



**INSTITUTO ENSINAR BRASIL  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DOCTUM DE TEÓFILO OTONI**

**Evaldo Sérgio Xavier Alves – evaldo\_sergio@hotmail.com  
Jhonata Lacerda Barcaro jhonatalacerdabarcaro@gmail.com  
Jhonathan Xavier Rodrigues - jhonathanxrodrigues95@gmail.com**

**REGULADOR DE VELOCIDADE ELETRÔNICO NA GERAÇÃO DE  
ENERGIA EM HIDRELÉTRICAS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA**

Cataguases

2024

**Evaldo Sérgio Xavier Alves – evaldo\_sergio@hotmail.com**  
**Jhonata Lacerda Barcaro jhonatalacerdabarcaro@gmail.com**  
**Jhonathan Xavier Rodrigues - jhonathanxrodrigues95@gmail.com**

**REGULADOR DE VELOCIDADE ELETRÔNICO NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM  
HIDRELÉTRICAS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário Doctum de Teófilo Otoni como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência. Orientador: D. Sc. José Eduardo Henriques da Silva.

Cataguases

2024

Alves, Evaldo.  
Barcaro, Jhonata.  
Rodrigues, Jhonathan.

REGULADOR DE VELOCIDADE ELETRÔNICO NA  
GERAÇÃO DE ENERGIA EM HIDRELÉTRICAS: UMA ANÁLISE  
BIBLIOMÉTRICA / – 2024.

Orientador: José Eduardo Henriques da Silva  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Instituto  
Ensinar Brasil. Centro Universitário Doctum de Teófilo Otoni, 2024.

1. Regulador de velocidade. 2. Hidrelétricas. 3. Geração de  
energia. 4. Bibliometria. I. Da Silva, José Eduardo Henriques.  
REGULADOR DE VELOCIDADE ELETRÔNICO NA GERAÇÃO  
DE ENERGIA EM HIDRELÉTRICAS: UMA ANÁLISE  
BIBLIOMÉTRICA.

**Evaldo Sérgio Xavier Alves – evaldo\_sergio@hotmail.com**  
**Jhonata Lacerda Barcaro jhonatalacerdabarcaro@gmail.com**  
**Jhonathan Xavier Rodrigues - jhonathanxrodrigues95@gmail.com**

## **REGULADOR DE VELOCIDADE ELETRÔNICO NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM HIDRELÉTRICAS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Centro Universitário  
Doctum de Teófilo Otoni do Centro  
Universitário Doctum de Teófilo Otoni  
como requisito parcial à obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área  
de concentração: Sistemas Elétricos de  
Potência.

Aprovado em 11 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

---

Natália da Mata Campos  
Instituição do Primeiro Membro

---

Carlos da Mata Campos  
Instituição do Segundo Membro

---

José Eduardo Henriques da Silva  
Instituição do Terceiro Membro

## RESUMO

O regulador de velocidade é um dispositivo que ajusta a potência elétrica gerada de acordo com a demanda de energia elétrica solicitada pelo SEP. Portanto, trata-se de um dispositivo projetado para regular a potência gerada pelo motor da turbina, controlando a velocidade de rotação para manter a frequência do sistema dentro de uma faixa de valores aceitáveis. Assim, trata-se de um componente fundamental em uma usina hidrelétrica. Esta pesquisa tem como objetivo realizar um estudo bibliométrico para verificação dos benefícios na utilização dos reguladores de velocidade eletrônico em usinas hidrelétricas. Quanto à metodologia utilizada, foi realizada uma pesquisa com natureza básica e abordagem quali-quantitativa, no qual irá discutir a utilização e as vantagens na adoção de Reguladores de Velocidade eletrônicos em usinas hidrelétricas, com levantamento de dados teóricos sobre a utilização deles, se valendo de uma revisão sistemática da literatura, como principais teóricos pode-se citar Sousa Neto (2019), Carneiro (2016), Menarin (2013), Brito (2010), dentre outros que contemplam o assunto em foco. Depois, foi realizada uma pesquisa bibliométrica, na plataforma *Scopus*, que resultou em 20 trabalhos a serem analisados a fim de verificar os benefícios na utilização de reguladores de velocidade eletrônico em usinas hidrelétricas. Percebe-se que os reguladores de velocidade possibilitam a proposição de como o sistema poderia melhorar seu desempenho com base nos resultados encontrados.

**Palavras-chave:** Regulador de velocidade, Hidrelétricas, Geração de energia, Bibliometria.

## ABSTRACT

The speed regulator is a device that adjusts the electrical power generated according to the electrical energy demand requested by the SEP. Therefore, it is a device designed to regulate the power generated by the turbine rotor, controlling the rotation speed to maintain the system frequency within a range of acceptable values. Thus, it is a fundamental component in a hydroelectric plant. This research aims to carry out a bibliometric study to verify the benefits of using electronic speed regulators in hydroelectric plants. Regarding the methodology used, a basic research with a qualitative-quantitative approach was carried out, which will discuss the use and advantages of adopting electronic speed regulators in hydroelectric plants, with a survey of theoretical data on their use, using a systematic review of the literature. The main theorists include Sousa Neto (2019), Carneiro (2016), Menarin (2013), Brito (2010), among others who address the subject in focus. Afterwards, a bibliometric research was carried out on the Scopus platform, which resulted in 20 papers to be analyzed in order to verify the benefits of using electronic speed regulators in hydroelectric plants. It can be seen that speed regulators allow the proposal of how the system could improve its performance based on the results found.

**Keywords:** Speed governor, Hydroelectric power plants, Power generation, Bibliometrics.

## 1 INTRODUÇÃO

A eletricidade, nas suas diversas formas, é muito importante para o desenvolvimento socioeconômico de uma nação. Devido aos avanços tecnológicos na produção e transmissão, seu uso quebrou longas barreiras e transformou algumas áreas menos conhecidas das cidades em referências industriais (Andrade, 2019). Assim, desde o seu aparecimento, tem revolucionado a sociedade trazendo inúmeras inovações que contribuem para o progresso da humanidade.

Outrossim, a busca por melhorias na qualidade de vida sempre esteve presente na história do homem, e foi dentro desse contexto que a eletricidade se destacou sendo capaz de trazer benefícios de diversas formas, desde o conforto com os eletrodomésticos até os carros elétricos modernos.

E concomitantemente, o crescimento econômico de um país acarreta no aumento do consumo de energia. Fato este que pode ser observado no Brasil, trazendo a necessidade de investimentos em infraestruturas de sistemas elétricos de potência (SEP).

Com isso, devido a ampla demanda da sociedade, torna-se necessário maiores investimentos na infraestrutura dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), para garantir as necessidades e o desenvolvimento econômico, sendo a energia proveniente das hidrelétricas uma das opções mais comuns na produção de eletricidade (Sampaio, Ramos, Sampaio, 2005).

Nas centrais hidrelétricas a velocidade das máquinas é controlada por um regulador que controla a quantidade de água na turbina por meio de um sistema distribuidor. Com isso, a velocidade dela implica diretamente na frequência terminal, tendo em vista que se houver variação da rotação, a frequência não irá se manter constante, causando assim, perturbações no sistema (Futikami et al., 2003).

Em meados do século XVII, James Watt, tendo como objetivo a solução do problema de rendimento das máquinas a vapor naquela época, criou o primeiro regulador de velocidade, aplicado em uma máquina motriz (Villaça, 2013). O modelo mecânico-hidráulico, trouxe eficiência no sistema em que foi implantado, marcando o início do controle da produção de energia das máquinas.

Assim, a demanda por reguladores de velocidade cresceu consideravelmente, principalmente em grandes centrais, pois além de manter a

frequência constante para garantir o rendimento das máquinas, também controla a potência gerada (Souza; Fuchs; Santos, 1983).

No atual cenário das centrais hidrelétricas, o regulador eletrônico de velocidade desempenha um papel crucial no controle e na operação das turbinas, sendo responsável por ajustar a velocidade de rotação para garantir uma operação segura e eficiente, otimizando a conversão da energia hidráulica em energia elétrica (Junior; Freire, 2020).

Foi pensando nessa perspectiva da geração de energia em hidrelétricas que se levantou a seguinte questão-problema que ora direciona a pesquisa deste artigo: Como os reguladores de velocidade eletrônico podem impactar positivamente na geração de energia em hidrelétricas no Brasil?

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo bibliométrico para análise dos benefícios na utilização de reguladores de velocidade eletrônico em usinas hidrelétricas. E como objetivos específicos procurou-se: i) apresentar um breve histórico das hidrelétricas no Brasil; ii) conceituar e verificar a confiabilidade do Regulador Eletrônico; iii) fazer uma análise bibliométrica para verificar as vantagens dos reguladores de velocidade eletrônico em usinas hidrelétricas.

Quanto à metodologia utilizada, tem-se uma pesquisa com natureza básica, de abordagem quali-quantitativa. No qual se teve, num primeiro plano, o levantamento de dados teóricos sobre a utilização de reguladores de velocidade, se valendo de uma revisão sistemática da literatura, que teve como principais autores Sousa Neto (2019), Carneiro (2016), Menarin (2013), Brito (2010), dentre outros que contemplam o assunto em foco.

Depois, realizou-se uma pesquisa bibliométrica que resultou em 20 trabalhos. Estes, foram analisados com o intuito de investigar as vantagens que se tem ao utilizar reguladores de velocidade eletrônico em usinas hidrelétricas. Nesta seção, tem a descrição metodológica e a análise dos dados, as quais valeu-se para selecionar as partes mais relevantes em decorrência da questão-problema e os objetivos que foram delineados na pesquisa. Por fim, tem-se a conclusão seguida das referências utilizadas para construção do trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 As hidrelétricas no Brasil: um breve histórico

Atualmente, o Brasil possui uma extensa rede fluvial, representando o país com maior capacidade hídrica do mundo, o que faz com que o desenvolvimento da tecnologia contribua para o atual cenário, em que se tem grande produção de energia elétrica, na busca de atender a sociedade. Além disso, essa produção tem grande atribuição, uma vez que as hidrelétricas, na atualidade, estão associadas à tecnologia, sendo muito relevante uma vez que elas impactam também, de forma significativa na indústria e na economia do país (Afonso, 2019).

