



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS APARECIDA DE GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

**AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA EM
ESTUDO DE CASO DE ESTAÇÃO BOOSTER NA CIDADE
DE RIO VERDE - GO**

**LAURA VITÓRIA REZENDE DIAS
WANESSA SOUZA SANTOS**

APARECIDA DE GOIÂNIA

2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Laura Vitória Rezende Dias

Matrícula: 20181090040297

Título do Trabalho: Ações de eficiência hidráulica e energética em estudo de caso de estação booster na cidade de Rio Verde - GO

Autorização - Marque uma das opções

1. (☒) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. (☐) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. (☐) Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- (☐) O documento está sujeito a registro de patente.
(☐) O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
(☐) Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

____ Aparecida de Goiânia____, ____04____/____04____/____22____.
Local Data

Laura Vitória Rezende Dias

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Wanessa Souza Santos

Matrícula: 20181090040220.

Título do Trabalho: Ações de eficiência hidráulica e energética em estudo de caso de estação booster na cidade de Rio Verde – GO.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Aparecida de Goiânia, 04/ 04 /2022.

Local

Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS APARECIDA DE GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LAURA VITÓRIA REZENDE DIAS
WANESSA SOUZA SANTOS

**AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA EM
SANEAMENTO: ESTUDO DE CASO DE ESTAÇÃO
BOOSTER NA CIDADE DE RIO VERDE - GO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Aparecida de Goiânia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e desenvolvido na linha de pesquisa Construção Civil: Águas e Meio Ambiente sob orientação do Me.: Wilson Marques Silva.

APARECIDA DE GOIÂNIA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

D541 Dias, Laura Vitória Rezende
Ações de eficiência hidráulica e energética em estudo de caso de
estação booster na cidade de Rio Verde – GO. / Laura Vitória Rezende
Dias; Wanessa de Souza Santos. - Aparecida de Goiânia, 2022.
56 f.: il.

Orientador: Me. Wilson Marques Silva.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Instituto Federal de
Educação Ciência e Tecnologia de Goiás: Campus Aparecida de Goiânia,
Bacharelado em Engenharia Civil, 2022.

1. Eficiência energética. 2. Hidráulica. 3. Saneamento. 4. Bombas. 5.
Inversor de frequência. I. Dias, Laura Vitória Rezende. II. Santos,
Wanessa de Souza. III. Título.

CDD 627

Catalogação na publicação:
Thalita Franco dos Santos Dutra – CRB 1/2186



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS APARECIDA DE GOIÂNIA

Termo de Aprovação

LAURA VITÓRIA R. DIAS

WANEISSA DE SOUZA SANTOS

AÇÕES DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA EM ESTUDO DE CASO DE ESTAÇÃO BOOSTER NA CIDADE DE RIO VERDE - GO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Aparecida de Goiânia/IFG, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Prof. Wilson Marques Silva.

Aprovado em 3 de fevereiro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Wilson Marques Silva

Presidente da banca / Orientador(a)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof.^a Ana Maria Barboza Lemos

Membro

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof.^a Rosinete Fernandes Bandeira

Membro

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Aparecida de Goiânia – GO

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ana Maria Barboza Lemos**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/02/2022 23:30:48.
- **Rosinete Fernandes Bandeira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/02/2022 20:55:06.
- **Wilson Marques Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/02/2022 19:34:12.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 26/01/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 239756

Código de Autenticação: 5851bd5eab



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Avenida Universitária Vereador Vagner da Silva Ferreira, Qd. 1, Lt. 1-A, Parque Itatiaia, APARECIDA DE GOIÂNIA / GO, CEP 74968-755
(62) 3507-5958 (ramal: 5985)

À Deus pela vida.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos em primeiro lugar a Deus pela sua misericórdia e infinita bondade.

Agradecemos ao nosso orientador Prof. Wilson Marques Silva pela paciência, disposição e prontidão durante esse tempo de orientação.

Às nossas famílias, que entenderam todas as nossas ausências e privações em todo o período de faculdade, principalmente nessa reta final. E, mesmo assim, dedicaram sempre o amor incondicional, força, suporte e todo carinho possível para que terminemos nossa caminhada.

Aos engenheiros eletricitas Osmar Qualhato e Roberto Cesar, da Supervisão de Energia da SANEAGO, por disponibilizarem os materiais e relatórios necessários para o desenvolvimento desse trabalho.

“O entusiasmo é a maior força da alma.”

Napoleon Hill

RESUMO

DIAS, L. V. R¹; SANTOS, W. S². Ações de eficiência hidráulica e energética em saneamento: estudo de caso de estação booster na cidade de Rio Verde - GO. 2022. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Aparecida de Goiânia. 2022.

O sistema de saneamento demanda um elevado consumo de energia, sendo cada vez mais importante o desenvolvimento de estudos e análises de viabilidade técnica e econômica sobre ações de eficiência hidráulica e energética aplicadas no setor de saneamento. Objetivou-se com esse trabalho analisar a implementação do projeto “Sistema de eficiência energética através do uso de inversores de frequência no Booster da cidade de Rio Verde” selecionado na chamada pública PEE CELG D nº 001/2015 e implantado em 2017. Para que o nível da torre de equalização de carga seja mantido constante, ocorre o estrangulamento frequente do fluxo nas tubulações e conseqüentemente o aumento de perdas de carga hidráulica, razão da viabilidade do projeto. Assim, com o controle da vazão do Booster por meio dos inversores de frequência ao invés das válvulas obteve-se a otimização do consumo energético do sistema, a redução de desgastes na bomba e nas tubulações, bem como a redução da perda de carga do sistema com a eliminação da válvula de estrangulamento.

Palavras-chave: Eficiência energética. Hidráulica. Saneamento. Bombas. Inversores de frequência.¹

¹Dias. **Ações de eficiência hidráulica e energética em saneamento: estudo de caso de estação booster na cidade de Rio Verde -GO.** IFG Aparecida de Goiânia: 2022.

²Santos. **Ações de eficiência hidráulica e energética em saneamento: estudo de caso de estação booster na cidade de Rio Verde -GO.** IFG Aparecida de Goiânia: 2022.

ABSTRACT

DIAS, L. V. R; SANTOS, W. S. Hydraulic and energy efficiency actions in sanitation: a case study of a booster station in the city of Rio Verde - GO. 2022. 54 p. Course Completion Work (Undergraduate in Civil Engineering) - Department of Civil Engineering. Federal Institute of Education, Science and Technology of Goiás. Aparecida de Goiânia. 2022.

The sanitation system demands high energy consumption, and it is increasingly important to develop studies and analyzes of technical and economic feasibility on hydraulic and energy efficiency actions applied in the sanitation sector. The objective of this work was to analyze the implementation of the project "Energy efficiency system through the use of frequency inverters in the Booster of the city of Rio Verde" selected in the public call PEE CELG D nº 001/2015 and implemented in 2017. level of the load equalization tower is kept constant, there is frequent throttling of the flow in the pipes and, consequently, an increase in hydraulic head losses, which is the reason for the feasibility of the project. Thus, with the control of the flow of the Booster through frequency inverters instead of valves, the optimization of the energy consumption of the system, the reduction of wear on the pump and pipes, as well as the reduction of the pressure drop of the system was obtained with the elimination of the throttling valve.

Keywords: *Energy efficiency. Hydraulics. Sanitation. Bombs. Frequency inverter.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de Sistema de Abastecimento de Água.....	27
Figura 2 – Curvas características da bomba e do sistema indicando o ponto de operação.....	30
Figura 3 – Curva característica torque x velocidade do motor acionado por inversor de frequência.....	33
Figura 4 – Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM.....	34
Figura 5 – Corte de uma instalação típica tipo booster.....	35
Figura 6 – Variação de H e Q na bomba para diferentes velocidades de operação.....	35
Figura 7 – Curva do sistema com controle de velocidade.....	37
Figura 8 – Representação dos custos anual com energia elétrica da SANEAGO.....	39
Figura 9 – Consumo de energia em 2020.....	40
Figura 10 – Custo com energia em 2020.....	40
Figura 11 – Bacia Hidrográfica do rio Abóbora.....	43
Figura 12 – Monitoramento das vazões nos Reservatórios.....	44
Figura 13 – Monitoramento das vazões da Captação Rio Verde.....	44
Figura 14 – Captação abóbora do Booster Rio Verde.....	45
Figura 15 – Motores Booster Rio Verde.....	45
Figura 16 – Tubulação de recalque do Booster Rio Verde.....	46
Figura 17 – Simulação da rede sem os inversores.....	47
Figura 18 – Simulação da rede com os inversores instalados.....	47

Figura 19 – Demanda de ponta de 2017 a 2021 do Booster.....	48
Figura 20 – Booster com inversores de frequência.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados operacionais SANEAGO.....	18
Tabela 2 – Valores da rugosidade absoluta equivalente.....	22
Tabela 3 – Valor do coeficiente C.....	24
Tabela 4 – Perda de carga em conexões - Comprimento equivalente para tubo liso.....	26
Tabela 5 – Consumo de energia elétrica 2019-2020 por classe de consumo (GWh).	37
Tabela 6 – Projeção do consumo de energia elétrica na rede (GWh), 2020-2024.....	38
Tabela 7 – Índice de perdas na distribuição.....	39
Tabela 8 – Demanda média do Booster Rio Verde.....	45
Tabela 9 – Dados do sistema Booster antes do projeto.....	49
Tabela 10 – Resultados após instalação dos inversores.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEE	Ação de Eficiência Energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
DC	Corrente contínua
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
SANEAGO	Empresa de Saneamento de Goiás S/A
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
PWM	Modulação por largura de pulso
MIT	Motor de Indução Trifásico
RMHS	Rede de Monitoramento Hidrológico da SANEAGO
SAA	Sistemas de Abastecimento de Água

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração da gravidade
H_1	Carga antiga
H	Carga da bomba
H_2	Carga obtida com a nova rotação
f	Coeficiente de atrito
C	Coeficiente de rugosidade
k	Coeficiente relacionado ao número de Reynolds
L	Comprimento do tubo
L_e	Comprimento equivalente
K	Constante
I	Corrente
i_2	Corrente no rotor
D	Diâmetro
s	Escorregamento.
$\cos \varphi$	Fator de potência do motor
Φ	Fluxo de magnetização
N_2	Nova rotação
p	número de polos
Re	Número de Reynolds
H_{rp}	Perda de carga primária
H_{rs}	Perda de carga secundária
h_f	Perda de carga

hf_{loc}	Perda de carga localizada
hf_d	Perda de carga distribuída
J	Perda de carga unitária
γ	Peso específico do líquido
P_2	Potência absorvida com a nova rotação
P_1	Potência absorvida nas condições iniciais
P_c	Potência cedida ao líquido
P_e	Potência elétrica consumida da rede
η	Rendimento da bomba
N_1	Rotação antiga
V	Tensão entre fases
v_1	Tensão no estator
τ	Torque no eixo
n	Velocidade de rotação mecânica
Q	Vazão
Q_1	Vazão antiga
Q_2	Vazão obtida com a nova rotação
V	Velocidade
ν	Viscosidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações Iniciais	16
1.2	Aspectos Históricos do Saneamento Mundial	16
1.3	Aspectos históricos do saneamento Brasileiro	17
1.4	Saneamento de Goiás S.A. – SANEAGO	17
1.5	Objetivos Gerais	18
1.5.1	Objetivos Específicos	18
1.6	Metodologia.....	19
1.7	Estrutura da monografia	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Escoamentos sob pressão	20
2.2	Perdas de carga	21
2.3	Sistema de Abastecimento de Água e Rede de Distribuição.....	26
2.4	Sistema de bombeamento de água.....	28
2.4.1	Válvulas.....	28
2.4.2	Reservatórios	29
2.4.3	Bombas	29
2.4.4	Motor Elétrico	31
2.4.5	Inversores de frequência	33
2.4.6	Booster.....	34
2.5	Projeção do consumo de energia	37
2.6	Consumo de energia elétrica na SANEAGO.....	39
3	AÇÕES PARA PROMOÇÃO DA EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE SANEAMENTO.....	41
3.1	Utilização de inversores de frequência no acionamento de conjuntos motor-bomba para controle da vazão de bombeamento	42

3.2	O uso de painéis fotovoltaicos para sistema de bombeamento	42
3.3	Estudo de caso: sistema de eficiência energética através da implantação de inversores de frequência no Booster Rio Verde.....	43
3.3.1	Booster Rio Verde	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A implementação de ações de eficiência hidráulica e energética é fundamental para minimizar impactos ambientais, principalmente nestes tempos de aquecimento global e mudanças climáticas, bem como para contribuir com a redução de custos operacionais e otimização do desempenho hidráulico no sistema de bombeamento por meio da utilização de dispositivos e equipamentos eficientes que possibilitam aumentar a segurança e a confiabilidade nos serviços de saneamento prestados para a população.

