

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA - CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JÚLIO CÉSAR DA SILVA BREDA

**IMPACTO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO SEM MANUTENÇÃO:
ESTUDO DE CASO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SÃO CARLOS
2025

JÚLIO CÉSAR DA SILVA BREDA

**IMPACTO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO SEM MANUTENÇÃO:
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Amilcar Flamarion Querubini
Gonçalves

SÃO CARLOS
2025

DEDICATÓRIA

A todos que acreditaram em mim mesmo
quando eu duvidei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força e saúde concedidas ao longo da minha vida. Aos meus pais, Andreia e Mário César, pela base sólida de apoio, incentivo incondicional e confiança durante toda esta jornada. Minha namorada, Isabelly, pelo apoio e por me manter firme durante minhas incertezas.

Aos professores Dr. Amílcar Gonçalves, Dra. Tatiane Fernandes, Dr. Osmar Ogashawara e ao técnico Rafael Visintin, pela orientação, paciência e valiosas contribuições ao longo da minha graduação. Seus ensinamentos foram fundamentais para minha formação acadêmica e profissional.

Aos meus amigos Tales, Mário, Felipe, Arthur, Sábio e Daniel, que caminharam comigo em diferentes etapas da vida, deixando em mim marcas profundas de amizade, companheirismo e crescimento. Cada um, à sua maneira, contribuiu não apenas para minha formação profissional, mas também para quem me tornei como pessoa. Levo comigo os aprendizados, os conselhos, as risadas e os momentos compartilhados com gratidão e carinho. Ao meu amigo Jonathan, agradeço por me ensinar — com bom humor e desafios diários — a expandir meus limites de paciência, resiliência e leveza.

Por fim, agradeço a todos aqueles que fizeram parte da minha trajetória, contribuindo, de alguma forma, para o meu crescimento pessoal e profissional. Suas presenças deixaram marcas que me fortalecem e motivam a seguir em frente na caminhada da vida, enfrentando com coragem os desafios que ela impõe.

Se eu tivesse seis horas para cortar uma árvore, passaria as primeiras quatro afiando o machado. (Atribuído a Abraham Lincoln)

RESUMO

BREDA, J. C. S.. **Impacto na Eficiência Energética em Sistemas de Irrigação sem manutenção:**

Estudo de Caso. 2025. 40p. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São Carlos. SÃO CARLOS, 2025.

A busca por eficiência energética é essencial para a agricultura, uma vez que, a energia elétrica representa um dos principais insumos do setor. O presente trabalho analisa o impacto da ausência de manutenção na eficiência energética de sistemas de irrigação por bombeamento hídrico. A pesquisa se baseia em um estudo de caso realizado em uma propriedade agrícola, onde foram coletados dados sobre consumo de energia, desempenho hidráulico e perdas no sistema. A metodologia envolveu medições de corrente, tensão e pressão, além de cálculos utilizando a equação de Hazen-Williams e a curva de trabalho da bomba. Os resultados mostraram que a falta de manutenção leva a um aumento significativo do consumo de energia e a uma redução na eficiência do sistema. Após uma intervenção parcial, observou-se uma melhora no desempenho da bomba e uma diminuição nos custos operacionais. Conclui-se que a manutenção preventiva é essencial para garantir a eficiência energética e reduzir desperdícios no setor agrícola.

Palavras-chave: Eficiência energética. Irrigação. Manutenção preventiva. Bombeamento hídrico. Consumo de energia.

ABSTRACT

BREDA, J. C. S.. **Impact on Energy Efficiency in Irrigation Systems without Maintenance: A Case Study**. 2025. 40 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São Carlos. SÃO CARLOS, 2025.

The pursuit of energy efficiency is essential in agriculture, as electricity represents one of the sector's main inputs. This study analyzes the impact of the lack of maintenance on the energy efficiency of irrigation systems using water pumping. The research is based on a case study conducted on a farm, where data were collected on energy consumption, hydraulic performance, and system losses. The methodology involved measurements of current, voltage, and pressure, as well as calculations using the Hazen-Williams equation and the pump performance curve. The results showed that the lack of maintenance leads to a significant increase in energy consumption and a reduction in system efficiency. After a partial intervention, an improvement in pump performance and a decrease in operational costs were observed. It is concluded that preventive maintenance is essential to ensure energy efficiency and reduce waste in the agricultural sector.

Keywords: Energy efficiency. Irrigation. Preventive maintenance. Hydraulic pumping. Energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira em 2023	3
Figura 2 – Conjunto Motobomba do Estudo de Caso.	7
Figura 3 – Curva de Trabalho Bomba KSB WKL 125/3. Relações de Altura Monométrica e Eficiência em Função da Vazão.	8
Figura 4 – Curva de Trabalho Bomba KSB WKL 125/3.	8
Figura 5 – Diagrama para Ensaio de Shut-Off.	9
Figura 6 – Curva de Desempenho em Carga Motor Trifásico WEG 280 S/M.	10
Figura 7 – Triângulo de Potência.	17
Figura 8 – Diagrama Tubulações de Sucção e Recalque.	19
Figura 9 – Fluxograma Condição Ideal.	21
Figura 10 – Fluxograma Sem Manutenção e Após Intervenção.	22
Figura 11 – Diagrama de Acessórios na Tubulação.	25
Figura 12 – Curva de Trabalho Bomba KSB com Intersecção de Retas.	30
Figura 13 – Folha de Dados Motor WEG W21.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo Elétrico Setor Irrigante 2014-2023	4
Tabela 2 – Dados de Ensaio Shut-Off.	10
Tabela 3 – Valores do Coeficiente C para a Equação de Hazen-Williams.	15
Tabela 4 – Medições do Sistema em Funcionamento sem Manutenção.	20
Tabela 5 – Medições do Sistema Após Intervenção Parcial.	20
Tabela 6 – Especificação de Funcionamento do Pivô.	23
Tabela 7 – Especificação da Tubulação de Recalque.	23
Tabela 8 – Parâmetros Convertidos para Equação Hazen-Williams.	24
Tabela 9 – Especificação da Tubulação de Sucção.	24
Tabela 10 – Diâmetro de Acessório por Comprimento Equivalente.	25
Tabela 11 – Desnível Recalque e Sucção.	26
Tabela 12 – Comparativo Motor em Condição Ideal, Sem Manutenção e Pós Intervenção.	32
Tabela 13 – Comparativo Bomba em Condição Ideal, Sem Manutenção e Após Intervenção.	32
Tabela 14 – Custo com Energia Elétrica Ativa em Condição Ideal e Sem Manutenção.	34
Tabela 15 – Custo com Energia Elétrica Reativa em Condição Ideal e Sem Manutenção.	35
Tabela 16 – Gastos para Correção Parcial de Estudo de Caso.	36
Tabela 17 – Dados Payback da Intervenção no Estudo de Caso.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
cv	Cavalo-Vapor
FP	Fator de Potência
FS	Fator de Serviço
GWh	Gigawatt-hora
GPS	Global Positioning System
mca	Metro de Coluna d'Água
MME	Ministério de Minas e Energia
MWh	Megawatt-hora
PBE	Plano Brasileiro de Etiquetagem
PNE	Plano Nacional de Energia 2030
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PVC	Policloreto de Vinil
TE	Tarifa de Energia
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Coeficiente de Perda de Carga para Diferentes Condutos.
D	Diâmetro de Conduto, em m .
$DTT\%$	Distorção Harmônica Total de Tensão, em $\%$.
$EEAM_{(p)}$	Montante de Energia Elétrica Ativa Medido em cada Posto Tarifário, em MWh .
$EEAM_T$	Montante de Energia Elétrica Ativa Medida em cada Intervalo "T" de uma Hora, em MWh .
E_{RE}	Valor Correspondente à Energia Elétrica Reativa Excedente, em $R\$$.
FEA_p	Faturamento da Energia Elétrica Ativa, em $R\$$.
F_r	Fator de Potência de Referência.
F_T	Fator de Potência Medida na Unidade Consumidora.
H	Perda de Carga Unitária, em m .
H_g	Desnível Entre Dois Pontos, em m .
H_m	Altura Manométrica Hazen-Williams, em m .
H_o	Altura Manométrica de Operação do Sistema, em m .
H_r	Altura Manométrica de Recalque, em m .
H_s	Altura Manométrica de Sucção, em m .
H_t	Altura Manométrica Total, em m .
I_f	Corrente Elétrica em Funcionamento, em A .
K	Coeficiente que Depende da Geometria da Singularidade e do Número de Reynolds.
L	Comprimento do Conduto, em m .
L_e	Comprimento Equivalente, em m .
L_{eq}	Comprimento Equivalente Total, em m .
L_v	Comprimento Virtual, em m .

n	Ordem de Harmônico.
n_{rotor}	Quantidade de Rotor Presente na Bomba.
P_1	Pressão no Ponto 1, em kgf/m^2 .
P_2	Pressão no Ponto 2, em kgf/m^2 .
P_{ap}	Potência Aparente, em VA .
$P_{ap}(hn)$	Potência Aparente para Harmônico de Ordem n , em VA .
P_{at}	Potência Ativa, em W .
$P_{at}(hn)$	Potência Ativa para Harmônico de Ordem n , em W .
P_{ele}	Potência Elétrica Trifásica, em VA .
P_{ensaio}	Pressão Resultante de Shut-Off, em kgf/cm^2 .
P_{hid}	Potência Hidráulica, em W .
P_{motor}	Potência Útil do Motor, em W .
P_m	Potência Motriz, em W .
P_{re}	Potência Reativa, em Var .
P_{rotor}	Pressão Entregue por Rotor, kgf/cm^2 .
p	Posto Tarifário, Ponta ou Fora Ponta.
Q	Vazão, em m^3/s .
Q_o	Vazão de Operação do Sistema, em m^3/s .
T	Ciclo de uma Hora.
V_t	Tensão de Funcionamento, em V .
$TE_{COMP(p)}$	Tarifa de Energia das Tarifas de Fornecimento, em $R\$/MWh$.
U	Velocidade Média de uma Seção, em m/s^2 .
U_1	Velocidade Média de Escoamento no Ponto 1, em m/s^2 .
U_2	Velocidade Média de Escoamento no Ponto 2, em m/s^2 .
VR_{ERE}	Valor de Referência Equivalente à Tarifa de Energia TE , em $R\$/MWh$.
Z	Carga de Posição, em m .

Z_1	Nível no Ponto 1, em m .
Z_2	Nível no Ponto 2, em m .
$\Delta h''$	Perda de Carga Localizada, em m .
Δh_r	Perda de Carga no Recalque, em m .
Δh_s	Perda de Carga na Sucção, em m .
ΔH_{1-2}	Perdas de Carga na Tubulação, em m .
η_{bomba}	Eficiência da Bomba.
η_{motor}	Rendimento do Motor.
γ	Peso Específico do Fluido, em N/m^3 .
θ_1	Ângulo do Fator de Potência Inicial, em graus.
θ_2	Ângulo do Fator de Potência Desejado, em graus.

SUMÁRIO

1 – Introdução	1
1.1 Apresentação do Tema e do Problema	2
1.1.1 Justificativa	4
1.1.2 Objetivos.	5
2 – Fundamentação Teórica	7
2.1 Características do Sistemas Irrigação.	10
2.1.1 Irrigação Pressurizada e Sistema de Distribuição.	11
2.1.2 Estação de Bombeamento.	11
2.1.3 Bomba Hidráulica.	12
2.1.4 Motor Elétrico.	13
2.2 Fundamentos de Hidráulica.	13
2.2.1 Perda de Carga Contínua.	14
2.2.2 Perda de Carga Localizada.	15
2.2.3 Associação de Diferentes Tubos.	16
2.3 Fator de Potência.	16
2.3.1 Correção Fator de Potência.	18
2.4 Dados do Sistema	18
2.5 Diagramas da metodologia de análise dos processos de manutenção	21
3 – Análises e Resultados	23
3.1 Condição Ideal de Funcionamento	23
3.1.1 Perda de Cargas.	23
3.1.2 Potência Requerida do Motor.	27
3.2 Sistema Sem Manutenção.	28
3.3 Sistema Após Intervenção.	31
3.4 Desempenho do Motor e da Bomba.	32
3.5 Impacto da Falta de Manutenção no Sistema de Bombeamento.	33
3.6 Resultados Após Intervenção no Sistema.	33
3.7 Análise dos Custos de Energia Elétrica.	34
3.8 Análise da Vazão e Eficiência da Bomba.	35
3.9 Custos de Manutenção e Retorno do Investimento.	36
4 – Conclusão	37
Referências	38

1 Introdução

No contexto das alterações climáticas e da tendência ascendente do preço da energia, é necessário desenvolver metodologias, ferramentas e ações que procurem otimizar a utilização dos recursos energéticos para benefícios ambientais e econômicos, devido ao custo da energia ser um dos principais insumos para os irrigantes. Além disso, a irrigação é um dos setores da agricultura que está aumentando seu consumo de energia como consequência da modernização dos sistemas de irrigação e distribuição de água (MORENO et al., 2010).

Aumentar a eficiência do uso de água e energia na agricultura é de vital importância diante das mudanças climáticas, por isso é necessário gerar ações de adaptação que permitam ajustar os processos de planejamento, operação e avaliação do serviço de irrigação (OJEDA W. B.; SIFUENTES, 2012). A eficiência energética nos sistemas de irrigação é importante não apenas para a redução de custos de produção, mas também para minimizar o impacto ambiental associado ao consumo excessivo de energia.

