

GANHO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA: UMA REVISÃO

Matheus Monteiro Rocha¹
Prof. Antonio Carlos Barros²

RESUMO

A utilização consciente da água e da energia na indústria é um requisito essencial para o progresso econômico e social na sociedade atual, dada a urgente necessidade de proteger o meio ambiente e reduzir os custos operacionais, pensando nisso em 2015 foram ampliados os ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), tendo como pauta na ODS 06 e ODS 07 questões ambientais, Água Limpa e Saneamento; Energia Acessível e Limpa, respectivamente. Assim, o presente estudo tem como objetivo principal analisar e relatar, através de uma revisão bibliográfica, de cunho qualitativo, a relevância e as vantagens da eficiência energética no processo de bombeamento de água, considerando o custo de implementação e também, fatores ambientais de preservação. Além disso, analisaremos o uso das novas tecnologias e técnicas de partidas de Motores Elétricos Trifásicos, assim como fatores físicos que intensificam a eficiência energética. A partir desse estudo foi analisado a partida direta, a estrela-triângulo e soft-starter, fazendo um comparativo foi possível a conclusão que a partida soft-starter é a mais eficiente no quesito energético, podendo ser aprimorada por meio do uso de inversores de frequência e banco de capacitores. De modo geral, motores trifásicos além da eficiência, consomem menos energia e emitem menos CO₂ na atmosfera.

Palavras – chaves: Bombeamento, Eficiência; Energia; Técnicas de partidas; Tecnologia.

ABSTRACT

The conscious use of water and energy in industry is an essential requirement for economic and social progress in today's society, given the urgent need to protect the environment and reduce operational costs. With this in mind, in 2015 the SDGs (Significance Objectives) were expanded. Sustainable Development), with the agenda of SDG 06 and SDG 07 being environmental issues, Clean Water and Sanitation; Affordable and Clean Energy, respectively. Thus, the main objective of this study is to analyze and report, through a qualitative literature

¹ Discente da Especialização em Gestão de Recursos Hídricos Ambientais e Energéticos, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), Matheusmonteiretec@gmail.com.

² Docente do Programa de Pós-graduação, PGEA da UNILAB, johnfelix@unilab.edu.br.

review, the relevance and advantages of energy efficiency in the water pumping process, considering the cost of implementation and also environmental preservation factors. . Furthermore, we will analyze the use of new technologies and starting techniques for Three-Phase Electric Motors, as well as physical factors that increase energy efficiency. From this study, the direct starter, star-delta and soft-starter were analyzed, making a comparison it was possible to conclude that the soft-starter starter is the most efficient in terms of energy, and can be improved through the use of inverters. frequency and capacitor bank. In general, three-phase motors, in addition to their efficiency, consume less energy and emit less CO₂ into the atmosphere.

Keywords: Pumping, Efficiency; Energy; Match techniques; Technology.

INTRODUÇÃO

Conforme Araujo et al., (2006) nas últimas décadas, uma das principais preocupações dos gestores dos sistemas de abastecimento de água, de todo o mundo, tem sido a minimização de perdas de água, que frequentemente atingem valores de 30% a 40% de toda a água que abastece os sistemas de distribuição. No Brasil, segundo o Instituto Trata o desperdício de água está em torno de 40,9% da água distribuída pela rede de abastecimento, isso equivale a mais de 7.800 piscinas olímpicas.

Fortana et al (2012) destaca que as perdas de água podem ainda ser maiores, uma vez que há o envelhecimento, deterioração dos componentes dos sistemas (tais como tubulação e válvulas), assim como gerenciamento incorreto. Diante do progressivo aumento dos preços da energia elétrica, tem-se como interesse a eficiência energética. Assim, a realização de otimização operacional do sistema de bombeamento vem recebendo um interesse significativo nos últimos anos (Skworcow et al., 2009).

O aumento da eficiência energética em estações de bombeamento de água é um tema de importância crescente, especialmente em um contexto de demandas de sustentabilidade ambiental e redução de custos operacionais. As estações de bombeamento representam uma parcela significativa do consumo de energia no setor de saneamento básico, muitas vezes ultrapassando 60% do gasto total em sistemas de abastecimento de água (Chandio, 2022).

Os custos com eletricidade representam grande parte dos custos operacionais do setor de saneamento, o que destaca a importância de ações voltadas a eficiência energética (Liomaye & Welsien, 2019). uma vez que, o consumo por esse setor representa 4% do consumo global, considerando o crescimento populacional essa demanda pode ser ainda maior, chegando a uma proporção de 40% nos próximos 20 anos, conforme S.O.ESCO ENSAIOS (2021).

No Brasil o consumo energético e dos respectivos gastos dos prestadores de serviço é recolhida e processada pelo Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS). Desta forma, no ano 2017, as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento atingiram R\$ 5,26 bilhões, tendo sido consumidos 12,6 TWh. Esta quantidade equivale ao consumo doméstico anual de cerca de 18,2 milhões de habitantes no Brasil.

Na atualidade a eficiência energética está atrelada a questões ambientais de preservação, como a exemplo de, o aquecimento global, causado pelo aumento da concentração gases do efeito estufa (GEE). Para isso, faz se necessário o uso de energia de forma responsável e eficiente, criando

mecanismos que minimize o uso de matéria-prima, mas que intensifique ao máximo a eficiência na obtenção de energia. O uso eficiente de energia deve prevalecer em todas as áreas da vida diária.

Com isso, este trabalho tem como objetivo apresentar a importância e as vantagens da eficiência energética no bombeamento de água, assim como, as tecnologias que podem intensificar esse processo e técnicas para aumentar a eficiência energética, além disso, estudaremos técnicas de Partida de Motores Elétricos Trifásicos e algumas características referentes ao ganho de eficiência energética, para isto, optamos pelo emprego da metodologia de pesquisa bibliográfica, onde utilizaremos a investigação sistemática e aprofundada de conhecimentos já publicadas sobre o objeto de estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O que é a eficiência energética no sistema de bombeamento de água

Daremos início a esta discussão falando sobre energia. A dificuldade em se definir energia está relacionada à enorme diversidade que ela pode apresentar nos sistemas, mantendo uma dinâmica complexa e muitas vezes desconhecida. Se sua natureza é indeterminada, nos resta então a representação da energia em forma de definições.

Costa traz uma definição de energia concebida por Kelvin e Planck:

Energia de um sistema material em um certo estado, referido a um estado normal escolhido convenientemente, é igual à soma algébrica dos equivalentes mecânicos de todos os efeitos exteriores ao sistema, quando ele passa de um modo qualquer do primeiro ao segundo estado (COSTA, 1971, p. 28).

Segundo o princípio de Lavoisier, a energia não tem um início e um fim. Ela se converte e se manifesta de formas diferentes, dependendo da interferência realizada. Na natureza encontramos diversas formas de energias, podemos destacar a elétrica, a mecânica, a luminosa, a térmica e a química. Para este estudo, o foco será a energia elétrica.

