

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DOUGLAS YURI LEITE PASCUETTI**

**ALTERNATIVAS PARA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DE TURBINAS  
EM MICRO CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO  
2021**

**DOUGLAS YURI LEITE PASCUETTI**

**ALTERNATIVAS PARA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DE TURBINAS EM  
MICRO CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**

**Alternatives for speed regulation for turbines in micro hydroelectric plants**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof.Me César Augusto Portolann

**PATO BRANCO**

**2021**



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**ALTERNATIVAS PARA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DE TURBINAS EM MICRO CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**”, do aluno “**DOUGLAS YURI LEITE PASCUETTI**” foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **283** de 2021.

Fizeram parte da banca os professores:

**Prof. Me. César Augusto Portolann**

**Prof. Dr. Géremi Dranka**

**Prof. Dr. Ricardo Vasques de Oliveira**

**A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica**

## DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho ao meus pais, Claudemir e Jucemara.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que me apoiaram ao longo da graduação. Ao meus pais por sempre proporcionarem e incentivarem a educação. Aos meus irmãos pelos momentos de fraternidade.

Aos meus amigos pelos momentos de suporte e companheirismo. A equipe Pato Baja pela experiência única proporcionada durante a graduação.

E por fim, a todos os professores que instigaram meu conhecimento e auxiliaram em meu desenvolvimento acadêmico.

## EPÍGRAFE

*Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela  
tampouco a sociedade muda.*

Paulo Freire

## RESUMO

PASCUETTI, Douglas Y. Leite. Alternativas para a regulação de velocidade de turbinas em micro centrais hidrelétricas. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

Embora o acesso à energia elétrica por parte da população venha aumentando no Brasil, algumas comunidades isoladas ainda convivem com a falta de fornecimento de energia elétrica. Também, sabe-se que a rede elétrica rural periodicamente sofre com interrupções de fornecimento devido principalmente a intempéries climáticas, o que causa prejuízo a aqueles que são seus dependentes. A utilização de micro centrais hidrelétricas pode amenizar o problema das interrupções no fornecimento, além de proporcionar outras vantagens como redução de custos com energia elétrica. Porém, o custo de implementação de micro centrais com equipamentos comerciais (particularmente o regulador de velocidade) é relativamente elevado e conseqüentemente inibidor e desestimulante para a difusão deste tipo de geração. Assim, nesse trabalho apresenta-se um estudo através de uma revisão bibliográfica para avaliar alternativas de substituição de reguladores de velocidade comerciais, por outros alternativos que fazem uso de técnicas não triviais como por exemplo carga auxiliar, implementada com dispositivos eletrônicos. Evidencia-se que a regulação de velocidade mantém o equilíbrio de potência ativa entre geração e carga, resultando em velocidade e frequência mantidos dentro de uma faixa de operação viável. Enfatiza-se assim que a necessidade de discutir métodos alternativos para regulação de velocidade de conjuntos turbina/gerador, visa atender uma população que carece de soluções para aplicações hidráulicas de pequeno porte, e que um sistema de geração de energia complementar pode suprir as perdas temporárias da redes de distribuição e minimizar seu impactos econômicos.

**Palavras-chave:** Hidrogeração. Controle de velocidade. Geração de energia elétrica. Controle de carga.

## ABSTRACT

PASCUETTI, Douglas Y. Leite. Alternatives for speed regulation for turbines in micro hydroelectric plants. 53 f. Monograph. (Degree in Electrical Engineering) – Course of Electrical Engineering, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

Although the access to electricity by the population is increasing in Brazil, some isolated communities still live with lack of electricity supply. Hence, rural electricity grid periodically suffers from supply interruptions mainly due to weather conditions, which causes damage to those who are its dependents. The use of micro-hydroelectric power plants can alleviate the problem of interruptions in supply, in addition to providing other advantages such as a reduction in electricity costs. However, the cost of implementing micro-plants with commercial equipment (particularly the speed regulator) is relatively high and consequently inhibiting and discouraging the diffusion of this type of generation. Thus, this work presents a study through a literature review to evaluate alternatives for replacing commercial speed regulators by other alternatives that make use of non-trivial techniques such as auxiliary load implemented with electronic devices. It is evident that speed regulation maintains the balance of active power between generation and load, resulting in speed and frequency kept within a viable operating range. It is thus emphasized that the need to discuss alternative methods for speed regulation of turbine/generator sets, aims to serve a population that lacks solutions for small hydraulic applications, and that a complementary power generation system can supply temporary losses distribution networks and minimize their economic impacts.

**Keywords:** Hydroelectricity. Speed regulation. Electric power generation. Load control.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Custo nivelado da eletricidade (US\$/kWh).....	12
Figura 2- Número de pequenas hidrelétricas, capacidade instalada e energia gerada. .....	13
Figura 3 - Turbina Turgo. ....	18
Figura 4- Turbina Pelton.....	19
Figura 5 - Turbina Michell-Banki.....	19
Figura 6 - Bomba centrífuga operando como turbina. ....	20
Figura 7 - Turbina Francis de eixo vertical. ....	21
Figura 8 - Gerador síncrono monofásico de dois polos.....	23
Figura 9 - Representação de máquina CC.....	24
Figura 10 - Conexão de banco de capacitores nos terminais do estator de um gerador de indução. ....	25
Figura 11 - Malha de sistema de regulação de velocidade. ....	26
Figura 12 - Representação de um pequeno sistema elétrico isolado.....	27
Figura 13 - Representação de uma micro central hidrelétrica isolada.....	30
Figura 14 - Representação equivalente do circuito. ....	30
Figura 15 - Sistema trifásico de geração com gerador GI auto excitado e controlador de carga. ....	33
Figura 16 - Controlador de carga, Chopper.....	34
Figura 17 – Tensão de saída no circuito Chopper step-down. ....	35
Figura 18 - Tensão nos terminais do gerador considerando fonte constante e carga variando.....	36
Figura 19 - Curva característica de tensão natural e modificada do gerador CC.....	37
Figura 20 - Tensão e corrente terminal do gerador de indução.....	38
Figura 21 - Roda de pá, turbina Pelton. ....	40
Figura 22 - Conjunto pás mais injetor, turbina Pelton.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação de hidrelétricas de acordo com a potência instalada. ....	16
Tabela 2 - Classificação de pequenas centrais hidrelétricas de acordo com a potência instalada e altura da queda d'água. ....	16
Tabela 3 - Quantidade de resultados exibidos por pesquisa de palavra chave .....	39

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Indicadores de qualidade DEC e FEC.....	11
Quadro 2 - Indicadores de qualidade DIC e FIC. ....	11

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABRAGEL	Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
C.C	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
<i>Carga dump</i>	Carga auxiliar ou secundária
CERPCH	Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção por Unidade Consumidora
EIA	Energy Information Administration
EPE	Empresas de Pesquisas Energéticas
ESHA	European Small Hydropower Association
FEC	Frequência de interrupção por unidade consumidora
FIC	Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora
FMM	Força Magneto Motriz
GI	Gerador de Indução
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma brasileira
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PWM	Modulação por largura de pulso
SIN	Sistema Interligado Nacional

μCH      Micro Central Hidrelétrica

W      Watt

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	OBJETIVOS .....	13
1.1.1	OBJETIVO GERAL.....	13
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
2.1	ENERGIA HIDRÁULICA.....	15
2.2	CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	15
2.3	CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CARACTERÍSTICAS DOS RESERVATÓRIOS .	16
2.4	CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS.....	17
2.4.1	Turbina turgo .....	17
2.4.2	Turbina pelton .....	18
2.4.3	Turbina michell-banki .....	19
2.4.4	Bombas centrífugas operando como turbina .....	20
2.4.5	Turbina francis.....	20
2.5	CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE TURBINAS .....	21
2.6	GERADORES .....	22
2.6.1	Gerador síncrono .....	22
2.6.2	Gerador de corrente contínua .....	23
2.6.3	Gerador de indução.....	24
2.7	SISTEMAS DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE .....	25
3	METODOLOGIA.....	26
4	DISCUSSÃO E RESULTADOS.....	27
4.1	EQUACIONAMENTO GENÉRICO DA VELOCIDADE VERSUS POTÊNCIA DA FONTE E CARGA.....	27

4.2 ANÁLISE DE SISTEMA DE GERAÇÃO COM GERADOR DO TIPO CC.....	29
4.3 ANÁLISE DE SISTEMA DE GERAÇÃO ISOLADO COM GERADOR DE INDUÇÃO.....	32
4.4 RESULTADOS PARA O GERADOR CC .....	36
4.5 RESULTADOS PARA O GERADOR DE INDUÇÃO .....	37
4.6 APLICABILIDADE DAS PROPOSTAS.....	39
5 CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS.....	44

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica desde seu surgimento transformou a qualidade de vida humana e proporcionou novas tecnologias que continuam a auxiliar em nosso desenvolvimento. De acordo com Souza (2001), o homem sempre procurou melhorar sua qualidade de vida e foi nesse contexto que a energia ganhou destaque. Desde o fogo na idade média até os estudos sobre o eletromagnetismo que mais tarde possibilitariam a conversão de energia mecânica em energia elétrica, a qual passou a ser comercializada no século XIX.

Pereira et al (2005) defende que para um país se desenvolver economicamente e fornecer bem estar social a seus cidadãos é necessário acesso à energia elétrica sem restrições. Afirma ainda que a escassez de energia agrava a pobreza, principalmente no campo, onde há escassez de oportunidades. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) divulgou no Censo Demográfico de 2010 que o serviço de energia elétrica apresentou uma cobertura de 97,8% dos domicílios e que na área urbana esse percentual chega quase a 100% enquanto na área rural atinge 89,7%.

Paralelo ao problema da ausência de fornecimento de energia elétrica, há também a questão sobre qualidade da energia disponível nas propriedades rurais. Segundo Murphy (1997), os constantes desligamentos e danos a equipamentos causados por distúrbios elétricos vem atingindo um número crescente de consumidores.

Através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) normatiza e padroniza todas as atividades relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição. Existem quatro indicadores de qualidade de serviço, DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), FEC (Frequência de interrupção por unidade consumidora) que indicam respectivamente, o número de horas e a frequência em média que a unidade consumidora fica sem energia elétrica. Enquanto, DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) e FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora) mostram a duração e o número de vezes que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica.



Com base nos dados fornecidos pela ANEEL, observados no Quadro 1 é possível analisar o DEC e o FEC anual das concessionárias brasileiras. Nota-se que ao longos dos últimos anos os valores do DEC apurados ficaram acima dos limites definidos que variaram de 17,44 à 12,72 horas. Observa-se também que apenas o FEC está de acordo com os limites fornecidos.

DEC E FEC BRASIL										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
DEC APURADO (horas)	18,26	18,42	18,61	18,78	18,49	18,03	18,60	15,81	14,35	12,60
DEC LIMITE (horas)	17,44	17,01	16,23	15,87	15,19	14,58	13,94	13,31	12,77	12,72
FEC APURADO	11,27	11,31	11,21	11,17	10,60	10,08	9,86	8,87	8,20	7,06
FEC LIMITE	15,19	14,54	13,61	13,19	12,47	11,77	11,03	10,33	9,72	9,52

**Quadro 1: Indicadores de qualidade DEC e FEC.**

Fonte: Adaptado de ANEEL (2019).

