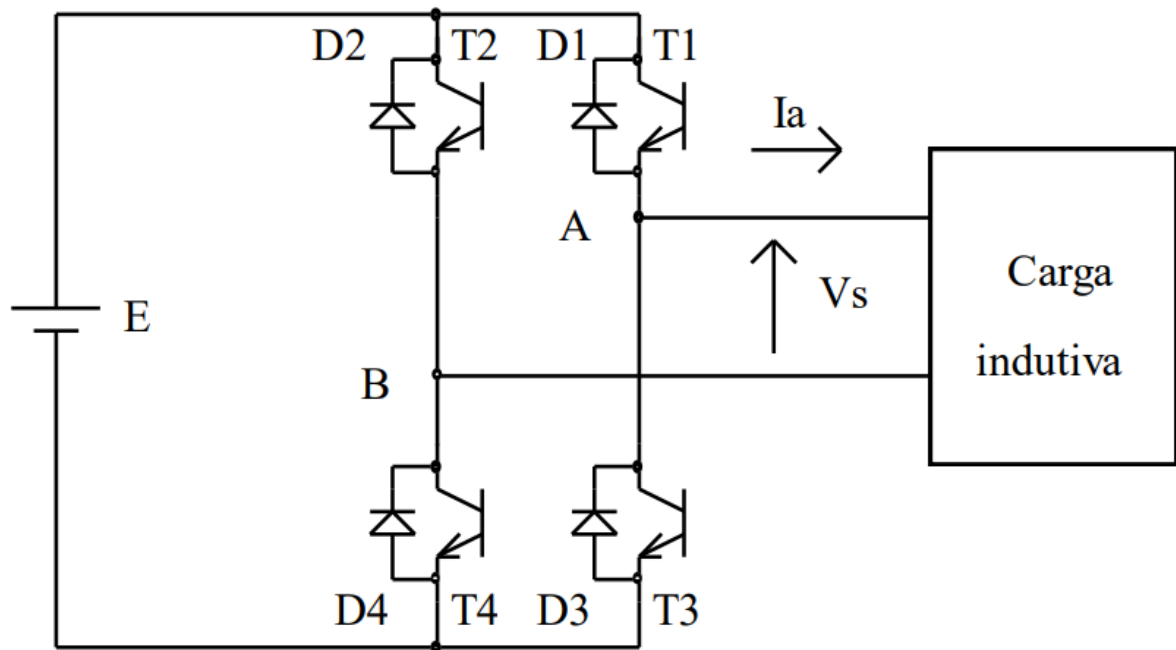
Na saída dos retificadores, são utilizados filtros passivos para reduzir a ondulação de tensão resultante da tensão alternada retificada. Neste trabalho, foi dimensionado um filtro LC na saída, para minimizar a ondulação de tensão principalmente nas baixas velocidades. Este filtro também facilita a medição da corrente sobre o indutor e da tensão sobre o capacitor, utilizadas pelo MPPT.

3.4.2 Inversor fonte de tensão

Operando de modo inverso aos retificadores, os inversores fonte de tensão tem como função principal converter uma fonte de tensão em corrente contínua para uma tensão em corrente alternada. Os inversores de tensão são utilizados geralmente na integração entre sistemas de geração e transmissão, quando a fonte proveniente da geração é entregue aos conversores em corrente contínua. Este monitora a rede de energia elétrica, permitindo a conexão nos limites aceitáveis, de forma sincronizada e controlada.

Como dito em [Pomilio \(2021\)](#), o conversor pode operar como fonte de tensão, onde os elementos no circuito se dispõem tal como na [Figura 9](#), de modo que cada par de transistores representa uma fase. Qualquer elemento que possa funcionar como chave pode estar no lugar dos transistores. O circuito funciona conduzindo alternadamente cada transistor do par, limitando a corrente através dos indutores na saída, a cada condução. Os diodos em anti-paralelo servem para que a corrente continue fluindo caso a carga apresente característica indutiva, ou seja, se oponha à variação de tensão. A partir do chaveamento e do comportamento indutivo do circuito da carga, ocorre a redução do conteúdo harmônico gerado pelo chaveamento.

Figura 9 – Inversor de tensão monofásico.



Fonte: (POMILIO, 2021)

Para melhorar a forma de onda da saída são utilizadas modulações como o PWM (*Pulse Width Modulation*), onde um sinal de referência (modulante) é comparado a uma onda triangular (portadora) de frequência constante (tipicamente, no mínimo 20 vezes maior que a frequência da modulante). O resultado da modulação produz uma tensão composta por vários pulsos de amplitude da tensão CC, e largura dos pulsos proporcionais ao sinal modulante. Um filtro passa-baixa é projetado para a saída do conversor, de modo que apenas a frequência do sinal de referência seja transportada à carga.

3.5 Controladores

3.5.1 MPPT - Rastreamento do ponto de máxima potência

Nos sistemas de energias renováveis, a potência disponível normalmente é dependente das condições climáticas, sendo necessário rastrear esta potência continuamente para o máximo aproveitamento. Estes pontos de maior potência disponível são chamados de MPP (*Maximum Power Point*); desejáveis em qualquer sistema com fontes renováveis. Nas fontes elétricas, como as fotovoltaicas, que possuem uma determinada curva de tensão e corrente, o MPP ocorre no máximo produto de tensão pela corrente. Em fontes mecânicas, como eólica e hidráulica, a máxima potência ocorre no maior produto entre torque e velocidade.

Os algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência - MPPT (*Maximum power point tracking*) - são elaborados com este objetivo de localizar continuamente o

MPP. Segundo [Brandão e Marafão \(2016\)](#), existem inúmeros métodos de se implementar um MPPT como um controlador PI, Perturbar e Observar (P&O), Técnica Beta, condutância incremental, entre outros.

Neste trabalho, foi escolhido o método P&O por ser bem conhecido e uma das técnicas mais utilizadas. Este método consiste em variar (incrementar ou decrementar) uma das variáveis de referência para o sistema (usualmente, tensão ou corrente) e observar se a potência alcançada está maior que a potência anterior. A variação da referência se mantém em caso de variação positiva de potência, ou inverte, caso contrário.

Estes passos são convencionalmente fixos, porém, como apresentado em [Brito et al. \(2011\)](#), o método pode ser aperfeiçoado com passos variáveis, visando melhorar o transitório sem prejudicar o regime permanente. Para isto, os passos podem ser proporcionais à derivada da potência em relação à derivada de controle. Na [subseção 4.4.1](#), será apresentado o algoritmo escolhido em maiores detalhes.

3.5.2 Controlador PI - Proporcional e Integral

Nas teorias de controle, existem várias formas de implementar um controlador para um determinado sistema dinâmico. Os controladores geralmente têm o objetivo de garantir a estabilidade, o rastreamento em regime permanente e transitório e a rejeição de distúrbios. Os controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) são bem conhecidos e usuais por atenderem os requisitos para diversos sistemas ([WANG, 2020](#)). Neste trabalho, foi suficiente o uso de controladores PI (Proporcional-Integral) para a dinâmica do sistema e requisitos escolhidos.

Com relação à sintonia (determinação dos parâmetros do controlador), também há diversos métodos: como os métodos clássicos do lugar geométrico das raízes e diagramas de bode; métodos numéricos; e empíricos. Neste trabalho, o projeto será realizado ajustando a resposta em frequência do diagrama de bode de malha aberta.

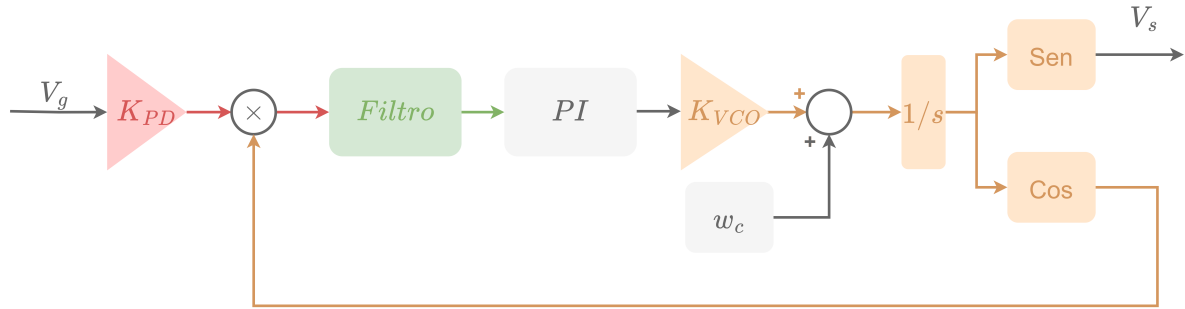
3.5.3 PLL — Malha de Sincronismo de Fase

O PLL consiste em um circuito capaz de sincronizar a frequência do sinal de entrada com o sinal de referência. Para isso, pode-se dividir o circuito do PLL em três fases. Dito em [Talbot \(2012\)](#) e [Murdoch e Reynoso \(2013\)](#), a primeira fase consiste em comparar o sinal de saída com o sinal de entrada, resultando em uma saída proporcional à diferença de fase entre os sinais. O filtro processa e suaviza a saída de modo a ser bem interpretada e passada para o oscilador. O oscilador alimenta o feedback proporcionalmente à diferença entre o sinal de saída e o sinal de entrada.

A ordem de um circuito PLL está relacionada à função de transferência do filtro. A partir do número de polos do filtro, é acrescentado um polo referente ao comportamento

integrativo em malha fechada do sistema, representando assim, o número total de polos do sistema. Portanto, um filtro de um polo resulta em um PLL de segunda ordem, e assim sucessivamente.

Figura 10 – Diagrama de Blocos do PLL.



Fonte: Autor.

Na Figura 10, o PD(s), em vermelho, é um detector de fase que gera um sinal proporcional à diferença de fase entre a entrada e sinal estimado, atuando como um comparador. LF(s), em verde, é o Laço de Filtro, é um filtro passa-baixa mais um PI, que atenua frequências acima do detector de fase, e é responsável pela dinâmica do sistema. E VCO(s), em laranja, é o oscilador, que gera o sinal alternado baseado na saída do bloco de laço do sistema.

Nas implicações das ordens dos circuitos, tem-se um problema de circuito PLL de primeira ordem no rastreamento de fase, onde a magnitude do ângulo acaba gerando erro de rastreamento em regime permanente. Esta limitação é corrigida nos circuitos de ordens superiores.

4 Metodologia

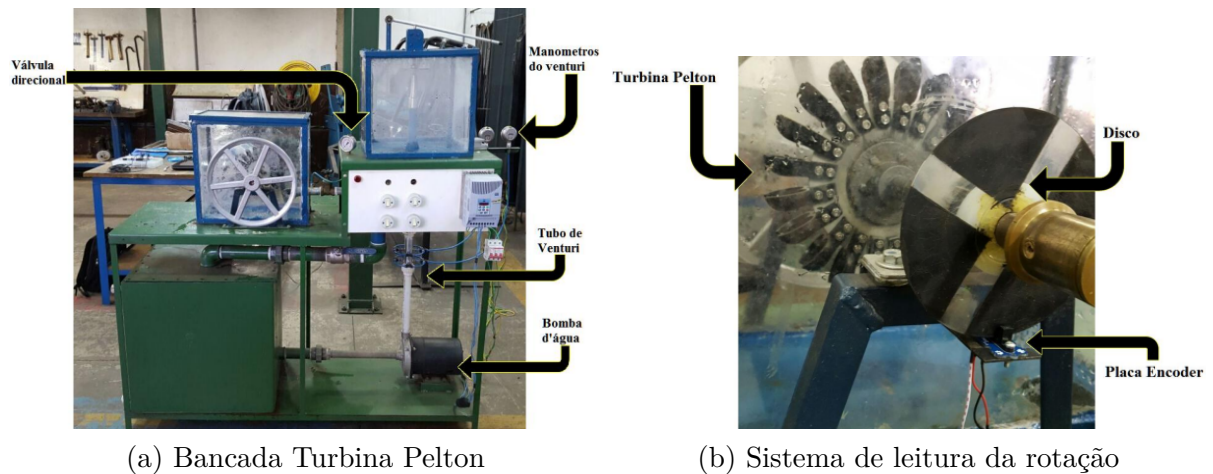
A metodologia foi dividida nas seguintes partes: a primeira etapa será a modelagem das turbinas (seção 4.1), utilizando uma função de eficiência da potência transferida e a velocidade específica baseada em dados reais. A segunda etapa consiste no dimensionamento do gerador de ímã permanente (seção 4.2). Na terceira etapa será apresentado o dimensionamento do conversor (seção 4.3). Por último, foi apresentada a metodologia de projeto dos controladores (seção 4.4).

4.1 Modelagem das Turbinas

4.1.1 Modelagem da turbina Pelton

Em Lescano et al. (2017), foi utilizado um modelo comumente implementado em modelos de geração eólica, em função de eficiência da potência transferida e a velocidade específica. Os dados foram obtidos através de um ensaio de Prony, que consiste em medir a eficiência da potência transmitida. A Bancada da turbina Pelton Figura 11a foi projetada por Silva e Florencio (2014) e construída pelos referidos autores e pelo autor deste trabalho.

Figura 11 – Bancada com a turbina Pelton



Fonte: Autor.

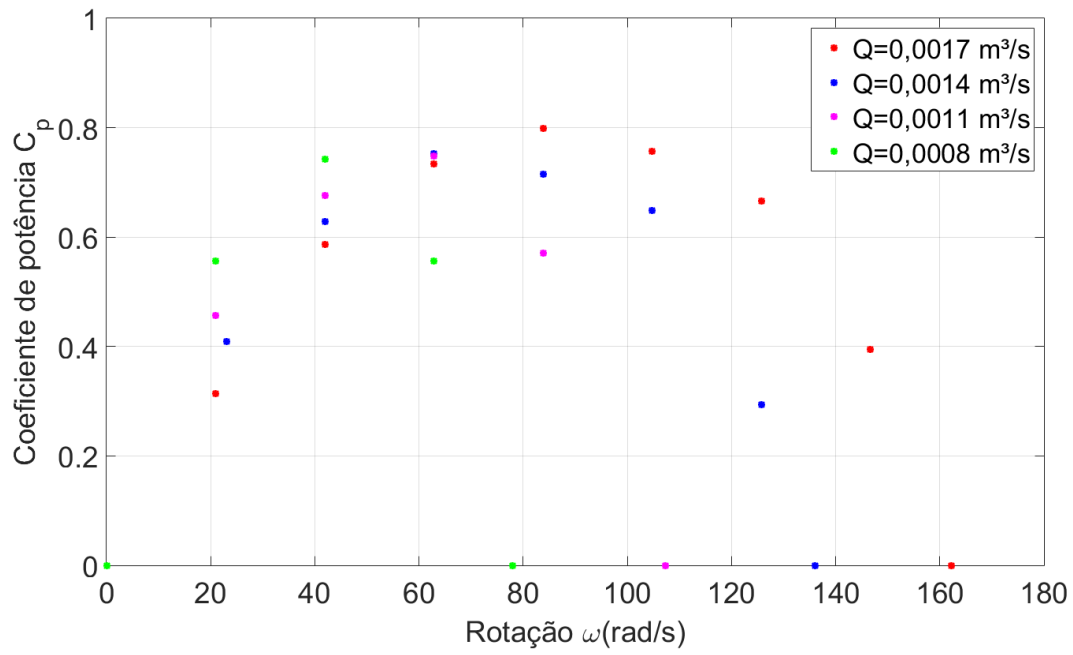
Com os dados gerados em Lescano et al. (2017) a partir do ensaio de Prony, gerou-se a Tabela 3, contendo os parâmetros mecânicos e hidráulicos da turbina Pelton para assim calcular sua eficiência. A linha vertical da tabela separa os dados medidos experimentalmente à esquerda, com os dados calculados à direita. Para calcular P_{HC} (Equa-

ção 3.4) foi necessária a área do bico injetor $A_u = 1,1310 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. E para calcular o λ (Equação 3.1) foi necessário o raio da turbina de 10,5 cm.

