



**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM TURBINAS  
HIDROCINÉTICAS**

**CLEBER BARBOSA ALBUQUERQUE**

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

Modelagem e Simulação de um Sistema de Geração Elétrica  
com Turbinas Hidrocinéticas

Cleber Barbosa Albuquerque

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA .

APROVADO POR:

---

Prof. Francis Arody Moreno Vásquez, Doutor. (ENE-UnB)  
(Orientador)

---

Rafael Castilho Faria Mendes, Doutor. (ENM-UnB)  
(Examinador Externo)

---

Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho, Doutor. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

Brasília/DF, 29 de outubro de 2021.

## FICHA CATALOGRÁFICA

ALBUQUERQUE, CLEBER BARBOSA

Modelagem e Simulação de um Sistema de Geração Elétrica com Turbinas Hidrocinéticas. [Distrito Federal] 2021.

xiii, XXp., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Elétrica, 2016).

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Turbinas hidrocinéticas

2. Conversores de potência

3. Geradores de ímãs permanentes

4. MPPT

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALBUQUERQUE, C. B. (2021). Modelagem e Simulação de um Sistema de Geração Elétrica com Turbinas Hidrocinéticas, Publicação 2021, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, XX p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Cleber Barbosa Albuquerque

TÍTULO: Modelagem e Simulação de um Sistema de Geração Elétrica com Turbinas Hidrocinéticas.

GRAU: Bacharel

ANO: 2021

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

---

Cleber Barbosa Albuquerque

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

# DEDICATÓRIA

À minha linda esposa Daniele

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que esteve comigo a cada instante me dando paz, saúde, inteligência e principalmente força pra vencer todos os obstáculos que se levantaram.

Agradeço a minha esposa, que esteve o tempo todo ao meu lado, que me apoiou e me incentivou. E compreendeu os finais de semana e as madrugadas de estudo.

Agradeço aos meus pais José Maria e Claudeci, que sempre sonharam junto comigo e me ensinaram a viver meus sonhos.

Agradeço ao meu orientador, professor Francis, que me ajudou muito em toda trajetória desse trabalho.

## RESUMO

Neste trabalho, avalia-se o desempenho de um sistema de geração elétrica constituída de unidades hidrocínéticas operando em paralelo, instaladas em rios. Para isso, cada unidade geradora é constituída de uma turbina acoplada a um gerador de ímãs permanentes. A contribuição individual de potência elétrica para uma carga comum em corrente contínua (CC) é então feita por meio de um conversor *boost* e um conversor *buck*, que são utilizados para implementar os algoritmos de maximização de potência extraída (MPPT) e de estabilização da tensão na carga em um valor constante, respectivamente. Os resultados servem para validar estes esquemas de controle, e permitem verificar o desempenho do sistema modular hidrocínético diante das variações da velocidade do rio e da carga elétrica. Adicionalmente, é possível identificar que a operação do conjunto de unidades hidrocínéticas, quando uma delas funciona sem o MPPT, pode ser mantida sem recair necessariamente em um problema de instabilidade. Também, constata-se a importância do controle dos conversores de potência quando as turbinas são submetidas a diferentes velocidades da água, assim como a relevância dos elementos de armazenamento de energia elétrica dentro da estrutura da interface eletrônica.

**Palavras-chave:** Turbinas hidrocínéticas, geradores de ímãs permanentes, conversores de potência, MPPT.

## ABSTRACT

In this work, the performance of an electrical generation system consisting of hydrokinetic units operating in parallel, installed in rivers, is evaluated. For this, each generating unit includes a turbine coupled to a permanent magnet generator. The individual contribution of electrical power to a common load in direct current (DC) is then made through a boost converter and a buck converter, which are used to implement the maximizing algorithms extracted power (MPPT) and load voltage stabilization at a constant value, respectively. The results serve to validate these control schemes, and allow verifying the performance of the modular hydrokinetic system in face of variations in river speed and electrical charge. Furthermore, it is possible to identify that the operation of the set of hydrokinetic units, when one of them works without the MPPT, can be maintained without necessarily falling into an instability problem. Also, the importance of controlling power converters when the turbines are subjected to different speeds of water, as well as the relevance of the electrical energy storage elements within the interface structure electronics.

**Keywords:** Hydrokinetic turbines, permanent magnet generator, power converters, MPPT.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iii
<b>Lista de Tabelas</b>	vi
<b>Lista de Símbolos</b>	vii
<b>Glossário</b>	x
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	7
1.3 Organização do texto . . . . .	8
<b>Capítulo 2 – Modelagem Matemática</b>	9
2.1 Turbina Hidrocinética . . . . .	9
2.2 Caixa de Transmissão . . . . .	12
2.3 Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes . . . . .	13
2.4 Retificador . . . . .	15
2.5 Conversor <i>Boost</i> . . . . .	17
2.6 Conversor <i>Buck</i> . . . . .	19
2.7 Implementação do Modelo no Simulink/Matlab . . . . .	22
2.8 Síntese do Capítulo . . . . .	24
<b>Capítulo 3 – Controle</b>	26
3.1 Controle: Conceitos Básicos . . . . .	26
3.1.1 Sistema de Controle Malha Aberta e Malha Fechada . . . . .	27
3.1.2 Controladores PID . . . . .	27
3.2 MPPT . . . . .	30

---

3.3	Controle de Barramento . . . . .	32
3.3.1	Síntese do Capítulo . . . . .	34
<b>Capítulo 4 – Análise dos Resultados</b>		<b>35</b>
4.1	Avaliação Inicial do Algoritmo de MPPT . . . . .	35
4.2	Avaliação do Regulador de Tensão CC . . . . .	39
4.3	Sistema Hidrocinético Modular com Três Unidades . . . . .	42
4.3.1	Velocidade de Rio Variável e Comum com Carga Constante . . . . .	42
4.3.2	Velocidade de Rio Fixa e Comum com Carga Variável . . . . .	45
4.3.3	Velocidade de Rio Variável e Diferente com Carga Constante . . . . .	46
4.3.4	Desabilitação do MPPT em uma das Unidades Geradoras . . . . .	48
4.3.5	Operação Durante Excesso de Carga Elétrica . . . . .	49
4.3.6	Síntese do Capítulo . . . . .	51
<b>Capítulo 5 – Conclusões</b>		<b>52</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>54</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Matriz de Geração Elétrica Mundial - 2019 fonte (IEA, 2021) . . . . .	1
1.2	Matriz de Geração Elétrica Brasileira por Fonte (EPE, 2021) (com adaptações) . . . . .	3
1.3	Turbina de Eixo Horizontal (KHAN <i>et al.</i> , 2009) (com adaptações) . . . . .	4
1.4	Turbina de Eixo Vertical (KHAN <i>et al.</i> , 2009) (com adaptações) . . . . .	5
1.5	Turbina de Fluxo Cruzado . . . . .	5
2.1	Sistema de Geração Hidrocinética . . . . .	9
2.2	Curva $\lambda$ vs $C_p$ da Turbina Hidrocinética Modelada . . . . .	11
2.3	Curva Rotação $\omega$ vs $C_p$ . . . . .	11
2.4	Modelo Eixos-dq do Gerador Trifásico de Ímãs Permanentes . . . . .	13
2.5	Modelo Simplificado de Gerador Síncrono . . . . .	14
2.6	Circuito Retificador . . . . .	15
2.7	Tensões de Linha e Saída do Retificador . . . . .	16
2.8	Retificador com Filtro Capacitivo . . . . .	16
2.9	Forma de Onda Após Filtro Capacitivo . . . . .	17
2.10	Conversor <i>Boost</i> . . . . .	17
2.11	Modos Conversor <i>Boost</i> . . . . .	18
2.12	Circuito <i>Buck</i> . . . . .	20
2.13	Modos Circuito <i>Buck</i> . . . . .	20
2.14	Modelagem da Turbina, Caixa de Transmissão e Gerador . . . . .	23

---

2.15	Modelo Simulink Retificador, Conversores CC e Controle . . . . .	24
3.1	Diagrama de Blocos - PID . . . . .	28
3.2	Curva de Potência(P) x Velocidade Angular( $\omega$ ) . . . . .	30
3.3	Algoritmo Perturba e Observa (COELHO, 2008)(com adaptações) . . . . .	31
3.4	Diagrama de Blocos - MPPT . . . . .	32
3.5	Diagrama de Blocos - Controle de Barramento CC . . . . .	33
3.6	Diagrama de Blocos - Gerador de PWM . . . . .	33
3.7	Onda Dente de Serra, Duty Cycle e PWM . . . . .	34
4.1	Sistema de Geração para Verificação do MPPT . . . . .	35
4.2	Simulação <i>Boost</i> - Velocidade Variável . . . . .	36
4.3	Simulação <i>Boost</i> - $C_p$ e Duty Cycle . . . . .	37
4.4	Simulação <i>Boost</i> - Carga Variável . . . . .	38
4.5	Simulação <i>Boost</i> - Carga Variável - $C_p$ e Duty Cycle . . . . .	38
4.6	Sistema com Controle de Barramento . . . . .	39
4.7	Sistema com um Gerador - Velocidade Rio Variável . . . . .	40
4.8	Sistema com um Gerador - Velocidade do Rio Variável - $C_p$ e Lambda . . . . .	40
4.9	Sistema com um Gerador - Carga Variável . . . . .	41
4.10	Sistema com um Gerador - Carga Variável - $C_p$ e Lambda . . . . .	42
4.11	Sistema com 3 Geradores Conectados ao Barramento CC . . . . .	43
4.12	Simulação 3 Geradores - Velocidade do Rio Variável . . . . .	44
4.13	Simulação 3 Geradores - Velocidade do Rio Variável- $C_p$ e Lambda . . . . .	44
4.14	Simulação 3 Geradores - Carga Variável . . . . .	45
4.15	Simulação 3 Geradores - Carga Variável - $C_p$ e <i>Duty Cycle</i> . . . . .	46
4.16	Simulação 3 Geradores - Velocidades do Rio Independentes . . . . .	47

---

4.17	Simulação 3 Geradores - Velocidade Rio Independentes - $C_p$ e Duty Cycle	47
4.18	Simulação 3 Geradores - Carga Variável - Gerador 3 Sem o Boost e MPPT	48
4.19	Simulação 3 Geradores - Carga Variável - Gerador 3 Sem o Boost e MPPT - $C_p$ e $\lambda$ . . . . .	49
4.20	Simulação 3 Geradores - Velocidade Variável - Queda Potência Mecânica	50
4.21	Simulação 3 Geradores - Carga Variável - Gerador 3 Queda na Potência Mecânica - $C_p$ e $\lambda$ . . . . .	51

## LISTA DE TABELAS

2.1	Parâmetros do Gerador . . . . .	24
-----	---------------------------------	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_a$	Potência da secção transversal da água.
$\rho$	Densidade da água.
$A$	Área da Secção transversal.
$v_a$	Velocidade da água.
$P_M$	Potência Mecânica.
$C_p$	Coefficiente de potência.
$\lambda$	Relação de ponta de pá.
$\omega_m$	Rotação do eixo.
$T_{mec}$	Torque mecânico.
$r_t$	Raio da turbina.
$N_{ct}$	Relação de caixa de transmissão.
$n_m$	Velocidade angular do gerador.
$n_{mM}$	Velocidade angular da turbina.
$T_{mec-e}$	Torque mecânico na entrada da caixa de transmissão.
$T_{mec-s}$	Torque mecânico na saída da caixa de transmissão.
$v_{ds}$	Tensão de eixo direito.
$v_{qs}$	Tensão de quadratura.
$\lambda_{ds}$	Fluxo de eixo direito.
$\lambda_{qs}$	Fluxo de quadratura.

---

$L_d$	Auto indutâncias direita.
$L_d$	Auto indutâncias quadratura.
$R_s$	Resistência de armadura.
p	Número de polos.
$T_e$	Torque eletromagnético.
$i_{ds}$	corrente de eixo direito.
$i_{ds}$	corrente de quadratura.
P	Potência ativa.
Q	Potência Reativa.
R	Resistência.
C	Capacitância.
f	Frequência.
L	Indutância.
$V_e$	Tensão de Entrada.
$V_s$	Tensão de saída.
$\Delta I$	Variação da corrente.
k	Largura de pulso.
$\Delta I$	Variação da tensão.
T	Período.
R	Resistência.
$I_e$	Corrente de Entrada.
$I_s$	Corrente de saída.
$K_p$	Ganho proporcional.
$K_i$	Ganho integral.

$K_d$  Ganho derivativo.

$e(t)$  Erro.

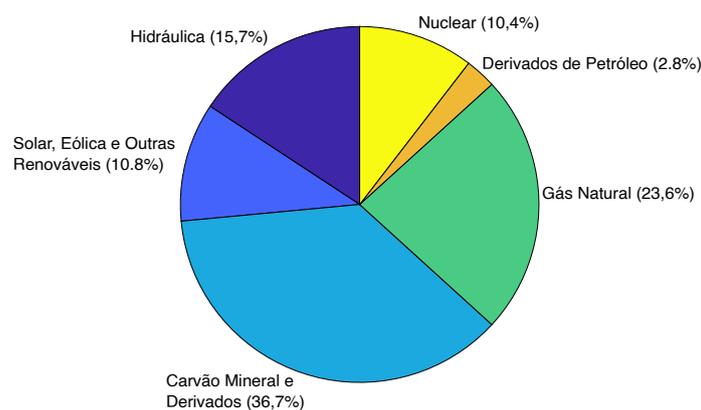
## GLOSSÁRIO

BP	<i>British Petroleum</i>
CC	Corrente Contínua
DC	<i>Direct Current</i>
DFIG	<i>Doubly Fed Induction Generator</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GSIP	Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
INPA	Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
ONU	Nações Unidas
P	Proporcional
P&O	Perturba e Observa
PD	Proporcional e Derivativo
PI	Proporcional e Integral
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
TRIAC	Triodo para Corrente Alternada

UHE Usina Hidroelétrica

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Estima-se que o crescimento da demanda mundial por energia elétrica no período de 2018-2050, será da ordem de 80%, representando um aumento no consumo de cerca de 2% ao ano (BP, 2020), o que obriga a ampliação da infraestrutura de geração. Nota-se que atualmente as principais fontes mundiais ainda são baseadas em petróleo, carvão mineral, gás natural e nuclear, ou seja, fontes não-renováveis e poluentes que contribuem com o efeito estufa. Na Figura 1.1 é possível observar que, em 2019, essas fontes representavam 73,5% do total geração (IEA, 2021), e as usinas nucleares ocupavam 10,4% da geração, o que implica em um problema de segurança, tendo em vista que os resíduos são extremamente perigosos e precisam ser armazenados por muito tempo.



**Figura 1.1.** Matriz de Geração Elétrica Mundial - 2019 fonte (IEA, 2021)

Com isso há uma tendência mundial na busca de fontes alternativas, que tenham um impacto menor sobre o meio ambiente. Nesse contexto, em setembro de 2015, os chefes de Estado e Governos e altos representantes se reuniram na sede das Nações

Unidas - ONU, decidiram sobre os novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis globais e se comprometeram pela implementação da Agenda 2030, que é composta por 17 Objetivos e 169 metas associadas, visando o crescimento econômico e social com responsabilidade com o meio ambiente e os povos, para os próximos 15 anos. A seguir, transcreve-se o Objetivo 7 - Energia Limpa e Acessível, que tem relação com o tema desse trabalho.

Objetivo 7. Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos.

7.1 Até 2030, assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia;

7.2 Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global;

7.3 Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética;

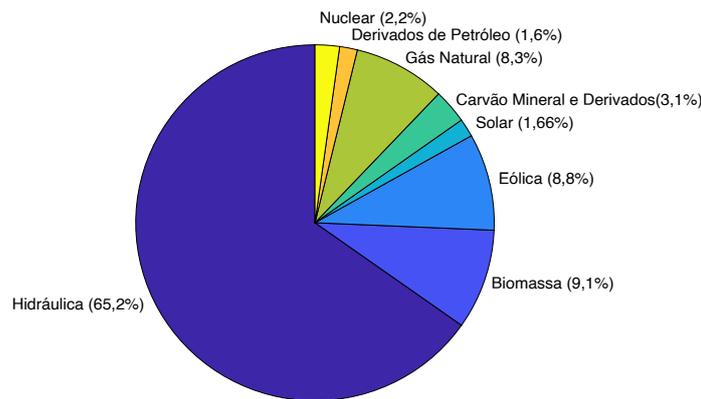
7.a Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa;

7.b Até 2030, expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento, particularmente nos países menos desenvolvidos, nos pequenos Estados insulares em desenvolvimento e nos países em desenvolvimento sem litoral, de acordo com seus respectivos programas de apoio;(ONU, 2015)

Ressalta-se que as metas relacionadas ao Objetivo 7, trazem compromissos que poderão impulsionar a ampliação das fontes renováveis na matriz global, viabilizando a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologia para obtenção de energia limpa e melhoria da eficiência das fontes já utilizadas.

Os dados tem demonstrado o crescimento da participação das energias renováveis, no âmbito mundial, tais como eólica, hidroelétrica, solar e biomassa. Essas fontes, em 2010, representavam apenas 20,3% da matriz de geração (EPE, 2020). Já em 2019, esse panorama apresenta uma mudança ainda tímida, onde a participação das energias renováveis subiu para 26,5% (IEA, 2021).

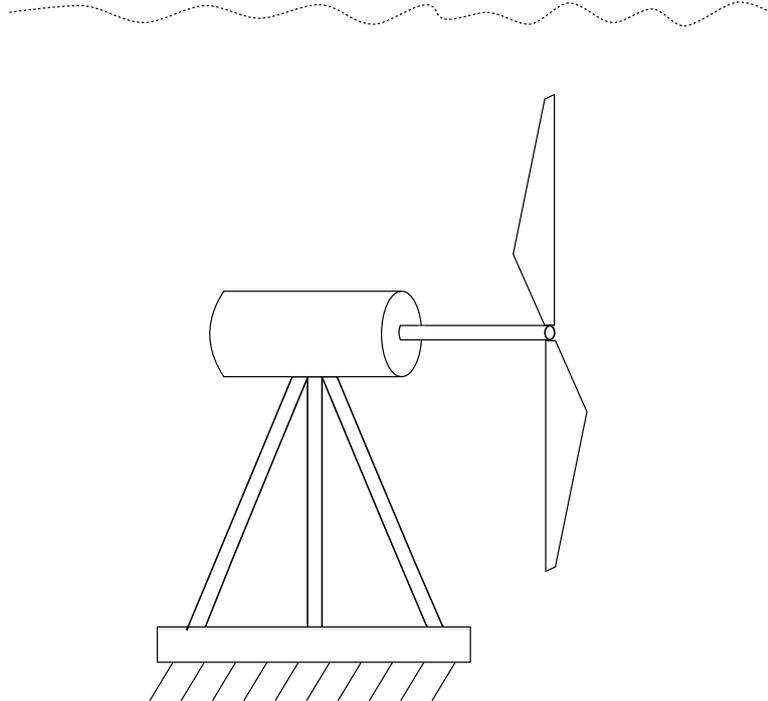
Por outro lado a matriz brasileira de geração de energia é bastante diferente do contexto mundial, um vez que 84,7% do total de energia elétrica produzida em 2020 foi advinda de fontes renováveis, conforme Figura 1.2. As principais fontes foram a energia hidráulica 65,2% e a eólica 8,8%, enquanto as fontes não renováveis registraram um percentual de 15,3%, onde derivados de petróleo e carvão representaram cerca de 4,7% e o gás natural 8,3% da geração (EPE, 2021).



**Figura 1.2.** Matriz de Geração Elétrica Brasileira por Fonte (EPE, 2021) (com adaptações)

Alinhada com essa necessidade de geração de energia via fontes renováveis no mundo, existem diversos estudos sobre a energia hidrocínética que pode ser extraída do fluxo da água nos rios e mares. Conforme (CANMETENERGY, 2010) esse tipo de geração tem vantagens sobre a geração hidroelétrica, tais como, menor custo de implantação, baixo impacto ambiental, menor ruído e a possibilidade do uso de turbina individualmente ou de uma rede de turbinas, mas com capacidade de produção mais baixa. Ainda considerando grande intermitência das fontes solar e eólica, a energia hidrocínética tem a vantagem de ser mais perene.