Ainda, no Quadro 2 analisando os valores de qualidade individuais para o município de Pato Branco, tem-se que o valor de DIC anual urbano é de 20,77 horas, enquanto o não urbano é de 41,76 horas. Para o FIC, o comportamento é similar apresentando também uma diferença de cinquenta por cento.

COPEL DISTRIBUIÇÃO S.A. (Urbano)			DIC (em horas)			FIC (número de interrupções)		
Conjunto	DEC	FEC	ANUAL	TRIM.	MENSAL	ANUAL	TRIM.	MENSAL
Pato Branco	11	8	20,77	10,38	5,19	12,95	6,47	3,23

COPEL DISTRIBUIÇÃO S.A. (Não urbano)			DIC (em horas)			FIC (número de interrupções)		
Conjunto	DEC	FEC	ANUAL	TRIM.	MENSAL	ANUAL	TRIM.	MENSAL
Pato Branco	11	8	41,76	20,88	10,44	30,09	15,04	7,52

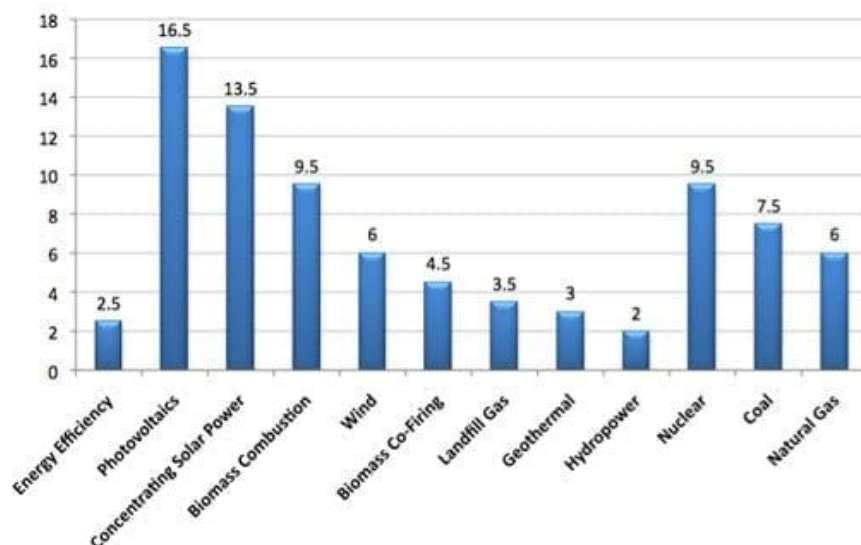
**Quadro 2 - Indicadores de qualidade DIC e FIC.**

Fonte: Adaptado de ANEEL(2019).

Os dados observados refletem que a interrupção de energia elétrica no país ainda é um problema sendo mais agravante em áreas mais afastadas dos

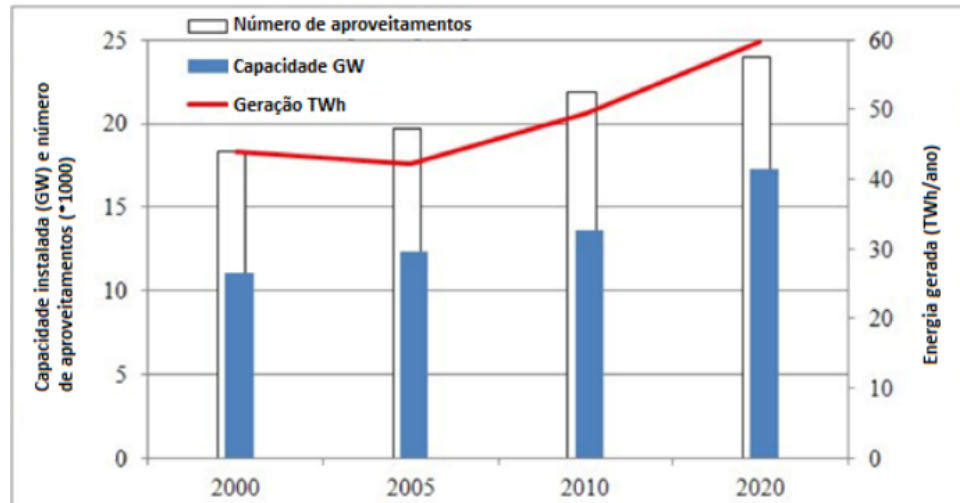
grandes centros, como as áreas rurais. Nesse contexto, surge a necessidade de buscar alternativas para reduzir os impactos causados por esse problema.

De acordo com National Hydropower Association (2021) a hidroeletricidade é uma opção de geração viável técnico/econômica quando comparado, por exemplo, com a termoeletricidade, considerando o custo nivelado da eletricidade conforme observado na Figura 1, onde tem-se aproximadamente um custo de 2 US\$/kWh. As micro centrais hidrelétricas ( $\mu$ CH's) viabilizam o atendimento a locais de difícil acesso para rede elétrica, proporcionando um ambiente de incentivo a negócios que impacta toda uma região, resultando em benefícios econômicos e sociais. Portanto, uma vez que o potencial hídrico brasileiro é enorme, estima-se 260 GW. E favorável a esses pequenos aproveitamentos, as micro centrais são alternativas para a solução de problemas como o fornecimento de energia elétrica precário ou ainda a ausência de fornecimento (Tiago Filho *et al*, 2006).



**Figura 1 - Custo nivelado da eletricidade (US\$/kWh).**  
**Fonte: Adaptado de National Hydropower Association (2021).**

Segundo Sosnoski (2015), a produção de energia em escala com o intuito de complementar a geração é umas das formas de obtenção de energia que mais vem crescendo, em projeções elaboradas pela *European Small Hydropower Association* (ESHA) para a União Europeia previa um crescimento até 2020 de aproximadamente 16 GW de energia, conforme representado na Figura 2. No Brasil, ANEEL (2019) informa que dos empreendimentos em operação as pequenas centrais hidrelétricas correspondem a 3,15% da potência instalada, dispersos no Sistema Interligado Nacional (SIN).



**Figura 2- Número de pequenas hidrelétricas, capacidade instalada e energia gerada.**  
**Fonte: Adaptado de Sosnoski (2015).**

Visto que há uma tendência de crescimento do aproveitamento hidrelétrico e que é uma maneira viável para a geração de energia elétrica em pontos isolados, uma vez que o Brasil possui potencial hídrico pode-se citar que é uma solução possível ao problema da falta de fornecimento de eletricidade.

Entretanto, é necessário que esse sistema seja considerado confiável e forneça eletricidade de maneira eficiente, mantendo a operação do sistema dentro de limites aceitáveis de tensão e frequência quando houver alterações na carga.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como propósito global discutir técnicas de regulação de velocidade em micro centrais hidrelétricas com o intuito de substituir os reguladores de velocidade comerciais.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Deduzir uma expressão matemática genérica, que evidencie as possibilidades de regulação de velocidade em micro centrais hidrelétricas;
- Explorar técnicas de regulação pela fonte, ou seja, analisar diferentes formas práticas de dosar o fluxo d'água na entrada da turbina.
- Averiguar técnicas de variações controladas de potência ativa, através de uma carga auxiliar, para regulação de velocidade pelo lado da carga.
- Explorar métodos ou técnicas que combinem as abordagens pela fonte e carga.
- Verificar a disponibilidade dos equipamentos no mercado brasileiro e global.

### 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 etapas. O capítulo inicial introduz e contextualiza o problema e também mostra os pontos que busca-se alcançar com o desenvolvimento desta monografia.

No capítulo dois será apresentada a fundamentação teórica, trazendo informações de micro centrais hidrelétricas. Também serão abordadas as principais turbinas hidráulicas existentes no mercado. E por fim, será apresentado os principais geradores de energia elétrica.

O terceiro capítulo traz a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.

Já no quarto capítulo tem-se a discussão de um equacionamento genérico que relaciona a potência elétrica com velocidade. Ainda, há a discussão de dois sistemas de controle de carga e seus equacionamentos que evidenciam a possibilidade de regulação. Por último há uma discussão sobre a disponibilidade de componentes que constituem um sistema de hidrogeração no mercado internacional e nacional.

Por fim, no quinto capítulo é realizada a conclusão desse trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ENERGIA HIDRÁULICA

Ao longo da história, a energia hidráulica foi utilizada amplamente para gerar trabalho útil. Os primeiros registros datam 85 a.C, com os gregos utilizando rodas d'água para a realização de diversas tarefas até então braçais. Essa utilização da água como fonte de energia mecânica permaneceu assim até o surgimento dos motores a vapor no século 19 (HINRICHS et al, 2003).

No mesmo século, outra criação foi de suma importância para o desenvolvimento dos sistemas elétrico de potência, o gerador elétrico. De acordo com Battaglin *et al* (2011), os primeiros geradores produziam tensão e corrente contínua e eram constituídos de células galvânicas. Com essa invenção tornou-se possível a conversão a energia potencial de uma massa de água em energia elétrica, conhecida como energia hidráulica.

Ainda de acordo com Battaglin *et al* (2011), a primeira usina experimental de geração de energia elétrica foi construída no estado de Massachusetts, nos Estados unidos e em 1886 obteve êxito em seus testes. Mais tarde em 1898, uma usina de grande porte foi inaugurada no estado de Nova York recebendo destaque por tamanho resultado.

Hoje, o Brasil destaca-se pelo uso da energia hidrelétrica atrás apenas da China e Canadá de acordo com os dados da *Energy Information Administration* (EIA). Ainda, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética para o ano de 2021 essa fonte corresponda a 12,4% da matriz energética do país. E 64,9% da matriz elétrica brasileira.

### 2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Em virtude da diversidade do parque gerador hidrelétrico brasileiro podem ser encontradas usinas de diferentes capacidades energética. Para o correto

entendimento a ANEEL classificou as hidrelétricas de acordo com seu tamanho e potência instalada conforme Tabela 1.

**Tabela 1- Classificação de hidrelétricas de acordo com a potência instalada.**

<b>Tipo</b>	<b>Potência</b>
Central Geradora Hidrelétrica	$P \leq 5\text{MW}$
Pequena Central Hidrelétrica	$5\text{MW} < P \leq 30 \text{ MW}$
UHE	$P > 30 \text{ MW}$

**Fonte: Adaptado ANEEL(2020)**

Ainda, de acordo com o manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas do Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH) a produção independente e a autoprodução podem ser classificados de acordo com a potência instalada e altura de queda, conforme Tabela 2.