Segundo SOUZA et al. (2019), a definição de eficiência energética pode ser dita como a capacidade de se obter um mesmo serviço energético utilizando menos energia durante o processo. Assim, mostrando-se uma fonte de relevante impacto e baixo custo para a redução dos gastos de energia na década passada, com potencial de aproximadamente 20% de economia quando comparada à aquisição de novas fontes de geração (SOUZA R. D. S.; OLIVEIRA, 2017).

Na agricultura, principalmente em sistemas de irrigação por bombeamento, o problema de ineficiência energética é potencializado pelo alto consumo elétrico, especialmente em regiões onde o custo de energia representa uma parcela significativa do custo de produção. Esse cenário é agravado pelo dimensionado inadequado e pela falta de manutenção preventiva, resultando em consumo excessivo de energia e água. De acordo com COELHO M. M. L. P.; BAPTISTA (2014), os sistemas de bombeamento devem ser projetados levando em conta critérios econômicos, devido a relação mútua entre diâmetro da tubulação, potência do sistema de bombeamento e despesas operacionais.

A ausência de manutenção nesses sistemas desencadeia mudanças nas características inter-relacionadas, refletindo em mudanças na faixa de operação de bombas e motores projetados para trabalhar com vazões e alturas manométricas previamente estabelecidas (COELHO M. M. L. P.; BAPTISTA, 2014).

Diante do exposto, fica evidente que a busca por maior eficiência energética nos sistemas de irrigação não é apenas uma alternativa, mas uma necessidade urgente frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela elevação dos custos energéticos. A adoção de práticas que envolvam o correto dimensionamento dos sistemas, a manutenção preventiva e a gestão eficiente dos recursos hídricos e energéticos se apresenta como uma estratégia fundamental para garantir a sustentabilidade econômica e ambiental da atividade agrícola.

Dessa forma, investir em eficiência energética na irrigação contribui não só para a redução dos custos de produção, mas também para a preservação dos recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais associados ao uso intensivo de energia.

1.1 Apresentação do Tema e do Problema

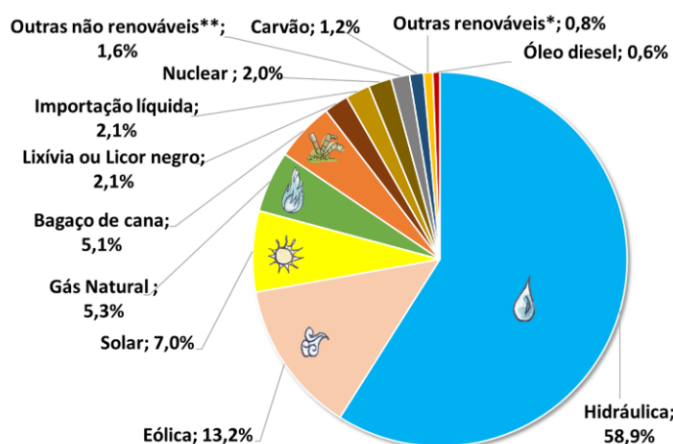
No início da década de 1970, o mundo presenciava a crise do petróleo, combustível fóssil mais utilizado até então. Devido ao aumento exorbitante do preço do petróleo, o Brasil começou a dar mais atenção ao setor energético nacional, foi nesse âmbito que surgiu a primeira ação do governo federal em prol da eficiência energética, Programa Conserve no Ministério de Minas e Energia (MME). Mais tarde, na década de 1990 o Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) foi criado com objetivo de promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício. Desde então, as ações do Procel tem contribuído para o aumento da eficiência dos bens e serviços, seja através de etiquetas de consumo energético de equipamentos elétricos e/ou desenvolvimentos de hábitos sobre consumo eficiente de energia (ENERGIA, 2024).

Ainda na mesma década, com o aumento do consumo elétrico no país, o governo brasileiro criou a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 1996. A Aneel foi criada para regularizar o setor elétrico brasileiro e promover ações para melhorar a eficiência energética nacional, atribuindo normas e indicadores para transmissão e distribuição de energia elétrica.

A Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, conhecida como Lei do Desenvolvimento do Setor Elétrico, estabelece obrigações de investimento em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética para as empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica. A lei determina que as empresas do setor elétrico devem investir, anualmente, 0,5% de sua receita operacional líquida em pesquisa e desenvolvimento e 0,2% em eficiência energética. Esses investimentos devem ser aplicados em projetos e programas aprovados pelo Procel (BRASIL, 2000).

A finalidade da Lei é promover o desenvolvimento de novas tecnologias, aumentar a eficiência energética e diminuir o consumo no setor elétrico brasileiro. O investimento originado da Lei do Desenvolvimento do Setor Elétrico têm produzido impactos positivos no setor elétrico, como o desenvolvimento dos sistemas de energia solar e eólica, impulsionando e diversificando a matriz elétrica nacional, Figura 1.

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira em 2023



Fonte: (EPE, 2023).

Após anos 2000, outras leis foram criadas e novos programas estruturados. No ano de 2001, a Lei nº 10.295, conhecida como Lei da Eficiência Energética, foi criada a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Essa lei tinha como objetivo a efficientização na destinação de insumos energéticos e preservação ambiental no Brasil (BRASIL, 2001b). Mais tarde no mesmo ano, por intermédio de um Decreto de nº 4.059/2001, estabeleceram indicadores de máximos e mínimos de eficiência energética de equipamentos fabricados ou comercializados no Brasil e das edificações a serem construídas (BRASIL, 2001a). Anos depois, em 2019, o mesmo decreto foi revogado pelo Decreto de nº 9.864/2019, que regulamenta a Lei da Eficiência Energética e discorre sobre Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (BRASIL, 2019).

No ano de 2007, o governo brasileiro publicou seu primeiro planejamento de longo prazo no âmbito da eficiência energética, conhecido como Plano Nacional de Energia 2030 (PNE). Criado com o intuito de mostrar o potencial do país para implementar novas medidas de eficiência energéticas, não somente a elétrica, estratégias para a ampliação da oferta de energia de maneira sustentável e promover insumos para a elaboração de políticas energéticas com vista a evolução da demanda (ENERGIA, 2007). Em 2009, o Plano Brasileiro de Etiquetagem (PBE) sofreu alterações, sendo divulgado o programa de etiquetagem de edifícios no Brasil, abrangendo prédios comerciais, públicos e de serviços. Os prédios residenciais foram incluídos no ano seguinte (ALTOÉ et al., 2017).

Em 2011, o foi publicado o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) destinado a apresentar medidas e ações para aumentar a conservação de energia nos setores industriais, transporte, edificações, educação, entre outros, com a diminuição de investimento na área a partir da conscientização e da adoção de incentivos fiscais (ENERGIA, 2011).

Em 2012, a Aneel concretizou um marco importante no setor de energias renováveis e

de eficiência energética. A Resolução Aneel nº 482/2012, instituiu um sistema de compensação de energia elétrica no Brasil, no qual as unidades consumidoras com micro ou minigeração distribuída (microgeração, potência instalada menor ou igual a 100 kW e minigeração, potência maior que 100 kW e menor ou igual a 1 MW), a partir de fonte hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, podem abater no seu consumo de energia. Ao fim do mês, um balanço entre energia consumida e injetada no sistema é realizado, caso o valor consumido seja menor que o injetado, o excesso são convertidos em créditos que podem ser usados em até 36 meses (ANEEL, 2012).

A resolução originalmente criada pela Aneel em 2012 passou por diversas atualizações ao longo dos anos. A mais recente, Resolução Normativa da Aneel nº 1.059/2023, introduz melhorias nas regras para conexão e faturamento de centrais de micro e minigeração distribuídas. Além disso, amplia os limites de potência instalada para até 5MW em usinas hidrelétricas e termelétricas, e para até 3 MW em sistemas fotovoltaicos (ANEEL, 2023b).

1.1.1 Justificativa

A eficiência energética ganhou grande importância na agricultura na década passada, especialmente devido ao aumento do consumo elétrico rural, como evidenciado por POPOVIĆ et al. (2017). O autor destaca que a gestão agrícola enfrenta desafios para equilibrar eficiência operacional e custos energéticos, cenário amplamente observado no setor irrigante brasileiro nos últimos anos (ver Tabela 1).

Tabela 1 – Consumo Elétrico Setor Irrigante 2014-2023

Ano	Consumo de Energia Elétrica (GWh)	Relação ao Consumo Total Brasileiro
2014	25.671	5,41%
2015	25.899	5,56%
2016	27.266	5,90%
2017	28.136	6,02%
2018	29.679	6,25%
2019	29.563	6,12 %
2020	31.691	6,65%
2021	32.429	6,67%
2022	30.201	5,93%
2023	30.431	5,72%

Fonte: Adaptado (EPE, 2024).

Com a relevância do tema, diversos autores tem proposto soluções para a otimização dos sistemas de irrigação em termos de eficiência energética. Trabalhos como de LIMA et al. (2009) que visa aumentar a eficiência energética na irrigação por sistemas de pivô central, através de uma análise econômica da adutora para os demais elementos de um pivô, se mostra uma das ferramentas possíveis para a diminuição energética na agricultura.

No livro de [COELHO M. M. L. P.; BAPTISTA \(2014\)](#), os autores enfatizam a importância de se considerar o aspecto econômico no dimensionamento de sistemas hidráulicos, importância essa, muitas vezes considerados em estudos de eficiência energética na agricultura e na indústria. Segundo os autores, a omissão do critério econômico pode acarretar em sistemas superdimensionados, diminuindo assim sua eficiência energética segundo a definição da mesma por [SOUZA et al. \(2019\)](#).

[JÚNIOR A. A. S.; CORDEIRO \(2024\)](#), analisaram em seu trabalho o aumento da eficiência energética em modelos atuais de irrigação, a partir do monitoramento e da coleta de dados em quatro estudos de casos diferentes. O estudo executado pelos autores, mostra o impacto na eficiência energética a partir da implementação de novas tecnologias de controle e sensoriamento no campo.

Em sistemas de irrigação mais antigos, além da falta de equipamentos de segurança para o conjunto de motobomba, os próprios equipamentos como motor e bomba se tornam obsoletos. Essa defasagem tecnológica implica em equipamentos com baixo nível de rendimento e baixo fator de potência, implicando em consumo elétrico maior ([ALTOÉ et al., 2017](#)).

1.1.2 Objetivos.

O presente estudo tem como objetivo principal analisar o impacto da ausência de manutenção na eficiência energética de um sistema de irrigação por bombeamento hídrico, focando no sistema elevatório e adutora, buscando compreender os fatores que contribuem para o consumo excessivo de energia e propor estratégias de otimização com base em normas vigentes.

Para alcançar esse objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Avaliar o desempenho do sistema em condições ideais de operação, considerando os parâmetros especificados pelo fabricante do pivô central (estrutura giratória de irrigação em área circular) e os requisitos hidráulicos necessários para o correto funcionamento da irrigação.
- Identificar as perdas de carga no sistema hidráulico e elétrico e os fatores que influenciam a eficiência energética, utilizando medições de corrente, tensão e pressão, além de cálculos baseados na equação de Hazen-Williams e na curva de trabalho da bomba e motor.
- Analisar o impacto da falta de manutenção no consumo elétrico, comparando o desempenho do sistema ideal, sem manutenção e após a intervenção de medidas de mitigação de perdas e melhoria na eficiência energética.
- Implementar uma intervenção parcial no sistema e avaliar seus efeitos na eficiência energética, verificando melhorias no consumo de energia, vazão do sistema e na redução de custos operacionais.
- Sugerir diretrizes para manutenção preventiva e boas práticas operacionais, visando otimizar o uso de energia e garantir maior sustentabilidade ao sistema de irrigação.

Desse modo, espera-se fornecer subsídios técnicos que auxiliem na melhoria da eficiência

energética no sistemas de irrigação agrícola, promovendo um uso mais racional dos recursos hídricos e elétricos.

2 Fundamentação Teórica

A metodologia é aplicada a um estudo de caso realizado em uma propriedade agrícola de médio porte, localizada no interior do estado de São Paulo, enquadrada no grupo tarifário A4 (com tensão de conexão entre 2,3 kV e 25 kV). A propriedade utiliza um sistema de irrigação por pivô central ao longo de todo o ano, operado por um motor elétrico trifásico de indução, do tipo gaiola de esquilo, com potência nominal de 150 cv (modelo WEG 280 S/M), responsável por bombear a água através de uma adutora composta por diferentes trechos de tubulação. O sistema de irrigação encontra-se em operação há vários anos e apresenta sinais de desgaste e falta de manutenção nas tubulações, o que tem contribuído para o aumento das perdas de carga hidráulica e, conseqüentemente, dos custos operacionais.

Para a análise do sistema de irrigação, foram coletados dados operacionais essenciais, como a vazão de água requerida, a altura geográfica do terreno e a pressão necessária para o correto funcionamento do pivô central, conforme especificações dos fabricantes. Também foram realizadas medições de tensão e corrente durante a operação do motor. Considerando que a propriedade já dispõe de um conjunto motobomba instalado (ver Figura 2), adotou-se o mesmo modelo de bomba — KSB WKL 125/3 — cuja curva de desempenho foi utilizada para o dimensionamento da potência do motor (ver Figuras 3 e 4).

Figura 2 – Conjunto Motobomba do Estudo de Caso.