Cabe pontuar que as fontes de energia demandam de matérias primas que indiretamente ou diretamente formam energia a fim de movimentar máquinas. Essas fontes podem ser renováveis, ou seja, recursos naturais que se renovam espontaneamente) ou não renováveis que podem se esgotar ao longo dos anos e que impactam diretamente o meio ambiente.

As energias não renováveis, por sua vez, são os combustíveis fósseis como petróleo e carvão mineral, assim como a energia nuclear que advém da fissão do urânio. Já as renováveis, tem-se como alguns exemplos a Energia eólica; Energia solar; A biomassa; Energia Geotérmica; E por fim, a energia hidrelétrica, (Marques, 2021).

No tocante ao funcionamento das hidrelétricas, elas podem ser classificadas como usinas a fio d'água, usinas com reservatório, usinas reversíveis ou de bombeamento (Marques, 2021).

Respectivamente, a usinas a fio d'água (Figura 1) se vale pelos regimes caudais dos rios, sem capacidade considerável de armazenamento com a produção contínua, variando ao longo do ano, na prática a energia proporcionada não se adapta às demandas de cobertura elétrica (Iberdrola, 2024).

Figura 1 - Usina a fio d'água



Fonte: Pensamento Verde (2024)

As usinas com reservatório (Figura 2), referem-se a um tipo de instalação que autoriza o armazenamento da água e a regulação de sua execução a fim de atender às demandas, onde o seu armazenamento de água consiste em uma represa em que dependendo há uma regulação sazonal, hiperanual e anual (Iberdrola, 2024).

Figura 2 - Usina com reservatório



Fonte: Agência Brasil (2014)

Com relação às usinas reversíveis ou de bombeamento (Figura 3), referem-se a instalações que permitem acumular energia elétrica bombeando a água com destino a uma represa maior, por meio dela é possível garantir mais estabilidade, sustentabilidade e segurança, uma vez que proporciona energia com otimização de

tempo e sem gerar nenhum poluente para atmosfera, a título de exemplo têm-se a que utiliza essa forma de funcionamento e tecnologia (Iberdrola, 2024).

Figura 3: Usinas reversíveis ou de bombeamento



Fonte: Canal Solar (2024)

Vale mencionar que o processo de geração se dá de forma com que preliminarmente, a barragem que fica localizada no canal do rio, reserva a água para estruturar a represa propiciando uma energia potencial na água em que posteriormente se transformará em eletricidade. Por conseguinte, a água localizada atrás da barragem por meio do conduto forçado é conduzida em que ocorre a transformação da energia potencial em energia cinética, logo após, ela é conduzida até as salas de máquinas, onde atuando sobre a pás da turbina em que modifica a energia cinética em mecânica de rotação. Após a produção de energia ela é direcionada para o rio através do escoamento. Por fim, para concluir seu funcionamento, através da união do gerador elétrico com o eixo da turbina, ao girar transforma a energia de rotação em eletricidade (Iberdrola, 2024).

Para entender o surgimento da energia hidrelétrica no país, é necessário trazer o contexto histórico do setor elétrico brasileiro, de acordo com Silva (2021), no Brasil, em 1879 ocorreu a primeira operação de energia gerada de forma mecânica devido a permissão de D. Pedro II a Thomas Edson de instituir seus equipamentos no Brasil com a finalidade de trazer a iluminação pública, posto que, Thomas havia inventado a lâmpada em Nova York. Com efeito, a Estação Central de D. Pedro II, localizado no Rio de Janeiro, foi o primeiro lugar no Brasil que recebeu a luz elétrica.

Em 1881, ocorreu a instalação de 16 lâmpadas no percurso Jardim do Campo da Aclamação, hoje denominada Praça da República, localizada no Rio de Janeiro. Na ocasião, propiciou os serviços de calçamento no período da noite (Silva, 2021).

Em 1883, aconteceu o primeiro serviço de Iluminação Pública Municipal do Brasil e da América do Sul, também realizado por D. Pedro II na cidade de Campos dos Goytacazes, localizado no norte do estado do Rio de Janeiro, utilizando a primeira usina termelétrica que atuava com uma máquina motriz a vapor gerado em caldeira a lenha, com potência de 52kw, na qual abastecia as 39 lâmpadas da cidade (Silva, 2021).

O Brasil estava vivenciando um cenário de avanço tecnológico com o aumento da utilização da eletricidade para iluminação de ruas e para os transportes públicos, sendo um marco em que os responsáveis na esfera produtiva começaram a implementar essa inovação nas suas demandas industriais.

A primeira usina hidrelétrica no Brasil, foi construída em 1883, no rio Jequitinhonha a fim de satisfazer às atividades de mineração em Diamantina, na província de Minas Gerais, intitulada como Ribeirão do Inferno. Caracterizada como a pioneira e a maior do mundo, naquela ocasião atingiu um desnível de 5 metros (Muller, 1995).

No ano de 1887 começou a operação da Usina Hidrelétrica Ribeirão dos Macacos, situada em Minas Gerais na cidade de Nova Lima sob a direção da Compagnie des Mines d'Or du Faria. Apesar da linha de passagem ser de pequeno porte, foi o suficiente para propiciar o fornecimento de iluminação nas dependências da mina e também nas casas dos trabalhadores e funcionários da empresa (Muller, 1995).

Em 1889 foi construída a primeira usina hidrelétrica de grande porte - com capacidade de mais de 30 megawatts por hora e com reservatórios acima de 13 km<sup>2</sup> - instalada no rio Paraibuna em Juiz de Fora/ MG, intitulada como "Usina de Marmelos". A originária da América Latina que atendeu e produziu energia para iluminação particular e pública, onde funcionou até 1896 (Silva, 2021).

E foi no ano de 1893 sob a liderança de Floriano Peixoto no Brasil que inaugurou a segunda usina hidrelétrica do país e do hemisfério Sul e a primeira do estado de São Paulo, nomeada como Usina Monjolinho, instituída pela Companhia

de Luz Elétrica de São Paulo com o objetivo de satisfazer a população local (Silva, 2021).

A usina hidrelétrica teve maior avanço, no governo de Prudente de Moraes em 1897, em que foi estabelecida em Belo Horizonte/MG, uma rede de iluminação elétrica, sendo essa energia oriunda da Usina de Freitas instituída no Ribeirão Arrudas (Silva, 2021).

Em meados de 1899, por meio do decreto de Campos Sales foram autorizadas as empresas estrangeiras The São Paulo Railway e a Light and Power Company Limited operarem no Brasil. Sendo assim, a atuação iniciou em São Paulo quando construiu a Usina Hidrelétrica Edgard de Sousa, finalizada em 1901 em Santana de Parnaíba, no Rio Tietê, atendendo as redes de transportes e iluminação urbanos. Posteriormente, em 1904 também foi instituída pelas mesmas empresas no Rio de Janeiro, resultado do processo de expansão urbana de São Paulo e Rio de Janeiro (Silva, 2021).

O ano de 1903 foi o marco histórico da regulamentação federal de indústria de energia elétrica, uma vez que a lei nº 1.145/1903 e o Decreto nº 5.407/04 autorizou a atuação do governo em âmbito federal proporcionar, por meio da esfera administrativa ou concessão, a utilização dos rios brasileiros para o funcionamento da energia hidráulica em prol dos serviços públicos, salvo o emprego dos excedentes para autoconsumo em atividades agroindustriais. Nesse cenário, a legislação demonstrou na prática pouca eficácia, posto que, houve um movimento de contratos sendo firmados pelos concessionários e regulamentados pelos Estados e Municípios. Essa legislação foi conhecida como a primeira lei brasileira versando sobre energia elétrica (Corrêa, 2005).

De acordo com Gomes *et al.* (2002), no período entre 1890 e 1909 houve um crescimento exacerbado das indústrias no país. No campo das manufaturas, a fonte de energia era o carvão importado. Porém, neste mesmo período havia sido descoberto a eletricidade de origem hidráulica como mais econômica, esta que corresponde a uma mudança significativa para nova opção de energia. Ademais, nesse período, vale pontuar que a capacidade elétrica desenvolvida no Brasil, multiplicou por 178, ou seja, ocasionando uma mudança de 61kW para 10.850 kW, sendo 53% oriundas da energia hidráulica (Gomes *et al.*, 2002).

A expansão urbana começou a se intensificar de modo que a população brasileira cresceu expressivamente, sendo 17 milhões no ano de 1900 e 31 milhões em 1920 (Gomes *et al.*, 2002). Nesse sentido, interferiu diretamente na demanda por serviços urbanos, na qual automaticamente surgiu o mercado interno que fundamentava a produção de bens de consumo. Observou-se que durante o período entre 1907 e 1919 foi ampliada no país mais de 600% a potência de geração de energia hidrelétrica no eixo Rio-São Paulo, elevando e possibilitando da força motriz para utilização industrial, passando de 109 mil para 363,3 mil HP, demonstrando a metade (47,2%) das formas de energia no setor secundário (Gomes *et al.*, 2002).

Fora da esfera Rio/São Paulo, houve o emprego de energia elétrica sob diversas formas. Em 1913 foi instaurada a usina Angiquinho, uma das primeiras hidrelétricas do Nordeste, localizada no Alagoas, na cachoeira de Paulo Afonso. Ela foi produzida para fábricas de linhas e fios, bem como promover a iluminação da Vila Operária de Pedra, na qual hoje é o município de Delmiro Gouveia (Gomes *et al.*, 2002).

No auge dos anos 1930, as empresas Light e American & Foreign Power Company (AMFORP) já haviam dominado a maior parte dos serviços vinculados à energia elétrica, sendo predominantemente pela energia hidráulica. Depois, com a crise de 1929, foi preciso configurar o papel do Estado de modo a intervir no âmbito econômico do país.

Como forma de efetivar o plano intervencionista, o Presidente Getúlio Vargas instituiu o Código de Águas por meio do Decreto de 24.643/1934, na qual garante ao poder público a possibilidade de fiscalizar as concessionárias de energia elétrica. Este código é o responsável pelas concessões a exploração de energia hidráulica ou serviços derivados, estabelecendo limitações para a iniciativa privada. Nesse contexto, a União tem como atribuições legislar sobre, em que antes instrumentalizado por apenas contratos assinados entre Estados, Municípios e o Distrito Federal (Silva, 2021).