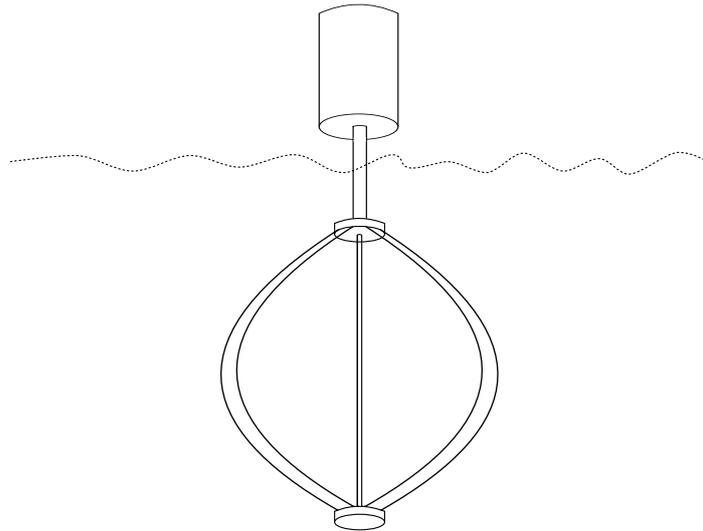
As pesquisas sobre a geração hidrocínética têm sido direcionadas para o projeto hidrodinâmico das turbinas, buscando a ampliação da eficiência e adaptação as velocidades baixas a que esses geradores são submetidos. Os tipos mais comuns são turbinas de eixo horizontal (Figura 1.3), onde o eixo de rotação é paralela ou inclinada ao fluxo da água, que apresenta a vantagem de capacidade de partida automática em caso de correnteza de baixa velocidade, mas geralmente o custo é superior as turbinas de eixo vertical (IBRAHIM *et al.*, 2021).



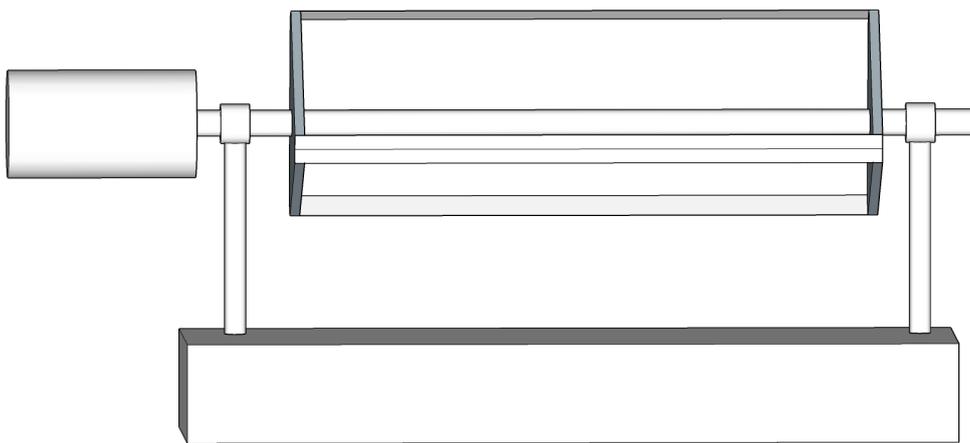
**Figura 1.3.** Turbina de Eixo Horizontal (KHAN *et al.*, 2009) (com adaptações)

Já nas turbinas de eixo vertical (Figura 1.4), o eixo de rotação está perpendicular a superfície da água. Elas são geralmente utilizadas em rios, podem receber fluxos de entrada em qualquer direção, dispensa o uso de engrenagens, e os custos podem ser reduzidos pois o gerador pode ficar acima do nível da água. Por último, as turbinas de fluxo cruzado (Figura 1.5), onde o eixo de rotação fica perpendicular ao fluxo e paralelo à superfície da água, são preferíveis para o uso em fazendas hidrocínéticas ou matrizes e elas podem operar a velocidades mais baixas, e possuem um volume menor.

Além dos estudos quanto ao formato da turbina, outro desafio é a forma de posicioná-las no rio ou mar, levando em consideração que o local estará submetido a ação do movimento da água, e algumas vezes em locais de difícil acesso. As pesquisas são direcionadas para o desenvolvimento da resistência estrutural, das estruturas de ancoramento e dos flutuantes. Geralmente turbinas de eixo vertical tem sido colocadas em flutuantes ou próximos a superfície. Já as de eixo horizontal e de fluxo cruzado são consideradas para instalação fixas no leito do rio ou mar (KHAN *et al.*, 2009).



**Figura 1.4.** Turbina de Eixo Vertical (KHAN *et al.*, 2009) (com adaptações)



**Figura 1.5.** Turbina de Fluxo Cruzado

No contexto brasileiro, as pesquisas tem sido focadas em sistemas hidrocínéticos instalados em rios para atendimento de pequenas comunidades ribeirinhas, que estão situadas longe dos grandes centros e que não estão interligadas aos grandes sistemas de geração. Os estudos começaram na década de 80, com o Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA), que construiu um protótipo hidrocínético de eixo horizontal, e a partir da década de 90, a Universidade de Brasília liderou as pesquisas em hidrocínética (MIRANDA, 2018).

Com isso, em 1995 um grupo de pesquisadores instalou o primeiro protótipo de turbina hidrocínética no Município de Correntina/BA, com capacidade de 1 kW, que

funcionou por mais de uma década atendendo um posto médico da região (ELS *et al.*, 2003). Outro protótipo foi instalado em 2006 no Assentamento Acroextrativista do Maracá no município de Mazagão/AP, cuja a produção é suficiente para atender a infraestrutura local do entreposto (iluminação, secador multiúso e eletrodomésticos), para essa comunidade que trabalha principalmente com o extrativismo de castanha (JUNIOR *et al.*, 2008).

Considerando a grande participação da energia hidroelétrica na matriz energética do Brasil, foram realizadas pesquisas sobre o aproveitamento do potencial remanescente de usinas hidroelétricas. Destaca-se o trabalho de (HOLANDA, 2017), que realizou um estudo sobre o aproveitamento na UHE de Tucuruí, concluindo que a instalação de 10 turbinas hidrocínéticas a jusante dessa hidroelétrica, possibilitará gerar 2,04GWh/ano. Semelhantes a esse, foram realizados estudos na UHE de Bariri e Ibitinga, instaladas na bacia hidroviária do rio Tietê, no estado de São Paulo, onde foram verificadas as velocidades e os melhores lugares para instalação das turbinas (BITTENCOURT *et al.*, 2016).

Por outro lado, em relação aos geradores para uso em usinas hidrocínéticas os estudos apontam para dois tipos. O primeiro é o Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG), cujo estator é diretamente conectado a rede e o circuito de rotor também é conectado na rede via anéis coletores por meio de um conversor *back-to-back*. Além disso, em virtude do número reduzido de polos, é necessário o uso de caixa de transmissão que aumenta o custo de manutenção e as perdas mecânicas.

Já o segundo é o Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes (GSIP), onde o campo no rotor é gerado por ímãs permanentes, o que lhe dá vantagens, tais como, menor custo de manutenção, tendo em vista que não tem escovas, assim como um volume menor em relação aos outros geradores, o que lhe confere uma alta densidade de potência. Adicionalmente não tem perdas por efeito joule no rotor (não há circulação de correntes neste componente) e ainda pode ser construído com muitos polos, o que possibilita uma

operação com velocidade mais baixas e dispensar caixas de transmissão, mas apresenta a desvantagem de sofrer risco de desmagnetização (WU *et al.*, 2011). Entretanto, sua independência de conexão com a rede possibilita a implantação de sistemas de geração de energia elétrica em localidades afastadas da rede distribuição convencional.

Outra tecnologia tem permitido o uso desse tipo de geração é a eletrônica de potência, que viabiliza a implementação de conversores e controladores para maximização da transferência de potência, e para controle e para compatibilização da conexão da saída dos sistemas com as cargas ou redes. Neste trabalho serão utilizados circuitos de eletrônica de potência, tais como, retificadores e conversores elevadores (*Boost*) e abaixadores (*Buck*) de tensão e o controle será feito via *software*, embarcados em um microcontrolador ou computador. Especificamente, equipamentos de retificação e regulação de tensão são controlados de acordo com um valor de referência vindo dos algoritmos de MPPT ou de estabilização de tensão, viabilizando o condicionamento e compatibilidade da energia elétrica gerada e a carga elétrica.

Diante do exposto, identifica-se uma oportunidade para o desenvolvimento de estudos voltados para o aproveitamento do potencial hidrocínético e da sua transformação em energia elétrica para o abastecimento energético de comunidades isoladas, sem acesso à geração convencional. Ao mesmo tempo, verifica-se na revisão da literatura que não existe um estudo detalhado da operação de sistemas de geração elétrica com várias unidades hidrocínéticas trabalhando em paralelo, o que pode ser estendido à formação de parques hidrocínéticos em locais potencialmente produtivos.

## 1.2 OBJETIVOS

A proposta deste estudo é avaliar o desempenho de um sistema de geração de energia elétrica com turbinas hidrocínéticas associadas modularmente, juntamente com a implementação de lógica de maximização de potência extraída pela turbina, e verifi-

cação do desempenho dinâmico dos conjuntos eletromecânicos diante das variações de velocidade da água e das alterações na carga elétrica, entregando ao barramento CC uma tensão constante. Para esse fim, são decididos como objetivos específicos:

- Apresentar a modelagem matemática de cada componente do módulo de geração;
- Propor e simular estratégias de controle viabilizando a máxima transferência de potência extraída e a regulação da tensão de saída dos módulos de geração;
- Avaliar o desempenho das turbinas hidrocínéticas associadas modelarmente frente as alterações de carga e velocidade da água;
- Verificar o comportamento dos módulos em situações onde a potência solicitada pelo barramento CC superar a potência extraída nas pás das turbinas;
- Comparar o desempenho de um módulo sem o controle MPPT com módulos que possuem esse recurso;

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado com a seguinte estrutura de capítulos:

- No Capítulo 2, Fundamentação Teórica, será apresentada a modelagem matemática de cada componente do sistema proposto.
- No Capítulo 3, Controle, serão abordadas as estratégias de maximização de transferência de potência e de estabilização da tensão de barramento CC.
- No Capítulo 4, é apresentada Análise dos Resultados obtidos nas simulações computacionais.
- No Capítulo 5, são mencionadas as conclusões do trabalho.

## MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo apresenta-se a estrutura de cada unidade hidrocinética, ilustrada na Figura 2.1, que compõe o sistema de geração de energia elétrica. Ela consiste em uma turbina hidrocinética acoplada ao eixo de um gerador síncrono trifásico de ímãs permanentes, cuja tensão alternada de saída passa por um retificador não controlado. A tensão contínua obtida dele é a entrada nos terminais de um conversor *boost*, o qual é utilizado para a implementação do algoritmo de MPPT. Em seguida, a tensão contínua e variável de saída do *boost* passa por um conversor *buck*, que é encarregado de regular essa tensão compatibilizando com uma carga terminal em baixa tensão.

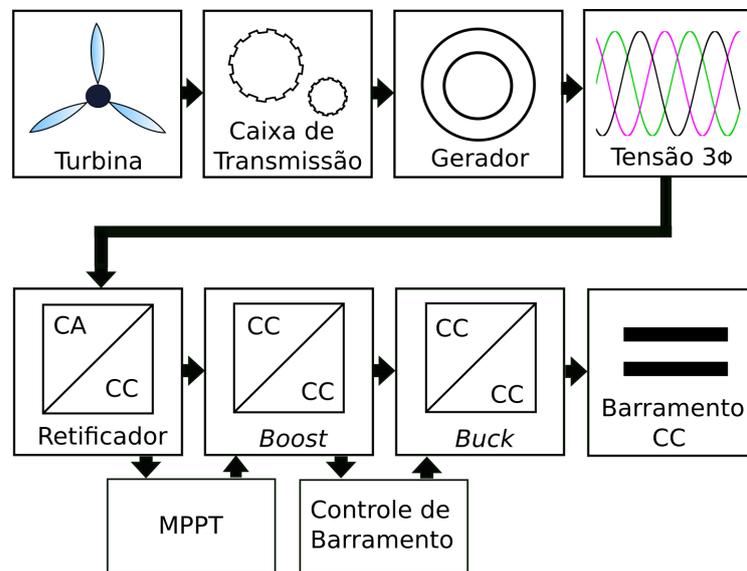


Figura 2.1. Sistema de Geração Hidrocinética

### 2.1 TURBINA HIDROCINÉTICA

A primeira parte do sistema é a turbina, que é responsável por transformar a velocidade do rio em rotação do eixo. Neste trabalho, assume-se que a turbina será composta

por três pás. Assim, a potência mecânica disponível na entrada da turbina pode ser calculada, conforme a equação abaixo:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A v_a^3 \quad (2.1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade da água em  $Kg/m^3$ ,  $A$  é a área em  $m^2$  e  $v_a$  é a velocidade da água em  $m/s$ . Todavia, a potência capturada pelas pás da turbina tem uma eficiência limitada pelo ângulo das pás  $\beta$ , assim como pela relação de ponta de pá  $\lambda$ , de acordo com a equação 2.2:

$$P_M = \frac{1}{2} \rho A v_a^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (2.2)$$

Onde  $C_p$  é o coeficiente de potência da pá que tem um valor máximo de 0,59, conforme o Limite de Betz, e indica o quanto de potência da água é transformada em movimento das pás. A relação da velocidade de ponta da turbina  $\lambda$  expressa a relação entre as velocidades da pá e a velocidade da água, e pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\lambda = \frac{\omega_m r_T}{v_a} \quad (2.3)$$

Onde  $\omega_m$  é a rotação do eixo de uma turbina de raio  $r_T$  submetido a uma velocidade  $V_a$ . Considerando um modelo matemático, para cálculo de  $C_p(\lambda, \beta)$  e ainda considerando uma forte dependência de  $\lambda$  é possível utilizar a equação 2.4 retirada de (VÁSQUEZ *et al.*, 2016):

$$C_p(\lambda) = \sum_{k=0}^4 C_k \lambda^k \quad (2.4)$$

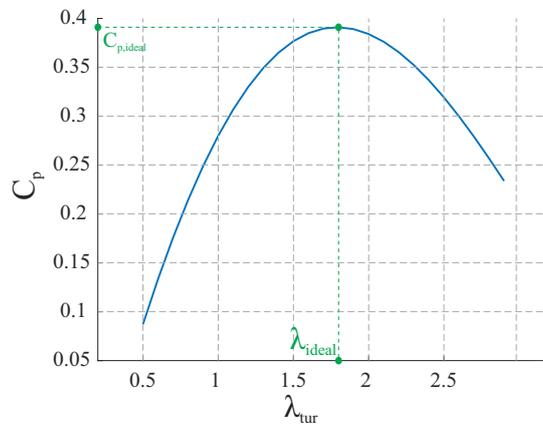
Neste trabalho foram utilizados para as simulações os coeficientes, conforme equação 2.5:

$$C_p(\lambda) = 0,007\lambda^4 - 0,026\lambda^3 - 0,158\lambda^2 + 0,665\lambda - 0,198 \quad (2.5)$$

A equação 2.5 corresponde ao perfil hidrodinâmico da turbina HK-10 desenvolvida no Laboratório de Energia e Ambiente do Departamento de Engenharia Mecânica da

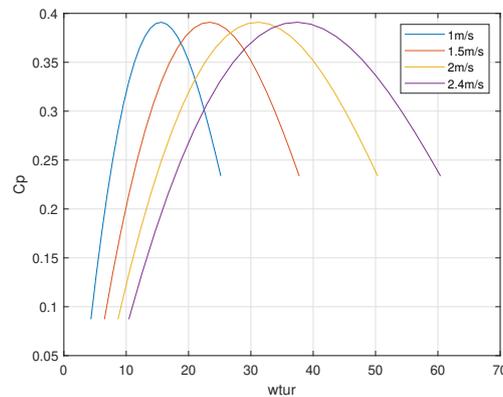
Universidade de Brasília, no contexto do projeto Hydro-K realizado em parceria com a empresa AES-Tietê.

Na Figura 2.2 é apresentada a curva característica para uma turbina de eixo horizontal, que relaciona as variáveis  $\lambda$  e  $C_p$ , e seus valores ideais, desconsiderando o ângulo de ataque  $\beta$ , pois geralmente em sistemas hidrocinéticos instalados em rios não há a mudança de direção no fluxo da água então no momento da instalação a mesma já é posicionada no melhor ângulo.



**Figura 2.2.** Curva  $\lambda$  vs  $C_p$  da Turbina Hidrocinética Modelada

Com esta informação, é possível também avaliar região de rotação da turbina  $\omega_{tur}$  vs  $C_p$ , para diversas velocidades do rio, o que corresponde à máxima potência que o gerador pode fornecer em uma determinada velocidade.



**Figura 2.3.** Curva Rotação  $\omega$  vs  $C_p$

Da equação 2.6, é possível encontrar o torque mecânico disponível no eixo da turbina.

$$T_{mec} = \frac{P_M}{\omega_m} \quad (2.6)$$

Onde  $T_{mec}$  é o torque mecânico. A equação 2.7 referente-se a dinâmica do conjunto eletromecânico da turbina do gerador, que relaciona o torque eletromagnético à potência mecânica.

$$J_h \frac{d\omega_h}{dt} = \frac{\eta_{ct}}{dt} P_{mec} - T_e \quad (2.7)$$

Onde  $J_h$  é o momento de inércia,  $\omega_h$  rotação do gerador,  $P_{mec}$  a potência mecânica e  $T_e$  torque eletromagnético.

## 2.2 CAIXA DE TRANSMISSÃO

A caixa de transmissão é um componente que multiplica a velocidade do eixo da turbina para um valor compatível à rotação nominal do gerador. A relação da caixa de transmissão pode ser calculada conforme a equação 2.8.

$$N_{ct} = \frac{n_m}{n_{n_M}} \quad (2.8)$$

Onde  $n_m$  e  $n_{n_M}$  são as velocidades nominais do gerador e da turbina respectivamente. Em geral, a velocidade da água em rios é baixa. Logo para evitar o uso da caixa de transmissão será necessário um gerador com muitos polos, nem sempre disponível. Portanto, a decisão sobre necessidade de uso da caixa de transmissão irá depender da velocidade fonte mecânica e da velocidade nominal do gerador.

Ao passar pela caixa de transmissão há uma modificação no torque mecânico conforme a equação 2.9.

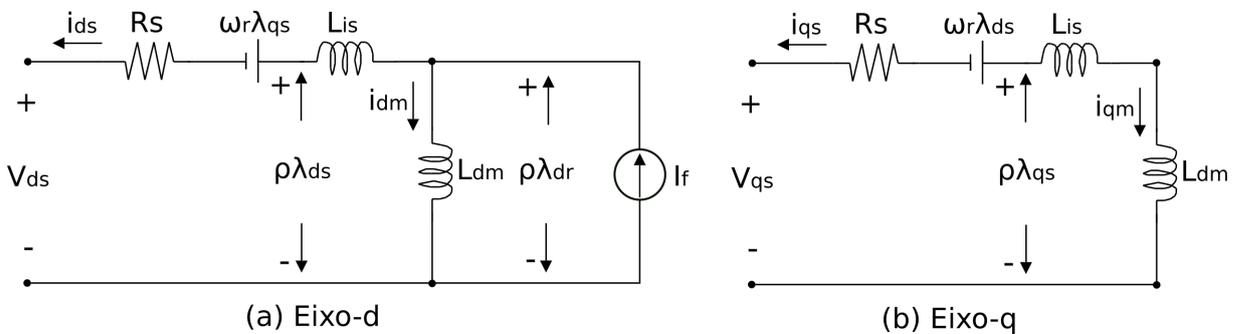
$$T_{mec-s} = \frac{T_{mec-e}}{N_{ct}} \quad (2.9)$$

Onde  $N_{ct}$  é o fator de multiplicação da caixa de transmissão e  $T_{mec-e}$  é o torque mecânico na entrada.

As desvantagens do uso da caixa de transmissão são a emissão de alto nível de ruído e ainda uma perda mecânica, pois normalmente o rendimento deste está entre 95% e 98%, conforme (WU *et al.*, 2011). Outra característica importante é que o acréscimo desse equipamento aumenta o custo da implantação da usina hidrocínética e também os custos de manutenção.