O sistema de saneamento consome uma quantidade de energia enorme para alimentar motores e bombas que são dimensionados de acordo com a quantidade de água captada, tratada e distribuída para a população, bem como com a quantidade de esgoto coletado e tratado. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo apresentar a análise de viabilidade técnica e econômica do projeto de eficiência energética implementado no Booster Rio Verde da empresa de saneamento de Goiás, a SANEAGO.

1.2 Aspectos Históricos do Saneamento Mundial

Saneamento é um conjunto de medidas que modificam ou preservam o meio a fim de tornar algo mais higiênico e saudável. Desde a idade antiga o homem tem desenvolvido técnicas de saneamento para melhorar as condições do meio em que vive. Ao longo do tempo o ser humano foi entendendo a relação de sua saúde com o meio e a necessidade do desenvolvimento de técnicas de saneamento. O controle das substâncias químicas perigosas, o manejo adequado dos recursos hídricos e dos resíduos sólidos, o controle de ruídos, das vibrações e das radiações são essenciais à proteção do meio ambiente natural e do ambiente modificado onde vive e trabalha o homem (FIOCRUZ, 2019).

Com o aumento demográfico a demanda por água também se torna crescente. Desta forma as evoluções tecnológicas permitem auxiliar no equilíbrio da demanda de água. “A aplicação da automação em Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) é uma prática que está sendo difundida no setor de saneamento (FILHO, 2016, p.102).”

1.3 Aspectos históricos do saneamento Brasileiro

O Brasil começou sua história no saneamento básico em 1561 quando o fundador Estácio de Sá mandou escavar o primeiro poço para abastecer o Rio de Janeiro. Em Porto Alegre e no Rio de Janeiro o abastecimento de água encanada se deu em 1861 e 1876, respectivamente. Nessa época a capital do Rio de Janeiro inaugurou a primeira Estação de Tratamento de Água (ETA). Em 1930 a constituição federal atribuiu aos municípios a responsabilidade pelos serviços de saneamento e abastecimento de água. Já o comércio dos serviços de saneamento no Brasil iniciou-se por volta de 1940 (TRATA BRASIL, 2020).

Na constituição brasileira o saneamento básico é um direito assegurado e definido pela Lei nº. 11.445/2007, chamada de Lei Nacional do Saneamento Básico – LNSB, sancionada em 05 de janeiro de 2007, que entrou em vigência a partir de 22 de fevereiro do mesmo ano e estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico no Brasil. De acordo com a lei, o saneamento é definido como sendo o conjunto dos serviços, infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais.

1.4 Saneamento de Goiás S.A. – SANEAGO

A SANEAGO (Companhia Saneamento de Goiás S/A) é uma empresa brasileira, fundada no ano de 1967, durante o governo de Otávio Lage de Siqueira, sendo oficializada pela Lei Estadual nº 6680/67. Posteriormente, ao aderir ao Plano Nacional de Saneamento Básico, conseguiu constituir-se como primeira iniciativa federal no setor de saneamento. Em dezembro de 2001 foi inserida no registro de Companhia Aberta junto a Comissão de Valores Mobiliários, sendo atualmente constituída sob a forma de sociedade de economia mista e controle acionário. Seu evento histórico mais recente ocorreu em 2018 com o Novo Estatuto da SANEAGO em atendimento à Lei das Estatais de nº 13.303/2016.

A SANEAGO é responsável pelo saneamento de 226 dos 246 municípios goianos, nos demais a captação de água é administrada pela própria prefeitura. Em 2019 a empresa registrou índices de atendimento em 2019 de 97,01% para água e 62,60% para esgoto. Alguns dos municípios atendidos são: Anápolis, Ceres, Formosa, Goiânia, Cidade de Goiás, Iporá, Inhumas, Jataí, Luziânia, Porangatu, Santa Helena de Goiás, Rio Verde, entre outros.

A empresa possui como atribuições elaboração de estudos e projetos, construção de sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, bem como a operação e a

manutenção dos sistemas implantados em Goiás. A Tabela 1 apresenta de forma geral as unidades operacionais da SANEAGO.

Tabela 1 – Dados operacionais - SANEAGO

Unidades operacionais	Quantidade
Estações de Tratamento de Água - ETAs	188
Estações de Tratamento de Esgoto - ETEs	89
Sistemas de Captação de Água	471
Poços Tubulares Profundos	870
Centros de Reservação	1396

Fonte: Relatório de Sustentabilidade SANEAGO (2020)

Os sistemas Mauro Borges e Meia Ponte são responsáveis pelo abastecimento da região metropolitana de Goiânia. Os demais municípios são abastecidos por captações superficiais ou poços. A estação de Rio Verde caracterizada como Booster é uma unidade intermediária de recalque de água bruta captada em sua maior parte no Rio Abóbora, e faz parte do objeto de estudo de caso deste trabalho.

1.5 Objetivos Gerais

Os objetivos da pesquisa são estudar e promover as ações de eficiência hidráulica e energética no sistema de saneamento, serviço essencial de abastecimento da população com água tratada e serviços de coleta e tratamento de esgoto sanitário; estudar as ferramentas e metodologias utilizadas para gestão eficiente de energia, bem como o uso de equipamentos para redução de perdas de água e o aproveitamento de energia limpa para geração de energia elétrica.

1.5.1 Objetivos Específicos

Fazer a análise de dados referente a implementação de uso de inversores no Booster Rio Verde da SANEAGO.

1.6 Metodologia

Este trabalho foi constituído por meio da realização das seguintes etapas:

- 1) Inicialmente foi feito um levantamento bibliográfico abordando os conceitos fundamentais de hidráulica básica: escoamentos; perda de carga; estudo de rede de distribuição de água convencional; modelos de rede; componentes físicos da rede; booster; tubulações; bombas; válvulas; reservatórios, e demais acessórios;
- 2) Após o levantamento bibliográfico realizou-se um estudo sobre ações de promoção de eficiência hidráulica e energética em sistemas de saneamento, tratando-se de tópicos como energia limpa; consumo de energia; inversores de frequência; motor elétrico; válvulas; redução de índice de perdas; aplicação de energia solar fotovoltaica para bombeamento de água; e utilização de inversores de frequência para diminuição de consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento;
- 3) Em seguida apresentou-se o processo de implementação do projeto de eficiência energética no Booster Rio Verde da companhia Saneamento de Goiás S.A., SANEAGO por meio do Programa de Eficiência Energética da ANEEL;
- 4) E por fim realizou-se uma análise dos resultados obtidos após a implementação dos inversores de frequência no Booster.

1.7 Estrutura da monografia

Esta monografia apresenta a seguinte estrutura: no capítulo 1 é apresentado um breve histórico do saneamento mundial e no Brasil; no capítulo 2 são explanados os conceitos fundamentais de Hidráulica Básica aplicados em sistema de abastecimento de água e rede de distribuição, bem como o funcionamento e as partes componentes de uma estação booster; o capítulo 3 descreve sobre ações de eficiência hidráulica e energética que tem sido utilizadas em sistemas de saneamento e apresenta o projeto de eficiência energética implementado no Booster Rio Verde da SANEAGO; o capítulo 4 apresenta os resultados e discussões quanto aos dados resultantes da implementação dos inversores de frequência no Booster no que tange ao controle de vazão, redução de perdas e do consumo de energia; e por fim o capítulo 5 finaliza a pesquisa com a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Hidráulica é a disciplina que estuda o comportamento dos fluidos em seu estado líquido, estando o fluido em repouso ou em movimento. Na engenharia civil a hidráulica é importante, pois oferece recursos técnicos necessários para análise e elaboração de projetos de redes de abastecimento de água, sistemas de esgoto, drenagem, irrigação, dentre outros.

O uso de tubulações no transporte de fluidos pode ser realizado por meio de tubos fechados e canais abertos. O escoamento do fluido em tubulações sofre a influência das paredes visto que o atrito do fluido com a parede do tubo gera uma perda de energia, denominada perda de pressão ou perda de carga. A análise das perdas de carga que ocorrem em tubulações e acessórios hidráulicos é necessária visto que essas perdas influenciam de forma direta nos dimensionamentos dos projetos hidráulicos.

2.1 Escoamentos sob pressão

Os escoamentos em tubulações são classificados em função de suas características, a saber (PORTO, 2006):

1. Escoamento laminar: o fluido escoar em blocos ou lâminas ao longo de trajetórias bem definidas. É preponderante a ação da viscosidade do fluido no sentido de amortecer a tendência de surgimento da turbulência;
2. Escoamento Turbulento: o movimento das partículas é aleatório, produzindo uma transferência de quantidade de movimento entre regiões da massa líquida;
3. Escoamento Unidimensional: as propriedades como pressão, velocidade, massa específica, etc., são representadas em termos de valores médios da seção;
4. Escoamento Bidirecional: as partículas escoam em planos paralelos segundo trajetórias idênticas, não havendo variação do escoamento na direção normal aos planos;
5. Escoamento rotacional: quando as partículas possuem uma rotação em relação a um eixo qualquer;
6. Escoamento uniforme: quando todas as seções transversais do conduto são iguais e a velocidade é idêntica em todos os pontos.

O regime de escoamentos laminares ou turbulentos em dutos depende das propriedades de cada escoamento. Para escoamentos em condutos cilíndricos circulares utiliza-se uma equação que determina um valor que associa grandezas tais como diâmetro, velocidade e viscosidade cinemática para o qual o fluido passa do escoamento laminar para o turbulento. Este valor é um parâmetro conhecido como número de Reynolds, conforme Equação 1.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1)$$

Onde:

Re é o número de Reynolds;

L , o comprimento do tubo (m);

ν , a viscosidade cinemática (m²/s); e

V , a velocidade do escoamento (m/s);

Sendo que para: $Re < 2000$ – o regime é considerado laminar;
 $2000 < Re < 4000$ – o regime é considerado de transição e
 $Re > 4000$ – o regime é considerado turbulento.