Com o caráter nacionalista do código, houve a diminuição de companhias internacionais investindo nesse setor, ocasionando restrições de oferta implicando na negativa de novas ligações, o que provocou o aumento do limite de capacidade instalada esbarrando na segurança, além de provocar o declínio de frequência e voltagem nos períodos de picos de consumo, obrigando o governo federal não

somente fiscalizar, mas também investir na produção, surgindo a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) para aproveitar os recursos do Rio São Francisco, além de outras iniciativas como a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) no Rio Grande do Sul (Gomes *et al.*, 2002).

Assim, emergiu na década de 40 a formação de inúmeras companhias estaduais e federais. Em 1960 foi formado o Ministério de Minas e Energia pela lei nº 3.782/1960. Um ano depois, obteve a permissão na criação da Eletrobrás por meio da lei nº 3.890/1961. Instalada em 1962 pelo Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica (CNAEE), no Rio de Janeiro, na qual contou com a presença do presidente João Goulart, passando a desenvolver a oferta da energia elétrica no país.

Nesse cenário apresentado, as empresas Light foram adquiridas pela Eletrobrás em 1979. Outras empresas também foram criadas: a Eletrosul em 1968 (correspondendo às centrais elétricas do sul do país) e a Eletronorte em 1972 (ligadas às centrais elétricas do norte do país). Aliados a isso, a constituição da Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico Social (BNDES) se mostrou pertinente na criação de condições para projetos de infraestruturas com foco na energia e transporte, promovendo financiamentos em moeda nacional e os recursos da esfera elétrica como o Fundo Federal de Eletrificação, assim como, a quota dos Municípios e Estados no imposto único sobre energia elétrica (IUEE).

Em 1973, teve o marco importante de o Brasil e o Paraguai firmarem um tratado para a construção da usina hidrelétrica Itaipu Binacional, vindo produzir energia só em 1984. Outro passo relevante foi a criação da primeira hidrelétrica no Amazonas, em 1974, intitulada Coaracy Nunes (Paredão), localizada no rio Araguari, satisfazendo Macapá e locais próximos, além de propiciar a extração de manganês (Alves, 2007).

Pouco tempo depois, a Lei nº 9.427/1996 estabelece a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com a atribuição de fiscalizar e transmitir o fornecimento e a comercialização de energia elétrica; concedendo instalações de energia, e conciliando os agentes do setor elétrico e consumidores, garantindo a universalização das atividades, dentre outros (Silva, 2021).

A Eletrobrás comandou o Plano Decenal de Expansão que compreendia o período de 1995 a 2004, na qual desenhou a necessidade de investimentos em

energia elétrica no valor de 6 bilhões por ano, entretanto, o governo não cumpriu com os investimentos previstos (Alves, 2007).

Conforme disposto por Goldemberg e Moreira (2005) houve um aumento da taxa média anual da geração de energia elétrica no Brasil de 4,2%, no intervalo entre 1980 e 2002, sendo a fonte de energia hidráulica como a predominante. No ano de 2001, a população foi surpreendida por uma crise energética, em que os depósitos das regiões nordestinas e sudeste estavam com seus volumes de água bem baixos (Goldemberg; Moreira, 2005).

Em 2003, a União elaborou o Programa Nacional de Universalização e Usos de Energia Elétrica que teve como proposta atender os 12 milhões de brasileiros até 2008, sendo 10 milhões referentes à área rural, que não detém acesso ao serviço elétrico. O programa busca atender os estados, municípios, comunidades e setor elétrico (Goldemberg; Moreira, 2005).

No ano de 2010, ocorreu o leilão para contratação de energia oriunda da usina hidrelétrica de Belo Monte, situada no Rio Xingu. Neste mesmo ano foi desenvolvido a Política Nacional de segurança de barragens com a finalidade de assegurar a proteção, de modo a reduzir a possibilidade de acidentes nas barragens que armazenam água para qualquer que seja a finalidade (Silva, 2021).

Em 2012 aconteceu a inauguração da usina hidrelétrica Santo Antônio, localizada no estado de Rondônia, com a potência de 3.568 MW (ANEEL, 2024). Outro marco importante foi a desestatização da Eletrobras, em 2021, no governo do Jair Bolsonaro com a promulgação da lei nº 14.182/2021. Neste ano de 2024, o presidente Luiz Inácio Lula da Silva instituiu o Programa de Energia Limpa na Minha Casa, Minha Vida que visa promover a implantação de energia elétrica renovável de forma prioritária nas casas vinculadas a esse programa (ANEEL, 2024).

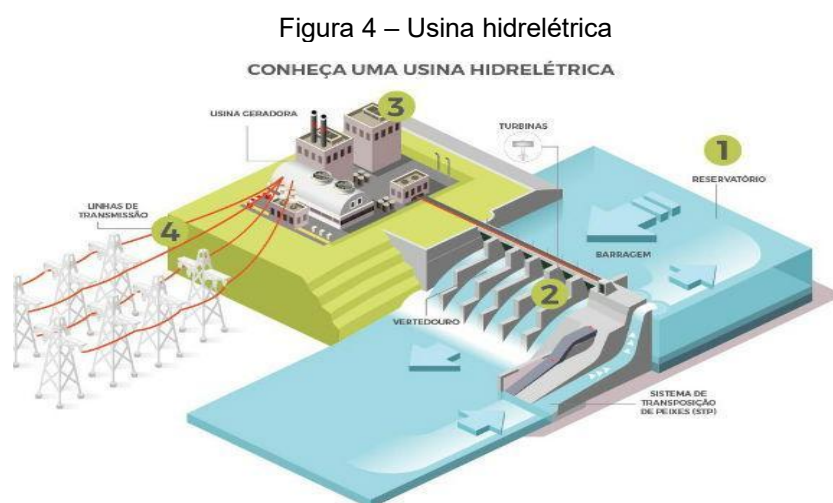
Portanto, é notório a importância das usinas hidrelétricas, posto que representam a maior parte da energia elétrica do nosso país. Como visto, com o passar dos anos elas crescem, porém, sua oferta é limitada já que o Brasil paga uma das maiores taxas para fornecimento de energia, resultado de um mercado de exportação para os países vizinhos: Argentina, Uruguai e Paraguai.

## 2.1 Conceituando Regulador de velocidade eletrônico

Ao falar sobre o regulador de velocidade eletrônico, é interessante entender seu funcionamento dentro do processo de geração de energia em uma usina hidrelétrica, quais suas funções, seus componentes, tipos e impactos.

Em síntese, tem-se o processo de geração de energia pelas usinas hidrelétricas que se constitui através de um represamento da água configurando a barragem. Essa água, por intermédio de obras de adução, tubos de desvio e canais, é forçada para as turbinas que ao mobilizar converte a energia potencial em energia mecânica. Após, essa energia é transportada para um gerador elétrico, resultando na energia elétrica, que são encaminhadas para linhas de transmissão, dirigindo as companhias distribuidoras, conforme disposto na Figura 4, que se tem de uma usinha hidrelétrica.

De forma geral os componentes fundamentais em uma usina hidrelétrica compreendem: A barragem com a função de interceptar o curso da água, originando um reservatório; A casa de força que acolhe o sistema da turbina-gerador, bem como os equipamentos auxiliares como o regulador de velocidade; As turbinas que tem como atribuição converter a força da água em energia mecânica; Os geradores que transforma a energia mecânica em elétrica; O circuito hidráulico que engloba a tomada de água, o conduto forçado e canal de adução; O canal de fuga com a finalidade de restabelecer a água turbinada ao rio; Por fim, o vertedouro que consiste em uma canal artificial que leva a água por intermédio da barragem e que escoo o excesso da água (Mazzorana, 2008).



Fonte: Gouveia (2024)

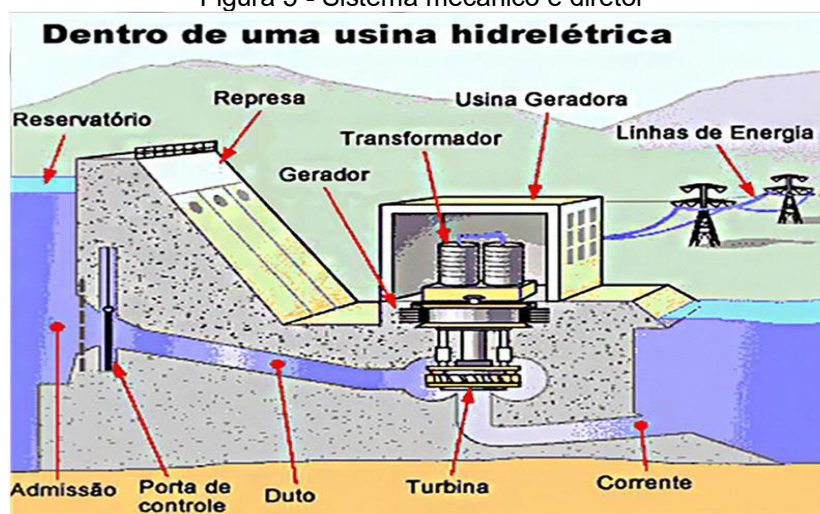
Após descrever o processo em que o regulador é inserido, vale caracterizar que o sistema regulador de velocidade consiste em um equipamento para controlar a potência estabelecida pelo rotor da turbina. Ele age de forma a controlar a velocidade de giro e manter a frequência do sistema em uma faixa de valores consideráveis. Esse regulador funciona para os atuadores hidráulicos (Souza; Fuchs; Santos, 1983).

Segundo Mazzorana (2008), o regulador serve também para manter a segurança, ainda que haja momentos de intensas variações, como por exemplo a aversão elétricas de carga. Desse modo, a sua finalidade vai muito além de controle, mas também a prevenção sobre velocidades do rotor da turbina. Esse sistema engloba diversos dispositivos que possuem o objetivo de identificar qualquer intercorrência na velocidade para transformar em uma forma conveniente.

Ademais, Mancini (2004) corrobora que na prática, a atuação de controle compreende no ajustamento de vazão de água que invade o rotor da turbina, sendo realizada por intermédio do comando de fechamento ou abertura do distribuidor da turbina.