**Tabela 2 - Classificação de pequenas centrais hidrelétricas de acordo com a potência instalada e altura da queda d'água.**

<b>Tipo</b>	<b>Potência</b>	<b>Altura da queda</b>
Minicentral	$1 \text{ MW} < P < 5 \text{ MW}$	$20 \text{ m} < h < 100 \text{ m}$
Microcentral	$P < 1 \text{ MW}$	$15 \text{ m} < h < 50 \text{ m}$
Picocentral	$P < 20 \text{ kW}$	-

**Fonte: Adaptado CERPCH(2021)**

### 2.3 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CARACTERÍSTICAS DOS RESERVATÓRIOS

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) usinas podem ser classificadas de acordo com o tipo de seus reservatórios, sendo eles:

- a) Fio d'água;
- b) Acumulação.

Segundo a ANA, a primeira destaca-se pela geração a partir do fluxo de água natural do rio, ou seja, realizando o mínimo ou nenhum armazenamento de

água. Já o segundo é geralmente localizado na cabeceira dos rios e em locais de altas quedas d'água, dado seu porte permitem o acúmulo de grandes aportes de água que irão funcionar como estoque para períodos de estiagem. Também, devido a sua instalação à montante das demais hidrelétricas irão atuar como reguladores de vazão da água permitindo assim uma operação integrada com o restante do conjunto de hidrelétricas na mesma bacia.

## 2.4 CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS

Soares (2012) cita que turbinas hidráulicas são máquinas que recebem a energia mecânica de um fluido e a convertem em energia motriz. Por serem máquinas reais e assim possuem perdas, a energia disponibilizada em seu eixo mecânico é menor do que a fornecida pelo fluido, fenômeno observado através da equação 1 do rendimento da turbina.

$$n_{turbina} = \frac{P_{MT}}{P_{MH}} \quad (1)$$

Onde  $P_{MT}$  é a potência mecânico-motriz e  $P_{MH}$  a potência mecânico-hidráulica.

Ainda segundo Soares (2012), turbinas podem ser divididas em dois grupos sendo eles: ação e reação. As turbinas de ação caracterizam-se pela ausência da variação de pressão do fluido durante o escoamento através do rotor, ou seja convertem a energia cinética em energia mecânico-hidráulica e então mecânico-motriz. Já as turbinas de reação caracterizam-se pelo oposto, possuem variação da pressão durante o escoamento e dessa forma irão converter a energia cinética mais a pressão em mecânico-hidráulica que por sua vez é convertida em mecânico motriz.

No que tange a aplicação, há vários tipos de turbinas comumente usadas em pequenas centrais hidrelétricas, sendo essas de ação ou reação.

### 2.4.1 TURBINA TURGO

Projetada para operar em uma ampla faixa de rotações e numa faixa de queda de 30 a 300 metros, a turbina Turgo é uma máquina de ação ou impulso cujo seu funcionamento consiste em concentrar a água em um jato que atinge o plano do rotor em uma determinada angulação, normalmente 20° conforme observado na Figura 3. Sendo assim, a água passa por um lado do rotor e sai pelo lado oposto. Essa turbina, tem seu uso disseminado na Índia e nenhuma utilização conhecida no Brasil (Mello Jr *et al*, 2011).



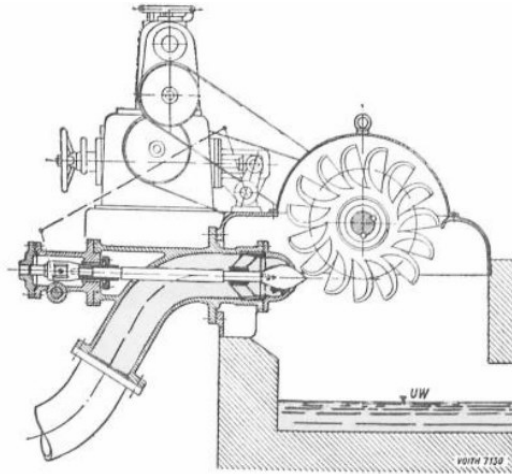
**Figura 3 - Turbina Turgo.**  
Fonte: Adaptado de Renewables First (2015).

#### 2.4.2 TURBINA PELTON

De acordo com Alves *et al* (2019), a turbina de ação Pelton é usada em projetos com quedas de grande altura e baixa vazão, sendo assim possui uma velocidade específica baixa. Em sua constituição possui um bocal distribuidor que irá guiar a água proporcionando um jato sobre a pá do receptor que possui forma de concha conforme Figura 4, essas são dispostas em um disco que irá girar preso a um eixo.

Também conhecida como turbina de jato livre, a Pelton pode ser aplicada em micro centrais hidrelétricas é possível o uso de exemplares menores que podem operar com queda d'água menores que 20 metros. (Mello Jr *et al*, 2011).

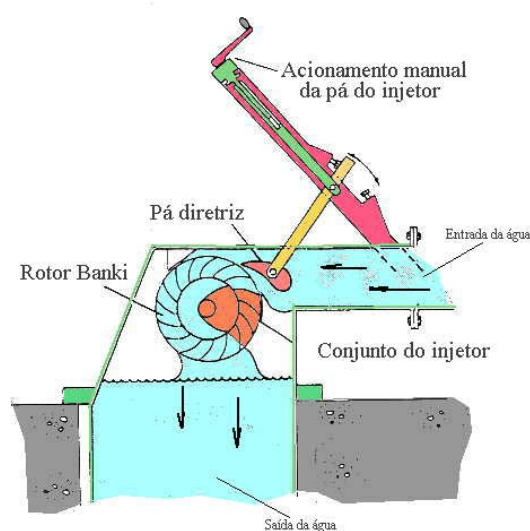




**Figura 4- Turbina Pelton.**  
**Fonte: Adaptado de Macintyre (1983).**

### 2.4.3 TURBINA MICHELL-BANKI

Conhecida também como turbina de fluxo cruzado ou transversal, possui como característica construtiva um rotor de eixo horizontal de formato cilíndrico dotado de pás conforme Figura 5. Sendo assim, o fluxo de água com seção retangular ao adentrar na turbina incide sobre as pás, cruzando o interior do rotor e então incidindo-as novamente ao sair resultando em uma dupla ação (SILVÉRIO et al, 2015).

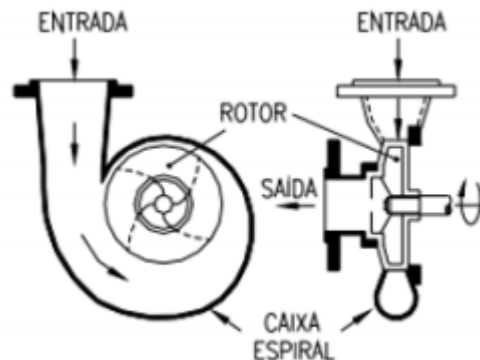


**Figura 5 - Turbina Michell-Banki.**  
**Fonte: Adaptado de Mello Jr. et al (2011).**

#### 2.4.4 BOMBAS CENTRÍFUGAS OPERANDO COMO TURBINA

De acordo com Gatulli *et al* (2018) nos projetos de pequeno aproveitamento hidroelétrico é interessante o uso de bombas funcionando como turbina sendo os procedimentos de projeto similares ao de turbinas convencionais. Ainda, o autor cita vantagens do uso de bomba operando como turbina para aproveitamentos hidráulicos com potência até 50 kW.

Durante o seu funcionamento o sentido do fluxo da água é invertido para que opere como turbina, ou seja, o líquido entra com energia de pressão, aciona de maneira reversa o rotor e sai com baixa pressão conforme Figura 6. Entretanto, para que o rendimento da bomba operando como turbina seja equivalente ao sistema original, exige-se alguns parâmetros como altura e vazão, esses por sua vez precisam ser maiores –para um mesma rotação (Gatulli *et al*, 2018).

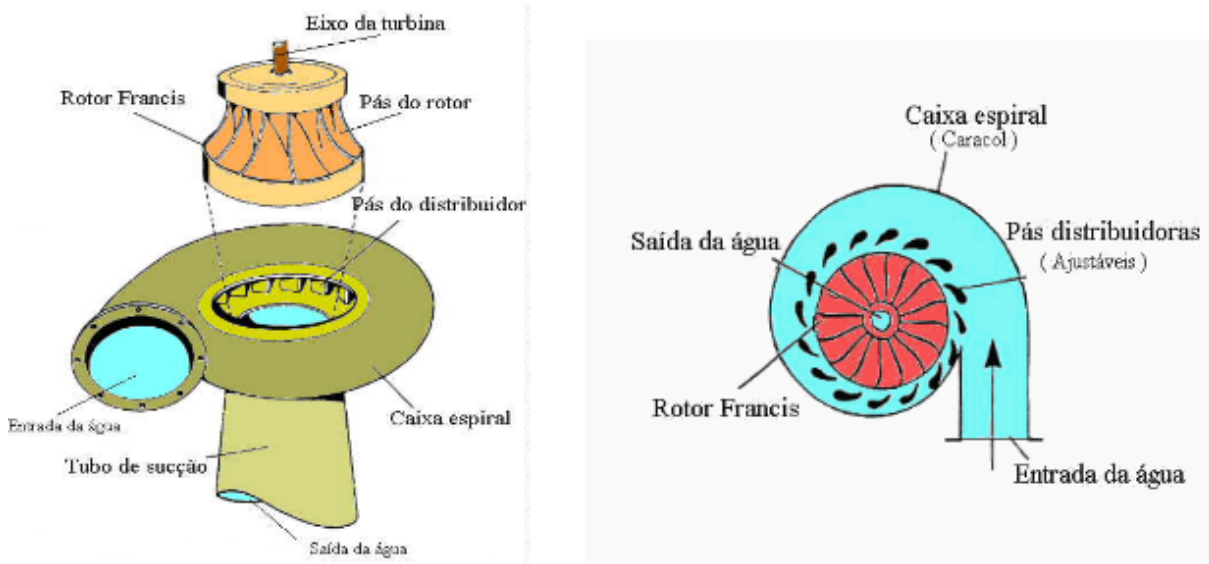


**Figura 6 - Bomba centrífuga operando como turbina.**  
 Fonte: Adaptado de Viana *et al* (1987).

#### 2.4.5 TURBINA FRANCIS

Desenvolvida em 1848, a turbina Francis representada na Figura 7 é a mais utilizada turbina hidráulica. É uma turbina de fluxo centrípeto onde a água atinge o impulsor por meio de um duto espiral e as hélices ajustáveis são responsáveis por direcionar o fluxo para hélices do impulsor. São recomendadas para casos em que a altura média seja de 10 a 300 metros e a vazão seja 2 a 100

m<sup>3</sup>/s. Pode-se destacar o baixo custo de manutenção que possui e a facilidade de controle. (ENEL, 2021)



**Figura 7 - Turbina Francis de eixo vertical.**  
**Fonte: Adaptado de Mello Jr. et al (2011).**

## 2.5 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE TURBINAS

De acordo com Brekke (2001) a escolha do tipo de turbina é dependente da relação queda-vazão, essas duas variáveis são associadas diretamente ao local de instalação. Onde tem-se a queda como a variável mais sensível a manipulação humana com a possibilidade da criação de represas.

Ainda, de acordo com a norma brasileira (NBR) 10208 de 1988 a seleção de turbinas que podem ser aplicadas a pequenas centrais hidrelétricas devem considerar os aspectos como: robustez e simplicidade do equipamento, facilidade de operação, facilidade de manutenção e assistência técnica. Ela ainda garante que algumas características como cavitação, vibração, ruído e pelas de reposição devem ser obtidos através do fabricante (Silvério et al, 2015).