O escoamento é classificado em superfície livre quando o líquido estiver sempre em contato com a atmosfera. Ele se dá pela ação da gravidade. Já o escoamento em pressão ou forçados ocorre dentro das canalizações onde a pressão é diferente da atmosférica. Todos os sistemas de tubulações prediais, de abastecimento de água, oleodutos e gasodutos possuem este tipo de escoamento. Nos escoamentos em condutos forçados a perda de energia gerada pelos atritos internos do fluido e pelos atritos entre este e a tubulação são gerados pelas asperezas das paredes dos condutos ou ainda em função da turbulência gerada em função de variações de direção dos trechos (NETTO, 1998).

2.2 Perdas de carga

Pode-se classificar as perdas de duas formas: perdas de carga distribuída ou primária e perdas de carga localizada ou secundária. Existem várias equações que descrevem como efetuar o cálculo das perdas de carga, dentre elas se destacam a equação de Darcy-Weisbach, equação Hazen-Williams e a equação de Flamant. O cálculo destas perdas permite a otimização de projetos e gera economia na produção e eficiência das instalações hidráulicas.

A parede dos dutos retilíneos ocasiona perda de pressão gradativa ao longo do comprimento do tubo. Esta perda de carga depende do diâmetro e do comprimento do tubo, da rugosidade da parede e das propriedades do fluido como a massa específica, viscosidade e velocidade de escoamento. A rugosidade da parede depende do material de fabricação do tubo bem como do seu estado de conservação, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores da rugosidade absoluta equivalente

Material	Rugosidade ϵ (mm)
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Aço soldado novo	0,15 a 0,10
Aço soldado limpo, usado	0,15 a 0,20
Aço soldada moderadamente oxidado	0,40
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,10
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6
Aço galvanizado, com costura	0,15 a 0,20
Aço galvanizado, sem costura	0,06 a 0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido com leve oxidação	0,30
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido centrifugado	0,05
Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,10
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,12 a 0,20
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC, tubos	0,0015 a 0,010

Em um sistema a perda de carga total é dado pela soma da perda de carga distribuída mais a perda de carga localizada (Equação 2).

$$H_{r1-2} = H_{rp} + H_{rs} \quad (2)$$

Onde:

H_{r1-2} é a perda de carga total;

H_{rp} a perda de carga primária; e

H_{rs} a perda de carga secundária.

A Equação 3, desenvolvida por Darcy-Weisbach, considera a natureza e o estado de conservação das paredes do tubo. Esta equação é conhecida como Fórmula Universal das Perdas de Carga. (PORTO, 2006)

$$hf = f \frac{LV^2}{D \ 2 \ g} \quad (3)$$

Onde:

h é a perda de carga (m);

L , o comprimento do tubo (m);

D , o diâmetro do tubo, (m);

V , a velocidade do escoamento (m/s);

g , aceleração da gravidade (m/s²); e

f , o coeficiente de atrito.

A Equação 4 é a formulação empírica de *Hazen-Williams*. Ela é usada quando não é dada a temperatura do fluido e quando se tem escoamento turbulento de transição em redes de distribuição de água, adutoras e sistemas de recalque.

Onde:

$$J = 10,643 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (4)$$

Onde:

J é perda de carga unitária (m/m);

Q , a vazão (m^3/s);

D , o diâmetro (m); e

C , o coeficiente de rugosidade que depende da natureza e estado das paredes do tubo, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Valor do coeficiente C

Tipo de Conduto	C
Aço corrugado	60
Aço galvanizado	125
Aço rebitado novo	110
Aço rebitado usado	85-90
Aço soldado novo	130
Aço soldado usado	90-100
Aço zincado	140-145
Cimento-amianto	130-140
Concreto com bom acabamento	130
Ferro fundido novo	130
Ferro fundido usado	90-100
Plástico	140-145
PVC rígido	145-150

Fonte: Adaptado de NETTO (1998)

As perdas de carga localizada ou secundária são causadas por acessórios de canalização, tais como as peças necessárias para a montagem da tubulação e para o controle do fluxo do escoamento. Estas peças ocasionam variação brusca da velocidade, e intensificam a perda de energia nos pontos onde estão localizadas. Cada componente apresenta um valor específico de perda de carga. O escoamento sofre perturbações bruscas em pontos da instalação tais como em válvulas, junções, joelhos, curvas, expansões e reduções (PORTO, 2006).

As perdas localizadas em acessórios podem ser expressas pela Equação 5:

$$hf_{loc} = k \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

Onde:

hf_{loc} é a perda de carga localizada (mca); e

K , o coeficiente que depende da singularidade e do número de Reynolds.

O Método dos comprimentos equivalentes é um conceito útil para o cálculo das perdas de carga localizadas. Neste método as peças e conexões são substituídas por comprimentos virtuais de tubulação que representam a mesma perda de carga das peças. Este conceito permite simplificar os cálculos e dimensionamentos através do uso de uma expressão única, conforme mostra as Equações 6, 7 e 8 (NETTO, 1998).

$$h_t = hf_{loc} + hf_d \quad (6)$$

$$h_t = f \frac{L_e V^2}{D 2g} + k \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

$$L_e = \frac{k D}{f} \quad (8)$$

Onde:

hf_{loc} é a perda de carga localizada (mca);

K , o coeficiente que depende da singularidade e do número de Reynolds;

L_e o comprimento (m).

A Tabela 4 mostra os comprimentos equivalentes para algumas peças especiais, utilizadas nas instalações hidráulicas prediais.

Tabela 4 – Perda de carga em conexões - Comprimento equivalente para tubo liso

Diâmetro nominal (DN)	Tipo de Conexão					
	Cotovelo (90°)	Cotovelo (45°)	Curva (90°)	Curva (45°)	Tê (passagem direta)	Tê (passagem lateral)
15	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3
20	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4
25	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1
32	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6
40	3,2	1,0	1,2	0,6	2,2	7,3
50	3,4	1,3	1,3	0,7	2,3	7,6
65	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8
80	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0
100	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3
125	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0
150	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1

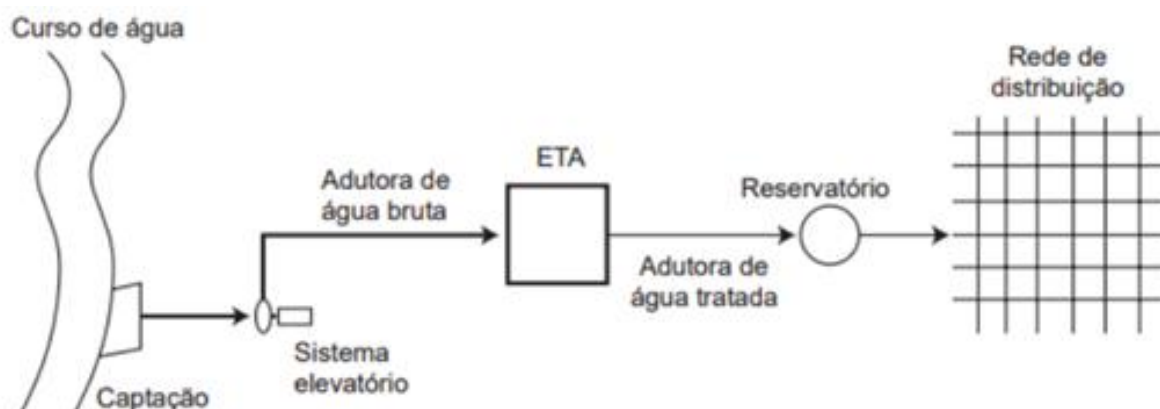
Fonte: NBR 5626 (1998)

O valor de k é praticamente constante para valores do número de Reynolds superiores a 50000. Desta forma, para escoamentos turbulentos pode-se adotar o valor de k constante, independente do diâmetro da tubulação e da velocidade e natureza do fluido (NETTO, 1998).

2.3 Sistema de Abastecimento de Água e Rede de Distribuição

O Sistema de Abastecimento de Água é o conjunto de equipamentos, obras e serviços voltados para o fornecimento de água para fins de consumo doméstico, industrial e público (SILVA, 2016). Geralmente o sistema de abastecimento é composto por: manancial, captação, estação elevatória, adutora, estação de tratamento de água, reservatório e rede de distribuição, conforme demonstra a Figura 1.

Figura 1 - Esquema de Sistema de Abastecimento de Água



Fonte: Inep. Enade Engenharia Ambiental (2018)

O manancial consiste no local de retirada de água para o abastecimento, podendo ser locais de reservas de água superficiais (cursos de água) ou subterrâneas. A água retirada do manancial passa pela captação que é um conjunto formado por estruturas e dispositivos construídos junto ao manancial para retirada de água destinada ao sistema de abastecimento (TSUTIYA, 2006).

A estação elevatória é formada por um conjunto de equipamentos destinados ao recalque da água para a próxima unidade do sistema. Já a adutora é uma canalização com objetivo de conduzir água entre as unidades que antecedem a rede de distribuição. Uma dessas unidades que precedem as redes é a Estação de Tratamento de Água (ETA). Ela é formada por um conjunto de elementos que adequam a água captada aos padrões de potabilidade. Essa água, após adequada, pode ser levada aos reservatórios elevados ou subterrâneos.

A rede de distribuição é responsável pela condução de água para o consumo final. É composta por um conjunto de tubulações e peças conectoras instalados desde as unidades, seguindo pela parte subterrânea das vias até os locais de demanda de abastecimento. As redes podem ser do tipo ramificada, malhada ou ainda do tipo mista. A rede ramificada possui condutos dispostos a partir de um conduto principal central. Esse esquema é típico de cidades de menor porte. Já a rede malhada possui seus condutos principais formando circuitos ou anéis e são interligados, lembrando uma disposição de malha. A rede de distribuição mista é composta por trechos em anéis e outros trechos ramificados.

2.4 Sistema de bombeamento de água

De acordo com Salvino, a água pressurizada pode ser conduzida na tubulação por gravidade, não havendo, portanto, necessidade do uso de energia elétrica. Mas ela pode ser impulsionada também por uma estação elevatória fazendo com que seja necessário dispor de sistema de impulsão composto por conjuntos motorbomba e/ou booster (SALVINO, 2018).

Os sistemas de bombeamento são dimensionados em função da vazão e da altura manométrica da instalação. Desta forma, deve-se medir as pressões de sucção e de recalque para determinar a altura manométrica total a qual a bomba estará recalcando a vazão medida. Esse ponto de funcionamento deve estar de acordo com a curva da bomba fornecida pelo fabricante.

O controle da vazão no sistema de bombeamento é obtido pelo uso de válvulas tipo globo, gaveta ou borboleta. Na operação com válvulas realiza-se o deslocamento do ponto de operação, que é a intersecção da curva da bomba com a curva do sistema, sobre a curva da bomba de modo a encontrar o ponto necessário para uma determinada vazão (ELETROBRÁS, 2005).

A regulação de vazão por meio de válvulas de controle aumenta a perda de carga local. A mudança do ponto de operação da curva da bomba acarreta um rendimento inferior das bombas e aumenta o consumo de energia elétrica.

2.4.1 Válvulas

As válvulas são utilizadas para promover a variação de vazão de sistemas de abastecimento de água. Os principais tipos de válvulas disponíveis no mercado são:

- Válvula do tipo on/off: usadas para o acionamento remoto de unidades;
- Válvula redutora de pressão: reduz a pressão a jusante do ponto de instalação;
- Válvula sustentadoras de pressão e válvulas de alívio: aplicam-se onde é necessário manter uma pressão inferior a um determinado limite;
- Válvula controlador de nível: usada na prevenção de extravasamentos;
- Válvula limitadora de vazão: mantém a vazão do sistema de abastecimento de água dentro dos limites preconizados; além serve também para controlar a vazão de uma bomba de curva “chata”, evitando sobrecargas ao motor;
- Válvula para a prevenção de golpe de aríete: estas válvulas evitam a variação de pressão quando ocorre a partida e desligamento do motor;
- Válvula de alívio rápido: aplicada na prevenção de golpes de aríete.

