



INSITUTO FEDERAL GOIANO
CAMPUS TRINDADE
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA AOS MODELOS ATUAIS DE
IRRIGAÇÃO: ESTUDO DE CASO**

TRINDADE – GOIÁS

2024

AGNEUSON ALVES DA SILVA JÚNIOR
MARCELO DOS REIS CORDEIRO

**AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA AOS MODELOS ATUAIS DE
IRRIGAÇÃO: Estudo de caso**

Artigo Científico apresentado ao Instituto Federal Goiano, Campus de Trindade como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Robert de Souza Bonuti.

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

C794a Cordeiro, Marcelo
AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA AOS
MODELOS ATUAIS / Marcelo Cordeiro; orientador
Robert Bonuti. -- Trindade, 2024.
81 p.

TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) --
Instituto Federal Goiano, Campus Trindade, 2024.

1. Energia. 2. eficiência energética. 3.
irrigação. 4. viabilidade econômica. 5. automação. I.
Bonuti, Robert, orient. II. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

AGNEUSON ALVES DA SILVA JÚNIOR | MARCELO DOS REIS CORDEIRO

Matrícula:

201810820264011 | 20181082026300

Título do trabalho:

AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA AOS MODELOS ATUAIS DE IRRIGAÇÃO: ESTUDO DE CASO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 13 /02 /2024

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que 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;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano 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;
- Que 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 Goiano.

Documento assinado digitalmente



MARCELO DOS REIS CORDEIRO

Data: 10/02/2024 13:23:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Trindade

Local

13 /02 /2024

Data

Documento assinado digitalmente



AGNEUSON ALVES DA SILVA JUNIOR

Data: 10/02/2024 13:41:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado eletronicamente por:

- Robert de Souza Bonuti, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/02/2024 10:23:02.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 14/02/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 571517

Código de Autenticação: a462b93cb4



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Trindade

Av. Wilton Monteiro da Rocha, S/N, Setor Cristina II, TRINDADE / GO, CEP 75380-000

(62) 3506-8000



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 4/2024 - CE-TRI/GE-TRI/CMPTRI/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

As sete (07) do mês de fevereiro de 2024, às 17 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Prof. Dr. Vinicius Otto de Aguiar Ritzmann Marzall, Prof. Dr. Cleber Asmar Ganzaroli, Prof Me. Robert de Souza Bonuti, para examinar o Trabalho de Curso intitulado “**AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA AOS MODELOS ATUAIS DE IRRIGAÇÃO: Estude caso**” dos estudantes AGNEUSON ALVES DA SILVA JÚNIOR Matrícula nº 2018108202640111 e MARCELO DOS REIS CORDEIRO, Matrícula nº 2018108202630027 do Curso de Engenharia Elétrica do IF Goiano – Campus Trindade - Goiás. A palavra foi concedida aos estudantes para a apresentação oral do TCC, houve arguição dos candidatos pelos membros da banca examinadora. Após esta etapa, a banca examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** dos estudantes. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Prof Me. Robert de Souza Bonuti

Orientador

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Cleber Asmar Ganzaroli

Membro

(Assinado Eletronicamente)

Prof Dr. Vincius Otto de Aguiar Ritzmann Marzall

Membro

Observação: Fazer as devidas correções indicadas pela banca no trabalho enviado por e-mail pelos avaliadores.

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- Robert de Souza Bonuti, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/02/2024 10:08:37.
- Vinicius Otto de Aguiar Ritzmann Marzall, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/02/2024 14:04:42.
- Cleber Asmar Ganzaroli, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/02/2024 17:15:49.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 07/02/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 569849

Código de Autenticação: 06b26fcf54



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Trindade

Av. Wilton Monteiro da Rocha, S/N, Setor Cristina II, TRINDADE / GO, CEP 75380-000
(62) 3506-8000

Dedicatória

Dedicamos este trabalho aos nossos pais, por sempre estarem nos incentivando, nos acompanhando e nos oferecendo suporte para mais esta etapa de nossas vidas.

Agradecimentos

Agradecemos a Deus em primeiro lugar, por sempre estar iluminando nossos caminhos e nos dando proteção.

Aos nossos pais, pela dedicação e compreensão e por sempre acreditarem em nós em todos os momentos das nossas vidas.

Em especial, o nosso orientador Professor Mestre Robert de Souza Bonuti e a nossa docente da disciplina de TCC 1 e 2 Prof. Dra. Priscilla Araújo Juá Stecanella, pelo acompanhamento durante a execução desse trabalho, por sua dedicação e atenção no decorrer de suas orientações, nos ensinando o caminho certo a percorrer.

Resumo

O objetivo deste estudo é compreender, por meio de estudos de caso, o aumento da eficiência energética aplicada aos modelos atuais de irrigação e o que pode ser feito para aprimorar a eficiência, reduzindo o consumo de energia elétrica e água. No contexto atual de mudanças climáticas e da tendência ascendente nos preços da energia, é necessário desenvolver metodologias, ferramentas e ações que visem otimizar o uso de recursos energéticos para benefícios ambientais e econômicos. Embora a irrigação não exija tanta energia quanto a indústria ou atividades urbanas, o custo da energia é um dos principais insumos para os irrigantes. Além disso, a irrigação é um dos setores agrícolas que está aumentando seu consumo de energia devido ao aumento de máquinas elétricas e à necessidade de sistemas de irrigação para manter ou aumentar os níveis de produção. Os resultados deste estudo, demonstrados por meio de estudos de caso, destacam a eficiência energética aplicada aos modelos atuais de irrigação. Especialmente, grandes produtores envolvidos em cultivos extensivos ou até mesmo pequenos produtores que adotam tais sistemas experimentarão um aumento significativo na eficiência energética da irrigação. Este sistema prova ser economicamente viável ao longo da vida útil do equipamento, contribuindo para a redução das despesas anuais com eletricidade e potencialmente cortando pela metade o consumo de recursos elétricos e hídricos.

Palavras-chave: Energia, eficiência energética, irrigação, viabilidade econômica, automação, sensores.

Abstract

The objective of this study is to understand, through case studies, the increase in energy efficiency applied to current irrigation models and what can be done to enhance efficiency while reducing electrical and water consumption. In today's context of climate change and the rising trend in energy prices, it is necessary to develop methodologies, tools, and actions that aim to optimize the use of energy resources for environmental and economic benefits. Although irrigation does not require as much energy as industry or urban activities, the cost of energy is one of the main inputs for irrigators. Additionally, irrigation is one of the agricultural sectors increasing its energy consumption due to the rise in electric machinery and the need for irrigation systems to maintain or increase production levels. The results of this study, demonstrated through case studies, highlight the energy efficiency applied to current irrigation models. Particularly, large-scale producers engaging in extensive cultivation or even small-scale producers adopting such systems will experience a significant increase in irrigation energy efficiency. This system proves to be economically viable throughout the equipment's lifespan, contributing to reduced annual expenses on electricity and potentially cutting the consumption of electrical and water resources in half.

Keywords: Energy, energy efficiency, irrigation, economic viability, automation, sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Irrigação por superfície através de sulcos na cultura do milho.....	20
Figura 2.2. Irrigação por Inundação em plantação de arroz.....	20
Figura 2.3. Aspersão convencional.....	21
Figura 2.4. Irrigação com autopropelido.....	22
Figura 2.5. Pivô central.....	22
Figura 2.6. Pivô linear.....	23
Figura 2.7. Pivôs centrais no deserto.....	23
Figura 2.8. Irrigação por microaspersão para banana.....	24
Figura 2.9. Irrigação por gotejo superficial para manga.....	24
Figura 2.10. Irrigação por gotejo subterrâneo para jardim.....	25
Figura 2.11. Subirrigação no projeto Formoso.....	26
Figura 2.12. Controlador para irrigação.....	28
Figura 2.13. Válvula solenoide.....	28
Figura 2.14. Tensiometro.....	29
Figura 2.15. Sensor Watermark.....	30
Figura 2.16. Sensor de constante dielétrica.....	31
Figura 2.17. Sensor de chuva.....	31
Figura 2.18. Sensor de fluxo.....	32
Figura 2.19. Irrigação automatizada com sensor de umidade.....	33
Figura 2.20. Campo experimental de cultivo de noz-pecã com as localizações dos nós sensores ilustrados com os círculos vermelhos: (a) Vista lateral da área 1; setas amarelas indicam os posicionamentos dos sensores. (b) Vista de satélite.....	34
Figura 2.21. Sistema de controle em rede para irrigação agrícola de precisão.....	35
Figura 2.22. Placa Arduino MKR.....	36
Figura 4.1. Divisão de setores.....	40
Figura 4.2. Motor Antigo de baixa eficiência e rendimento.....	41
Figura 4.3. Aspersor do Confinamento.....	42
Figura 4.4. Registros manuais PVC.....	42
Figura 4.5. Quadro Elétrico Antigo.....	43

Figura 4.6. Conjunto Motobomba Atual com maior eficiência e controle.....	44
Figura 4.7. Sistema de Controle.....	44
Figura 4.8. Válvulas hidráulicas.....	45
Figura 4.9. Quadro de Comando com Controlador.....	45
Figura 4.10. Composição orçamentária para implantação do sistema do Estudo de Caso 1.....	47
Figura 4.11. Vista aérea das estufas.....	49
Figura 4.12. Sistema de gotejamento.....	49
Figura 4.13. Registros manuais PVC.....	50
Figura 4.14. Quadro de comando e proteção.....	51
Figura 4.15. Central do dosador de fertilizante.....	51
Figura 4.16. Quadro de controle e acionamento do dosador de fertilizante.....	52
Figura 4.17. Produção dos tomates em estufa.....	52
Figura 4.18. Composição orçamentária para implantação do sistema do Estudo de Caso 2.....	55
Figura 4.19. Microaspersor rondo.....	56
Figura 4.20. Conjunto Motobomba 100CV.....	57
Figura 4.21. Conjunto Filtros de areia.....	57
Figura 4.22. Registro de abertura e fechamento do setor.....	58
Figura 4.23. Quadro de comando e proteção.....	58
Figura 4.24. Válvulas elétricas.....	59
Figura 4.25. Conjunto de Solenoides.....	59
Figura 4.26. Composição orçamentária para implantação do sistema do Estudo de Caso 3.....	62
Figura 4.27. Pivô central.....	63
Figura 4.28. Motobomba antiga de 200 CV.....	64
Figura 4.29. Painel para acionar a motobomba.....	64
Figura 4.30. Parte interna do painel do pivô.....	65
Figura 4.31. Parte externa do painel do pivô.....	65
Figura 4.32. Conjunto Motobomba 200 CV.....	66
Figura 4.33. Vista externa do painel do pivô.....	66
Figura 4.34. Vista interna do painel do pivô.....	67
Figura 4.35. Vista externa do painel da motobomba.....	67