Para o melhor aproveitamento da energia elétrica no bombeamento de água, faz-se necessário pensar em eficiência energética, conceituada como um conjunto de ações diversas que culminam na redução da energia necessária para atender às demandas da sociedade, ou seja, atender às necessidades da economia com menor uso de energia primária (MME 2011).

Consoante Takeda (2020) a eficiência energética traduz-se na melhor utilização da energia empregada em um processo de produção de forma que haja menor consumo, sem reduzir a produtividade, conforto e a qualidade de vida, além de propiciar a preservação do meio ambiente de forma sustentável.

2.2 Técnicas de Partida de Motores Elétricos Trifásicos

A partida direta é um método de partida que consiste em alimentar um motor elétrico puramente com sua tensão e frequência nominais. Esse método de partida é o mais comum, pois não necessita de componentes eletrônicos, apenas a ligação direta do motor à rede elétrica. O motor é conectado à fonte de alimentação por meio de um contator/disjuntor/interruptor.

O nível de tensão e a frequência na fonte de alimentação são fixos e serão a tensão e a frequência da rede elétrica. Essa partida eleva a corrente do motor até a 7 vezes o valor nominal, gerando assim um aumento no consumo de energia a cada partida das bombas da estação de

bombeamentos, o que pode acarretar problemas na rede elétrica como o caso de sobrecarga no sistema. Para evitar este problema, a partida do motor deve ser realizada somente se, houver o sobredimensionamento do sistema de proteção, facilitando o processo de partida e garantindo maior segurança durante o procedimento.

Drumond (2023), destaca algumas características da técnica de dar partida direta em motores:

1. A corrente de partida pode ser em até 8 vezes maior do que a corrente nominal;
2. Precisa-se de conjugado nominal na hora da partida;
3. É necessário ter certos dispositivos de acionamentos, aqueles mais bem desenvolvidos;
4. O custo de manutenção é mais alto, mas este é um processo considerado mais econômico por ser feito sem intermediários.

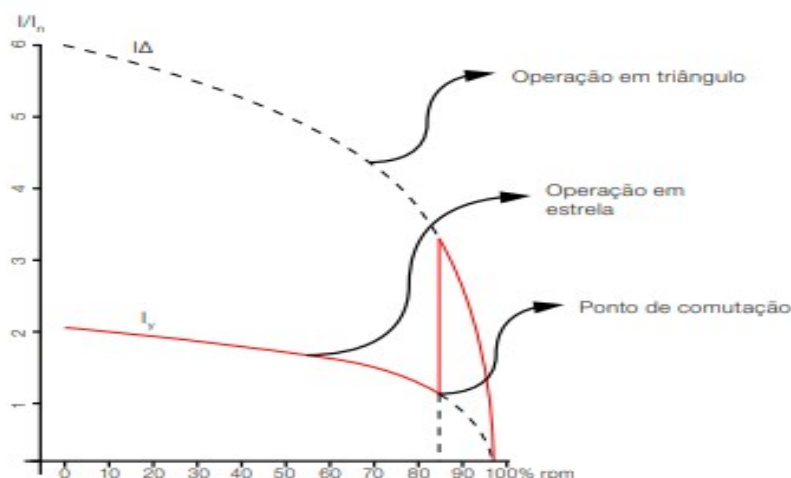
Conforme Drumond (2023), a partida direta de motores possui algumas vantagens, a primeira se estaciona no fato de não possui intermediários, consequentemente haverá economia. A segunda vantagem está associada a potência do motor, onde seu objetivo é maximizar o motor. Por fim, podemos salientar a facilidade em relação a implementação da partida direta de motor, no entanto é legível destacar que essa técnica deve ser efetuada por um especialista, além disso, temos a praticidade na manutenção, posterior a instalação. Assim, fazendo um paralelo entre resultados positivos que serão obtidos pelo maquinário e sua alta duração, seu custo não é alto.

Segundo Filho (2018), partida direta é o método mais simples, onde são utilizados apenas contadores, disjuntores ou chave interruptoras. A eficiência energética nesta modalidade pode ser prejudicada pela alta corrente de partida, que provoca picos de demanda e maior aquecimento do motor, reduzindo sua eficiência.

Em instalações elétricas industriais, principalmente aquelas sobrecarregadas, podem ser usadas chave estrela – triângulo como forma de suavizar os efeitos de partida dos motores elétricos (FILHO, 2018). Este método reduz a corrente de partida e, consequentemente, as perdas associadas ao aquecimento, melhorando a eficiência energética durante a partida.

A ideia principal da partida estrela – triângulo é reduzir a tensão do motor durante a partida. Tal método visa dar a partida no motor com seus enrolamentos ligados em Estrela (ou Y) e, após o período inicial de aceleração, alterar a ligação dos enrolamentos para Triângulo. Quando a ligação é em estrela, a corrente é reduzida entre 25 e 30% em relação à corrente de partida com a ligação em triângulo. A ligação em estrela fornece menor tensão, corrente e, consequentemente, menor torque de partida ao motor.

Figura 1: Curva Corrente x Velocidade partida Estrela Triângulo



Fonte: Guia comparativo de torque, corrente e consumo de energia

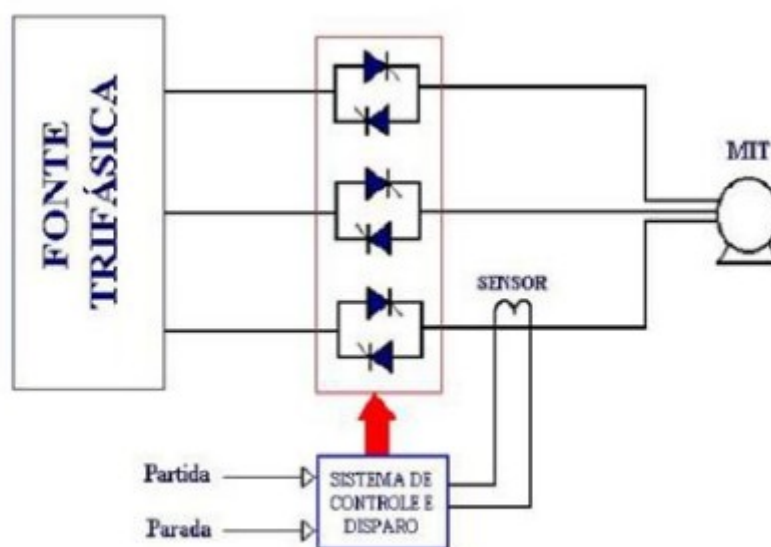
A ideia principal da partida estrela-triângulo é reduzir a tensão do motor durante a partida. Tal método visa dar a partida no motor com seus enrolamentos ligados em Estrela (ou Y) e, após o período inicial de aceleração, alterar a ligação dos enrolamentos para Triângulo.