Com relação ao sistema de regulador de velocidade, ele abarca dois subsistemas: sistema mecânico e o diretor, conforme Figura 5. Respectivamente, o primeiro refere-se a um conjunto de manivelas, bielas, constituindo o anel distribuidor das pás direcionais. O segundo compreende na válvula direcional proporcional, atuadores hidráulicos, válvula de alívio, filtros para controle de óleo, bomba, sendo conectados através de uma tubulação firme.

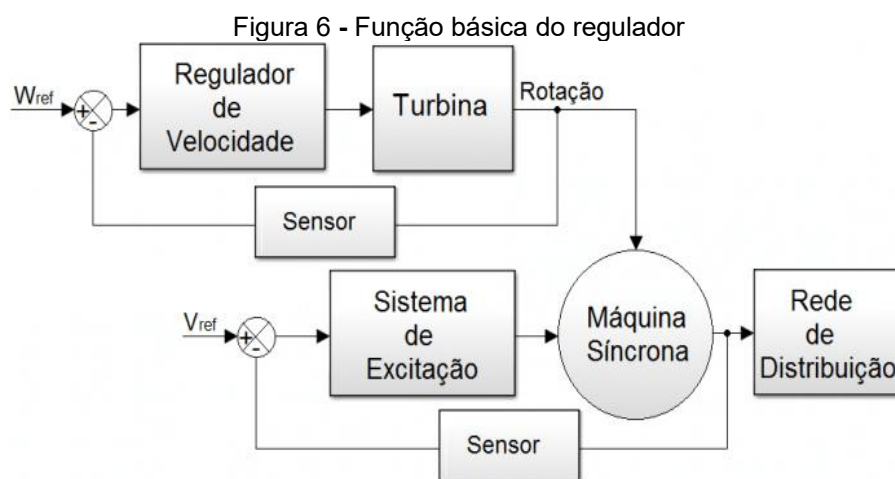
Figura 5 - Sistema mecânico e diretor



Fonte: Quanta (2021)

Vale ressaltar a importância em averiguar a melhor forma de atuação do regulador de velocidade, uma vez que se não for bem adaptado pode gerar uma rejeição da carga e ocasionar fenômenos como golpes de aríete, em que o rotor dispara implicando em problemas para toda a usina. Entretanto, se nessa ocasião o distribuidor passar a fechar de forma rápida, podem descartar o perigo sobre velocidade, mas o condutor forçado pode vir a deteriorar dependendo da velocidade de fechamento em que se encontrar (Mazzorana, 2008).

Em suma, as funções básicas do regulador consistem em responder às variações de carga da rede, de modo a propiciar a constância na frequência; adequar e controlar a potência do gerador, segundo a exigência do sistema; realizar a partida de modo automático até a velocidade nominal de forma controlada; impedir a sobrepressão e sobrevelocidade no conduto em hipótese de rejeição da carga, conforme ilustrado na Figura 6 (Voith Hydro, 2018).



Fonte: Alves (2018)

Quanto aos tipos de reguladores de velocidade, existem quatro, que são: o regulador isócrona, o regulador com estatismo permanente, estatismo transitório e o regulador de velocidade PID. O isócrona, quando operado em regime permanente, funciona para manter a velocidade constante de rotação. Mas possui péssimas qualidades quanto a estabilidade no regime de transição. Sendo utilizados em sistemas isolados quando não precisam de controlar a potência. Dessa forma, demonstra ser inadequado para sistemas interligados, podendo ocasionar problemas na sua estabilidade (Ogata, 2010).

O Estatismo Permanente é o resultado da relação percentual entre a variação da velocidade e a variação de potência ativa em uma unidade geradora, sendo necessário conter essa característica para gerar uma divisão estável da carga entre as unidades geradoras que utilizam o sistema interligado.

Depois, o Estatismo Transitório, que ocorre quando é introduzido ao regulador de estatismo permanente, uma realimentação com um fragmento transitório, utilizados para garantir uma execução de maneira estável. Por fim, o regulador PID, usado no controle de inúmeras variáveis como velocidade, posição, etc. Ele permite uma resposta rápida, diminuição de ganho transitório e expansão do ganho em regime permanente (Ogata, 2010).

Vale observar que, a escolha para a utilização do tipo de regulador depende do regime de operação que está previsto na central da usina hidrelétrica, isto é, se irá funcionar em regime isolado ou regime interligado ao sistema (Pereira, 2020).

O primeiro regulador de velocidade foi produzido por James Watt em 1769, conhecido como “regulador de esferas” para controlar a velocidade de máquinas a vapor. E com o advento do capitalismo e das máquinas modernas de modo a atender as demandas com a energia elétrica, atingir o maior número de consumidores e estabelecer um padrão nas geradoras. Para isso, as turbinas e geradores precisariam estar preparados a fim de gerar a tensão na frequência correta, sem dispor de riscos aos equipamentos e usuários.

Sendo assim, o regulador de velocidade das máquinas, surgiu com o condão de controlar a velocidade da turbina e a frequência da tensão do gerador. Atualmente, as novas usinas são estruturadas com reguladores eletrônicos, mas ainda há muitas com o regulador de velocidade totalmente mecânico (modelo Watt), embora algumas empresas estão optando por substituir para os modelos mais modernos que detêm maior eficiência na sua execução (Belo, 2017).

Para que um regulador esteja em conformidade e equilíbrio, é preciso considerar a redução de falhas do equipamento, o menor custo de reparo que envolve a mão de obra, equipamentos e os custos da perda da produção no tempo em que a máquina ficou parada. Assim, é preciso considerar a disponibilidade dos equipamentos e as suas confiabilidades, quando um ativo produz uma função, durante um tempo, com suas especificidades (Fogliatto; Ribeiro, 2009). Com isso, é

necessário o estudo da confiabilidade para determinar as probabilidades de falhas, a fim de diminuir o custo de eventuais manutenções.

De acordo com Bazanella (2005), na análise de estabilidade de sistemas dinâmicos, é necessário verificar se o sistema obedece ao Princípio da Superposição e ao Teorema da Convolução, caso esses critérios sejam atendidos, o sistema pode ser considerado linear. Com relação ao princípio da superposição, tem-se que o efeito total de várias fontes independentes atuando ao mesmo tempo é a soma dos efeitos individuais de cada fonte. E o Teorema da Convolução, sendo um conceito matemático que relaciona sinais nos domínios do tempo e da frequência

Nesse sentido, em um sistema linear compreende o princípio da superposição, que consiste na saída de um sinal estabelecido pela combinação linear de diferentes sinais, sendo igual a mesma combinação tida nos sinais de saída ocasionado por cada sinal original separado. Portanto, o teorema da convolução também é fundamental para trabalhar com SLITs (Bazanella, 2005).

Assim, um sistema será invariante no tempo quando um avanço ou retardo de lapso temporal ocasionar em tempo descolado igual ao sinal de saída. Em suma, um sistema que detém características de invariância no tempo e seja linear, é intitulado como SLIT - sistema linear invariante ao tempo. Entretanto, a denominada variante no tempo é mesma que se diz invariante, porém essa condição não se verifica no sistema (Bazanella, 2005).

De modo a complementar, Ogata (1982) define a função de transferência de um sistema que não varia no tempo por meio de uma equação diferente, sendo ela determinada como o quociente entre as transformadas de Laplace de saída e entrada, invalidando as condições iniciais (iguais a zero). Assim, a aplicabilidade da função de transferência é restrita a sistemas de equações lineares e invariantes no tempo. A função de transferência consiste em uma propriedade intrínseca ao sistema, sendo a fórmula matemática que possui uma forma operacional para manifestar a equação diferencial, isto é, relaciona a variável de saída e entrada do sistema.

Vale pontuar que, na década de 40, foi muito utilizado o controle operacional por meio de malhas fechadas, as quais atendiam os desempenhos demandados. O sistema de malha fechada é um sistema que utiliza o controle de realimentação, ou

seja, mede o sinal de saída e compara a sua referência. Esse sistema tem um sinal de erro atuante, onde o erro é a diferença entre o sinal de entrada e saída.

Por conseguinte, a estabilidade de um sistema dinâmico depende dos meios e conceitos concedidos para uma investigação. Portanto, a estabilidade está intimamente ligada a competência de um sistema se manter em equilíbrio, e mesmo assim, após alguma desordem voltar a esse estado (Kundur, 2004).

Sabe-se que à medida que a tecnologia avança, os dispositivos e meios são criados a fim de atender os mais variados setores. E com a esfera da energia elétrica não é diferente. Assim, o contexto atual brasileiro indica para uma necessidade cada vez maior de energia. E como forma de minimizar gastos e utilizar medidas complementares para aumentar a capacidade, é imprescindível a reforma das instalações antigas, de modo a atender as inovações e modernizações, seguindo o exemplo de alguns países como Estados Unidos, Canadá, Europa, dentre outros. Por isso, as modernizações dos sistemas de regulação implicam na eficiência, rendimento e segurança das usinas.

## **2.2 Revisão Sistemática da Literatura**

### **2.2.1 No que concerne à metodologia e análise dos dados**

Com relação à estrutura do trabalho, é dividido em três seções. Em um primeiro momento, foi realizada uma pesquisa exploratória com levantamento bibliográfico em periódicos e livros que contemplam o assunto em foco. Incluem-se aí a busca de subsídios sobre as hidrelétricas no Brasil e regulador de velocidade eletrônico, contando com diversos teóricos, como Marques (2021), Muller (1995), Silva (2021), Mazzorana (2008), dentre outros. Assim, essa fundamentação teórica vinculada ao tema se caracteriza como pesquisa bibliográfica.

Com relação a sua abordagem, classifica-se como quali-quantitativa, no qual trata-se de um estudo que se teve a coleta de informações que visam descrever, usada para criar uma hipótese que é, em seguida, testada utilizando a pesquisa quantitativa que analisam os conceitos e pontos de vista dos teóricos e também quando são analisados e interpretados os dados da pesquisa bibliométrica, estabelecendo conexões com os teóricos da fundamentação.

Em consonância com Pendlebury (2008, p.29), a pesquisa bibliométrica se trata da “aplicação de análise quantitativa e estatística a publicações científicas, oferecendo vantagens durante o processo de coleta da informação objetiva necessária para tomada de decisões”.