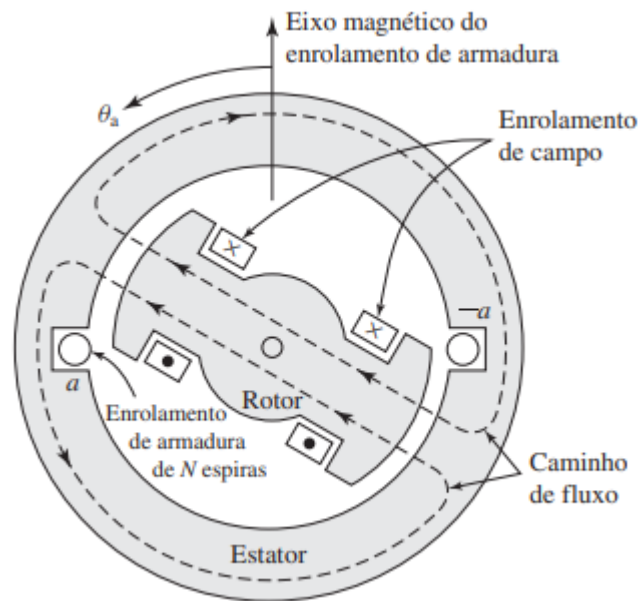
## 2.6 GERADORES

Geradores são máquinas rotativas que realizam a conversão da energia mecânica em energia elétrica. Podem ser considerado três tipos diferentes de geradores para a aplicação em PCH's e MCH's são eles: assíncronos, síncrono com multiplicador de velocidade e síncrono sem multiplicador de velocidade (ELETROBRÁS, 2000).

### 2.6.1 GERADOR SÍNCRONO

De acordo Chapman (2013), o gerador síncrono tem em seu rotor um campo magnético criado através de ímãs permanentes ou eletroímãs, através da aplicação de uma corrente contínua (C.C). Assim o rotor quando acionado por uma máquina motriz como uma turbina hidráulica, produz um campo magnético girante que induz um conjunto de tensões trifásicas defasadas em  $120^\circ$  entre si nos enrolamentos do estator.

Sobre o aspecto construtivo dos rotores, Marques (2013) nos diz que há dois tipos: polos lisos e polos salientes. Essa diferenciação não altera seu princípio de operação apenas conduz a construção de modelos equivalentes diferentes. Em aplicações envolvendo hidrogeração encontram-se rotores de polos salientes, Figura 8, uma vez que operam com baixa rotação e portanto necessitam de alto número de polos. O número de polos é ditado de acordo com a rotação mais adequada para a turbina conforme tensão da frequência gerada.

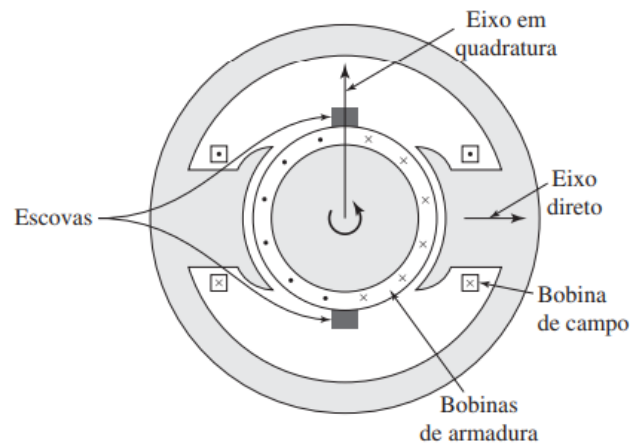


**Figura 8 - Gerador síncrono monofásico de dois polos.**  
**Fonte: Adaptado de Chapman (2013).**

## 2.6.2 GERADOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Máquinas de corrente contínua são constituídas por uma parte fixa chamada de estator, que é responsável pela criação de um campo magnético fixo. A parte móvel é o mecanismo que faz a conversão da energia mecânica em energia elétrica, conhecido como rotor, é constituído por um núcleo ferromagnético e um enrolamento de armadura. Ainda, o estator possui polos salientes excitados por uma ou mais bobinas de campo e o fluxo criado é distribuído simetricamente em relação a linha central dos polos de campo conforme observado na Figura 9 (FITZGERALD, 2014).

A tensão produzida nos terminais do gerador em corrente alternada (C.A) decorre da utilização de comutadores rotativos e escovas estacionárias, que constituem um retificador mecânico. Além disso, a disposição dessas escovas ocorre de maneira à proporcionar a comutação apenas quando os lados da bobinas estiverem na zona neutra. Sendo assim a força magneto motriz (FMM) estará  $90^\circ$  graus elétricos distante do eixo dos polos de campo (FITZGERALD, 2014).



**Figura 9 - Representação de máquina CC.**  
**Fonte: Adaptado de Fitzgerald (2014).**

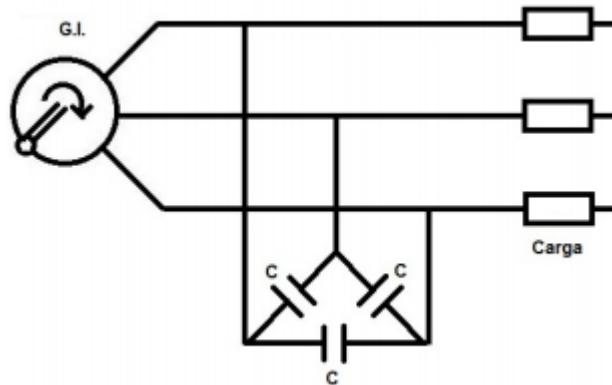
O princípio de funcionamento do gerador de corrente contínua é regido pela Lei de Faraday, sendo assim se há variação de fluxo em uma espira ao longo de um tempo, nessa surgirá uma FMM induzida, cujo valor é proporcional à intensidade de fluxo e também a taxa de variação do mesmo (VILLAR, 2006).

### 2.6.3 GERADOR DE INDUÇÃO

As máquinas de indução comumente chamadas de assíncronas possuem em sua estrutura um estator e um rotor. Sendo a primeira parte estática e a segunda móvel, essa podendo ainda ser dividida em duas categorias: bobinada ou gaiola de esquilo. A máquina com rotor bobinado é constituída por um enrolamento trifásico ligado a uma chave centrífuga ou a anéis de cobre isolados enquanto a máquina do tipo gaiola tem seu rotor em curto circuito e suas três fases estarão no enrolamento do estator. Comparando-as se tem uma maior viabilidade no tipo gaiola uma vez que há uma menor necessidade de manutenção e custo. Ainda, o termo indução se deve ao enrolamento do estator criar um campo magnético girante que induz corrente alternada no enrolamento do rotor. Estando esse campo não sincronizados e apresentando um escorregamento.

De acordo com Teixeira (2018) para converter energia mecânica em energia elétrica, a máquina de indução necessita de suficiente magnetismo residual

em seu rotor para que junto com a rotação seja capaz de induzir tensão no estator. Dessa maneira quando instalado em um sistema isolado se faz necessário a instalação de banco de capacitores em paralelo ao terminais do estator conforme Figura 10 para que haja um avanço de fase na corrente de excitação e assim aumente a magnetização da máquina.



**Figura 10 - Conexão de banco de capacitores nos terminais do estator de um gerador de indução.**

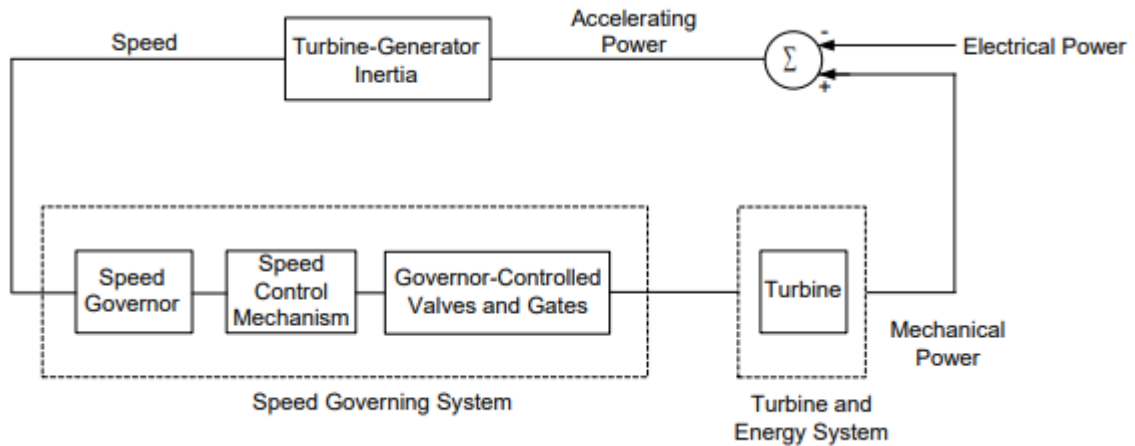
**Fonte: Adaptado de Teixeira (2018).**

## 2.7 SISTEMAS DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE

De acordo com Koritatorov *et al.* (2013), o regulador de velocidade é o equipamento responsável pelo controle do fluxo de potência ativa da unidade geradora de acordo com a variação de frequência na rede, de maneira a garantir que a frequência da tensão terminal esteja dentro dos limites de operação. Sendo assim, é ele quem faz a regulação primária se estiver em rede interligada e sob operação isolada irá controlar somente a frequência da unidade geradora. O regulador irá atuar no torque mecânico injetado no eixo do gerador, controlando a vazão de água na turbina.

O regulador monitora a velocidade do rotor da máquina e também a potência elétrica gerada, e então compara esses valores com a referência do sistema. Quando há discrepância, um sinal de controle é enviado para o sistema de servo atuadores que se movem e alteram a vazão de água na turbina e por consequência a potência mecânica no rotor da máquina até o sistema atingir a

posição de referência novamente. Pode-se observar o diagrama de regulação de velocidade na Figura 11.



**Figura 11 - Malha de sistema de regulação de velocidade.**  
 Fonte: Adaptado de Koritav *et al.* (2013)

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se por uma pesquisa de natureza aplicada, pois visa a solução de um problema em específico, alternativas ao uso de reguladores de velocidade de turbinas comerciais.

No que diz respeito a abordagem do problema, é feita de forma qualitativa onde os dados dos trabalhos analisados são discutidos de forma indutiva.

O objetivo define-se como explicativo, uma vez que métodos alternativos de regulação de velocidade de turbinas já existem e nesse trabalho busca-se explicar o porquê dos fenômenos.

Quanto ao procedimento, adotou-se o levantamento bibliográfico se apoiando em trabalhos e materiais já publicados, como livros, artigos científicos, teses entre outros.