Quando a ligação é em estrela, a corrente é reduzida entre 25 e 30% em relação à corrente de partida com a ligação em triângulo. A ligação em estrela fornece menor tensão, corrente e, consequentemente, menor torque de partida ao motor.

Outro método de partida é o soft-starter, entendido como um equipamento eletrônico que controla a potência do motor, tanto na sua partida quanto na sua frenagem, Rosa (2003), e o seu princípio de funcionamento é baseado no controle do ângulo de disparo (condução) dos tiristores, veja a figura 2.

“Através de um controle analógico ou digital é possível disparar os tiristores (SCR’s) de forma sincronizada com a passagem por zero da tensão da rede. Dessa forma, controlando o seu ângulo de disparo a tensão eficaz aplicada à carga é controlada, assim como a sua corrente e potência” (Amaral, 2013, p. 10).

Figura 2: Esquema de uma soft-starter com 6 tiristores para acionar um motor de indução trifásico (MIT)



Fonte: Rosa (2003)

Esta manipulação de disparo permite diminuir a tensão na partida do motor, a finalidade de um acionamento mais suave é alcançado, evitando assim a queda na tensão na rede de eletricidade.

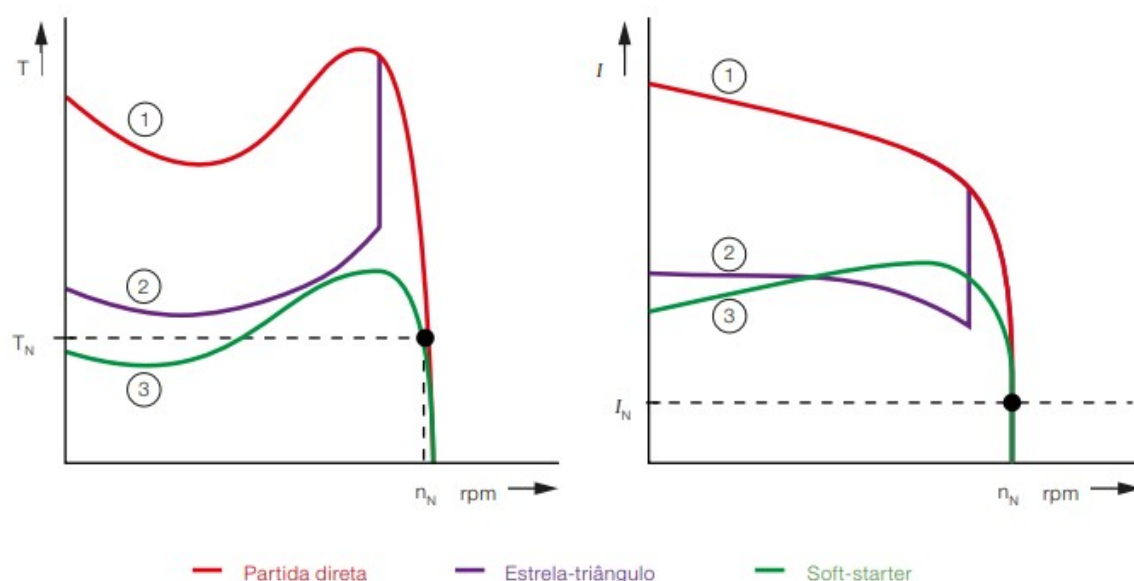
Segundo Rosa (2003), o controle de potência do motor deve ser realizado sem alterar a sua frequência (velocidade de rotação do motor) com o controle de disparo dos tiristores atuando no momento em que a tensão é zero e no momento em que a corrente é zero, ou seja, “o circuito de controle deve temporizar os pulsos de disparo a partir do último valor de zero 11 da forma de onda, tanto da tensão como da corrente”. O sensor pode ser um transformador de corrente, por exemplo, instalado numa fase apenas ou em cada fase, medindo o ponto de cruzamento da fase, conforme Rosa (2003).

A corrente de saída do soft-starter é monitorada por transformadores de corrente, possibilitando o controle eletrônico efetuar proteção e manutenção do valor de corrente em níveis pré-definidos (função limitação de corrente ativada) (FERRAZ).

Grande parte dos soft-starters no mercado são microprocessados. Seus circuitos de controle são responsáveis pelo comando, monitoração e proteção do circuito de potência e também pelos circuitos usados no comando, sinalização e interface homem-máquina que são configurados pelo usuário em função da aplicação. (FERRAZ)

Na figura 3, temos dois gráficos, onde podemos fazer um comparativo entre a partida direta, partida estrela – triângulo e partida soft – starter.

Figura 3: Comparação de métodos de partida



Fonte: Guia comparativo de torque, corrente e consumo de energia

Este método permitirá o aproveitamento aprimorado do torque de aceleração. Conforme o Guia comparativo de torque, “corrente e consumo de energia, essa partida produz menos torque e corrente para atingir a velocidade nominal e, portanto, consome menos energia elétrica na rampa de partida em comparação com as partidas direta e estrela-triângulo”.

“Esta função reduz a tensão aplicada ao motor de maneira que a energia necessária para suprir o campo seja proporcional à demanda da carga.” (NOVAES). Com aceleração gradual, os picos de corrente é reduzido, como consequência haverá uma carência energética menor durante a partida. Com essas amenizações não haverá apenas a redução no uso de energia, mas também auxiliará na redução de custos adicionais com sobretensões elétricas, valorizando a eficiência energética.

Os inversores de frequência, também conhecidos como conversores de frequência, são dispositivos que possibilitam a variação da velocidade de motores de indução trifásicos, permitindo variar, consequentemente, a velocidade dos processos nos quais estes estão inseridos (NASCIMENTO, 2013).

Com o desenvolvimento da eletrônica, os inversores de frequência não são utilizados simplesmente para acionamento de motores elétricos, mas também para obter o controle de velocidade durante o processo industrial. Com esse tipo de controle foi possível melhorar a qualidade do acionamento dos motores de indução trifásicos, onde o operador pode fazer tanto

manual quanto automático, através do Controle Lógico Programável, o aumento ou diminuição da rotação do equipamento (MAMEDE FILHO, 2013).

Segundo CREDER (2014), as vantagens de utilizar o inversor de frequência são que não ocorre pico de corrente na rede elétrica na partida do motor, evita aquecimentos anormais, elimina vibrações exageradas, possibilita a partida em rampa, melhora no rendimento do motor em toda faixa de velocidade, parando suavemente, melhorando o fator de potência na indústria.

O uso de inversores de frequência em motores trará outras vantagens, sendo elas: economia de energia, controle de acionamento, aumento da vida útil dos motores, automatização, baixo custo de manutenção.

No critério eficiência energética segundo WEG (2016, p.7) “o rendimento do sistema não depende somente do motor, mas também do controle de velocidade e nesse quesito a aplicação do inversor pode atingir 97% ou mais de eficiência”.