Figura 4.36. Vista interna do painel da motobomba.....	68
Figura 4.37. Vista interna do painel da motobomba.....	68
Figura 4.38. Tensiômetro.....	69
Figura 4.39. Estação meteorológica.....	69
Figura 4.40. Composição orçamentária para implantação do sistema do Estudo de Caso 4.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Valor tarifário de consumo de energia elétrica.....	38
Tabela 4.1: Comparação do sistema manual e automático- Características do Sistema de Despoeiramento.....	41
Tabela 4.2: Comparativo do consumo energético manual e automatizado.....	46
Tabela 4.3: Comparativo do consumo de água manual e automatizado.....	46
Tabela 4.4: Cálculo da Economia.....	47
Tabela 4.5: Payback (Tempo de Retorno do Valor Investido).....	48
Tabela 4.6: Comparação do sistema manual e automático- Características do Sistema de Gotejamento.....	53
Tabela 4.7: Comparativo do consumo energético manual e automatizado.....	53
Tabela 4.8: Comparativo do consumo de água manual e automatizado.....	54
Tabela 4.9: Cálculo de economia financeira entre os sistemas manual e automatizado.....	54
Tabela 4.10: Payback (Tempo de Retorno do Valor Investido).....	55
Tabela 4.11: Comparação do sistema manual e automático- Características do Sistema de microaspersão.....	60
Tabela 4.12: Cálculo do Consumo Energético do Conjunto Motobomba.....	60
Tabela 4.13: Comparativo do consumo de água manual e automatizado.....	61
Tabela 4.14: Cálculo do consumo entre os sistemas manual e automatizado.....	61
Tabela 4.15: Payback (Tempo de Retorno do Valor Investido).....	62
Tabela 4.16: Comparação do sistema manual e automático- Características do Sistema Pivô Central.....	70
Tabela 4.17: Comparativo do consumo energético manual e automatizado.....	70
Tabela 4.18: Comparativo do consumo de água manual e automatizado.....	71
Tabela 4.19: Cálculo do consumo mensal entre os sistemas manual e automatizado...	71
Tabela 4.20: Payback (tempo de retorno do valor investido).....	72

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. OBJETIVOS.....	13
1.1.1 Objetivo Geral.....	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
1.2. ESTADO DA ARTE.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Eficiência Energética.....	16
2.2. Práticas de Gestão Agrícola.....	17
2.3. Métodos de Irrigação Atuais.....	19
2.3.1. Irrigação por Superfície.....	19
2.3.2. Irrigação por Aspersão.....	20
2.3.3. Irrigação Localizada.....	23
2.3.4. Subirrigação.....	25
2.4. Controle Manual e Automatizado na Irrigação.....	26
2.4.1. Controle Manual.....	27
2.4.2. Controle Automatizado.....	27
3. METODOLOGIA.....	37
4. RESULTADOS.....	39
4.1. Estudos de Caso.....	40
4.1.1. Estudo de Caso 1: Despoeiramento para Curral de Engorda de Gado Por Aspersão.....	40
4.1.2. Estudo de Caso 2: Irrigação por Gotejamento para Tomate em Estufa.....	48
4.1.3. Estudo de Caso 3: Irrigação por Microaspersão para Banana.....	56
4.1.4. Estudo de Caso 4: Irrigação por Aspersão do Tipo Pivô Central.....	63
5. CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS.....	75

1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, 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. Embora a irrigação não exija tanta energia quanto a indústria ou as atividades urbanas, o custo da energia é 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).

Já se tem visto um grande constrangimento hídrico e energético, o que impacta diretamente nos custos de produção nas áreas agrícolas, os quais tendem a aumentar, e com isso haverá cada dia mais, a necessidade de explorar novas tecnologias e metodologias para a gestão dos sistemas de rega (BARBOSA *et al.*, 2018).

Em várias regiões do mundo, a principal fonte de água é a subterrânea (para mais de 65% da irrigação e da água urbana). A água é extraída por meio de bombas submersíveis e armazenada em um reservatório ou injetada diretamente no sistema de irrigação, o que implica que uma grande proporção dos custos de produção é para energia (MORENO *et al.*, 2010).

No Brasil, o uso do pivô central tem sido amplamente difundido em áreas agrícolas irrigadas devido às diversas vantagens (automação, uniformidade, redução de mão de obra) que este equipamento proporciona em relação a outros tipos de sistema de irrigação. Atualmente, existem 1,28 milhões de hectares irrigados por sistema de pivô central no Brasil. Isso representa um aumento de 43,3% em relação à área irrigada por pivô central no Brasil em 2006 (GUIMARÃES; LANDAU, 2016).

Neste contexto de expansão da agricultura irrigada e da necessidade de monitoramento da eficiência hídrica e energética, diferentes indicadores de eficiência energética foram propostos (CÓRCOLES *et al.*, 2010).

É importante implementar uma rotina de avaliação energética não só para determinar a eficiência energética de um sistema de irrigação, mas também para auxiliar na tomada de decisões de melhorias no sistema de distribuição de água, a fim de otimizar o consumo de energia e economia (TARJUELO *et al.*, 2015),

Para o caso específico de sistemas de irrigação por pivô central no Brasil, Schons *et al.* (2012) utilizou um índice específico de consumo de energia normalizado que é expresso em $\text{kWh}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 100\text{ m}^{-1}$. Este índice representa a quantidade de energia elétrica ativa

(kWh) necessária para bombear um volume normalizado de água ($\text{mm.ha} = 10 \text{ m}^3$) com valores padrão de altura dinâmica total (100 m).

Para o caso de sistemas de irrigação pressurizados, Barbosa *et al.* (2018) propuseram um procedimento para cálculo de um indicador de Eficiência Energética Global (EEG). Esse indicador é resultado do produto de outros dois indicadores de eficiência energética: Eficiência Energética de Bombeamento (PEE) e Eficiência Energética de Suprimento (EES). A Eficiência Energética de Bombeamento (PEE) está relacionada à eficiência da unidade de bombeamento (eficiência do motor elétrico multiplicada pela eficiência da bomba centrífuga). A Eficiência Energética de Abastecimento (EE) está relacionada ao projeto e gestão do sistema de distribuição de água.

O índice de Energia Específica (E_s , em kWh m^3) é amplamente utilizado para avaliar o desempenho energético de sistemas de distribuição de água de diferentes configurações (CÓRCOLES *et al.*, 2010). O ES representa a quantidade de energia elétrica ativa (kWh) necessária para bombear um volume normalizado de água ($1,0 \text{ m}^3$). Para fins práticos, a quantidade de energia elétrica consumida por um sistema de irrigação, que é medida em kWh, pode ser determinada multiplicando o volume total de água irrigada bombeada na área cultivada (m^3) pelo valor da Energia Específica da unidade de bombeamento (BARBOSA *et al.*, 2018).

Segundo Rodríguez Díaz *et al.* (2011) a redução da quantidade de energia (kWh) consumida para bombear água para irrigação em um sistema de irrigação pode ser alcançada por ambos os métodos: (i) redução do volume de água bombeada (m^3); e (ii) redução no valor da Energia Específica (kWh m^3) da unidade de bombeamento.

Barbosa *et al.* (2018) apontaram que os indicadores de consumo de energia dos sistemas de irrigação devem ser de alguma forma normalizados, permitindo a comparação de diferentes sistemas de irrigação, instalados em áreas de diferentes condições topográficas.

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 *et al.*, 2012). Neste contexto, diferentes indicadores de eficiência foram propostos, fatores fundamentais para ajudar no processo de tomada de decisão sobre melhorias no sistema de distribuição de água, a fim de otimizar o consumo energético e econômico (LÓPEZ-SILVA *et al.*, 2019).

Existem vários indicadores de eficiência hídrica; os mais comuns são a eficiência da irrigação e a eficiência do uso da água. A baixa eficiência dos sistemas de irrigação afeta os rendimentos agrícolas (ZHUO; HOEKSTRA, 2017). A eficiência do sistema de irrigação por

aspersão pode ser avaliada pelo Coeficiente de Uniformidade de Heerman e Hein e pela Eficiência de Aplicação, enquanto a energia específica nesses sistemas é avaliada por meio de indicadores específicos de potência ou consumo (DE ALMEIDA *et al.*, 2017). Por exemplo, no Brasil, eles podem ser caracterizados quanto ao seu consumo específico entre 0,2 a 0,6 kWh/m³. No entanto, não são suficientes para caracterizar a eficiência global de um sistema de irrigação (LÓPEZ *et al.*, 2017).

Deficiências em projetos de irrigação são encontradas praticamente em todas as regiões, geralmente com desconhecimento de quem as utiliza para a produção. Essas deficiências também podem abranger a instalação e manutenção do equipamento, fazendo com que o uso eficiente do equipamento tenha um valor menor do que o esperado ou o que é possível, dependendo de suas características (SCHONS *et al.*, 2012).

Não há suporte aos consumidores de sistemas de irrigação para que possam, na aquisição, também comparar os equipamentos em seu caráter de eficiência energética. Muitos projetistas se valem dessa deficiência do mercado para que os produtores levem um investimento inicial em projetos mais econômicos, porém menos eficientes em sua vida útil. Em algumas situações de projeto, ao longo da vida útil do equipamento, surgem novas tecnologias que o tornam mais viável e atrativo, sendo necessária, portanto, constante avaliação e atualização dos sistemas instalados (SCHONS *et al.*, 2012).

Diante ao tema exposto, surgiu o seguinte questionamento: Qual a importância da engenharia elétrica aplicada à irrigação?

Nos dias de hoje, 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. Diante disso, justifica-se a escolha do presente tema pelo fato da engenharia elétrica aplicada à irrigação ser empregada em vários setores, seja em jardins de casas, plantações grandes. Diante disso surgiu o interesse em obter melhores conhecimentos sobre a relevância da engenharia elétrica aplicada à irrigação.