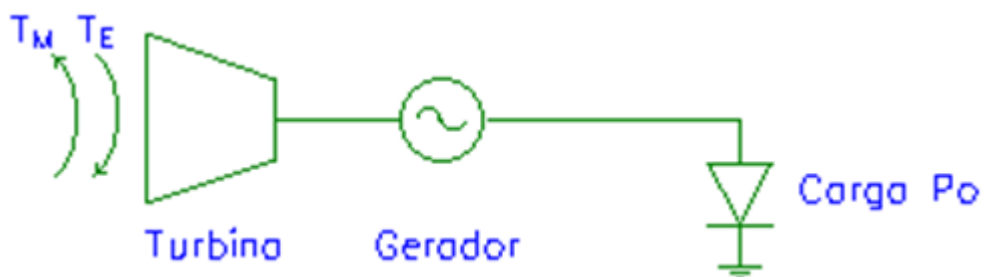


## 4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os equacionamentos genéricos para os sistemas de regulação de velocidade através de controladores de carga. Também, será apresentada a discussão em torno dos resultados apresentados pelos autores. E por fim, será discutida a disponibilidade de materiais no mercado nacional e internacional.

### 4.1 EQUACIONAMENTO GENÉRICO DA VELOCIDADE VERSUS POTÊNCIA DA FONTE E CARGA

Para representar o comportamento da velocidade perante variações de potência ativa da carga e da fonte partiu-se de um modelo simplificado de uma planta hidrelétrica, observada na Figura 12, onde  $T_m$  representa o torque mecânico e  $T_E$  o torque elétrico.



**Figura 12 - Representação de um pequeno sistema elétrico isolado.**  
**Fonte: Adaptado de Portolann (2021).**

Sob condições de regime permanente, o gerador da Figura 12 alimenta a carga  $P_o$  com frequência constante  $\omega_o$  apresentando um equilíbrio entre o torque elétrico de frenagem e torque mecânico.

Em seguida, analisa-se o caso para quando há desequilíbrio entre os torques  $T_m$  e  $T_E$ . Para isso, é feita a suposição simplificada de que o torque da turbina em um primeiro momento é apenas influenciado pela variação da energia primária, no caso a velocidade da água. Também considerou-se a massa do fluido constante e assim obteve-se:

$$T_M = K_T * Q \cdot u \quad (2)$$

Onde:

- $K_T = \text{constante} \left( \frac{\text{Kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^3} \right)$ ;
- $Q = \text{vazão} \text{ (m}^3/\text{s)}$ ;
- $U = \text{velocidade da água}$ .

Considerando a vazão  $Q$  também como constante, o produto " $K_T \cdot Q$ " também será constante e a equação 2, torna-se:

$$T_M = K_M \cdot u \quad (3)$$

Onde  $K_M$  terá a unidade de (Kgf.s).

Além disso de acordo com Portolann (2021), outra variável deve ser considerada no equacionamento, o torque resistente. Esse composto por dois componentes, o torque devido ao atrito e inércia e também o torque devido a potência elétrica da rede, ambos descritos a seguir.

Para o torque devido ao atrito e inércia do conjunto turbina-gerador tem-se:

$$T_{R1} = j \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega \quad (4)$$

Sendo:

- $j = \text{momento de inércia dos rotores das máquinas (Kgf} \cdot \text{m/s}^2)$ ;
- $d\omega/dt = \text{variação da frequência (Rad/s}^2)$ ;
- $B = \text{coeficiente de atrito (adimensional)}$ ;
- $\omega = \text{frequência angular (Rad/s)}$ .

Para o torque devido a potência elétrica da rede, considerando constante a tensão nos terminais do gerador devido a regulação de tensão, tem-se:

$$T_{R2} = K_2 * \phi * i_C \quad (5)$$

Sendo:

- $K_2 = \text{constante (Kgf} \cdot \text{m/A}^2)$ ;
- $\Phi = \text{fluxo de campo (Gauss)}$ ;
- $i_C = \text{corrente fornecida à carga (A)}$ .

Considerando o fluxo constante, o produto " $K_2 \cdot \phi$ " será constante e chamado de  $K_E$ , conforme equação 6.

$$T_{R2} = K_E \cdot iC \quad (6)$$

Onde  $K_E$  tem a unidade de (Kgf.m/A).

Por fim, o torque mecânico deve ser igual à soma dos torques resistentes, então:

$$K_M \cdot u = j \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega + K_E \cdot iC \quad (7)$$

Considerando que a taxa de variação da velocidade da água é pequena e que a máquina alimenta uma carga aproximadamente constante com frequência de operação em 60 Hz ( $\omega_0 = 377$  rad/s). Se aplica a transformada de Laplace na equação 7 e obtém-se a seguinte solução:

$$K_M \cdot u(s) = j \cdot s \cdot \omega(s) + B\omega(s) + K_E \cdot \emptyset \cdot iC(s) \quad (8)$$

$$\omega(s) = \frac{1}{j \cdot s + B} * [K_M \cdot u(s) - K_E \cdot iC(s)] \quad (9)$$

Ou então no domínio do tempo:

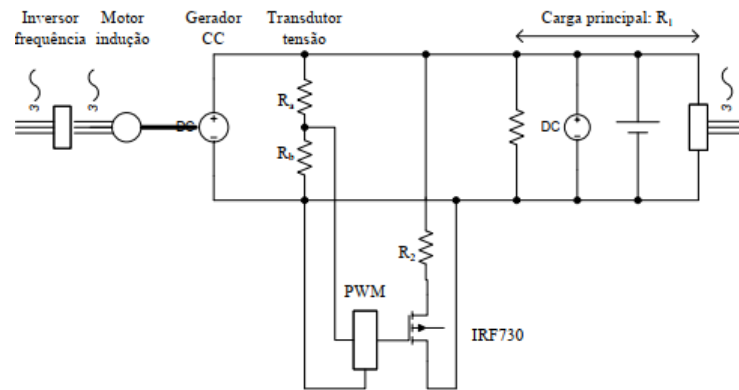
$$\omega(t) = \frac{1}{B} * [(K_M \cdot u - K_E \cdot iC) * (e^{\frac{B}{J}t} - 1)] - 377 * e^{\frac{B}{J}t} \quad (10)$$

Sendo assim fica evidenciado através da equação 10 que é possível correlacionar a velocidade de um conjunto de geração turbina-gerador através de suas potências sejam elas fornecidas pela fonte ou pela carga.

#### 4.2 ANÁLISE DE SISTEMA DE GERAÇÃO COM GERADOR DO TIPO CC

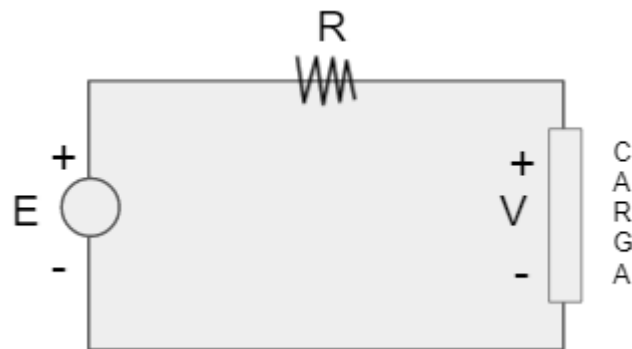
De acordo com Henderson (1998) em um sistema elétrico onde o gerador está alimentando diretamente a carga, é mais onerosa a regulação da velocidade ou frequência através da máquina primária. Dessa forma, adota-se como alternativa a utilização de uma carga auxiliar que cumpre a função de minimizar a regulação de tensão e também de controlar a velocidade eliminando o uso de regulares de velocidade convencionais.

Considerando o circuito da Figura 13 que descreve uma micro central hidrelétrica com um gerador C.C, Portolann (2011) desenvolve o equacionamento para correlatar o uso da carga auxiliar como método de regulação de velocidade.



**Figura 13 - Representação de uma micro central hidrelétrica isolada.**  
**Fonte: Adaptado de Portolann (2011).**

Do circuito acima, pode-se fazer uma simplificação do circuito agrupando as resistências presentes no sistema conforme Figura 14.



**Figura 14 - Representação equivalente do circuito.**  
**Fonte: Autoria própria.**

De onde obtém-se a seguinte equação:

$$V = E - i * R \quad (11)$$

Onde:

- V, tensão nos terminais das cargas;
- E, força eletromotriz gerada;
- i, corrente gerada;
- R, equivalente dos resistores envolvidos.

Considerando a potência nas cargas como:

$$P_c = V * i \quad (12)$$

Substituindo (12) em (11),

$$P_c = (E - i * R) * i \quad (13)$$

$$P_c = E * i - i^2 * R \quad (14)$$

Isolando  $i$  em (11) e substituindo em (14),

$$P_c = E * \left( \frac{E - V}{R} \right) - \left( \frac{E - V}{R} \right)^2 * R \quad (15)$$

$$P_c = \frac{E * V}{R} - \frac{V^2}{R} \quad (16)$$

Multiplicando a equação por  $R$  e igualando a zero, tem-se a expressão que reflete a regulação do gerador C.C como função de sua força eletromotriz,  $R$  e da carga total  $P_c$ :

$$V^2 - E * V + R * P_c = 0 \quad (17)$$

Uma vez evidenciada a possibilidade de regulação através do equacionamento tem-se a análise da atuação de um controlador de carga para garantir que a tensão terminal seja mantida aproximadamente constante. Segundo Stein *et al* (1992) o gerador de corrente contínua com excitação independente apresenta uma baixa eficiência na regulação de tensão e o controlador de carga tem por objetivo manter a potência fornecida constante próximo de seu valor nominal.

Em seu experimento Portolann (2011) considerou como carga auxiliar um Mosfest em série com um resistor e um conversor do tipo *chopper* como controlador de carga. Dessa forma foi possível obter o valor médio e eficaz da carga ôhmica, considerando por conveniência a carga auxiliar como condutância efetiva ( $G_{2o}$ ) conforme equacionamento abaixo, onde  $T$  é o período de chaveamento do controlador de carga e  $G_{2, \max}$  o valor de condutância média.

$$G_{2o} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^w G_{2, \max}^2 dt} \quad (18)$$

$$G_{2o} = \sqrt{\frac{w}{T}} * G_{2, \max} \quad (19)$$

$$\frac{1}{G_{2o}} = \sqrt{\frac{T}{w}} * \frac{1}{G_{2, \max}} \quad (20)$$

A expressão anterior representa a resistência efetiva da carga auxiliar como função da largura de pulso  $w$  do conversor. Já a resistência efetiva total de carga do gerador CC, é dada por:

$$R_c = \frac{R_1 * R_2}{\sqrt{\frac{w}{T}} * R_1 + R_2} \quad (21)$$

Ainda, tem-se que a potência gerada pode ser estabelecida por:

$$P_g = \frac{E^2}{R + R_c} = \frac{E^2}{R + \frac{R_1 * R_2}{\sqrt{\frac{w}{T}} * R_1 + R_2}} \quad (22)$$

Desconsiderando as perdas, pode-se aproximar  $PC = P_g$ , e dessa forma a expressão 17, é rearranjada e obtém-se:

$$V = \frac{E \pm \sqrt{E^2 \left[ 1 - \frac{4 * R}{R + \left( \frac{R_1 * R_2}{\sqrt{\frac{w}{T}} * R_1 + R_2} \right)} \right]}}{2} \quad (23)$$

Da equação 23, evidencia-se que a tensão nos terminais de saída do gerador estão relacionados com a largura de pulso  $w$ . Ou seja, quando variações ocorrerem no sistema como: aumento ou diminuição de cargas, para restabelecer o ponto de equilíbrio o controlador de carga irá atuar no PWM dissipando a energia excedente na carga *dump*.