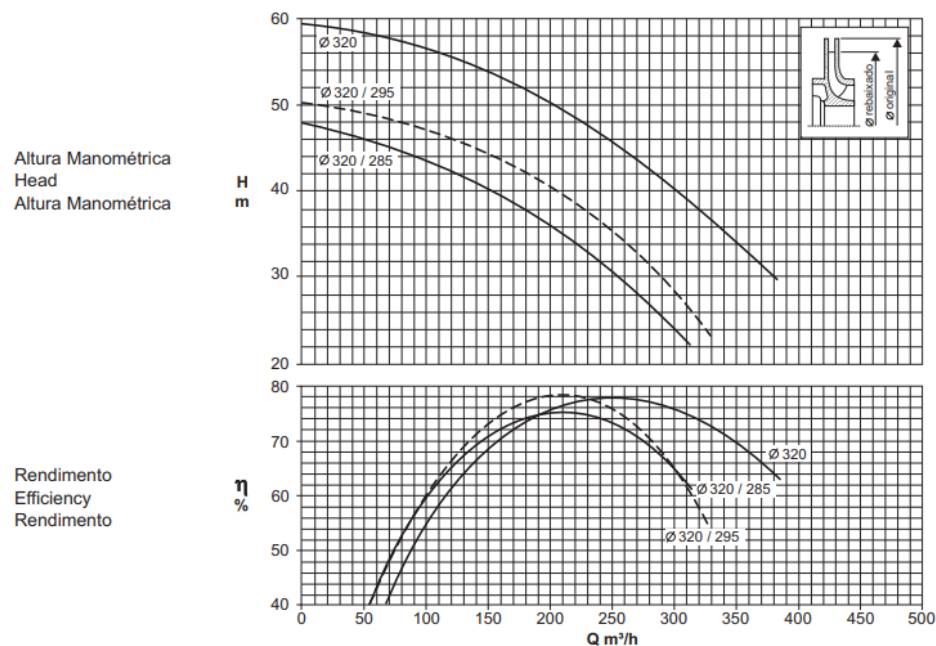


Fonte: Autoria Própria.

Observa-se nas curvas de altura manométricas (ver Figura 3) que a pressão exercida por cada rotor é influenciada pelo tamanho do mesmo. Ao analisar as curvas de potência requerida (ver Figura 4), nota-se dinamômetros maiores de rotores fazem com que a bomba

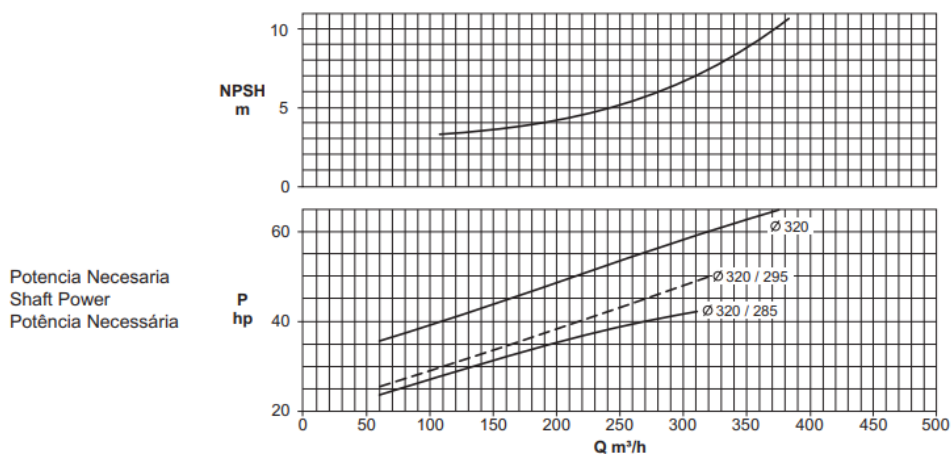
precise de mais potência do motor. A partir das curvas e de medições elétricas, é possível encontrar a curva de trabalho da bomba e encontrar o consumo ideal de potência elétrica do motor.

Figura 3 – Curva de Trabalho Bomba KSB WKL 125/3. Relações de Altura Monométrica e Eficiência em Função da Vazão.



Fonte: (KSB, 2020)

Figura 4 – Curva de Trabalho Bomba KSB WKL 125/3.



Fonte: (KSB, 2020)

Os gráficos das curvas de desempenho da bomba (Figuras 3 e 4) apresentam três curvas distintas, que relacionam altura manométrica, rendimento e potência em função da

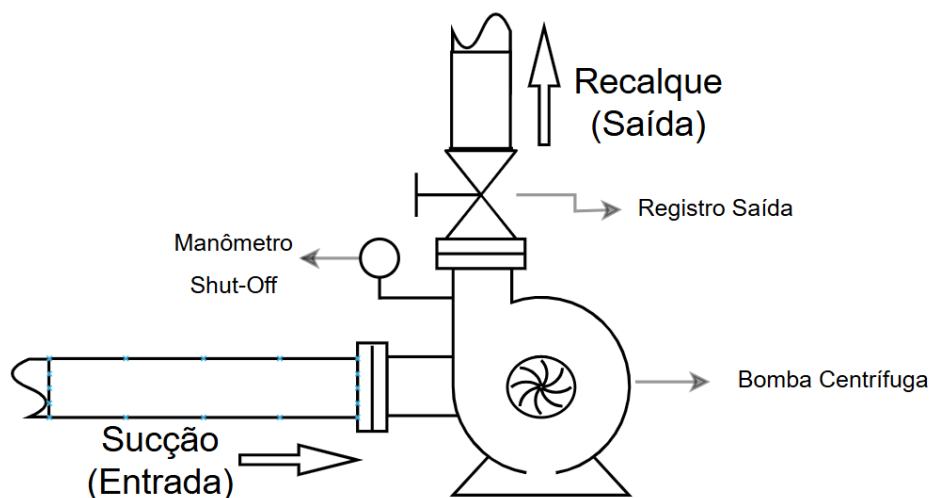
vazão, cada uma correspondente a um diâmetro específico de rotor. Nas curvas, o símbolo \emptyset indica o diâmetro máximo do rotor (em milímetros), e um segundo valor, quando presente, refere-se ao diâmetro efetivo utilizado. Para determinar o diâmetro do rotor da bomba centrífuga instalada, foi utilizado o Ensaio de Shut-Off, que consiste em medir a pressão máxima fornecida pela bomba com a vazão igual a zero — isto é, com a válvula de saída totalmente fechada. A medição foi realizada com um manômetro analógico de precisão de $0,100 \text{ kgf/cm}^2$, conforme ilustrado no diagrama da Figura 5.

De posse da pressão medida pelo manômetro, determina-se a pressão máxima fornecida por cada rotor da bomba (P_{rotor}), conforme a Equação 1:

$$P_{rotor} = \frac{P_{ensaio}}{n_{rotor}} \quad (1)$$

onde P_{rotor} é a pressão máxima entregue pelo rotor dada em kgf/cm^2 , enquanto P_{ensaio} refere a pressão resultante do Ensaio de Shu-Off em kgf/cm^2 , com n_{rotor} sendo a quantidade de rotores presente na bomba.

Figura 5 – Diagrama para Ensaio de Shut-Off.



Fonte: Autoria Própria.

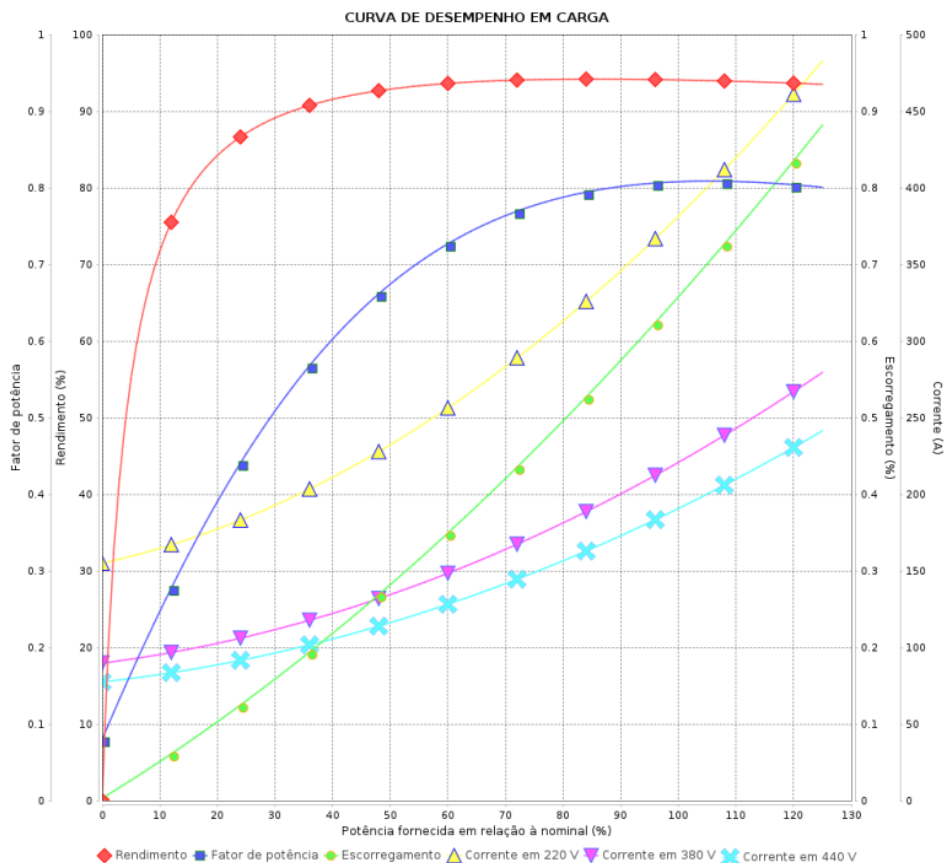
O modelo de bomba analisado no estudo de caso possui, conforme as especificações do fabricante, três estágios — ou seja, três rotores em sua construção. A Tabela 2 apresenta os dados obtidos a partir do Ensaio de Shut-Off. Para a análise do desempenho elétrico, utiliza-se a curva de rendimento sob carga do motor trifásico (ver Figura 6), fornecida pelo fabricante, a fim de determinar o fator de potência e o rendimento do motor em diferentes níveis de carga e tensões de operação.

Tabela 2 – Dados de Ensaio Shut-Off.

Shut-Off	
Pressão Máxima	15 kg/cm ²
Quantidade de Rotor	3

Fonte: Autoria Própria.

Figura 6 – Curva de Desempenho em Carga Motor Trifásico WEG 280 S/M.



Fonte: (WEG, 2024)

2.1 Características do Sistemas Irrigação.

Segundo GOMES (2013), um sistema de irrigação é qualquer prática agrícola de fornecimento de água as culturas quando as dotações pluviométricas ¹ ou qualquer outra forma natural de abastecimento, são insuficientes para suprir as necessidades hídricas das plantas. Destacando tal atividade como imprescindível para qualquer agricultura tecnificada e rentável, em uma quase totalidade das regiões do planeta Terra.

Os sistemas de irrigação podem ser divididos em duas categorias: irrigação por superfície e irrigação sob pressão ou pressurizada. Na irrigação por superfície, a água alcança as plantas

¹Dotação pluviométrica é o índice pluviométrico que indica o volume de chuva acumulado num determinado local.

de forma direta por escoamento através de sulcos, faixas ou inundação. Essa prática é de aplicação milenar, mas está limitada a zonas topograficamente favoráveis e a baixa eficiência. Na irrigação pressurizada, a água é conduzida, desde a captação até a área cultivada, através de condutos forçados. Sendo distribuída às plantas mediante dispositivos especiais, como por exemplo, aspersores, gotejadores, pivô, entre outros (GOMES, 2013).

2.1.1 Irrigação Pressurizada e Sistema de Distribuição.

O sistema de irrigação analisado neste estudo de caso opera com base em princípios hidráulicos aplicáveis a condutos forçados, uma vez que a topografia do terreno não permite o escoamento por gravidade. A irrigação pressurizada por aspersão exige que as tubulações da rede de distribuição operem sob pressões internas superiores à pressão atmosférica. De acordo com COELHO M. M. L. P.; BAPTISTA (2014), condutos forçados são definidos como aqueles em que a pressão interna difere da pressão atmosférica, exigindo, portanto, que sejam totalmente fechados para manter o regime de escoamento pressurizado.

De acordo com TESTEZLAF (2015), o dimensionamento correto das tubulações é de assegurar que a mesma forneça água para a cultura sem que haja perda excessiva de pressão, atendendo assim os critérios de projeto e assegurando o escoamento da água em velocidades seguras. Para que seja possível o escoamento do líquido até a cultura, além da tubulação, é necessário um sistema de bombeamento para proporcionar energia à água (SCAPIN, 2019).

2.1.2 Estação de Bombeamento.

A unidade de bombeamento é responsável por fornecer a energia ao fluido, para que o mesmo possa deslocar até a cultura. Segundo os autores COELHO M. M. L. P.; BAPTISTA (2014), uma estação de bombeamento é normalmente composta por:

- Válvula de pé com crivo: localizada na parte inferior da sucção. Tem finalidade de impedir o refluxo de água quando a bomba cessa seu funcionamento e impedir entrada de partículas sólidas.
- Redução excêntrica: condutos com diâmetros maiores que da bomba, portanto, é necessário a redução.
- Válvula de retenção: impede o refluxo da água na adutora, localizada após a bomba.
- Registro: permite controle de vazão e manutenção no conjunto de bombeamento.
- Bomba: responsável por converter a energia mecânica para a água.
- Motor: converte energia elétrica em mecânica.