Outro benefício, é o controle de acionamento, permitindo o controle de velocidade, evitando assim, pico de tensão. De acordo com Mesquita (2015, p.24) “as partidas e paradas bruscas são reduzidos através de rampas de aceleração e frenagem o impacto sobre os componentes mecânicos é minimizado”.

A terceira vantagem diz respeito a vida útil dos motores, que se eleva com a utilização do inversor de frequência. “Um sistema que possua o inversor que atua na medida exata das exigências operacionais, haverá uma maior preservação dos equipamentos e acessórios, aumentando assim a vida útil e diminuindo os gastos com manutenção” (LEITE, 2018, p.31).

O quarto benefício é automatização,

O inversor de frequência possibilita a automação do sistema, permitindo a comunicação através de redes fieldbus, trocando informações com um sistema superior (CLP, supervisor), permitindo melhor administração do processo através da monitoração, emissão de relatórios, etc” (WEG, 2005, p.161).

Segundo a (WEG, 2016) “o uso dos inversores estáticos de frequência tem crescido devido aos benefícios propiciados pelo mesmo”. Tais benefícios abrange tanto o meio energético quanto o econômico.

No estudo da energia, temos um componente de grande relevância para tal entendimento, a energia reativa, fundamental no funcionamento de equipamentos. De acordo com VIEIRA (1989), para o funcionamento de equipamentos elétricos como exemplos motores e transformadores é essencial que se tenha energias ativa e reativa. Entretanto a energia reativa é responsável pela geração dos campos magnéticos e elétricos nas bobinas dos equipamentos, já a energia ativa é aquela que executa as tarefas, a que produz o torque, a ação e o efeito do equipamento de se

movimentar para executar o trabalho devido. Contudo, apesar de a energia reativa ser indispensável no processo de geração energia para rotação e funcionamento das máquinas, sua utilização deve ser a menor possível, visto que a mesma necessita de condutores de maior seção e uma estrutura da rede maior, ocasionando gasto e perdas técnicas por aquecimento e quedas de tensão.

Em motores esse tipo de energia se faz bastante presente, no entanto, a presença excessiva representa um desafio expressivo para eficiência energética, além disso, o excesso, causará custos adicionais, perdas de rede e flutuações de tensão.

Diante disso, é importante fazer as correções para reduzir a energia reativa, para que alguns benefícios sejam alcançados:

1. Reduzir a capacidade dos alimentadores do sistema elétrico.
2. Evitar o desgaste precoce dos equipamentos.
3. Diminuir a queda de tensão nos circuitos de distribuição.
4. Prevenir aumentos inesperados nos valores da conta de luz.
5. Evitar o desperdício de energia elétrica.

Para conseguir atingir esses objetivos, faz-se necessário adotar algumas medidas que diminuam a energia reativa, uma proposta se estaciona no uso de banco de capacitores. Os capacitores podem ser entendidos como elementos reativos que trabalham a passagem de corrente através do acúmulo de cargas elétricas, um capacitor é capaz de armazenar energia. Os capacitores mais comuns são os construídos por placas condutivas e separadas por um material dielétrico.

Os capacitores acionados como forma de controle do reativo, podem ser divididos em três maneiras: fixo, automático, semiautomático e estático (COTRIM, 2008).

O primeiro é o banco fixo, indicado para correções de cargas constantes, sendo esse, ligado de forma integral, não havendo controle em relação à variação de carga. Na figura 4, temos um exemplo de banco de capacitor fixo.

Figura 4: Banco de capacitor fixo



Fonte: http://www.potencialmanutecao.com/?page_id=1175

A principal vantagem desse tipo de sistema é o baixo custo de aquisição. Mas, como não se pode controlar sua operação, pode haver períodos de injeção capacitiva superior à necessidade da carga. Nesses momentos, o sistema ficará sujeito a sobretensões indesejadas (STAROSTA, 2018).

O segundo tipo de banco de capacitores é semiautomático. Nessa configuração, os capacitores são conectados diretamente junto à carga ou associados a dispositivos de manobra. Dessa forma, o fornecimento de energia reativa ocorre somente quando o equipamento ao qual o capacitor está conectado entrar em operação (STAROSTA, 2018). Economicamente de custo alto, uma vez que, a medida que se aumenta o número de equipamentos indutivos, maior será a quantidade de capacitores para fazer o controle. A seguir temos a apresentação desse tipo de banco de capacitor.

Figura 5: Banco de capacitor semiautomático



Fonte: <http://www.wgr.com.br/banco-capacitores-semi-automatico>

O penúltimo banco de capacitores que será citado nesse trabalho é chamado de automático. Nesse método algumas técnicas de automação são necessárias, de modo a fazer com que os capacitores sejam acionados de acordo com a necessidade da carga (FILHO, 2017).

Para isso é preciso instalar transformadores de corrente (TC) junto aos quadros de distribuição (QD) das UCs, para medir e transmitir as leituras para controladores eletrônicos. Esses controladores coordenam o acionamento de células ou grupos de células capacitivas de acordo com a necessidade dos equipamentos (STAROSTA, 2018). na figura 6 vemos um exemplo de banco automático.

Figura 6: Banco de Capacitor automático



Fonte: <https://alemetec-eletroneca.webnode.com/servicos/banco-de-capacitor-correcao-do-fator-de-potencia/>

Por último, temos a compensação estática. Um compensador estático de VAR - Static VAR Compensator (SVC) é um conjunto de dispositivos elétricos para fornecer energia reativa de ação rápida em redes de transmissão de eletricidade de alta tensão. Os SVC fazem parte da família de dispositivos do sistema de transmissão CA flexível, regulando tensão, fator de potência, harmônicos e estabilizando o sistema. Um compensador estático de VAR não possui partes móveis significativas (além do quadro interno). Antes da invenção do SVC, a compensação do fator de potência era a preservação de grandes máquinas rotativas, como condensadores síncronos ou bancos de capacitores comutados (NOKIAN, 2007).

De acordo com ANEEL (2000, p.2) a resolução 456, no Art. 2º, § VIII: “Demanda: média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado”. A demanda, conforme afirma Matheus (2008), representa a estrutura de geração e transmissão da energia elétrica que a concessionária disponibiliza ao consumidor. Já o consumo representa a quantidade de energia ativa consumida (MATHEUS, 2008).

Para que seja melhor manuseada a energia, temos os controladores de demanda. Conforme Suppa (2011), controlador de demanda é um equipamento eletrônico que tem como função principal manter a demanda de energia ativa de uma unidade consumidora, dentro de valores limites pré determinados, atuando, se necessário, sobre alguns dos equipamentos (cargas) da instalação e segundo as regras de faturamento vigentes.

Os controladores de demanda são divididos em dois grupos: convencionais e inteligentes. O método de controle de demanda convencional é o mais comum, utilizados em estabelecimentos comerciais e industriais. Segundo Ozur (2011) esse método “usa medição por média móvel e controle por níveis (on/off) ou, ainda, por controle de projeção simples”.