Indivíduos que utilizam sistemas de irrigação não apresentam conhecimentos necessários sobre a rentabilidade energética do equipamento, os quais acabam adquirindo projetos desenvolvidos por alguns fornecedores que, tendo como objetivo diminuir os custos iniciais, acrescentam a relação potência posicionada por unidade de área do sistema de irrigação.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar através de estudos de casos os impactos positivos do aumento da eficiência energética no consumo de água e de energia elétrica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a eficiência energética em sistemas de irrigação;
- Demonstrar que a engenharia elétrica aplicada à irrigação apresenta viabilidade econômica;
- Mostrar que tal sistema contribui para que as despesas com energia elétrica anualmente sejam reduzidas.

1.2. ESTADO DA ARTE

Segundo Chen e Yang (2019), na agricultura inteligente, a irrigação agrícola de precisão, é essencial para que seja reduzido o consumo de água e produzir maiores rendimentos agrícolas. A irrigação em circuito fechado fundamentada em medições de umidade do solo pode demonstrar a capacidade de alcançar uma quantidade considerável de economia de água durante o cultivo de culturas saudáveis.

No estudo de Khanna e Kaur (2019) diz que os sistemas de irrigação automatizados são normalmente implementados em redes de sensores sem fio, onde os dispositivos de detecção são alimentados por bateria e, portanto, precisam gerenciar restrições de energia através da implementação de esquemas de comunicação eficientes. Ainda advertem que o controle auto disparado é uma estratégia de amostragem aperiódica capaz de reduzir o número de mensagens em rede em comparação com a amostragem periódica tradicional. Na amostragem periódica tradicional, os dados são coletados e transmitidos em intervalos regulares, independentemente das mudanças nos dados ou no sistema. Por outro lado, no controle auto disparado, a transmissão de dados ocorre apenas quando certas condições específicas são atendidas, como uma alteração significativa nos dados ou quando há uma necessidade imediata de atualização. Essa abordagem pode ser mais eficiente em termos de largura de banda e consumo de energia, já que

evita a transmissão desnecessária de dados em momentos em que não há mudanças significativas. Isso é especialmente útil em sistemas distribuídos e comunicações em tempo real.

Lozoya *et al.* (2021), em seu estudo propôs uma estratégia de comunicação energeticamente eficiente para controle de irrigação em circuito fechado, implementada através de uma rede de sensores sem fio, onde medições de umidade do solo orientadas por eventos são conduzidas pelos dispositivos sensores apenas quando necessário. Assim, o algoritmo auto acionado estima a ocorrência do próximo período de amostragem com base na dinâmica do processo. A estratégia proposta foi avaliada em um campo de cultivo de noz-pecã e comparada com implementações de amostragem periódica. Os resultados experimentais mostram que a técnica de taxa de amostragem adaptativa proposta diminuiu o número de mensagens de comunicação em mais de 85% e reduziu o consumo de energia em até 20%, ao mesmo tempo em que atingiu os objetivos de controle do sistema em termos de eficiência de irrigação e consumo de água.

Moreno *et al.* (2010) em seu estudo propôs uma estratégia de comunicação com eficiência energética de taxa de amostragem adaptativa para reduzir o consumo de energia dos nós remotos em uma rede de sensores sem fio usando algoritmos auto acionados para implementar controle de malha fechada para irrigação agrícola de precisão. O objetivo é reduzir o número de mensagens na rede, transmitindo dados de sensores apenas quando relevantes, ao mesmo tempo em que cumpre os objetivos de controle de irrigação de usar a água de forma eficiente e evitar culturas insalubres devido ao estresse hídrico. A estratégia proposta foi avaliada e comparada com implementações de programação periódica do ciclo de trabalho em quatro áreas de irrigação de um campo experimental de cultivo de noz-pecã.

Diferentes esquemas de gerenciamento de energia para RSSF em aplicações de monitoramento agrícola e ambiental foram propostos pela comunidade de pesquisa, conforme resumido por Jawad *et al.* (2017). De uma perspectiva de comunicação pura, técnicas como protocolos de roteamento eficientes, controle eficiente de acesso ao meio e agrupamento de dados têm sido amplamente utilizadas para reduzir o consumo de energia, conforme demonstrado por Akashi, Ishii e Cetinkaya (2018). Por outro lado, o método dormir/despertar adotado pela programação do ciclo de trabalho e pelas técnicas de taxa de amostragem adaptativa considera uma abordagem de controle-comunicação.

Nesse sentido, Jawad *et al.* (2018) propôs um algoritmo de redução de potência baseado em dados redundantes para um sistema de irrigação agrícola onde a transmissão de dados é ativada após a diferença entre as leituras de umidade do solo atingir um limite específico. Neste

caso, a dinâmica da umidade determina a taxa de amostragem adaptativa; entretanto, o limite definido tem um valor fixo que não considera as características da cultura-clima.

Kozłowski e Sosnowski (2019) analisaram diferentes mecanismos de ciclo de trabalho, incluindo as abordagens programada e sob demanda. No primeiro, o nó acorda e se comunica periodicamente; neste último, o nó é despertado conforme necessário por um evento externo. Embora a técnica sob demanda possa alcançar melhores resultados, ela depende de um canal de comunicação adicional.

Já no estudo de Agrawal *et al.* (2020), os autores propuseram um algoritmo de ciclo de trabalho aprimorado para reduzir o consumo de energia em um campo agrícola. O algoritmo determina os períodos de ativação/desativação com base na agregação de dados de energia na estação base; entretanto, não considera as variáveis da dinâmica do processo agrícola.

O trabalho de Buzura *et al.* (2020) implementou um sistema de comunicação de conscientização de conteúdo onde um controlador com conhecimento suficiente gerencia uma RSSF determinando se cada sensor deve transmitir dados ou não; entretanto, conforme afirmado pelos autores, esta abordagem centralizada pode aumentar a carga da rede.

No estudo de Muzakkari *et al.* (2020) mostrou um esquema de ciclo de trabalho adaptativo o qual foi proposto com base no tamanho da fila e na classe de prioridade de um pacote para reduzir o atraso de pacotes de alta prioridade e suportar a entrega com limite de tempo de pacotes prioritários. Esta abordagem concentra-se na poupança de energia com base em parâmetros puramente de comunicação.

O modelo proposto por Lozoya *et al.* (2019) descreve a dinâmica do solo, da cultura e do clima para um sistema de controle de irrigação de grama, e no estudo de Moreno *et al.* (2010), foi aprimorado e aplicado a um campo de cultivo de noz-pecã para implementar uma estratégia de sono/despertar de taxa de amostragem adaptativa baseada em auto acionamento e controle para implementar um algoritmo de eficiência energética para comunicar os nós sensores através de uma RSSF.

Conforme Moreno *et al.* (2010), o objetivo da agricultura inteligente como o sistema irrigação visa reduzir custos e aumentar a produtividade, ao mesmo tempo que otimiza os recursos naturais através do processamento e análise de dados obtidos a partir de dispositivos sensores. Já de acordo com Popović *et al.* (2017), variáveis culturais e ambientais, como umidade do solo, umidade das folhas, temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa e radiação solar, são comumente monitoradas em diferentes aplicações agrícolas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Eficiência energética no Brasil

A preocupação com a eficiência energética no Brasil teve início na década de 1970, em resposta à crise do petróleo. Naquela época, o país era altamente dependente das importações de petróleo, e a crise levou a um aumento significativo nos preços da energia. Em 1981, surgiu o Programa Conserve no MME (Ministério de Minas e Energia), que foi a primeira ação do governo no âmbito da eficiência energética, que teve como objetivo de promover a eficiência energética na indústria. Na década de 90 o Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica (PROCEL) foi criado e era gerenciado pela Eletrobras. (HADDAD, 2019).

O PROCEL foi responsável por implementar uma série de medidas para reduzir o consumo de energia, como a etiquetagem de equipamentos elétricos e a realização de campanhas de educação para o consumidor. Além disso, na mesma década de 1990, a preocupação com a eficiência energética se intensificou, devido ao crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil. Em 1996, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que passou a regular o setor elétrico brasileiro e a promover a eficiência energética (HADDAD, 2019).

A Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, também 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 Programa de Conservação de Energia Elétrica (Procel) (BRASIL, 2000).

O objetivo da lei é promover o desenvolvimento tecnológico do setor elétrico brasileiro, aumentar a eficiência energética e reduzir o consumo de energia elétrica (BRASIL, 2000).

A lei foi criada em resposta à necessidade de o Brasil aumentar sua competitividade no setor elétrico. O país enfrentava a concorrência de países desenvolvidos, que investem massivamente em tecnologia e eficiência energética. Ela também foi criada para atender a uma demanda da sociedade por uma energia elétrica mais barata e sustentável. O consumo de energia elétrica no Brasil cresce a uma taxa média de 4% ao ano, o que pressiona os preços da energia (BRASIL, 2000).

A lei 9.991 já teve um impacto positivo no setor elétrico brasileiro. Os investimentos em pesquisa e desenvolvimento têm permitido o desenvolvimento de novas tecnologias, como geração solar e eólica, que contribuem para a diversificação da matriz energética brasileira. Os investimentos em eficiência energética também têm permitido reduzir o consumo de energia elétrica onde é aplicado a melhoria de eficiência energética, o que contribui para a redução dos custos e das emissões de gases de efeito estufa (BRASIL, 2000).

2.2 Práticas de gestão agrícola

As práticas de gestão agrícola compreendem uma série de processos, incluindo o planejamento, a organização, a administração e o controle dos recursos, visando alcançar as metas e objetivos estabelecidos. Essas práticas são de suma importância para o sucesso e o crescimento de qualquer propriedade agrícola, independentemente do seu tamanho ou ramo dentro da agricultura. Pois, faz com que os recursos sejam utilizados de maneira mais eficiente. Essas práticas podem ser feitas através do controle de frota, controle de estoque de suprimentos e insumos, gestão de custos e fluxo de caixa, preparo de solo, manutenção de maquinários em geral, venda dos produtos produzidos na fazenda, entre outras práticas (BASSOI et al., 2019).

Um dos principais desafios da gestão agrícola é o aumento da eficiência de toda a operação, visando melhores resultados com o menor custo operacional possível. Com isso, a eficiência energética na irrigação é uma área de crescente importância na agricultura, por conseguir atingir melhores resultados e contribuir para o desenvolvimento sustentável da agricultura (POPOVIĆ et al., 2017).

Práticas de gestão específicas de cada local têm sido possíveis devido à ampla gama de soluções para aquisição de dados e intervenções em nível de campo. Diferentes abordagens devem ser consideradas para a coleta de dados, como sensores dedicados ao solo e às plantas, ou mesmo associadas à capacidade da maquinaria agrícola em gerar dados valiosos que permitam ao agricultor ou ao gestor inferir a variabilidade espacial dos campos (BASSOI et al., 2019).