A entrada de energia no sistema ocorre por meio da energia elétrica fornecida pela concessionária local, através da rede de distribuição. Devido às sucessivas conversões de energia — de elétrica para mecânica, e de mecânica para hidráulica — e ao fato de que as máquinas não operam com 100% de rendimento, parte da energia é inevitavelmente dissipada ao longo do processo. No trabalho de GOMES (2013), o consumo energético das componentes de um

conjunto motobomba pode ser quantificado através da potência de cada uma das componentes, determinando o rendimento a partir da razão entre as potências.

A potência hidráulica (P_{hid}) representa a quantidade de energia transferida ao fluido por unidade de tempo, Equação 2, onde P_{hid} é potência hidráulica [W], γ é o peso específico do fluido [N/m^3], Q_o é a vazão de operação do sistema [m^3/s] e H_t é a altura manométrica total de operação do sistema [m].

$$P_{hid} = \gamma \cdot Q_o \cdot H_t \quad (2)$$

Potência motriz (P_m), expressa em [W], corresponde à potência disponível no eixo do rotor da bomba. Essa potência pode ser calculada pela Equação 3, considerando o rendimento da bomba η_{bomba} .

$$P_m = \frac{P_{hid}}{\eta_{bomba}} \quad (3)$$

2.1.3 Bomba Hidráulica.

Segundo os autores [COELHO M. M. L. P.; BAPTISTA \(2014\)](#), bomba é uma das duas categorias de máquinas hidráulicas existente. Tem como função transformar a energia mecânica proveniente de motor em energia hidráulica, possibilitando o transporte e elevação dos fluidos a grandes distâncias, se aplicando desde pequenas instalações prediais até aos grandes sistemas de irrigação e sistemas industriais.

Este tipo de máquina pode ser classificado de acordo com o processo de transformação de energia no interior das bombas, são elas:

- Bombas Volumétricas
- Turbobombas

As bombas volumétricas são caracterizadas por utilizarem a variação de volume do líquido em seu interior para provocar variação de pressão. Já as turbobombas utilizam do movimento rotativo fornecido pelo motor para girar um uma parte móvel denominada de rotor, essa energia cinética é parcialmente convertida em pressão no interior da máquina. Uma mesma bomba pode apresentar um ou mais rotores, sendo denominada de simples estágio e múltiplo estágios, respectivamente. Por fim, de acordo com a trajetória da água no rotor, as turbobombas podem ser radiais, axiais e mistas. ([COELHO M. M. L. P.; BAPTISTA, 2014](#)).

- Turbobombas Radiais ou Centrífugas: trajetória do fluxo, dentro do rotor, se faz em um plano radial.
- Turbobombas Axiais: trajetória do fluxo segundo direção do eixo da bomba.
- Turbobombas Mistas: trajetória do fluxo diagonal ao eixo, portanto um tipo intermediário entre as centrífugas e as axiais.

2.1.4 Motor Elétrico.

O motor elétrico é uma máquina que transforma a energia elétrica em energia mecânica, e é dividido em dois grandes grupos: motores de corrente contínua e de corrente alternada. Essa divisão decorre-se com base na tensão de alimentação da máquina, subdividindo para cada um dos grupos existentes. Os motores de corrente alternada trifásico são os mais difundidos nas indústrias, devido à sua simplicidade de construção, vida útil e custo de manutenção reduzido (FILHO, 2017).

Os motores de corrente alternada podem ser assíncronos ou síncronos. Essa divisão se diz respeito quanto à velocidade do rotor da máquina, caso a velocidade do rotor seja igual a velocidade do campo girante do estator essa máquina é considerada síncrona. No caso contrário, velocidade do rotor diferente do campo girante do estator, a máquina é considerada assíncrona de indução. De acordo com sua construção, a máquina de indução pode ser do tipo gaiola de esquilo ou rotor bobinado, sendo o rotor do tipo gaiola de esquilo mais utilizado.

De acordo com FILHO (2017), em grande parte das aplicações industriais em que não há necessidade do controle de velocidade em sua aplicação, utilizam-se motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo. Esses motores operam com base em três enrolamentos dispostos no estator, conectados diretamente à rede elétrica. Os enrolamentos são fisicamente espaçados entre si por 120°, acompanhando o defasamento de 120° entre as tensões das três fases da alimentação elétrica.

2.2 Fundamentos de Hidráulica.

Em um sistema de elevação a partir de uma bomba, a altura manométrica H_m representa a energia na saída da bomba menos a energia de entrada, ou seja, é a energia absorvida pelo líquido. Para esse sistema, a Equação de Bernoulli quando aplicada a esse caso, pode ser representada pela Equação 4, sendo o ponto 1 localizado a montante da bomba e o ponto 2 a jusante da mesma (COELHO M. M. L. P.; BAPTISTA, 2014).

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2.g} + H_m = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2.g} + \Delta H_{1-2} \quad (4)$$

Sendo, P_1 e P_2 pressão (Pa ou kgf/m²) nos pontos 1 e 2. U_1 e U_2 velocidade média do escoamento (m/s²) nos pontos 1 e 2. Z é energia ou carga de posição (m) e ΔH_{1-2} é perdas de carga ocorrida na tubulação (m).

Pode-se simplificar a Equação 4 se os pontos 1 e 2 estiverem sujeitos à pressão atmosférica e se a energia cinética entre os dois pontos forem muito próximas. Portanto,

$$H_m = Z_2 - Z_1 + \Delta H_{1-2} \quad (5)$$

Agora, na Equação 5, $Z_2 - Z_1$ passa a ser o desnível entre os dois pontos, sendo representado por H_g .

$$H_m = H_g + \Delta H_{1-2} \quad (6)$$

A Equação 6 pode ser dividida em dois termos, sendo uma relativa à sucção e a outra ao recalque, conforme Equação 10 e 11.

$$H_m = H_s + H_r \quad (7)$$

$$H_g = h_s + h_r \quad (8)$$

$$\Delta h_{1-2} = h_s + h_r \quad (9)$$

$$\therefore H_s = h_s + \Delta h_s \quad (10)$$

$$\therefore H_r = h_r + \Delta h_r \quad (11)$$

em que ΔH_{1-2} é perda de cargas pela tubulação, H_g desnível entre os dois pontos, H_s altura manométrica de sucção, h_s altura geométrica de sucção, Δh_s perda de carga na sucção, H_r altura manométrica de recalque, h_r altura geométrica de recalque e Δh_r é a perda de carga no recalque.

2.2.1 Perda de Carga Contínua.

De acordo com GOMES (2013), parte da energia que os líquidos dispõem em regime dinâmico se perde por conta do efeito de viscosidade do líquido e da rugosidade das tubulações, gerando atrito interno entre partículas. Entre diversas fórmulas empregadas para o dimensionamento de tubulações, a mais utilizada em sistemas de irrigação pressurizados com seção circular superior a 50 mm é a fórmula de Hazen-Williams, Equação 12.

$$H = 10,667 \cdot \frac{L}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \quad (12)$$

As variáveis desta Equação 12 são as mesmas da equação universal para perda de carga unitária, utilizada para a definição da equação de Hazen-Williams e outras formulas existentes, sendo D o diâmetro do conduto em metros, L comprimento do conduto em metros, Q vazão em m^3/s e C coeficiente de perda de carga para diferentes condutos.

Os valores do coeficiente C refere-se a natureza e das condições do material empregado nas paredes dos tubos. A Tabela 3 mostra os valores encontrados na prática.

Tabela 3 – Valores do Coeficiente C para a Equação de Hazen-Williams.

Material	C
Aço corrugado (chapa ondulada)	60
Aço galvanizado	125
Aço rebitado novo	110
Aço rebitado em uso	85
Aço soldado novo	130
Aço soldado em uso	90
Aço soldado com revestimento especial	130
Chumbo	130
Cimento amianto	140
Cobre	130
Concreto com acabamento comum	120
Ferro fundido novo	130
Ferro fundido de 15 a 20 anos de uso	100
Ferro fundido usado	90
Ferro fundido revestido de cimento	130
Latão	130
Manilha cerâmica vidrada	110
Plástico	140
Vidro	100
Tijolo bem executados	140

Fonte: Adaptado (NETTO, 1998).

2.2.2 Perda de Carga Localizada.

As perdas de cargas localizadas ocorrem em pontos específicos ao longo das tubulações, causadas por singularidades do tipo curva, junção, válvulas, registros, reduções, entre outros. Representadas por $\Delta h''$, essas perdas podem ser calculadas por meio da equação geral apresentada na Equação 13.

$$\Delta h'' = \frac{K \cdot U^2}{2 \cdot g} \quad (13)$$

Sendo U a velocidade média de uma seção utilizada como referência e K um coeficiente que depende da geometria da singularidade e do número de Reynolds. Para o coeficiente K, existem valores tabelados para cada tipo de acessório de diferentes configuração, como mostrado em GalaxyCMS (2015).

Um método bastante utilizado para o cálculo das perdas de carga localizada é o Método dos Comprimentos Virtuais. Esse método, aplicado exclusivamente para fins de cálculo, consiste em substituir as perdas causadas por singularidades por um comprimento equivalente (L_e), correspondente a um trecho de tubulação que produz a mesma perda de carga (NETTO, 1998). Assim, ao somar o comprimento equivalente ao comprimento real da tubulação, obtém-se o comprimento virtual (L_v), o que permite modificar a Equação 12, resultando na Equação 14.

$$H = 10,667 \cdot \frac{(L_v + L_e)}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \quad (14)$$

Os valores do comprimento equivalente dos acessórios são tabelados de acordo com sua especificação.

2.2.3 Associação de Diferentes Tubos.

Segundo NETTO (1998), nem sempre são utilizados os mesmo tubos ao longo da adutora, podendo alterar o tipo e o diâmetro em trechos específicos do sistema. É dito Tubulações em Série quando há uma sequência de tubos diferentes no sistema, desse modo, a perda de carga contínua é calculada somando-se as parcelas de perdas para cada tipo de tubulação, Equação 15.

$$H = 10,667 \cdot \frac{(L_1)}{D_1^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C_1}\right)^{1,852} + \dots + 10,667 \cdot \frac{(L_n)}{D_n^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C_n}\right)^{1,852} \quad (15)$$

Onde L_1 é o comprimento para a tubulação 1, L_n é o comprimento para a tubulação n , D_n o diâmetro da tubulação correspondente, C_n coeficiente do material correspondente do tubo n e Q_n vazão referente ao trecho n .

2.3 Fator de Potência.

Segundo FILHO (2017), determinados equipamentos que não possuem carga puramente resistiva, tais como motores elétricos, transformadores, fornos a arco, entre outros, necessitam de uma quantidade de energia reativa para sua operação, necessitando de alguma fonte de energia reativa ligada ao sistema elétrico.

Esse tipo de energia não é convertida em trabalho útil, diferentemente da energia ativa. Em sistemas de corrente alternada (CA), a energia reativa está diretamente relacionado à relação de tensão e corrente, podendo ser indutiva ou capacitiva (ALEXANDER CHARLES K.; SADIKU, 2013).

A energia reativa capacitiva apresenta como característica o adiantamento da corrente elétrica em relação à tensão, defasagem positiva da corrente. Já a energia reativa indutiva apresenta um atraso da corrente em relação à tensão, defasagem negativa. Os motores elétricos, muito utilizado nas indústrias e agricultura, necessitam da energia reativa indutiva para a ativação do campo magnético no indutor da máquina, podendo ser calculado a partir da potência total elétrica do sistema.

A potência total da carga de um sistema pode ser calculada pela Equação 16:

$$P_{ap} = \sqrt{P_{at}^2 + P_{re}^2} \quad (16)$$

sendo P_{ap} potência total da carga em VA, P_{at} potência ativa em W e P_{re} potência reativa em VAR.

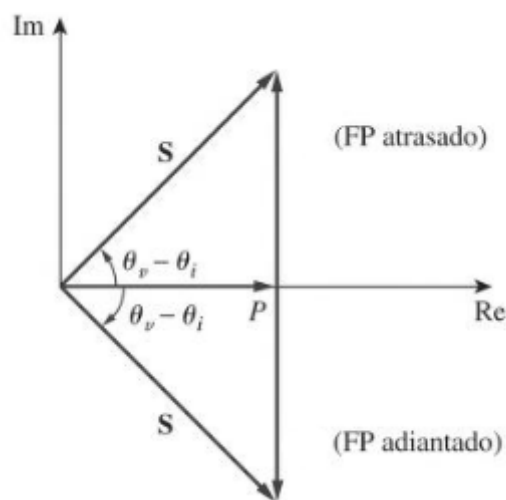
De acordo com FILHO (2017), o fator de potência é a relação entre as duas quantidades de potência, P_{at} e P_{ap} . Desse modo, por ser uma relação entre duas quantidades de mesma unidade, o fator de potência é um número adimensional e pode ser calculado pela Equação 17:

$$FP = \frac{P_{at}}{P_{ap}} \quad (17)$$

O fator de potência também pode ser definido como o cosseno do ângulo formado entre o componente da potência ativa e da potência total, representado pelo triângulo de potência na Figura 7 .

$$FP = \cos \theta \quad (18)$$

Figura 7 – Triângulo de Potência.



Fonte: Adaptado de (ALEXANDER CHARLES K.; SADIKU, 2013).

O triângulo de potência é utilizado quando no sistema há somente cargas lineares, tais como lâmpadas incandescentes, aquecedores de água etc., pois a intensidade que circula por elas possuem a mesma forma de onda senoidal da tensão de alimentação. Cargas não lineares, como inversores, retificadores, se divergem do valor obtido através de $\cos \theta$, sendo necessário o cálculo através de:

$$\cos \phi = \frac{P_{at}(hn)}{P_{ap}(hn)} \quad (19)$$

onde $P_{at}(hn)$ é a potência ativa para carga de conteúdo harmônico de ordem "n" e $P_{ap}(hn)$ é a potência aparente para carga de conteúdo harmônico de ordem "n".