O segundo grupo, controlador de demanda inteligente são mais seguros, eficientes e confiáveis, de acordo com Ozur (2011) “posterga ao máximo sua atuação dando oportunidade para a demanda cair naturalmente, pois se baseia num método de medição preditivo mais elaborado”.

O método de controle do controlador de demanda define a estratégia que este irá utilizar para monitorar e controlar a demanda. É, portanto, sua componente mais importante, afinal é o método de controle quem determina a maior ou menor precisão do controlador, conforme afirma Suppa (2011). Esses métodos são: janela móvel, retas de cargas ou retas inclinadas e preditivo adaptativo.

Segundo Suppa (2011), o chamado algoritmo de Janela Móvel, inventado no final da década de 70, para uso nos primeiros controladores microprocessados, nada mais é que um processamento "first-in first-out" (o primeiro que entra é o primeiro que sai), onde a janela de 15 minutos é dividida em compartimentos. Em cada compartimento é armazenado o total de pulsos de energia contados no correspondente período de tempo.

O método de Retas de Cargas ou Retas Inclinadas, de acordo com Suppa e Terada (2008), surgiu em meados da década de 80, e pode-se dizer que eram algoritmos que faziam uma "regra de três" com o número de pulsos acumulado no intervalo, o tempo transcorrido, o tempo total do intervalo (15 minutos), para chegar à Demanda Projetada.

O método Preditivo Adaptativo utiliza na parte preditiva a medição sincronizada com a concessionária integrando os pulsos recebidos a partir do instante zero (chegada do sincronismo) e trabalhando sempre com a projeção da demanda dentro do intervalo de integração e com o conhecimento prévio do valor da potência da carga, podendo ainda operar de forma adaptativa (GESTAL, 2011).

Esse controle de demanda energética é relevante para evitar picos de consumo, que podem resultar em tarifas mais altas. A partir do uso controlado de energia, teremos uma melhoria na eficiência energética, evitando desperdícios e minimiza impactos negativos ao meio ambiente.

2.3 A relevância da eficiência energética

Como visto no tópico anterior, a eficiência energética é crucial no melhor aproveitamento da energia elétrica, desempenhando um papel primordial nas questões ambientais como a exemplo de,

gestão dos recursos naturais e a redução dos impactos ambientais. Desse modo, sistemas de bombeamento de água consomem uma quantidade considerável de eletricidade, e aprimorar sua eficiência pode levar a uma série de benefícios.

Tais benefícios são citados por Brito (2024):

1. **Redução de custos:** sistemas mais eficientes consomem menos energia, resultando em contas de eletricidade mais baixas para as operadoras de água e, potencialmente, em tarifas mais baixas para os consumidores.
2. **Sustentabilidade ambiental:** menos energia consumida significa menos emissões de gases de efeito estufa e um menor impacto ambiental.
3. **Resiliência:** sistemas eficientes são mais resilientes a variações de demanda e perturbações no fornecimento de energia, garantindo um abastecimento de água mais estável.

Para que isto aconteça é necessário adotar algumas medidas, Brito (2023) destaca-as em:

1. **Seleção adequada de equipamentos:** uma estratégia fundamental para melhorar a eficiência energética é a seleção adequada de equipamentos de bombeamento. Utilizar bombas dimensionadas corretamente para a demanda real do sistema pode evitar o desperdício de energia. Além disso, a escolha de tecnologias de bombeamento modernas e eficientes, como bombas de velocidade variável, pode proporcionar economias substanciais de energia.
2. **Monitoramento e controle avançado:** a implementação de sistemas de monitoramento avançado e controle inteligente é crucial para otimizar o desempenho das bombas. Sensores de pressão, vazão e nível podem ser utilizados para ajustar automaticamente a velocidade das bombas com base na demanda em tempo real. Isso evita o funcionamento desnecessário em plena capacidade, economizando energia.
3. **Manutenção preventiva e preditiva:** a manutenção desempenha um papel crucial na eficiência energética a longo prazo. A falta de manutenção adequada pode levar ao desgaste prematuro das bombas e à perda de eficiência. A adoção de práticas de manutenção preventiva e preditiva ajuda a identificar problemas antes que causem interrupções e permite ajustes para manter o desempenho ideal.
4. **Sistemas de recuperação de energia:** em alguns casos, é possível recuperar energia a partir do sistema de bombeamento. A instalação de sistemas de recuperação de energia, como turbinas de água, pode transformar a energia cinética do fluido em energia elétrica utilizável, reduzindo ainda mais o consumo de eletricidade.

2.4 Tecnologias que intensificam a eficiência energética em sistema de bombeamento de água

Em estudo realizado por Cabrera et al., (2010) é citado que a água é visualizada como agente de consumo de energia. Isso guiou uma nova ótica sobre a distribuição de água, contudo esta visão se estende não somente a quantidade de energia consumida, mas também como ela é desfrutada.

Investimentos em tecnologias mais sofisticada faz se necessário para obtenção de uma maior capacidade energética. O uso das tecnologias contribuem para a modernização e o desenvolvimento sustentável dessa seção, proporcionando súpero desempenho, maior produtividade, diminuição de custos e aproveitamento supremo das fontes de energia elétrica.

Brito (2023) apresenta algumas das tecnologias avançadas que podem ser implementadas para melhorar a eficiência:

- 1. Bombas de velocidade variável (VFDs):** as VFDs permitem ajustar a velocidade das bombas conforme a demanda atual. Isso reduz o consumo de energia, evitando a operação constante em plena potência, mesmo quando a demanda é menor.
- 2. Sistemas de controle inteligente:** utilizando sensores e algoritmos avançados, sistemas de controle inteligente podem prever a demanda futura e ajustar automaticamente as operações das bombas, otimizando o consumo de energia.
- 3. Baterias e armazenamento de energia:** a integração de baterias e sistemas de armazenamento de energia permite armazenar o excesso de energia quando a demanda é baixa e liberá-la quando necessário, reduzindo picos de consumo.
- 4. Tecnologias de bombas de alta eficiência:** a escolha de bombas de alta eficiência, como bombas de ímãs permanentes ou bombas de turbina submersa, pode reduzir significativamente o consumo de energia em comparação com modelos mais antigos.
- 5. Sistemas de reciclagem de água:** a reutilização da água em processos industriais, quando apropriado, reduz a necessidade de bombeamento adicional, economizando energia e água.
- 6. Fontes de energia renovável:** o uso de energia renovável, como painéis solares ou turbinas eólicas, para alimentar sistemas de bombeamento é uma opção sustentável.

Outra preocupação é em relação às questões ambientais, no tocante à preservação. O uso de energia de bombeamento de irrigação produziu 12,6 milhões de toneladas métricas de CO₂ e nos EUA em 2018 (IC de 90%: 10,4, 15,0), predominantemente atribuível ao bombeamento de água subterrânea.