O uso de válvulas na instalação tem algumas desvantagens pois gera perda de carga, altera o ponto de operação das bombas, bem como mantém os motores dos conjuntos motobomba operando em rotação nominal, e desta forma contribui para redução da eficiência do sistema.

2.4.2 Reservatórios

O reservatório é a unidade do sistema de abastecimento de água responsável pelo equilíbrio entre a demanda e a oferta de água conforme os hábitos de consumo que dependem das condições socioeconômicas da população abastecida, da capacidade de produção da instalação, da disponibilidade de água na região e até mesmo das condições meteorológicas.

No dimensionamento dos reservatórios deve-se considerar a variação diária da demanda pela água, de modo que seja possível armazenar um volume suficiente de água para suprir os horários em que a demanda é maior do que a capacidade de bombeamento.

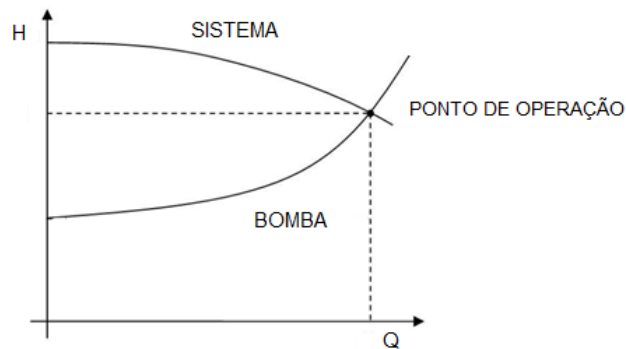
2.4.3 Bombas

As bombas centrífugas são equipamentos que promovem o transporte de fluidos por meio da conversão de energia cinética rotacional em energia hidrodinâmica. Esse dispositivo possui duas categorias principais: as centrífugas e as volumétricas. Em estação Booster geralmente são empregadas as bombas centrífugas de fluxo radial.

As bombas centrífugas de fluxo radial são aplicadas para vencer grandes alturas e vazões relativamente baixas, e podem ser acionadas por motores elétricos. Em aplicações onde é necessário variar a vazão de uma bomba é normal a utilização de válvulas a qual reduz a vazão restringindo a área de passagem do fluido. Nesse caso a bomba continua trabalhando em rotação nominal e consumindo potência nominal, sendo que a válvula se encarregará de dissipar a energia excedente. Assim, a vazão é reduzida com a perda de energia nas válvulas (ELETROBRÁS, 2005).

O ponto de funcionamento da bomba representa a relação entre a vazão que a bomba é capaz de recalcar e a altura manométrica total contra a qual essa vazão pode ser recalçada, conforme demonstrado na Figura 2. O ponto de funcionamento dessa bomba em um determinado sistema é dado pelo cruzamento da curva característica do sistema (que representa a hidráulica do sistema de tubulações, reservatórios e cotas dos níveis de água, etc) com a curva característica da bomba (COELHO, 2020).

Figura 2 – Curvas características da bomba e do sistema indicando o ponto de operação



Fonte: Adaptado de COELHO (2020)

Dentre os fatores que influenciam na curva característica da bomba, cita-se a viscosidade do líquido, densidade, a variação de rotação da bomba, dentre outros. A bomba centrífuga permite operar a uma velocidade constante com vazões que vão de zero até o valor nominal. A potência que é entregue ao líquido é dada pela Equação 9:

$$P_c = \frac{\gamma Q H}{75 \eta} \quad (9)$$

Onde:

P_c é a potência cedida ao líquido (cv);

γ , peso específico do líquido (kgf/m³);

Q , vazão (m³/s);

H , carga da bomba (m); e

η , rendimento da bomba.

Já a potência consumida da rede pela bomba acionada pelo motor de indução é dada pela Equação 10:

$$P_E = \sqrt{3} V I \cos \varphi \quad (10)$$

Onde:

P_E é potência elétrica consumida da rede (W);

V , a tensão entre fases (V);

I , a corrente (A); e

$\cos \varphi$, o fator de potência do motor.

2.4.4 Motor Elétrico

O Motor de Indução Trifásico (MIT), conhecido como motor de corrente alternada (CA) ou motor assíncrono, é um tipo de motor elétrico que apresenta dois campos magnéticos girantes. Os principais componentes que compõem o MIT são:

- Rotor: elemento móvel que gira em torno de seu próprio eixo;
- Estator: componente fixo à carcaça do motor elétrico. É constituído por três enrolamentos dispostos a 120° entre si (enrolamentos de armadura).

O estator está ligado à fonte de alimentação CA. Quando os enrolamentos do estator são energizados com corrente alternada senoidal é produzido um campo magnético girante no entreferro (espaço entre o rotor e o estator), que por sua vez induz correntes elétricas trifásicas no rotor. A interação entre as correntes induzidas no rotor e o campo magnético girante produzem torque eletromagnético que atua sobre o rotor fazendo-o girar (UMANS, 2014).

O motor é considerado máquina assíncrona pois para existirem correntes induzidas no rotor, a velocidade mecânica do eixo deve ser diferente da velocidade do campo girante. Assim, a diferença entre a velocidade do campo girante produzido pelo estator e do giro mecânico do rotor é denominada escorregamento (CHAPMAN, 2013).

O acionamento de motor de indução por inversores de frequência permite controlar a velocidade do motor. A Equação 11 é usada para calcular a velocidade do motor.

$$n = \frac{120f}{p}(1 - s) \quad (11)$$

Onde:

n é a velocidade de rotação mecânica (rpm);

f , a frequência da tensão de alimentação (Hz);

p , o número de polos; e

s , o escorregamento.

O inversor transforma a tensão da rede, que possui amplitude e frequência constante, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Ao variar a frequência da tensão de alimentação, a velocidade do campo girante e a velocidade mecânica de rotação da máquina também são variadas. O torque desenvolvido pelo motor de indução e o fluxo magnetizante são representados pelas Equações 12 e 13:

$$\tau = k \Phi i_2 \quad (12)$$

$$\Phi = k v_1 / f \quad (13)$$

Onde,

τ é o torque no eixo (N.m);

Φ , o fluxo de magnetização (Wb);

i_2 , a corrente no rotor (A);

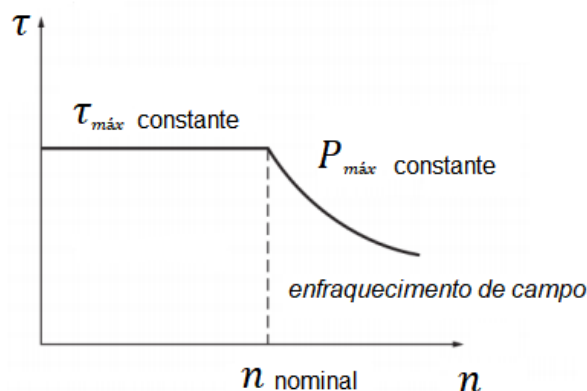
v_1 , a tensão no estator (V); e

k é uma constante.

Pela Equação 13 observa-se que o fluxo permanece constante quando se varia proporcionalmente a amplitude e a frequência da tensão de alimentação. Sendo assim, para um fluxo constante, o torque permanece constante e o motor passa a ter um ajuste contínuo de velocidade e torque com relação a carga mecânica. Posto isso a variação da relação v_1/f é feita de forma linear até a frequência nominal do motor. Acima da frequência nominal, a tensão é máxima e permanece constante, ocorrendo então apenas a variação da frequência aplicada ao enrolamento do estator (WEG, 2016).

Acima da frequência nominal tem-se a região de enfraquecimento de campo, onde o fluxo decresce com o aumento da frequência, provocando então a diminuição de torque, conforme demonstrado pela curva característica torque x velocidade do motor acionado por inversor na Figura 3.

Figura 3 – Curva característica torque x velocidade do motor acionado por inversor de frequência



Fonte: Adaptado de WEG (2016)

Assim, pela Figura 3 observa-se que o torque permanece constante até a frequência nominal e decresce de forma gradativa quando se ultrapassa a frequência nominal. Já a potência do motor cresce de forma linear até a frequência nominal e permanece constante acima desta.

2.4.5 Inversores de frequência

Os inversores de frequência são equipamentos eletrônicos acoplados, entre outros, aos conjuntos motobomba para controlar a velocidade de rotação da bomba em substituição das válvulas reguladoras de vazão e pressão hidráulica. Quando se reduz a rotação da bomba diminui-se por consequência o consumo de energia elétrica do motor. O uso do inversor apresenta as seguintes vantagens (WEG, 2016):

- Aumento da vida útil da bomba, mancais, vedações e tubulações devido as paradas suaves sem “golpe de aríete”;
- Economia de energia;
- Melhora o controle do processo pois com o controle preciso de velocidade obtido com o inversor é possível otimizar a operação do sistema;
- Possibilita a automação do sistema com controle de equipamento à distância;
- Diminui o número de rompimentos nas tubulações;
- Reduz custos: visto que o inversor proporciona partida suave para o motor, o que evita os picos de correntes ocasionados em partidas diretas.

Dentre as desvantagens para o uso do inversor pode-se citar o custo de investimento ser relativamente alto e a ocorrência de distorções harmônicas na tensão. Contudo a realização de análise de viabilidade técnica e econômica permite verificar se é conveniente investir na instalação de inversores no sistema. Ademais, é possível reduzir as

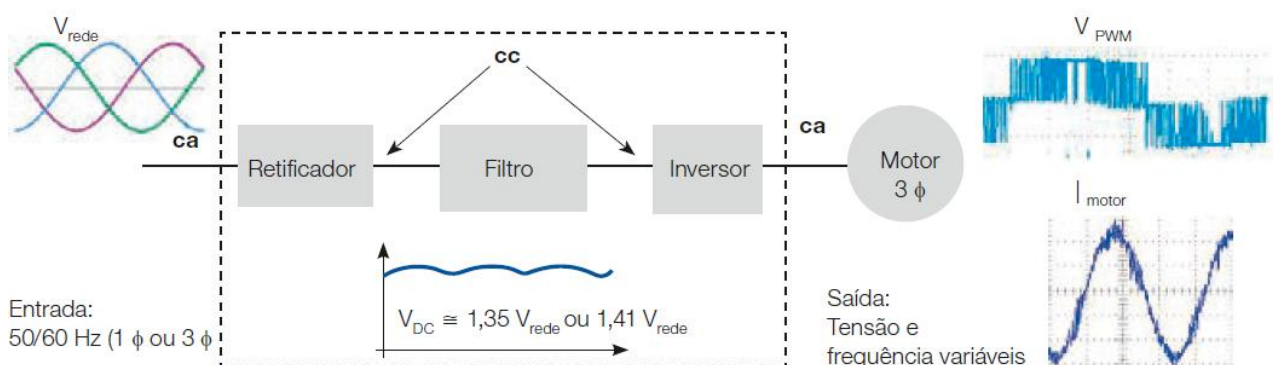
harmônicas geradas por um inversor de frequência por meio de instalação de filtros passivos de saída.

O inversor de frequência é constituído pelos seguintes componentes:

- Retificador: composto por associação de diodos que retificam o sinal de entrada AC para DC;
- Filtro ou Link DC: transformar o sinal DC em um sinal mais contínuo (suaviza o ripple);
- Transistores IGBT: faz a inversão do sinal que vem do link DC para sinal alternado com tensão e frequência variáveis, chamado sinal modulado pela largura de pulso (PWM).