De acordo com (ANEEL, 2020), a distorção harmônica está associado as distorções das formas de ondas de tensão e corrente em relação à onda senoidal de frequência fundamental, 60 *hz* no Brasil. As medições são desempenhadas para diversas ondas de frequências múltiplas da fundamental. Devido as características únicas para cada conjunto de harmônicas, por exemplo, harmônicas de ordem par, ímpares e múltiplos de 3, há um limite máximo para cada

tipo de medição, sendo a mais popular e de fácil medição a distorção harmônica total de tensão, com limite máximo de 10%.

Por se tratar de uma relação atrelada ao quanto o sistema é capaz de converter a energia em trabalho real, W , se torna necessário a aplicação de critérios mínimos de qualidade de energia ao sistema, um vez que a energia reativa ocupa os meios de transmissão e distribuição elétrico.

2.3.1 Correção Fator de Potência.

Segundo Resolução Normativa ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010, revogada pela Resolução Nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021 e Resolução Nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023, estabelece um limite de fator de potência para consumidores do grupo A (aqueles que recebem o fornecimento elétrico em média ou alta tensão) para o mínimo de 0,92 indutivo ou capacitivo. A não correção do fator de potência resulta em multas e cobranças pelo excedente consumido de energia reativa na instalação consumidora, sendo do cargo da concessionária local de energia realizar as medições elétricas (ANEEL, 2021).

Para a correção do fator de potência é necessário conhecer o fator de potência no qual se encontra a unidade consumidora. O índice pode ser indutivo ou capacitivo, para a correção do fator capacitivo, se faz o uso de motores para a correção. Quando há excesso de energia reativa indutiva, fator de potência indutivo, a correção é realizada pela instalação de banco de capacitores fixos ou automáticos. Esses bancos de capacitores devem injetar uma quantidade de energia reativa no sistema de modo que eleve o fator de potencia para uma valor desejado entre 0,92 e 1 (FILHO, 2017). Um método de se calcular o valor do banco de capacitores é pela Equação 20.

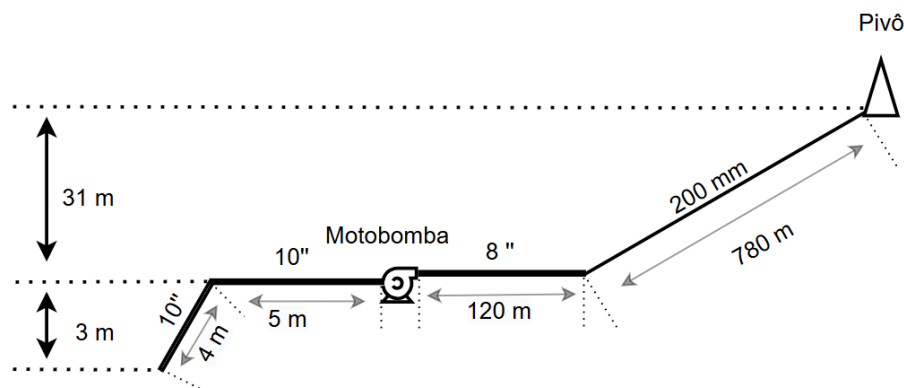
$$P_c = P_{at} \cdot (tg(\theta_1) - tg(\theta_2)) \quad (20)$$

sendo θ_1 o angulo do fator de potência inicial, θ_2 o angulo do fator de potência desejado e P_{at} a potência ativa em kW.

2.4 Dados do Sistema

De posse com os dados do motor e da bomba, levantou-se os parâmetros da adutora instalada na propriedade. A tubulação instalada apresenta uma elevação topográfica de 31 metros, medido com auxílio de um GPS de topografia, além de apresentar um trecho de 120 metros de tubo de aço galvanizado e 780 metros com o tubo PVC de 200 mm, conforme ilustra o diagrama da Figura 8. Os cálculos de perdas das tubulações serão calculados a partir do Método de Hazen-Williams, Equação 12 e as perdas de carga localizadas serão calculadas pelo Método dos Comprimentos Virtuais, Equação 14.

Figura 8 – Diagrama Tubulações de Sucção e Recalque.



Fonte: Autoria Própria.

O primeiro desenvolvimento a ser realizado é o levantamento das características de pressão da bomba e potência elétrica do sistema de irrigação em condição ideal de funcionamento, isto é, o sistema projetado para as especificações do fabricante do pivô central. Para essa análise, utiliza-se as Equações 1, 2, 3 e 6 e 12 para encontrar a curva de atuação da bomba em sua curva de trabalho, e consecutivamente a potência elétrica do motor dada pela Equação 21.

$$P_{motor} = \frac{P_m}{\eta_{motor}} \quad (21)$$

Em (21), P_{motor} é a potência útil do motor, η_{motor} o rendimento do motor e P_m é a potência motriz.

A segunda análise do estudo de caso contemplará o levantamento da potência elétrica do sistema em condição real de funcionamento e sem manutenção, a partir do cálculo da potência elétrica trifásica do motor com base na corrente e tensão de funcionamento, Equação 22. Sendo P_{ele} a potência elétrica aparente em volt-ampère (VA), V_t tensão elétrica do motor em funcionamento em volts (V) e I_f a corrente elétrica do motor em funcionamento em ampère (A).

$$P_{ele} = \sqrt{3} \cdot V_t \cdot I_f \quad (22)$$

As medições dos dados apresentados nas Tabelas 4 e 5 foram realizadas com o auxílio de um alicate amperímetro Minipa ET-4090, utilizado para aferir a corrente, a tensão do motor elétrico e a distorção harmônica total de tensão ($DTT\%$) durante o funcionamento. Para a medição da pressão, utilizou-se um manômetro analógico com precisão de $0,100 \text{ kgf/cm}^2$.

A partir da primeira e segunda análise no sistema, realiza-se uma intervenção para tentar corrigir alguma característica fora do padrão. Desse modo, a terceira etapa consiste no levando do consumo elétrico após intervenção com base nos dados medidos em campo.

Tabela 4 – Medições do Sistema em Funcionamento sem Manutenção.

Medidas em Funcionamento	
Altura Manométrica	9,2 kgf/cm ²
V_t	385 V
I_f	240 A
$DTT\%$	2,2 %

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 5 – Medições do Sistema Após Intervenção Parcial.

Medidas em Funcionamento	
Altura Manométrica	11,4 kgf/cm ²
V_t	380 V
I_f	210 A
$DTT\%$	2,2 %

Fonte: Autoria Própria.

A tarifação do consumo de energia elétrica ativa e do excedente de energia reativa segue as diretrizes da Resolução Normativa nº 1000/2021 da ANEEL, que altera as RENs nº 414, de 9 de setembro de 2010, e nº 470, de 13 de dezembro de 2011. Essas resoluções estabelecem as regras aplicáveis aos consumidores do Grupo A — aqueles com tensão de fornecimento igual ou superior a 2,3 kV, ou por ligação subterrânea com tensão inferior a 2,3 kV. O consumo de energia ativa deve ser calculado pela Equação 23, enquanto o excedente de energia reativa é determinado pela Equação 24 (ANEEL, 2021).

$$FEA_{(p)} = EEAM_{(p)} \cdot TE_{COMP(p)} \quad (23)$$

Onde, $FEA_{(p)}$ é o faturamento da energia elétrica ativa, por posto tarifário, em Reais (R\$), $EEAM_{(p)}$ é montante de energia elétrica ativa medido em cada posto tarifário “p” do ciclo de faturamento, em megawatt-hora (MWh), $TE_{COMP(p)}$ é tarifa de energia das tarifas de fornecimento, em Reais por megawatt-hora (R\$/MWh) e p é o posto tarifário, ponta ou fora de ponta, para as modalidades tarifárias horárias.

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^n \left[EEAM_T \cdot \left(\frac{f_r}{f_T} - 1 \right) \right] \cdot VR_{ERE} \quad (24)$$

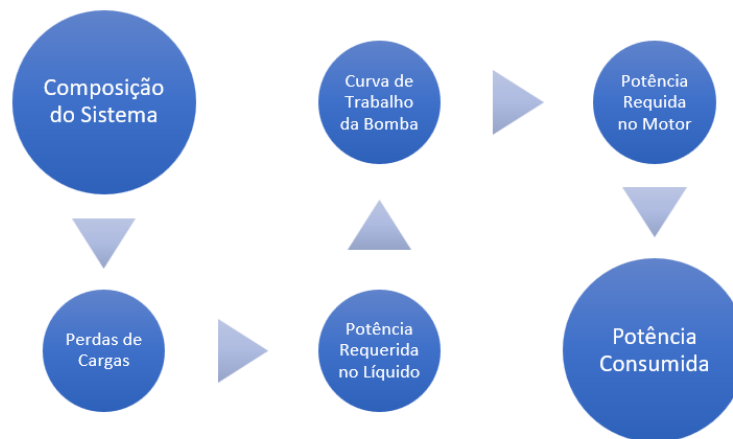
Em que, E_{RE} , é o valor correspondente à energia elétrica reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “ f_r ”, no período de faturamento em Reais (R\$), $EEAM_T$, é o montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo “T” de uma hora, durante o período de faturamento, em megawatt-hora (MWh), f_r , fator de potência de referência igual a 0,92, f_T , fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo “T” de uma hora durante o período de faturamento, VR_{ERE} , valor de referência equivalente à tarifa de energia “TE” da bandeira verde aplicável ao subgrupo B1, em Reais por

megawatt-hora ($R\$/MWh$), T , intervalo de uma hora, no período de faturamento e n , número de intervalos de integralização “ T ”, por posto tarifário “ p ”, no período de faturamento.

2.5 Diagramas da metodologia de análise dos processos de manutenção

O diagrama da Figura 9 mostra a sequência de eventos que descrevem a ordem de análise/intervenção no sistema em condição ideal.

Figura 9 – Fluxograma Condição Ideal.



Fonte: Autoria Própria.

Na condição ideal do sistema o passo inicial desenvolve-se com o levantamento das características do sistema de irrigação, tais como: tubulações e acessórios, vazão e pressão requerida no pivô e comprimento e altura geográfica da instalação. Com base nos dados coletados, aplica-se os fundamentos de perdas de cargas da tubulação e acessórios presentes, necessário para encontrar a pressão requerida da bomba. De posse dessa informação, calcula-se a potência necessária no líquido para atender todas as características do fabricante do pivô.

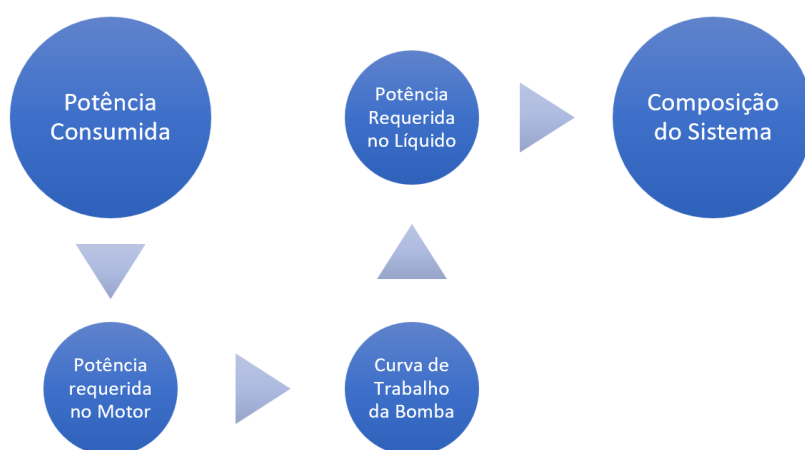
Com a pressão necessária e com a curva de trabalho do equipamento fornecido pelo fabricante, encontra-se as características de trabalho para as condições requerida pelo sistema, de modo que seja possível efetuar o levantamento da potência requerida do motor elétrico e posteriormente a potência elétrica consumida pelo mesmo.

De modo semelhante, para as condições do sistema sem manutenção e pós intervenção, tem-se o diagrama representado pela Figura 10.

Para as condições sem manutenção e após intervenção, tem-se o passo inicial partindo da potência elétrica consumida pelo motor. Utilizando os fundamentos e equacionamento apresentados no capítulo anterior, é possível encontrar a potência requerida pela bomba e assim a curva de trabalho da mesma. Assim, com as característica da curva de trabalho do equipamento é possível encontrar a potência requerida pelo líquido.

O último passo a ser feito é encontrar a composição do sistema, que diferentemente da condição ideal, será apenas a característica de vazão e pressão existente no sistema.

Figura 10 – Fluxograma Sem Manutenção e Após Intervenção.



Fonte: Autoria Própria.

3 Análises e Resultados

Neste capítulo são apresentados os cálculos realizados com base nos dados coletados e nos métodos descritos no Capítulo 2, além da análise dos resultados obtidos. O objetivo principal é identificar as causas do consumo energético elevado no sistema de irrigação estudado, analisando a eficiência energética, as perdas de carga e o gasto com energia elétrica.

Os cálculos foram realizados utilizando as fórmulas apresentadas no Capítulo 2, como a equação de Hazen-Williams para determinar a perda de carga nas tubulações e a equação da potência hidráulica para avaliar o desempenho do sistema.