Assim, a realização desta pesquisa aconteceu no mês de outubro de 2024, no qual se utilizou o recurso de busca rápida, que foi capaz de disponibilizar publicações que apresentassem os descritores digitados no título, no resumo ou nas palavras-chave.

Assim, foi realizada a pesquisa bibliométrica utilizando os descritores: “*hydroelectric plant*”, “*speed regulator*”, “*hydraulic turbine*” na plataforma *Scopus*, com buscas no período de 2014 a 2024, tendo como resultado 20 trabalhos. A escolha por essa plataforma se deu pelo fato de fornecer referências bibliográficas completas e com credibilidade, no qual permite realizar consulta de dados autorais ou de bases.

Dessa forma, a pesquisa bibliométrica tem como base verificar os benefícios que se tem na utilização de reguladores de velocidade eletrônico em usinas hidrelétricas. No quadro 1 encontra-se a estrutura metodológica da pesquisa.

Quadro 1 - Estrutura metodológica

ETAPAS DA BIBLIOMETRIA	
1ª ação	Realização da pesquisa da plataforma <i>Scopus</i>
2ª ação	Critério de exclusão e inclusão dos documentos encontrados
3ª ação	Leitura dos documentos escolhidos e análise dos artigos do estudo bibliométrico

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Com relação à segunda etapa da pesquisa, foram selecionados trabalhos considerando-se as referidas palavras-chave em seus títulos e resumos, como critério de exclusão e inclusão. Assim, vale ressaltar que alguns trabalhos trazem o regulador com resultados positivos, mas também como negativos em usinas hidrelétricas em pesquisas aplicadas, porém o termo parece nos tópicos: título, resumo, introdução, na fundamentação teórica ou na pesquisa bibliográfica.

O Quadro 2 traz o quantitativo de trabalhos que foram encontrados na pesquisa bibliométrica. Depois, foi realizada a triagem no critério de inclusão e exclusão dos documentos, deixando registrado o título, autor e ano de publicação.

Quadro 02 - Total de trabalhos encontrados para análise

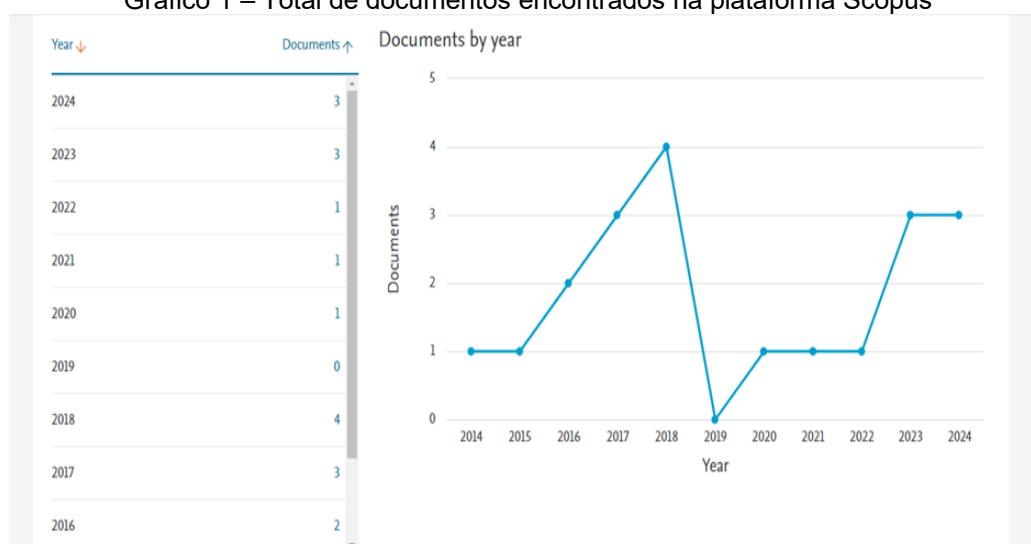
Nº	Título	Autores	Ano
1	Direct Grid Connection of a Prototype with Real-Time Control for Energy Recovery and Pressure Control in a Water Distribution Network through Hydraulic Regulation	MAIO, Marco; MARINI, Gustavo; ZOTTI, Fernando; FONTANA, Nicola	2024
2	PID Parameter Optimization of Hydro-Turbine Speed Control System Based on CPG Algorithm	YANG, Li; ZHANG, Mingxu; YANG, Yun	2024
3	Experimental Implementation of Hydraulic Turbine Dynamics and a Fractional Order Speed Governor Controller on a Small-Scale Power System	DA SILVA, Cláudia Sabrina Monteiro	2024
4	Parameter estimation of the hydraulic turbine regulator system using multi-objective lion algorithm	BERGAMINI, Mariane Gaviol; OLIVEIRA, Gustavo HC; RIBEIRO, Eduardo P.;	2023
5	Effectiveness of applying pressure regulation valve to hydro turbine governing system and its multi-objective control optimization under load rejection	XINJIE, Lai <i>et al.</i>	2023
6	Multi-Objective Feedback Nonlinear Sliding Mode Control Strategy Based Integrated Regulator for Hydropower Set With Sloping Ceiling Tailrace Tunnel	WU, Zhiding; WU, Zhuolin; KONG, Fannie; ZHANG, Haochen	2023
7	Modeling and Simulation of Speed Regulating System for Paute Molino Hydroelectric Power Plant and Commissioning Tests Contrasting	LUIS, Lucero-Amay; JESÚS Játiva-Ibarra	2022
8	Understanding the coherent structures for different fluctuation frequencies at partial load condition of a Francis turbine	GUOYONG, Sun <i>et al.</i>	2021
9	Stability of speed regulating system of hydropower station with surge tank considering nonlinear turbine characteristics	XINYU Xu; WENCHENG; Guo	2020
10	Advanced rotational speed control in ocean energy doubly fed induction generators	IZASKUN, Garrido <i>et al.</i>	2018
11	Simulation Study of a GPC Controller for a Hydroelectric Plant during Electric Faults	SACASQUI, Marcos; LUYO, Jaime	2018
12	Voltage and Frequency Regulation for Wound Rotor Synchronous Generator in Micro Hydro Power Plants with Real-Time Implementation	PHAM, Duy An <i>et al.</i>	2017
13	Sliding Mode Rotational Speed Control of an Oscillating Water Column-based Wave Generation Power Plants	M'ZOUGH, Fares	2018
14	Valve exploiting the principle of a side channel turbine	JANDOUREK, Pavel; POCHYLÝ, František; HABAN, Vladimír	2017
15	Speed governor PID gains optimal tuning of hydraulic turbine generator set with an improved artificial fish swarm algorithm	SUN, Xing; HONGQING, Presa de	2017
16	Water hammer effect in the spiral case and penstock of Francis turbines	PEPA, D. <i>et al.</i>	2016
17	Pneutronic speed governor for small hydropower plants: a new application for pneumatics	ASAFF, Yesid, NEGRI, Victor Juliano De; SOARES João Marcos Castro	2016
18	Mathematical modeling of vibrations in turbogenerator sets of Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Station	LEONOV, G.A.; KUZNETSOV, N. V.; SOLOVYOVA, E. P.	2016

19	Data-driven design of a fault tolerant fuzzy controller for a simulated hydroelectric system	SIMANI, Silvio; ALVISI, Stefano; VENTURINI, Mauro	2015
20	Accurate DC-DC power converters as hydro turbine speed governor power supply	THOMASSET, P. J. <i>et al.</i>	2014

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Dentre os trabalhos que foram encontrados, percebe-se que, em um percurso histórico, há a existência de um número maior de pesquisas publicadas. No Gráfico 1, verifica-se a pertinência referente aos trabalhos relacionados no Quadro 2. Assim, o Gráfico 1 traz o quantitativo de trabalhos encontrados por ano, do total de 20 trabalhos.

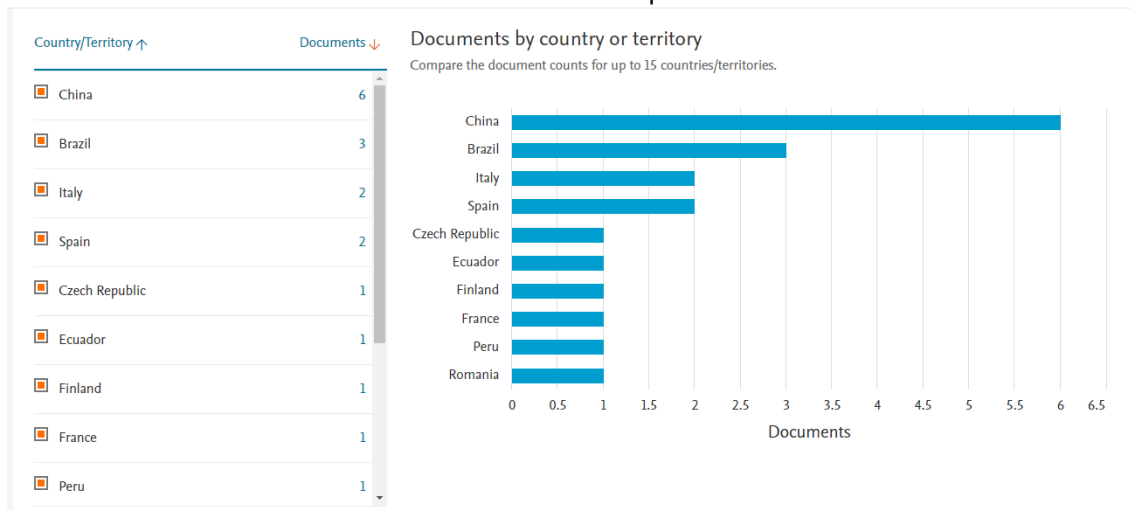
Gráfico 1 – Total de documentos encontrados na plataforma Scopus



Fonte: Base Scopus (2024)

Dentre os trabalhos encontrados, vale a observação sobre a redução de pesquisas a partir do ano de 2019, o que leva a perceber que a pandemia da Covid-19 trouxe impactos nas pesquisas, as quais provavelmente sofreram novos encaminhamentos. A seguir, com base no resultado dos documentos encontrados, o Gráfico 2 apresenta o quantitativo de pesquisas realizadas em cada território/país.