Tabela 3 – Resultados da turbina Pelton com o Ensaio de Prony.

P (bar)	H (m)	Q (m ³ /s)	F (N)	ω (rad/s)	T (Nm)	P_M (W)	P_{HC} (W)	λ	C_p
1,5	15,5	0,0017	0,00	162,3	0,0	0,0	191,47	1,134	0,000
1,5	15,5	0,0017	1,72	146,6	0,5	75,5	191,47	1,024	0,394
1,5	15,5	0,0017	3,38	125,7	1,0	127,6	191,47	0,878	0,666
1,5	15,5	0,0017	4,61	104,7	1,4	144,8	191,47	0,731	0,756
1,5	15,5	0,0017	6,08	83,8	1,8	152,9	191,47	0,585	0,799
1,5	15,5	0,0017	7,46	62,8	2,2	140,5	191,47	0,439	0,734
1,5	15,5	0,0017	8,93	41,9	2,7	112,2	191,47	0,293	0,586
1,5	15,5	0,0017	9,56	20,9	2,9	60,1	191,47	0,146	0,314
1,5	15,5	0,0017	9,86	0,0	3,0	0,0	191,47	0,000	0,000
1,0	10,5	0,0014	0,00	136,1	0,0	0,0	106,94	1,154	0,000
1,0	10,5	0,0014	0,83	125,7	0,3	31,4	106,94	1,066	0,294
1,0	10,5	0,0014	2,21	104,7	0,7	69,3	106,94	0,888	0,648
1,0	10,5	0,0014	3,04	83,8	0,9	76,4	106,94	0,711	0,714
1,0	10,5	0,0014	4,27	62,8	1,3	80,4	106,94	0,533	0,752
1,0	10,5	0,0014	5,35	41,9	1,6	67,2	106,94	0,355	0,628
1,0	10,5	0,0014	6,33	23,0	1,9	43,7	106,94	0,195	0,409
1,0	10,5	0,0014	7,65	0,0	2,3	0,0	106,94	0,000	0,000
0,6	6,3	0,0011	0,00	107,3	0,0	0,0	51,87	1,158	0,000
0,6	6,3	0,0011	1,18	83,8	0,4	29,6	51,87	0,905	0,571
0,6	6,3	0,0011	2,06	62,8	0,6	38,8	51,87	0,678	0,748
0,6	6,3	0,0011	2,80	41,9	0,8	35,1	51,87	0,452	0,677
0,6	6,3	0,0011	3,78	20,9	1,1	23,7	51,87	0,226	0,457
0,6	6,3	0,0011	4,81	0,0	1,4	0,0	51,87	0,000	0,000
0,3	2,8	0,0008	0,00	78,0	0,0	0,0	19,95	1,158	0,000
0,3	2,8	0,0008	0,59	62,8	0,2	11,1	19,95	0,932	0,556
0,3	2,8	0,0008	1,18	41,9	0,4	14,8	19,95	0,622	0,742
0,3	2,8	0,0008	1,77	20,9	0,5	11,1	19,95	0,310	0,556
0,3	2,8	0,0008	2,60	0,0	0,8	0,0	19,95	0,000	0,000

A vazão variou de 0,0008 m³/s a 0,0017 m³/s, tendo eficiência máxima em regime permanente de até 80% dependendo do ponto de operação de vazão e da rotação da turbina, conforme a Figura 12.

Figura 12 – Dados $C_P \times \omega$ obtidos para a turbina Pelton.

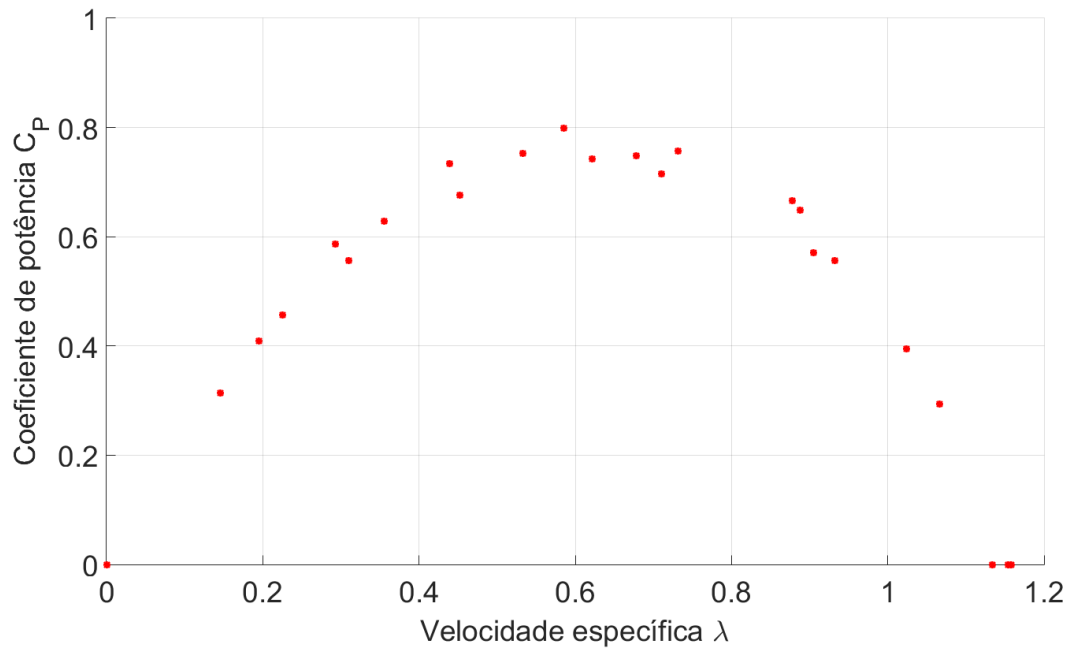
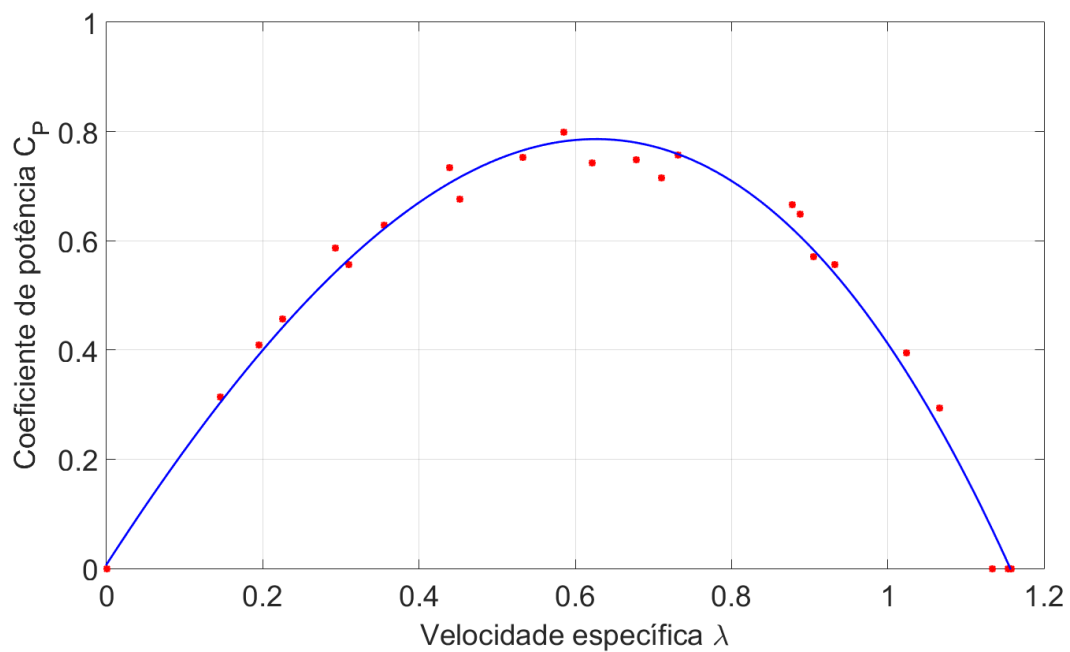
Fonte: Autor.

Os dados do gráfico [Figura 12](#) foram normalizados com a [Equação 3.1](#), no intuito de obter uma única curva característica da turbina para todas as vazões. Estes dados relacionam eficiência da turbina (C_p) em função da velocidade relativa entre o fluido e a ponta da turbina (λ), podendo ser observados na [Figura 13a](#).

Com os dados normalizados utilizando a função $C_p(\lambda)$, obtém-se então o modelo da curva característica da turbina, ajustada a uma função polinomial de terceira ordem, conforme a [Figura 13b](#). A função obtida, dada pela [Equação 4.1](#), apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,9849$.

$$\widehat{C}_p(\lambda) = 0,005209 + 1,52\lambda - 0,669\lambda^2 - 0,3915\lambda^3 \quad (4.1)$$

Figura 13 – Dados normalizados e modelo da turbina em regime permanente.

(a) Dados normalizados $C_p \times \lambda$ da turbina Pelton.(b) Curva do modelo $\widehat{C}_p(\lambda)$ ajustado aos dados.

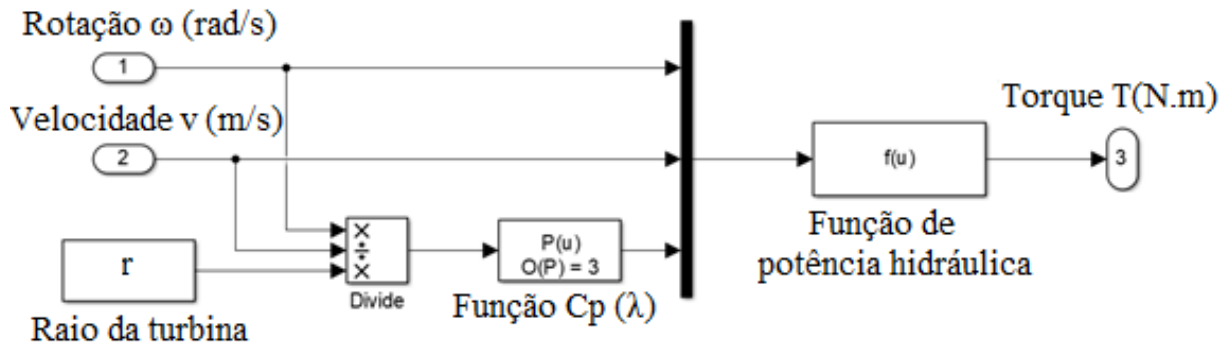
Fonte: Autor.

Este modelo polinomial de terceira ordem é obtido a partir de uma regressão linear, conforme a apresentado na [seção 3.2](#).

4.1.2 Aplicação do modelo na simulação.

Com a curva característica, a simulação da turbina pode ser realizada, como apresentado na [Figura 14](#). A velocidade do fluido e a rotação são entradas para calcular a velocidade específica λ e o coeficiente de potência estimado $\widehat{C}_p$.

Figura 14 – Subsistema para a simulação da turbina em regime permanente.



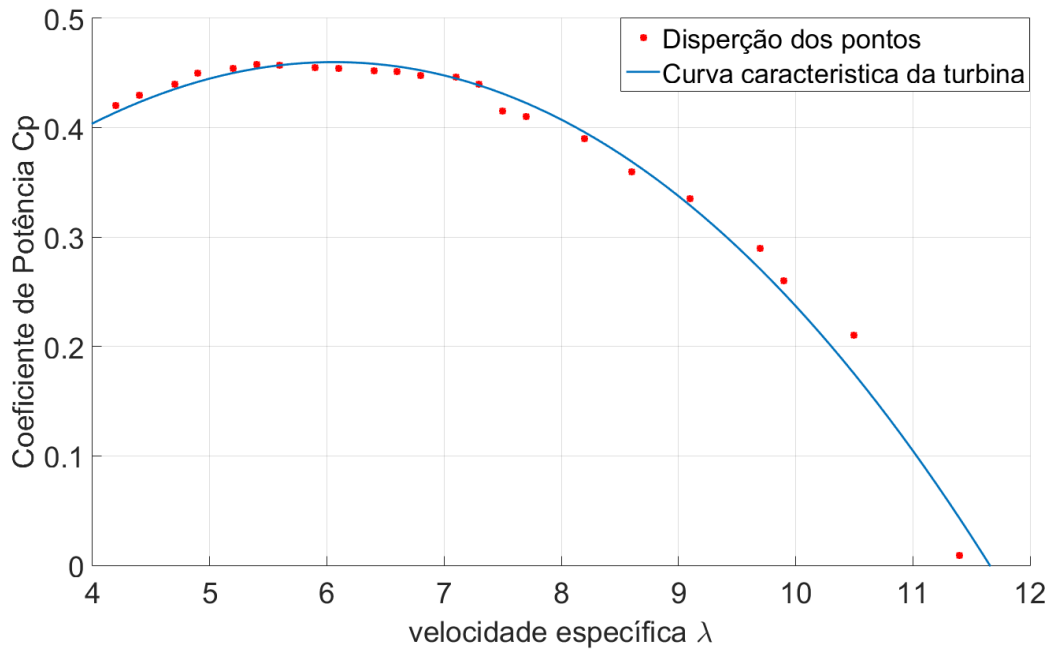
Fonte: Autor.

A função utilizada na saída do subsistema permite calcular a potência hidráulica cinética ou diretamente o torque como saída do modelo. O torque da turbina é calculado utilizando a [Equação 4.2](#).

$$T = \widehat{C}_p(\lambda) \cdot \frac{P_H}{\omega} = \widehat{C}_p(\lambda) \cdot \frac{A_u \cdot \rho \cdot v_f^3}{2 \cdot \omega} \quad (4.2)$$

4.1.3 Modelagem da turbina de eixo horizontal

Para a validação e aplicação do método, para meios de comparação e observação de comportamento, foi utilizada uma curva característica $C_p(\lambda)$ referente a outra turbina. Foram utilizados os dados apresentados por [Tian et al. \(2016\)](#), que apresenta uma turbina de eixo horizontal para carregamento de sistemas eletrônicos que possui pás móveis. E possui a sua curva característica descrita na [Figura 15](#).

Figura 15 – Dados $C_p \times \lambda$ e modelo da turbina de eixo horizontal.

A regressão para este tipo de turbina resultou na [Equação 4.3](#), com coeficiente $R^2 = 0,9905$.

$$\widehat{C_p}(\lambda) = 0,0032 + 0,1436\lambda - 0,0101\lambda^2 - 0,0002\lambda^3 \quad (4.3)$$

Para o cálculo do P_{HC} é utilizada a área útil correspondente a esta turbina. Para esta turbina, também foi modificado o parâmetro de constante de tensão do gerador síncrono de ímã permanente - que relaciona a tensão e a rotação - para 1000. Isto porque esta turbina possui uma velocidade específica maior, sendo então adaptada para a tensão induzida estar no limite controlado do sistema, utilizando o mesmo método anteriormente descrito.

Com isso, obtêm-se uma simulação completa do sistema de implementação com uma nova turbina.

4.2 Dimensionamento do gerador

O gerador foi dimensionado, considerando a rotação máxima e mínima prevista na aplicação ([Tabela 1](#)). A tensão mínima do barramento CC usada para determinar a indução do gerador na velocidade mínima, garantindo índice de modulação adequado para operar conectado a rede. Da mesma forma, a tensão máxima projetada conforme os limites dos semicondutores de potência está relacionada à velocidade máxima. Portanto,

o modelo não precisa de um estágio de elevação de tensão, como um transformador ou conversor Boost CC-CC.