Os resultados detalhados são apresentados nas Tabelas 12 e 13, que comparam as características do motor e da bomba, respectivamente, para as três condições analisadas: ideal, sem manutenção e pós-intervenção.

3.1 Condição Ideal de Funcionamento

A condição ideal de operação do sistema de irrigação (pivô) é elaborada para os requisitos de funcionamento do pivô central segundo o fabricante, o mesmo deve atender as especificações que se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificação de Funcionamento do Pivô.

Especificação do Fabricante	
Vazão	234 m ³ /h
Pressão na Base	6,28 bar

Fonte: Autoria Própria.

3.1.1 Perda de Cargas.

O conjunto motobomba deve atender às especificações apresentadas na Tabela 6. Para isso, é necessário, inicialmente, calcular as perdas de carga associadas à tubulação de recalque, cujas características estão descritas no Capítulo 2 e detalhadas na Tabela 7. Vale destacar que, neste estudo de caso, o sistema contempla uma associação em série de diferentes trechos de tubulação.

Tabela 7 – Especificação da Tubulação de Recalque.

Especificação da Tubulação		
Tipo de Tubo	Comprimento	Diâmetro
Tubo de Aço Galvanizado	120 m	8"
Tubo de PVC	780 m	200 mm

Fonte: Autoria Própria.

Com os parâmetros coletados durante as medições, calcula-se a perda de carga do recalque utilizando a fórmula de Hazen-Williams e associação em série de tubulações, apresentada na seção 2.

$$H_r = 10,667 \cdot \frac{L_1}{D_1^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C_1}\right)^{1,852} + 10,667 \cdot \frac{L_2}{D_2^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C_2}\right)^{1,852} \quad (25)$$

Substituindo os parâmetros da Equação 25 pelos valores da Tabela 8 e adotando o coeficiente C conforme indicado na Tabela 3 (seção 2.2.1), obtém-se a Equação 26, resultando em uma perda de carga da tubulação de recalque $H_r = 16,645$ m. Isso significa que para vencer as perdas de carga da tubulação é necessário pelo menos uma coluna de água de 16,6 metros.

Tabela 8 – Parâmetros Convertidos para Equação Hazen–Williams.

Parâmetro	Valor
L_1	120 m
L_2	780 m
D_1	0,2032 m
D_2	0,2 m
Q	0,065 m ³ /s

Fonte: Autoria Própria.

$$H_r = 10,667 \cdot \frac{120}{0,2032^{4,87}} \cdot \left(\frac{0,065}{125}\right)^{1,852} + 10,667 \cdot \frac{780}{0,2^{4,87}} \cdot \left(\frac{0,065}{140}\right)^{1,852} \quad (26)$$

$$\therefore H_r = 16,645 \text{ m} \quad (27)$$

De maneira semelhante, a perda de carga na sucção é calculada com base nos parâmetros obtidos nas medições apresentadas na Tabela 9. Assim, a perda de carga por sucção (H_s) é expressa pela Equação 28:

Tabela 9 – Especificação da Tubulação de Sucção.

Especificação da Tubulação		
Tipo de Tubo	Comprimento	Diâmetro
Tubo de Aço Galvanizado	9 m	10"

Fonte: Autoria Própria.

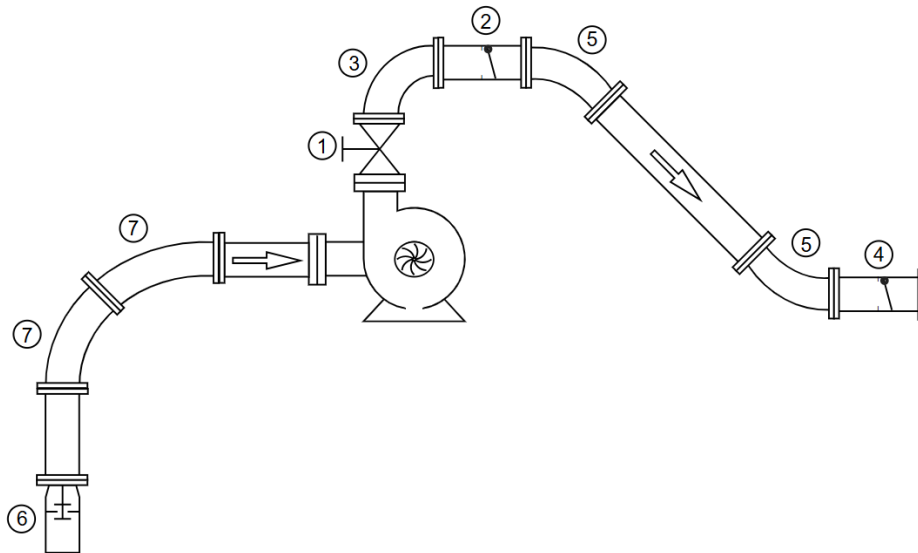
$$H_s = 10,667 \cdot \frac{9}{0,254^{4,87}} \cdot \left(\frac{0,065}{125}\right)^{1,852} \quad (28)$$

$$\therefore H_s = 0,0629 \text{ m} \quad (29)$$

Como mostrado na Seção 2.2.2, além da tubulação, o sistema de distribuição conta com diversos acessórios. Esses acessórios estão representados no diagrama da Figura 11 e

listados na Tabela 10, juntamente com seus respectivos comprimentos equivalentes (L_e) de tubulação.

Figura 11 – Diagrama de Acessórios na Tubulação.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10 – Diâmetro de Acessório por Comprimento Equivalente.

Acessórios				
índice	Item	Quantidade	Diâmetro (Polegadas)	Comprimento Equivalente
1	Registro de Gaveta	1	5"	1,1 m
2	Válvula de Retenção Pesado	1	5"	19,3 m
3	Curva 90°	1	5"	2,7 m
4	Válvula de Retenção Pesado	1	8"	25 m
5	Curva 45°	2	8"	1,5 m
6	Válvula de Retenção de Pé Leve	1	10"	20 m
7	Curva 45°	2	10"	1,8 m

Fonte: Autoria Própria.

Conhecendo o L_e de cada acessório, pertencente a um mesmo tipo de tubulação e diâmetro, somam-se todos os comprimentos equivalentes, obtendo-se o comprimento total equivalente da tubulação. Esse valor é utilizado no cálculo das perdas de carga, conforme a Equação 30:

$$L_{eq} = L_{e1} + L_{e2} + L_{e3} + \dots + L_{en} \quad (30)$$

Para o tubo de 5 polegadas, tem-se:

$$L_{eq1} = 1,1 + 19,3 + 2,7 = 23,1 \text{ m} \quad (31)$$

Para o tubo de 8 polegadas, tem-se:

$$L_{eq2} = 25 + 2 \cdot 1,5 = 28 \text{ m} \quad (32)$$

Para o tubo de 10 polegadas, tem-se:

$$L_{eq3} = 20 + 2 \cdot 1,8 = 23,6 \text{ m} \quad (33)$$

Desse modo, utilizando a Equação 12, calcula-se a perda de carga para cada tipo de tubulação correspondente, H_{s1} tubulação de 5", H_{s2} tubulação de 8" e H_{s3} tubulação de 10".

$$H_{s1} = 10,667 \cdot \frac{23,1}{0,127^{4,87}} \cdot \left(\frac{0,065}{125}\right)^{1,852} \quad (34)$$

$$\therefore H_{s1} = 4,722 \text{ m} \quad (35)$$

$$H_{s2} = 10,667 \cdot \frac{28}{0,2032^{4,87}} \cdot \left(\frac{0,065}{125}\right)^{1,852} \quad (36)$$

$$\therefore H_{s2} = 0,580 \text{ m} \quad (37)$$

$$H_{s3} = 10,667 \cdot \frac{23,6}{0,254^{4,87}} \cdot \left(\frac{0,065}{125}\right)^{1,852} \quad (38)$$

$$\therefore H_{s3} = 0,164 \text{ m} \quad (39)$$

As perdas por desnível estão presentes, uma vez que há variações de altura tanto na sucção quanto no recalque do sistema de bombeamento, conforme indicado na Tabela 11.

Tabela 11 – Desnível Recalque e Sucção.

Desnível Recalque (h_r)	31 m
Desnível Sucção(h_s)	3 m

Fonte: Autoria Própria.

Desse modo, as perdas totais do sistema se dá pela Equação 40:

$$H_m = H_r + H_s + H_{s1} + H_{s2} + H_{s3} + h_r + h_s \quad (40)$$

$$\therefore H_m = 56,174 \text{ mca} \quad (41)$$

O conjunto motobomba deve fornecer, na saída da bomba, uma pressão capaz de vencer as perdas de carga do sistema e atender à pressão requerida na extremidade da tubulação, ou seja, à pressão na base do pivô especificada na Tabela 6.

Dessa forma, calcula-se a pressão correspondente em altura manométrica (H_t) fornecida pela bomba, conforme a Equação 42.

$$\therefore H_t = 56,174 + 10,1974 \cdot 6,28 = 120,227 \text{ mca} \quad (42)$$

A pressão de saída da bomba, essencial para assegurar o desempenho hidráulico do sistema de irrigação, está diretamente vinculada à altura manométrica total e às perdas de carga ao longo da tubulação. Para que a bomba atinja a pressão exigida, é fundamental que o motor forneça energia suficiente para superar tanto o desnível geométrico quanto as resistências hidráulicas impostas pelo sistema.

3.1.2 Potência Requerida do Motor.

No contexto deste estudo, a potência fornecida pelo motor é analisada como um elemento essencial para garantir que a bomba atenda às exigências hidráulicas do sistema de irrigação. Essa potência deve ser suficiente para superar a altura manométrica total (H_t), a qual é composta pelo desnível geométrico, pelas perdas de carga e pela pressão requerida na saída.

Com base nos dados obtidos, calculou-se a potência hidráulica necessária para o funcionamento do sistema, utilizando a Equação 2. Considerando γ como 9.810 N/m^3 , tem-se:

$$P_{hid} = 9.810 \cdot 0,065 \cdot 120,227 \quad (43)$$

$$\therefore P_{hid} = 76.662,746 \text{ W} \quad (44)$$

Para o cálculo da potência mecânica, necessita-se da curva característica de trabalho da bomba, dada pelo tamanho do rotor empregado em sua construção. Utiliza-se a Equação 1 em conjunto com Tabela 2 para encontrar a curva de trabalho. Tem-se:

$$P_{rotor} = \frac{15 \text{ kg/cm}^2}{3} \quad (45)$$

$$\therefore P_{rotor} = 5 \text{ kg/cm}^2 \text{ ou } 50 \text{ mca} \quad (46)$$

Dessa forma, para uma vazão nula, a pressão fornecida por um único rotor é de 50 mca. Isso corresponde à curva característica de um rotor com diâmetro de $\varnothing 295 \text{ mm}$, representada pela linha pontilhada nas Figuras 3 e 4.

A partir da Figura 3, utilizando a curva pontilhada do gráfico de rendimento e considerando uma vazão de $234 \text{ m}^3/\text{h}$, obtém-se um rendimento da bomba de $\eta_{bomba} = 78 \%$. Assim, com base na Equação 3, calcula-se a potência mecânica necessária no eixo da bomba:

$$P_m = \frac{76.662,746}{78\%} \quad (47)$$

$$\therefore P_m = 98.285,571 \text{ W} \quad (48)$$

A potência fornecida pelo motor, correspondente à potência elétrica consumida, deve ser superior à potência motriz, conforme definido na Equação 48, devido às perdas internas do motor elétrico. A relação entre essas potências é determinada pela eficiência do motor, apresentada em suas especificações na Figura 6. Considerando 95% de carga, encontra-se uma eficiência de $\eta_{motor} = 94\%$. Portanto, a potência elétrica consumida pelo motor, calculada pela Equação 21, é dada pela Equação 49.

$$P_{motor} = \frac{98.285,571}{94\%} \quad (49)$$

$$\therefore P_{motor} = 104.560 \text{ W} \quad (50)$$

Convertendo a potência ativa para cv, através da conversão $1 \text{ kW} = 1,3596 \text{ cv}$, tem-se que o motor está trabalhando com 142 cv, Equação 51.

$$\therefore P_{motor} = 104,56 \text{ kW} \cdot 1,3596 \approx 142 \text{ cv} \quad (51)$$

Com a potência elétrica do motor determinada, procede-se ao cálculo da potência aparente do sistema, uma vez que a potência obtida refere-se apenas à componente ativa da máquina. Considerando a curva do fator de potência para 95% de carga, apresentada na Figura 6, obtém-se um fator de potência (FP) de 0,81. Assim, pela Equação 17, calcula-se:

$$0,81 = \frac{104.560}{P_{ap}} \quad (52)$$

$$\therefore P_{ap} = 129,085 \text{ kVA} \quad (53)$$

Com a potência aparente do motor elétrico determinada, calcula-se a potência reativa indutiva consumida pelo motor no sistema elétrico. A Equação 16 é utilizada para obter o valor de P_{re} .