### 2.3 GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES

Neste tipo de gerador, o fluxo magnético do rotor é gerado por ímãs permanentes, e por isso ele possui uma maior densidade de potência, ou seja, tamanho reduzido em comparação com o gerador com rotor bobinado. Esse gerador não possui correntes no rotor e como consequência menos perdas térmicas e também não tem escovas o que reduz o custo de manutenção. Dependendo do sistema essa característica pode dispensar o uso de caixas de transmissão, permitindo a construção de geradores com alto número de polos. Entretanto, a desvantagem dessa tecnologia é que o gerador é mais caro e ainda apresenta um risco de desmagnetização dos ímãs. Tradicionalmente, essas máquinas elétricas são modeladas na referência dos eixos direto e em quadratura, cujos circuitos equivalentes são apresentados na Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Modelo Eixos-dq do Gerador Trifásico de Ímãs Permanentes

Usando a lei de Kirchhoff das tensões:

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \end{cases} \quad (2.10)$$

As constantes  $\lambda_{ds}$  e  $\lambda_{qs}$  são os fluxos de eixo direito e de quadratura e  $p = \frac{d}{dt}$ , têm-se as relações:

$$\begin{cases} \lambda_{ds} = -L_{ls} i_{ds} + L_{dm} (I_f - i_{ds}) = -L_d I_{ds} + \lambda_r \\ \lambda_{qs} = -(L_{ls} + L_{qm}) i_{qs} = -L_q i_{qs} \end{cases} \quad (2.11)$$

Na equação 2.12 é apresentada a definição de  $\lambda_r$  (fluxo no rotor),  $L_d$  e  $L_q$  que são as auto indutâncias de eixo direito e de quadratura:

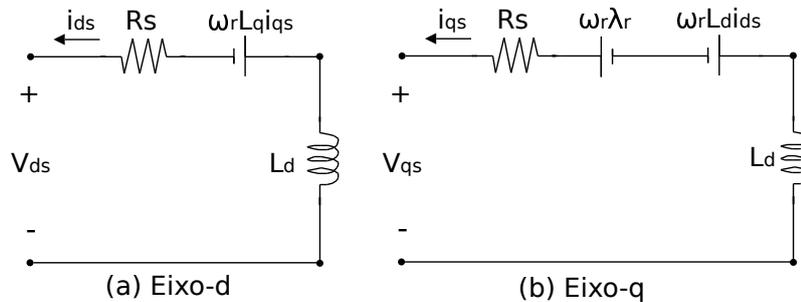
$$\begin{cases} \lambda_r = L_{dm} I_f L_d = L_{ls} + L_{dm} \\ L_q = L_{ls} + L_{qm} \end{cases} \quad (2.12)$$

Como no gerador de ímãs permanentes o fluxo magnético é constante então  $\frac{d\lambda_r}{dt} = 0$ .

Substituindo os resultados da equação 2.12, reescreve-se a equação 2.10:

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_r L_q i_{qs} - L_d p i_{ds} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \lambda_r - L_q p i_{qs} \end{cases} \quad (2.13)$$

Baseada na equação 2.13, apresenta-se na Figura 2.14 um modelo simplificado, considerando um fluxo magnético constante e essa formulação vale tanto para geradores de polos salientes quanto não-salientes:



**Figura 2.5.** Modelo Simplificado de Gerador Síncrono

Com isso é possível calcular o torque eletromagnético:

$$T_e = \frac{3P}{2} (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (2.14)$$

Então substituindo a equação 2.11 em 2.14:

$$T_e = \frac{3p}{2} [\lambda_r i_{qs} - (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}] \quad (2.15)$$

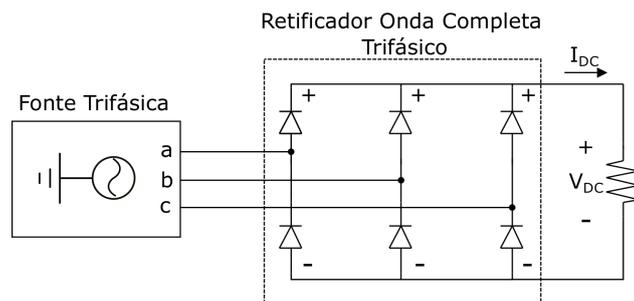
O primeiro termo da equação 2.15 é chamado de torque de reação mútua, que resulta das interações dos ímãs permanentes e das correntes do estator e o segundo é chamado de torque de relutância que é resultado da saliência magnética do rotor. Além disso, a potência ativa e reativa podem ser calculadas pelas equações 2.16 e 2.17, respectivamente.

$$P = \frac{3}{2}(v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) \quad (2.16)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_{ds}i_{qs} - v_{qs}i_{ds}) \quad (2.17)$$

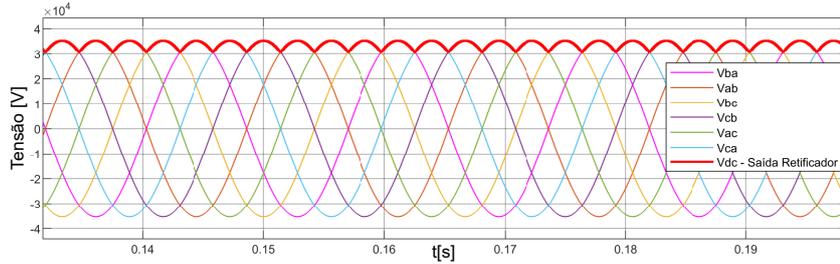
## 2.4 RETIFICADOR

A saída do gerador vai ser uma fonte senoidal trifásica, e considerando a natureza variável da fonte mecânica, o valor da velocidade do rotor não será constante, então a tensão e a frequência estarão mudando no tempo. Por isso, utiliza-se um retificador como o primeiro estágio para possibilitar o condicionamento da energia elétrica de uma forma mais simples, se comparado aos esquemas de controle que utilizam sinais alternados. Na Figura 2.6, apresenta-se uma fonte com um retificador trifásico de onda completa.



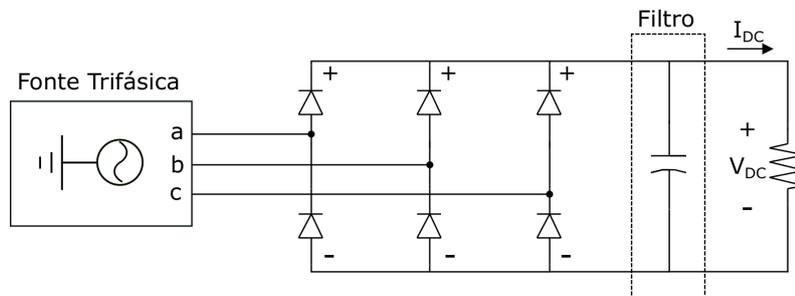
**Figura 2.6.** Circuito Retificador

No bloco retificador, a ponte de diodos permite a passagem de corrente em um único sentido, possibilitando uma tensão positiva na saída. Na Figura 2.7 são apresentadas as tensões linha  $V_{ab}$ ,  $V_{ba}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{cb}$ ,  $V_{ac}$ ,  $V_{ca}$ , na entrada do retificador, e a tensão de saída que é positiva com uma pequena ondulação que é chamada de *ripple*, sendo que formato da tensão de saída é uma envoltória dos picos das tensões de linha de entrada.



**Figura 2.7.** Tensões de Linha e Saída do Retificador

Para tornar a tensão de saída mais plana, geralmente usa-se um filtro capacitivo na saída do retificador, onde o tempo de carga e descarga deste dispositivo reduz o *ripple* de saída do circuito, como ilustrado na Figura 2.8.

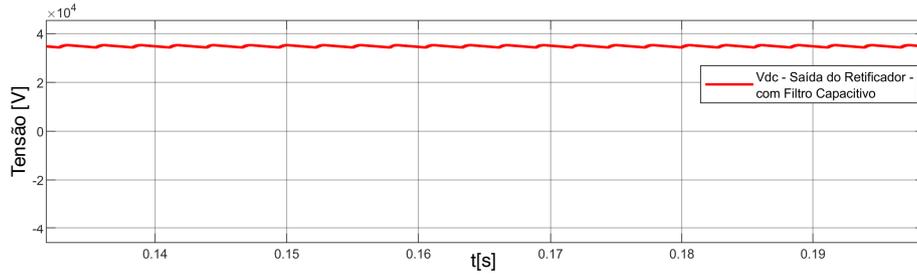


**Figura 2.8.** Retificador com Filtro Capacitivo

Para projetar o valor do capacitor a ser utilizado neste filtro, é utilizada a equação 2.18 (RASHID, 1999). Por essa expressão a escolha de RF (*Ripple Factor*) ou fator de ondulação, depende da capacitância e da carga associada. Como RF desejado é um valor baixo, então para reduzir o valor do *ripple* será necessário aumentar o valor do capacitor.

$$RF = \frac{1}{\sqrt{2}(4fRC - 1)} \quad (2.18)$$

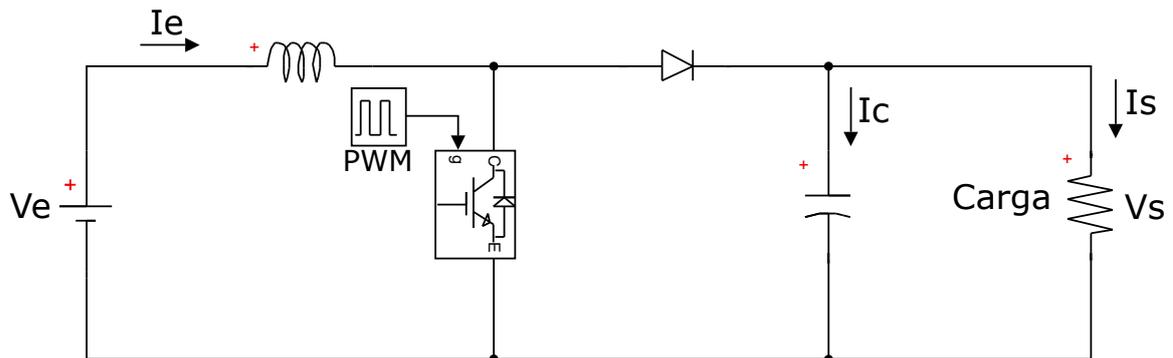
Onde C a capacitância, R a resistência da carga e f é a frequência da rede. Na Figura 2.9 é apresentada a saída do retificador com filtro capacitivo, onde a amplitude do *ripple*, sofreu uma redução permitindo assim uma saída mais plana.



**Figura 2.9.** Forma de Onda Após Filtro Capacitivo

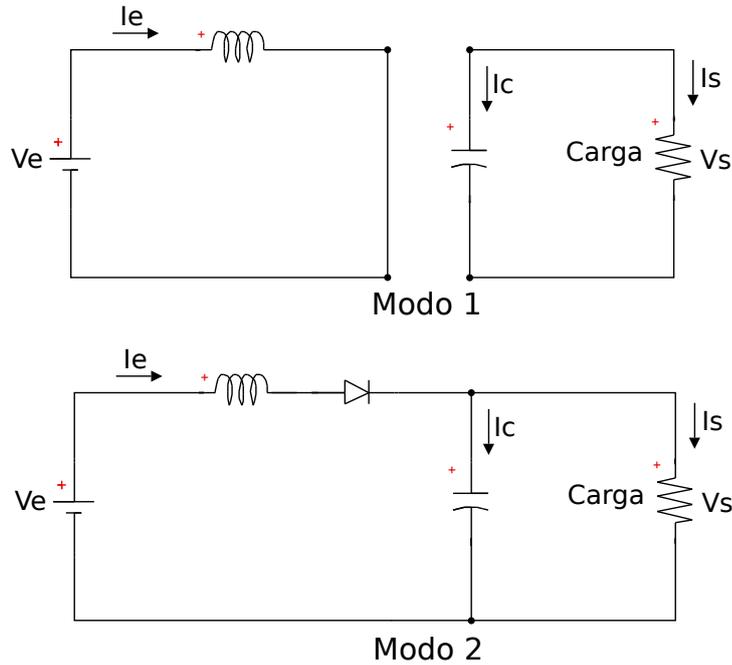
## 2.5 CONVERSOR *BOOST*

O *Boost* é um conversor CC-CC, onde a tensão de saída é maior que a de entrada, é equivalente a um transformador elevador para corrente contínua. No caso desse trabalho, a entrada desse circuito poderá sofrer variações em decorrência de alterações na velocidade do rio e na carga conectada. Com isso, esse conversor terá a função de ajustar a tensão de saída viabilizando a máxima transferência de potência - MPPT. Em decorrência disso a saída será variável. Na Figura 2.10 é apresentado o diagrama do *Boost*.



**Figura 2.10.** Conversor *Boost*

Ele funciona em dois modos de operação, conforme circuitos equivalentes apresentados na Figura 2.11. No modo 1 a corrente cresce sobre o indutor armazenando energia neste componente, enquanto o capacitor alimenta a carga. Já no modo 2 a corrente flui pelo indutor, diodo, capacitor e carga. Nesta operação a energia armazenada no indutor é liberada para carga e o capacitor se carrega.



**Figura 2.11.** Modos Conversor *Boost*

Considerando no tempo  $t_1$ , um crescimento linear da corrente sobre o indutor de  $I_1$  até  $I_2$ , com isso define-se  $\Delta I = I_2 - I_1$ , assim é possível definir a tensão de entrada  $V_e$ .

$$V_e = L \frac{\Delta I}{t_1} \quad (2.19)$$

No tempo  $t_2$  irá ocorrer a queda da corrente sobre o indutor, onde  $V_s$  é a tensão sobre a carga.

$$V_e - V_s = -L \frac{\Delta I}{t_2} \quad (2.20)$$

Isolando  $\Delta I$  nas equações 2.19 e 2.20, tem-se:

$$\Delta I = \frac{V_e t_1}{L} = \frac{(V_s - V_e) t_2}{L} \quad (2.21)$$

E ainda substituindo  $t_1 = kT$  e  $t_2 = (1 - k)T$  é encontrada a expressão da tensão média de saída:

$$V_s = \frac{V_e}{1 - k} \quad (2.22)$$

Onde  $k$  é o tempo onde a chave eletrônica fica fechada. É possível verificar pela equação 2.22 que essa constante determina o aumento de tensão em relação a entrada  $V_e$ . Somando  $t_1$  e  $t_2$ , das equações 2.20 e 2.21 e ainda utilizando a equação 2.22, é possível calcular o valor da ondulação de pico a pico de corrente.

$$\Delta I = \frac{V_e k}{fL} \quad (2.23)$$

Geralmente o controle da chave é feito por modulação de largura de pulso (PWM), onde a constante  $k$  representa a largura de pulso. Observando a equação 2.22, pode-se notar que o valor de  $k$  está no intervalo  $0 \leq t < 1$ , mas quando o valor de  $k$  está muito próximo de 1 poderá haver instabilidade, tendo em vista que o aumento de tensão é muito grande.

No modo 1, enquanto a chave está fechada, o capacitor fornece corrente para carga, com isso há uma queda de tensão  $\Delta V_c = v_c - v_{ci}$ , onde  $v_{ci}$  é quando o tempo  $t_1 = 0$ , que pode ser calculada pela equação 2.24.

$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} I_1 dt = \frac{I_s t_1}{C} \quad (2.24)$$

Como  $t_2 = T - t_1$ , isolamos  $t_1$  na equação 2.21, e substituímos na equação 2.24, e ainda considerando  $T = \frac{1}{f}$ , tem-se:

$$\Delta V_c = \frac{I_s(V_s - V_e)}{V_s f C} \Rightarrow \Delta V_c = \frac{I_s k}{f C} \quad (2.25)$$

Observa-se nas equações 2.23 e 2.25, que o valor da indutância vai depender da variação de corrente e a capacitância da variação de tensão de projeto e as duas estão relacionadas a constante  $k$ .

## 2.6 CONVERTOR *BUCK*

O circuito *Buck* é um conversor CC-CC onde a tensão de entrada é maior que a de saída, é semelhante a um transformador abaixador para corrente contínua. Considerando que, após o conversor *Boost*, a tensão será variável devido as alterações de

velocidade do rio ou da carga, o conversor *Buck* será utilizado para estabilizar a tensão no barramento CC, possibilitando a conexão segura de diversas cargas e banco de baterias. Na Figura 2.12 é apresentado o circuito *Buck* e posteriormente será tratado sobre os modos de funcionamento e suas equações.

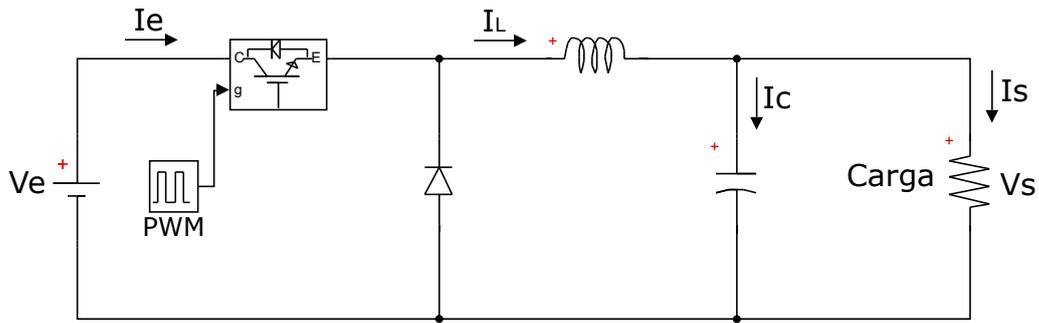
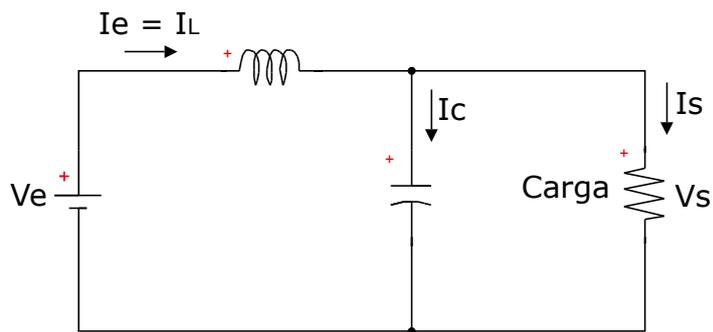
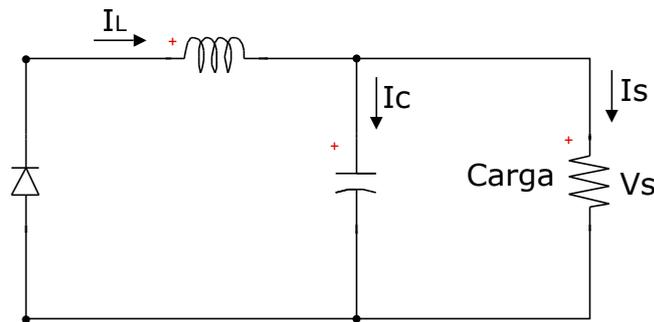


Figura 2.12. Circuito *Buck*



Modo 1



Modo 2

Figura 2.13. Modos Circuito *Buck*

Semelhante ao *Boost*, o conversor *Buck* funciona em dois modos de operação a depender do estado da chave, conforme Figura 2.13. o modo 1 a chave é fechada e a corrente flui pelo capacitor, indutor e carga, e No modo 2 a chave é aberta e a energia

armazenada no capacitor e indutor flui para a carga, e durante a descarga desses componentes a corrente cai. Na equação 2.26 encontra-se a tensão sobre o indutor:

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.26)$$

Considerando que no modo 1 a corrente cresce de  $I_1$  para  $I_2$  linearmente no tempo  $t_1$  tem-se:

$$V_e - V_s = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} \Rightarrow \Delta I = \frac{t_1(V_e - V_s)}{L} \quad (2.27)$$

Já no modo 2 a corrente cai linearmente no tempo  $t_2$  de  $I_2$  para  $I_1$ , possibilitando o cálculo da variação de corrente:

$$-V_s = -L \frac{\Delta I}{t_2} \Rightarrow \Delta I = \frac{t_2 V_s}{L} \quad (2.28)$$