O bloco PMSG foi utilizado definindo a constante de tensão do gerador CC K_{CC} , na [Equação 4.4](#), onde n_m^{min} é a rotação mínima da máquina (em RPM). Os demais parâmetros do gerador síncrono foram mantidos, conforme as pré-definições do bloco para as especificações de potência da aplicação.

$$K_{CC} = 1000 \frac{V_g^{RMS} \sqrt{2}}{n_m^{min}} \quad (4.4)$$

Para dimensionar a rotação mínima da máquina, o requisito v_f^{min} ([Tabela 1](#)) é combinado com $\lambda = 0,6272$ (para o máximo C_p baseado na [Equação 4.1](#)) para calcular a rotação com a [Equação 3.1](#). O valor desta rotação é de aproximadamente 60 rad/s (573 rpm), resultando em $K_{CC} = 313,47$, conforme a [Equação 4.5](#).

$$K_{CC} = \frac{127\sqrt{2}}{60 \left(\frac{60}{2\pi} \right)} = 313,47 \quad (4.5)$$

A [Figura 16](#) representa a interface do bloco, onde se ajustam os parâmetros do gerador síncrono de ímã permanente.

Figura 16 – Parâmetros do Gerador Síncrono de ímã permanente.

Block Parameters: Gerador Síncrono de Ima Permanente

The stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

The three-phase machine can have sinusoidal or trapezoidal back EMF waveform. The rotor can be round or salient-pole for the sinusoidal machine, it is round when the machine is trapezoidal. Preset models are available for the Sinusoidal back EMF machine.

The five-phase machine has a sinusoidal back EMF waveform and round rotor. Preset models are not available for this type of machine.

Configuration Parameters Advanced

Stator phase resistance R_s (ohm):
0.0485

Armature inductance (H):
0.000395

Machine constant
Specify: Voltage Constant (V_{peak} L-L / krpm)
Voltage constant: 313

Inertia, viscous damping, pole pairs, static friction [J(kg.m²) F(N.m.s) p() Tf(N.m)]:
[0.0027 0.0004924 4 0]

Initial conditions [ω_m (rad/s) θ_{em} (deg) i_a, i_b (A)]:
[10,0, 0,0]

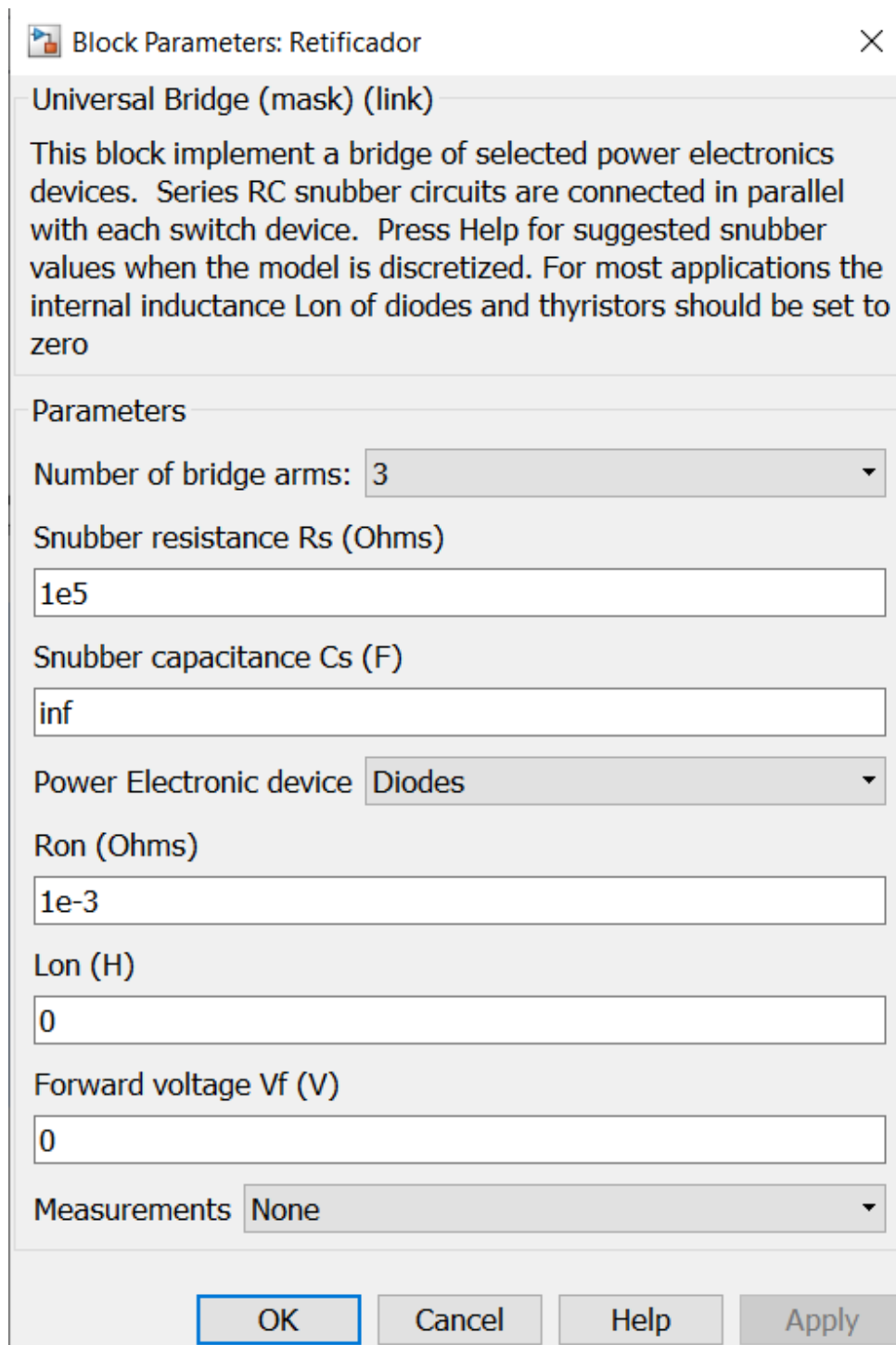
OK Cancel Help Apply

Fonte: Autor.

4.3 Dimensionamento do conversor - retificador e inversor

O retificador utilizado foi um modelo de onda completa ideal, com os parâmetros apresentados na [Figura 17](#).

Figura 17 – Configuração do bloco do retificador.



Block Parameters: Retificador

Universal Bridge (mask) (link)

This block implement a bridge of selected power electronics devices. Series RC snubber circuits are connected in parallel with each switch device. Press Help for suggested snubber values when the model is discretized. For most applications the internal inductance L_{on} of diodes and thyristors should be set to zero

Parameters

Number of bridge arms: 3

Snubber resistance R_s (Ohms)
1e5

Snubber capacitance C_s (F)
inf

Power Electronic device Diodes

R_{on} (Ohms)
1e-3

L_{on} (H)
0

Forward voltage V_f (V)
0

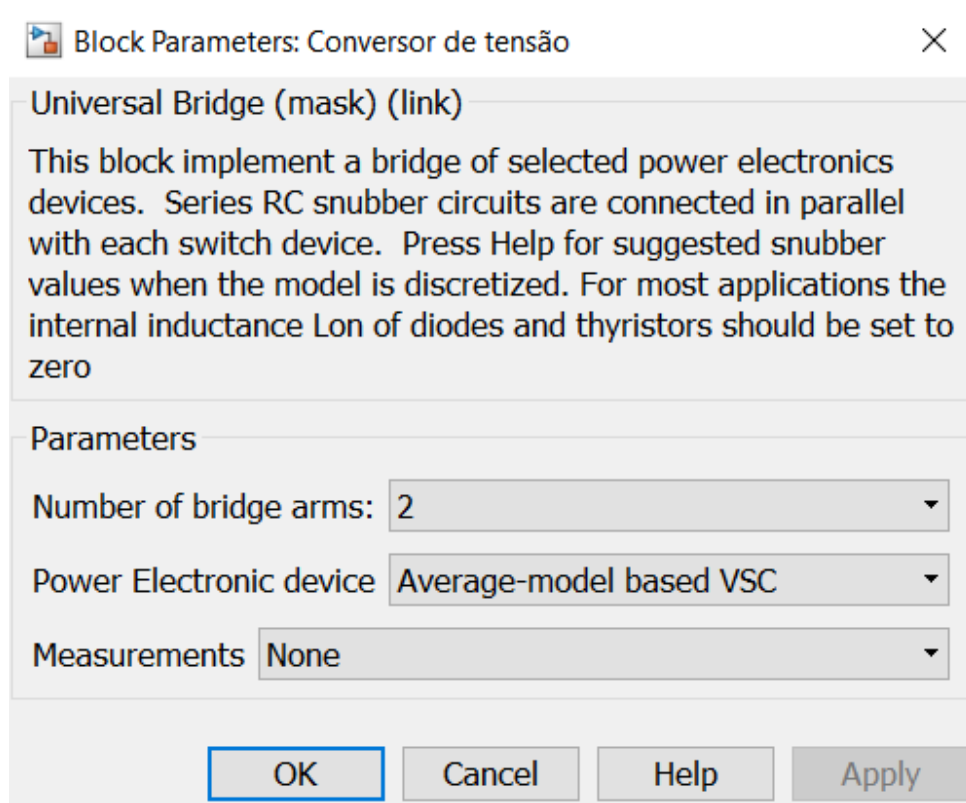
Measurements None

OK Cancel Help Apply

Fonte: Autor.

O inversor fonte de tensão utilizado foi um modelo médio (desprezando os efeitos de chaveamento), monofásico de 2 braços, como indicado na [Figura 18](#).

Figura 18 – Configuração do bloco do inversor de tensão.



Fonte: Autor.

Os componentes L_{CC} e C_{CC} foram calculados considerando o dobro da frequência da rede como largura de banda. A capacitância também é necessária para desacoplamento de energia entre a rede e o gerador.

Os parâmetros do conversor estão resumidos na [Tabela 4](#), respeitando a nomenclatura adotada neste trabalho ([Figura 1](#)).

Tabela 4 – Parâmetros dimensionados para o conversor.

Variável	Descrição	Valor
V_{CC}^{min}	Mínima tensão do link CC	200V
V_{CC}^{max}	Máxima tensão do link CC	400V
f_s	Frequência de chaveamento	30 kHz
C_{CC}	Capacitância do link CC	820 μ F
L_{CC}	Indutância do link CC	2,1 mH
Δi_{Lg}	Ripple de corrente no indutor	35% $\times$ 8A
L_g	Indutância da rede	3 mH
R_g	Resistência da rede	0,1 Ω

O indutor de acoplamento da rede foi calculado usando a [Equação 4.6](#) para a condição de pior caso na tensão máxima do link CC. A resistência está relacionada ao

condutor escolhido para a construção do indutor.

$$L_g = \frac{(V_{CC}^{max} - V_g^{RMS} \sqrt{2}) \cdot m}{\Delta i_{Lg} \cdot f_s} \quad (4.6)$$

A faixa de tensão escolhida para o barramento CC foi de 200 Volts no limite inferior (suficiente para operar com a tensão da rede V_g^{RMS}) e 400 Volts para o limite superior, relacionado aos limites físicos dos componentes do conversor.

4.4 Projeto dos sistemas de controle

Os sistemas de controle utilizados neste trabalho iniciam com o MPPT, que localiza o ponto de máxima eficiência de operação, e gera uma tensão de referência para o controlador de tensão. Este controlador de tensão do link CC gera uma amplitude de corrente de referência que, modulada pelo sinal do PLL sincronizado com a rede, é rastreada pelo controlador de corrente. A saída do controlador de corrente é o sinal modulante enviado ao inversor.

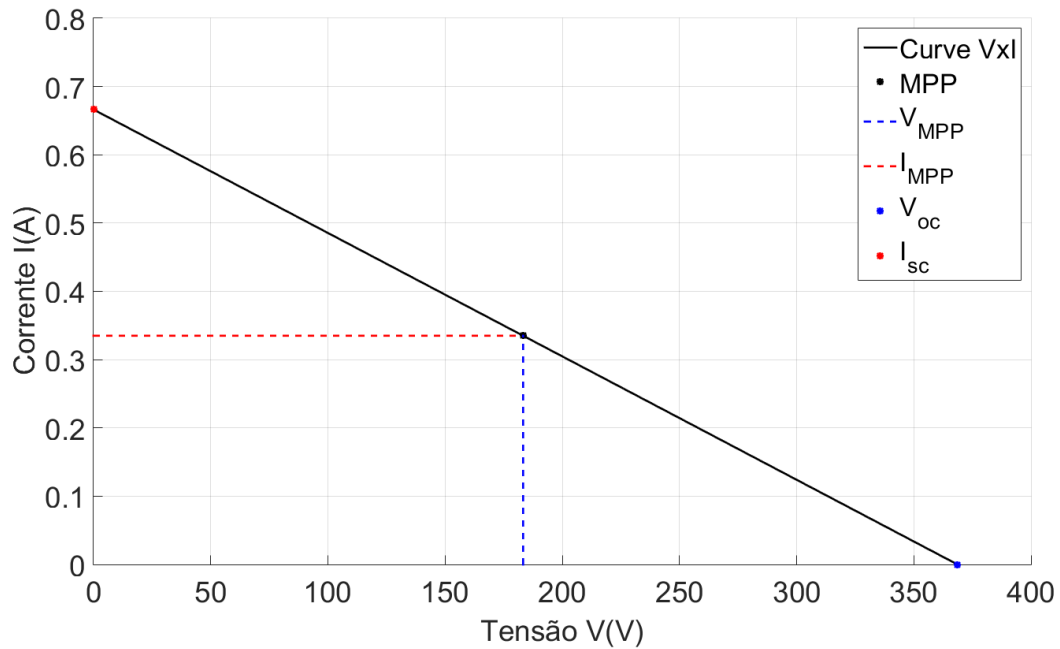
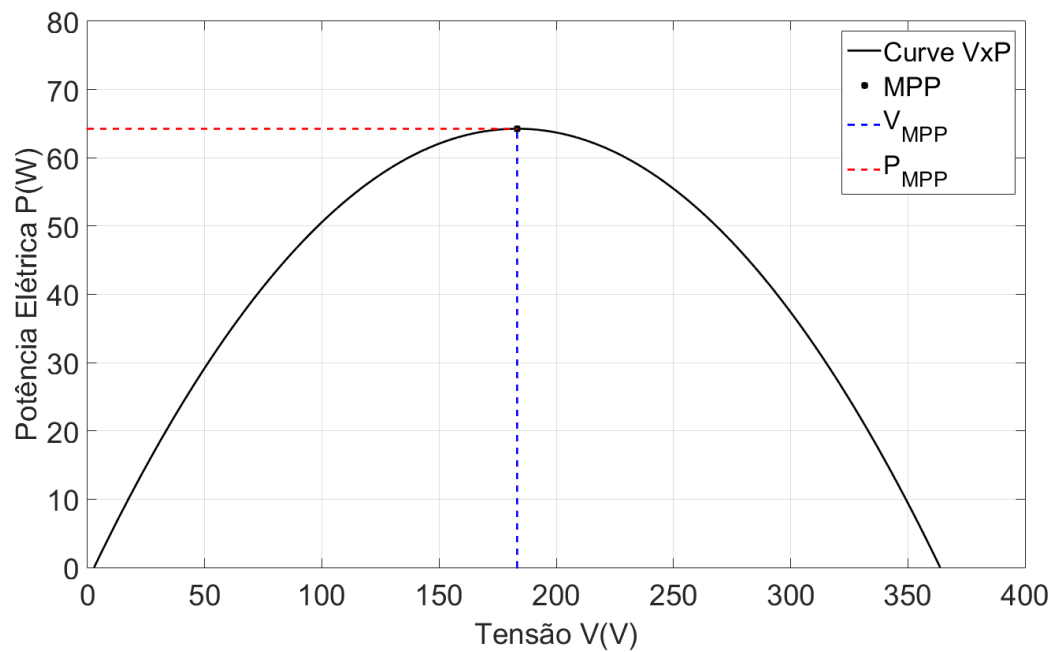
4.4.1 MPPT

Os algoritmos de MPPT (BRITO et al., 2011; BRANDÃO; MARAFÃO, 2016) são amplamente aplicados em geração renovável, principalmente para sistemas eólicos ou fotovoltaicos (BOLLIPO; MIKKILI; BONTHAGORLA, 2020; ABO-KHALIL; Dong-Choon Lee, 2008), mas também para geração hidráulica (BELHADJI et al., 2013; MOLINA; PACAS, 2010). Neste trabalho, foi aplicado no modelo o P&O MPPT com passo variável.