$$129.085 = \sqrt{104.560^2 + P_{re}^2} \quad (54)$$

$$P_{re} = \sqrt{5.730.144} \quad (55)$$

$$\therefore P_{re} = 75,70 \text{ kVAR} \quad (56)$$

3.2 Sistema Sem Manutenção.

Com base nas medições e dados coletados no Capítulo 2, a potência elétrica consumida pelo motor no sistema sem manutenção é determinada pela Equação 22. Utilizando os dados da Tabela 4, obtém-se:

$$P_{ele} = \sqrt{3} \cdot 385 \cdot 240 \quad (57)$$

$$\therefore P_{ele} = 160,06 \text{ kVA} \quad (58)$$

Considerando o fator de potência (FP) do motor para 120% da carga, segundo a curva de desempenho da máquina, tem-se $FP = 0,80$. Assim, a potência elétrica ativa é dada pela Equação 17:

$$0,80 = \frac{P_{at}}{160,60 \cdot 10^3} \quad (59)$$

$$\therefore P_{at} = 128,03 \text{ KW} \quad (60)$$

Convertendo a potência ativa para cv, utilizando a conversão $1 \text{ kW} = 1,3596 \text{ cv}$, verifica-se que o motor está operando com aproximadamente 174 cv, conforme a Equação 61:

$$\therefore P_{motor} = 128,03 \cdot 10^3 \cdot 1,3596 = 174 \text{ cv} \quad (61)$$

Com o motor elétrico demandando uma nova potência ativa, é necessário calcular o novo consumo de potência reativa do sistema elétrico. Utilizando Equação 16, tem-se:

$$160,06 \cdot 10^3 = \sqrt{(128,03 \cdot 10^3)^2 + P_{re}^2} \quad (62)$$

$$\therefore P_{re} = 96,06 \text{ kVAR} \quad (63)$$

Durante a coleta de dados com o sistema em operação, a pressão máxima registrada na saída da bomba foi de 92 mca, conforme a Tabela 4. Com essa pressão e a potência elétrica medida, é possível determinar a vazão para a qual o sistema sem manutenção está demandando da bomba. Para calcular a vazão efetiva nessas condições, considera-se inicialmente que a eficiência do motor (n_{motor}) é 93 % para uma carga de 115% (operando com 174 cv, sendo a potência nominal de 150 cv). A potência motriz é então calculada pela Equação 21.

$$128,03 \cdot 10^3 = \frac{P_m}{93 \%} \quad (64)$$

$$P_m = 119,07 \text{ kW} \quad (65)$$

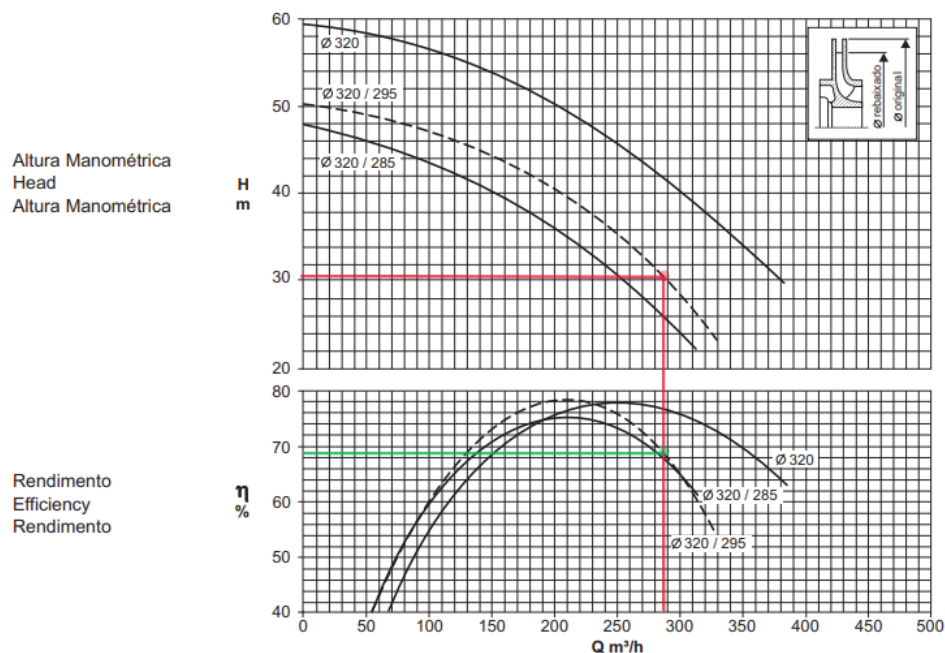
O rendimento da bomba, para essa condição de funcionamento, pode ser determinado a partir da curva de rendimento do equipamento, apresentada na Figura 3. De acordo com essa curva, é necessário conhecer a pressão fornecida por cada rotor. Esse cálculo pode ser realizado de forma semelhante ao descrito na Equação 1, adotando P_{ensaio} como a pressão medida durante o funcionamento. Assim, tem-se:

$$P_{rotor} = \frac{92}{3} \tag{66}$$

$$\therefore P_{rotor} = 30,66 \text{ mca} \tag{67}$$

Traçando uma reta a partir de 30,66 m.c.a. até a curva tracejada — correspondente à curva característica do rotor com diâmetro de 285 mm — obtém-se, pela reta verde na Figura 12, um rendimento da bomba (η_{bomba}) de 68%. A partir da curva de desempenho do rotor, o fabricante especifica uma vazão de $290 \text{ m}^3/\text{s}$ para as condições de pressão e rendimento observadas. Com esses dados, a potência hidráulica pode ser determinada por meio da Equação 3.

Figura 12 – Curva de Trabalho Bomba KSB com Intersecção de Retas.



Fonte: Adaptado de (KSB, 2020).

$$119,07 \cdot 10^3 = \frac{P_{hid}}{68 \%} \tag{68}$$

$$\therefore P_{hid} = 80,97 \text{ kW} \tag{69}$$

Pela Equação 2 a vazão correspondente à pressão obtida no ensaio de 92 mca.

$$80,97 \cdot 10^3 = 9810 \cdot 92 \cdot Q_o \tag{70}$$

$$\therefore Q_o = 0,0897 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{ ou } 322,92 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \tag{71}$$

3.3 Sistema Após Intervenção.

A partir da manutenção em determinada parte do sistema, o conjunto motobomba começou a operar com as características mostradas na Tabela 5. Com base nos valores obtidos, realiza-se o levantamento das potências ativas, reativas e aparente do sistema, além da estimação de vazão na bomba, de modo semelhante à Seção 3.2.

A partir da Equação 22, tem-se:

$$P_{ele} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 210 \quad (72)$$

$$\therefore P_{ele} = 138,22 \text{ kVA} \quad (73)$$

Considerando um FP em 100 % da carga nominal do motor, tem-se pela Figura 6 um fator de potência de 0,81. Assim, a potência ativa é dada pela Equação 17:

$$0,81 = \frac{P_{at}}{138,22 \cdot 10^3} \quad (74)$$

$$\therefore P_{at} = 111,95 \text{ kW ou } 152 \text{ cv} \quad (75)$$

A parcela de potência reativa é dada pela Equação 16:

$$138,21 \cdot 10^3 = \sqrt{(114,62 \cdot 10^3)^2 + P_{re}^2} \quad (76)$$

$$\therefore P_{re} = 81,07 \text{ kVar} \quad (77)$$

De posse dos valores de potência do motor, estima-se a vazão do sistema de bombeamento com base nas curvas de desempenho da bomba e nas medições realizadas no sistema. Para isso, a partir da Figura 6, identifica-se uma eficiência do motor de 94% para uma carga de 100%, resultando em uma potência motriz calculada conforme a Equação 79:

$$111,95 \cdot 10^3 = \frac{P_m}{94 \%} \quad (78)$$

$$P_m = 105,23 \text{ kW} \quad (79)$$

O rendimento da bomba para o terceiro caso pode ser encontrado de mesmo modo que a etapa anterior, Seção 3.2. Deste modo, tem-se:

$$P_{rotor} = \frac{114}{3} \quad (80)$$

$$\therefore P_{rotor} = 38 \text{ mca} \quad (81)$$

Realizando a intersecção do ponto de 38 *mca* na curva de altura manométrica, Figura 3, encontra-se um rendimento de 78% para um vazão de 230 m^3/h . Portanto, a potência hidráulica é dada pela Equação 2.

$$105,23 \cdot 10^3 = \frac{P_{hid}}{78 \%} \quad (82)$$

$$P_{hid} = 82,08 \text{ kW} \quad (83)$$

Desse modo, a a vazão correspondente às características de funcionamento do sistema após intervenção é dada pela Equação 84.

$$82,08 \cdot 10^3 = 9810 \cdot 114 \cdot Q_o \quad (84)$$

$$\therefore Q_o = 0,0734 \frac{m^3}{s} \text{ ou } 264,22 \frac{m^3}{h} \quad (85)$$

De posse das características obtidas nas três análises, procede-se ao agrupamento dos dados para a avaliação do consumo elétrico da unidade consumidora. A próxima seção, portanto, abordará a análise dos resultados apresentados nesta etapa, além de discutir a intervenção realizada no estudo de caso.

3.4 Desempenho do Motor e da Bomba.

A Tabela 12 compara o desempenho do motor em condição ideal, sem manutenção e pós-intervenção. Já a Tabela 13 apresenta o comparativo da bomba nas mesmas condições.

Tabela 12 – Comparativo Motor em Condição Ideal, Sem Manutenção e Pós Intervenção.

Condição	Potência Ativa (P_{at}) [kW]	Potência Motor (P_{motor}) [cv]	Potência Reativa (P_{re}) [kVar]
Ideal	104,56	142	75,70
Sem Manutenção	128,03	174	96,06
Pós Intervenção	111,95	152	81,07

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 13 – Comparativo Bomba em Condição Ideal, Sem Manutenção e Após Intervenção.

Condição	Rendimento [%]	Vazão (Q_o) [m^3/s]	Pressão [<i>mca</i>]
Ideal	78	0,065	120
Sem Manutenção	68	0,089	92
Pós Intervenção	78	0,073	114

Fonte: Autoria Própria.

3.5 Impacto da Falta de Manutenção no Sistema de Bombeamento.

O sistema de bombeamento sem manutenção demonstrou um aumento de 22,44% no consumo de potência elétrica ativa, ocasionado pelo incremento na vazão do sistema, conforme ilustrado na Figura 4 (Potência Necessária por Vazão Entregue pela Bomba). Consequentemente, o motor, com potência nominal de 150 cv, operou a 174 cv, um aumento de 16% acima do seu limite de trabalho contínuo, acelerando a deterioração da vida útil do equipamento. Essa deterioração acelerada ocorre porque o motor trabalha acima de seu fator de serviço (FS), um coeficiente que indica a capacidade de um motor elétrico operar acima de sua potência nominal por períodos limitados sem comprometer sua vida útil. De acordo com a folha de dados do motor WEG W21 (Figura 13), o FS é de 1,00, por se tratar de um modelo mais antigo.

Além do maior consumo elétrico, que resultou em um aumento de 22,44% na potência ativa e 26,90% na potência reativa, totalizando um aumento de 24% na potência aparente, o gasto financeiro também foi significativamente maior neste estudo de caso. Devido à sobrecarga da máquina elétrica trifásica, que levou ao superaquecimento dos enrolamentos das bobinas, o motor apresentou fuga de tensão dos enrolamentos para a massa do equipamento (partes metálicas da estrutura). Isso resultou na necessidade de rebobinamento do motor, ou seja, substituição dos cabos internos e externos que constituem o enrolamento da máquina, gerando um custo de R\$ 14.190,00 para o agricultor.


3.6 Resultados Após Intervenção no Sistema.

Após uma intervenção parcial no sistema, que consistiu na troca do rebobinamento do motor elétrico e na manutenção em partes específicas das tubulações da adutora, realizando a troca de tubos perfurados por desgastes devido à anos de usos e troca nas vedações dos tubos de aço galvanizados. Foram obtidos resultados superiores em comparação com o sistema sem manutenção. Por ser um sistema de bombeamento extenso e enterrado, as manutenções concentraram-se em áreas visíveis e mais acessíveis à equipe. Trechos enterrados sob estradas e em áreas de plantio foram excluídos, e as ações se dedicaram à troca de vedações e de tubos furados devido à oxidação ao longo dos anos.

Essa intervenção resultou em um aumento de apenas 7% na potência ativa em comparação com a condição ideal, e uma redução de 12,55% em comparação com o sistema sem manutenção. O motor passou a operar com 152 cv, apenas 1,3% acima de sua potência nominal.

Ao converter o aumento do consumo elétrico da Tabela 12 para valores monetários, utilizando a Equação 23, a Tabela 14 apresenta o custo do consumo de potência ativa, considerando a tarifação de energia (TE). Para a comparação dos resultados, foi considerado um funcionamento diário de 8 horas por 30 dias para todas as condições (ideal, sem manutenção e após intervenção). Além disso, considerou-se o início da operação às 19 horas, abrangendo o período de tarifa de ponta (entre 18h e 21h) e o período complementar de fora de ponta

Figura 13 – Folha de Dados Motor WEG W21.