Onde  $\Delta I = I_2 - I_1$  que é a ondulação de corrente no indutor L, considerando o valor de  $\Delta I$  e igualando as equações 2.27 e 2.28, chega-se a equação 2.29:

$$\Delta I = \frac{t_1(V_e - V_s)}{L} = \frac{t_2 V_s}{L} \quad (2.29)$$

Considerando T o período de chaveamento, substitui-se  $t_1 = kT$  e  $t_2 = (1 - k)T$ , na equação 2.29, com isso é possível calcular o valor da tensão de saída em função da constante k que representa o *Duty Cycle* ou o percentual do período T que o PWM vai estar com valor alto.

$$\frac{kT(V_e - V_s)}{L} = \frac{(1 - k)TV_s}{L} \Rightarrow V_s = kV_e \quad (2.30)$$

Considerando esse circuito sem perdas, é possível escrever  $V_e I_e = V_s I_s = kV_e I_s$ , então chega-se na relação entre as correntes de entrada e saída, conforme equação 2.31 abaixo.

$$I_e = kI_s \quad (2.31)$$

Isolando  $t_1$  e  $t_2$  nas equações 2.27 e 2.28 e considerando o período de chaveamento tem-se:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I L}{V_e - V_s} + \frac{\Delta I L}{V_s} = \frac{\Delta I L V_e}{V_s (V_e - V_s)} \quad (2.32)$$

Chega-se então ao ondramento de corrente:

$$\Delta I = \frac{V_s(V_e - V_s)}{fLV_e} = \frac{V_e k(1 - k)}{fL} \quad (2.33)$$

Usando a lei Kirchhoff das corrente, pode-se calcular a corrente no indutor:

$$i_L = i_c + i_0 \quad (2.34)$$

Considerando que a ondulação da corrente de carga é pequena, então  $\Delta i_L = \Delta i_c$ , tem-se a corrente média no capacitor.

$$I_c = \frac{\Delta I}{4} \quad (2.35)$$

A tensão sobre o capacitor pode ser calculada como:

$$v_c = \frac{1}{C} i_c dt + v_c(t = 0) \quad (2.36)$$

Tem-se a ondulação de pico a pico no capacitor:

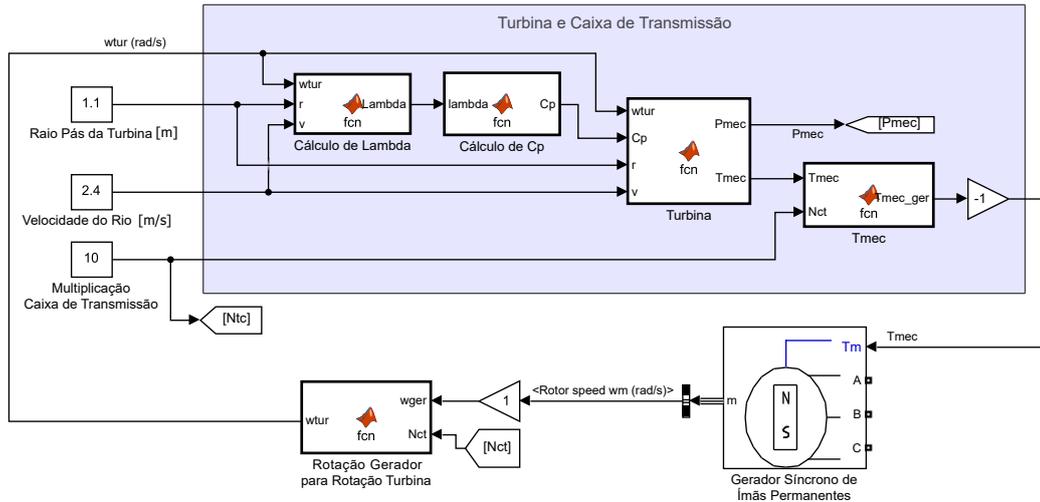
$$\Delta V_c = v_c - v_c(t = 0) = \frac{1}{C} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{\Delta I}{4} dt = \frac{\Delta IT}{8C} = \frac{\Delta I}{8fC} \quad (2.37)$$

Chega-se a ondulação de Tensão no capacitor  $\Delta V_c$  Substituindo  $\Delta I$  na equação 2.33, tem-se:

$$\Delta V_c = \frac{V_s(V_e - V_s)}{8f^2LCV_e} = \frac{V_e k(1 - k)}{8f^2LC} \quad (2.38)$$

## 2.7 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NO SIMULINK/MATLAB

Para a modelagem de cada unidade de geração de energia elétrica com turbinas hidrocinéticas, foi utilizado o *software* Matlab/Simulink. Na Figura 2.14, é apresentado diagrama de blocos que modela a turbina, a caixa de transmissão e o gerador síncrono de ímãs permanentes, tendo como resultado a saída de tensão trifásica. Na entrada do sistema são fornecidos o raio das pás da turbina, o fator de multiplicação de velocidade da caixa de transmissão e a velocidade do rio que é a fonte mecânica.



**Figura 2.14.** Modelagem da Turbina, Caixa de Transmissão e Gerador

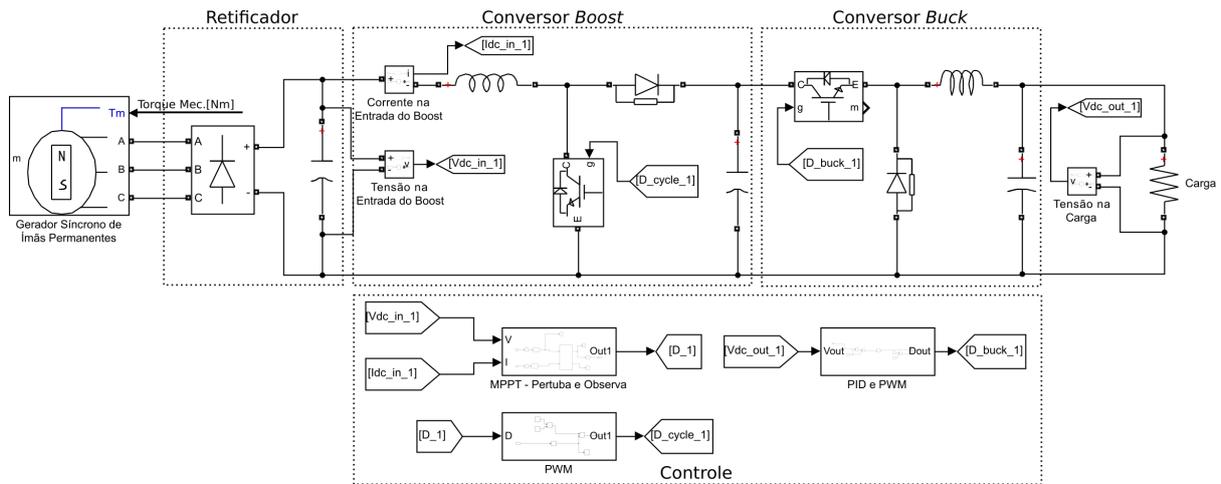
Nota-se que a turbina e a caixa de transmissão estão representadas no retângulo azul da Figura 2.14. Esclarece-se que foram utilizados os blocos *MATLAB function*, que possibilitam a implementação de equações matemáticas dentro do ambiente do Simulink. O primeiro bloco refere-se ao cálculo da variável  $\lambda$  (equação 2.3), o segundo ao cálculo da variável  $C_p$  (equação 2.11). Já, no terceiro bloco foram calculadas a potência mecânica (equação 2.2) e torque mecânico (equação 2.6). Por último, o cálculo do torque mecânico após a caixa de transmissão é realizado de acordo com a equação 2.9, sinal que foi invertido para estar de acordo com os requerimentos do bloco da máquina para operação como gerador.

O Bloco Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes tem como entrada torque mecânico e como saída uma tensão trifásica e possibilita a extração de vários sinais. Neste trabalho, foi extraída a velocidade do rotor que é dividida pela relação da caixa de transmissão e serve como realimentação para o modelo da turbina. Na tabela 2.1 são apresentados os parâmetros do gerador. Já os demais blocos utilizados nas simulações, pós gerador, estão apresentados na figura 2.15, e são compostos pelo retificador, conversor *Boost*, conversor *Buck*, cujos funcionamentos foram explicados acima e os blocos de controle.

Foram ilustrados na Figura 2.15 os blocos de controle, que tem o objetivo de gerenciar os conversores CC-CC, com o objetivo de maximizar a extração de potência na

Parâmetro	Valor
Potência Nominal	10kW
Pares de Polos	12
Resistência do Estator	0,06Ω
Indutância de Armadura	0,01H
Fluxo Magnético	0,91Wb
Inércia	20kg.m <sup>2</sup>
Viscosidade	4,924.10 <sup>-4</sup> N.m.s
Atrito Estático	0 N.m

**Tabela 2.1.** Parâmetros do Gerador



**Figura 2.15.** Modelo Simulink Retificador, Conversores CC e Controle

turbina e condicionar a tensão sobre a carga. O primeiro bloco é o MPPT perturba e observa, que recebe os valores de tensão e corrente do voltímetro e amperímetro, instalados após o retificador. A partir desses valores calcula o *duty cycle* que é a saída deste bloco, buscando a maximização da potência. O segundo é o PWM que converte o valor do *duty cycle* em um sinal modulado por largura de pulso, que controla a chave do conversor *Boost* e o terceiro é o PID e PWM, quem tem como entrada a tensão sobre a carga e a partir da comparação com a tensão de referência, calcula o sinal PWM de saída, que aciona a chave do conversor *Buck*, regulando a tensão sobre a carga.

## 2.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi tratado da modelagem matemática dos principais blocos do sistema de geração hidrocinética, começando pela turbina que é a responsável pela captação da energia do rio, e posteriormente a caixa de transmissão que compatibiliza a

velocidade da turbina com a velocidade do gerador. Logo em seguida, o gerador síncrono de ímãs permanentes, que irá fazer a conversão da energia mecânica para elétrica. Depois o retificador que irá converter a tensão variável em uma tensão contínua e por último os conversores CC-CC *Boost e Buck*, que irão ser comandados pelos sistemas de controle, com o objetivo de entregar uma tensão constante no barramento CC com a máxima transferência de potência.

Neste capítulo serão discutidas estratégias de controle do sistema de geração de forma a obter o máximo rendimento de potência dos geradores e uma tensão constante no barramento CC. O controle irá atuar ajustando o *Duty Cycle* das chaves que são componentes dos conversores *Boost* e *Buck*, controlando as tensões e correntes de saída.

### 3.1 CONTROLE: CONCEITOS BÁSICOS

O controle automático está presente na maior parte dos equipamentos que nos cercam e mais fortemente na produção industrial. Essa tecnologia tem muitas vantagens. Uma delas é a segurança, pois os equipamentos podem funcionar de maneira autônoma em locais contaminados ou radioativos, com isso, afastando as pessoas de situações de risco. Outro benefício é o uso em processos repetitivos onde a fadiga ou a distração humana poderiam causar acidentes e ainda em atividades que exigem uma precisão muito refinada, como algumas cirurgias que são realizadas utilizando-se de braços robóticos.

Para (NISE, 2012) um sistema de controle consiste em subsistemas e processos (ou plantas) construídos com o objetivo de se obter uma saída desejada com um desempenho desejado, dada uma entrada especificada. Neste trabalho o processo ou planta são todos os componentes entre a turbina e o barramento CC. A entrada é a velocidade do rio, que é fonte de energia do sistema e a saída uma é a tensão CC constante.

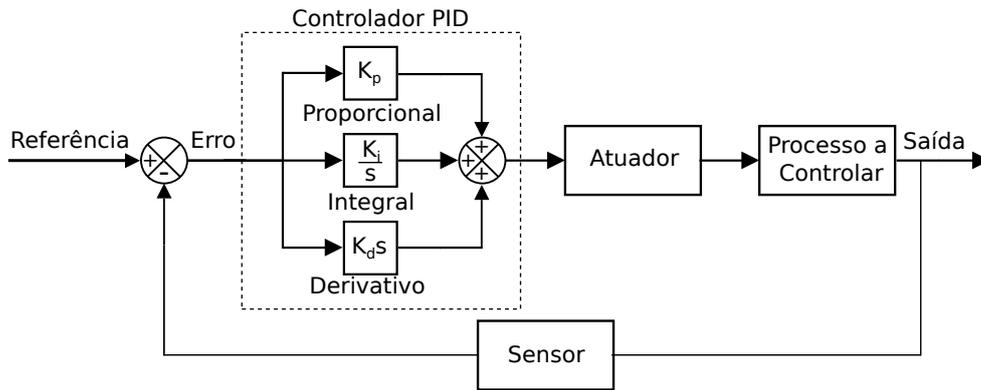
### 3.1.1 Sistema de Controle Malha Aberta e Malha Fechada

Nos sistemas de controle em malha aberta, o controlador aciona o processo ou a planta a partir de um valor padrão ou referência, sem a verificação da saída. Então para um bom funcionamento será necessário calibração do sistema. Para (OGATA, 2000) os sistemas de controle a malha aberta são usados somente quando as relações entre entrada e saída do processo a controlar forem conhecidas e quando não existirem distúrbios internos e externos. Essa estratégia de controle funciona bem em sistemas que são imunes a ruídos tanto internos como externos e uma das vantagens que esse tipo de sistemas é que eles tem menos problemas de estabilidade, mas são sensíveis às perturbações que são amplificadas até a saída.

Já os sistemas em malha fechada, a saída é monitorada e comparada com a entrada ou sinal de referência permitindo ao controlador o mitigar efeito das perturbações. A realimentação que pode ser o próprio sinal de saída amplificado ou não, sua derivada e/ou sua integral, que é subtraído do sinal de entrada, gerando o sinal que atua sobre o controlador com o objetivo de redução ou eliminação do erro, levando a saída ao valor desejado. O sistema descrito neste trabalho terá várias perturbações, principalmente alterações da velocidade do rio e mudanças na carga, por isso os controladores serão em malha fechada.

### 3.1.2 Controladores PID

Como já foi tratado anteriormente, no controle automático a grandeza de saída é comparada com a grandeza de referência, gerando o sinal de erro, e a partir dele o controlador irá trabalhar pra reduzir esse desvio ou torná-lo zero, gerando um sinal que iremos chamar de ação de controle. Na figura 3.1 é apresentado o diagrama de um controlador PID( ação Proporcional, Integral e Derivativo) que tem sido muito utilizado para aplicações industriais.



**Figura 3.1.** Diagrama de Blocos - PID

Por meio de um sensor ou conjunto de sensores a informação de saída é convertida para uma variável comparável com o sinal de referência ou *setpoint*. O resultado do primeiro somador é o sinal de erro que é a entrada do controlador PID. Logo em seguida o sinal passa pelo atuador que comanda o processo com a intenção de corrigir o erro.

Os ajustes das ações do controlador PID serão feitos via constantes  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , referentes aos ganhos das ações Proporcional, Integral e Derivativa, respectivamente. A sintonia desse controlador irá depender da resposta desejada do sistema, e nem sempre serão utilizadas todas as ações, podendo ser um controlador P(proporcional), ou PI (proporcional-integral) ou PD(proporcional-derivativo) ou PID(proporcional-integral-derivativo). Nos próximos parágrafos serão tratadas as características de cada ação.

A Ação de Controle Proporcional, é um amplificador de ganho ajustável igual a  $K_p$  e a relação entre o erro  $e(t)$  e a saída do controlador  $u(t)$  é apresentada na equação 3.1.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.1)$$

No domínio de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (3.2)$$

Na Ação de Controle Integral a saída  $u(t)$  é alterada conforme uma taxa proporcional ao erro  $e(t)$ , onde  $K_i$  é uma constante variável, na equação 3.3 é apresentado a expressão dessa ação.

$$u(t) = K_i \int e(t) \quad (3.3)$$

No domínio de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (3.4)$$

Nesta ação a saída será proporcional ao erro, se o mesmo for zero a saída permanece estacionária. Muitas vezes o controle integral é chamado de controle de reestabelecimento. A ação integral é utilizada para eliminar o erro em regime permanente, embora possa inserir ao sistema uma resposta oscilatória com amplitude que cresce ou decresce lentamente.

Por último a ação de controle derivativo onde a magnitude de saída do controlador é proporcional a variação do erro, essa ação tem um caráter antecipatório, embora não possa antecipar a uma ação que não tenha ocorrido. Não é utilizada sozinha pois atua apenas em transitórios. Na equação 3.5 apresentamos a ação do controlador proporcional-derivativo.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

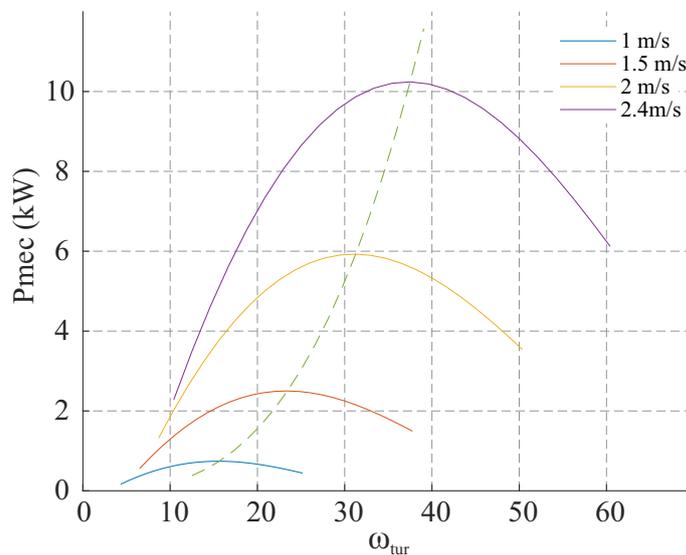
No domínio de laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s \quad (3.6)$$

Quando adicionado uma ação derivativa possibilita a obtenção de um controlador com alta sensibilidade, que responde a variação da taxa de erro para produzir uma correção antes que o mesmo se torne grande. Ele introduz ainda um amortecimento ao sistema o que resulta uma melhoria na precisão em regime permanente.

### 3.2 MPPT

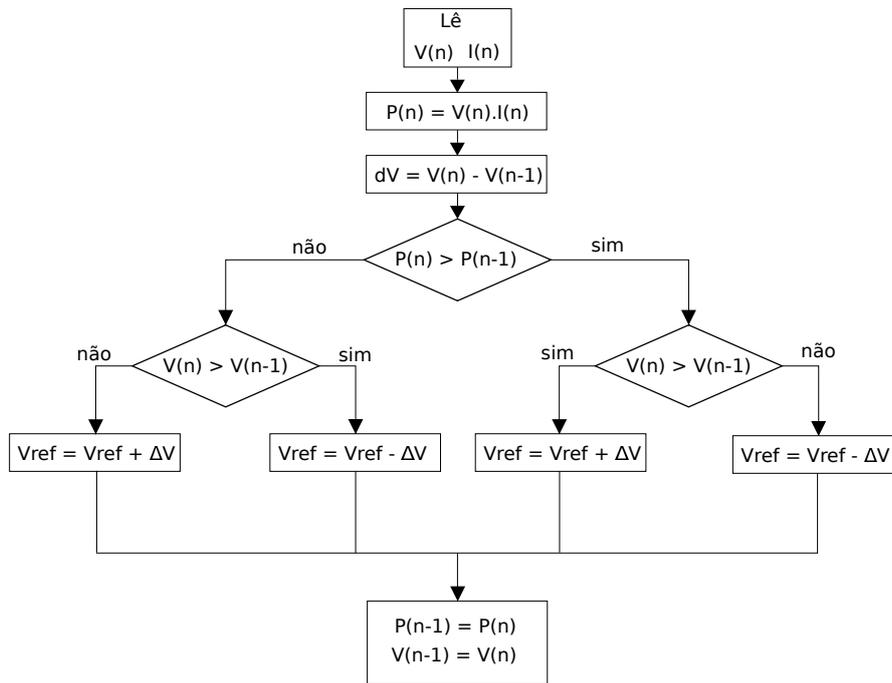
Considerando a busca por maior eficiência, o algoritmo de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), é responsável pela máxima extração de potência, que é obtida operando com o máximo  $C_p$  da turbina, para diferentes velocidades de rio. Nesse sentido, a potência que a turbina hidrocinética pode extrair para velocidades de rio característicos entre 1 m/s e 2.4 m/s é ilustrada na Figura 3.2. Nessa imagem, é possível ver que existe uma única rotação de turbina para produzir uma determinada potência máxima, dependendo da velocidade. Também, a linha verde representa a curva de máxima potência extraída para esses cenários.