A figura 4 apresenta o diagrama de funcionamento do inversor de frequência acoplado ao motor.

Figura 4 – Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM

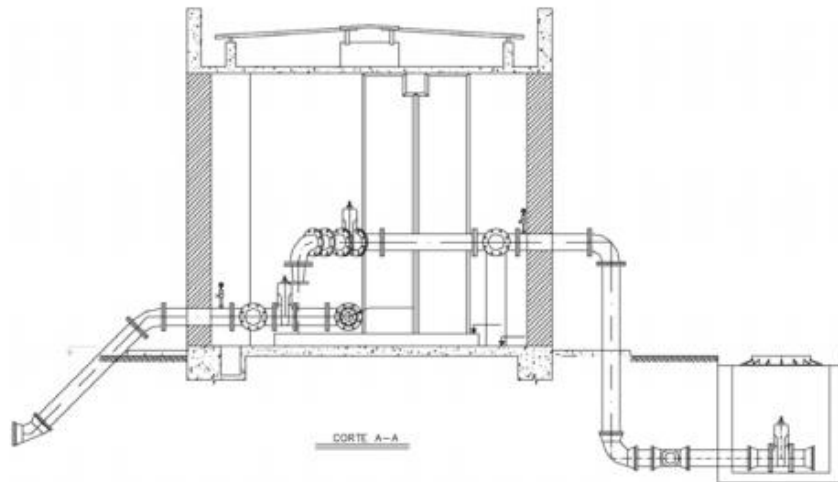


Fonte: WEG (2016)

2.4.6 Booster

A Estação Pressurizadora de Água Tratada (EPAT) ou Booster tem por função realizar o transporte de água para níveis diferentes de altura por meio de tubulações de sucção e de recalque, podendo ser utilizado então em substituição aos reservatórios elevados. Dentre os principais componentes que constituem um Booster pode-se citar a bomba centrífuga, motor elétrico, válvulas, curvas, joelhos, inversor de frequência, painel de comando, painel de controle automático de pressão, etc. A figura 5 apresenta a ilustração esquemática de uma instalação típica do tipo Booster.

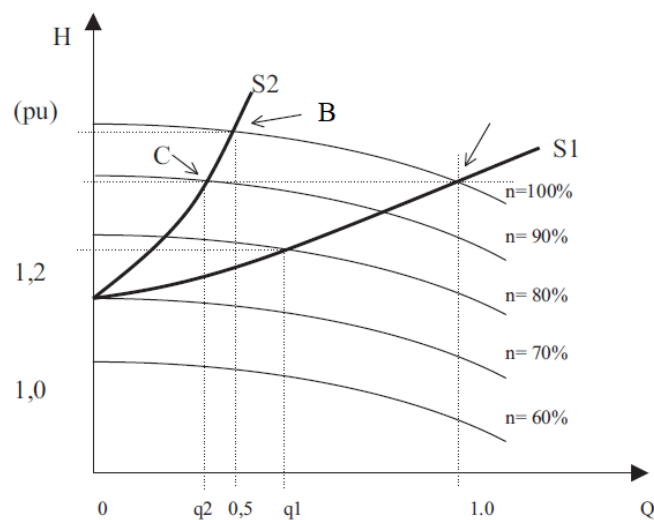
Figura 5 – Corte de uma instalação típica tipo booster



Fonte: Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro. (ELETROBRÁS, 2005)

Quando se varia a rotação de uma bomba centrífuga a pressão (H) e a vazão (Q) irão variar de acordo com a variação de velocidade e de acordo com a perda de carga ou resistência da tubulação da linha de saída. Na Figura 6 tem-se duas curvas de sistema $S1$ e $S2$, com a representação da variação de H e Q na bomba para diferentes velocidades de operação. A curva $S1$ representa a condição normal do sistema sem ocorrência de fechamento de válvulas. A curva $S2$ considera abertura e fechamento de válvulas ou estrangulamento da tubulação. Os valores de H e Q são definidos pela intersecção das curvas da bomba com a curva do sistema (YASKAWA, 2021).

Figura 6 – Variação de H e Q na bomba para diferentes velocidades de operação



Fonte: YASKAWA (2021)

Um sistema de abastecimento de água frequentemente a tubulação é submetida a estrangulamentos e alterações de vazão, devido a abertura e fechamento de válvulas. Neste sentido existem então várias curvas entre S1 e S2 que variam conforme a vazão diária do sistema. Assim, por exemplo, quando ocorre um fechamento de válvula na tubulação a curva do sistema S1 passa a ser a curva S2 a vazão cai de 1,0 para 0,5 e a pressão se eleva para 1,2, podendo ocasionar danos a instalação (YASKAWA, 2021). Com a atuação do inversor ocorre a alteração da curva da bomba mantendo-se constante a curva do sistema, o que permite reduzir o consumo de energia do sistema, visto que a potência mecânica disponibilizada na saída do motor não será constante, mas variará de acordo com a exigência da carga.

Pelas Leis de Semelhança as Equações 14, 15 e 16 permitem verificar o efeito da variação da rotação na vazão e potência da bomba. De modo que sendo a vazão diretamente proporcional a rotação, e a potência diretamente proporcional a rotação elevada ao cubo, tem-se uma redução na potência consumida de acordo com a redução da vazão (RODRIGUES, 2007).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (14)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (15)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (16)$$

Onde:

Q_2 e Q_1 é a vazão obtida com a nova rotação e vazão antiga, respectivamente (m^3/s);

H_2 e H_1 , a carga obtida com a nova rotação e carga antiga, respectivamente (m);

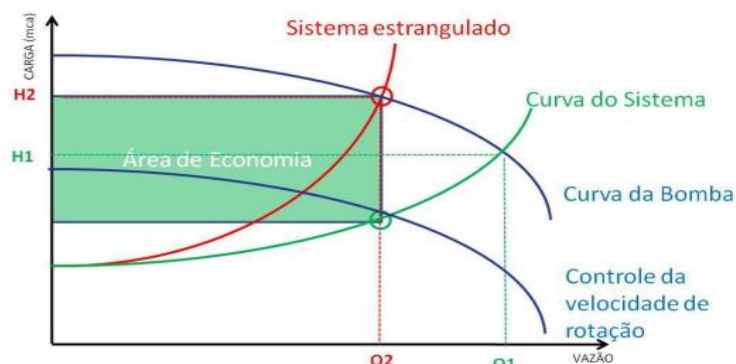
N_2 e N_1 , a nova rotação e rotação antiga (rpm);

P_2 , a potência absorvida com a nova rotação (W); e

P_1 , a potência absorvida nas condições iniciais (Q_1 , H_1 e N_1).

Comparando-se então os efeitos da utilização do inversor de frequência e das válvulas de estrangulamento, pode-se observar que, pelo método de estrangulamento, o ponto de operação movimenta-se sobre a curva da bomba, conforme demonstra a Figura 7.

Figura 7 – Curva do sistema com controle de velocidade



Fonte – Pedrosa (2015)

Analisando as curvas da Figura 7, para vazões menores tem-se maiores pressões de recalque, o que aumenta o esforço do conjunto motor-bomba. Em contrapartida, com o controle de velocidade de rotação do motor, o ponto de operação passa a se deslocar sobre a curva do sistema. Assim, para vazões menores, obtêm-se menores pressões de recalque (PEDROSA, 2015).

2.5 Projeção do consumo de energia

O Sistema Interligado Nacional (SIN) disponibiliza anualmente O Planejamento Anual da Operação Energética 2020-2024 do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) com projeções do consumo e da carga. Na Tabela 5 é possível verificar a evolução do consumo de eletricidade por classe em 2019 e 2020.

Tabela 5 – Consumo de energia elétrica 2019-2020 por classe de consumo (GWh)

Classe	2019	2020		2020	
		Rev.Extraordinária 2020-2024	Δ%	2ªRQ 2020-2024	Δ%
Residencial	141.392	139.478	-1,4%	139.478	-1,4%
Industrial	167.541	161.789	-3,4%	161.789	-3,4%
Comercial	91.545	85.157	-7,0%	85.157	-7,0%
Outros	78.875	79.952	1,4%	79.952	1,4%
Total	479.353	466.375	-2,7%	466.375	-2,7%

Notas: (1) Previsão para o Planejamento Anual da Operação Energética 2020-2024.

(2) Previsão atual apresentada nesta nota técnica para a 1ª Revisão Quadrimestral de 2020.

Fonte: 2ª Revisão Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica do SIN 2020-2024 (2020)

Conforme apresentado na Tabela 5, entre o consumo total de energia elétrica consumido em 2019 e o consumido em 2020 houve uma queda de 4,1%. Isso porque o ano de 2019 foi um ano mais quente. Além disso, em março de 2020, entraram em vigor as medidas de isolamento social direcionando a população para um quadro de quarentena.

Com o menor dinamismo nos setores produtivos, o uso de energia elétrica, comparativamente ao ano de 2019, reduziu-se acentuadamente (SIN, 2020).

No período entre 2020 e 2024, a projeção do consumo de energia elétrica do SIN resultou em um crescimento à taxa de 3,8% anuais, conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6 – Projeção do consumo de energia elétrica na rede (GWh), 2020-2024

CONSUMO	2020	2021	2022	2023	2024	Δ% ao ano
TOTAL	466.375	484.522	503.324	521.811	540.777	3,8%
<i>Projeção por classe de consumo</i>						
Residencial	139.478	144.849	150.822	156.822	162.955	4,0%
Industrial	161.789	167.945	173.529	178.469	183.342	3,2%
Comercial	85.157	88.470	92.103	95.895	99.895	4,1%
Outras classes	79.952	83.259	86.870	90.626	94.586	4,3%
<i>Projeção por subsistema interligado</i>						
Norte	33.932	35.721	37.307	38.490	39.996	4,2%
Nordeste	73.842	77.359	80.799	84.267	87.891	4,5%
Sudeste/CO	272.017	281.886	292.261	302.722	313.021	3,6%
Sul	86.584	89.557	92.957	96.333	99.869	3,6%

Fonte: EPE/ONS/CCEE (SIN, 2020)

Os efeitos da pandemia em 2020 propiciaram um alto grau de incerteza para as previsões de carga nas projeções do ciclo de Planejamento 2020-2024. Desta forma, observa-se a relação direta entre a duração da política de isolamento social e o nível de atividade mensal dos setores produtivos, estando a projeção de consumo e carga vinculada a duração e cumprimento do período de quarentena.

A representatividade dos custos com energia se posiciona atualmente entre as principais despesas das empresas de saneamento, chegando a representar até 30% dessas despesas operacionais (SNSA, 2018). As estações de tratamento de água e esgoto e as máquinas de bombeamento são os principais focos de consumo de energia.

A informação do consumo energético e dos respectivos gastos dos prestadores de serviço é recolhida e processada pelo Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento - SNIS. O SNIS possui ferramentas de monitoramento e diagnóstico da prestação dos serviços públicos. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, em 2019, o Índice de perdas na distribuição (IN049) no Brasil foi de 39,2%, conforme Tabela 7. Esse é o percentual do volume de água disponibilizado que não foi contabilizado como volume utilizado pelos consumidores, seja por vazamentos, falhas nos sistemas de medição ou ligações clandestinas. Goiânia/GO teve 21,7% de perdas, percentual menor que a média nacional (39,2%).