FOLHA DE DADOS			
Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola			
Cliente	:		
Linha do produto	: W21 Explosão Standard Trifásico	Código do produto	: 13000389
Carcaça	: 280S/M	Tempo de rotor bloqueado	: 34s (frio) 19s (quente)
Potência	: 110 kW (150 HP-cv)	Elevação de temperatura	: 80 K
Número de polos	: 4	Regime de serviço	: S1
Frequência	: 60 Hz	Temperatura ambiente	: -20°C a +40°C
Tensão nominal	: 220/380/440 V	Altitude	: 1000 m
Corrente nominal	: 374/217/187 A	Grau de proteção	: IP55
Corrente de partida	: 3179/1840/1590 A	Método de refrigeração	: IC411 - TFVE
Ip/In	: 8.5	Forma construtiva	: B3D
Corrente a vazio	: 150/86.8/75.0 A	Sentido de rotação ¹	: Ambos
Rotação nominal	: 1788 rpm	Nível de ruído ²	: 80.0 dB(A)
Escorregamento	: 0.67 %	Método de partida	: Partida direta
Conjugado nominal	: 59.9 kgfm	Massa aproximada ³	: 809 kg
Conjugado de partida	: 260 %		
Conjugado máximo	: 290 %		
Classe de isolamento	: F		
Fator de serviço	: 1.00		
Momento de inércia (J)	: 2.57 kgm ²		
Categoria	: N		
Potência	50%	75%	100%
Rendimento (%)	93.0	94.0	94.1
Cos Φ	0.69	0.78	0.82
		Esforços na fundação	
		Tração máxima	: 1116 kgf
		Compressão máxima	: 1925 kgf
		<u>Dianteiro</u>	<u>Traseiro</u>
Tipo de mancal	:	6316 C3	6316 C3
Vedação	:	Retentor	Retentor
Intervalo de lubrificação	:	8569 h	8569 h
Quantidade de lubrificante	:	34 g	34 g
Tipo de lubrificante	:	Mobil Polyrex EM	

Fonte: Adaptado (WEG, 2024).

(ANEEL, 2023a).

3.7 Análise dos Custos de Energia Elétrica.

Tabela 14 – Custo com Energia Elétrica Ativa em Condição Ideal e Sem Manutenção.

Condição	Tarifa [R\$/kWh]		Horas Por Tarifa		Custo Total [R\$]
	Ponta	Fora Ponta	Ponta	Fora Ponta	
Ideal					7.465,00
Sem Manutenção	0,4042	0,2619	2	6	9.140,00
Após Intervenção					7.993,00

Fonte: Autoria Própria.

A tarifação da energia reativa ocorre de forma diferente. Embora calculada pela Equação 24, o período de tarifação possui uma regra de contabilização específica. De acordo com a ANEEL (2021), a energia reativa capacitiva é medida exclusivamente entre 24h e 6h, período em que a energia reativa indutiva não é contabilizada. Considerando o funcionamento do motor das 19h às 3h (8 horas diárias), a concessionária realizará a leitura da energia reativa apenas até as 24h e a partir das 6h, totalizando cinco horas de energia reativa contabilizada.

Outra consideração importante é em relação ao fator de potência da unidade consumidora (f_T) e ao montante de energia ativa medida ao longo do tempo ($EEAM_T$) em intervalos de uma hora. Para este estudo de caso, os valores do fator de potência do próprio motor foram considerados como o fator de potência da unidade consumidora, sendo inalteráveis durante o funcionamento. Para o valor da energia, considerou-se o mesmo valor de consumo de potência ativa durante todo o período. As tarifas utilizadas referem-se ao mês de outubro de 2024 da concessionária CPFL. A partir da Equação 24 e das considerações feitas, os gastos com energia reativa estão representados na Tabela 15. Observa-se um aumento de 35% no gasto com reativos em comparação com a condição ideal do sistema, e um aumento de 7% em comparação com o sistema após intervenção, o que se traduz em uma redução de 21% na potência reativa do sistema sem manutenção para o sistema com intervenção.

Tabela 15 – Custo com Energia Elétrica Reativa em Condição Ideal e Sem Manutenção.

Condição	Tarifa [R\$/kWh]		Horas por Dias		FP_{motor}	FP_{limite}	Custo Total [R\$]
	Ponta	Ponta Fora	Ponta	Ponta Fora			
Ideal					0,81		587,52
Sem Manutenção	0,2759	0,2758	2	3	0,80	0,92	794,66
Após Intervenção					0,81		629,05

Fonte: Autoria Própria.

Esse consumo de energia reativa pode ser mitigado com a correção do fator de potência, utilizando um banco de capacitores o mais próximo possível da carga, neste caso o motor de 150 cv. Dessa forma, o consumidor não pagará mais pelo consumo de energia reativa, e a distorção harmônica total de tensão presente no sistema não impacta a correção do fator de potência. Segundo as restrições impostas pelo Prodlist Módulo 8, o limite para $DTT\%$ é de 10%, sendo apenas 2,2% no estudo de caso, bem abaixo do limite estabelecido.

3.8 Análise da Vazão e Eficiência da Bomba.

De acordo com os resultados da Tabela 13, o sistema sem manutenção apresenta uma vazão 37% maior do que o necessário para o pivô. Esse aumento se deve ao desgaste das vedações nos tubos da adutora e furações por oxidação, o que justifica a queda no consumo hídrico do sistema após os reparos. Nota-se ainda que a vazão calculada para o sistema sem manutenção, tanto pelo cálculo quanto pelo valor tabelado pelas curvas de trabalho (Figuras 3 e 4), apresenta disparidade de valor. Essa diferença na vazão decorre principalmente do valor de rendimento adotado para o cálculo, uma vez que a bomba está com anos de uso, refletindo em desgastes de buchas, anéis e rotores. Dessa forma, as curvas de trabalho para o tamanho do rotor podem apresentar associações de pressão, vazão e rendimento diferentes da curva original. Isso se torna evidente ao escolher um rendimento utilizando a potência necessária em vez da pressão fornecida por cada rotor, que, nesse caso, passa para um rendimento de 54%.

3.9 Custos de Manutenção e Retorno do Investimento.

Os custos de manutenção e substituição do enrolamento do motor estão representados na Tabela 16. O custo total da execução dos serviços se equipara ao valor gasto mensalmente com a conta de energia na propriedade. Antes da intervenção do estudo de caso, a unidade consumidora em questão tinha um gasto mensal médio de R\$ 28.000,00 com energia elétrica; portanto, a intervenção gerou uma economia de aproximadamente R\$ 7.500,00 por mês. Desse modo, o investimento realizado terá um retorno em aproximadamente 2 meses e meio, a partir do cálculo de payback simples. Os valores estão dispostos na Tabela 17.

Tabela 16 – Gastos para Correção Parcial de Estudo de Caso.

Rebobinamento	Manutenção na Adutora	Total
R\$ 14.190,00	R\$ 6.323,00	R\$ 20.513,00

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 17 – Dados Payback da Intervenção no Estudo de Caso.

Energia Elétrica Mensal Média [R\$]		
Condição	Sem Manutenção	Após Intervenção
Custo	28.000,00	20.500,00
Payback		
	Mensal [mês]	Financeiro [R\$]
Retorno	2,5	7.500,00

Fonte: Autoria Própria.

4 Conclusão

Os gastos com energia elétrica na prática são maiores devido à inclusão de cobranças de bandeiras, impostos, Tarifação por Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), consumo de energia (TE), demanda contratada e multas por fator de potência abaixo do mínimo e extrapolação da demanda. Esses fatores contribuem para o encarecimento da produção agrícola e, conseqüentemente, para a redução da eficiência energética do sistema estudado.

As práticas de intervenção, como demonstrado no presente estudo de caso, comprovam a necessidade de realizar o monitoramento e a manutenção em sistemas de bombeamento, aumentando assim sua eficiência elétrica e hídrica. A análise da qualidade de energia é de suma importância para o tema, pois, como apresentado no estudo de caso, o consumo de energia reativa indutiva gerada pelo motor proporciona um aumento desnecessário nos gastos com energia elétrica. Isso ocorre porque a unidade consumidora pode e deve corrigir seu fator de potência por meio da instalação de bancos capacitivos ou indutivos.

Conhecer a metodologia de tarifação da energia também é de suma importância para o profissional prestador de serviço e para os consumidores, devido à possibilidade de desenvolver estratégias de irrigação em horários nos quais a contabilização de energia reativa indutiva não é realizada.

O desenvolvimento de estudos para aumentar a eficiência energética em sistemas de irrigação deve ser sempre realizado, seja para novos produtos e métodos, ou para a adequação de sistemas existentes. Conforme apresentado no estudo de caso, a distorção harmônica impacta a qualidade de energia, possuindo um limite de trabalho a ser seguido. No entanto, no caso apresentado, não interferiu na eficiência do sistema, mas análises futuras poderão indicar um impacto negativo à rede de distribuição.

Estudos futuros poderão abordar a utilização do sistema de bombeamento em horários de baixa tarifa elétrica para elevar a água para tanques mais altos e utilizar a gravidade para irrigação em horários de alto custo tarifário. Análises de substituição de equipamentos antigos por equipamentos novos mais eficientes também podem ser realizadas.

Em suma, a análise do estudo de caso demonstrou o impacto da ausência de manutenção no sistema de bombeamento e na adutora, refletindo diretamente na conta de energia. Além disso, caracterizou o aumento não só da potência elétrica, mas também da água utilizada para irrigação, e apresentou ações para sua correção. A eficiência energética deve ser sempre buscada e alcançada na agricultura e demais setores da economia, e sempre haverá estudos a serem realizados e descobertas a serem feitas.

Referências

- ALEXANDER CHARLES K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. [S.l.]: Bookman, McGraw Hill, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- ALTOÉ, L. et al. Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 31, n. 89, p. 285–297, jan./abr. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 5.
- ANEEL. **Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. 2012. <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 abr. 2012. Citado na página 4.
- ANEEL. **Resolução Normativa n. 888/2020: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)**. Brasília, DF: [s.n.], 2020. <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020888_prodist_modulo_8_v11.pdf>. Citado na página 17.
- ANEEL. **Resolução Normativa n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. 2021. <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>>. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 dez. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 18, 20 e 34.
- ANEEL. **Resolução Homologatória n. 3.183, de 4 de abril de 2023**. 2023. <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20233183ti.pdf>>. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 4 abr. 2023. Citado na página 34.
- ANEEL. **Resolução Normativa n. 1.059, de 7 de fevereiro de 2023**. 2023. <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf>>. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 fev. 2023. Citado na página 4.
- BRASIL. **Lei n. 9.991, de 24 de julho de 2000**. 2000. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 jul. 2000. Citado na página 2.
- BRASIL. **Decreto n. 4.059, de 19 de dezembro de 2001**. 2001. <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/d4059.htm>. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 20 dez. 2001. Citado na página 3.
- BRASIL. **Lei n. 10.295, de 17 de outubro de 2001**. 2001. <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110295.htm>. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 out. 2001. Citado na página 3.
- BRASIL. **Decreto n. 9.864, de 27 de junho de 2019**. 2019. <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/D9864.htm>. Citado na página 3.
- COELHO M. M. L. P.; BAPTISTA, M. B. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. [S.l.]: Editora UFMG, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 1, 5, 11, 12 e 13.
- ENERGIA, B. M. de Minas e. **Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030)**. Brasília, DF: [s.n.], 2007. <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-deEnergia-PNE-2030>>. Citado na página 3.
- ENERGIA, B. M. de Minas e. **Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf)**. Brasília, DF: [s.n.], 2011. <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-eficiencia-energetica/documentos/plano-nacional-eficiencia-energetica-pdf>>. Citado na página 3.

- ENERGIA, B. M. de Minas e. **Procel: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**. Brasília, DF: [s.n.], 2024. <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/procel>>. Citado na página 2.
- EPE. **Matriz energética e elétrica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2023. <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Citado na página 3.
- EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2024. <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Citado na página 4.
- FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 13, 16 e 18.
- GALAXYCMS. **Comprimentos Equivalentes em Conexão**. 2015. Disponível em: <https://www.galaxcms.com.br/up_crud_comum/910/TABELAPERDADECARGAEMCONEXOES-20160801153234.pdf>. Citado na página 15.
- GOMES, H. P. **Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética**. [S.l.]: Editora UFPB, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11 e 14.
- JÚNIOR A. A. S.; CORDEIRO, M. R. **Aumento da eficiência energética aplicada aos modelos atuais de irrigação: Estudo de caso**. 2024. Citado na página 5.
- KSB. **Catálogo de Produtos KSB ETA**. 2020. <<https://www.ksb.com/pt-br/produtos/catalogo-de-produtos>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 30.
- LIMA, A. C. et al. Avaliação e análise da eficiência energética na irrigação em sistemas pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 499–505, maio 2009. Citado na página 4.
- MORENO, M. A. et al. Energy analysis of irrigation delivery systems: monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency. **Irrigation Science**, v. 28, n. 5, p. 437–446, 2010. Citado na página 1.
- NETTO, J. M. A. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. [S.l.]: Editora Edgar Blucher, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- OJEDA W. B.; SIFUENTES, E. I. R. A. A. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México. In: **Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 4, p. 63–66. Citado na página 1.
- POPOVIĆ, T. et al. Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 141, p. 185–195, set. 2017. Citado na página 4.
- SCAPIN, B. A. **Eficiência energética em sistemas de irrigação por bombeamento**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2019. Citado na página 11.
- SOUZA, D. F. et al. **Efficiency, quality, and environmental impacts: A comparative study of residential artificial lighting**. [S.l.]: Elsevier, 2019. <<https://hdl.handle.net/10419/243596>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 5.

SOUZA R. D. S.; OLIVEIRA, R. C. L. M. E. T. Analysis of the brazilian energy efficiency program for electricity distribution systems. **Energies**, Basel, v. 10, n. 11, p. 1777, nov. 2017. Citado na página 1.

TESTEZLAF, R. **Engenharia de Irrigação: Tubos e Acessórios**. [S.l.]: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2015. Citado na página 11.

WEG. **W21 explosão standard 150 cv 4P 280S/M 3F**. 2024. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Atmosferas-Explosivas/%C3%80-Prova-de-Explos%C3%A3o-%28Ex-db%29/W21Xdb-/W21-Explos%C3%A3o-Standard-150-cv-4P-280S-M-3F-220-380-440-V-60-Hz-IC411---TFVE---B3D/p/13000389>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 34.