**Figura 3.2.** Curva de Potência(P) x Velocidade Angular( $\omega$ )

Considerando que a rotação da turbina depende da interação entre o torque mecânico da turbina e o torque eletromagnético do gerador, é coerente alterar a corrente elétrica nos enrolamentos do gerador para modificar o torque eletromagnético, visando pontos de operação condizentes com o MPPT. Para alterar a relação entre tensões e correntes fornecidas pelo gerador será utilizado o conversor *Boost*, que irá permitir o ajuste para rotação ideal. Considerando que  $\omega \propto P$  e  $\omega \propto T_e$ , ou seja, as variações de corrente, vão alterar a potência, que irá mudar o torque e como consequência a mudança da velocidade angular. O bloco MPPT será responsável por regular o ciclo de trabalho do conversor *Boost*, para permitir que o gerador esteja sempre na máxima transferência e em decorrência disso a tensão de saída será variável.

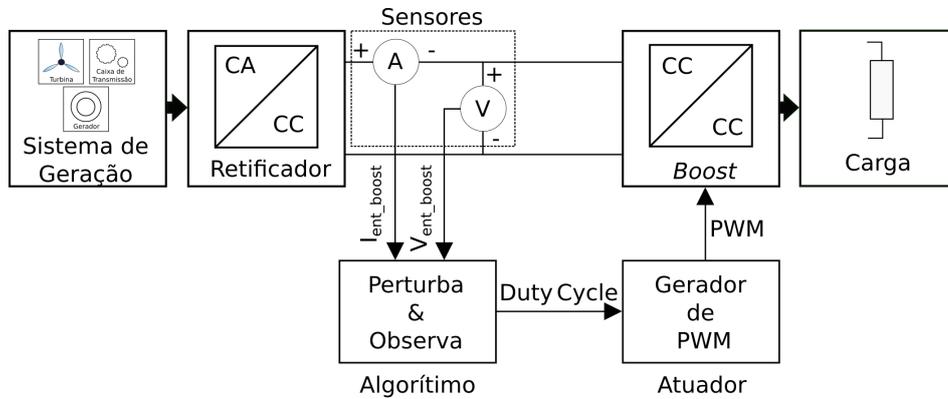
Neste trabalho será utilizado o algoritmo Perturba e Observa - P&O como estratégia de rastreamento da máxima potência, cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 3.3. Esse método se destaca pela simplicidade de implementação, e ainda um baixo esforço computacional para o controle. É amplamente utilizado pois ele depende apenas da leitura da tensão e corrente, cujo o produto é a potência extraída, tendo como saída o *duty cycle* que controla a chave do *Boost*, que é alterado em passos até o ponto de máxima potência.



**Figura 3.3.** Algoritmo Perturba e Observa (COELHO, 2008)(com adaptações)

Outra vantagem desse método é que ele independe dos parâmetros característicos da turbina. São feitas perturbações da tensão de referência que é utilizada para cálculo do *duty cycle*  $\Delta D$ , até localizar a região de máxima potência. Com isso, enquanto a potência vai aumentando, ele incrementa (ou decrementa) a tensão de referência até que a mesma comece a diminuir, neste ponto ele age no sentido contrário da perturbação anterior. No diagrama apresentado na figura 3.4, observa-se que o bloco do algoritmo perturba e observa recebe a informação dos sensores de corrente e tensão, instalados na saída do retificador e com esses dados calcula o próximo valor do *Duty Cycle*, que é uma constante com valor entre 0 e 1, que representa o percentual do período  $T$  onde a chave do conversor *boost* ficará ligada, buscando localizar o ponto de máxima transferência

de potência. O bloco atuador que irá converter o valor de *Duty Cycle* em um sinal PWM que irá atuar sobre a chave do conversor *Boost*.



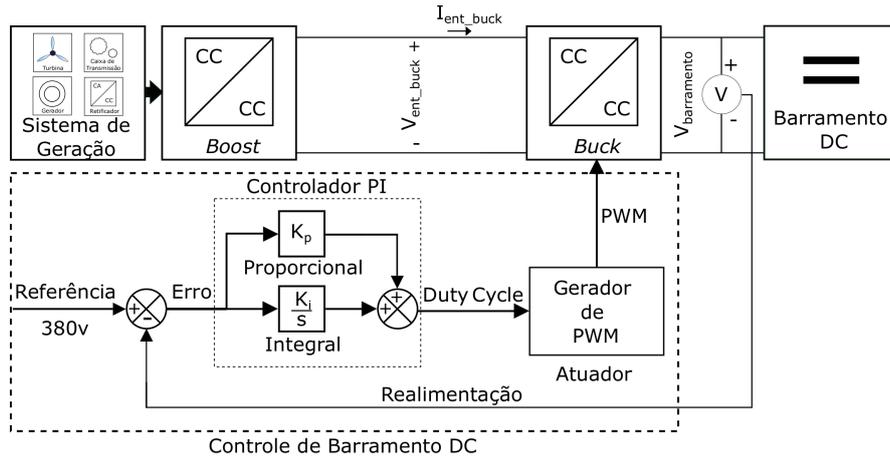
**Figura 3.4.** Diagrama de Blocos - MPPT

### 3.3 CONTROLE DE BARRAMENTO

Como a saída do *Boost* será variável, tendo em vista que o ponto de máxima potência irá depender da velocidade do rio e também da carga, será necessário o uso do conversor *Buck* para redução da tensão até o valor definido em projeto, estabilizando a tensão de barramento em um valor fixo. O circuito controle irá atuar com uma tensão constante de referência, no caso deste trabalho 380 Vcc, e o *Duty Cycle* irá variar para permitir que as tensões de entrada sejam convertidas para uma tensão de saída constante.

O controle de barramento será composto por uma tensão de referência que é a tensão desejada no barramento CC. A saída é monitorada por um voltímetro onde valor de saída é subtraído da referência, gerando assim um sinal de erro que será a entrada do controlador PI que irá ajustar o ciclo de trabalho do conversor *Buck*, com o objetivo de regular a tensão no barramento. Na Figura 3.5 é apresentado o diagrama de blocos desse controlador.

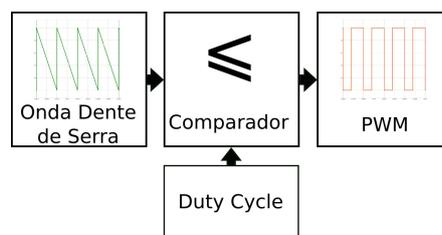
O uso do controlador PI se justifica, pois uma das características desse controlador é erro zero no regime estacionário, possibilitando assim estabilizar a tensão de Bar-



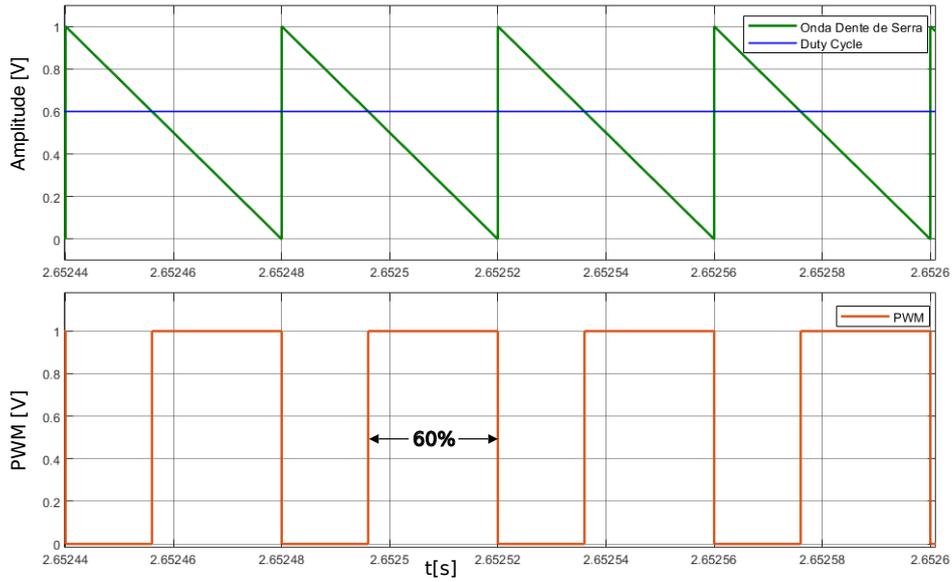
**Figura 3.5.** Diagrama de Blocos - Controle de Barramento CC

ramento CC no valor de 380 Vcc. A saída do controlador é o *Duty Cycle* que é um valor entre 0 e 1 que representa o percentual do período  $T$  onde a chave do conversor *Buck* estará ligada e por último o bloco gerador de PWM irá transformar esse valor em uma onda quadrada onde a parte positiva representa o tempo onde a chave fica fechada.

O esquema do Bloco Gerador de PWM está apresentado na Figura 3.6, o comparador tem saída igual a 1 V quando o valor da Onda Dente de Serra é menor ou igual ao valor do *Duty Cycle*, se for maior a saída é zero. Com isso, é possível gerar na saída uma onda quadrada com modulação de PWM. Na Figura 3.7 são apresentadas as formas de onda nos blocos do Gerador de PWM.



**Figura 3.6.** Diagrama de Blocos - Gerador de PWM



**Figura 3.7.** Onda Dente de Serra, Duty Cycle e PWM

### 3.3.1 Síntese do Capítulo

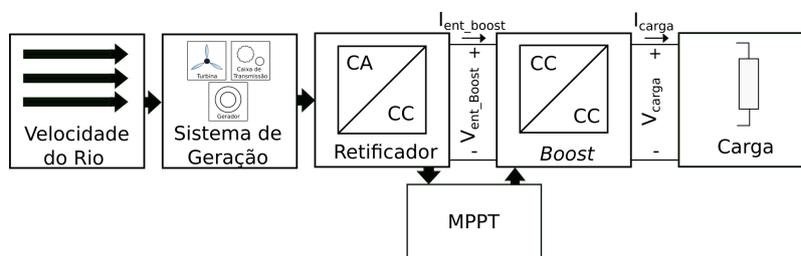
Neste capítulo foram apresentados a importância e os conceitos básicos de controle, tais como, realimentação e controladores PID, e posteriormente foi discutido sobre o algoritmo Perturba & Observa, que será a estratégia de Maximização da Transferência de Potência MPPT e por último o uso do controlador PI para regular a tensão entregue ao barramento CC.

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são mostrados os resultados das simulações baseadas no modelo da unidade hidrocínética apresentada e seus sistemas de controle. Especificamente, o algoritmo de MPPT é inicialmente testado para diferentes condições, considerando apenas o estágio retificador e o *boost* acoplado. Posteriormente, é incorporado o conversor *buck* para um valor de saída fixa de 380 Vcc, junto com uma carga conectada no barramento CC. Finalmente, três unidades hidrocínéticas são conectadas em paralelo com uma carga em comum, as quais são submetidas a diferentes cenários.

### 4.1 AVALIAÇÃO INICIAL DO ALGORITMO DE MPPT

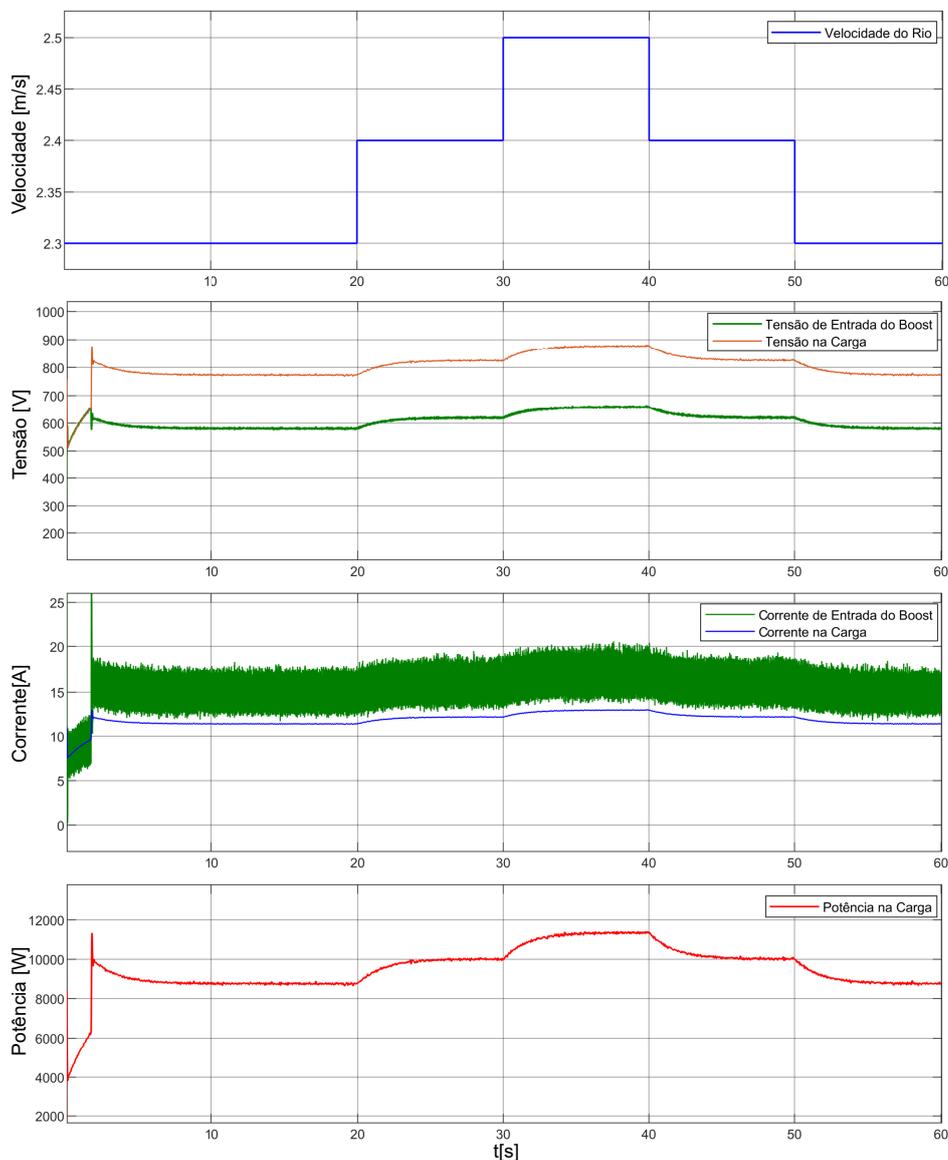
Inicialmente, o funcionamento do algoritmo de MPPT que controla o conversor *boost* é verificado. Para isso, uma carga é conectada diretamente na saída deste conversor, considerando que o conversor *buck* e a carga terminal podem ser modelados por uma resistência equivalente, como mostrado na Figura 4.1. Com base nisso, o modelo é testado diante de variações de velocidade de rio e da resistência da carga.



**Figura 4.1.** Sistema de Geração para Verificação do MPPT

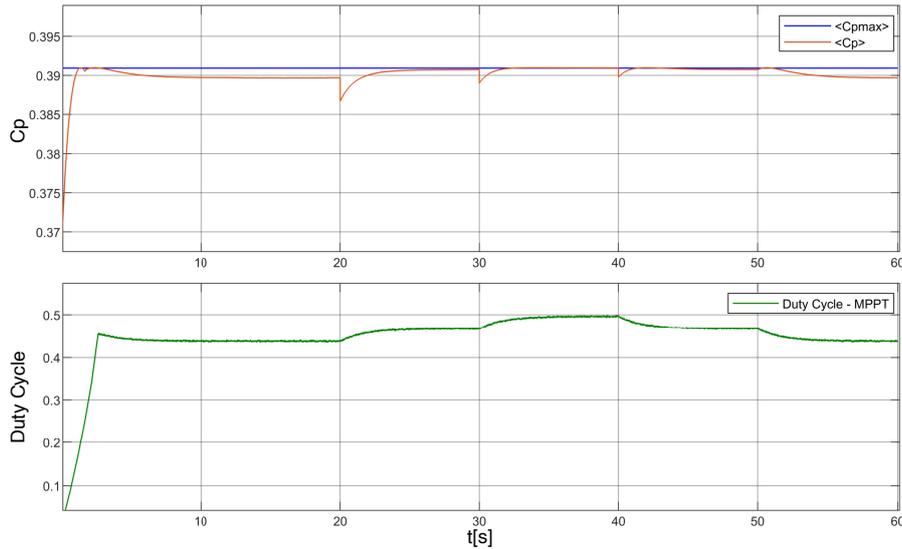
Na primeira simulação, foi utilizada uma carga com resistência fixa e velocidade do rio variável, como observado na Figura 4.2. Com isso verificamos que a tensão e a corrente de entrada e saída, e conseqüentemente a potência elétrica, acompanham

proporcionalmente a alteração da velocidade do rio. Especificamente, a tensão terminal do gerador, que é diretamente proporcional à rotação da turbina com o fluxo concatenado dos ímãs permanentes como fator multiplicador, muda de acordo com cada valor de velocidade de rio. Para isso, a corrente que entra no *boost* é alterada de forma a modificar o torque eletromagnético do gerador e interagir com o torque mecânico da turbina, visando a rotação de turbina de acordo com máxima transferência de potência. Todavia, deve-se notar que a tensão disponível na carga será variável uma vez que, até agora, o único objetivo é satisfazer essa máxima extração por parte das pás das turbinas.



**Figura 4.2.** Simulação *Boost* - Velocidade Variável

O funcionamento do algoritmo de MPPT fica mais evidente quando observa-se na Figura 4.3 que o coeficiente de potência da turbina,  $C_p$ , cujo valor máximo é 0,39, se mantém próximo ao ideal. Para isso acontecer, deve-se observar na Figura 4.3 que a alteração do ciclo de trabalho (*duty cycle*) é o responsável pela alteração da corrente terminal do gerador de acordo com controle MPPT.



**Figura 4.3.** Simulação *Boost* -  $C_p$  e Duty Cycle

Na segunda simulação do conversor *Boost*, a velocidade do rio foi fixada em 2.4 m/s e a resistência da carga será variável, como observado na Figura 4.4. Verifica-se que as tensões e correntes de entrada e saída no boost acompanham as mudanças da carga, semelhantemente ao que ocorreu na simulação anterior. A diferença neste caso é que a potência se manteve constante exceto nos transitórios onde houve mudança de carga. Isso é esperado tendo em vista que a potência mecânica do rio não se alterou e o controle MPPT atuou para que a carga recebesse a máxima transferência de potência.

Como pode ser observado na Figura 4.5, o gráfico de  $C_p$  se manteve próximo ao seu valor ideal, e na curva do *Duty Cycle* nota-se que essa variável é alterada acompanhando as alterações de carga, permitindo a manutenção do sistema em máxima transferência de potência. Esse comportamento indica a atuação do controle MPPT. As transições entre novos valores de *Duty Cycle*, não ocorrem instantaneamente tendo pois as perturbações realizadas pelo algoritmo do perturba e observa, ocorrem em passos, com isso o sistema gasta um tempo para chegar no novo ponto ideal.