Tabela 7 – Índice de perdas na distribuição

Macrorregião	Tipo de prestador de serviços					Total
	Regional	Micror-regional	Local Direito Público	Local Direito Privado	Local Empresa privada	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Norte	55,7	30,6	35,2	-	69,8	55,2
Nordeste	46,5	-	39,2	13,0	55,1	45,7
Sudeste	36,3	21,8	37,1	29,8	32,4	36,1
Sul	38,2	23,4	35,4	44,2	34,1	37,5
Centro-Oeste	31,7	36,4	39,2	-	39,0	34,4
Brasil	39,6	23,4	37,1	30,9	46,4	39,2

Notas: a) As macrorregiões Norte e Centro-Oeste não têm prestadores de serviços de abrangência Local – Direito privado e a macrorregião Nordeste não tem prestadores de serviços de abrangência Microrregional.

b) Existem apenas oito prestadores de serviços de abrangência Microrregional, sendo três no Sudeste (que cobrem 10 municípios), dois no Sul (5 municípios), um no Centro-Oeste (2 municípios) e dois no Norte (39 municípios).

c) Existem apenas 16 prestadores de serviços de abrangência Local Direito Privado, sendo três no Nordeste, sete no Sudeste e seis no Sul.

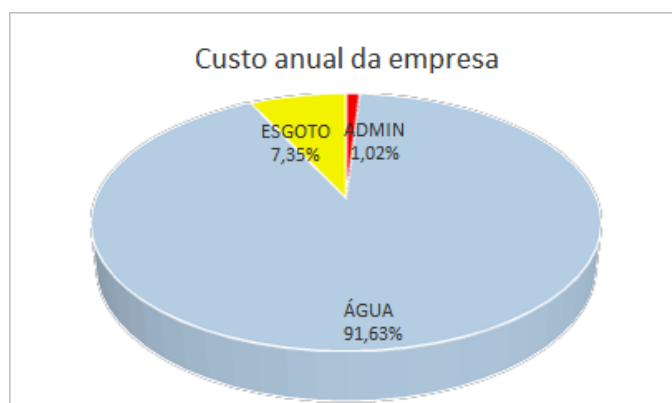
Fonte: EPE/ONS/CCEE (SIN, 2020)

Uma vez que praticamente toda a água captada, tratada ou distribuída sofre bombeamento, a ocorrência de perda de água também contribui para o aumento do desperdício de energia elétrica. Neste sentido, há uma associação direta entre perdas de água e de energia, expressa pelo indicador kWh/m³.

2.6 Consumo de energia elétrica na SANEAGO

Na figura 8 é representada uma análise comparativa dos custos anual com energia elétrica do ano de 2020 pelos setores de água, esgoto e administrativos da SANEAGO. Desta forma é possível observar que 92% da despesa com energia elétrica é do setor de água: captação, tratamento e distribuição.

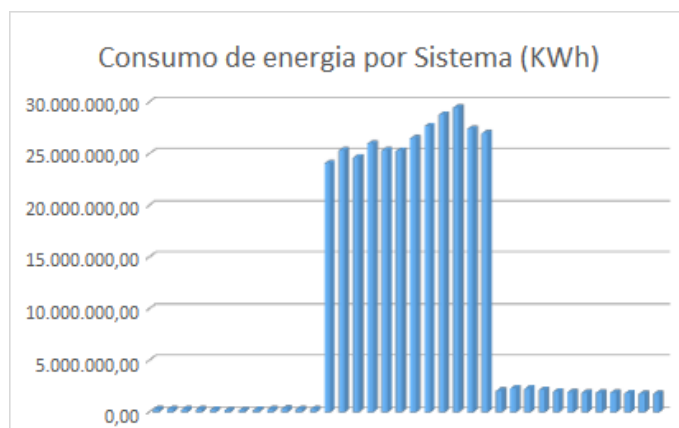
Figura 8 – Representação dos custos anual com energia elétrica da SANEAGO



Fonte: Adaptado de P-SEM SANEAGO (2021)

Na Figura 9 é apresentada a representatividade do consumo de energia elétrica em kWh por setor. Neste sentido, pode-se observar que o consumo de energia elétrica do setor de água teve uma média mensal de 26 milhões kWh ao longo do ano de 2020.

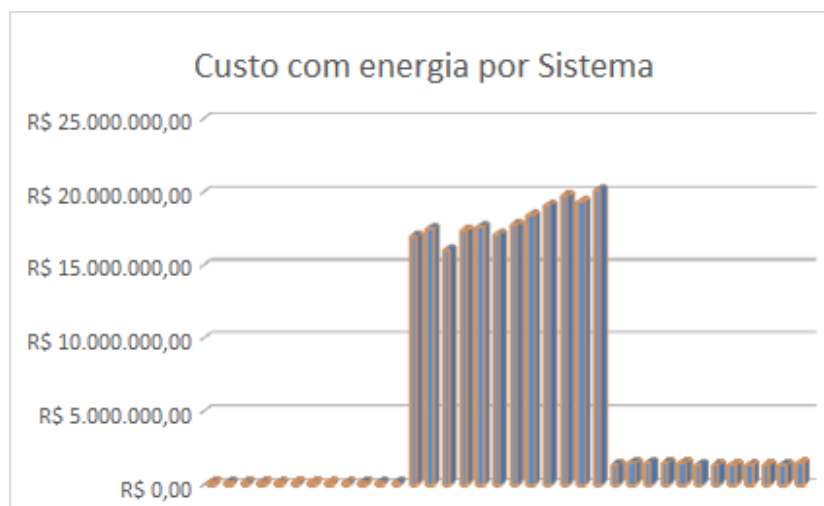
Figura 9 - Consumo de energia em 2020



Fonte: Adaptado de P-SEM SANEAGO (2021)

Para todo consumo há um custo. Na Figura 10 é apresentado o custo mensal gasto com o consumo da energia elétrica pela empresa, sendo o valor de 18 milhões de reais o valor médio gasto por mês pelo setor de água.

Figura 10 - Custo com energia em 2020



Fonte: Adaptado de P-SEM SANEAGO (2021)

Neste sentido é importante salientar a importância de buscar formas de otimização do uso de energia elétrica sem que os processos de produção e distribuição de água sejam afetados. Essas medidas não são importantes somente para reduzir as perdas e despesas da empresa mas para também contribuir com a redução da demanda mundial por energia elétrica cujo aumento do consumo agride severamente o meio ambiente cada vez mais.

3 AÇÕES PARA PROMOÇÃO DA EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE SANEAMENTO

O consumo de energia elétrica cresce com o aumento da produção industrial e por isso torna-se necessário investir em ações que promovam a eficiência hidráulica e energética no mundo de modo a amenizar às recentes crises energéticas no Brasil. No Brasil, as empresas de saneamento têm como maior custo operacional o consumo com energia elétrica, devido ao sistema de distribuição de água apresentar perdas por vazamentos, bombas mal dimensionadas, ou até mesmo pelo enquadramento em estruturas tarifárias menos vantajosas economicamente.

Pressões excessivas ou variações abruptas podem causar perdas de água na rede de distribuição, o que ocasiona um consumo de água e energia elétrica além do previsto. Para melhorar a eficiência em sistemas de abastecimento de água pode-se adotar medidas de redução da energia consumida e de otimização do comportamento hidráulico no sistema. Neste sentido, o desempenho energético no sistema de bombeamento depende de condições operativas como (ELETROBRÁS, 2005):

- Utilizar tubulações com diâmetros bem dimensionados;
- Manter a tubulação em bom estado de conservação quanto à rugosidade interna;
- Reduzir perda de rendimento de motores por operação indevida (sobrecarga, excesso de partidas, etc.);
- Evitar queda de rendimento das bombas por operação fora do ponto de operação;
- Verificar a redução no diâmetro útil das tubulações por incrustações;
- Monitorar periodicamente a ocorrência de vazamentos visíveis e não visíveis;
- Usar conjuntos motobomba bem dimensionados e de alto rendimento;
- Automatizar o sistema para monitoramento e comando remoto;
- Reduzir a perda de carga das tubulações (redução de incrustações em adutoras);
- Dimensionar corretamente a capacidade dos reservatórios;
- Evitar variação de vazão de conjuntos motobomba por registros de estrangulamento com acionamento por inversores de frequência.

3.1 Utilização de inversores de frequência no acionamento de conjuntos motor-bomba para controle da vazão de bombeamento

O motor elétrico trifásico de indução é largamente utilizado nos processos industriais por ser mais robusto. É possível integrar o inversor de frequência para operar no controle da vazão e pressão nas tubulações, substituindo então as válvulas convencionais. Bem como, controlar a partida e desligamento do motor, para racionalizar o uso de energia elétrica (GOMES, 2012).

A velocidade dos motores de indução é proporcional à frequência das tensões e da corrente de entrada. Com o acionamento eletrônico é possível controlar essa velocidade e bem como a vazão em processos de bombeamento. Desta forma, o inversor de frequência permite um acionamento com velocidade variável, com controle da tensão e da frequência de alimentação dos motores. Com a evolução tecnológica a indústria ganhou além dos conversores de frequência com controle escalar (controle da relação tensão/frequência) e chaveamento PWM (modulação por largura de pulso), a vinda do modelo de controle vetorial, o que permite o controle de tensão e frequência independente.

O inversor permite manter o rendimento do motor na condição normal de carga ou o mais próximo dela conforme as diversas solicitações da carga de acionamento. Desta forma a economia de energia acontece em função da redução da potência de entrada e do tempo de funcionamento do sistema (GOMES, 2012).

3.2 O uso de painéis fotovoltaicos para sistema de bombeamento

Dentre outras técnicas utilizadas para a redução de consumo de energia elétrica tem-se a energia solar fotovoltaica, fonte alternativa de energia, que pode ser usada para alimentar o sistema de bombeamento. Essa técnica é mais viável ainda em regiões onde há ausência de energia elétrica, bem como em localidades que possuem características favoráveis para instalação de painéis fotovoltaicos. Além disso, a energia solar é uma fonte limpa, abundante e sem emissão de gases poluentes, o que contribui para a preservação do meio ambiente (MICHELS, 2007).

Com a energia solar a radiação do sol ao ser captada pelo sistema fotovoltaico é convertida em energia elétrica. O efeito fotovoltaico ocorre devido a diferença de potencial presente nos extremos de um material semicondutor com a absorção da luz. A irradiação solar depende de fatores espaço para instalação dos módulos, fatores como radiação global, disponibilidade de sol, sombra, inclinação dos módulos, dentre outros.

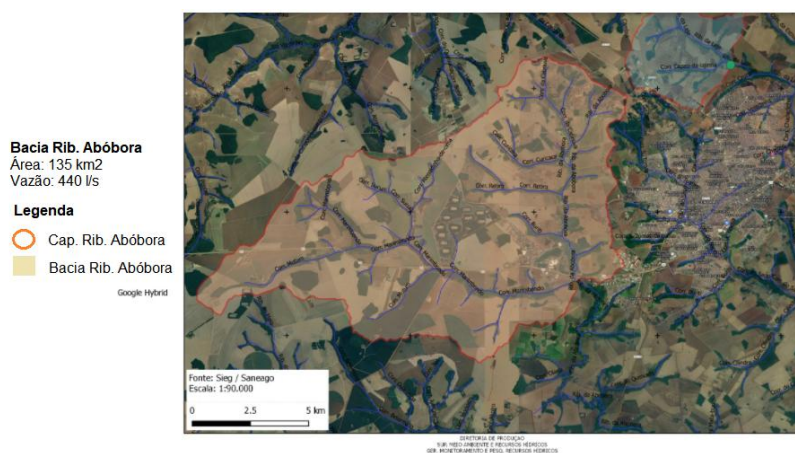
O dimensionamento dessa solução conta com definição da vazão necessária para atendimento da população, quantidade de placas solares, característica da bomba. Para o cálculo da vazão deve ser analisada a taxa de crescimento da população, o regime de abastecimento em horas por dia, bem como o regime de produção, coeficientes de consumo, projeção populacional futura, dentre outros. A quantidade de módulos necessários para implantar o sistema fotovoltaico é em função da potência necessária para alimentar a bomba.