O MPP desse sistema hidráulico varia com a vazão do rio, rotação e torque obtido na turbina. Assim, os algoritmos de MPPT são desafiados a rastrear rapidamente o MPP fornecendo a referência para o laço de controle do link CC. O sistema utilizará o MPP do conjunto turbina, gerador e retificador, visto que se deseja instalar sensores elétricos (Tensão e Corrente) ao invés de sensores mecânicos (Torque e Velocidade). Portanto, o MPPT está considerando implicitamente a eficiência do gerador e do retificador.

Para melhor explicar o funcionamento do MPPT, apresenta-se na [Figura 19a](#) a curva característica Corrente $\times$ Tensão ($I \times V$) do sistema para um fluxo fixo. O ponto de curto-circuito ($0, I_{sc}$) e o ponto de circuito aberto ($V_{oc}, 0$) também são indicados. Para o mesmo fluxo, também é apresentada a curva Potência $\times$ Tensão ($P \times V$), na [Figura 19b](#), com o MPP representado por (V_{MPP}, I_{MPP}).

Figura 19 – Curvas características do sistema hidráulico apresentado para uma vazão fixa.

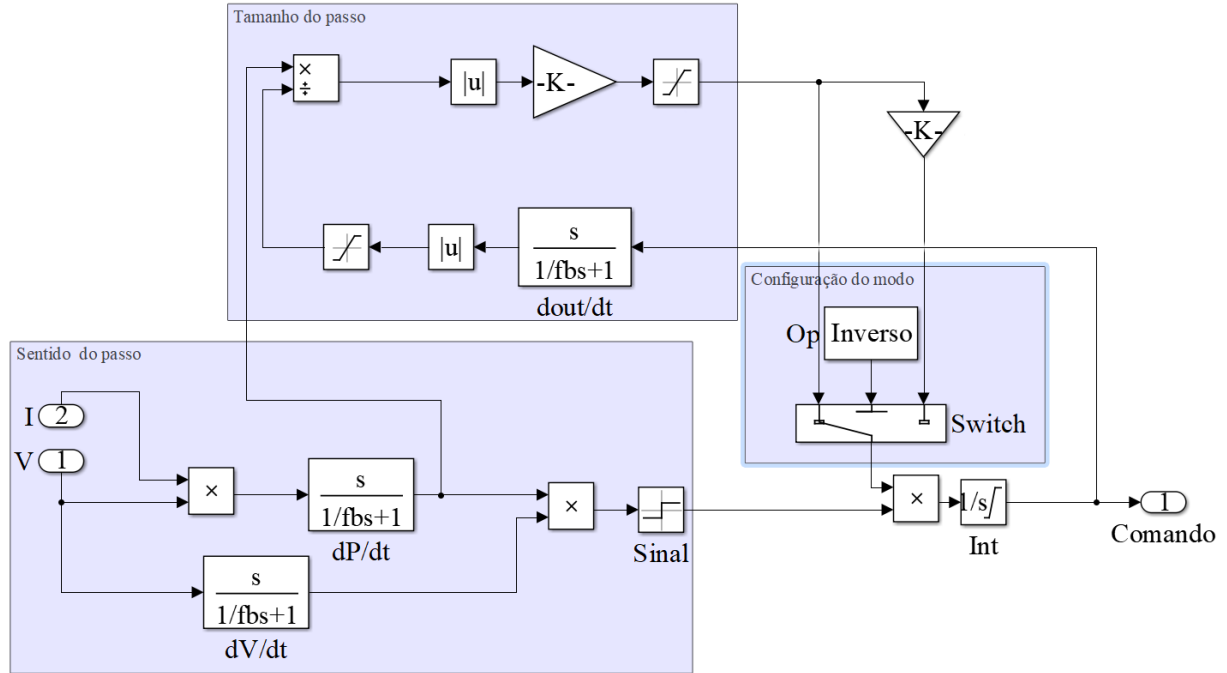
(a) Curva $I \times V$ característica(b) Curva $P \times V$ característica

Fonte: Autor.

Nota-se que as técnicas de MPPT operam em conjunto com conversores CC, de modo que o algoritmo MPPT fornece o sinal de referência de tensão, para o controle interno do conversor CC.

O MPPT P&O de passo variável foi dimensionado tendo a tensão e a corrente no barramento CC como referência, utilizando um algoritmo apresentado em Galotto (2011). A Figura 20 mostra o diagrama de blocos.

Figura 20 – Diagrama de blocos do MPPT simulado no *simulink/matlab*.



Fonte: (GALOTTO, 2011).

Após lidas as entradas, calcula-se a potência ($P = V.I$) e as derivadas $\frac{dV}{dt}$ e $\frac{dP}{dt}$, calcula-se o sentido do passo, comparando os diferenciais. Comparando o diferencial da potência, cresce ou decresce o tamanho do passo - caso o diferencial aumente, aumenta o tamanho do passo, se o diferencial diminuir, decresce o tamanho do passo. O MPPT possui uma configuração inversa, caso necessário, como pode ser visto na figura, porém não foi utilizada no sistema, pois o sistema funciona no sentido direto.

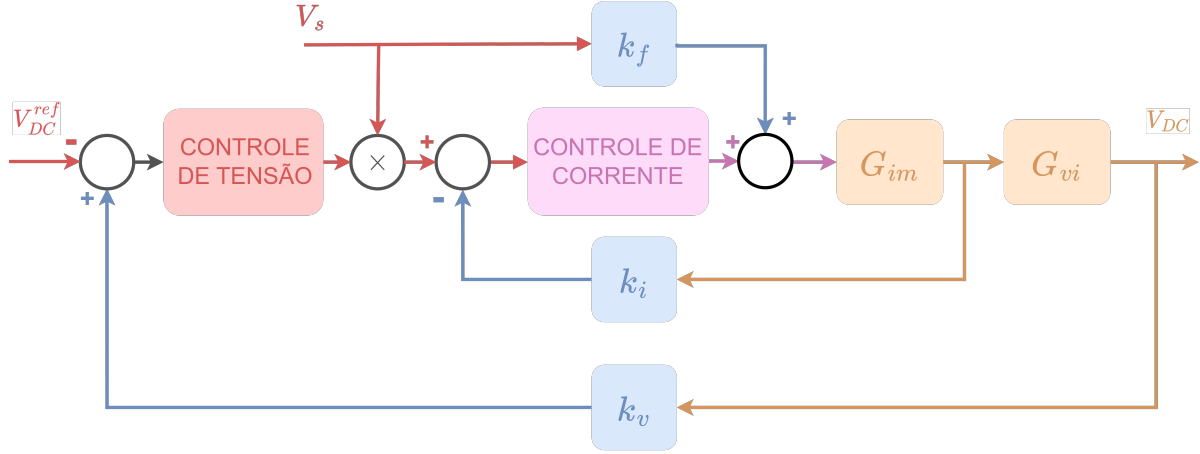
Os limites de tensão superior e inferior (200 a 400 V, conforme a Tabela 4) são aplicados como saturação da atuação do MPPT. Ou seja, para a tensão não ficar abaixo do limite inferior (impedindo o funcionamento adequado do conversor) é preferível sair da máxima potência para manter o funcionamento. De forma semelhante, a tensão máxima precisa ser preservada para a vida útil do conversor, prioritária em relação a operar no MPP.

4.4.2 Controladores de tensão e corrente

Os controladores escolhidos para as malhas de corrente e tensão, apresentados no diagrama de blocos da Figura 21, foram do tipo PI (Proporcional e Integral), que têm sua

função de transferência no domínio da frequência na [Equação 4.7](#).

Figura 21 – Diagrama de Blocos do sistema de controle.



Fonte: Autor.

$$PI(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_i \left(\frac{\frac{K_p}{K_i} \cdot s + 1}{s} \right) = K_i \left(\frac{\tau \cdot s + 1}{s} \right) \quad (4.7)$$

Para se dimensionar o PI, com a FTMA (Função Transferência de Malha Aberta), obtêm-se a magnitude e a fase do sistema (utilizando a função bode no *MatLab*). Calcula-se a influência da fase do PI, subtraindo a Φ_M (margem de fase) da malha aberta em relação à Φ_M desejada ([Equação 4.8](#)). O Φ_M é calculado subtraindo a fase da malha aberta de -180° , na frequência de cruzamento em 0 dB.

$$Fase_{PI} = \Phi_M^{desejada} - \Phi_M^{planta} \quad (4.8)$$

Com a Fase do PI, calcula-se o τ ([Equação 4.9](#)):

$$\tau = \frac{\tan(Fase_{PI} + 90^\circ)}{2\pi f_c} \quad (4.9)$$

Calcula-se o K_i , para que o módulo da reposta do sistema de malha aberta (PI e planta em cascata) seja 0 dB na frequência de cruzamento ω_c desejada ([Equação 4.10](#)).

$$|PI(j\omega_c)| |FTMA(j\omega_c)| = K_i |PI_{parcial}(j\omega_c)| |FTMA(j\omega_c)| = 1 \quad (4.10)$$

Deste modo, o resultado das constantes K_p e K_i é obtido pela [Equação 4.11](#):

$$K_i = \frac{1}{\left| \frac{\tau \cdot j\omega_c + 1}{j\omega_c} \right| |FTMA(j\omega_c)|}; K_p = \frac{\tau}{K_i} \quad (4.11)$$

4.4.3 Projeto do controlador de tensão no link CC

O controlador de tensão do barramento CC foi ajustado usando a função de transferência G_{vi} (Equação 4.12), que representa a variação dinâmica da tensão CC para uma perturbação da corrente da rede. Os valores foram adotados conforme a tensão da rede local (Tabela 1) e os parâmetros do conversor (Tabela 4). A tensão V_{CC} escolhida foi 220 V como ponto de operação válido entre os valores mínimo e máximo especificados.

$$G_{vi}(s) = \frac{V_g^{RMS} \sqrt{2}}{2V_{CC}C_{CC}.s} = \frac{179,6}{0,3608s} \quad (4.12)$$

A planta possui margem de fase de 90° e a contribuição da $Fase_{PI}$, para 75° é de -15° . obtêm-se então o τ , almejando frequência de cruzamento de ganho em 10Hz:

$$\tau = \frac{\tan(-15^\circ + 90^\circ)}{2\pi \cdot 10} = 0,0594 \quad (4.13)$$

Com o τ , calcula-se o $PI_{Parcial}$ e a $Planta_{Parcial}$, multiplicando o $PI_{Parcial}$ por G_{vi} :

$$PI_{Parcial} = \frac{0,0594.s + 1}{s} \quad (4.14)$$

$$Planta_{Parcial} = \frac{10,67.s + 179,6}{0,3608.s^2} \quad (4.15)$$

O sistema parcial possui fase de -105° e magnitude de 0,4872. Enfim, calcula-se o K_i e K_p .

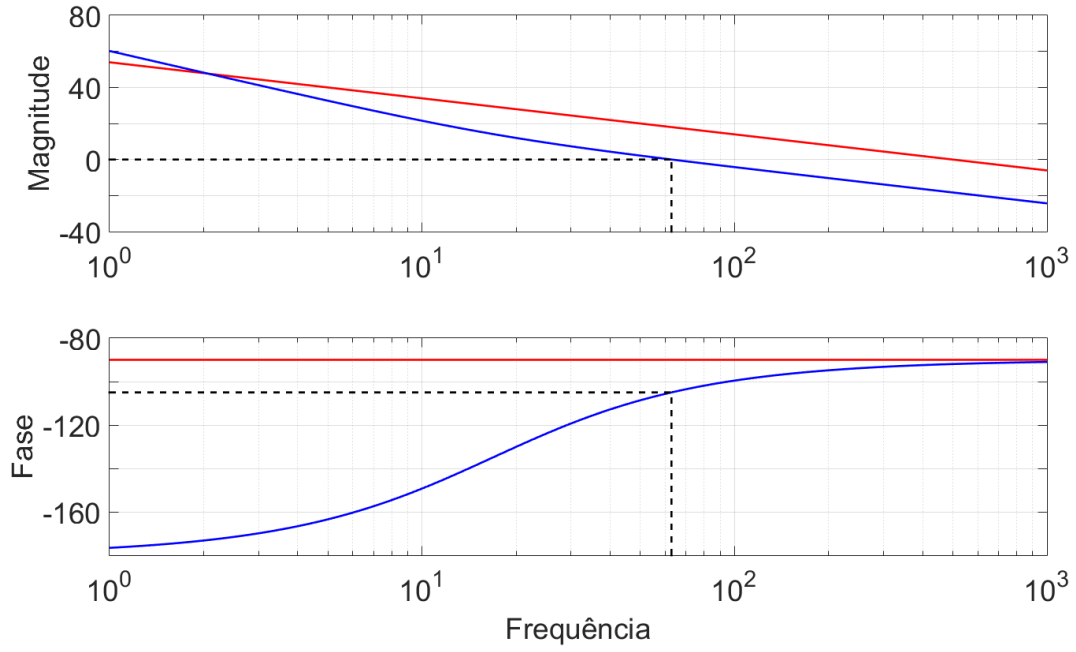
$$K_i = \frac{1}{0,4872} = 2,0526; K_p = \frac{0,0594}{2,0526} = 0,0289 \quad (4.16)$$

Sendo assim, o PI do controlador de tensão é:

$$PI = 0,0289 + \frac{2,0526}{s} \quad (4.17)$$

Pode-se conferir o dimensionamento do PI através do diagrama de bode do sistema e malha aberta, na Figura 22. Em vermelho, está o diagrama de bode do sistema sem o compensador. Em azul, está o sistema compensado com o PI.

Figura 22 – Diagrama de Bode do sistema de controle de tensão



Fonte: Autor.

Nota-se que o sistema compensado possui margem de fase de 75° como pretendido com o PI.

4.4.4 Projeto do controlador de corrente injetada na rede

E o controle de corrente tem a função de transferência G_{im} , sendo a corrente injetada a entrada e a modulante do PWM como saída. A função G_{im} foi calculada com os parâmetros previamente definidos, conforme a [Equação 4.18](#):

$$G_{im} = \frac{V_{CC}}{(L_g \cdot s + R_g)} = \frac{200}{0,003 \cdot s + 1} \quad (4.18)$$

A planta possui margem de fase de 90° e a contribuição da $Fase_{PI}$, para 60° é de -30° . obtêm-se então o τ , para frequência de cruzamento de ganho de 2,5 kHz:

$$\tau = \frac{\tan(-30^\circ + 90^\circ)}{2\pi \times 2,5 \times 10^3} = 1,0973 \times 10^{-4} \quad (4.19)$$

Com o τ , o $PI_{Parcial}$ e a $Planta_{Parcial}$, é:

$$PI_{Parcial} = \frac{1,0970 \cdot 10^{-4} \cdot s + 1}{s} \quad (4.20)$$

$$Planta_{Parcial} = \frac{0,02414 \cdot s + 220}{0,003 \cdot s^2 + 0,1 \cdot s} \quad (4.21)$$

O sistema parcial possui fase de -120° e magnitude de $5,9224 \cdot 10^4$. Calcula-se então o K_i e K_p (Equação 4.22).