#### 4.3 ANÁLISE DE SISTEMA DE GERAÇÃO ISOLADO COM GERADOR DE INDUÇÃO

De acordo com Marra *et al* (2000) em um sistema operando isolado da rede elétrica conforme observado na Figura 10, a potência ativa da carga CA irá influenciar na frequência e tensão terminal do gerador mesmo que a velocidade do rotor seja mantida constante. Em uma análise desconsiderando perdas mecânicas e eletromagnéticas, a potência elétrica gerada pelo GI é fornecida pelo produto entre a velocidade angular do rotor e o conjugado no eixo do gerador. Sendo assim com o rotor operando em velocidade constante, um aumento de potência ativa de carga CA

produz uma queda de frequência síncrona, visto que é a única forma para elevar o conjugado novamente.

Pode-se ressaltar que muitos estudos tem sido aplicados para auxiliar no problema de regulação de tensão insatisfatória em GI operando isoladamente, resultado esse da influência da frequência síncrona na característica de magnetização do gerador além da correlação entre essa frequência e a potência ativa (MARRA *et al*, 2000).

No sistema proposto por Kulandhaivelu (2011) exibido na Figura 15 tem-se um esquema de geração de energia isolado composto por um motor CC, simulando a máquina primária, acoplado há um gerador de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo, um banco de capacitores para a excitação e um controlador de carga que consiste em uma ponte de diodos retificadores alimentando um conversor do tipo *chopper* com um carga resistiva (*carga dump*).

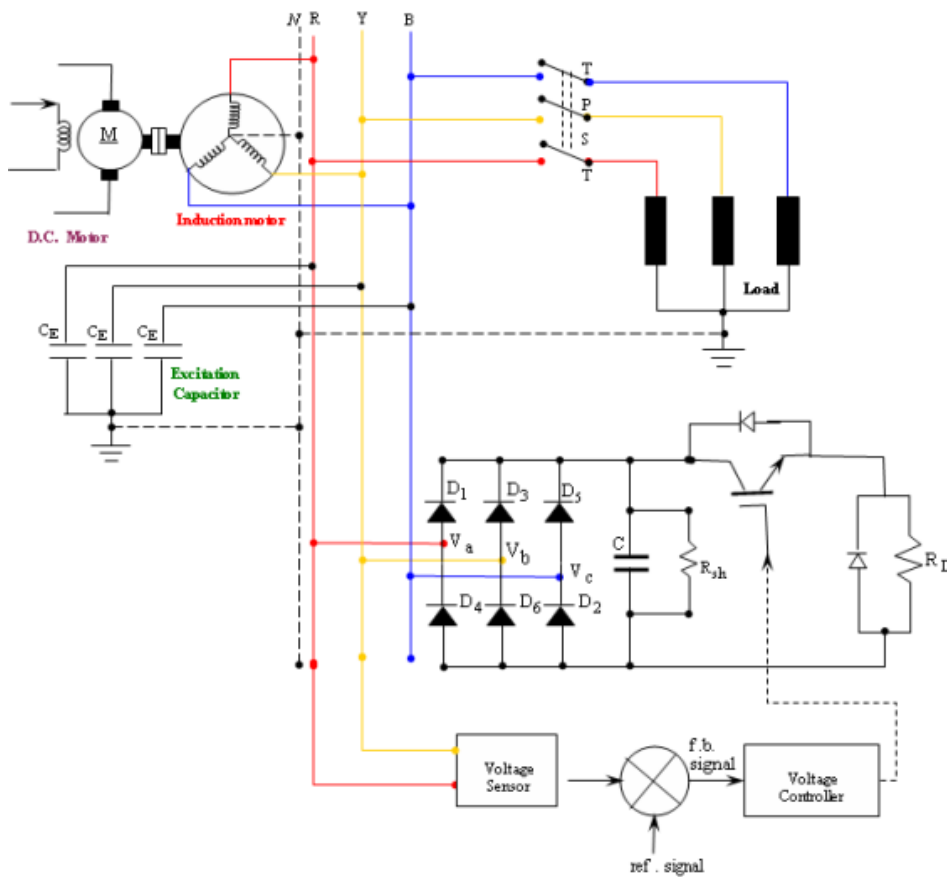
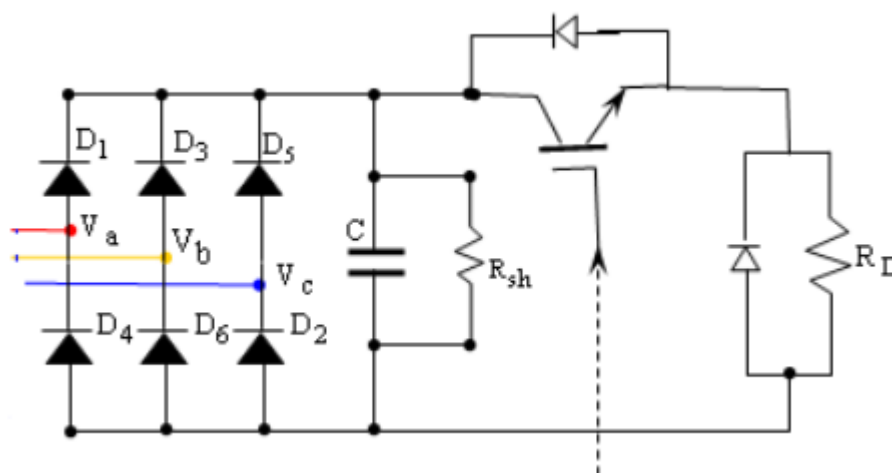


Figura 15 - Sistema trifásico de geração com gerador GI auto excitado e controlador de carga.  
Fonte: Adaptado de Kulandhaivelu (2011)

O motor CC reproduz uma máquina motriz sem alteração de velocidade, simulando por exemplo, uma turbina sem alteração na vazão de água. Ou seja, a regulação ocorre apenas através do lado da carga.

Ainda de acordo com Kulandhaivelu (2011), em um sistema onde não há alterações na potência de entrada através da máquina motriz, deve-se fazer uso dos capacitores de excitação definindo um ponto de operação onde o fornecimento de potência e velocidade de saída seja o nominal. Em seguida, a carga deve ser controlada de maneira que o GI sinta uma carga fixa em seus terminais. Para isso, é utilizado um controlador de carga eletrônico *Chopper* exibido na Figura 16 conectado em uma carga resistiva conhecida como carga lastro ( $R_D$ ), que irá absorver ou dissipar variações na carga principal com o objetivo de manter a carga no terminal do gerador constante.



**Figura 16 - Controlador de carga, Chopper.**  
**Fonte: Adaptado de Kulandhaivelu (2011)**

Para explicar o funcionamento do controlador de carga pode-se analisar a onda de saída do circuito *Chopper* exemplificada na Figura 17.



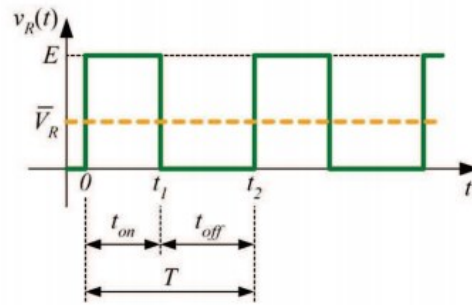


Figura 17 – Tensão de saída no circuito Chopper step-down.  
Fonte: Adaptado de Canesin(2021).

De onde obtém-se a tensão e corrente média de saída, através do equacionamento do circuito, conforme demonstrado abaixo:

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} V_0 dt \quad (24)$$

$$V_a = \frac{t_1}{T} = f * t_1 * E = \alpha * E \quad (25)$$

Da mesma forma,

$$I_a = \frac{V_a}{R} = \alpha * \frac{E}{R} \quad (26)$$

Onde  $V_a$  tensão média de saída,  $I_a$  corrente média de saída,  $T$  o período de comutação e  $\alpha$  o *duty cycle* do circuito e a frequência  $f$ .

Desconsiderando a as perdas na chave, o valor de potência de entrada se torna igual a potência de saída, conforme descrito por:

$$P_i = P_o = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} v_0 i dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} \frac{(v_0)^2}{R} dt = \alpha * \frac{E^2}{R} \quad (27)$$

Por fim, a resistência efetiva vista pela fonte será:

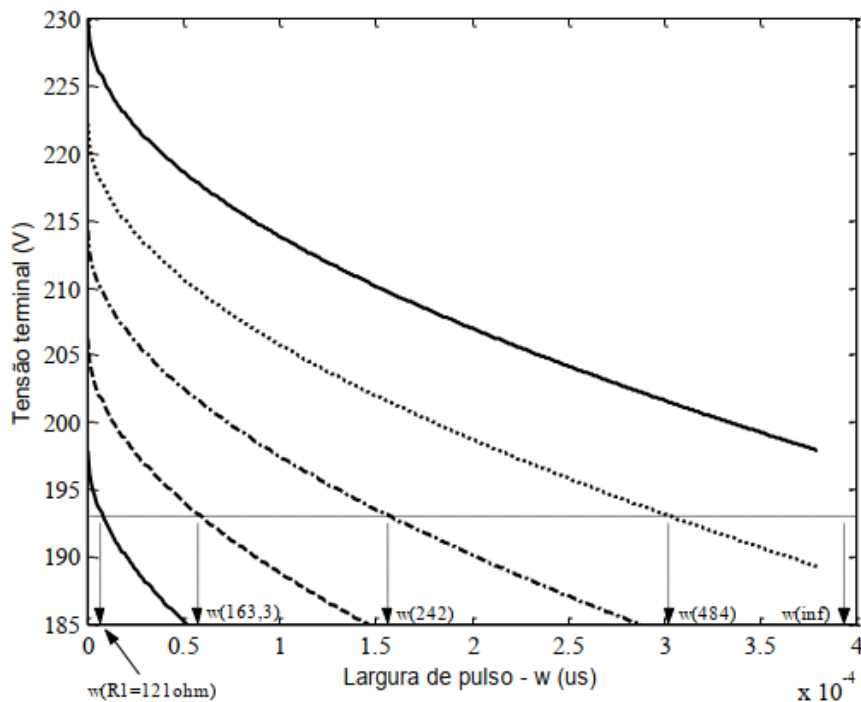
$$R_i = \frac{E}{I_a} = \frac{E}{\alpha * \frac{E}{R}} = \frac{R}{\alpha} \quad (28)$$

De acordo com Kulandhaivelu (2011), a equação 28 demonstra que para o conversor a resistência de entrada ( $R_i$ ) se torna função do *duty cycle* ( $R/\alpha$ ). Dessa

forma evidenciando o processo de regulação de tensão do gerador utilizando a técnica de balanceamento de carga através do circuito *Chopper*.