3.3 Estudo de caso: sistema de eficiência energética através da implantação de inversores de frequência no Booster Rio Verde

O projeto “Sistema de eficiência energética através do uso de inversores de frequência no booster Rio Verde” foi selecionado na chamada pública PEE CELG D nº 001/2015 e implantado em 2017. Esta Ação de Eficiência Energética (AEE) objetivou a instalação de inversores de frequência no Booster de Rio Verde para equalizar a vazão de água bruta da captação com a vazão de água bruta da estação. Como o nível da torre de equalização de carga deve ser mantido constante, ocorre o estrangulamento frequente do fluxo nas tubulações e consequentemente o aumento de perdas de carga hidráulica, razão da viabilidade do projeto. Desta forma, o controle da vazão do Booster será feito pelos inversores de frequência.

O Booster Rio Verde caracteriza-se por ser uma unidade intermediária de recalque de água bruta do sistema de abastecimento da cidade de Rio Verde. A unidade representa a totalidade da água fornecida pelo sistema Abóbora, conforme bacia hidrográfica do rio Abóbora mostrado na Figura 11, responsável por 70 % da água fornecida à cidade de Rio Verde, cuja população é de aproximadamente de 241 mil habitantes.

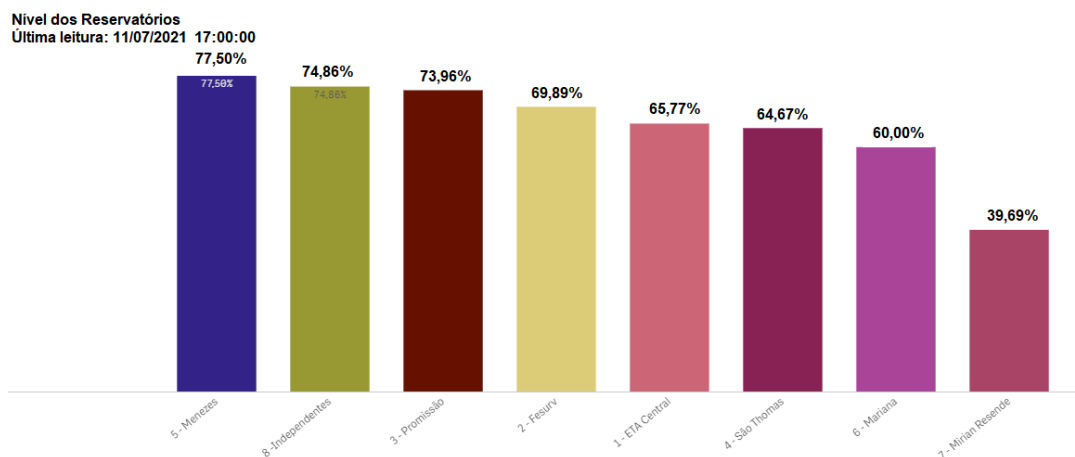
Figura 11 – Bacia Hidrográfica do rio Abóbora



Fonte: Sieg/ SANEAGO (2021)

Dentre outras medidas para otimização da operação dos sistemas de bombeamento, a SANEAGO implantou em 2018 a Rede de Monitoramento Hidrológico da SANEAGO (RMHS) que monitora em tempo real as vazões do nível das barragens e dos reservatórios, conforme apresentado pela Figura 12.

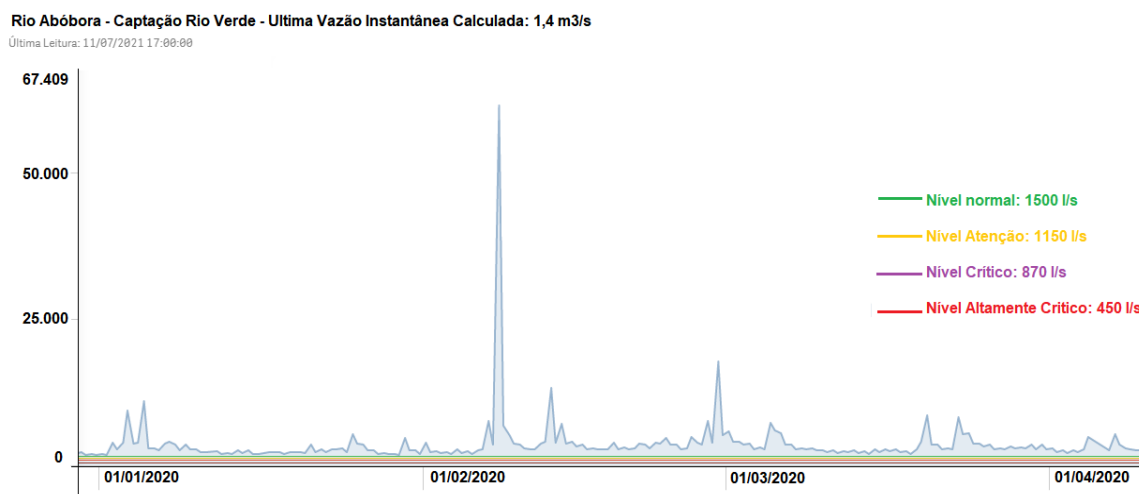
Figura 12 – Monitoramento das vazões nos Reservatórios



Fonte: Rede de Monitoramento Hidrológico da SANEAGO (2021)

A RMHS tem estações de monitoramento telemétrico com coleta de dados automatizada, por sensores ultrassônicos instalados nos mananciais, e pluviômetro de báscula para monitoramento da chuva, sendo que o envio de dados é realizado por telemetria. A Figura 13 apresenta o monitoramento das vazões da captação Rio Verde conforme a variação dos níveis em l/s, a saber: altamente crítico (400 l/s), crítico (870 l/s), atenção (1150 l/s) e normal (1500 l/s).

Figura 13 – Monitoramento das vazões da Captação Rio Verde



Fonte: Adaptado da RMHS (2021)

3.3.1 Booster Rio Verde

A unidade consumidora Booster Rio Verde possui as seguintes características no sistema motriz:

- Os motores são a principal carga do Booster, representando quase totalidade de consumo de energia da unidade;
- O sistema é composto por 3 motores trifásicos de 500 cv, 440 V;
- Dois motores atuam de forma contínua na maior parte do dia e uma unidade é reserva;

O subsistema de água bruta do sistema de abastecimento de água de Rio verde é composto por captação, conforme demonstrado na Figura 14, elevatória de água bruta, adutora de água bruta, torre de carga e o booster, mostrado pela Figura 15.

Figura 14 – Captação abóbora do Booster Rio Verde



Figura 15 – Motores Booster Rio Verde



Fonte: DINIZ (2016)

A unidade apresenta pequena variação na curva de demanda, pois os motores representam quase totalidade do consumo de energia. A demanda média da unidade pode ser determinada em função da quantidade de motores em funcionamento, conforme apresentado pela Tabela 8.

Tabela 8 – Demanda média do Booster Rio Verde

Quantidade de Motores ligados	Demanda Média (kW)
0	6,8
2	729,5

Fonte: DINIZ (2016)

A fim de que a água na torre de carga não seque ou extravase, a vazão de água bruta do Booster Abóbora e a vazão de água bruta da captação Abóbora devem ser equalizadas. A Figura 16 apresenta uma foto da tubulação de recalque do Booster Rio Verde.

Figura 16 – Tubulação de recalque do Booster Rio Verde



Fonte: DINIZ (2016)

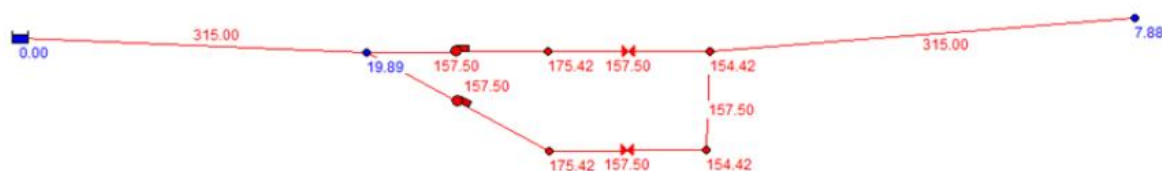
Antes da instalação dos inversores a equalização era realizada por meio do estrangulamento do registro de recalque da água bruta do booster, acarretando aumento da perda de carga e energia no ponto, além do aumento do custo de manutenção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a implementação do projeto foi realizado o levantamento de parâmetros hidráulicos como pressão de sucção (mca) de cada bomba; pressão de recalque (mca) na saída de cada bomba; pressão à jusante (mca) de cada válvula de controle; vazão de adução (l/s); potências elétricas (kW) de cada conjunto motor-bomba e potência elétrica total da instalação da unidade Booster. Com estes dados utilizou-se o software EPANET, que permite simular o comportamento hidráulico em sistemas de abastecimento de água, para calcular a perda de carga localizada nas válvulas de controle de vazão devido ao estrangulamento hidráulico e determinar qual seria a redução de potência elétrica com a implementação dos inversores de frequência para controle da vazão (DINIZ, 2016).

Conforme o diagnóstico energético feito pela Tecnia engenharia antes da implementação do projeto, o método de estrangulamento na válvula de controle provocava uma perda de carga localizada de 21 mca (DINIZ, 2016). A Figura 17 apresenta a simulação realizada no software Epanet para as condições de carga do sistema sem a instalação dos inversores de frequência.

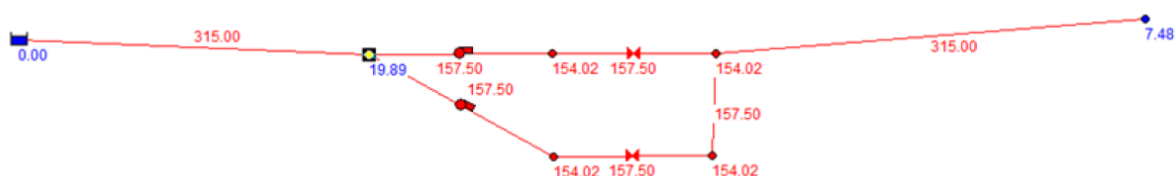
Figura 17 - Simulação da rede sem os inversores



Fonte: DINIZ (2016)

A Figura 18 apresenta a condição de carga do sistema considerando a instalação do inversor de frequência e por sua vez a eliminação do estrangulamento de fluxo na tubulação.