No entanto, são necessários elevados recursos computacionais para converter bancos de dados extensos em informações úteis para o gerenciamento específico do local. Assim, tecnologias provenientes da indústria, como a Internet das Coisas e a Inteligência Artificial, aplicadas à produção agrícola, têm apoiado o processo de tomada de decisão das práticas de agricultura de precisão (HU, 2020).

A interpretação e a integração de informações de diferentes fontes de dados permitem aprimorar a gestão agrícola devido à sua capacidade de prever atributos da cultura e do solo usando ferramentas avançadas baseadas em dados. Alguns exemplos são o monitoramento de culturas, aplicações locais de insumos e detecção de doenças por meio de sistemas baseados em nuvem em plataformas digitais, previamente elaborados para sistemas de apoio à decisão (POPOVIĆ *et al.*, 2017).

Molin *et al.* (2020), em seu estudo discutiram diferentes abordagens e recursos tecnológicos, popularmente denominados como Agricultura 4.0 ou agricultura digital, inseridos no contexto da gestão da variabilidade espacial dos campos considerando diferentes fontes de dados de culturas e solos.

As inovações agrícolas têm apoiado o desenvolvimento de soluções para otimizar a produção agrícola, focadas principalmente na intensificação e na sustentabilidade. Ao longo dos anos, os sistemas agrícolas foram expostos a diferentes níveis de tecnologia, desde a mecanização até aos dispositivos inteligentes, para melhorar a eficiência das operações agrícolas, considerando todo o ciclo de gestão – desde a monitorização das culturas até às recomendações (ZHAI *et al.*, 2020). A aplicação de tecnologias (Internet das Coisas - IoT, sensores sem fio, Inteligência Artificial - IA, etc.) na agricultura vem proporcionando avanços no controle remoto de objetos por meio de redes de comunicação integradas e na adoção de sistemas de apoio à decisão para gestão agrícola (FOUNTAS *et al.*, 2015).

O avanço na gestão agrícola baseada nos princípios da agricultura de precisão (AP) faz parte do que se denomina Agricultura 4.0, que foi proposta após a criação da Indústria 4.0 pelo governo alemão. Neste ponto vale ressaltar a definição de AP conforme a Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (ISPA), recentemente atualizada, segundo a qual:

“AP é uma estratégia de gestão que reúne, processa e analisa dados temporais, espaciais e individuais e combina-a com outras informações para apoiar decisões de gestão de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência no uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agrícola” (ISPA, 2019).

A Agricultura 4.0, também chamada de Agricultura Digital ou Agricultura Inteligente, foi projetada principalmente para lidar com o aumento da produtividade, alocando recursos (terra, água, energia), adaptando a cadeia de abastecimento às mudanças climáticas e evitando o desperdício de alimentos. Outras características devem ser discutidas para ampliar as tecnologias atuais, considerando a sua viabilidade económica e a seu potencial aplicabilidade para a gestão específica do local (ZHAI *et al.*, 2020).

O principal desafio da utilização da informação digital na agricultura é acrescentar valor às diferentes fontes de dados (cultura, campo, máquinas, aspectos económicos, etc.) e transferir

esses dados em conhecimento. Algumas iniciativas são a elaboração de sistemas de apoio à decisão às estratégias operacionais dos agricultores (YAZDANI *et al.*, 2017). Outras iniciativas que envolvem ferramentas digitais são a análise de dados para seleção de culturas utilizando compilação de dados (fertilidade do solo) e algoritmo de árvore de decisão, o manejo de culturas baseado em modelos de aprendizagem supervisionada para previsão de produtividade e detecção de e um sistema baseado em nuvem para planejamento de pulverização para controle de pragas em vinhedos e pomares (RAJESWARI; SUTHENDRAN, 2019).

A utilização eficiente da água na agricultura é um dos desafios agrícolas mais significativos que as tecnologias modernas estão a ajudar a enfrentar através dos Serviços de Aconselhamento de Irrigação (SAI) e dos Sistemas de Apoio à Decisão (SAD). Estes últimos são considerados instrumentos de gestão poderosos, capazes de ajudar os agricultores a alcançar a melhor eficiência no uso da água de irrigação e a aumentar os seus rendimentos através da obtenção do maior rendimento possível das culturas (MOLIN *et al.* *et al.*, 2020).

2.3 Métodos de irrigação atuais

Existe basicamente 4 tipos de métodos de irrigação. Dentre eles estão a irrigação por superfície, irrigação do tipo aspersão, irrigação localizada e subirrigação. (TESTEZLAF, 2017).

2.3.1 Irrigação por superfície

Na irrigação por superfície, a água é distribuída pela gravidade sobre o solo, sendo liberada dos rios, bacias, lagos e diques, para inundar toda a área. Nesse sistema de irrigação o declívio não pode superar 3% de desnível, a irrigação por superfície possui uma eficiência entre 30% a 80%. (LELIS,2006).

As vantagens desse método é o baixo investimento inicial de implantação e manutenção do sistema, utilização de equipamentos mais simples, não sofre ação do vento, permite a utilização de água com sólidos em suspensão.

Em contrapartida, esse método depende de uma topografia plana, requer a sistematização do terreno, ou seja, igualar e deixar plano todo o terreno, abertura de sulcos como na Figura 2.1, realizar o plantio em canteiros como mostra a Figura 2.2, fazer ensaios do solo, requer um manejo mais complexo da irrigação e desperta pouco interesse comercial por utilizar poucos equipamentos. Isso faz com que esse sistema não tenha novos investimentos e inovações, para melhorar a eficiência e novos equipamentos (AUGUSTO,2006).

A irrigação por superfície possui uma eficiência entre 30% a 80%.



Figura 2.1. Irrigação por superfície através de sulcos na cultura do milho
Fonte: Revista Rural (2020).



Figura 2.2. Irrigação por Inundação em plantação de arroz
Fonte: Planeta arroz (2020).

2.3.2 Irrigação por aspersão

Na irrigação do tipo aspersão, a água é lançada no ar, tentando recriar uma chuva sobre as plantas. Esse método é constituído pela aspersão convencional mostrado Figura 2.3,

autopropelido apresentado na Figura 2.4, pivôs centrais como na Figura 2.5 e lineares como na Figura 2.6. Esse método tem uma eficiência entre 75% a 90%.



Figura 2.3. Aspersão convencional
Fonte: Autor Próprio (2022).



Figura 2.4. Irrigação com autopropelido
Fonte: Irrigat (2023).



Figura 2.5. Pivô central
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 2.6. Pivô linear
Fonte: Valley (2021).

Esse método possui um baixo custo de mão de obra, melhor controle de lâmina de água aplicada em relação a irrigação por superfície, facilita a aplicação de fertilizantes e possui uma elevada eficiência na aplicação (FRANKE, 1998).

A aspersão possibilita a instalação em diferentes condições de climas, tipos de solo e maiores declividades. Isso possibilita irrigar diversas culturas diferentes, mantendo alta eficiência e produtividade. Um exemplo disso é a transformação dos desertos da Arábia Saudita, como mostra na Figura 2.7, utilizando pivô central para irrigar áreas desérticas.



Figura 2.7. Pivôs centrais no deserto
Fonte: Comprerural.

A irrigação por aspersão convencional e os pivôs centrais tem a possibilidade de automação, ou seja, o sistema pode ser controlado automaticamente. Isso faz com que seja possível melhorar a eficiência desses sistemas e diminuir a dependência de mão de obra para operar a irrigação.

Os custos iniciais, de energia e manutenção desse sistema de irrigação é elevado quando comparado aos outros modelos. Juntamente com isso, deve ser analisado qual tipo de cultura vai ser irrigada, pois algumas plantas podem desenvolver doenças por conta da alta umidade nas folhas (TESTEZLAF, 2017).

As perdas desse sistema por evapotranspiração (perca de água por evaporação das plantas e do solo) e a deriva (perca da água por ação do vento), são consideráveis. Com isso, a busca para minimizar percas e otimizar o sistema, tem como a automação uma solução para esses problemas (TESTEZLAF, 2017).

2.3.3 Irrigação localizada

Os sistemas de irrigação localizada, como microaspersão mostrada Figura 2.8, gotejo em superfície apresentado na Figura 2.9 e gotejo subterrâneo ilustrado na Figura 2.10, tem eficiência entre 80% a 95%. (AUGUSTO,2014).



Figura 2.8. Irrigação por microaspersão para banana
Fonte: Autoria própria (2024).



Figura 2.9. Irrigação por gotejo superficial para manga
Fonte: Autoria própria (2024)



Figura 2.10. Irrigação por gotejo subterrâneo para jardim
Fonte: Autoria própria (2024).

Esse modelo de irrigação é muito utilizado em plantas frutíferas, pois molha apenas a faixa necessária, formando um círculo úmido ou aplicando a água diretamente nas raízes, no caso do gotejo enterrado. Outro ponto importante é o baixo custo de implementação inicial, pois esse sistema utiliza motobombas menores, menor pressão para o funcionamento, baixo custo de manutenção, e baixo gasto com energia, gasta menos água em comparação aos outros modelos de irrigação, possui uma fácil adaptação a diferentes tipos de solo, não sofre influência do vento e nem da declividade do solo (AUGUSTO,2014).

Um ponto importante a ser considerado ao implantar esse sistema, é a qualidade da água, pois os emissores de água utilizado nesse método são extremamente suscetíveis ao entupimento. Outro ponto importante a ser considerado é que esse método diminui a profundidade das raízes, podendo levar a estabilidade da planta.

Mesmo tendo alta eficiência no uso da água, alguns sistemas têm sua parte elétrica sub ou superdimensionado, com motores elétricos antigos, com baixa taxa de transferência de energia, ou seja, na transformação de energia elétrica em energia mecânica. O uso de equipamentos antigos e cabeamento mal dimensionamentos diminui a eficiência desses sistemas e podem causar acidentes e interrupções no funcionamento (AUGUSTO,2014).

2.3.4 Subirrigação

Esse modelo de irrigação consiste em manter o nível do lençol freático próximo a superfície, assim o sistema radicular da planta consegue ter acesso a água. Esse sistema está

interligado com a realização de drenagem, que possibilita o preparo do solo para plantio e possibilita regular o nível da água do lençol freático (TESTEZLAF, 2017).

Não é aconselhado utilizar esse sistema em terrenos com declividade maior que 2% e como lençol freático abaixo dos 3 metros de profundidade da superfície. Para que isso ocorra, o solo deve ter uma barreira física e impermeável para manter esse nível. Essas condições ocorrem em áreas úmidas e subúmidas.