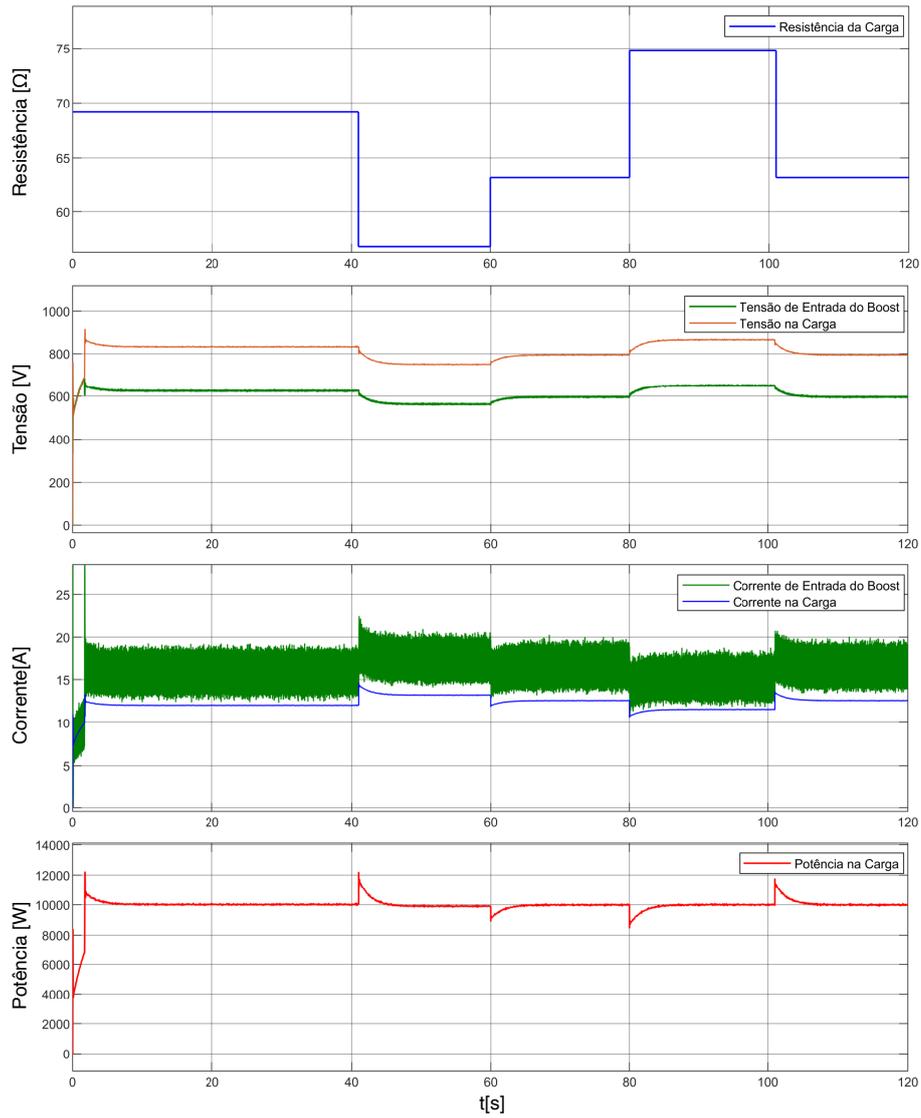


Figura 4.4. Simulação *Boost* - Carga Variável

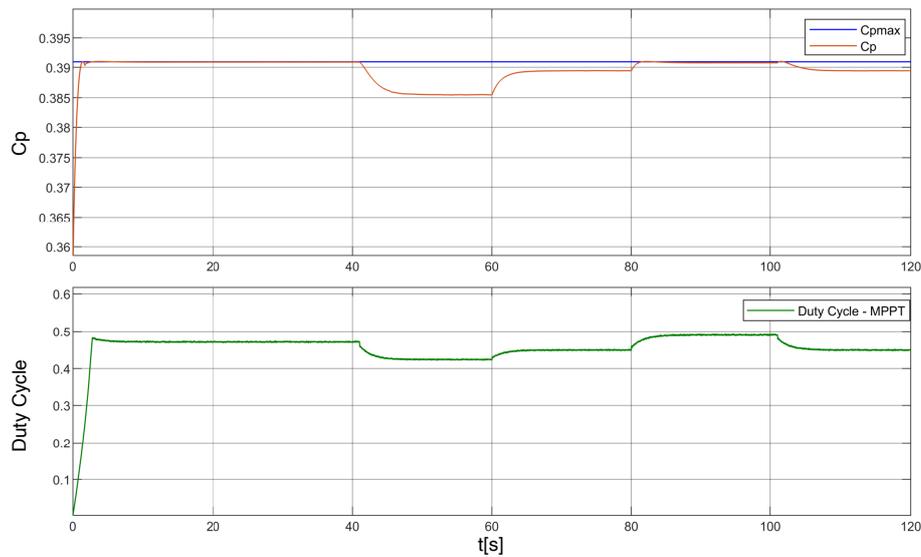


Figura 4.5. Simulação *Boost* - Carga Variável -  $C_p$  e Duty Cycle

## 4.2 AVALIAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO CC

Um fato importante que pode ser verificado nas Figuras 4.2 e 4.4, referente a simulações apenas com o conversor *Boost* controlado por MPPT, foi que a busca pela máxima transferência de potência impõe uma tensão de saída variável, que depende da velocidade do rio e do valor das cargas conetadas, dessa forma não haverá uma tensão constante de saída do sistema. Além disso a tensão sobre a carga se manteve superior a 380 Vcc, tensão de barramento CC definida neste trabalho. Para resolver essa situação é incorporado ao sistema o *buck*, que é um circuito abaixador de tensão CC, acionado pelo controle de barramento, com o objetivo de reduzir e fixar a tensão de saída. Na Figura 4.6 apresenta-se o sistema do gerador com essa modificação.

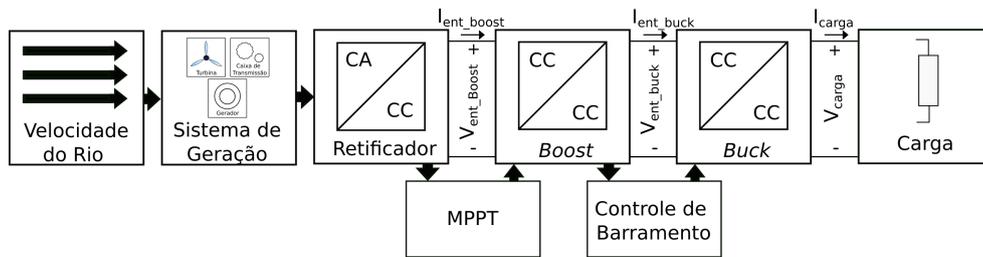


Figura 4.6. Sistema com Controle de Barramento

Como nas simulações anteriores, o novo sistema é submetido a variações na velocidade do rio e alteração da carga. Primeiro, a carga é mantida constante e varia-se a velocidade do rio, como observado na Figura 4.7. Verifica-se que a tensão e a corrente na carga se manteve constante, mesmo com a alteração da velocidade do rio, e consequentemente a potência também se manteve constante. Isso é esperado, uma vez que a lei de ohm ( $U = RI$ ), tem apenas três variáveis. Como a resistência e a tensão são constantes, a corrente também será constante. Nota-se também que as tensões de entrada do *Boost* e do *Buck*, seguiram as alterações de velocidade do rio como já era esperado.

Destaca-se que na Figura 4.7 que não foram apresentadas a corrente na entrada do conversor *Buck*, pois ela é descontínua e deixaria o gráfico sobrecarregado. Essa descontinuidade é em função da chave na entrada do conversor *Buck*, como pode ser observado no esquemático apresentado na Figura 2.12, que toda vez que ela fica aberta

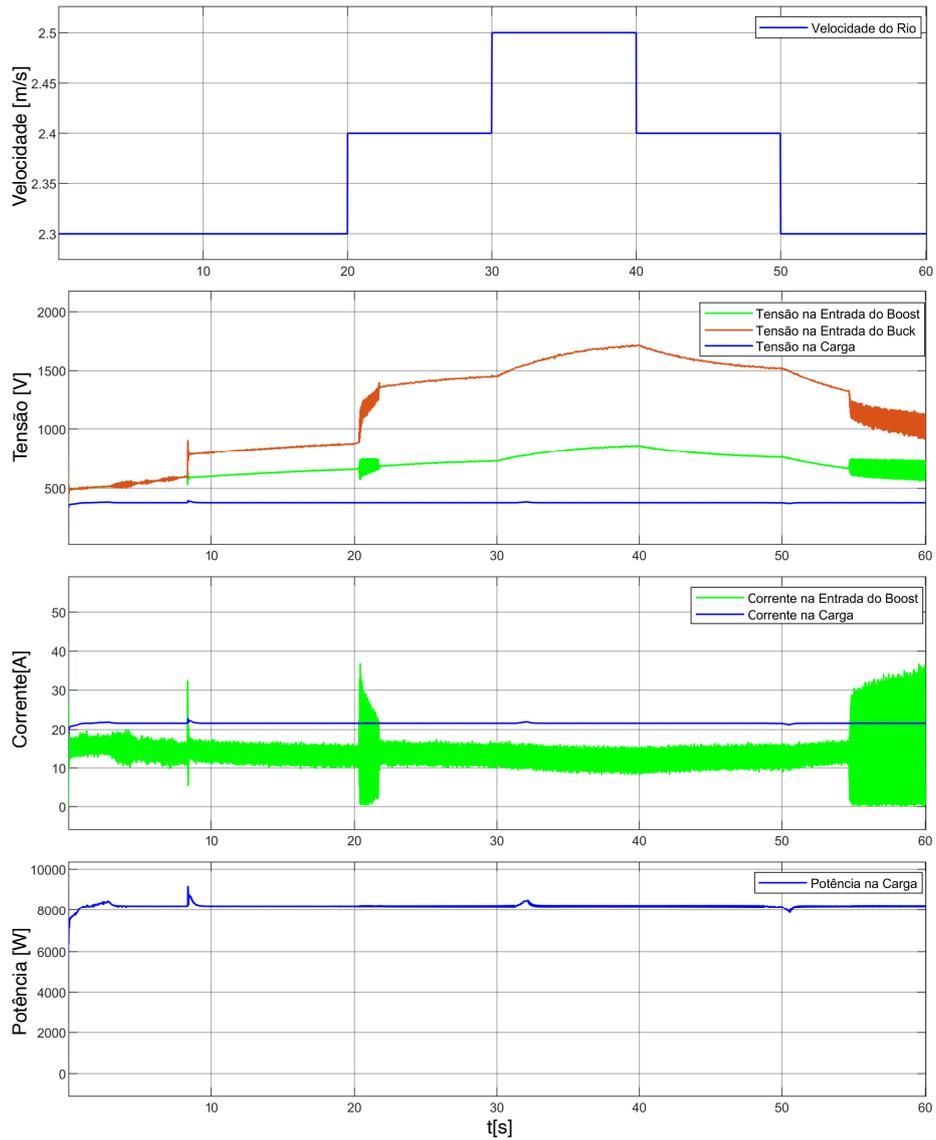


Figura 4.7. Sistema com um Gerador - Velocidade Rio Variável

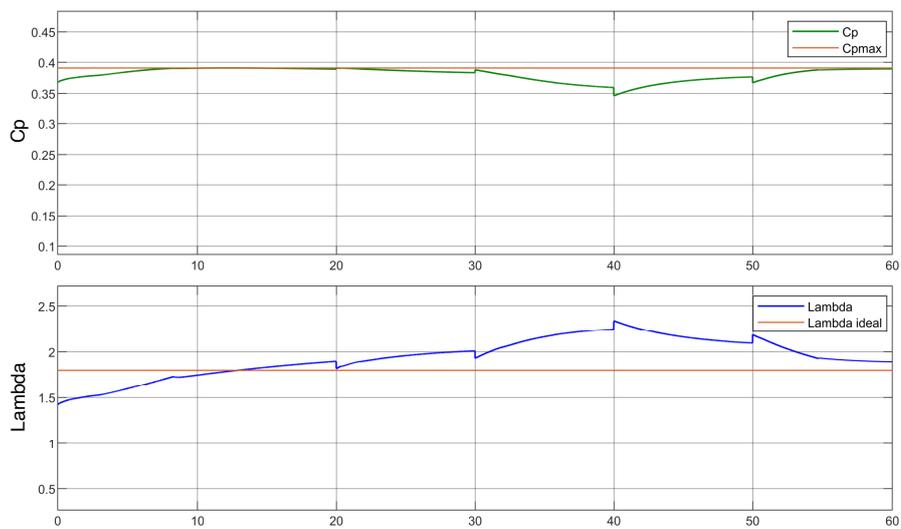
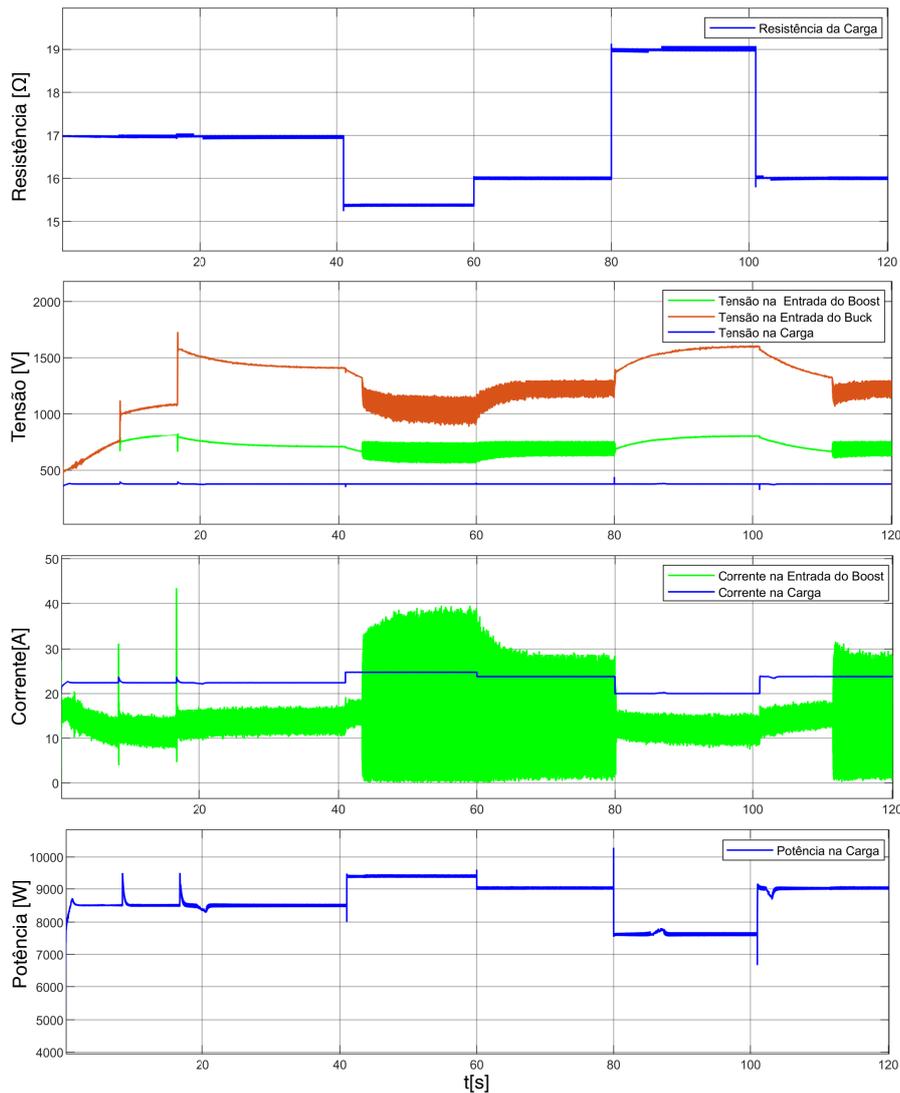


Figura 4.8. Sistema com um Gerador - Velocidade do Rio Variável -  $C_p$  e Lambda

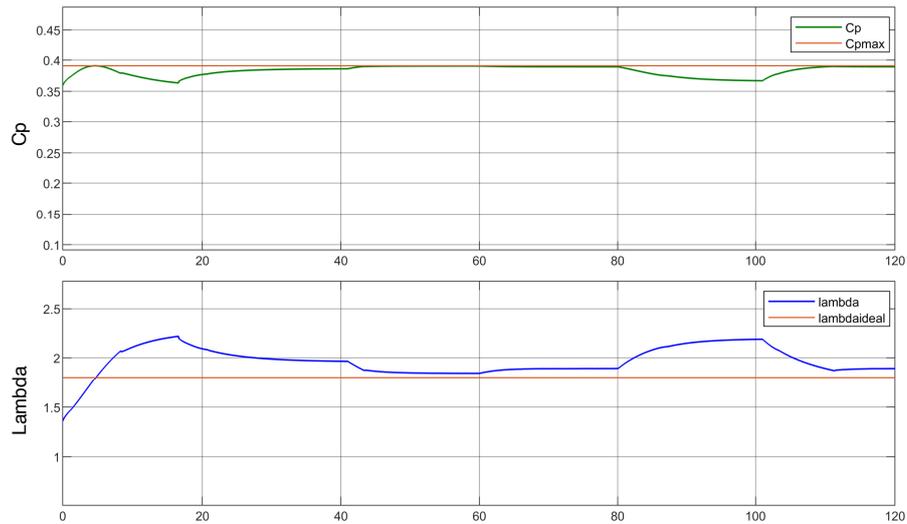
a corrente zero. Por outro lado, o barramento CC com tensão constante de saída impõe que a potência destinada a carga será dependente da resistência da mesma. Adicionalmente, o MPPT continua atuando fazendo o gerador funcionar na melhor região de  $C_p$  e  $\lambda$ , como é possível verificar na Figura 4.8, mas só vai atuar na potência máxima do gerador se a carga solicitar esse valor.

Agora, a velocidade do rio se mantém constante e o valor da carga é alterado. É possível verificar na Figura 4.9 que o valor da tensão de Barramento CC foi mantida constante, embora as tensões de entrada nos circuitos *Boost* e *Buck* tenham acompanhado proporcionalmente a variação de resistência da carga. Já, a corrente na carga acompanhou inversamente as alterações de resistência, em conformidade com a lei de ohm, e a potência seguiu as alterações da corrente de saída.



**Figura 4.9.** Sistema com um Gerador - Carga Variável

Por outro lado, os valores de  $C_p$  e  $\lambda$  fornecidos na Figura 4.10 se mantiveram próximos aos ideais, e quando a carga se aproximou da potência máxima, entre 40s e 60s, essas variáveis se aproximaram ainda mais aos valores ideais. Neste exemplo a atuação do MPPT é importante para que o gerador atue próximo a máxima potência, mas a potência dissipada depende da carga.



**Figura 4.10.** Sistema com um Gerador - Carga Variável -  $C_p$  e Lambda

### 4.3 SISTEMA HIDROCINÉTICO MODULAR COM TRÊS UNIDADES

Uma vez testados os algoritmos de controle para uma unidade hidrocínética, o sistema modular apresentado na Figura 4.11, é composto por três geradores operando em paralelo e uma carga conectada no barramento CC. Este sistema será submetido também a variações de carga e de velocidades de rio. Avalia-se também o cenário de unidades geradoras submetidas a velocidades de rio diferentes.

#### 4.3.1 Velocidade de Rio Variável e Comum com Carga Constante

Inicialmente, foi mantida a carga constante e a velocidade do rio variável. Neste caso, considera-se que as três unidades de geração estão próximos e experimentam a mesma velocidade. Uma vez que as unidades hidrocínéticas são idênticas e que as

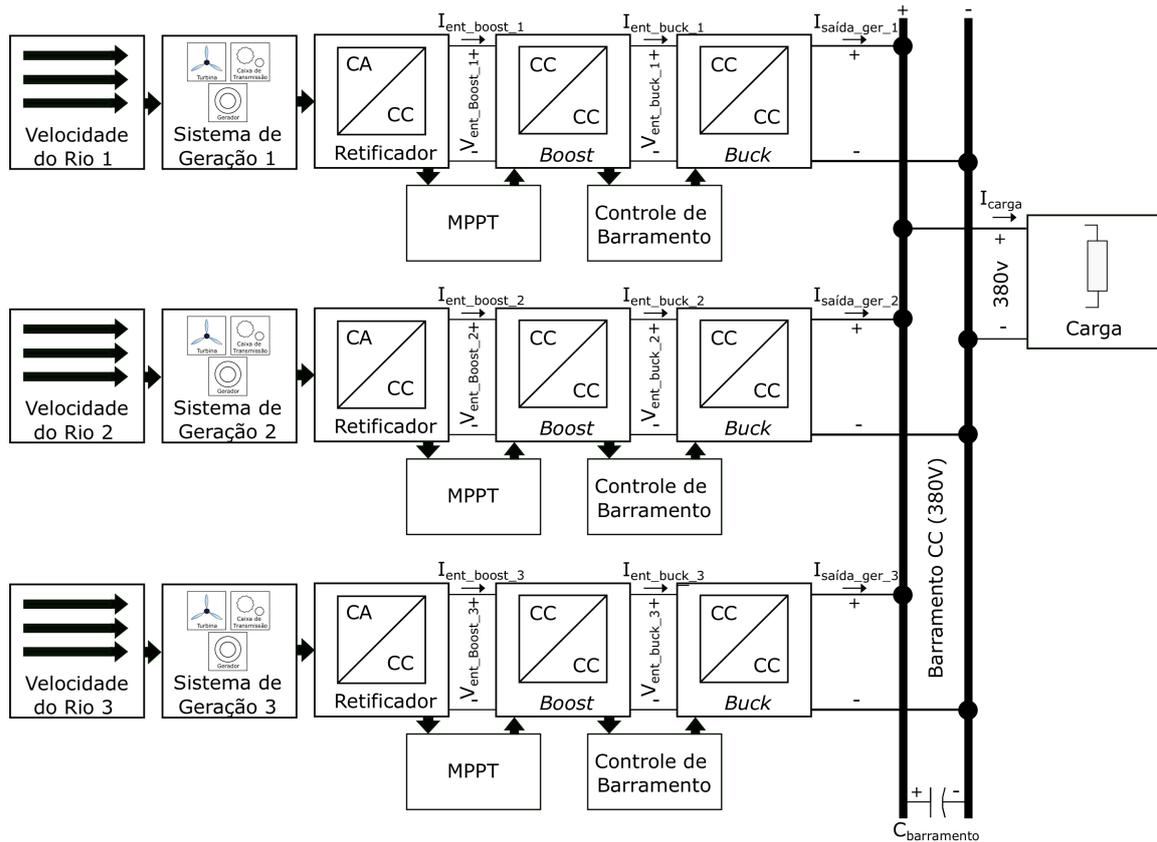


Figura 4.11. Sistema com 3 Geradores Conectados ao Barramento CC

turbinas estão sujeitas à mesma velocidade, os resultados apresentados foram os obtidos para apenas uma dessas unidades.