Gráfico 2 - Documentos por território



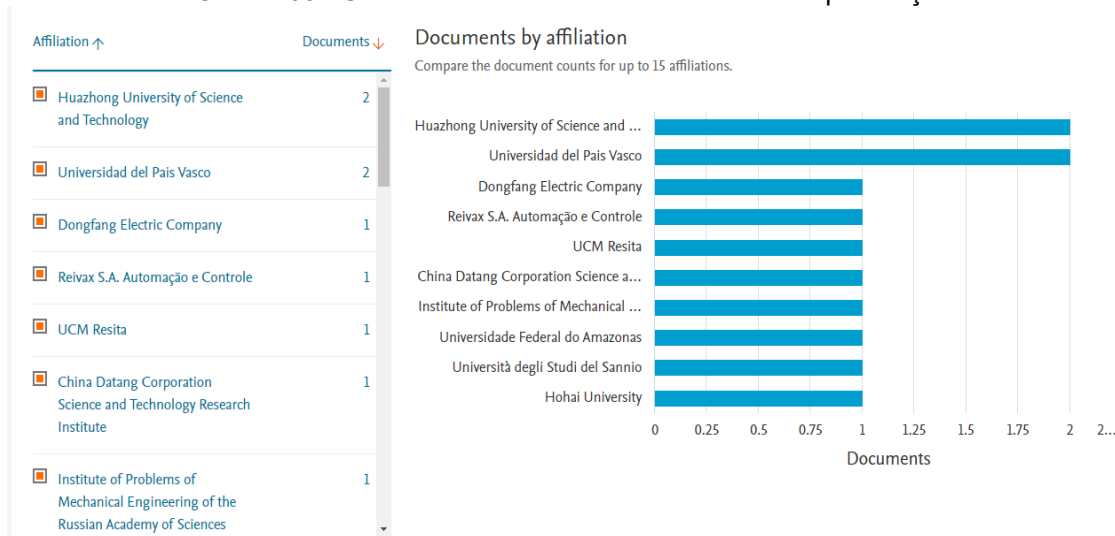
Fonte: Base Scopus (2024)

Observa-se que o maior número de pesquisas se encontra na China, com o total de 06 trabalhos; e, em segundo lugar vêm o Brasil com o total de 3 publicações, ou seja, a metade dos trabalhos chineses.

Pondera-se o fato de os chineses estarem no topo, uma vez que o país impressiona o mundo com suas gigantescas obras de infraestrutura, tendo em sua localidade, a Usina Hidrelétrica das Três Gargantas, sendo considerada a maior do mundo. Ademais, é o país com o maior crescimento da capacidade instalada e do consumo de energia elétrica no mundo, graças basicamente ao planejamento integrado e ao modelo de financiamento estatal, tendo diversas usinas concluídas por ano e algumas unidades, ainda inacabadas, colocadas em funcionamento, como o caso do ano de 2014, que teve 27 unidades concluídas (Castro; Católico; Vieira, 2018).

O Gráfico 03 mostra o ranking das Universidades com maior quantitativo de publicações, entre as quais encontram-se Huazhong University of Science and Technology e Universidad del País Vasco, ambas com duas publicações, localizadas na China e Espanha. Esta, sendo localizada no país da União Europeia que tem a segunda maior infraestrutura de energia renovável e aquela, no país que é o maior produtor mundial de hidreletricidade, seguida pelo Brasil e Canadá.

Gráfico 03 - Universidades com maiores números de publicações



Fonte: Base Scopus (2024)

Além disso, alguns trabalhos que foram encontrados não serão utilizados na análise, pois não estão dentro do objeto da pesquisa com o regulador de velocidade eletrônico, entre os quais têm-se Maio, Marini, Zotti e Fontana (2024), que trazem em sua pesquisa, “um método de otimização de parâmetros do sistema de controle de velocidade baseado no Convergence Factor Particle Swarm Optimization and Gravitational Search Algorithm (CPG)”.

Com relação a pesquisa Bergamini, Oliveira e Ribeiro (2023), eles tratam do cálculo do fluxo interno de uma turbina Francis, tendo uma pesquisa sem ligação ao objeto desejado. Já o trabalho de Xinjie *et al.* (2023), estuda a turbina de canal lateral utilizada para substituir a válvula redutora de pressão.

A pesquisa de Wu *et al.* (2023), traz uma análise de método de cálculo dos valores máximos de pressão, os quais podem ocorrer quando há rejeição de carga a uma turbina hidráulica. Pham *et al.* (2017) abordam o alto potencial da micro energia hidrelétrica no qual traz oportunidades off-grid no Vietnã.

M'zough (2018), aborda a modelagem e controle Energia Maremotriz, da usina de geração de ondas Nereida, um quebra-mar, instalada em Mutriku, na Espanha e Jandourek, Pochylý e Haban (2017), pesquisam sobre a turbina de canal lateral, a qual pode ser utilizada como substituto adequado para uma válvula redutora de pressão.

Com relação a pesquisa de Pepa *et al.* (2016), fala sobre os métodos de calcular valores máximos de pressão, os quais podem ocorrer em situações de rejeição de carga a uma turbina hidráulica, relatando a espiral e conduto forçado. Leonov, Kuznetsov e Solovyova (2016) abordam as faixas de oscilação indesejáveis dos testes em escala das hidrelétricas da Usina Hidrelétrica Sayano Shushenskaya, que foram realizados em 1988.

O trabalho de Simani, Alvisi e Venturini (2015), traz os estudos voltados a uma proposta de abordagem orientada com dados para o projeto de um Controlador Fuzzy, um sistema de controle tolerante a falhas que busca regular a velocidade de uma turbina Francis incluída em um sistema hidrelétrico simulado nos ambientes Matlab e Simulink. Por fim, Thomasset *et al.* (2014), que abordam os conversores de energia DC-DC precisos como fonte de alimentação do regulador de velocidade da turbina hidrelétrica, usado como fonte de alimentação de tensão múltipla para evitar falhas frequentes e desligamentos de emergência da turbina

Sendo assim, dos 20 trabalhos encontrados, 10 pesquisas não estão relacionadas a reguladores de velocidade eletrônico em usinas hidrelétricas. Ademais, 01 artigo encontra-se indisponível publicamente ou via acesso institucional, restando 09 trabalhos, cujas pesquisas estão relacionadas aos reguladores de velocidade em usinas hidrelétricas.

Observa-se que apenas a de Xinyu e Wencheng (2020), relata acerca do regulador de velocidade, contudo o resultado é voltado na investigação da estabilidade do sistema de regulação de velocidade (SRS) da estação hidrelétrica com tanque de compensação (HSST) considerando características não lineares da turbina.

Sendo assim, restaram 08 trabalhos os quais constam no Quadro 03, a serem trabalhados.

Quadro 03 - Trabalhos utilizados para análise da pesquisa

Nº	Título	Autores	Ano
1	PID Parameter Optimization of Hydro-Turbine Speed Control System Based on CPG Algorithm	YANG, Li; ZHANG, Mingxu, YANG, Yun	2024
2	Modeling and Simulation of Speed Regulating System for Paute Molino Hydroelectric Power Plant and Commissioning Tests Contrasting	LUIS, Lucero-Amay; JESÚS Játiva-Ibarra	2022
3	Advanced rotational speed control in ocean energy doubly fed induction generators	IZASKUN, Garrido <i>et al.</i>	2018

4	Simulation Study of a GPC Controller for a Hydroelectric Plant during Electric Faults	SACASQUI, Marcos; LUYO, Jaime	2018
5	Speed governor PID gains optimal tuning of hydraulic turbine generator set with an improved artificial fish swarm algorithm	SUN, Xing; HONGQING, Presa de	2017
6	Pneutronic speed governor for small hydropower plants: a new application for pneumatics	ASAFF, Yesid, NEGRI, Victor Juliano De; SOARES João Marcos Castro	2016
7	Accurate DC-DC power converters as hydro turbine speed governor power supply	THOMASSET, P. J.	2014
8	Experimental Implementation of Hydraulic Turbine Dynamics and a Fractional Order Speed Governor Controller on a Small-Scale Power System	DA SILVA, Cláudia Sabrina Monteiro	2024

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Depois de realizada a leitura dos artigos, pode-se perceber que existem vários tipos de reguladores de velocidade em usinas hidrelétricas. Dentre os resultados, tem-se que o “controlador FOPID com derivada de segunda ordem supera os outros controladores em termos de estabilidade”, conforme aponta Yang, Zhang e Yang (2024, p. 4). De acordo com os autores, os parâmetros encontrados trazem resultados positivos com relação aos reguladores, no qual foram utilizados algoritmo de otimização de enxame de partículas (PSO).

Assim, os resultados confirmam o desempenho superior dos controladores de ordem fracionária sobre os controladores de ordem inteira, uma vez que foram investigados dois controladores, ambos aplicados ao sistema em um ambiente computacional e não linear que representa um sistema de geração de energia de pequena escala. Portanto, verificou-se em todos os testes, que o sistema com o regulador de velocidade de ordem fracionária apresentou um menor *overshoot* e *undershoot*, bem como um menor nível de oscilações de velocidade, ambos com tempo de estabilização semelhantes. Assim, o fenômeno *overshoot* refere-se a comportamentos transitórios das variáveis elétricas como a voltagem ou corrente em casos de transientes, falhas da rede ou variações em carga abrupta. Já o *undershoot* está ligado a uma queda temporária abaixo do valor normal ou de referência da variável, como a tensão ao longo do transitório (Yang; Zhang; Yang, 2024).

Em consonância com Luis e Jesús (2022, p. 8), o regulador de velocidade tem como objetivo “manter, dentro de uma faixa técnica adequada, a frequência e a potência ativa em resposta à variação de carga, tendo o desempenho obtido pela

variação da velocidade do sistema turbina-gerador”. Assim, o método de PSO que é um enxame de partículas para otimização, possui maior flexibilidade para se ajustar aos limites estabelecidos pelo fabricante, em relação aos parâmetros do acionamento.

Com relação aos resultados, mostram que o algoritmo PSO, que se refere a um método competente para a parametrização do regulador de velocidade, que possibilita a obtenção da tendência do desempenho do gerador e do sistema de regulação de velocidade, nos quais os resultados são comparáveis aos obtidos na simulação, sugerindo que a simulação possui alta precisão (Luis; Jesús, 2022).