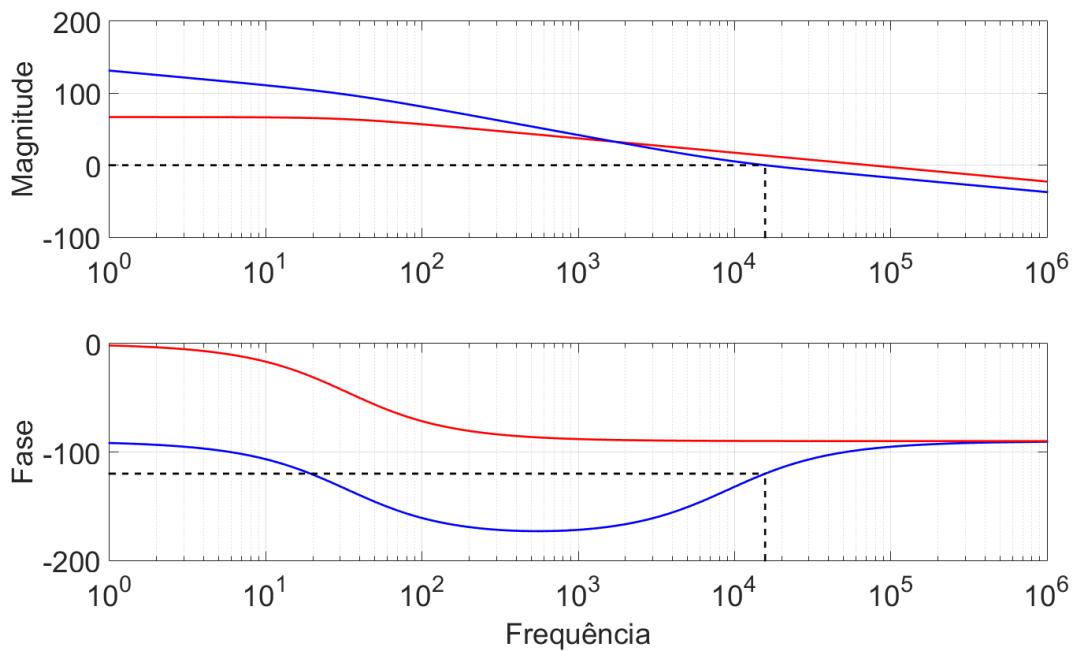
$$K_i = \frac{1}{5,9224 \cdot 10^4} = 1,6885 \cdot 10^3; K_p = \frac{1,0973 \cdot 10^{-4}}{1,6885 \cdot 10^3} = 0,1853 \quad (4.22)$$

O PI do controlador de tensão está na Equação 4.23.

$$PI = 0,1853 + \frac{1,6885 \cdot 10^3}{s} \quad (4.23)$$

O diagrama de bode do sistema em malha aberta compensado com PI está na Figura 23. Esta figura mostra em vermelho a resposta em frequência do sistema sem compensador, e em azul com compensador, demonstrando assim que a margem de fase do sistema está em 60° , como pretendida com o PI.

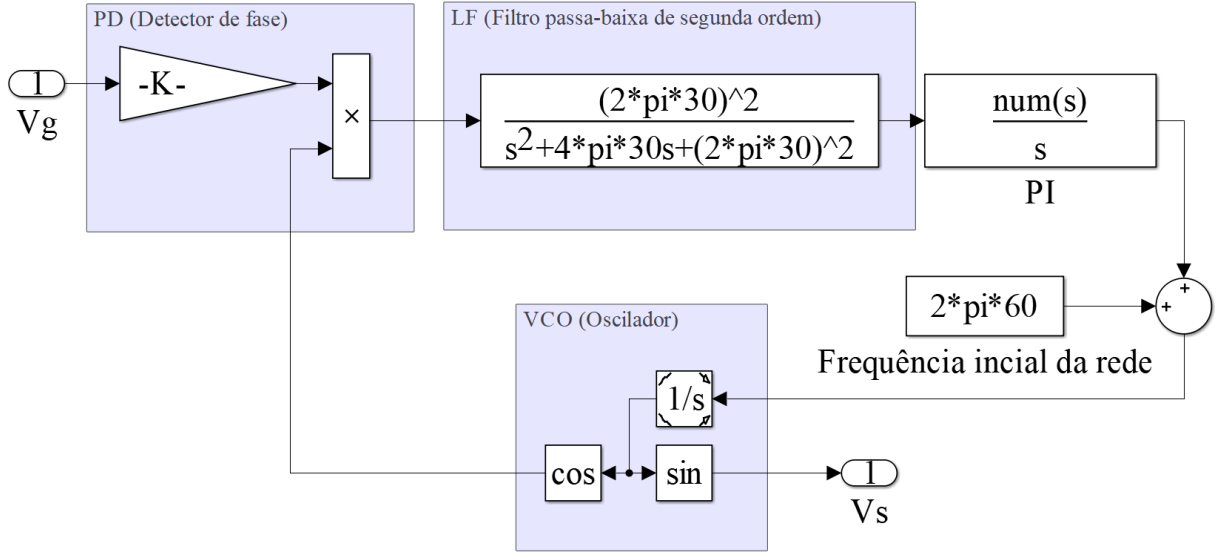
Figura 23 – Diagrama de Bode do sistema de controle de corrente.



Fonte: Autor.

4.4.5 PLL

O projeto do PLL, cuja função é executar a demodulação de frequência de uma maneira indireta, tornando assim, conhecida a frequência e fase da rede, onde o conjunto será acoplado, apresenta o diagrama de blocos, na Figura 24.

Figura 24 – Diagrama de Blocos do PLL simulado no *simulink/matlab*.

Fonte: Autor.

Esse PLL terá frequência de cruzamento de ganho em 6 Hz, uma década abaixo da frequência da rede, 60 Hz, e coeficiente de amortecimento $\xi = 0,9$. Sendo sistema do tipo 2, que apresenta erro nulo na entrada rampa e degrau. Tendo sua função transferência em malha aberta descrita na [Equação 4.24](#), com o ganho k_{pd} e k_{vco} unitário.

$$FTMA_{PLL}(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{s^2} \quad (4.24)$$

A [Equação 4.25](#) descreve a função transferência da malha fechada (FTMF) do sistema, visto na [Figura 24](#).

$$FTMF_{PLL}(s) = \frac{\theta'(s)}{\theta(s)} = \frac{LF(s)}{s + LF(s)} = \frac{K_p \cdot s + K_i}{s^2 + K_p \cdot s + K_i} \quad (4.25)$$

E comparando com uma função transferência padrão de segunda ordem:

$$G(s) = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (4.26)$$

Logo, por comparação direta, tem:

$$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_c = 37,7 \text{ rad/s} \quad (4.27)$$

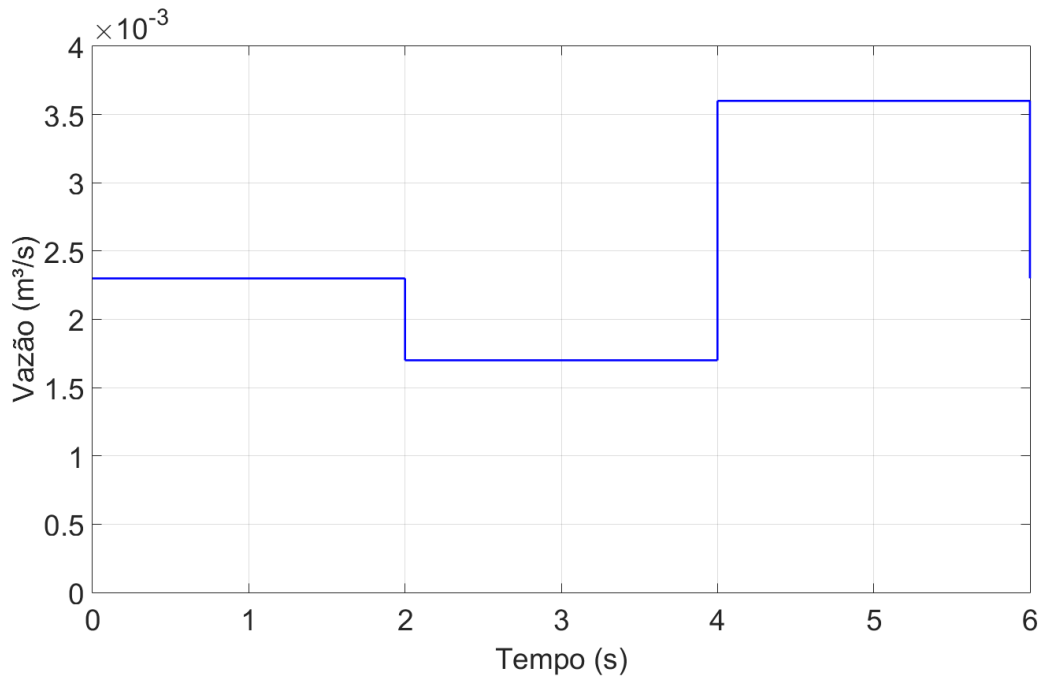
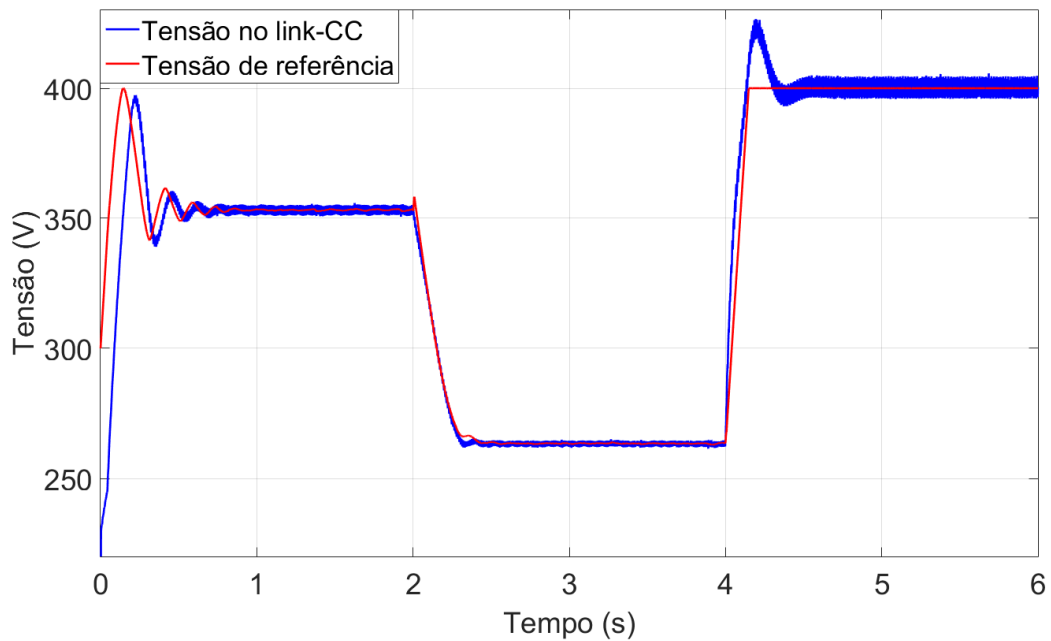
$$K_p = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n = 67,86 \quad (4.28)$$

$$K_i = \omega_n^2 = 1421,3 \quad (4.29)$$

Tendo assim, o ganho K_p e K_i do compensador PI.

Nota-se a utilização de um filtro passa-baixa de segunda ordem com frequência de corte em 30 Hz após a obtenção do erro, para atenuar a ondulação proveniente da potência monofásica pulsante e resultar numa frequência de saída do PLL com menos oscilações.

Figura 26 – Resultados no período de 6 segundos.

(a) Vazão $Q(\text{m}^3/\text{s}) \times \text{Tempo (s)}$.(b) Tensão do link CC (V) $\times$ Tempo (s).

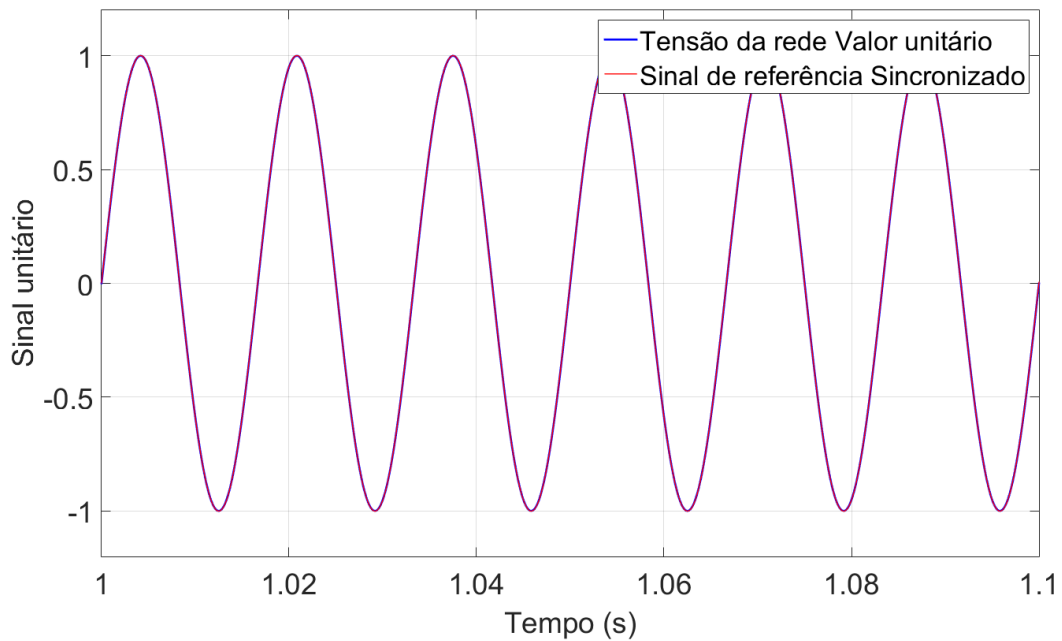
Fonte: Autor.

Na Figura 26b, observa-se a tensão do link CC de referência gerada pelo MPPT é variável em função da vazão. Isto porque a tensão onde ocorre a máxima potência aumenta também com o aumento da vazão. E esta referência é rastreada pelo sistema de controle de tensão. A tensão em regime permanente aproximada observada para os

intervalos $t = 0 - 2$, $t = 2 - 4$ e $t = 4 - 6$ segundos foram 353 V, 263 V e 400 V, respectivamente. Na vazão de $0,0036 \text{ m}^3/\text{s}$, o MPPT saturou no limite superior devido ao limite de tensão do link CC projetado para o conversor. Ou seja, nesta condição de saturação, o sistema não opera no MPP, mas continua funcionando no limite técnico de tensão priorizando a integridade do conversor.

Para o controle de corrente, é utilizado o sinal do PLL. A Figura 27 demonstra o PLL rastreando a frequência e fase da rede, entregando para o controlador de corrente um sinal sincronizado com a rede de valor unitário.