#### 4.4 RESULTADOS PARA O GERADOR CC

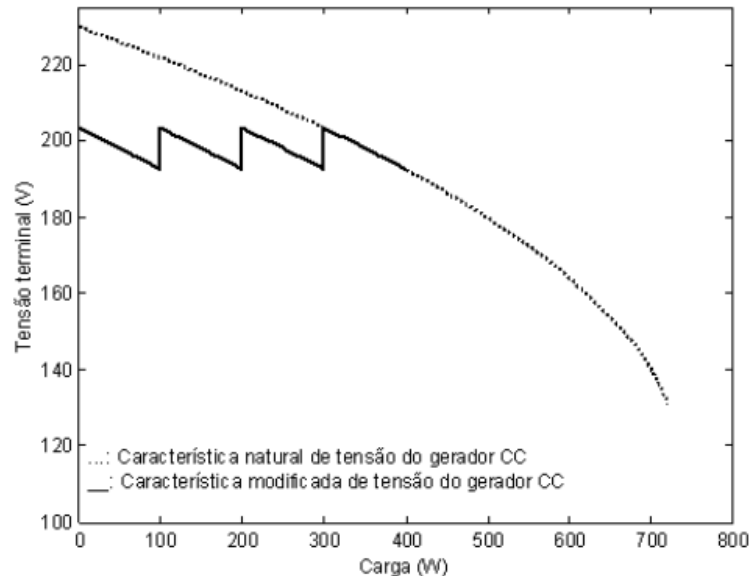
Para análise do funcionamento do sistema proposto por Portolann (2011) citado no capítulo 3, será discutido os resultados de laboratório obtidos por Canzi (2011) que reproduziu o experimento. Em seu teste, considerou como carga principal e carga *dump* duas lâmpadas com potência de 100W, alimentadas com tensão 220V, com cargas foram limitadas em 400W e como transistor, o mosfet comercial IRF730 foi considerado. Dessa maneira, foram obtidas as curvas de tensão terminal da Figura 18 e Figura 19.



**Figura 18 - Tensão nos terminais do gerador considerando fonte constante e carga variando. Fonte: Adaptado de Canzi (2011).**

Pode-se observar na Figura 18 que para um sistema onde a energia primária é constante, em nosso caso e a carga varia de acordo com sua demanda, a largura de pulso se adapta para incrementar ou reduzir a dissipação de energia

sobre a carga *dump*. Também, é possível notar que a tensão terminal no sistema tende a se manter em aproximadamente 195 volts.



**Figura 19 - Curva característica de tensão natural e modificada do gerador CC.**  
**Fonte: Adaptado de Canzi (2011).**

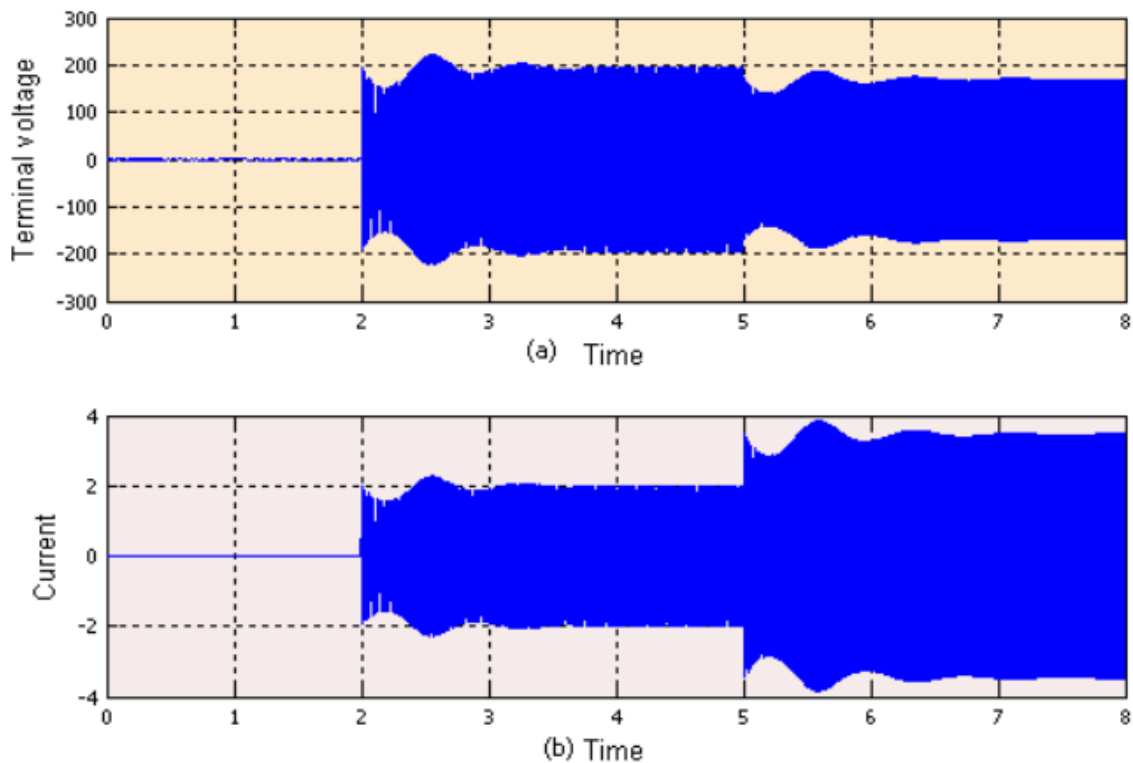
Já Figura 19 ilustra o comportamento de tensão terminal, sendo possível observar a resposta natural aquela que representa uma carga sem variações. E a resposta chamada pelo autor de variante, que representa o comportamento do gerador quando há uma carga com variações, essa produzidas pela carga *dump*.

Dessa maneira fica evidenciando de acordo com Portolann (2011), que a tensão nos terminais do gerador ficam confinadas em estreitos limites de variação demonstrando que o controle de carga proposto garante o funcionamento equilibrado do sistema sem alterações na fonte primária. Podendo ser aplicado em situações reais, excluindo o uso de reguladores comerciais de velocidade que encarecem o preço de implementação do sistema.

#### 4.5 RESULTADOS PARA O GERADOR DE INDUÇÃO

Kulandhaivelu (2011) considerou em seu experimento o circuito citado no capítulo 3, constituído por um gerador com potência de 2,2kW e 415V, duas cargas de 98 ohms nos terminais do gerador sendo a primeira conectada no sistema após 2

segundos e a outra após 5 segundos, simulando uma variação de carga nesses terminais. Após os 5 segundos, a resistência da carga vista pelo sistema passa a ser 49 ohms, devido ao paralelo de resistências. A carga *dump* também foi considerada de 98 ohms e a chave um tiristor. Dessa forma, obteve as curvas de tensão e corrente nos terminais do gerador representadas na Figura 20.



**Figura 20 - Tensão e corrente terminal do gerador de indução.**  
**Fonte: Adaptado de Kulandhaivelu (2011).**

Com base nas curvas obtidas por Kulandhaivelu (2011) pode-se observar o comportamento do controlador de carga e sua influência sobre a tensão e corrente presentes no terminal do gerador.

Nota-se que há três diferentes comportamentos na Figura 20, o primeiro deles referente ao período de 0 a 2 segundos quando não há magnitude de tensão. Por conseguinte, de 2 à 5 segundos tem-se o valor de tensão em aproximadamente 200V, quando a carga de 98 ohm é conectada no sistema. E por fim após o 5s, quando a resistência equivalente de carga passa a ser 49  $\Omega$  tem-se uma leve queda na tensão nos terminais do gerador.

Sendo assim, denota-se a atuação da técnica de balanceamento de carga através do circuito *Chopper* de maneira satisfatória em um gerador de indução auto

excitado, demonstrando ser uma técnica simples e eficaz pois mantém a tensão no terminal do gerador constante com pequenas variações.

#### 4.6 APLICABILIDADE DAS PROPOSTAS

Para as duas propostas de regulação citadas anteriormente, fez-se uso de circuitos conversores conhecidos como *chopper* conectados a um carga resistiva. Mas pondera-se que em uma situação real pode-se adotar como carga *dump* aplicações simples como carregadores de baterias e capacitores que podem fornecer eletricidade para processos diários de uma pequena propriedade rural. Até mesmo, sistemas de aquecimento de água ou fornos elétricos.

Visando a análise de aplicabilidade real dessa proposta para aplicação em sistema rurais isolados da rede elétrica, uma pesquisa dos componentes foi realizada para mostrar o “estado da arte” que o mercado disponibiliza. Para isso considerou-se um sistema de geração de baixa potência (até 50 kW).

Na pesquisa considerou-se o mercado internacional, através de sites que oferecem soluções de comércio eletrônico como: Alibaba, Aliexpress, Amazon e o Mercado Livre. Também fez-se uso da ferramenta de pesquisa Google Market.

No primeiro item turbinas, optou-se pela pesquisa de três modelos comerciais: Pelton, Francis e Bombas Centrífugas, uma vez que podem operar como turbina. Então obteve-se a seguinte quantidade de resultados conforme Tabela 3:

**Tabela 3 - Quantidade de resultados exibidos por pesquisa de palavra-chave.**

	AliExpress	Alibaba	Mercado Livre
Pelton	52 resultados	180 resultados	110 resultados
Francis	-	170 resultados	-
Bombas centrífugas	1.447 resultados	458 resultados	103 resultados

**Fonte: Autoria própria.**

Embora algumas pesquisas apresentem resultados expressivos pode-se destacar que o algoritmo de busca dessas plataformas nem sempre retorna o item pesquisado.

Dentre os resultados, a turbina Pelton pode ser encontrada em duas configurações: a primeira somente as pás permitindo aplicações menores conforme Figura 21.



**Figura 21 - Roda de pá, turbina Pelton.  
Fonte: AliExpress (2021).**

E a segunda, para aplicações mais robustas, como as desejadas de até 50kW fornecendo o conjunto de pás mais sistema injetor conforme Figura 22.



**Figura 22 - Conjunto pás mais injetor, turbina Pelton.  
Fonte: Mercado Livre (2021).**

Os resultados encontrados para turbinas Francis são vastos uma vez que a mesma é amplamente difundida comercialmente. Portanto foram encontrados diversas opções para potências de até 50 kW. É importante destacar que muitas opções oferecem o conjunto turbina-gerador, mesmo que essa opção não se aplique

a esse trabalho. Ressalta-se que modelos como Turgo e Michell-Banki citados no capítulo 1 não foram encontrados.

O segundo item geradores e motores puderam ser encontrados com facilidade uma vez que estão disseminados no mercado, com destaque para grandes fabricantes nacionais. O motor CC apresenta limitações quanto a potência elétrica elevada quando comparado com o motor de indução, uma vez que são mais difundidos no mercado e portanto pode ser encontrado em uma gama variada de potência elétrica.

Através da pesquisa pode-se notar que o mercado da hidrogeração tem espaço no comércio internacional e nacional, mesmo com outros métodos de geração como solar e eólica. E que pode-se encontrar componentes para a construção de uma micro central hidrelétrica com certa facilidade.