Izaskun *et al.* (2018), relatam diferentes estratégias de controle para maximizar a energia obtida de dispositivos Conversores de Energia das Ondas-WEC. Uma vez que o esquema proposto é baseado no projeto de demonstração NEREIDA MOWC, em uma usina de ondas de quebra-mar, na localidade de basca de Mutriku. Este projeto tem como objetivo mostrar a incorporação bem-sucedida da tecnologia com a tomada de potência da turbina Wells em um quebra-mar de entulho que foi construído recentemente na costa norte da Europa, demonstrando sua viabilidade para projetos futuros. Sendo assim, ficou perceptível a eficiência da turbina Wells, aumentando a potência gerada.

Além disso, apresentaram um esquema para evitar o fenômeno de estol – perda da velocidade - que é controlar adequadamente a velocidade rotacional do conjunto turbogerador. Também foi determinado quando o uso da válvula de ar não é mais necessário, reduzindo os custos de instalação e melhorando a confiabilidade e o tempo de resposta da usina de energia das ondas, trazendo um resultado positivo para os reguladores (Izaskun *et al.*, 2018).

De acordo com Sacasqui e Luyo (2018, p. 2), a utilização de “controladores digitais além de aumentar a confiabilidade e reduzir custos que permite a possibilidade de diferentes alternativas de controle como a utilização de Model Predictive Control - MPC, algoritmos de Inteligência Artificial”.

Segundo os autores, como resultado da análise tem-se que o regulador de velocidade, através da Teoria de Controle Preditivo Generalizado – GPC, cumpre a tarefa de estabilizar a velocidade embora o tempo seja excessivo (10 segundos considerando falha trifásica) com relação ao controlador PID. A análise trouxe também que o controlador PID demonstrou mais confiabilidade do que um

controlador MPC como GPC, e mostra no mesmo período de tempo o curto tempo de recuperação assumido pelo controlador PID e a instabilidade na tensão de saída do gerador GPC. Por outro lado, a velocidade nominal da turbina, isto é, o tempo de estabilização foi alcançada pelo controlador PID em 5s, mas o mesmo levou 10s usando GPC (Sacasqui; Luyo, 2018).

Os pesquisadores Sun e Hongqing (2017) trazem a proposta do algoritmo de enxame de peixes artificial, aplicando para otimizar os ganhos de PID do regulador de velocidade do gerador de turbina hidráulica.

O algoritmo de enxame de peixes artificiais aprimorado, utiliza o critério ITAE (Integral do Tempo Absoluto do Erro) dos erros relativos de velocidade do gerador como a função de aptidão. Com isso, observaram que o controle PID do regulador do gerador de turbina hidrelétrica apresenta eficiente desempenho.

Com base nos estudos de Asaff, Negri e Soares (2016), percebe-se que as usinas hidrelétricas são uma solução consolidada para geração de eletricidade por meio de fonte renovável de energia, em que a capacidade de produção de cada usina pode variar de centenas de quilowatts ou menos até milhares de megawatts.

Com isso, os reguladores de velocidade usados em plantas grandes e pequenas compreendem fundamentalmente em Sistemas Hidráulicos de Malha Fechada – CLHSs, para o controle de posicionamento de comportas e lâminas de rotor em turbinas de reação, e agulhas e defletores em turbinas de ação.

As turbinas hidráulicas são máquinas de fluxo que geram energia mecânica na forma de torque, sendo utilizada em centrais hidrelétricas para mover um gerador. Dentro do contexto tecnológico, a combinação da turbina e do gerador são os componentes fundamentais de uma central hidrelétrica, sendo assim, as turbinas são classificadas em dois grupos, ação e reação, diferenciadas pelo seu tipo de atuação (Soares, 1982).

A principal característica das turbinas de ação, é variação de pressão do fluido enquanto passa pelo rotor, transformando assim a energia cinética em energia mecânica motriz. Elas são instaladas em locais onde possuem grandes quedas, uma vez que seu rotor com pás em formato de conchas, recebe a água impulsionada pelos jatos, fazendo girar o eixo. Um exemplo são as turbinas Pelton (Çengel; Cimbala, 2015).

Nas turbinas de ação, a pressão atmosférica permanece constante, tanto na entrada quanto na saída do rotor. Dessa forma, a energia cinética da água é a única aproveitada, não havendo utilização da energia de pressão (Soares, 1982).

As turbinas denominadas de reação operam com variação da pressão da água, convertendo-a em energia mecânica para movimentar o rotor. Essas turbinas podem ser do tipo com pás fixas, como a turbina Francis, ou com pás ajustáveis, como a turbina Kaplan

De acordo com Bergamo (2018), as turbinas Pelton são indicadas para quedas elevadas, nas quais a descarga (vazão) utilizável geralmente é inferior, uma vez que a captação ocorre em altitudes onde o curso d'água ainda apresenta pequeno deflúvio. Devido à sua fabricação, instalação e regulação relativamente fáceis, além de serem utilizadas em usinas de grande potência, são também amplamente utilizadas em micro usinas, aproveitando quedas e vazões muito pequenas para a geração de algumas dezenas de kW.

Com relação a turbina Francis, é o modelo mais empregado na geração hidrelétrica do país. Essas turbinas atingem as maiores potências de eixo e são utilizadas em uma ampla gama de alturas de queda líquida, que vai desde pequenas alturas como, por exemplo, 10m até 450m. O funcionamento da turbina se dá quando a água preenche completamente a cavidade destinada ao rotor e, ao fluir, transfere tanto energia de pressão quanto energia cinética para as pás do rotor, por isso é chamada de turbina de reação, pois apresenta uma diferença de pressão entre os dois lados das pás do rotor (Bergamo, 2018).

Já as turbinas Kaplan têm hélice com lâminas ajustáveis e são usadas na mesma faixa de altura das turbinas Francis, onde uma velocidade mais alta é necessária, preferencialmente em relativas baixas elevações topográficas e grande vazão de água. As Kaplan apresentam maior eficiência em comparação com as turbinas Francis, mas têm custos de fabricação e manutenção superiores. Tradicionalmente, o eixo de uma turbina Kaplan é vertical, mas existem projetos com eixo horizontal, que são utilizados para baixas potências em locais onde a altura da queda é muito reduzida (Bergamo, 2018).

Assim, os resultados teóricos e experimentais obtidos em laboratório confirmam a eficácia do sistema servo-pneumático para o controle da posição do servomotor em reguladores de velocidade de CGH's de 400 kW, no qual foi

observado através dos testes realizados com diferentes amplitudes de passo e um sinal sinusoidal que a resposta do sistema estava de acordo com a dinâmica e os erros de posição de 0,5 –0,8% do curso total do cilindro estavam abaixo de 1% exigido para reguladores de velocidade, sendo boa identificada em todos os testes (Asaff; Negri; Soares, 2016).

No trabalho de Silva (2024) abordou o regulador de velocidade na usina hidrelétrica em um túnel de canal de escape com teto inclinado, mostrando os índices hidráulicos, no qual estabelece um modelo de sistema de regulação integrado de conjunto de geradores hidrelétricos não lineares e demonstrando que o processo de transição hidráulica do sistema de desvio é o impacto rígido da água.

De acordo com os resultados obtidos, tem-se que todos os parâmetros do controlador são otimizados de forma simultânea pelo algoritmo de otimização de baleia (WOA) que é usado para otimizar os parâmetros do controlador.

Assim, os resultados da simulação mostram que o MOFNSMC tem um melhor efeito de controle quando o conjunto hidrogerador é perturbado. Este método de controle pode reduzir significativamente o impacto no conjunto hidrogerador quando ele está sujeito a perturbações elétricas e hidráulicas frequentes, melhorando efetivamente a operação segura e estável do conjunto hidrogerador.

MOFNSMC - Model-Based Optimal Fixed-Point Nonlinear Sliding Mode Control, consiste em uma técnica de controle não linear baseada no modo deslizante Sliding Mode Control, ou SMC que é otimizada para lidar com sistemas dinâmicos não lineares, especialmente em situações de perturbações ou incertezas, como pode ocorrer em sistemas de controle de hidrogeradores. Dessa forma, age de forma a manter o sistema eficaz e estável, mesmo com perturbações externas, ou seja, com falhas e variações na carga, potencializando o controle ao longo do prazo (Silva, 2024).

Por último, Thomasset (2014) acrescenta que os reguladores eletrônicos de velocidade de usinas hidrelétricas “são engenharia personalizada Interface e Interface Ambiental projetos, tão precisos e confiáveis quanto possível”. Assim, o conversor de energia CC-CC usado como fonte de alimentação de múltiplas tensões, deve ter pelo menos a mesma confiabilidade do próprio regulador, para evitar falhas frequentes e desligamentos de emergência da turbina.

O autor relata que as correspondências de carga ideal com o regulador de velocidade, melhor MTBF, concluindo que o planejamento de projetos de regulador de velocidade em um país tropical ou subtropical não se aplica apenas ao circuito de controle principal, mas também deve incluir a escolha e instalação adequadas da fonte de alimentação. De acordo com Thomasset (2014), MTBF se trata do período médio de tempo entre falhas do sistema, excluindo a mortalidade infantil e o fim da vida estimado. Frequentemente O método usado para calcular o MTBF é descrito em MIL-HOBK-217.

Assim, questões como conversor de energia CC-CC superdimensionado, de carga mínima, resfriamento insuficiente ou nenhum resfriamento, consequência de MTBF baixo de operação em altas temperaturas e faixa de tensão de entrada insuficiente para se ajustar ao intervalo de tensão CC da bateria/retificador, estão deixando uma margem de segurança, no qual devem ser levadas em consideração. Portanto, o regulador de velocidade pode ter consequências severas para o cliente, tendo várias unidades desnecessárias de desligamentos de turbina que poderiam ter sido evitadas (Thomasset, 2014).

Dessa forma, fica evidente a importância e benefício dos reguladores de velocidade, pois existem diversos modelos que possibilitam uma avaliação comparativa detalhada das condições de desempenho dos controladores. Nesse contexto, é essencial aprofundar a análise, a fim de trazer novas pesquisas sobre o tema, incluindo uma discussão sobre diferentes métodos de sintonia de controladores, para proporcionar uma compreensão mais abrangente e fundamentada dos resultados e conclusões deste estudo. Essa reformulação busca expandir o entendimento sobre o tema e criar um fechamento mais robusto e conclusivo.