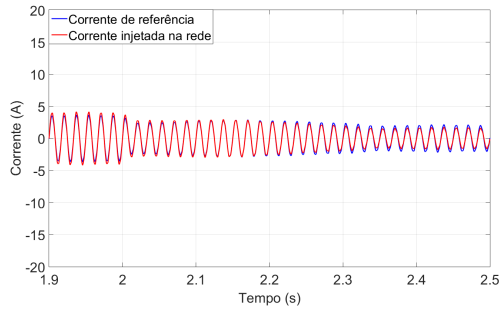
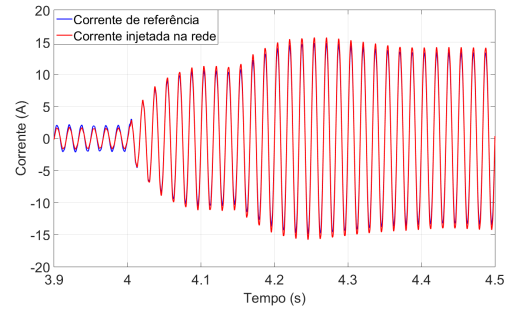
Figura 27 – Gráfico do sinal do PLL sincronizado.



Fonte: Autor.

A Figura 28a mostra a resposta transitória da corrente injetada na rede ao degrau de redução de vazão. Mesmo com a mudança, o sistema mantém a fase e frequência sincronizados, tendo um erro em regime permanente de amplitude no rastreamento. Este erro é esperado pelo tipo de controlador projetado, diferentes técnicas como ressonantes ou de referência síncrona que são os conhecidos na literatura podem ser utilizadas para eliminar este erro. Porém, isto não foi necessário neste trabalho pelo fato da referência ser variável pelo MPPT que observa se a condição de máxima potência foi alcançada independente do valor eficaz da corrente da rede.

Na Figura 28b, o sistema de controle reage à mudança de degrau ascendente de vazão. Ocorre como no degrau descendente, de modo a manter a fase e a frequência, com pequenos erros de amplitude em regime permanente.

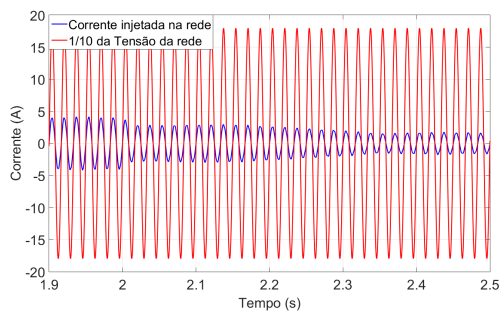
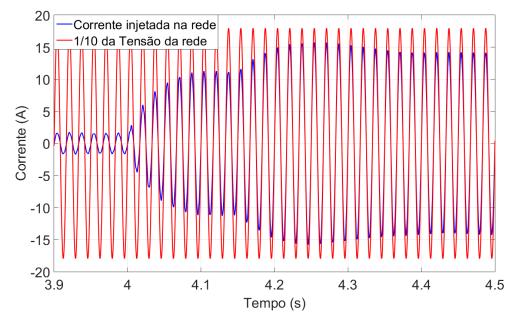
Figura 28 – Transitórios da malha de controle da corrente da rede I_g .(a) Para $t = 1,9$ à $t = 2,5$.(b) Para $t = 3,9$ à $t = 4,5$.

Fonte: Autor.

A [Figura 29a](#) mostra a corrente injetada, com $1/10$ da tensão da rede, no momento $t = 1,9s$ à $t = 2,5s$, no degrau de descida, demonstra que a injeção de potência está com fase e frequência da rede, mesmo nos períodos de transição.

Na [Figura 29a](#) mostra a corrente injetada, com $1/10$ da tensão da rede, no momento $t = 3,9s$ à $t = 4,5s$, no degrau de subida, demonstrando que a injeção de potência está com fase e frequência da rede, mesmo nos períodos de transição.

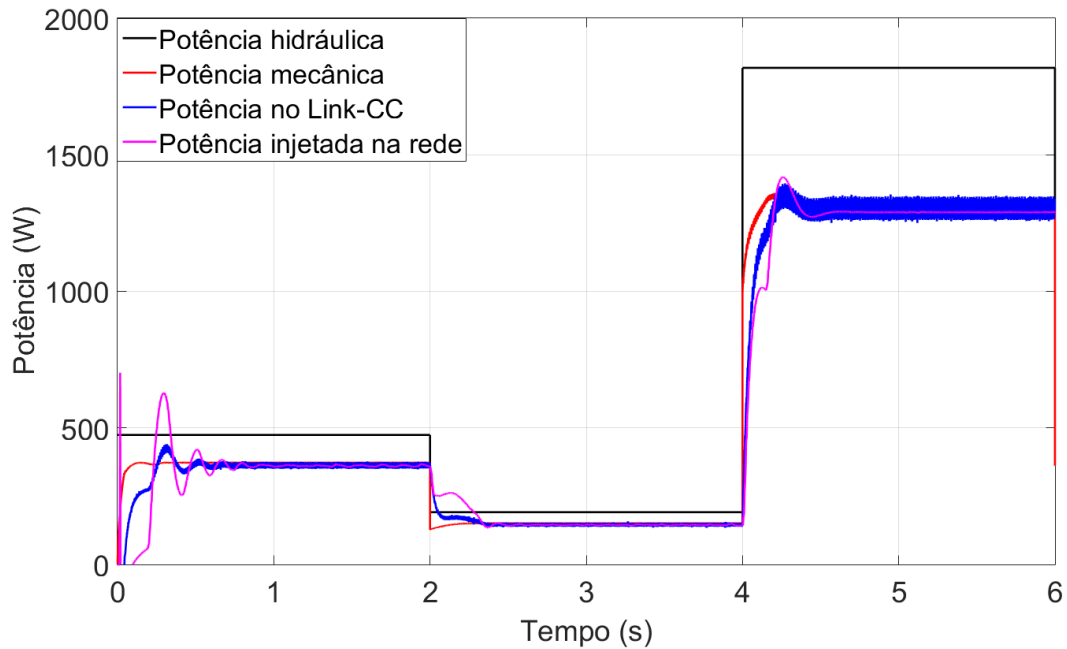
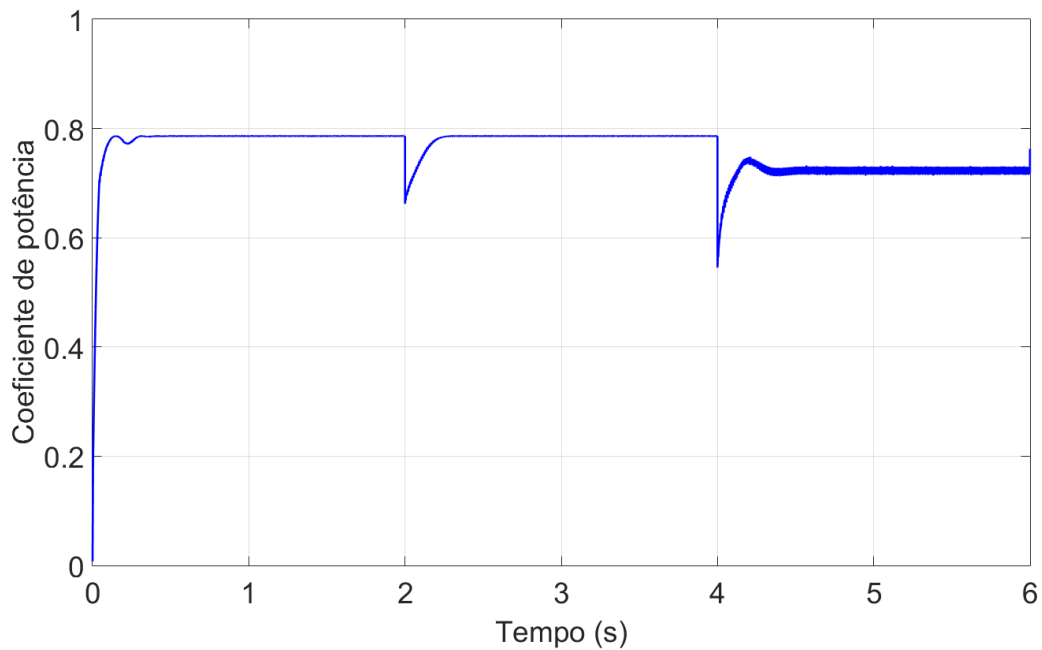
Portanto, a potência injetada nestes períodos é predominantemente ativa.

Figura 29 – Transitórios da malha de controle da corrente da rede I_g , com a tensão em escala.(a) Para $t = 1,9$ à $t = 2,5s$.(b) Para $t = 3,9s$ à $t = 4,5s$.

Fonte: Autor.

No gráfico das potências ([Figura 30a](#)), pode-se notar o tempo de subida e acomodação para cada degrau diferente de entrada, estando implícita a eficiência de cada estágio de conversão do sistema. A maior perda de potência ocorre na conversão de energia cinética hidráulica para energia mecânica.

Figura 30 – Gráficos de potência e eficiência no tempo.

(a) Potências (W) $\times$ Tempo (s).(b) Coeficiente de potência $\times$ Tempo (s).

Fonte: Autor.

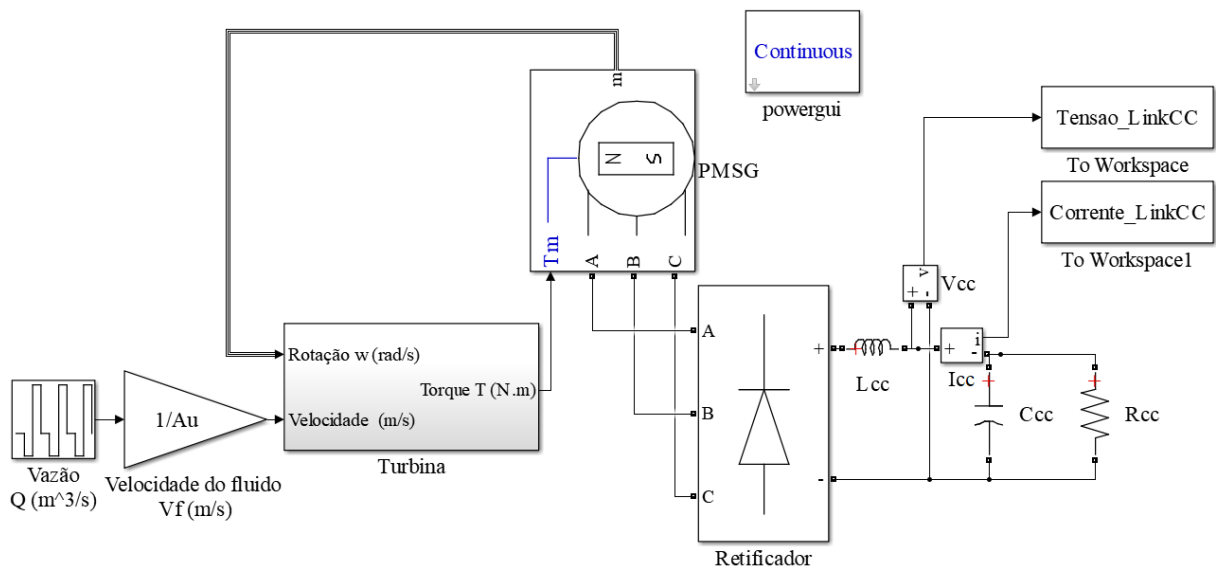
Na [Figura 30b](#), o MPPT de passo variável permite um transitório de rastreamento do MPP relativamente rápido, e praticamente não apresentou oscilações em regime permanente, estabilizando em torno da máxima eficiência. A eficiência máxima do sistema é predominantemente determinada pela turbina (em torno de 78,61%), devido à alta efici-

ência do gerador elétrico e do retificador comparadas à turbina. Nota-se que o primeiro e segundo degrau de entrada estão na região de operação normal do MPPT alcançando assim essa eficiência. Na terceira vazão de entrada, houve saturação do MPPT para manter a tensão máxima projetada para o conversor, como pôde também ser constatado na [Figura 26b](#), reduzindo a eficiência para 72,34%.

5.1.2 Resultados em regime permanente.

Para a obtenção das curvas características de potência, foi utilizado um sistema isolado da rede, utilizando apenas a turbina, o gerador de ímã permanente e o retificador, alimentando uma carga resistiva, como visto na [Figura 31](#):

Figura 31 – Diagrama da simulação do sistema para obtenção da curva característica.



Fonte: Autor.

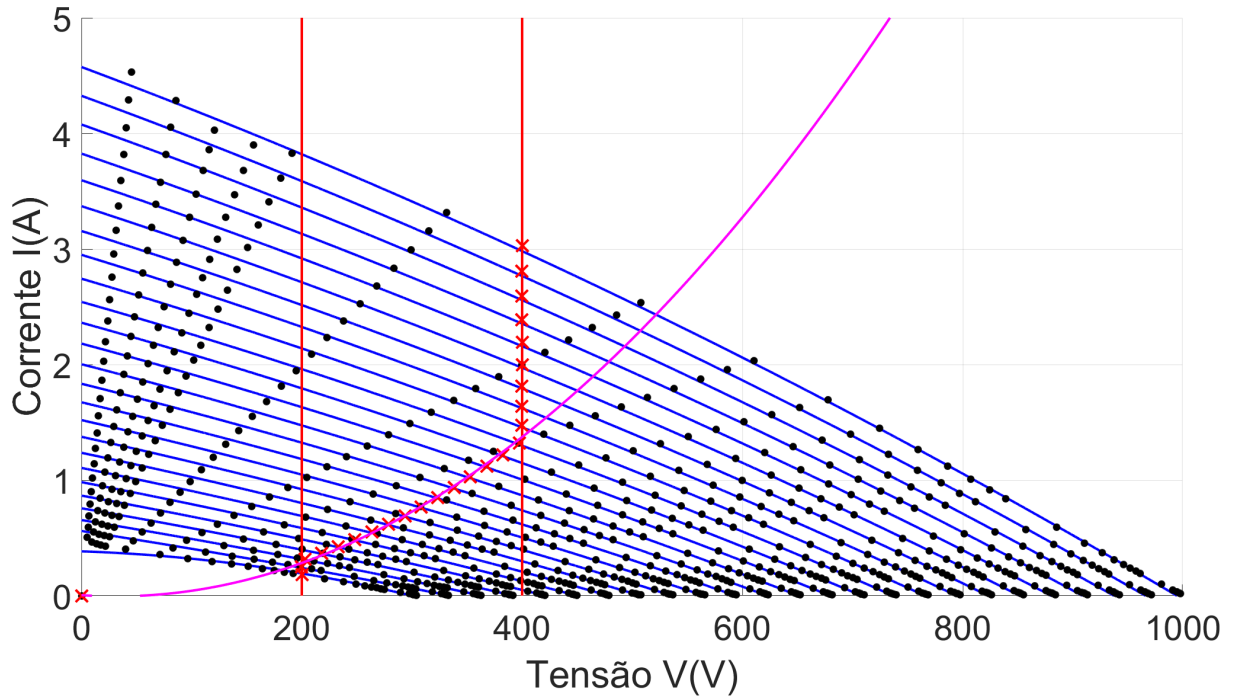
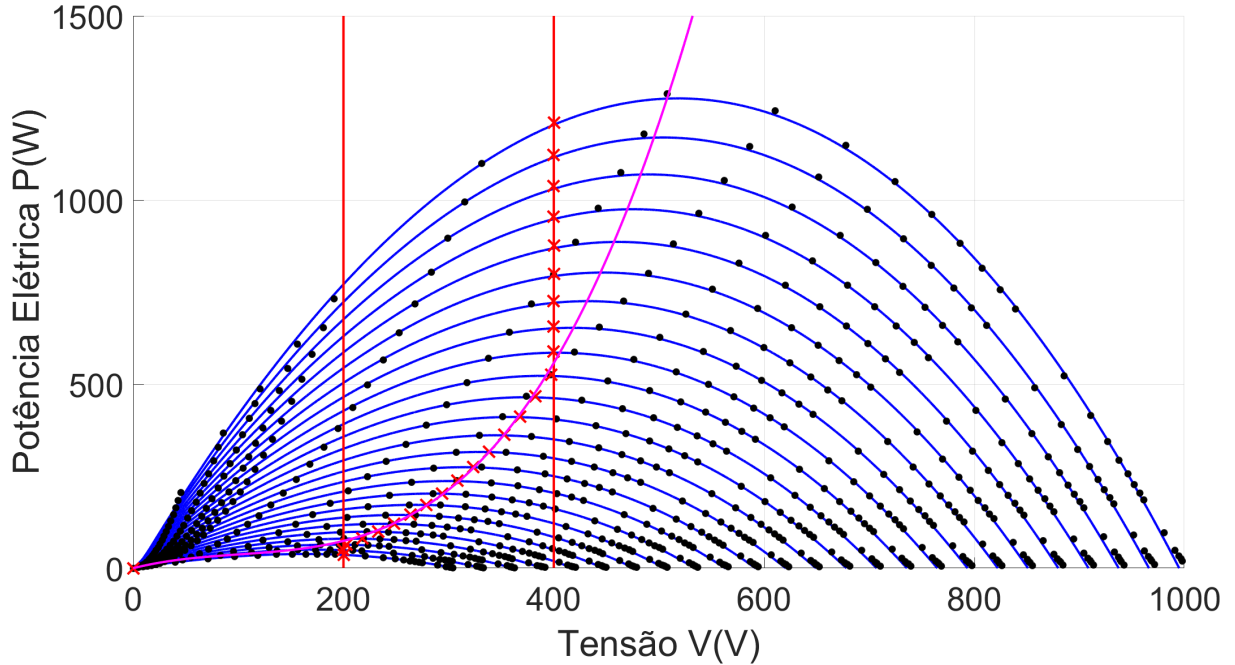
Foi simulado o sistema alterando a entrada de vazão e a resistência da carga, sendo a vazão variada de $0,0011 \text{ m}^3/\text{s}$ à $0,0035 \text{ m}^3/\text{s}$, com passo de $0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$ e resistência variando de 10Ω à $10\,000 \Omega$. Todos os dados foram obtidos em regime permanente, de modo a obter as características dos pontos de operação deste sistema.