Para delimitar e controlar o nível de água, são feitos drenos de manilhas na área e poços de observação.

Testezlaf, 2017, em sua obra, defende que esse sistema possui um baixo custo de implantação inicial, baixo custo de operação e utiliza a mesma quantidade de água por m^2 que a aspersão. Porém, em muitos casos, não é necessário a utilização de motobombas para implantar a subirrigação. Em contra partida, é difícil ter uma área com as condições ideais para realizar esse tipo de irrigação. No Brasil esse tipo de irrigação é utilizado no projeto Formoso, no estado do Tocantins como mostra a Figura 2.11.



Figura 2.11. Subirrigação no projeto Formoso
Fonte: Grupo esperança rural.

2.4 Controle manual e automatizado na irrigação

Com a finalidade de diminuir custos com material, potência das motobombas e energia, é feito a setorização da irrigação, ou seja, a área total a ser irrigada é dividida em setores, que normalmente possuem o mesmo tamanho ou a mesma vazão de água. Por exemplo, uma área de 1 hectare (10 mil m^2) sendo utilizado o método de aspersão convencional, gasta aproximadamente $49\text{ m}^3/\text{h}$ de água. Caso não seja feita a divisão e irrigue toda essa área de uma

vez, seria necessária uma motobomba de 20 CV e uma tubulação de 100 mm. Caso seja feita a divisão dessa área em 4 partes, 2500 m² cada setor, a motobomba passa a ser de 4 CV e a tubulação de 75 mm reduzindo drasticamente os custos de operação, manutenção e instalação desse sistema.

Nos sistemas de irrigação, o controle da abertura e fechamentos dos setores, limpeza dos filtros, tempo de rega, a quantidade de água aplicada, e acionamento da motobomba, podem ser feitos de maneira manual ou automática.

2.4.1 Controle manual

No controle manual de uma irrigação, o operador do sistema é responsável por acionar a motobomba, limpar o filtro quando houver e abrir e fechar os registros de cada setor.

No caso da irrigação por superfície e a subirrigação, toda a irrigação é feita de maneira manual. Da mesma forma, no método por aspersão, o sistema autopropelido e os pivôs lineares também são acionados apenas de maneira manual, demandando um funcionário e em alguns casos até um trator para movimentar os equipamentos. Os demais sistemas podem ser feitos de maneira manual também, reduzindo os custos iniciais de implementação quando comparados com o sistema automatizado.

2.4.2 Controle automatizado

Segundo Reis, 2015 a automação dos sistemas de irrigação pode ser feita de diversas maneiras e com diferentes equipamentos. A automatização mais comum para irrigação por aspersão convencional e irrigação localizada, é a utilização de controladores como ilustrado na Figura 2.12 e válvulas solenoides mostradas na Figura 2.13.



Figura 2.12. Controlador para irrigação
Fonte: Rain Bird (2023).



Figura 2.13. Válvula solenoide
Fonte: Rain Bird (2023).

O manejo eficiente da irrigação requer medições de umidade do solo em tempo real para capturar variações temporais e espaciais na zona radicular da cultura. No entanto, obter leituras representativas e precisas em grandes áreas de cultivo é uma tarefa desafiadora, uma vez que as propriedades hidráulicas do solo e a heterogeneidade espacial influenciam fortemente os padrões de umidade e enraizamento das culturas, entre outras variáveis. Os sensores de umidade utilizam princípios eletromagnéticos para medir o teor de água; além disso,

para obter valores precisos, é necessária uma calibração específica do solo antes da instalação (LOZOYA *et al.*, 2019).

A umidade do solo indica a porcentagem de conteúdo de água disponível em uma amostra específica de volume de solo e é frequentemente chamada de conteúdo volumétrico de água (VWC). A evapotranspiração de referência (ETO) representa a perda de água causada pelas condições climáticas para uma cultura de referência específica (grama). Um coeficiente de cultura K_c é necessário para converter este valor de referência num parâmetro específico da cultura. Medições de radiação solar, velocidade do vento, temperatura do ar e umidade relativa do ar são necessárias para calcular este parâmetro. A evapotranspiração é geralmente expressa em milímetros (mm) de água perdida de uma cultura superficial por unidade de tempo (dias) (LOZOYA *et al.*, 2021).

Para medir a umidade do solo pode ser utilizado o tensiômetro apresentado na Figura 2.14, composto por uma cápsula porosa, conectado ao um tubo com um medidor de vácuo, sendo todas essas partes preenchidas por água. Ao colocar esse equipamento em um solo seco por exemplo, a água dentro dele penetra no solo e gera um vácuo no tubo, sendo medido pelo vacuômetro. Assim é possível saber a umidade do solo. o tensiômetro é um aparelho manual, ou seja, ele não é interligado no controlador da irrigação, mas com a leitura de umidade é possível programar a irrigação de maneira eficiente, irrigando apenas a quantidade de água necessária para atingir a umidade desejada.

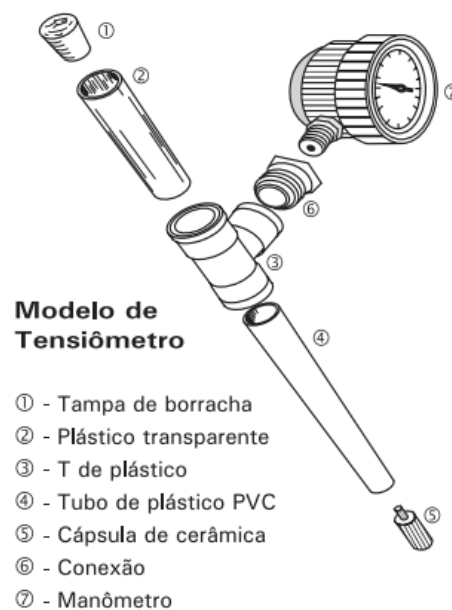


Figura 2.14. Tensiômetro
Fonte: Embrapa (2023).

Outro modelo de sensor de umidade é o Watermark como o mostrado na Figura 2.15. Ele mede a umidade do solo através da resistência elétrica, enviando uma corrente pelas hastes. Quanto mais úmido estiver o solo, menor será a resistência. Com esses parâmetros de resistência, ele lê e indica qual a umidade aproximada do solo. Esse sensor, diferente dos outros, pode ser conectado via cabos no controlador. Ele vai fazer a medição em tempo real da umidade e assim que atingir a quantidade programada, ele manda um sinal para o controlador mudar de setor, ou desligar a irrigação (DURSON & OZDEN, 2011).



Figura 2.15. Sensor Watermark
Fonte: Geoagri (2023).

Já os sensores de constante dielétrica como o mostrado na Figura 2.16, funciona medindo a refletância e tempo de deslocamento de um pulso eletromagnético. Esse sensor não é possível conectar no controlador, mas é de grande importância para cultivos em ambientes fechados, como estufas, pois as plantas cultivadas nesse sistema possuem raízes rasas e em alguns casos são plantadas em vasos (MADALOSSO, 2014).



Figura 2.16. Sensor de constante dielétrica
Fonte: Irriga Global (2023).

Outro equipamento que pode ajudar na economia de água, são os sensores de chuva como o ilustrado na Figura 2.17. Esse sensor vai fazer a medição a precipitação de chuva em milímetros. Ele pode ser ajustado de acordo com a necessidade da cultura que está sendo irrigada, e caso tenha chovido mais que a quantidade necessária que as plantas exigem por dia, o sensor manda um sinal via cabos para o controlador e ele não aciona o sistema.



Figura 2.17. Sensor de chuva
Fonte: Hunter (2023).

Já os sensores de fluxo como o da Figura 2.18, eles são capazes de detectar fugas e rupturas nos tubos de água. Em alguns casos de fuga de água e ruptura da tubulação, não é perceptível a quem está olhando o sistema em funcionamento, com esse equipamento, é possível identificar pequenos vazamentos. Com isso, o sistema pode ser desligado para realizar as manutenções necessárias, economizando tempo, água e energia.



Figura 2.18. Sensor de fluxo
Fonte: Rain Bird (2023).

Esses sensores em conjunto com as válvulas solenoides e o controlador, faz um papel fundamental de gerir o gasto de água e conseqüentemente o gasto de energia elétrica.

Outra maneira de fazer a automação de um sistema de irrigação, é por meio da implementação de uma rede de sensores sem fio (RSSF) em grandes áreas de cultivo com vários dispositivos de detecção colocados em locais diferentes para obter valores representativos de umidade do solo, como na Figura 2.19. Durante os últimos dez anos, diferentes trabalhos como de Gutierrez *et al.* (2014) Navarro-Hellín *et al.* (2015), Goap *et al.* (2018), Muangprathub *et al.* (2019), demonstraram a relevância das medições de umidade do solo implementadas em uma RSSF para alcançar uma utilização eficaz e ótima da água para irrigação em grandes áreas de cultivo.



Figura 2.19. Irrigação automatizada com sensor de umidade
Fonte: Sergieieva (2022).

A implementação de RSSFs para aplicações agrícolas requer um gerenciamento eficiente de energia, uma vez que vários dispositivos sensores alimentados por bateria podem compor a rede. A energia é dissipada principalmente durante a comunicação; portanto, a redução de energia pode ser alcançada através da implementação de uma estratégia sleep/wake-up, onde os dispositivos sem fio entram no modo de espera e interrompem a comunicação até o próximo horário de transmissão (JAWAD *et al.*, 2017).

Uma das primeiras técnicas utilizadas é o agendamento do ciclo de trabalho, onde os nós são programados para ligar e desligar em uma base pré-estabelecida; no entanto, esta abordagem apresenta um compromisso entre eficiência energética e qualidade de detecção. Recentemente, técnicas de taxa de amostragem adaptativa baseadas na dinâmica do processo alcançaram melhorias significativas na eficiência energética, ativando transmissões apenas quando medições relevantes são necessárias (GUPTA; TRIPATHI, 2020).

Do ponto de vista do controle, os circuitos fechados digitais têm sido tradicionalmente implementados utilizando amostragem periódica. No entanto, estratégias aperiódicas orientadas a eventos começaram a ganhar atenção devido às melhorias de eficiência alcançadas no tempo de processamento e comunicação de dados. Além disso, o controle orientado a eventos demonstrou uma redução considerável nas mensagens de comunicação, ao mesmo tempo em que atingiu os objetivos de controle (ARAÚJO *et al.*, 2014).