## CONCLUSÃO

Diante do que foi estudado, é possível compreender que a eletricidade desempenha um papel fundamental nas hidrelétricas e nos reguladores de velocidade eletrônico, tanto no ponto de vista econômico quanto social, ambiental e técnico. Assim, as usinas hidrelétricas são responsáveis por grande produção de energia no Brasil tendo a função de diversificar a matriz energética, reduzir as dependências de fontes não renováveis e promover desenvolvimento regional.

A pesquisa demonstrou a relevância dos reguladores de velocidade eletrônico em usinas hidrelétricas para otimizar a geração de energia elétrica. A análise bibliométrica revelou que esses dispositivos promovem melhorias na eficiência energética, aumento da confiabilidade e estabilidade do sistema, na redução de perdas de energia, aperfeiçoamento da atuação das turbinas e na redução de custos operacionais.

Assim, a aplicação dos reguladores em usinas hidrelétricas brasileiras pode contribuir significativamente para melhorar a qualidade do fornecimento de energia, ampliar a capacidade de geração de energia e reduzir impactos ambientais, o que torna essencial a realização de investimentos em tecnologia para atualizar os reguladores, assim como no desenvolvimento de reguladores mais eficientes e sustentáveis e treinamento dos profissionais que atuam neste segmento.

Verificou-se que o regulador de velocidade é responsável pelo controle da vazão de água, que impacta diretamente na produção de energia elétrica, sendo necessário ajustar a potência gerada de acordo com a demanda de energia solicitada pelo Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Portanto, dentre as pesquisas analisadas voltadas para a importância dos reguladores de velocidade nas hidrelétricas, percebe-se que sua função não está apenas no controle da vazão de água da velocidade do gerador, fazendo com que seu desempenho seja mais amplo a ser trabalhado com cada modelo de regulador nos diferentes tipos de hidrelétricas, no qual pode ser integrado aos variados tamanhos de máquinas, agregando diversas funções de controle, proteção, supervisão e de interface com outros sistemas, conforme abordado pelas pesquisas citadas no trabalho.

Assim, a função dos reguladores de velocidade ultrapassa o controle da rotação das turbinas, contendo uma série de funções que buscam aperfeiçoar a atuação do sistema elétrico, além de melhorar a constância da rede e assegurar a proteção do equipamento.

Em suma, os reguladores de velocidade têm como funções principais: controlar a rotação da turbina e garantir a estabilidade da rede elétrica; regular a potência gerada; proteger a unidade geradora contra sobrecarga e falhas mecânicas; controlar transientes e arranques, prevenindo picos de corrente, entre outras.

Além disso, podem ser integrados a sistemas SCADA (Supervisão, Controle e Aquisição de Dados), o que permite o monitoramento em tempo real das condições operacionais da turbina, a fim de ajustar automaticamente a tensão e a frequência da rede elétrica e utilizando controle adaptativo para otimizar o desempenho do sistema e também, oferecem interfaces para controle remoto ou local da hidrelétrica.

Portanto, o avanço contínuo na tecnologia dos reguladores, aliado ao treinamento especializado, pode potencializar ainda mais o desempenho das usinas hidrelétricas, consolidando sua importância no cenário brasileiro. Logo, estudos futuros podem abordar viabilidade econômica, análises de caso em usinas brasileiras, modelos matemáticos para otimizar reguladores, exploração de reguladores de velocidade com a integração de tecnologias de inteligência artificial, como também sobre a capacitação de forma continuada de profissionais para operar e manter a tecnologia.

## REFERÊNCIAS

ALVES, G. M. **Avaliação da Viabilidade e Implementação de uma Micro Central Hidrelétrica para Atender Consumidores Localizados em Regiões Isoladas**. 2007. 175 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas do Campus de Botucatu, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Botucatu/SP, 2007.

ANDRADE, M. A. L. **MODERNIZAÇÃO DO CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM GERADOR SÍNCRONO**: efeitos do procedimento de partida. 2019. Disponível em: <https://portal.ifba.edu.br/paulo-afonso/cursos/engenharia-eletrica/TCC-EE/ano-2018/tcc-marcos-antonio-2018-2.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2024.

ANEEL. **Setor elétrico brasileiro**. Brasília, Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), 2024. Disponível em: <https://caminhosregulacao.aneel.gov.br/caminhos3.asp>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

BAZANELLA, A.S.; SILVA JR, J.M.G. **Sistemas de Controle**: Princípios e Métodos de Projeto. Editora UFRGS, 2005.

BELO, S. F. F. **Regulação de velocidade em usinas hidrelétricas**. 2017. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/regula%C3%A7%C3%A3o-de-velocidade-em-usinas-hidrel%C3%A9tricas-flores-belo>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

Bergamo, P. R. **Especificações de turbinas hidráulicas**. 2018. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/14941/1/PB\\_COELT\\_2018\\_2\\_17.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/14941/1/PB_COELT_2018_2_17.pdf). Acesso em: 28 nov. 2024.

CASTRO, N.; CATÓLICO, A. C.; VIEIRA, C. O Setor Elétrico Chinês e o papel das Usinas Hidrelétricas Reversíveis. **Agência Canal Energia**. Rio de Janeiro, 25 de junho de 2018.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH; Bookman, 2015.

COSTA, A.; SILVA, A. **Aspectos dinâmicos do controle de sistemas de potência**. Notas de Aula, LABSPOT, UFSC. 2000.

COSTA, A. S. **Turbinas Hidráulicas e Condutos**. 2003. Disponível em: <http://www.labspot.ufsc.br/~simoed/dincont/turb-hidr-2003.pdf>. Acesso em: 24 de outubro de 2024.

CORRÊA, M. L. Contribuição para uma história da regulamentação do setor de energia elétrica no Brasil: o Código de Águas de 1934 e o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica. **Política e Sociedade**. 2005. Disponível em:

file:///C:/Users/ALESSANDRA/Downloads/administrador,+Maria+Let+%C3%82%C2%A1cia+Corr+%C3%82%C2%ACa.pdf. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro. Editora Elsevier, 2009.

FUTIKAMI, E. E. *et al.* **Simulador de regulador de velocidade para turbinas hidráulicas Francis**. 2003. 85 p. TCC (Curso de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrotécnica) - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2003.

GOLDEMBERG, J. MOREIRA, J. R. **Política Energética no Brasil**. 2005.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ea/a/PjH9CHHj9MSQW4vbLx4XqbF/?lang=pt>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

GOMES, A. C. S.; ABARCA, C. D. G.; FARIA, E. A. S. T.; FERNADES, H. H. O. **O setor elétrico**. 2002. Disponível em:

[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/13975/3/BNDES%2050%20anos%20-%20O%20setor%20el%C3%A9trico\\_P\\_BD.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/13975/3/BNDES%2050%20anos%20-%20O%20setor%20el%C3%A9trico_P_BD.pdf). Acesso em: 10 de outubro de 2024.

GOUVEIA, R. **Usina Hidrelétrica**. Toda Matéria, 2024. Disponível em:

<https://www.todamateria.com.br/usina-hidreletrica/>. Acesso em: 11 out. 2024.

IBERDROLA. **Energia hidrelétrica, a chave para um futuro mais verde**. 2024.

Disponível em: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/energia-hidreletrica#:~:text=A%20energia%20hidrel%C3%A9trica%20se%20tornou,%2C%20Wisconsin%2C%20nos%20Estados%20Unidos>. Acesso em: 24 de outubro de 2024.

JUNIOR, S; FREIRE, J. **Modelo Matemático Para Representação De Uma Turbina Bulbo De Cinco Pás Da Uhe De Santo Antônio Para Estudos De Transitórios Eletromecânicos**, Curso de Engenharia Elétrica da Instituição Faculdade Metropolitana, Porto Velho, 2020.

KJØLLE, A. **Hydropower in Norway: Mechanical Equipment**. [S.l.]: Norwegian University of Science and Technology, 2001.

KUNDUR, P. *et al.* Definition and classification of power system stability ieeecigre joint task force on stability terms and definitions. Power Systems, **IEEE Transactions on**, v. 19, n. 3, p. 1387–1401, 2004. ISSN 0885-8950.

MANCINI FILHO, E. **Regulador de velocidade para turbinas hidráulicas tipo Francis**. Artigo técnico. Curitiba: Unicenp, 2004.

MARQUES, V. **Fontes de Energia**: o que são e seus tipos (renováveis e não renováveis). Toda Matéria, 2021. Disponível em:

<https://www.todamateria.com.br/fontes-de-energia/>. Acesso em: 10 out. 2024.

- MAZZORANA, R. H. F. **Modelagem dinâmica via fluxo de potência de reguladores de velocidade em usinas hidrelétricas**. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.
- MULLER, A. C. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995.
- OGATA, K. **Modern Control Engineering**, Minesota, 1982.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5a Edição. [S.l.]: Pearson, 2010.
- PELLEGRINI, C.; SCOLA, L. **Geração de Potência**. São João Del-Rei: Universidade Federal de São João Del-Rei, 2005.
- PEREIRA, G. G. **Controle de velocidade de turbinas hidráulicas: aspectos teóricos e práticos**. 91 p. TCC (Graduação em engenharia elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 91. 2020.
- SAMPAIO, L. M. B.; RAMOS, F. S.; SAMPAIO, Y. Privatização e eficiência das usinas hidrelétricas brasileiras. **Economia Aplicada**, v. 9, p. 465-480, 2005.
- SILVA, A. F. S. **Geração de energia elétrica por hidrelétricas com turbinas bulbo**. 2021. 33 p. TCC (Graduação em engenharia elétrica) - Faculdade Unime Facdelta. Salvador, 2021.
- SOARES, J. M. C. **Identificação experimental, simulação e ajustes de reguladores de velocidade de usinas hidrelétricas com verificação em testes de campo**. 1982. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, 1982.
- SOUZA, Z.; FUCHS, R. D.; SANTOS, A. H. M. **Centrais, hidro e termelétricas**. São Paulo: E. Blücher/Centrais, 1983.
- VILLAÇA, M. V. M.; SILVEIRA, J. L. Uma breve história do controle automático. **Revista Ilha Digital**, v. 4, p. 3-12, 2013.