Para que esta ocorra de forma correta, quanto a aspectos ambientais e energéticos, faz-se necessário que esteja amparada por uma política de sustentabilidade, que não gere aumento dos níveis de emissão de CO₂. O Protocolo de Kyoto (OLIVEIRA, BARROS, & LEMOS DE SOUSA,

2015) e demais acordos transnacionais que regulamentam essas emissões devem ser observados. Algumas das ações que surtem efeito no melhor aproveitamento energético e consequente menor emissão de CO₂:

- Estudo energético nas subestações internas, com aplicação de novos equipamentos e redistribuição de carga;
- Aproveitamento da luz natural a partir da instalação de telhas refratárias em pontos de melhor incidência solar direta, análise da irradiação solar no local e automação dos processos que envolvem a iluminação do ambiente;
- Uso de materiais mais adequados do ponto de vista energético, como a aplicação de luminárias e sistemas energeticamente menos dispendiosos.

Diante desse cenário é válido lembrar da ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), foram estabelecidos no ano 2000 e incluíam oito objetivos de combate à pobreza. Em 2015 foram constituídos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e suas 169 metas correspondentes, que englobam um plano de ação de 15 anos para solucionar os maiores problemas da humanidade.

Nos objetivos 06 e 07, temos ênfase na garantia ao acesso à água e energia para todos. No ODS 06 trata-se de Água Limpa e Saneamento, tem como objetivo assegurar o acesso à água potável e saneamento de qualidade para todos. Já o ODS 07, a finalidade pauta em Energia Acessível e Limpa, tendo como finalidade, garantir o acesso à energia limpa, sustentável e moderna para todos. Conforma a cartilha ODS, tem-se como metas:

ODS 6 são:

- Garantir o acesso universal e equitativo à água potável;
- Melhorar a qualidade da água;
- Reduzir a poluição;
- Aumentar a reciclagem e reutilização de água;
- Garantir a sustentabilidade da extração e do abastecimento de água doce.

ODS 7 são:

- Garantir o acesso à energia acessível, confiável, sustentável e moderna;
- Diminuir a dependência de combustíveis fósseis;
- Aumentar o uso de energias limpas e renováveis.

Assim, a garantia de abastecimento de água de qualidade para população é algo indispensável, sendo esse objetivo alcançado observando alguns fatores eficiência energética, meios de bombeamento, mas também, obedecendo à relevante preocupação mundial em conservar o meio ambiente, por isso, a importância do desenvolvimento de estudo que pense nisso.

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada a partir de uma revisão bibliográfica, analisando artigos, livros, teses de mestrado, revistas científicas e digitalizadas. Sendo utilizadas sites da internet, como Scielo, mundo da elétrica, repositório da UFC, repositório da UTFPR, arquivos do portal da indústria e portal institucional UFPEL, esses foram alguns exemplos de meios usados para realização dessa pesquisa.

Por meio disso, foi coletado dados relevantes para cada elemento definido no estudo, posteriormente, desempenhou-se o método comparativo, em que se trata de uma técnica investigativa que permite analisar dados, fenômenos e informações, assim, neste estudo foi comparado três tipos de partidas de motores: direta, estrela-triângulo e soft-starter, fazendo um paralelo entre o trio em relação a capacidade de cada método em relação a eficiência energética.

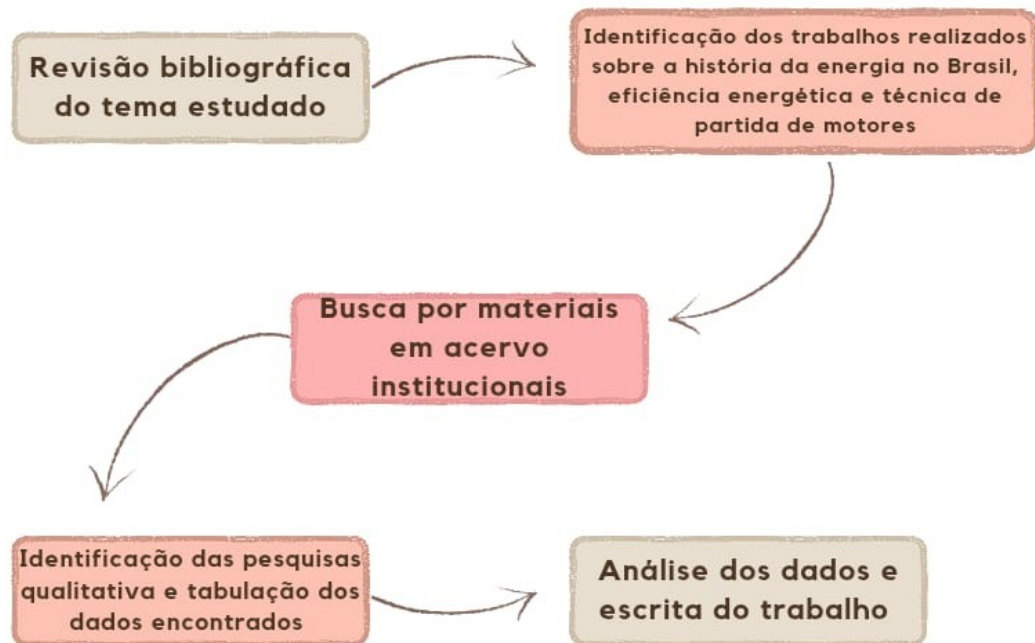
Diante do filtro efetuado dos autores e obras usadas na pesquisa, foi delimitado palavras-chave que nortearam o estudo, sendo elas: Bombeamento, eficiência, energia, técnica de partida e tecnologia. Para atingir o objetivo da pesquisa foi dedicado o período de estudo de outubro de 2024 a janeiro de 2025.

Essa obra se manifesta de forma qualitativa, Creswel (2007, p. 186) chama atenção para o fato de que, na perspectiva qualitativa, o ambiente natural é a fonte direta de dados e o pesquisador, o principal instrumento, sendo que os dados coletados são predominantemente descritivos. Foi realizada uma reflexão e análise crítica do material bibliográfico consultado, e considerado um juízo de valor sobre o determinado material científico.

As obras foram selecionadas considerando cada modo de partida de motores exposto nesse trabalho, posteriormente, foi realizado o estudo a partir de leitura e destaque de partes relevantes de cada obra, para que fosse feito a descrição de cada técnica de partida, assim como a eficiência energética de cada uma.

Por fim, temos a apresentação abaixo do fluxograma dos passos dessa pesquisa:

GANHO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA: UMA REVISÃO



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor uso das fontes energéticas é relevante considerar a eficiência ao utilizar – la, pois no aspecto ambiental, diminuirá a emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para o bom funcionamento do planeta. Para AMDA (2018), as questões ambientais vêm ganhando uma maior atenção da sociedade, dos governos e das empresas, dada a frequência com que ocorrem catástrofes naturais frutos das alterações climáticas provenientes do uso imponderado dos recursos e da poluição emitida pelo homem.