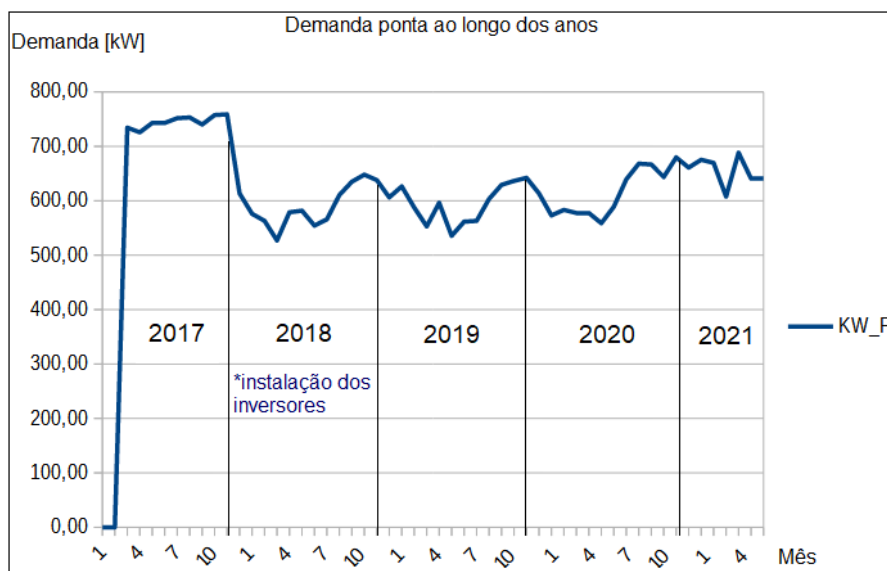
Figura 18 - Simulação da rede com os inversores instalados



Fonte: DINIZ (2016)

A demanda contratada para o Booster no horário de ponta e fora de ponta era de 770 Kw no ano de 2017, com tensão de 13,8 kV, e subgrupo tarifário A4, antes da implementação dos inversores de frequência. A Figura 19 apresenta o histórico do consumo de energia elétrica do Booster ao longo dos anos de 2017 a 2021.

Figura 19 – Demanda de ponta de 2017 a 2021 do Booster



Fonte: Adaptado de P-SEM SANEAGO (2021)

Pela Figura 19 observa-se que no ano de 2017 a demanda média do Booster era de 705,10 kW. Com a operação dos inversores de frequência junto dos conjuntos moto-bomba no início de 2018, foi obtida uma redução pela demanda de energia elétrica nos anos de 2018 a 2021. Pelo gráfico é possível ver ainda que ocorre uma variação da curva de carga de acordo com o comportamento de consumo de energia elétrica pelo Booster ao longo dos meses, porém, a demanda mantém-se abaixo de 700 kW.

Após a redução significativa da demanda do Booster foi realizada uma alteração da demanda contratada junto a Celg (Atual Enel) de 770 kW para 580 kW em 2018.

A Tabela 9 apresenta os dados quantitativos de demanda e consumo de energia elétrica do sistema Booster antes e após a implementação do projeto. Ao que se pode observar a demanda média utilizada era de 705,10 kW e após a instalação dos inversores passou a ser de 540,20 kW.

Tabela 9 – Dados do sistema Booster antes do projeto

Sistema antes do projeto		
	Valores	Unidade
Potência dos motores	735,49	kW
Potência contratada	770,00	kW
Demanda média utilizada	705,10	kW
Consumo anual	5399,00	Mwh/ano
Consumo	0,642	kwh/m3
Rendimento nominal	96,30%	-
Sistema após os inversores		
	Valores	Unidade
Demanda média utilizada	540,20	kW
Consumo anual	4048,90	Mwh/ano
Consumo	0,485	kwh/m3
Rendimento nominal	93,40%	-

Fonte – Adaptado de Júnior (2019)

Com a instalação dos inversores de frequência esperava-se a redução de demanda na ponta de 70,47 kW, o que representaria uma redução de 11,08% no consumo de energia e um valor aproximado de R\$ 186,000,00 anual de economia para a SANEAGO (Diniz, 2016). Após a análise de eficiência energética do sistema com os inversores, a demanda reduzida na ponta foi de 164,90 kW equivalente a um percentual de redução de 23,39% para a demanda de energia elétrica e 25% para o consumo. A redução com o consumo de energia elétrica resultou para o Booster Abóbora uma economia anual de R\$ 705,505.08, conforme apresentado na Tabela 10. Sendo o custo para aquisição dos equipamentos e execução da instalação dos inversores o valor de R\$ 629,318.67. Estimou-se 10 meses para o retorno do valor investido na implantação dos inversores no Booster.

Tabela 10 – Resultados após instalação dos inversores

Resultados			
	Valores	Unidade	Percentual de redução
Demanda reduzida na ponta	164,90	kW	23,39%
Consumo reduzido	1350,10	Mwh/ano	25%
Custo reduzido mensal	R\$ 58.959,59	-	-
Custo anual reduzido	R\$ 705.505,08	-	-
Custo do projeto	R\$ 629.318,67	-	-
Payback (simples)	10 meses	-	-

Fonte – Adaptado de Júnior (2019)

É interessante ressaltar que ainda que o rendimento do sistema tenha sido reduzido para 93,4% devido as perdas de 3% do inversor de frequência, os resultados encontrados mostram que as ações operacionais de gestão de energia implantadas são capazes de

reduzir significativamente as despesas energéticas em empresas de saneamento. Uma vez que, após as melhorias realizadas, houve uma redução de consumo de energia elétrica de 25%. A Figura 20 apresenta o sistema Booster com os inversores e motores de alto rendimento instalados.

Figura 20 – Booster com inversores de frequência



Fonte – Júnior (2019)

Ao longo deste trabalho foi visto que em sistemas com controle de vazão por meio de válvulas, o deslocamento do ponto de operação (intersecção da curva da bomba com a curva do sistema) através do aumento da perda de carga ocorre progressivamente sobre a curva da bomba até se encontrar o ponto desejado para uma determinada vazão com a bomba operando com rotação constante. A ação de regulagem da válvula aumenta a perda de carga local e eleva a carga a montante da válvula de controle. Isso pode comprometer a vida útil das tubulações e válvulas devido ao surgimento de vibrações excedentes.

Com a ação do inversor de frequência o conjunto motobomba passa a acelerar ou desacelerar, de acordo com a parametrização da rampa, de forma lenta e continua. Isso permite o desaparecimento das perturbações geradas pelos transitórios. As ações de acionamento e parada com o inversor reduzem o “stress” no motor, bomba e acoplamento, aumentando a vida útil da bomba, mancais e vedações pela diminuição do desgaste mecânico, redução do nível de ruído, vibração e efeitos de cavitação. Assim, a aplicação de solução de eficiência energética no sistema de bombeamento de água por meio do uso de inversores permitiu alcançar não somente a otimização do consumo de energia elétrica, mas também do sistema hidráulico.

5 CONCLUSÃO

Para qualificar o abastecimento público de água, além dos investimentos em obras de ampliações, são necessários investimentos que otimizem a operação dos sistemas. Programa de perdas requer ações paralelamente implantadas de forma contínua e permanente, com destaque para as seguintes ações: monitoramento permanente de pressões, controle efetivo dos volumes de entrada de água nos setores de abastecimento, válvulas de controle/redutoras de pressão, bombas com inversores de frequência, investimentos em micromedição e macromedição e sistemas informatizados em tempo real (telemetria e telecomando).

As tubulações são constantemente submetidas a estrangulamentos e alterações de vazão, ocasionados pela abertura e fechamento sazonais de válvulas. Isso porque a válvula estrangulada acarreta uma perda de carga localizada adicional a jusante da bomba, alterando a curva do sistema. A válvula reduz a vazão restringindo a área de passagem do fluido e a bomba continua trabalhando em rotação nominal e consumindo potência nominal, sendo que a válvula se encarregará de dissipar a energia excedente.

Com o uso de inversores de frequência ao variar a rotação da bomba a potência absorvida pelo motor reduz aproximadamente ao cubo, o que representa uma redução considerável no consumo de energia elétrica na medida em que a rotação diminui. Desta forma, os inversores de frequência proporcionaram ao sistema Booster economia de energia elétrica, redução de desgastes na bomba e na tubulação por meio de partidas e paradas suaves, redução da perda de carga do sistema com a eliminação da válvula de estrangulamento e aumento da capacidade do reservatório para evitar bombeamento no horário de ponta por meio da automatização do sistema e do controle de fluxo e de pressão.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5626. Instalação predial de água fria. Rio de Janeiro. 1998.

CHAPMAN, S.J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. Ed. Porto Alegre. 2013.

COELHO, B.C. Estudo de operação do controle por variação de velocidade em motores de indução trifásicos em estações elevatórias de água tipo “booster” operando através de inversores de frequência. Monografia. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2020.

DINIZ, L.C. Diagnóstico energético sistema de eficiência energética através do uso de inversores de frequência no booster rio verde. Tecnia Engenharia. Belo Horizonte. 2016.

ELETROBRÁS. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro. 2005.

FILHO, E. G. B. Sistema Inteligente para o Controle de Pressão de Redes de Distribuição de Águas Abastecidas por Bombas Associadas em Paralelo. Tese Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. João Pessoa, Paraíba. 2016.

FIOCRUZ. Manual de Saneamento. Fundação Nacional de Saúde. 2019.

GOMES, H. P; CARVALHO, P. S. O. Manual de sistema de bombeamento – Eficiência energética. Universidade Federal de João Pessoa. João Pessoa. 2012.

JÚNIOR, A. A. S; DINIZ, L. C. Sistema de eficiência energética através do uso de inversores de frequência no Booster Rio Verde. Enel Distribuição Goiás. Goiás. 2019.

JÚNIOR, O. Q; JÚNIOR, A. A. S; SILVA, A. A. R; CHAVES, R. C. P; JÚNIOR, W. J. M. Programa de eficiência energética – PEE: Estudo de caso Booster Rio Verde. Congresso ABES. Natal, Rio Grande do Norte. 2019.

MICHELS, R.N. Avaliação de um sistema de bombeamento de água alimentado por painéis fotovoltaicos. 2007. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel. 2007.

NETTO, A., FERNANDEZ, M.F., ARAUJO, R., ITO, A. E. Manual de hidráulica. 8º Ed., Blucher. 1998.

PORTO, R.M. Hidráulica Básica. 4 ed. São Carlos. Editora EESC-USP. 2006.

PROCEL. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro. 2005.

P-SEM/SANEAGO. Histórico de Consumo Energético Booster Rio Verde. Goiás. 2021.

Relatório de Sustentabilidade - SANEAGO. Goiânia, Goiás. 2020.

RODRIGUES, W. Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo. 2007.

SALVINO, L. R. Eficiência energética em sistemas pressurizados de distribuição de água com o uso de redes neurais artificiais. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. João Pessoa, Paraíba. 2018.

SILVA, F.B. O Sistema de Abastecimento d'água da Cidade de Santa Rita – PB. Monografia. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. João Pessoa, Paraíba. 2016.

SIN. 2ª Revisão Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica do SIN 2020-2024. Rio de Janeiro. 2020.

SNSA. Eficiência Energética. Ações de assistência técnica em redução e controle de perdas de água e uso eficiente de energia elétrica. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. 2018.

TISUTIYA, M. T. Abastecimento de água. 3 Ed. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária Escola politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.

TRATA BRASIL. A origem do saneamento básico. 2020. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/blog/2020/01/07/a-origem-do-saneamento-basico/>. Acesso em: abril de 2021.

UMANS, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre. 2014.

WEG. Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. 2016.

YASKAWA. Economia de energia em máquinas de fluxo. Disponível em: <http://www.yaskawa.com.br/wp-content/uploads/2013/07/Economia-de-Energia.pdf>. Acesso em julho de 2021.



**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS

Documento Digitalizado Público

Versão Final TCC

Assunto: Versão Final TCC
Assinado por: Gracielly Prado
Tipo do Documento: Documentos
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Público
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Gracielly Silva Prado, AUX EM ADMINISTRACAO**, em 06/04/2022 10:31:15.

Este documento foi armazenado no SUAP em 06/04/2022. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 267054

Código de Autenticação: 85c8ce4e37