Especificamente, o controle auto disparado (STC) implementa algoritmos baseados em modelo para estimar o próximo evento de amostragem, prevendo o instante em que a medição seguinte deve ocorrer com base na dinâmica do processo. Recentemente, diferentes implementações auto disparadas sobre RSSF foram propostas, obtendo resultados relevantes de desempenho de controle e eficiência de comunicação (KHASHOOEI *et al.*, 2017).

Um processo automatizado de irrigação de precisão (Figura 3.1) pode ser implementado usando leituras de umidade do solo na zona das raízes da cultura para realimentar o sistema; enquanto isso, as condições climáticas representam a perturbação do sistema medida para compensar antecipadamente seus efeitos (LOZOYA *et al.*, 2016).

O sensor 10HS, é um sensor de conteúdo volumétrico de água (VWC), de baixo custo com faixa de volume de medição de 1 dm^3 , e de acordo com Dominguez-Niño *et al.* (2019), o erro de medição pode ser reduzido de 5% a 1% se desligado. A calibração da linha é realizada antes da instalação. No estudo de Moreno *et al.* (2010) mostrou que em um campo experimental que consiste em um hectare de cultura de noz-pecã (*Carya illinoensis*) dividido em quatro áreas de irrigação de $25 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, conforme ilustrado na Figura 2.20. Cada área contém aproximadamente 45 árvores produtivas regadas com sistema de irrigação por microaspersão. O campo está localizado no norte do México (cidade de Chihuahua), que é uma região árida com pluviosidade anual muito baixa.



Figura 2.20. Campo experimental de cultivo de noz-pecã com as localizações dos nós sensores ilustrados com os círculos vermelhos: (a) Vista lateral da área 1; setas amarelas indicam os posicionamentos dos sensores. (b) Vista de satélite

Fonte: Moreno *et al.* (2010).

Conforme demonstrado na Figura 2.21, o sistema de controle em rede compreendia um nó sensor e um nó atuador para cada área de irrigação; havia um nó meteorológico e um único controlador para todo o campo experimental. A RSSF foi implementada sobre o padrão IEEE 802.15.4, que é a base do protocolo de comunicação Zigbee (2021). Zigbee se tornou um protocolo popular devido ao seu baixo custo, baixo consumo de energia e pequeno tamanho de

pacote de comunicação. Usando um esquema de comunicação cliente-servidor, cada nó sensor envia dados de umidade do solo para o nó controlador, o controlador usa as informações meteorológicas e de umidade do solo para determinar se a irrigação é necessária e, em seguida, a mensagem de controle é enviada para o nó atuador correspondente.

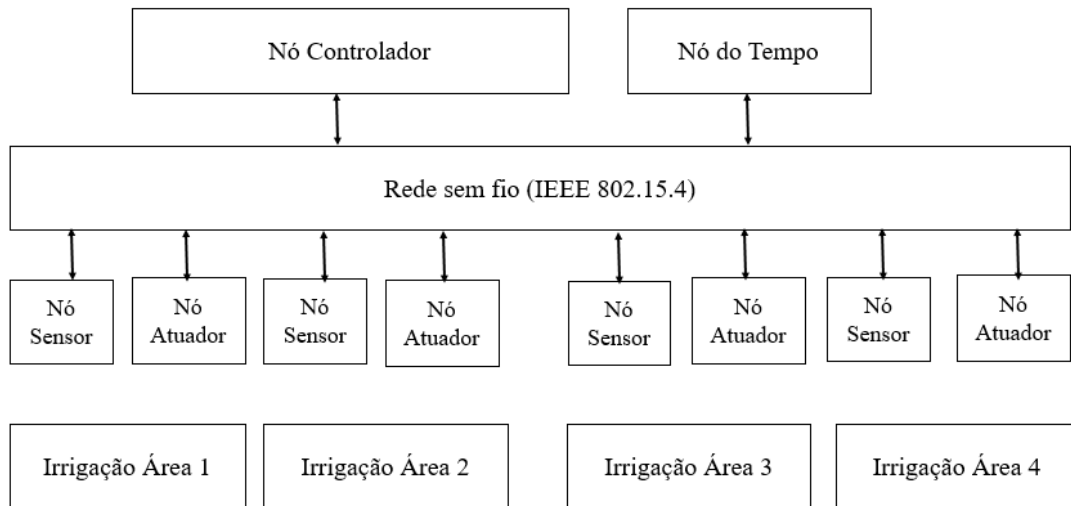


Figura 2.21. Sistema de controle em rede para irrigação agrícola de precisão.
Fonte: Moreno *et al.* (2010).

Cada nó sensor inclui três sensores 10HS enterrados no nível raso da zona radicular efetiva da noz-pecã (60 cm), com uma separação horizontal de 3 m entre eles; o valor médio das três leituras fornece uma medição representativa da umidade do solo para a área de irrigação. Os sensores foram previamente calibrados para a textura específica do solo (franco-argiloso siltoso) de acordo com o método descrito por Cobos (2010). Uma eletroválvula de irrigação ativa e desativa a irrigação de campo para cada nó atuador e um sensor de fluxo mede o consumo de água. O nó meteorológico inclui um sensor de radiação solar, um sensor de velocidade do vento e um sensor de temperatura-umidade para calcular a evapotranspiração de referência para o campo cultivado (LOZOYA *et al.*, 2021).

Esses três tipos de nós foram construídos na placa Arduino MKR (Figura 2.22) que inclui um microprocessador de 32 bits e um conversor analógico-digital de 12 bits.

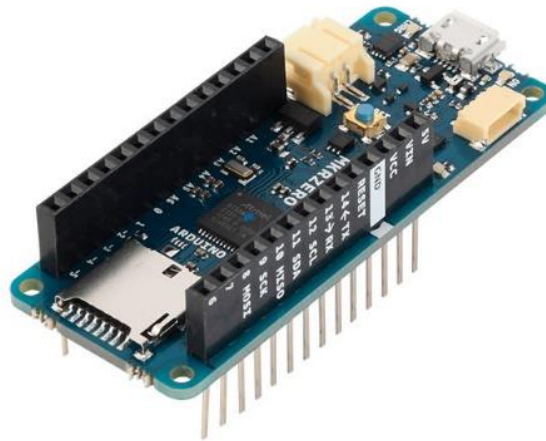


Figura 2.22. Placa Arduino MKR.
Fonte: Eletrônica Embalagens (2023).

A placa foi energizada com fonte de alimentação de 3,3 V e foi capaz de reduzir o consumo de corrente de 20 mA em modo operação para 0,57 mA em modo standby. O nó controlador foi implementado com um Raspberry Pi 3 Modelo B (Raspberry Pi Foundation, Cambridge, Reino Unido) baseado em um processador ARM Cortex-A53 de 64 bits. O controlador executou quatro tarefas de controle simultâneas para implementar os quatro circuitos do sistema de irrigação (MORENO *et al.*, 2010).

Conforme visto, a arquitetura proposta é fundamentada em diferentes nós sem fio equipados com conectividade GPRS. Cada nó sem fio é totalmente autônomo e utiliza energia solar, o que lhe confere autonomia praticamente ilimitada. Diferentes sensores comerciais para medição de uma ampla gama de parâmetros do solo, planta e atmosfera podem ser conectados aos nós. Os dados são enviados e processados em um servidor remoto, que armazena as informações dos sensores em um banco de dados, permitindo posterior consulta e análise dos dados de forma simples e versátil (NAVARRO-HELLÍN *et al.*, 2015).

3. METODOLOGIA

A metodologia apresentada será aplicada a 4 estudos de casos. O objetivo dos estudos de caso é aumentar a eficiência energética dos sistemas antes e após a aplicação da automatização que tinha como objetivo dos empresários, donos das propriedades rurais, a diminuição do consumo de energia elétrica. Visando um maior aproveitamento dos recursos naturais, o cuidado com o meio ambiente e a diminuição do consumo de água também são pontos importantes a serem considerados, pois a maior fonte de energia elétrica em nosso país é proveniente das hidrelétricas (ABRHIDRO, 2023). Tem-se uma redução em curto prazo do investimento financeiro em soluções automatizadas, abatendo-se o valor da redução mensal do gasto com energia elétrica.

O primeiro e o quarto estudos de caso foram realizados na Fazenda Caçapava que fica no município de Acreúna-Goiás. Sendo o primeiro caso, um sistema de despoeiramento de currais para confinamento bovino e o quarto caso, de um pivô central de irrigação. O segundo estudo de caso foi realizado na Fazenda Lagoa Formosa que fica no município de Itaberaí-Goiás, que faz a irrigação de tomates plantados em estufa. Já o terceiro estudo de caso foi realizado em Porto Alegre do Tocantins-TO, na fazenda AgroPillati, que faz a irrigação por microaspersor na cultura de banana.

A primeira análise a ser feita é o comparativo do consumo de água e o período de funcionamento do sistema antes e após a implementação da automatização.

Para a transformação de minutos em horas utilizou-se (1):

$$tempo (h) = \frac{tempo (min)}{60} \quad (1)$$

Em seguida é realizada análise do Cálculo da Média de Consumo Energético do Conjunto Motobomba, tendo como base o estudo do consumo 3 meses anteriores à instalação do sistema automatizado e 3 meses após a instalação do sistema automatizado, além de estudar as variáveis de potência do motor do Conjunto Motobomba e o período de utilização diário.

Para a conversão da Potência em Cavalo-Vapor (CV) para Watts (W) utiliza-se a seguinte conversão: $1 \text{ CV} \cong 735,5 \text{ W}$.

Para calcular o consumo de um motor elétrico, utiliza-se sua potência absorvida (P_a), dada por (2):

$$P_a = P_u \times n \quad (2)$$

Em (2), P_u é a potência útil do motor dada em W e n é o rendimento do motor.

Já o cálculo do Consumo Médio (kWh) utilizou-se (3):

$$\text{Consumo Médio (kWh)} = \frac{Pa (W) \times t (h) \times d (\text{dias})}{1000} \quad (3)$$

Em que Pa é a Potência absorvida em Watts (W), t é o tempo, que foi expresso em horas (h) e d (dias). A divisão por 1000 se dá em razão do consumo faturado pela distribuidora ser calculado em Quilo Watts vezes a quantidade de horas utilizadas (kWh).

Em seguida analisa-se a redução do consumo de água antes e após a implementação do sistema automatizado. Para conversão do volume de água foi adotado que 1m^3 equivale a 1000 litros.