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo apresentou uma análise de possíveis alternativas a regulação de velocidade em pequenos sistemas de geração isolada de energia elétrica. Fez-se isso através da revisão de controladores de cargas propostos por diferentes autores.

Primeiro, foi necessário entender a estrutura de uma pequena central hidrelétrica e seus principais componentes operacionais, não levando em consideração os aspectos construtivos mas apenas de geração de energia elétrica. Partindo de explicações sobre a energia hidráulica e também de classificações da ANEEL que exemplificam a hidrogeração no Brasil foi possível compreender esses empreendimentos. E por fim, estudou-se diferentes turbinas e geradores.

Em seguida, dois sistemas de controle de carga foram analisados, um deles composto por um gerador de corrente contínua e um circuito conversor CC-CC comumente chamado de *chopper* com uma carga resistiva atuando como carga *dump*. Através do equacionamento do circuito pode-se constatar que é possível a substituição do regulador de velocidade mecânico por um controlador de carga. Da mesma forma, o segundo circuito analisado era composto por um gerador de indução, circuito *chopper* e carga resistiva *dump*. Nesse modelo, através do equacionamento também ficou evidenciado a aplicabilidade de controladores de carga.

Após, fez-se estudo sobre as simulações e experimentos desses circuitos com intuito de evidenciar para além do equacionamento o correto funcionamento do sistema proposto. Pode-se observar nos dois casos o comportamento e atuação do controlador de carga sobre a tensão terminal dos geradores denotando a variação de largura de pulso quando houve variações no sistema por implementação ou retiradas de cargas.

Ainda, discutiu-se a aplicabilidade dessas propostas com base em uma pesquisa dos itens que compõem os modelos com intuito de identificar quais as dificuldades para a construção desses modelos.

Conclui-se que a regulação através de controladores de carga podem ser uma alternativa viável para pequenos produtores, especialmente em comunidades



rurais. Podendo proporcionar para os mesmos fontes de renda extra através da utilização da energia dissipada nesses circuitos, seja através de carregamento de baterias, aquecimento de água ou alimentação de fornos elétricos. Embora o custo de baterias ainda seja alto, um sistema backup para comunidades rurais pode auxiliar no problema de fornecimento de energia elétrica diminuindo as perdas sofridas. Da mesma forma, em locais onde não há o fornecimento de eletricidade um sistema simples que possa fornecer o mínimo de conforto para seus habitantes garante uma vida digna.

Sugestão para trabalhos futuros seria a implementação desses modelos, assim como discussão sobre a aplicação de outros conversores e também para os geradores aqui não estudados.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Indicadores de qualidade**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores\\_de\\_qualidade/pesquisaGeral.cfm](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores_de_qualidade/pesquisaGeral.cfm)> . Acesso em: 15 Abr. 2021.

BATTAGLIN, Paulo D., BARRETO, Gilmar. **Revisitando a História da Engenharia Elétrica**. Revista de Ensino de Engenharia, 2011. Disponível em: <<http://revista.educacao.ws/revista/index.php/abenge/article/view/103/83>>. Acesso em: 15, Jun. 2021.

BRASIL. ANEEL. Resolução Normativa nº 687 de 24 de Novembro de 2015. **Classifica a micro geração**. Disponível em:<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 16 Abr. 2021.

BRASIL. ANEEL. **Procedimentos de distribuição – PRODIST**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/prodist>>. Acesso em: 16 Abr. 2021.

CANZI, André Luiz. **Influência do controle de frequência tipo carga “dump” na regulação de tensão de microcentrais hidrelétricas**. Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4084/1/PB\\_COELT\\_2011\\_2\\_06.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4084/1/PB_COELT_2011_2_06.pdf)>. Acesso em: 15 Jun. 2021.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas** - recurso eletrônico. 5ª edição. Porto Alegre: AMGH, 2013. Tradução: Anatólio Laschuk.

ELETROBRAS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em:<<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Acervo-de-Documents-Tecnicos.aspx>>. Acesso em: 15 Abr. 2021

FITZGERALD, Antonio. E, KINGSLEY JR, Charles. **Máquina elétricas** - recurso eletrônico. 7ª edição. AMGH, 2014. Tradução: Anatólio Laschuk

GATULLI, Letícia Vianna, BRANDÃO Lívio Ciscotto, EDO, Samila Silva Conde. **Recuperação de Energia Hidráulica: uso de bombas que operem como turbinas**. Monografia. Centro Federal de Educação Tecnológica/ RJ, 2018. Disponível em: <[http://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Projeto%20Final%202018\\_2%20Recupera%C3%A7%C3%A3o%20Energia%20Hidr%C3%A1ulica%20-](http://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Projeto%20Final%202018_2%20Recupera%C3%A7%C3%A3o%20Energia%20Hidr%C3%A1ulica%20-)

%20Uso%20de%20Bombas%20q%20Operam%20como%20Turbinas.pdf>. Acesso em: 10, Mai. 2021.

HENDERSON, D., **An Advanced Electronic Load Governor for Control of Micro Hydroelectric Generation**, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 13, No. 3, Sept. 1998.

HINRICHES, Roger A.; KLEINBACK, Merlin. **Energia e Meio Ambiente** - 3ªed. Editora: Thomson, 2003.

HYDROELETRIC Power Water Use.U.S. Geological Survey, 2012.Disponível em: <[https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/hydroelectric-power-water-use?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/hydroelectric-power-water-use?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)>. Acesso em: 05, Mai. 2021.

KULANDHAIVELU, Subramanian, Ray, K. k., **Voltage Regulation of 3- $\Phi$  Self-Excited Asynchronous Generator**, International of Engineering Science and Technology (IJEST), Vol. 2(12), 2011, ISSN: 0975-5462

LEVELIZED Cost of Electricity for Various Power and Energy Efficiency options. National Hydropower Association. Disponível em: <<https://www.hydro.org/waterpower/why-hydro/affordable/>>. Acesso em: 15, Agos. 2021.

MARRA, Enes Gonçalves, POMILIO, José Antenor. **Sistemas de geração baseados em gerador de indução operando com tensão regulada e frequência constante**. SBA Controle & Automação, Vol 11. 2000. Disponível em: <<https://www.sba.org.br/revista/vol11/v11a258.pdf>>. Acesso em: 25, Jun. 2021.

MARQUES, Larissa. **Estudo do Desempenho Dinâmico de Geradores Síncronos de Produtores Independentes em Sistemas de Geração Distribuída via ATPDraw**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14545/1/Larissa%20Marques.pdf>> Acesso em: 15, Jun. 2021.

MATRIZ Energética Brasileira. Empresa Energética Brasileira, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#TOPO>>. Acesso em: 05, Mai. 2021

MAZZORANA, Rafael Hilário Fonseca. **Modelagem dinâmica via fluxo de potência de reguladores de velocidade em usinas hidrelétricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em

<[http://nedip.ufsc.br/uploads/file/dissertacao\\_mazzorana.pdf](http://nedip.ufsc.br/uploads/file/dissertacao_mazzorana.pdf)>. Acesso em: 20 Abr. 2019.

MELLO JR, Antonio G., SAUER, Ildo Luis. **Análise comparativa do desempenho de turbinas de fluxo cruzado e Francis em sistema com regularização diária de vazão**. Mackenzie, 2011. Disponível em: <<http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/A%20turbina%20de%20fluxo/A%20turbina%20de%20fluxo%20.htm>>. Acesso em: 05, Mai. 2021

MURPHY H.G. - **Power quality and the AFD**, overview, 1998. 5p

Notas de aula. CANESIN, Carlos Alberto. **Teoria dos Conversores CC/CC Abaixadores de tensão**. 2021.176 páginas.

Notas de aula. PORTOLANN, Cesar Augusto. **Melhoria da regulação de tensão de uma microcentral elétrica com carga auxiliar**. 2011.19 páginas.

Notas de aula. PORTOLANN, Cesar Augusto. **Velocidade versus potência da fonte e carga**. 2020.4 páginas.

Notas de aula. VILLAR, Gileno J. de Vasconcelos. **GERADORES E MOTORES CC**.2006. 33 páginas.

ROCHA, Danilo Cancela, OLIVEIRA, Felipe Maia Barbosa, NARDI, Mauricio. **Simulador de regulador de velocidade para turbinas hidráulicas de usinas hidrelétricas**. Monografia. Universidade tecnológica Federal do Paraná. Disponível em <[https://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2012\\_1\\_05/2012\\_1\\_05\\_monografia.pdf](https://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2012_1_05/2012_1_05_monografia.pdf)>. Acesso em: 20 Abr. 2019.

ROSA, L.P., SIGAUD, L., LA ROVERE, E.L., MAGRINI, A., POOLE, A., FEARNside, P, (1995). **Estado, Energia Elétrica e Meio Ambiente: O Caso das Grandes Barragens**. COOPE/UFRJ.

SILVÉRIO, Heitor Batista, POLLI, Josirene Aparecida Arcie. **Projeto de implementação da microcentral hidrelétrica de Roncador**. Monografia. Universidade tecnológica Federal do Paraná, 2015. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6830/1/CT\\_COELE\\_2015\\_1\\_18.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6830/1/CT_COELE_2015_1_18.pdf)>. Acesso em: 03, Jun. 2021.

SOUZA, V. S. M. de. **Energia elétrica como suporte para o crescimento econômico da cidade de Manaus, uma análise do período de 1988 à 1998**. Monografia. Centro universitário de ensino superior do Amazonas. Manaus: CIESA, 2001.

SOUZA, Z. DE; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. DA C. **Centrais Hidrelétricas: implantação e comissionamento**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Interciência, p. 520, 2009

SOSNOSKI, André Sandor Kajdacsy-Balla. **Produção de energia por mini e micro hidrelétricas na rede de distribuição de água**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/D.3.2016.tde-03052016-141852. Acesso em: 15 Abr. 2019.

PEREIRA, M.G. et al. **Avaliação dos impactos socioeconômicos de projetos energéticos – eletrificação rural: área de concessão da Enersul –MS**. Revista Perspectiva Econômica, julho/dezembro de 2005. Disponível em: <[http://revistas.unisinos.br/index.php/perspectiva\\_economica/article/view/4378](http://revistas.unisinos.br/index.php/perspectiva_economica/article/view/4378)>. Acesso em: 10 Abr. 2019.

TEIXEIRA, Edson Lucas Gaudereto. **Comportamento de um gerador de indução trifásico autoexcitado**. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018. Disponível em < <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10023377.pdf>>. Acesso em: 03, Jun. 2021.

TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio, GABETTA, José Henrique e CAMPOS, Bruno Thiago Lopes da Costa. **As microcentrais hidrelétricas ( $\mu$ CH) como alternativa de atendimento as comunidades isoladas: um estudo de caso**. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6. 2006, Campinas. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022006000100019&lng=pt&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100019&lng=pt&nrm=abn)>. Acesso em: 10 Abr. 2019.

VIANA, A.N.C.; TIAGO, F.; LEITE, F. **Bombas centrífugas funcionando como turbinas, para microcentrais**. Mundo Elétrico, São Paulo, n.320, p.52-5, 1986.