De acordo com o IPEA (2018), vive-se atualmente uma época de desafios, onde há uma maior preocupação com o bem-estar, dado o emergente crescimento da economia mundial deste século, sendo, porém, ameaçado por mudanças no meio ambiente, fruto de externalidades e da ação do homem, exigindo assim uma ação mais contundente, no que se refere a relação entre desenvolvimento econômico e sustentabilidade.

Tendo em vista essa preocupação, em 2015 o ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) ampliou suas metas, incluindo nesse acordo pautas ambientais, expostas em ODS 06 e ODS 07, tratando-se de Água Limpa e Saneamento e Energia Acessível e Limpa, respectivamente. Essas finalidades fazem nos refletir sobre as práticas cotidianas nos sistemas de bombeamento de água, uma vez, devemos garantir o acesso à água limpa, mas os meios de exploração desse recurso deve ser feita através de energias limpas, meios tecnológicos e técnicas sustentáveis que permite a menor invasão possível do meio ambiente.

Para atingir tais objetivos faz se necessário investimento em técnicas que aumentem a eficiência energética. Uma alternativa se relaciona ao emprego de tecnologias, anteriormente citado por Brito (2023), sendo essas: Bombas de velocidade variável (VFDs), 2. Sistemas de controle inteligente: Baterias e armazenamento de energia, Tecnologias de bombas de alta eficiência, Sistemas de reciclagem de água e Fontes de energia renovável.

Além de alternativas voltadas a tecnologia, fizemos um paralelo entre a partida direta de motores e partida estrela – triângulo. Fazendo um comparativo, é perceptível que o uso da partida estrela – triângulo traz diversos benefícios quando comparado a partida direta. De acordo com Drumond (2024)

a principal vantagem desse método está na redução do estresse elétrico e mecânico no sistema durante a partida. Ao minimizar os picos de corrente, ele contribui para a estabilidade da rede elétrica, evita quedas de tensão abruptas e prolonga a vida útil do motor. Essa técnica é comumente utilizada em motores de média e alta potência, proporcionando uma solução eficiente e econômica para processos industriais que demandam o acionamento de equipamentos robustos.

Em síntese, a partida estrela triângulo é geralmente preferível à partida direta, pois reduz a corrente de partida em cerca de 33%, sendo a partida estrela – triângulo mais eficiente em relação a partida direta, uma vez que o torque de partida excedente é menor, além disso, há maior economia de energia. A partida estrela – triângulo é geralmente mais indicada do que a partida direta para motores de média e grande porte, pois reduz a corrente de partida e proporciona uma partida mais suave.

Com relação a partida de soft-starter permite a redução de picos de corrente durante a partida, tratando-se de eficiência energética, esse método permite reduzir o consumo de energia, mas não de forma contínua durante o procedimento nominal. Ao ser comparado com o inversor, esse contribui de forma mais efetiva com a eficiência energética, pois a velocidade é ajustada conforme a necessidade, poupando energia em cargas parciais. No que concerne a economia, o inversor de frequência é mais caro e complexo em contraposto ao soft-starter.

O uso de motores elétricos mais eficientes é uma maneira extremamente eficaz para reduzir custos com energia elétrica e por consequência, as emissões de carbono para a atmosfera. Para fazermos o cálculo da emissão de CO₂ por um motor elétrico, basta multiplicarmos o consumo de energia do motor pelo coeficiente de emissão base de CO₂. Motores elétricos são mais eficientes do que os motores a combustão, com isso, tal característica permite maior economia de energia e também redução de gases poluentes, assim, o uso de técnicas de partidas eficientes além de impactar no quesito financeiro, contribuirá com a pauta ambiental.

Um fator de estudo que interfere na eficiência energética foi a energia reativa, sendo essa essencial para o funcionamento de sistemas de energia, porém não realiza trabalho, além disso, o excesso dela pode causar ineficiência energética e custos anexos. Como proposta de solução temos a implementação de bancos de capacitores, na qual equilibrará o consumo de energia de forma satisfatório. Como espanado anteriormente, temos as opções de banco de capacitores: fixo, automático, semiautomático e estático.

Outro componente de estudo, foi em relação ao consumo energético, fator que implica na tarifa paga pelo consumidor. Com isso, foi motivo de estudo o controlador de demanda, que por sua vez, é dividido em dois grupos, controle de demanda convencional e controle de demanda inteligente, sendo esse, mais sofisticado e eficiente, sendo mais útil no processo de bombeamento de água. Além disso, foram apresentados alguns métodos que auxiliam nesse processo, janela móvel, retas de cargas ou retas inclinadas e preditivo adaptativo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa obra teve como pretensão apresentar o ganho de eficiência energética em estações de bombeamento de água, diante disso, foi realizado um resgate histórico sobre a evolução energética no Brasil, foi analisado o conceito de energia e como ela pode ser manejada de forma mais eficiente para que seja evitado desperdícios e melhor uso para conservação do meio ambiente, para isso, apresentamos técnicas e possibilidades para alcançar tal eficiência. Para isso, foi usado a pesquisa qualitativa, com prioridade na metodologia de pesquisa bibliográfica.

Foi investigado técnicas de Partida de Motores Elétricos Trifásicos, o primeiro foi a partida direta de motores, onde foi constatado alguns benefícios com relação a economia, facilidade de instalação e manutenção, contudo, no quesito eficiência energética, a partida estrela – triângulo exprimi melhor essa característica.

Por conseguinte, vimos a partida soft-starter desempenha partida suave e eficiente para motores elétricos. Já os inversores de frequência se destacam no critério eficiência energética, mas em custo financeiro ele se revela mais caro em relação ao soft-starter. Mediante o exposto, vimos que nessas operações possui-se uma energia, que em excesso interfere na eficiência, sendo ela, chamada de energia reativa, como solução é possível a aplicação de banco de capacitores que, a depender do objetivo, pode-se optar pelo fixo, semiautomático, automático ou estático.

Para finalizar, tratamos nesse estudo sobre o controle de demanda energética, tema importante, pois por meio do seu uso podemos amenizar casos de picos de consumo que implicam diretamente na tarifa a ser paga, além de vantagens para o meio ambiente. Para isto, vimos dois tipos de grupo de controladores e métodos a serem utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica, Núcleo de Biblioteca e Arquivo.— Brasília: ANEEL: NBA, abr. 2024.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Resolução nº. 456. [S. I.]: 29 de novembro de 2000. Disponível em <www.leffa.pro.br/textos/abnt.htm>. Acesso em: 04 jan 2025.

AMARAL, Rodrigo Sarmiento do. **APLICAÇÃO DA SOFT-STARTER PARA ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO ACOPLADOS A DIFERENTES TIPOS DE CARGAS MECÂNICAS**. 2013. 54 f. Trabalho de conclusão de curso (pós-graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná Programa de Pós-Graduação em Automação Industrial. Curitiba 2013.

AMDA. **Estratégia Energético-Ambiental**. Disponível em: <http://www.amda.org.br/imgs/up/Artigo_09.pdf> Acesso em: 15 dez 2024.