O consumo de água mensal dá-se por (4):

$$\begin{aligned} \text{Consumo de Água Mensal (L)} \\ = \text{Consumo de Água Diário (L)} \times \text{Qtde de Dias} \end{aligned} \quad (4)$$

Para o cálculo do valor a ser pago mensalmente, é utilizada em (5):

$$\begin{aligned} \text{Valor Total Mensal (R\$)} \\ = \text{Consumo Mensal (kWh)} \times \text{Valor da Tarifa} \left(\frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Em que o valor da tarifa está expresso na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Valor tarifário de consumo de energia elétrica

Demais classes	
TARIFA CONVENCIONAL	
Classe	Tarifa (R\$/kWh)
Comercial	0,39085
Iluminação Pública – B4a	0,39085
Iluminação Pública – B4b	0,42637
Industrial	0,71063
Serviço Público de Irrigação	0,71063
Poder Público	0,71063
Próprio	0,71063
Rural	0,71063

Fonte: EQUATORIAL/GO (2024).

E por fim, é verificado o tempo de retorno do investimento (payback) na automatização do sistema, em que (6), foi utilizada para se obter esse dado:

$$\text{Payback (R\$)} = \frac{\text{Investimento Inicial do Sistema (R\$)}}{\text{Abatimento da Economia Mensal (R\$)}} \quad (6)$$

Com todas essas análises e cálculos é possível determinar se a automatização do sistema é viável para o aumento da eficiência energética, com a diminuição do consumo dos recursos naturais e compensativo financeiramente para o investidor, além de, determinar o tempo de retorno do investimento.

4. RESULTADOS

Foram realizados 4 estudos de casos concretos em campo, em propriedades rurais distintas, sendo que os Estudos de Casos 1 e 4 foram realizados na Fazenda Caçapava localizada no município de Acreúna-Goiás, o Estudo de Caso 2 realizado Fazenda Lagoa Formosa localizada no município de Itaberaí-Goiás, o Estudo de Caso 3 realizado na Fazenda AgroPillati que fica no município de Porto Alegre do Tocantins-Tocantins.

4.1 ESTUDOS DE CASOS

Para realizar as comparações e os objetivos desejados, foram analisados 4 estudos de caso, 2 com o método de aspersão, sendo um de aspersão convencional para despoeiramento de currais para bois e o outro um pivô central e 2 pelo método de irrigação localizada, um pelo sistema de gotejo em tomates e um de microaspersão para banana.

Em todos os estudos de caso, vai ser abordado o antes de depois do sistema, quais melhorias foram feitas, orçamento com os valores da automação, a economia e eficiência energética após feita as melhorias e automatização dos sistemas.

4.1.1 ESTUDO DE CASO 1: DESPOEIRAMENTO PARA CURRAL DE ENGORDA DE GADO POR ASPERSÃO

O sistema de irrigação é do tipo aspersão convencional, para despoeiramento e é composto por 3 setores, como mostra a Figura 4.1. Cada setor conta com aproximadamente 1.3 hectares, com uma vazão de 18 m³/h cada setor e a pressurização do sistema é feita por uma motobomba PX15/3 de 10 CV trifásica, mostrada na Figura 4.2.



Figura 4.1. Divisão de setores.
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.2. Motor Antigo de baixa eficiência e rendimento.
Fonte: Autor Próprio (2024).

O sistema antigo era manual e cada setor ficava ligado 2 horas por dia, sendo 1 hora pela manhã e 1 hora a tarde, consumindo 36m³ de água por dia cada setor, conforme mostra a Tabela 4.1. O aspersor utilizado é do modelo Pingo setorial com vazão de 600 l/h ou 0,6m³/h, mostrado na Figura 4.3. Cada setor possui 30 aspersores com espaçamento médio de 12 metros entre cada aspersor.

Tabela 4.1: Comparação do sistema manual e automático- Características do Sistema de Despoeiramento

Tipo de Sistema	Acionamento	Período de Funcionamento do Sistema (h)	Volume de Água Por Setor/Dia (L)	Volume de Água Total/Dia (L)
Sistema Manual	Disjuntor Trifásico	2	36.000	108.000
Sistema Automatizado	Automático- Controladores	0,83	15.000	45.000

Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.3. Aspersor do Confinamento.
Fonte: Autor Próprio (2024).

O sistema antigo era utilizado registros manuais de PVC para acionar os 3 setores e o quadro elétrico era composto por um sistema de acionamento manual por disjuntores e contadoras, conforme Figuras 4.4 e 4.5.



Figura 4.4. Registros manuais PVC.
Fonte: Autor Próprio (2024).

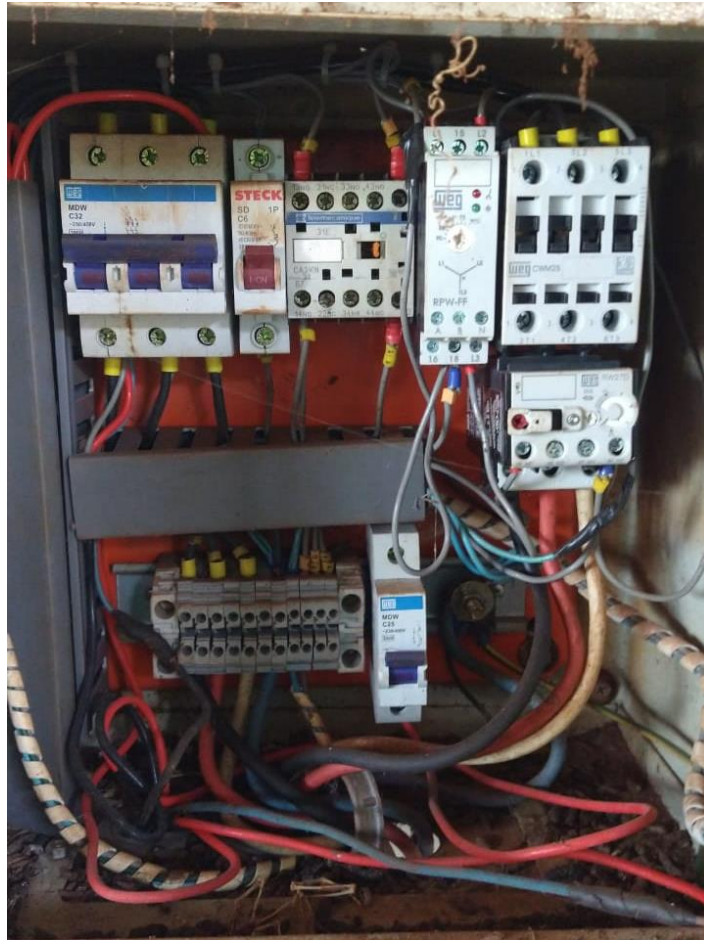


Figura 4.5. Quadro Elétrico Antigo.
Fonte: Autor Próprio (2024).

Após ser feita a automação e redimensionamento do sistema, a pressurização continuou a ser feita por uma motobomba PX15/3 de 10 CV trifásica, porém, foi trocada por uma motobomba nova, com motor atualizado e mais eficiente, conforme Figuras 4.6 e 4.7, sendo o motor antigo com eficiência igual a 0.762 e o motor novo 0.839, e os 3 setores passaram a ser acionados por válvulas hidráulicas, conforme Figura 4.8. A motobomba e as válvulas hidráulicas passaram a ser acionados por um quadro de comando com um controlador de até 4 setores, conforme Figura 4.9. Cada setor passou a ser acionado 50 minutos por dia, sendo 25 minutos pela manhã e 25 minutos a tarde e com essa atualização, cada setor passou a consumir 15 m³ por dia, conforme já foi mostrado para efeito comparativo na Tabela 4.1.



Figura 4.6. Conjunto Motobomba Atual com maior eficiência e controle.
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.7. Sistema de Controle.
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.8. Válvulas hidráulicas.
Fonte: Autor Próprio (2024).

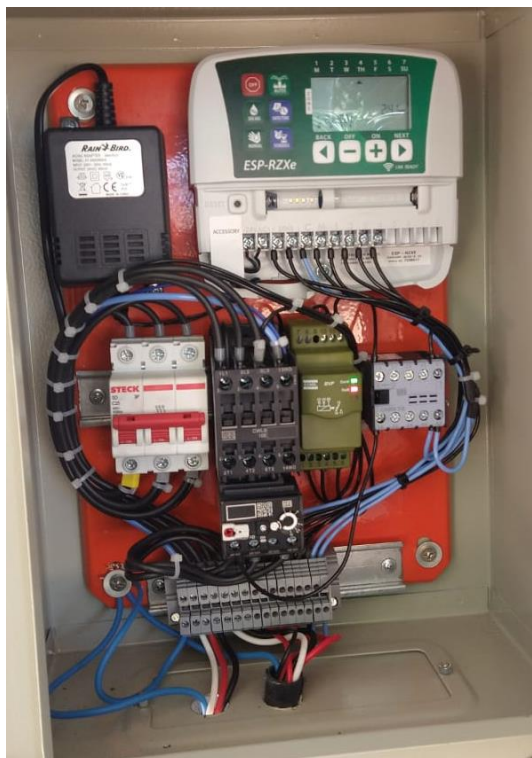


Figura 4.9. Quadro de Comando com Controlador.
Fonte: Autor Próprio (2024).

Conforme abordado na metodologia, foram levantados alguns dados e inseridos em tabelas para comprovar o aumento da eficiência energética após ser realizada a automação e redimensionamento do sistema.

Na Tabela 4.2, foi realizado comparativo entre o consumo energético dos sistemas manuais e automatizados.

Tabela 4.2: Comparativo do consumo energético manual e automatizado

Tipo de Sistema	Potência (CV)	Potência (W)	Nº de horas utilizadas por setor/dia	Qtd de Setores	Nº de horas utilizadas total/dia	Nº de dias utilizados/mês	Consumo Mensal (kWh)
Sistema Manual	10	7355	2	3	6	30	1.737,40
Sistema Automatizado	10	7355	0,83	3	2,49	30	654,84

Fonte: Autor Próprio (2024).

Observa-se que, com base nos dados da Tabela 4.2 e os cálculos de consumo mensal, para a realização do mesmo trabalho, houve uma diferença de 1.082,56 kWh por mês, diminuindo apenas a utilização do sistema de 2h por dia para 0,83h por dia. A redução observada decorre da otimização do sistema e de uma gestão eficiente. A automação permitiu a operação em períodos de menor vento, melhorando a eficiência na aplicação da água e reduzindo as perdas por deriva. Segundo análises de uma equipe técnica especializada, verificou-se que, com menor índice de perdas e maior eficiência, cada setor pode operar apenas 0,83 horas diárias para realizar a mesma quantidade de trabalho que seria realizada pelo sistema manual em 2 horas por dia.