Na [Figura 32a](#), as barras verticais em vermelho representam os limites operacionais de tensão do link CC para conversor eletrônico de potência.

Os asteriscos em preto representam o regime permanente de cada simulação para cada combinação de vazão e resistência de carga. As curvas azuis são a regressão linear para cada entrada de vazão variando apenas a resistência, ou seja, a curva característica para cada vazão de entrada. Os asteriscos em vermelho são a máxima potência que pode ser alcançada com o conversor para cada vazão de entrada. Em magenta, está a curva de máxima potência do sistema.

Na [Figura 32b](#) tem-se a curva da potência de saída do conversor em função da tensão no link CC V_{CC} , assim como a [Figura 32a](#). Nota-se que, na maior vazão, o sistema não possui a máxima potência pela saturação na tensão superior. Por esta razão a eficiência é reduzida, e o mesmo ocorre para a curva no limite inferior, quando a tensão de máxima potência está abaixo do limite mínimo necessário para a modulação do inversor. Porém, o sistema pode continuar operando, ainda que não seja na melhor eficiência.

Figura 32 – Curvas características de operação do sistema em regime permanente.

(a) Corrente $I_{CC}(A) \times$ Tensão $V_{CC}(V)$.(b) Potência $P(W) \times$ Tensão $V_{CC}(V)$.

Fonte: Autor.

Interessante acrescentar que diferentes conversores podem operar com limites diferentes dependendo da topologia e dos semicondutores utilizados. O aumento desta faixa é possível para o maior aproveitamento de energia, porém com aumento também do custo e complexidade do conversor. Sendo desta forma um problema desafiador de projeto de en-

genharia que ainda pode agregar a mudança de turbina, do gerador elétrico e otimização do conjunto.

5.2 Resultados com a turbina de eixo horizontal.

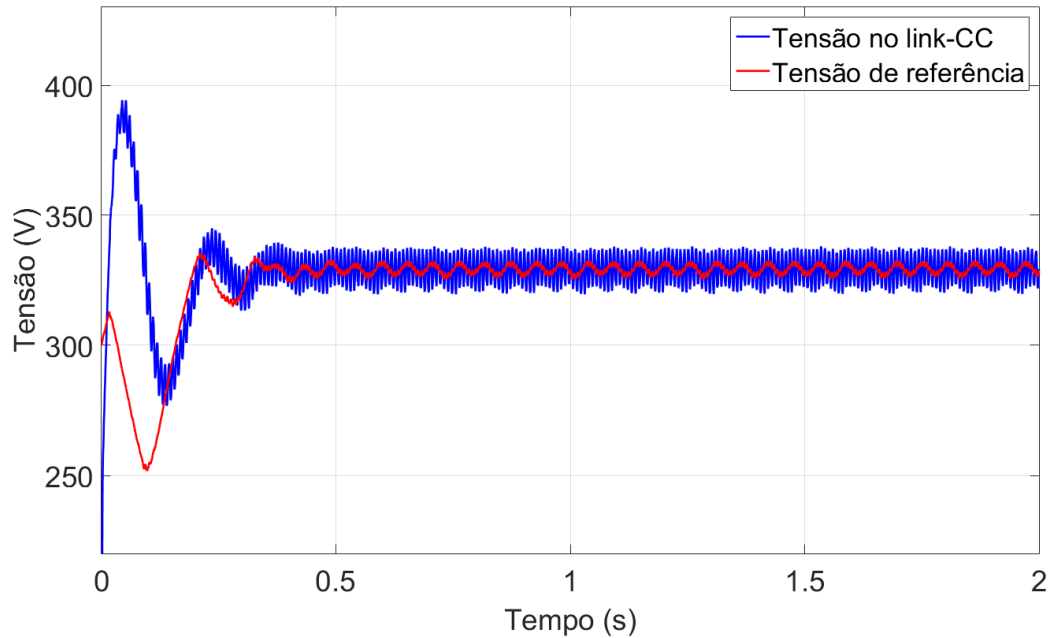
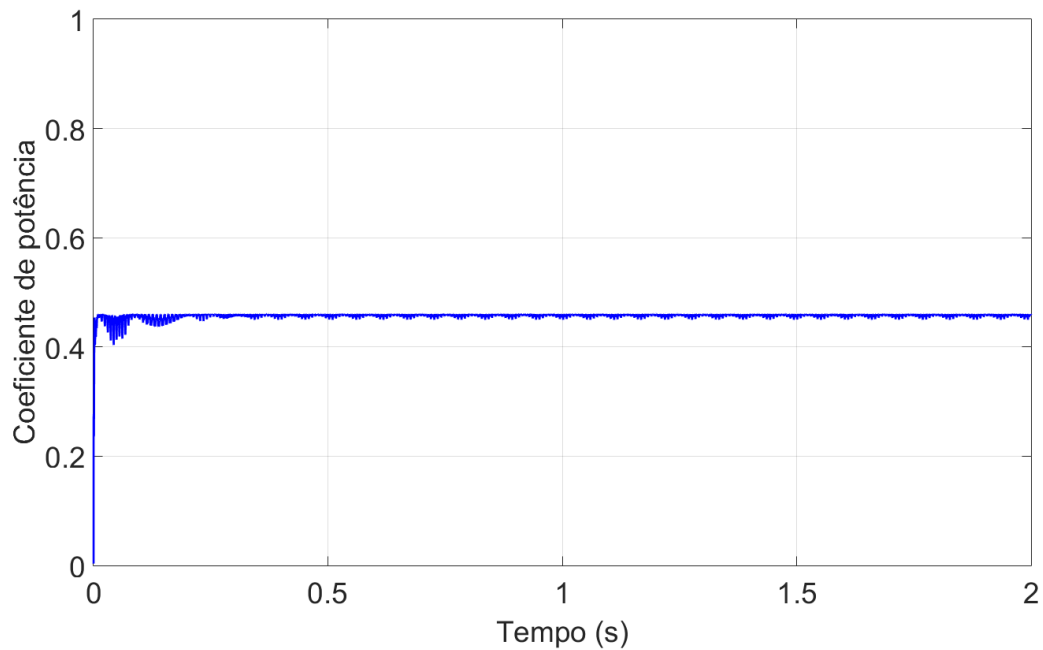
Com o modelo desenvolvido e o sistema dimensionado para a nova turbina, foi realizada uma simulação com degrau de velocidade do fluido de 2,4 m/s para observar o comportamento em regime transitório em conexão com a rede elétrica. Também foram gerados os resultados em regime permanente, para levantamento das curvas características de operação do sistema isolado da rede.

5.2.1 Resultados em regime transitório.

A [Figura 33a](#) apresenta a tensão de referência do link CC gerada pelo MPPT e a tensão controlada, alcançando cerca de 325 V CC em regime permanente.

Na [Figura 33b](#), a eficiência máxima alcançada está em torno de 45%. Esta corresponde à máxima eficiência do sistema nesta faixa de vazão que permite a operação nos limites de tensão.

Figura 33 – Gráficos no tempo de tensão e eficiência.

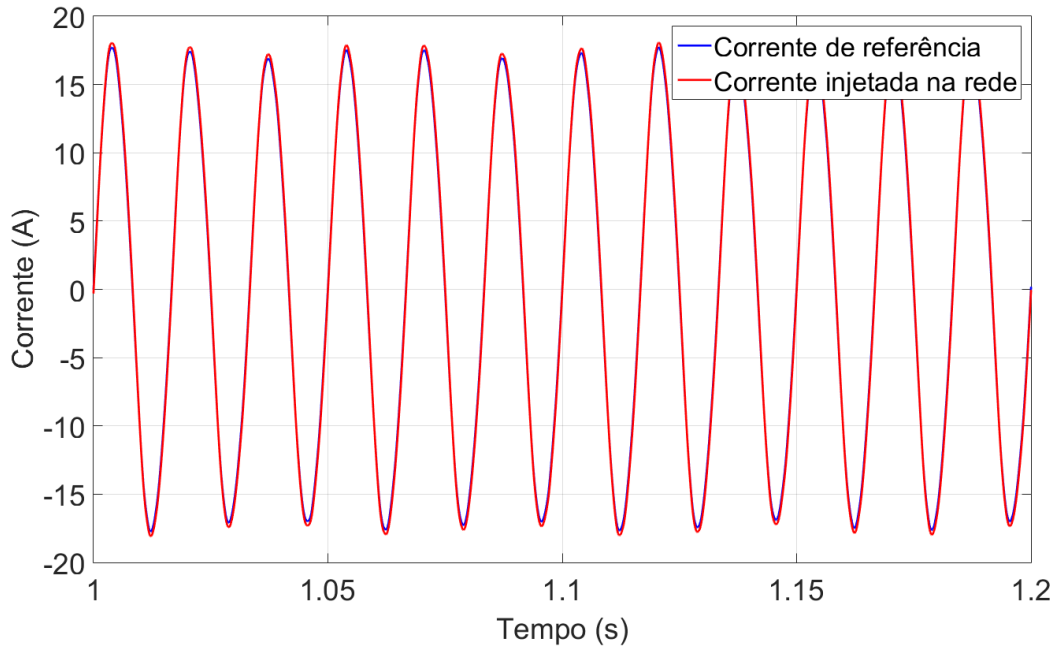
(a) Controle da tensão $V_{CC}(V) \times$ Tempo (s).(b) Coeficiente de potência $C_P \times$ Tempo (s).

Fonte: Autor.

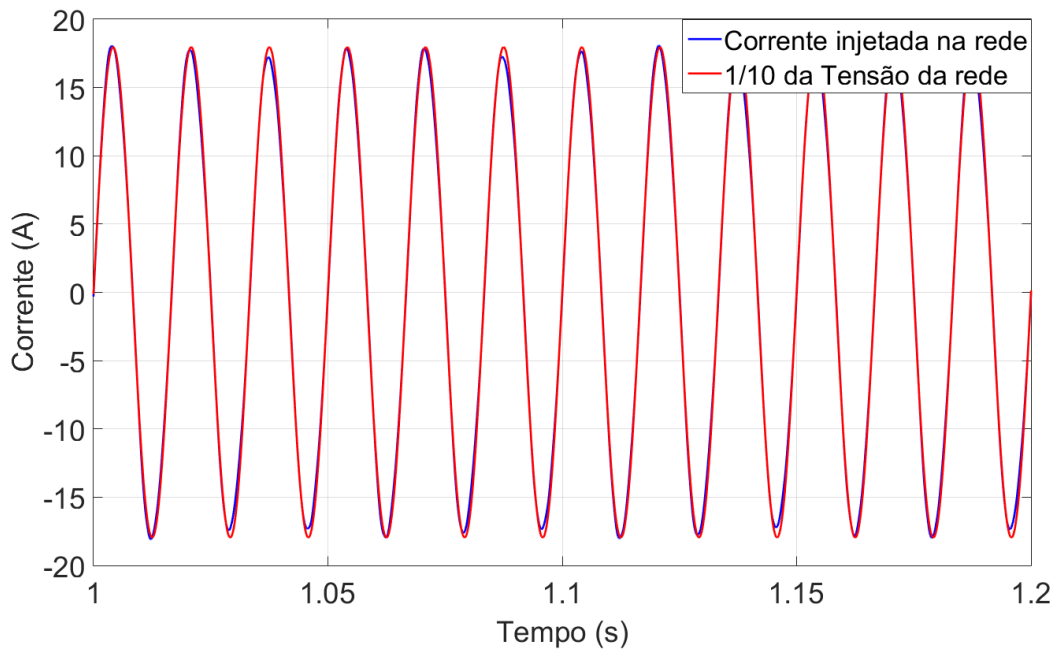
A Figura 34a mostra o desempenho do controlador de corrente através da visualização da forma da onda de corrente. O sistema mantém a fase e a frequência sincronizados, visto na Figura 34b demonstrando que o sistema fornece praticamente potência ativa.

Figura 34 – Gráficos de Corrente $I_g(A) \times$ Tempo (s).

(a) Comparada com a referência.



(b) Comparada com a tensão da rede em escala.



Fonte: Autor.