ARAUJO, L., RAMOS, H., COELHO, S. Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. **Water Resources Management**, 20, 133 – 149. 2006.

BRITO, A. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento de água: estratégias e tecnologias**. NIVETEC. 2023. Disponível em: <<https://www.nivetec.com.br/sistemas-de-bombeamento-de-agua/>>. Acesso em: 11 dez 2024.

BRITO, A. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento de água: oportunidades e desafios**. NIVETEC. 2024. Disponível em: <<https://www.nivetec.com.br/eficiencia-energetica/#:~:text=A%20import%C3%A2ncia%20da%20efici%C3%A2ncia%20energ%C3%A9tica&text=Redu%C3%A7%C3%A3o%20de%20custos%3A%20sistemas%20mais,mais%20baixas%20para%20os%20consumidores.>>. Acesso em: 11 dez. 2024.

CABRERA, E., PARDO, M., COBACHO, R., CABRERA, Jr. Energy Audit of Water Networks. **Water Resources Planning and Management**. 136, 669 – 677. 2010.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. 15.ed. Rio de Janeiro- RJ: LCT, 2014.

CRESWEL, J. W. *Projeto de pesquisa: método qualitativo, quantitativo e misto*. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

COSTA, E. C. Física Industrial – Enciclopédia Técnica Universal. Tomo I, termodinâmica, I Parte. Porto Alegre: Globo, 1971.

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações Elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

DRUMOND, B. **Partida direta de motores: o que é, como funciona, onde se aplica**. Engenharia adequada. 2023. Disponível em: <<https://adequada.eng.br/partida-direta/>>. Acesso em: 14 dez 2024.

FERRAZ, Rogério. **Guia de Aplicação de soft-starters** – WEG. Manual, 2a Edição, WEG.

FILHO, N. A. **Partida Direta de Motores**. Revista Eletricidade Moderna, São Paulo, 2018.

FORTANA, N., GUIGNI, M., PORTOLANO, D. Losses Reduction and Energy Production in Water-Distribution Networks. **Water Resources Planning and Management**, 138, 237 – 244. 2012.

IPEA. **Sustentabilidade Ambiental no Brasil: biodiversidade, economia e bem-estar humano**. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/livros/livros/livro07_sustentabilidadeambienta.pdf>. Acesso em 15 dez 2024.

LEITE, Flávio Aparecido. **Comparativo entre variadores de velocidade e inversor de frequência**. 2018. 60 f. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018.

LEITE, Antonio D. **A Energia no Brasil**. 01 ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.

LIOMAYE, D. & WELSIEN, K. Mainstreaming Energy Efficiency Investments in Urban Water and Wastewater Utilities. Water Guidance Note: World Bank Group, ESMAP, GWSP, 2019.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 8.ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2013.

MATHEUS, H. **Controle de Demanda**. Cuiabá/MT: Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, 2003. 32 p. (Trabalho de Conclusão de Curso) Disponível em: <<http://www.ejm.com.br/download/Demanda.pdf>>. Acesso em: 04 jan 2025.

MESQUITA, Gabriel Fonseca de. **Estudo comparativo de consumo energético de uma motobomba centrífuga com o controle de vazão na forma tradicional e com a utilização do inversor de frequência**. 2015. 56 f. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. (2011). Plano Nacional de Eficiência Energética. Premissas e Diretrizes Básicas.

NASCIMENTO, G. **Comandos elétricos – teoria e atividades**. 1 ed. São Paulo: Editora Érica, 2013.

NOVAES, Barbara D. **Chaves de Partida – soft-starter**. Disponível em: <http://200.195.174.230/Materiais/818_482.pdf>. Acesso em: 15 dez 2024.

OLIVEIRA, C., STAFFORD, S., RODRIGUES, M., & HUBNER, R. Análise do impacto ambiental e da economia gerada com a troca de transformadores em parque fabril. In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA, 3., 2013. Passo Fundo, RS. Anais... Passo Fundo, RS, 2013. OLIVEIRA, G. M., BARROS, N. A., & LEMOS DE SOUSA, M. J. Os desafios da estratégia pós-Kyoto. Porto - Portugal: Universidade Fernando Pessoa, 2015.

OZUR, Fernando Silva. PEREIRA, Thiago Henrique. CORREA, Joana D'arque da Silva. **CONTROLE DE DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA**. Belo Horizonte: UniBH. 2011.

ROSA, Alex. **Simulação de um soft-starter para acionamento de motores de indução**. 2003. 67. Dissertação - Universidade Federal de Goiás, 2003.

São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2022. Disponível em:
<<https://www.neowater.com.br/post/desperdicio-agua>>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SEVERINO, Antonio Joaquim. Metodologia do Trabalho Científico. São Paulo: Cortez, 2007.

SKWORCOW, P., ABDELMEGUID, H., ULANICKI, B., BOUNDS, P., PATEL, R., Combined energy and pressure management in water distribution systems. **World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers**. ASCE. 2009.

STAROSTA, José. Compensação de energia reativa, correção de fator de potência em instalações elétricas e mitigação das harmônicas - Parte 01/04. Revista o setor elétrico, Atitude. Editorial, ano 13, ed. 155, 1 dez. 2018.

SUPPA M.R., **Como funciona um controlador de demanda?**. São Paulo: CCK, Nov. 2011. Disponível em <<http://www.cck.com.br/>>. Acesso em 02 Jan. 2025.

SUPPA M.R., **Evolução do Controle de Demanda de Energia Eletrica no Brasil**. São Paulo: CCK, Dez. 2011. Disponível em:< <http://www.cck.com.br/>>. Acesso em: 04 jan 2025.

SUPPA M.R., **O Controle da Energia Elétrica na Nova Economia**. São Paulo: CCK, Nov. 2011. Disponível em:< <http://www.cck.com.br/>>. Acesso em: 04 jan 2025.

SUPPA, M.R., TERADA, M.I. **Artigo Comparativo entre métodos de controle de demanda: qual o mais eficiente para o usuário nacional?**. São Paulo: GESTAL, Dez. 2011. Disponível em:<<http://www.gestal.com/new/>>. Acesso em: 04 jan 2025.

TAKEDA, Marcondes Silvestre. **Eficiência energética na indústria**. Set. 2020. Revista Potência. Disponível em: <<https://revistapotencia.com.br/portal-potencia/artigos/eficiencia-energetica-na-industria/>>. Acesso em: 09 dez 2024.

Vieira, A. C. G. **Correção do Fator de Potência**. 2º Edição. Rio de Janeiro: Editora Manuais CNI, 1989, p. 155. Flarys, F. Eletrotécnica Geral (1ª Edição ed.). São Paulo: Editora Manole, (2006).

WEG. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. Jaraguá do Sul: WEG, 2016.

WEG. **Guia de aplicação de inversores de frequência**. Jaraguá do Sul: WEG, 2005.