Pode-se observar na Figura 4.12, que tanto a tensão de entrada do conversor *Boost*, quanto a entrada do *Buck*, acompanham a velocidade do rio. Apesar das variações na fonte mecânica e das tensões nas entradas dos conversores CC, a tensão do barramento CC se manteve constante, demonstrando o bom funcionamento do módulo controle de barramento para a operação em paralelo dos geradores. Verifica-se também que a potência transferida pelos módulos geradores é constante, tendo em vista que a carga e a tensão de barramento se mantiveram fixas. Já, a potência mecânica disponível se manteve superior à potência elétrica requerida pela carga. Diante desse resultado, atribui-se o excesso da potência à perda e ao armazenamento de energia nos elementos passivos capazes de armazenar energia elétrica na estrutura da interface conversora entre cada gerador e a carga. Por outro lado, as variáveis  $C_p$  e  $\lambda$  neste ensaio se mantiveram próximos aos seus valores ideais indicando o bom funcionamento do MPPT, como pode ser observado na figura 4.13.

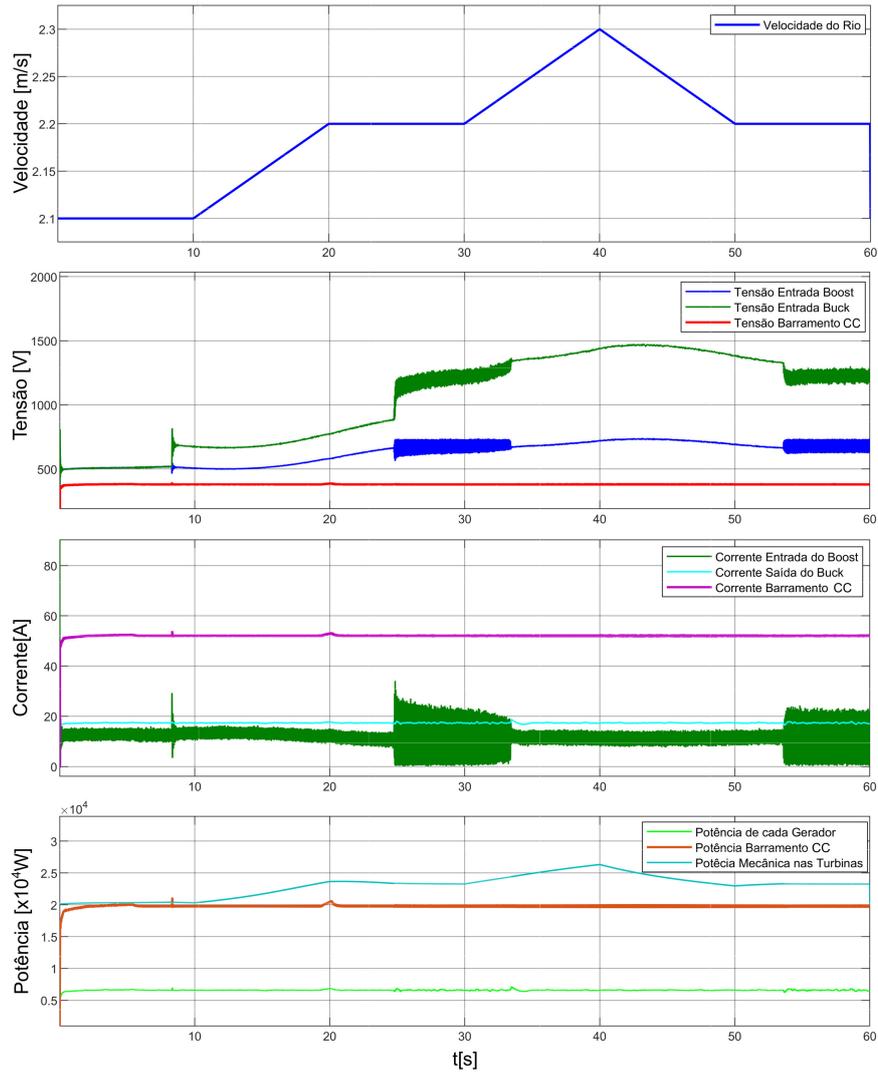


Figura 4.12. Simulação 3 Geradores - Velocidade do Rio Variável

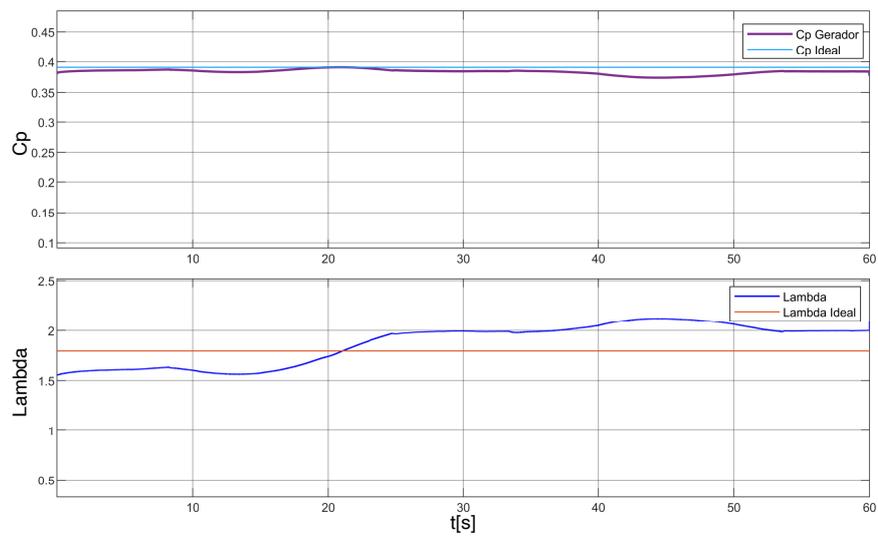


Figura 4.13. Simulação 3 Geradores - Velocidade do Rio Variável-  $C_p$  e Lambda

### 4.3.2 Velocidade de Rio Fixa e Comum com Carga Variável

Na segunda simulação com o sistema modular composto, a velocidade do rio é fixa e a carga conectada ao barramento CC é variável. Na Figura 4.14, observa-se que a corrente na carga é inversamente proporcional à sua resistência e que a tensão de barramento se manteve constante. Já, a potência fornecida seguiu a variação da corrente causada pela variação da carga e, na figura, a potência total na carga é a somatória das contribuições de cada gerador que, neste caso, é três vezes a potência individual obtida da unidade 1.

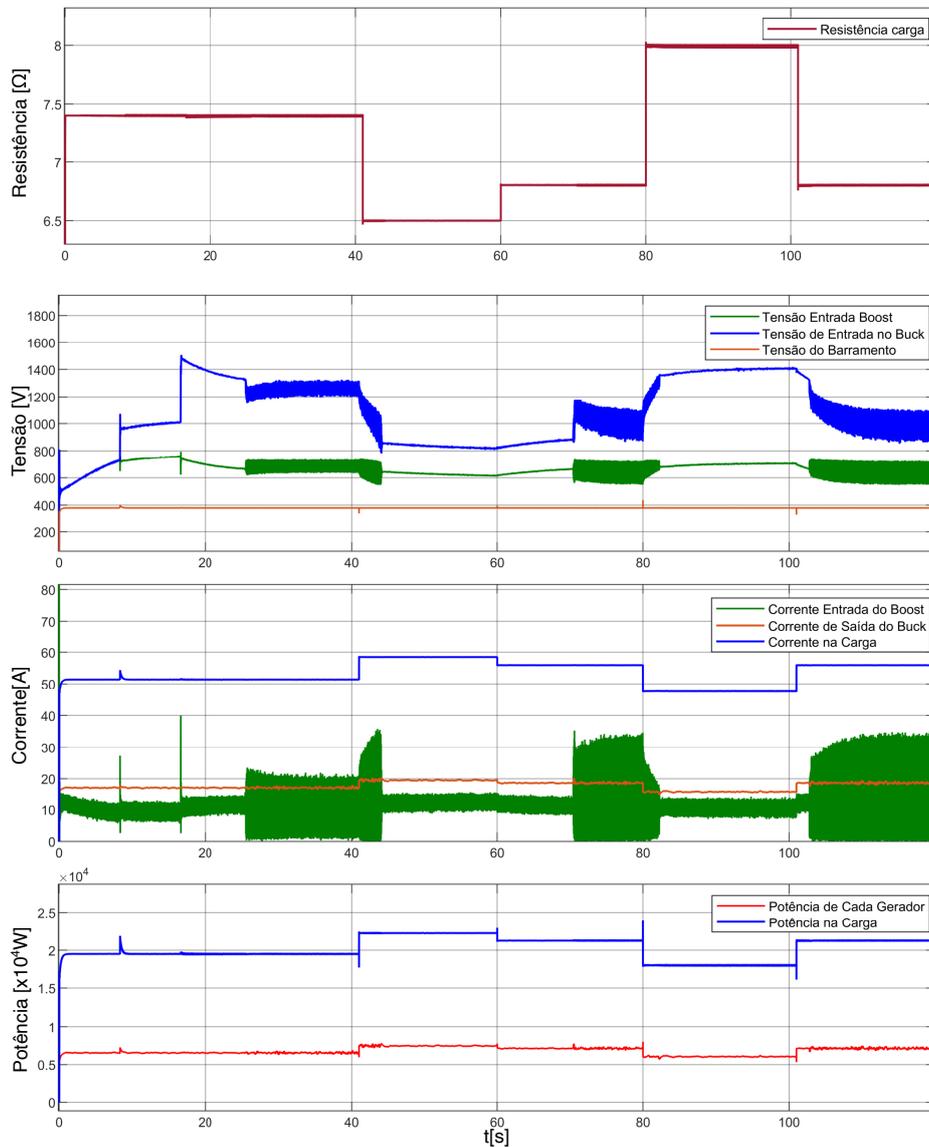
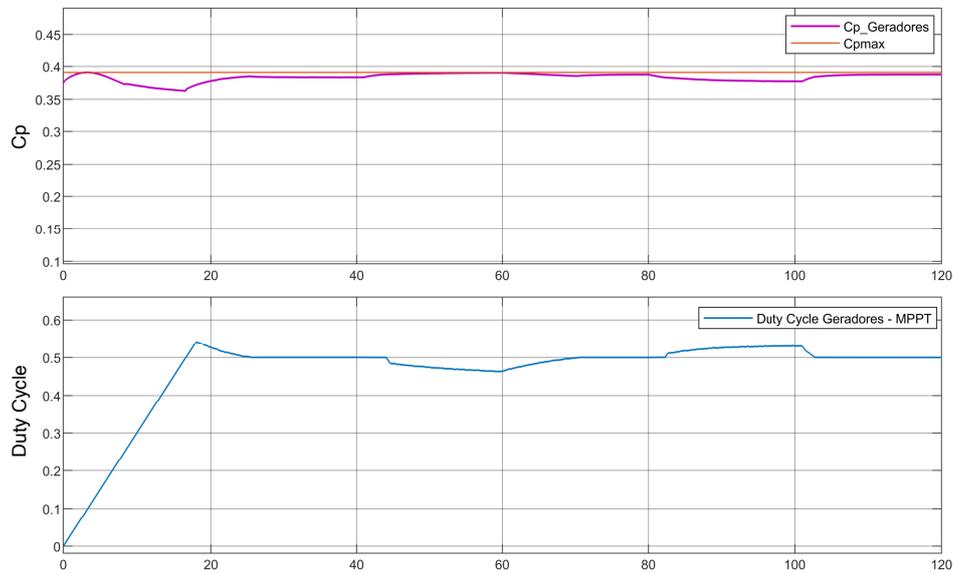


Figura 4.14. Simulação 3 Geradores - Carga Variável

Na figura 4.15 podemos notar que o MPPT atuou conforme o gráfico do *Duty Cycle*, e que o  $C_p$  dos geradores se manteve próximo ao valor ideal, e ficou mais próximo do máximo entre 40s e 60s, que é coerente com o ponto de maior potência da simulação.

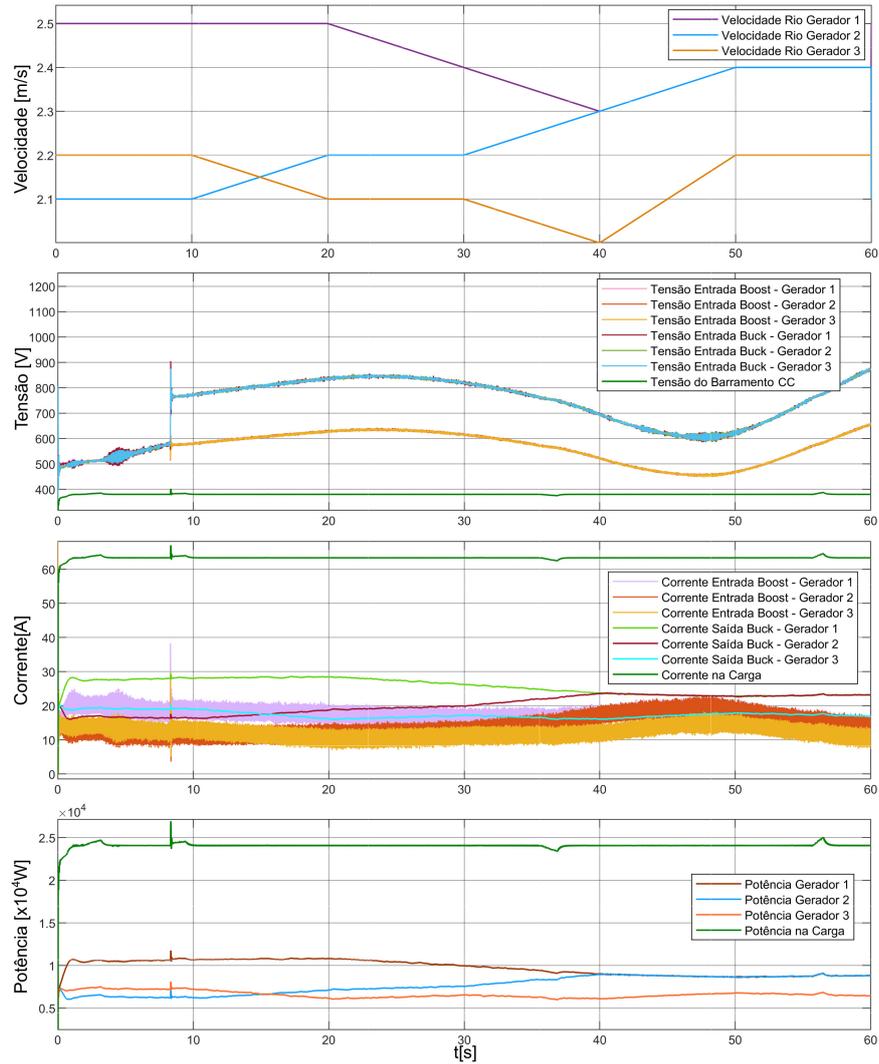


**Figura 4.15.** Simulação 3 Geradores - Carga Variável -  $C_p$  e *Duty Cycle*

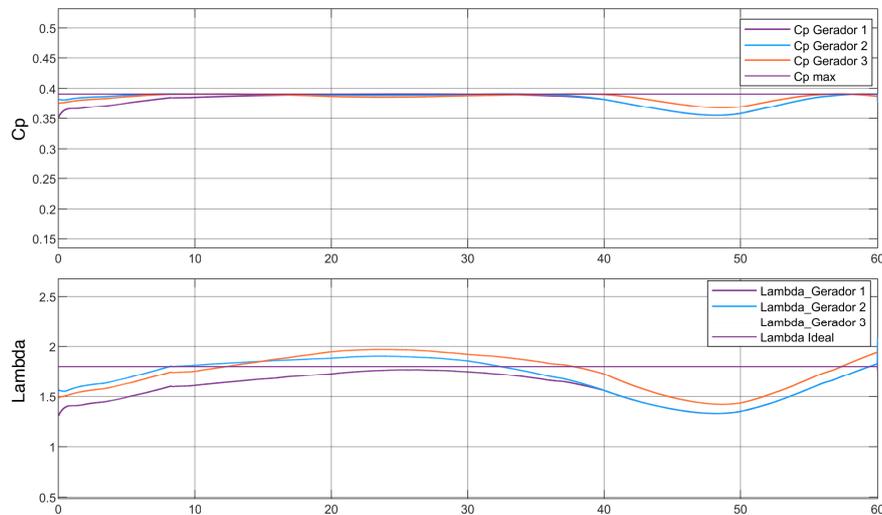
### 4.3.3 Velocidade de Rio Variável e Diferente com Carga Constante

Neste caso, é considerado que as turbinas estão distribuídas em pontos distintos do rio, e que as velocidades de rio são variáveis e independentes para cada gerador, e que a carga é mantida constante. De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.16, a tensão de barramento foi mantida constante e a corrente também se manteve, em virtude da carga com resistência fixa. Ainda, embora a corrente na carga seja constante, cada gerador contribui com correntes proporcionais a velocidade da sua turbina. A mesma situação ocorre quando é observada a resposta da potência, onde cada gerador fornece proporcionalmente conforme sua fonte mecânica, e a potência fixa sobre a carga é resultado de cada contribuição do gerador. Por sua vez, os valores de  $\lambda$  e  $C_p$  se mantiveram próximos aos valores ideais conforme a Figura 4.17 como resultado da atuação do MPPT, mas os valores ideais somente são alcançados apenas quando os geradores atuam na sua potência máxima, o que ocorre somente quando a carga

conectada ao barramento CC consumir a soma da potência máxima dos três geradores.



**Figura 4.16.** Simulação 3 Geradores - Velocidades do Rio Independentes



**Figura 4.17.** Simulação 3 Geradores - Velocidade Rio Independentes -  $C_p$  e Duty Cycle

#### 4.3.4 Desabilitação do MPPT em uma das Unidades Geradoras

Com o objetivo de verificar o funcionamento do sistema modular e a importância do MPPT atuando sobre o *boost*, esta simulação considera a desabilitação desse algoritmo na unidade de geração 3. Para isso, a velocidade para os três geradores é considerada a mesma e a carga é alterada, como pode ser observado na Figura 4.18. Verifica-se que não houve grandes mudanças nos gráficos das tensões das unidades 1 e 2, em relação às simulações anteriores. Contudo, pode-se observar que corrente do Gerador 3 representa uma contribuição bem inferior na maior parte do tempo em relação aos outros geradores, o que também pode ser conferido monitorando a potência do gerador 3, mesmo as turbinas sendo submetidas à mesma velocidade de rio.