5.2.2 Resultados em regime permanente.

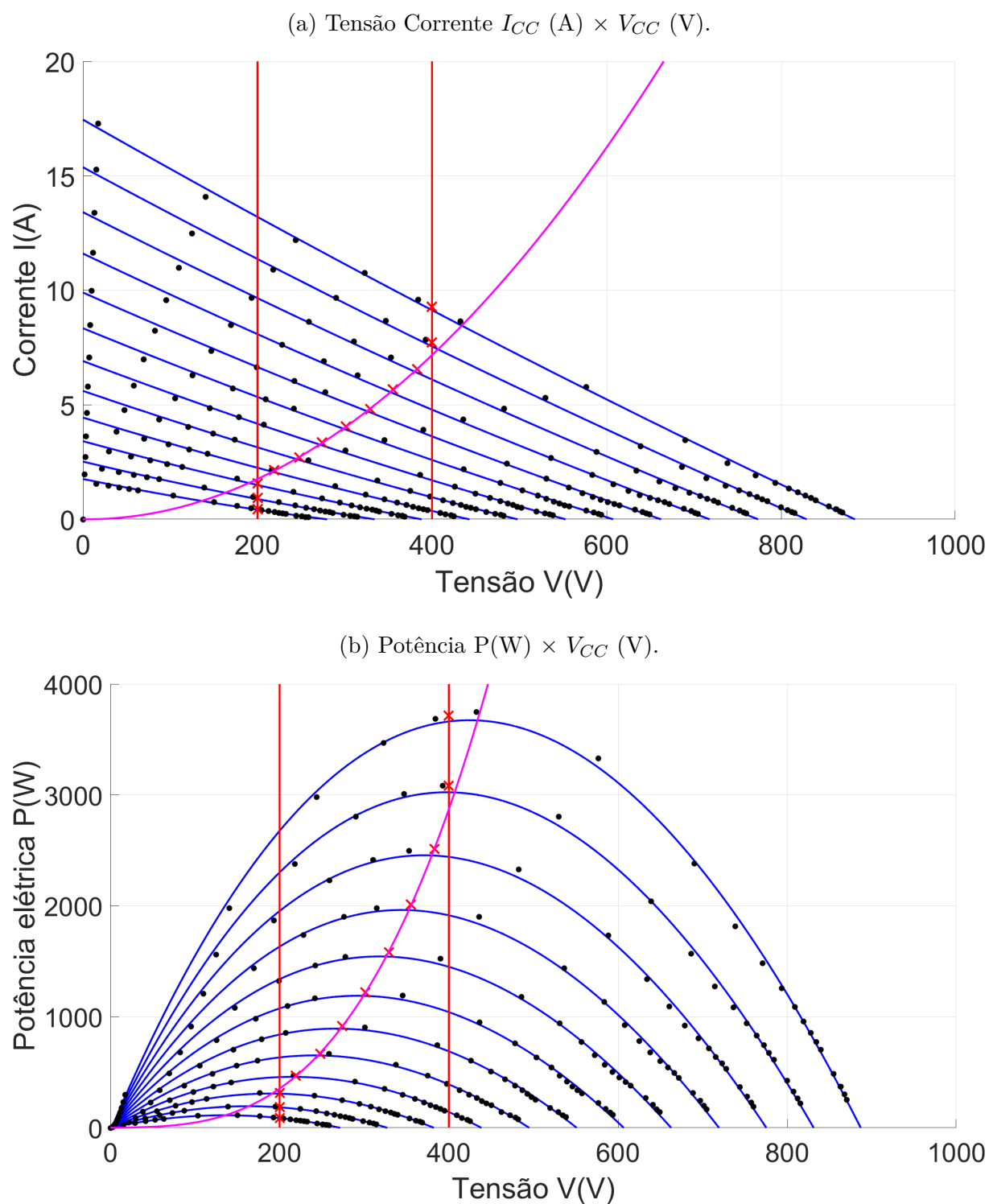
Utilizando o mesmo método anterior, com o modelo isolado da rede elétrica, utilizando apenas a turbina de eixo horizontal, o gerador de ímã permanente e o retificador,

alimentando uma carga R , com filtro LC , para a obtenção das curvas características. Foi simulado o sistema, alterando a entrada de vazão e a resistência da carga, sendo a velocidade do fluido variada de 1 m/s à 3,2 m/s, com passo de 0,1 m/s e resistência variando de 10 Ω à 10 k Ω . Todos os dados foram obtidos em regime permanente.

Na [Figura 35a](#), as barras verticais em vermelho representam o limite controlável do sistema, sendo eles os saturadores superior e inferior do MPPT. Os asteriscos em preto representam cada simulação para cada vazão e resistência diferente. As curvas azuis são a regressão linear para cada entrada de vazão variando apenas a resistência, ou seja, a curva característica para cada degrau de vazão de entrada. Os asteriscos em vermelho são a potência de operação do conversor para cada vazão de entrada, e em magenta, está a curva de máxima potência do sistema.

Na [Figura 35b](#), tem-se a curva de potência em função da tensão no link CC. Nota-se que o sistema não opera no MPP na maior vazão, devido à saturação de tensão máxima pelo MPPT. O mesmo ocorre na condição de tensão mínima, onde o MPP está abaixo da tensão mínima de operação do conversor. Porém, para os dois casos de saturação, o sistema continua injetando potência com menor eficiência, priorizando os limites operacionais do conversor. Os valores de 450-500 V são possíveis de serem observados em inversores, mas foi uma escolha do autor reduzir a tensão máxima para mostrar que mesmo na saturação de tensão, há operação adequada do sistema. Considerando os semicondutores adequados para essa tensão maior.

Figura 35 – Curvas características de operação do sistema com a turbina de eixo horizontal.



Fonte: Autor.

Conclusão

Este trabalho apresentou uma metodologia de modelagem e análise de um sistema de geração hidrocínética conectado a rede elétrica.

Inicialmente, foi desenvolvido um modelo para uma turbina Pelton baseado em dados experimentais em regime permanente de um ensaio de Prony. Os dados foram obtidos para uma turbina específica em diferentes condições de operação, variando a vazão e a carga mecânica no eixo. Pode-se ampliar a escala, sem a necessidade de novas simulações ou experimentos, desde que se mantenham as características geométricas, como, por exemplo, o número de pás, a proporção da turbina e sistema injetor.

Em seguida, foi dimensionado o gerador e o conversor eletrônico de potência com 2 estágios (retificador e inversor) para a conexão com a rede elétrica. Finalmente, o sistema de controle também foi projetado com rastreamento da máxima potência e delimitações da tensão e corrente de operação.

Com o sistema dimensionado e modelado, foram gerados resultados de simulação organizados em duas partes: conectado à rede elétrica, para observar o comportamento transitório; e de forma isolada somente com o primeiro estágio, de modo a explorar as características de operação em regime permanente.

No regime transitório, foi possível validar o funcionamento do sistema, tendo como resultados principais apresentados na [Figura 26](#) e na [Figura 30](#).

O sistema de controle de tensão e corrente, embora simples, apresentou resultados satisfatórios apresentando erros desprezíveis de rastreamento com a corrente controlada em fase com a tensão da rede. Além disto, mesmo que haja erro em regime permanente no rastreamento, as referências são atualizadas pelo MPPT para buscar a máxima transferência de potência pelo sistema. O sistema possui uma região de atuação do MPPT determinada pelas limitações mínima e máxima de tensão no link CC da topologia do conversor. Nas tensões dentro destes limites o sistema opera no ponto de máxima eficiência, mas fora da área controlável do sistema a injeção de potência na rede permanece com menor eficiência para manter as tensões de segurança.

Em regime permanente, observaram-se as curvas apresentadas na [Figura 32](#) que apresentam os pontos de operação do sistema em função da vazão. Esta é uma importante contribuição deste trabalho, pois pode auxiliar na melhor compreensão da operação da turbina hidráulica em conjunto com o gerador de ímã permanente e o retificador e também no dimensionamento do sistema. Com estes resultados, foi possível identificar a tensão e a potência do conjunto disponível para cada valor de vazão de entrada definida a turbina e

as características da aplicação. Também foram destacados os pontos de máxima potência deste sistema em função da vazão e os limites físicos de tensão escolhidos para a operação do inversor a ser conectado à rede elétrica.

O mesmo método pode ser reproduzido com a curva característica de várias turbinas distintas. Neste trabalho foi possível utilizar também a curva de uma turbina de eixo horizontal para confirmar esta possibilidade. Pode-se ainda criar um banco de dados e realizar comparações de forma semelhante às turbinas eólicas.

5.3 Trabalhos Futuros e Considerações

A metodologia apresentada, além de permitir a troca de máquinas primárias, também pode ser utilizada para dimensionar diferentes combinações de geradores elétricos e de topologias de conversores eletrônicos de potência. Diferentes trabalhos futuros também podem ser feitos com o intuito de avaliar e otimizar estas diferentes combinações. Por exemplo, com diferentes turbinas, com um primeiro estágio elevador/abaixador, ou com gerador de indução, ou com conversores utilizando semicondutores que suportem ampla faixa de esforços de tensão e corrente.

Finalmente, são desejáveis trabalhos que construam e implementem estes conversores conectados à rede elétrica, atentando para os impactos positivos e negativos, especialmente no Brasil pelo potencial de recursos hídricos inexplorados.

Diversas questões surgirão relacionadas a implementação prática, como discretização dos controladores, eletrônica embarcada, aspectos construtivos dos componentes ativos e passivos, formas de captação e fixação da turbina com o gerador (submerso ou não) e sistema de frenagem para proteção do sistema em condições de vazão extremas. Portanto, muitos trabalhos são esperados, conforme o aumento de interesse da sociedade nestas aplicações.

Referências

- ABO-KHALIL, A.; Dong-Choon Lee. MPPT Control of Wind Generation Systems Based on Estimated Wind Speed Using SVR. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, v. 55, n. 3, p. 1489–1490, mar. 2008. ISSN 0278-0046. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4390608/>>. 41
- ASIFUL, H.; CHE, H. S. Design and Simulation of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Residential Pico-Hydro Power Generation. In: *2018 International Conference on Intelligent and Advanced System (ICIAS)*. Kuala Lumpur: IEEE, 2018. p. 1–5. ISBN 978-1-5386-7269-3. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8540629/>>. 13, 19
- ASSAD, V. C. D.; BATISTA, O. E. Scenario and perspective of distributed generation in Brazil. In: *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. Niteroi: IEEE, 2018. p. 1–5. ISBN 978-1-5386-3363-2. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8395706/>>. 9
- BELHADJI, L. et al. Adaptive MPPT Applied to Variable-Speed Microhydropower Plant. *IEEE Trans. Energy Convers.*, v. 28, n. 1, p. 34–43, mar. 2013. ISSN 0885-8969, 1558-0059. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6332493/>>. 41
- BOLLIPO, R. B.; MIKKILI, S.; BONTAGORLA, P. K. Hybrid, optimization, intelligent and classical PV MPPT techniques: Review. *CSEE JPES*, 2020. ISSN 20960042, 20960042. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9171659>>. 41
- BRANDÃO, D. I.; MARAFÃO, F. P. DIGITAL PROCESSING TECHNIQUES APPLIED TO POWER ELECTRONICS. In: *Modeling Power Electronics and Interfacing Energy Conversion Systems*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2016. p. 279–320. ISBN 978-1-119-05845-8 978-1-119-05826-7. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119058458.ch12>>. 29, 41
- BRITO, M. A. G. de et al. Evaluation of MPPT techniques for photovoltaic applications. In: *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Gdansk, Poland: IEEE, 2011. p. 1039–1044. ISBN 978-1-4244-9310-4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5984303/>>. 29, 41
- EPE, E. D. P. E. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*. 2021. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/Caderno%20de%20Economia%20PDE%202031_vf.pdf. Acessado: 20-05-2021. 9
- FITZGERALD; KINGSLEY. *Máquinas Elétricas*. [S.l.]: AMGH Editora Ltda, 2014. (7). 26
- FURLAN, R. *Eletrônica Experimental - Retificadores*. [S.l.: s.n.], 2004. 26
- GALOTTO, L. *Inversores integrados monofásicos aplicados em sistemas fotovoltaicos com conexão à rede de distribuição de energia elétrica*. Tese (Tese de Doutorado) —

- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira - SP, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/100317>>. 43
- GUERRA, J. B. S. O. d. A.; YOUSSEF, Y. A. *Energias Renováveis Energia Hídrica*. [S.l.]: Edição – Livro Digital, 2011. unico. 22
- KERDTUAD, P. et al. Establishment of a Pico Hydro Power Plant Using Permanent Magnet Synchronous Generator Supplied for AC Microgrid. In: *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. Krabi, Thailand: IEEE, 2018. p. 1–4. ISBN 978-1-5386-2317-6. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8712214/>>. 5, 13, 14, 19
- LESCANO, J. C. O. d. S. et al. COBEM-2017-1323, *MODELLING, CONTROL AND MEASUREMENT OF PELTON HYDRAULIC TURBINE: A LABORATORY CASE OF STUDY*. Curitiba, PR, Brazil: [s.n.], 2017. Disponível em: <<http://www.sistema-abcm.org.br/articleFiles/download/11542>>. 31
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. p. 705, 2009. ISSN 2009033881. 20, 21
- MOLINA, M. G.; PACAS, M. Improved power conditioning system of micro-hydro power plant for distributed generation applications. In: *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*. Vi a del Mar , Chile: IEEE, 2010. p. 1733–1738. ISBN 978-1-4244-5695-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5472461/>>. 41
- MURDOCH, S.; REYNOSO, S. Design and Implementation of a MPPT circuit for a Solar UAV. *IEEE Latin Am. Trans.*, v. 11, n. 1, p. 108–111, fev. 2013. ISSN 1548-0992. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6502787/>>. 29
- PETERNELLI, L. A. Estatística - CAPÍTULO 9 - Regressão linear e correlação. p. 11, 2001. 24
- POMILIO, J. A. *Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica*. p. 20, 2021. 27, 28
- RAJAGOPAL, V.; SINGH, B. Improved electronic load controller for offgrid induction generator in small hydro power generation. In: *India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010)*. New Delhi, India: IEEE, 2011. p. 1–7. ISBN 978-1-4244-7883-5. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5728118/>>. 5, 9, 14, 15, 19
- RANA, K.; MEENA, D. C. Self Excited Induction Generator for Isolated Pico Hydro Station in Remote Areas. In: *2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. Delhi, India: IEEE, 2018. p. 821–826. ISBN 978-1-5386-6625-8. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8897329/>>. 9, 17, 19
- RATHORE, U. C.; SINGH, S. Power quality control of SEIG based isolated pico hydro power plant feeding non-linear load. In: *2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*. Kurukshetra, India: IEEE, 2014. p. 1–5. ISBN 978-1-4799-6045-3 978-1-4799-6046-0. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7115777/>>. 5, 9, 15, 16, 19

- RAWLINGS, J. O.; PANTULA, S. G.; DICKEY, D. A. *Applied regression analysis: a research tool*. 2nd ed. ed. New York: Springer, 1998. (Springer texts in statistics). ISBN 978-0-387-98454-4. 25
- ROY, S. Optimal Planning of Generating Units Over Micro-Hydro Resources Within a Catchment Area. *IEEE Trans. On Energy Conversion*, v. 20, n. 1, p. 231–236, mar. 2005. ISSN 0885-8969. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1396105/>>. 9
- SILVA, A. P. d. S.; FLORENCIO, J. A. Construção de uma bancada didática com turbina pelton. *Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Exatas e da Terra Engenharias Mecânica, Controle, Automação e Elétrica, Universidade Católica Dom Bosco*, v. 2013, n. 10, p. 1857–1869, 2014. 31
- TALBOT, D. B. A Review of PLL Fundamentals. In: *Frequency Acquisition Techniques for Phase Locked Loops*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. p. 3–15. ISBN 978-1-118-38328-5 978-1-118-16810-3. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118383285.ch2>>. 29
- TIAN, W. et al. Numerical simulations of a horizontal axis water turbine designed for underwater mooring platforms. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, v. 8, n. 1, p. 73–82, jan. 2016. ISSN 20926782. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2092678216000108>>. 5, 17, 19, 35
- TROULLAKI, A. et al. Life Cycle Assessment of Locally Manufactured Small Wind Turbines and Pico-Hydro Plants. In: *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. Porto, Portugal: IEEE, 2019. p. 1–6. ISBN 978-1-72811-156-8. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8849074/>>. 9, 16, 17, 19
- VILANOVA, L. C. *Mecânica dos Fluidos*. n. 3, p. 82, 2011. 22
- WANG, L. *PID Control System Design and Automatic Tuning using MATLAB/Simulink*. 1. ed. Wiley, 2020. ISBN 978-1-119-46934-6 978-1-119-46941-4. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119469414>>. 29
- YUEN, K.; APELFROJD, S.; LEIJON, M. Implementation of Control System for Hydrokinetic Energy Converter. *Journal of Control Science and Engineering*, v. 2013, p. 1–10, 2013. ISSN 1687-5249, 1687-5257. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/jcse/2013/342949/>>. 12, 13, 19