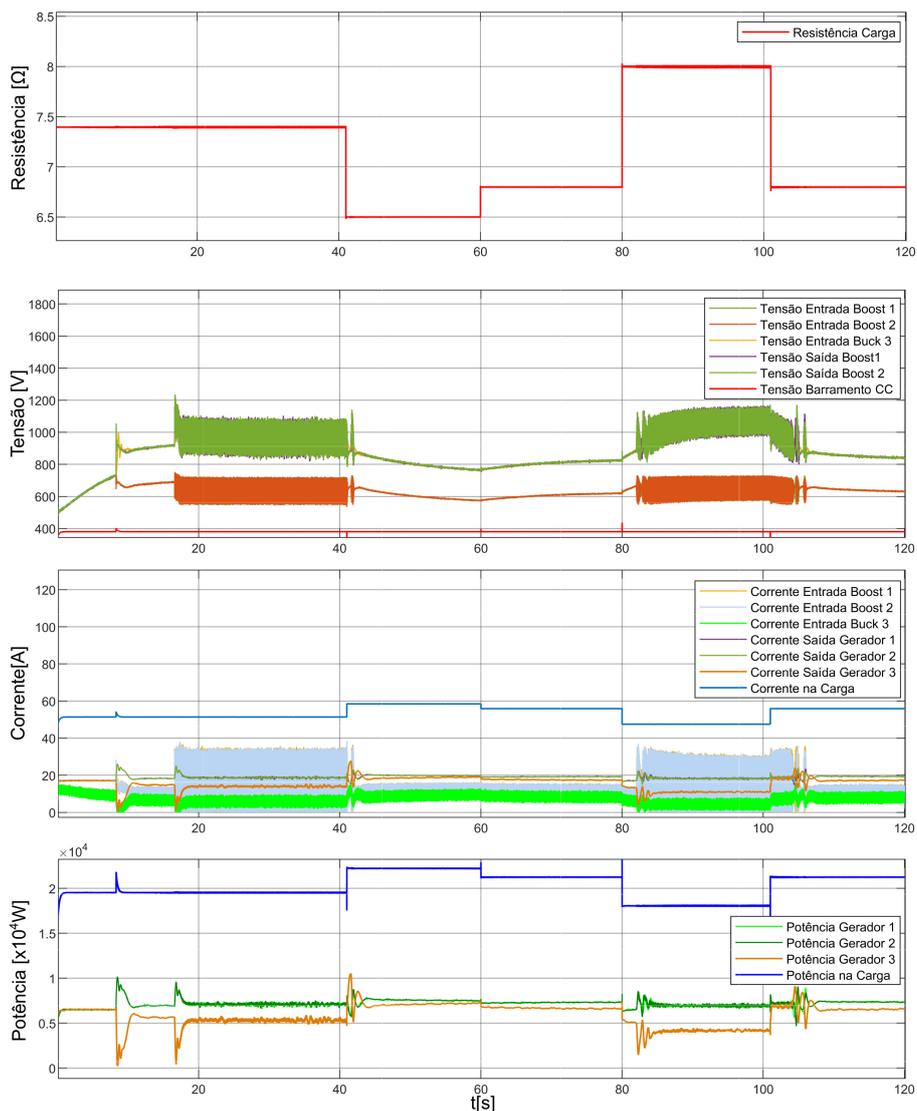
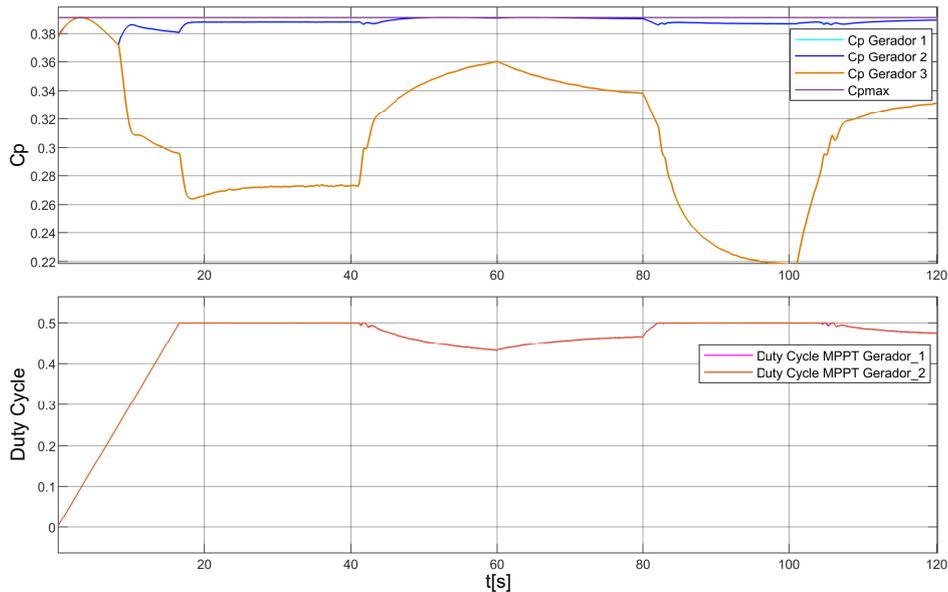


Figura 4.18. Simulação 3 Geradores - Carga Variável - Gerador 3 Sem o Boost e MPPT

Na Figura 4.19, observa-se que no gráfico do *Duty Cycle*, foram representadas as curvas para os geradores 1 e 2, tendo em vista que essa parte do circuito foi suprimida no sistema do gerador 3. Já, no gráfico do  $C_p$  é que as diferenças do gerador 3 em relação aos demais se tornou ainda mais evidente, pois o resultado ficou longe do  $C_p$  max, representando o pior desempenho em relação aos ensaios apresentados anteriormente, enquanto os demais geradores se mantiveram próximos ao  $C_p$  ideal.



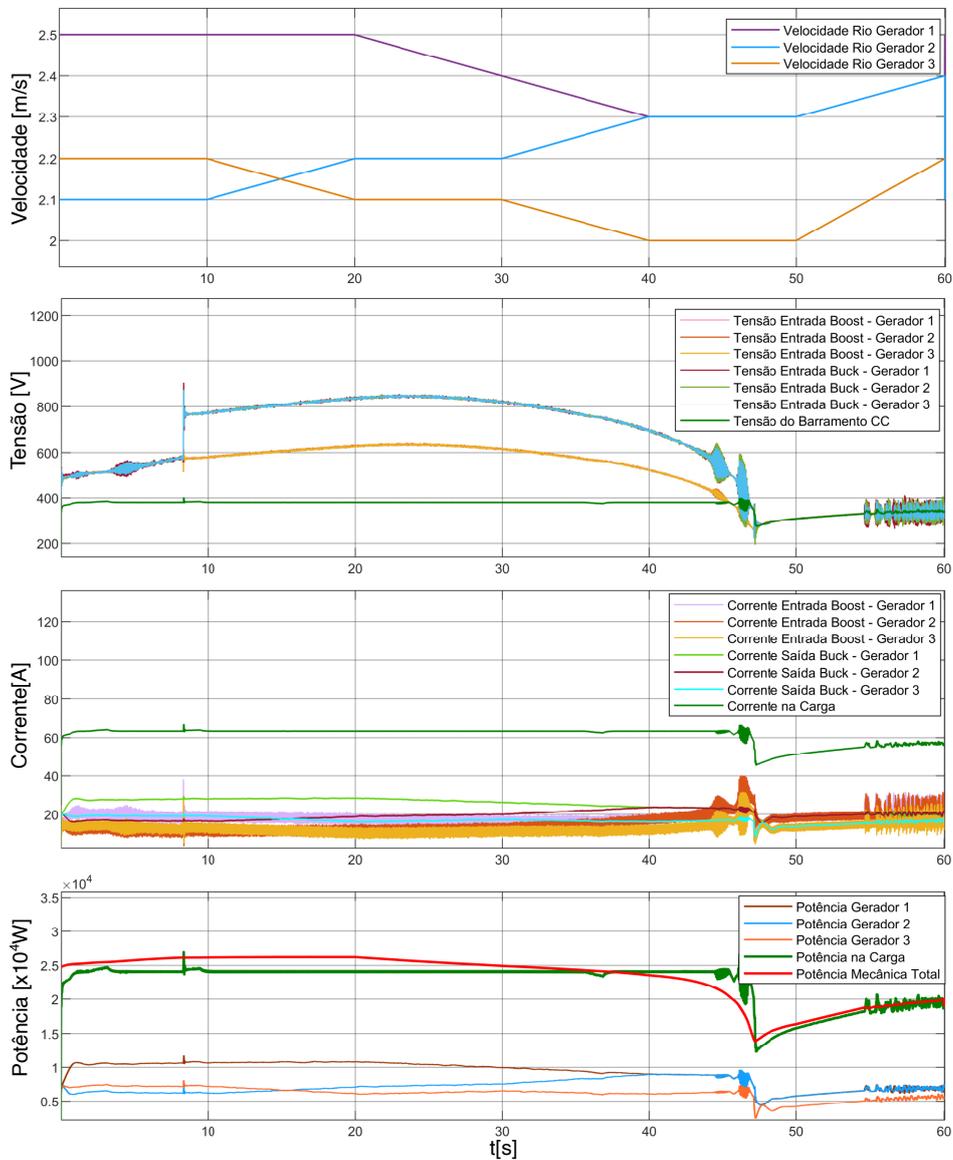
**Figura 4.19.** Simulação 3 Geradores - Carga Variável - Gerador 3 Sem o Boost e MPPT -  $C_p$  e  $\lambda$

Esse último ensaio demonstrou que a supressão do estágio MPPT controlando o conversor *Boost*, implica em uma redução considerável do rendimento do gerador que é representado pela variável  $C_p$ , define quanto da energia mecânica disponível irá se tornar em potência útil transmitidas as cargas.

#### 4.3.5 Operação Durante Excesso de Carga Elétrica

Neste caso, avalia-se o que ocorre quando a carga conectada ao barramento solicita potência superior à potência mecânica disponível nas turbinas. Aqui, o algoritmo de MPPT está habilitado em todas as unidades e que o perfil de velocidade é variável e diferente, como adotado na Seção 4.3.3. Na Figura 4.20, observa-se que nos instantes de tempo entre 40 e 60 seg. acontece essa situação. Especificamente, durante aproximadamente 4 seg. o sistema se mantém com tensão e potência constante, mas depois

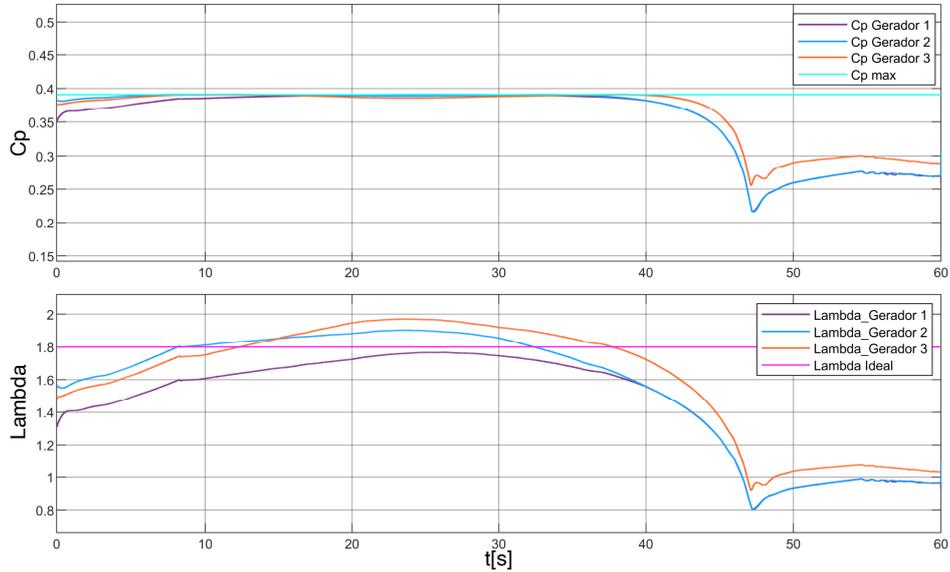
existe um afundamento dessas variáveis, devido ao desbalanço entre a potência elétrica e a potência de entrada nas turbinas. Isto está relacionado com o armazenamento de energia elétrica nos capacitores e indutores.



**Figura 4.20.** Simulação 3 Geradores - Velocidade Variável - Queda Potência Mecânica

Por outro lado, as grandezas  $C_p$  e  $\lambda$  sofrem também uma queda abrupta pois os geradores saem da região de funcionamento ideal quando a potência mecânica é inferior a potência solicitada pela carga, como mostrado na Fig. 4.21. Portanto, esta simulação aponta que um sistema de geração de energia elétrica com a estrutura adotada tem uma necessidade de estocagem de energia, com a função de fornecer potência ao barramento CC em situações onde ocorram aumento de cargas ou redução da potência mecânica

nas pás dos geradores. Esse armazenamento poderá ocorrer via banco de baterias, que carregam enquanto a potência mecânica disponível for maior que o requisitado na carga e fornecem potência quando essa situação se inverter.



**Figura 4.21.** Simulação 3 Geradores - Carga Variável - Gerador 3 Queda na Potência Mecânica -  $C_p$  e  $\lambda$ .

#### 4.3.6 Síntese do Capítulo

Este capítulo apresentou a validação dos algoritmos de controle para maximização de extração de potência e regulação de tensão CC. A operação em paralelo de geradores elétricos foi testada diante de variações de velocidade de rio e de carga terminal. Ainda, foram considerados os cenários onde a velocidade de rio é diferentes para cada unidade, e onde o MPPT é desativado para uma das unidades. Finalmente, é possível avaliar a dinâmica completa do sistema diante de cargas elétricas elevadas em relação à potência mecânica transmitida pela turbina.

# CONCLUSÕES

Este trabalho tratou sobre a modelagem e simulação de um sistema de geração de energia elétrica por meio de turbinas hidrocínéticas instaladas em rios, viabilizando a conversão de uma fonte de energia variável em uma tensão constante entregue ao barramento CC, juntamente com uma lógica de controle que permite maximização da potência extraída pelas pás das turbinas.

As simulações realizadas, referentes à associação de três módulos de geração, foi possível verificar que cada módulo irá fornecer potência proporcional a sua respectiva fonte mecânica, ou seja, não há necessidade que as turbinas experimentem a mesma velocidade do rio. Esse resultado demonstra a possibilidade de criação de parques de geração com vários módulos espalhados pelo rio, ou até em vários rios, conectados via barramento CC.

Outro resultado importante é que ao fixar a tensão de saída de cada módulo, dentro dos limites de operação, a carga conectada ao barramento define a potência a ser disponibilizada pelo sistema. Esse fato implica que poderá haver um potencial excedente, quando o valor solicitado pela carga for inferior ao valor máximo disponível para uma determinada velocidade do rio. E em situações, onde a potência elétrica requerida pela carga for maior que a disponível nas pás da turbina, ocorre um afundamento da tensão de barramento CC, colocando-o em uma operação abaixo do valor nominal.

Com isso, para aumentar a robustez do sistema e melhor aproveitamento do potencial disponível, sugere-se a inclusão de um ou mais bancos de bateria ao barramento CC, para armazenar o potencial sobressalente, que poderá suprir o sistema em momentos de pico na carga ou baixa velocidade do rio.

Diante do exposto neste trabalho, podemos vislumbrar que os módulos de geração poderiam ser produzidos industrialmente, e da mesma forma como é feita a comerciali-

zação de painéis solares, onde os consumidores comprariam em quantidades, conforme sua demanda, para atender residências, indústrias, cidades ou para conexão a rede convencional de energia. Com isso, entende-se que o uso da geração hidrocínética poderá contribuir para a ampliação da oferta de energia elétrica e também na mudança da matriz energética, permitindo a redução da emissão de dióxido de carbono e a dependência de fontes não renováveis. Utilizando-se de uma fonte limpa e com baixo impacto ambiental.

Como propostas de trabalhos futuros, destacam-se:

- Incorporação nas simulações de um banco de baterias, possibilitando o armazenamento da potência sobressalente, para uso em momentos de pico da carga ou de baixa velocidade do rio;
- Monitoramento do sistema possibilitando a identificação de falhas nos módulos, visando permitir a correção do funcionamento ou desligamento;
- Implementação de sistemas de proteção contra curto-circuito e circuito aberto;
- Estudo sobre formas de conexão do barramento CC à rede convencional de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BITTENCOURT, M. de P.; NUNES, M. A.; HOLANDA, P. da S.; ALVES, C. da S.; BLANCO, A. L. A. M. C. J. C.; JUNIOR, A. C. P. B.; SECRETAN, Y. Avaliação de potencial hidrocínético remanescente a jusante de uhes na bacia hidrográfica do rio tietê. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, 2016. ISSN 2447-6102. Disponível em: <<http://ojs.bce.unb.br/index.php/ripe/article/view/23294>>. Citado na página 6.

BP. *Energy Outlook 2020*. Londres, Inglaterra: BP, 2020. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf>>. Citado na página 1.

CANMETENERGY. *Assessment of Canada's Hydrokinetic Power Potential*. Ottawa, Canadá: CanmetENERGY, 2010. Disponível em: <[https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/files/pubs/NRCanCHC\\_Assessment\\_of\\_Canadas\\_Hydrokinetic\\_Power\\_Potential\\_FinalReport\\_EN.pdf](https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/files/pubs/NRCanCHC_Assessment_of_Canadas_Hydrokinetic_Power_Potential_FinalReport_EN.pdf)>. Citado na página 3.

COELHO, R. F. *Estudo dos conversores Buck e Boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos*. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, dez. 2008. Citado 2 vezes nas páginas iv and 31.

ELS, R. H. van; CAMPOS, C. de O.; HENRIQUES, A. M. D.; BALDUINO, L. F. Hydrokinetic propeller type turbine for the electrification of isolated householders or community and social end-users. In: *17th International Congress of Mechanical Engineering*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 6.

EPE. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 - ano base 2019*. Rio de Janeiro, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Citado na página 2.

EPE. *Balanco Energético Nacional 2021 - ano base 2020*. Rio de Janeiro, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Citado 2 vezes nas páginas iii and 3.

HOLANDA, P. da S. *Avaliã de Potencial Hidrocínético à Jusante de Centrais Hidroelétricas*. 61 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) — Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Dez. 2017. Citado na página 6.

IBRAHIM, W.; MOHAMED, M.; ISMAIL, R.; LEUNG, P.; XING, W.; SHAH, A. Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review. *Energy*

- Reports*, v. 7, p. 2021–2042, 2021. ISSN 2352-4847. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721002171>>. Citado na página 3.
- IEA. *Key World Energy Statistics 2021*. Paris, França: IEA, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>>. Citado 3 vezes nas páginas iii, 1, and 2.
- JUNIOR, A. C. P. B.; ELS, R. V.; SALOMON, L. R. B.; OLIVEIRA, T.; RODRIGUES, A. P.; FERREIRA, W. O. *Turbina Hidrocinética Geração 3*. Brasília, Brasil: Universidade de Brasília, 2008. Disponível em: <<https://www.cgti.org.br/publicacoes/turbina-hidrocinetica-geracao-3/>>. Citado na página 6.
- KHAN, M.; BHUYAN, G.; IQBAL, M.; QUAICOE, J. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied Energy*, v. 86, n. 10, p. 1823–1835, 2009. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909000713>>. Citado 3 vezes nas páginas iii, 4, and 5.
- MIRANDA, A. R. S. de. *Sistema Modular de Acionamento, Controle e Monitoramento de Ensaio de Turbinas de Eixo Horizontal*. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, Jul. 2018. Citado na página 5.
- NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. Rio de Janeiro, Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2012. ISBN 978-0470-54756-4. Citado na página 26.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Rio de Janeiro, Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2000. Citado na página 27.
- ONU. *Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Nova Iorque, EUA: ONU, 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/mre/pt-br/arquivos/documentos/clima/20160119ODS.pdf>>. Citado na página 2.
- RASHID, M. H. *Eletrônica de Potência - Circuitos, Dispositivos e Aplicações*. São Paulo, Brasil: Makron Books, 1999. ISBN 85-346-0598-x. Citado na página 16.
- VÁSQUEZ, F. A. M.; ESCUDERO, A. P.; BAINY, R. G.; SILVA, K. M. e. Fundamentals of instantaneous-values-based busbar differential protection. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 10.
- WU, B.; LANG, Y.; ZARGARI, N.; KOURO, S. *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. New Jersey, EUA: John Wiley & Sons, Inc., 2011. ISBN 978-1-118-02900-8. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 13.