Na Tabela 4.3, foi realizado comparativo entre o consumo de água dos sistemas manuais e automatizados.

Tabela 4.3: Comparativo do consumo de água manual e automatizado

Tipo de Sistema	Consumo de Água Diário Por Setor (L)	Qtde de Setores	Consumo de Água Diário Total (L)	Nº de dias utilizados/mês	Consumo de Água Mensal (L)
Sistema Manual	36.000	3	108.000	30	3.240.000
Sistema Automatizado	15.000	3	45.000	30	1.350.000

Fonte: Autor Próprio (2024).

Essa diminuição de 3.240.000L para 1.350.000L mensais se dá devido a utilização do sistema ser menor, pois o sistema automatizado reduziu o tempo de utilização diário.

Comparando os resultados das Tabelas 4.2 e 4.3 do antes e depois do sistema, foi constatado a diminuição da quantidade de água utilizada por mês e a economia de energia elétrica mensal.

Na Tabela 4.4, foi possível demonstrar o cálculo de economia mensal e o valor economizado mensal. Os cálculos para economia foram os descritos em (5), citados na metodologia.

Tabela 4.4: Cálculo da Economia

Tipo de Sistema	Consumo Mensal (kWh)	Valor da Tarifa (R\$/kWh)	Valor Total (R\$)
Sistema Manual	1.737,40	0,71063	1.234,64
Sistema Automatizado	654,84	0,71063	465,34

Fonte: Autor Próprio (2024).

Pôde-se observar o valor economizado, levando em consideração o consumo mensal antes e após a implantação do sistema automatizado, e o valor da tarifa, mostrado na Tabela 3.1, praticado pela distribuidora de energia, Equatorial Goiás, e assim, perceber que a economia mensal foi de R\$ 769,30.

O orçamento para implantação do sistema foi considerado e está expresso na Figura 4.10.

Produto	Descrição	Nro. Req.	Prateleira	NCM	UN	CST	Qtde	Preço unit.	Descontos	ICMS ST	Valor total
2980	BOMBA PX-15/3 N AL 10,0 CV MO	0		84137090	PC	20	1,0000	11.130,00	0,00	0,00	11.130,00
3548	TUBO COMANDO 8 MM R500M	0		84248229	MT	20	500,0000	0,80	0,00	0,00	400,00
4139	QUADRO DE COMANDO COMPLE	0		85371019	UN	0	1,0000	2.100,00	0,00	0,00	2.100,00
5826	SOLENOIDE 1/8 N.O. 3VIAS 24V	0		84248229	UN	20	3,0000	144,66	0,00	0,00	433,98
6056	CONTROLADOR ESP RZX 4 ESTA	0		84248229	UN	20	1,0000	590,00	0,00	0,00	590,00
7197	VALVULA BASICA HIDRAULICA B	0		84818094	PC	0	3,0000	450,00	0,00	0,00	1.350,00
Valor Icm Subst.		0,00	Valor IPI	0,00	Total:			14.415,46	0,00	0,00	16.003,98

Quantidade de itens:	6	Despesas:	0,00	Seguro:	0,00	Frete:	0,00	Total dos itens:	16.003,98
Total IPI:	0,00	Descontos:	0,00	Serviços:	0,00	Mercadorias:	16.003,98	Total da nota:	16.003,98
Transportadora:	0								

Figura 4.10. Composição orçamentária para implantação do sistema do Estudo de Caso 1.

Fonte: Autor Próprio (2024).

Tal custo de implantação foi considerado para se obter o Payback Simples que se trata de um modelo que leva em consideração exclusivamente duas variáveis para estimar o retorno do capital investido: o investimento inicial e a projeção média do fluxo de caixa esperado, ou seja, vamos considerar para o tempo de retorno do valor investido (Payback Simples), o custo da implantação do sistema e o abatimento do valor economizado com a diminuição do consumo de energia elétrica mensal. Tais dados podem ser observados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Payback (Tempo de Retorno do Valor Investido)

Investimento Inicial (R\$)	Abatimento da Economia Mensal (R\$)	Tempo de retorno do investimento (mês)
16.003,98	769,30	20,8

Fonte: Autor Próprio (2024).

Ao analisar a implantação do sistema, percebemos que o retorno do investimento ocorre em apenas 20,8 meses, levando em consideração exclusivamente a economia mensal no consumo de energia elétrica. Vale ressaltar que, anteriormente demandava um colaborador dedicado apenas para as operações manuais de ligar e desligar o sistema. Além disso, não podemos ignorar as falhas humanas que ocorriam, como o esquecimento ocasional de deixar o sistema ligado por um período maior do que o necessário.

4.1.2 ESTUDO DE CASO 2: IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PARA TOMATE EM ESTUFA

O sistema é composto por 6 estufas de 50x8 metros como na Figura 4.11, com uma população de 1000 plantas por estufa. O sistema é dividido em 3 setores, ou seja, 2 estufas são irrigadas ao mesmo tempo. A vazão de cada setor é de 8 m³/h. É utilizado o sistema de botão gotejador autocompensante e antidrenante de 8 litros/hora cada um. É colocado um adaptador com 4 saídas no gotejador (Figura 4.12), essas 4 saídas vão ser ligadas com um micro tubo de 2,2/5,5mm e é colocado na ponta desses micros tubos, estacas gotejadoras que são enterradas dentro dos vasos. Cada gotejador abastece 2 plantas. A pressurização do sistema é feita por uma motobomba TH-16 de 3 CV monofásica. O tomate plantado é da variedade cereja, e necessita em média entre 1,7 a 2 L de água por dia.



Figura 4.11. Vista aérea das estufas.
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.12. Sistema de gotejamento.
Fonte: IrricampoAgro (2024).

No sistema manual mostrado na Figura 4.13, era utilizado registros de PVC para acionar os 3 setores. Nesse sistema manual cada setor funcionava 1 hora por dia, sendo 30 minutos pela manhã e mais 30 minutos a tarde. Cada setor consumia 8 m³ por dia.

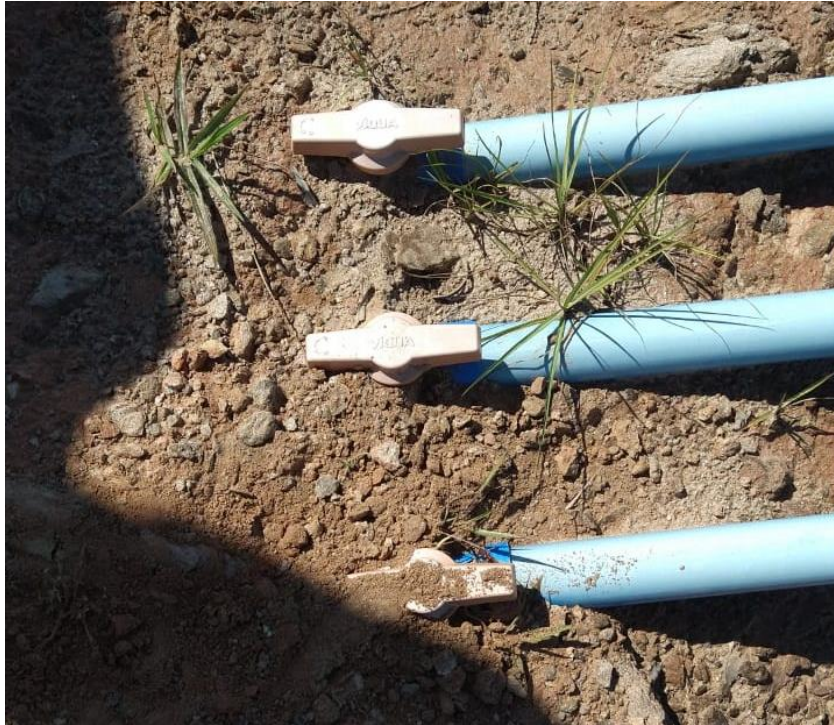


Figura 4.13. Registros manuais PVC.
Fonte: Autor Próprio (2024)

Na automatização do sistema, foi mantido a mesma motobomba, foi adicionado um quadro de comando e proteção e um controlador de 4 setores (Figura 4.14). Foi adicionado também um sistema dosador de nutrientes (Figuras 4.15 e 4.16). Esse sistema é um equipamento composto por um controlador próprio, pequenas bombas dosadoras e um cavalete, que possibilita a mistura de até 4 nutrientes diferentes e em qualquer quantidade necessária. Esse dosador puxa os nutrientes, faz a mistura e injeta na dutora principal, levando até as plantas. Esse sistema é chamado de semi-hidropônico, pois as plantas ficam em vasos, e tem apenas uma pequena quantidade de substrato para fixar suas raízes e praticamente todos os nutrientes que ela precisa durante seu ciclo, são fornecidos pela água. Após essa automatização do sistema, cada setor passou a ser irrigado 3 vezes por dia, com duração de 10 minutos cada rega, recebendo assim 2 litros de água com nutrientes por dia.

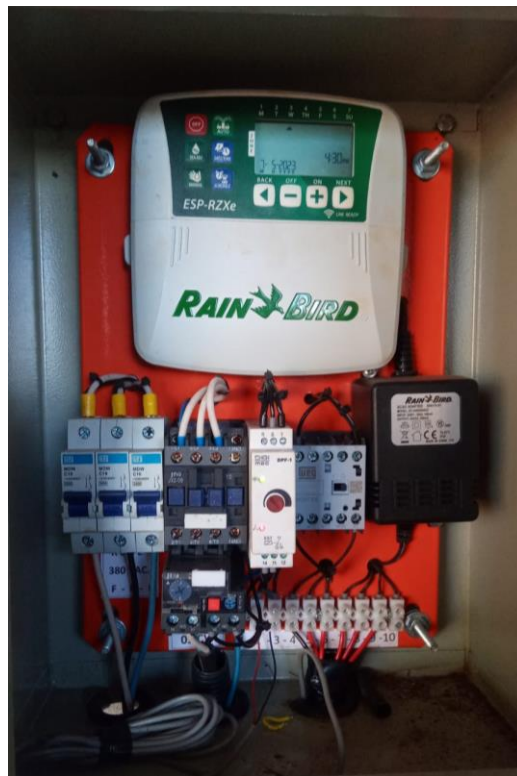


Figura 4.14. Quadro de comando e proteção.
Fonte: Autor Próprio (2024).

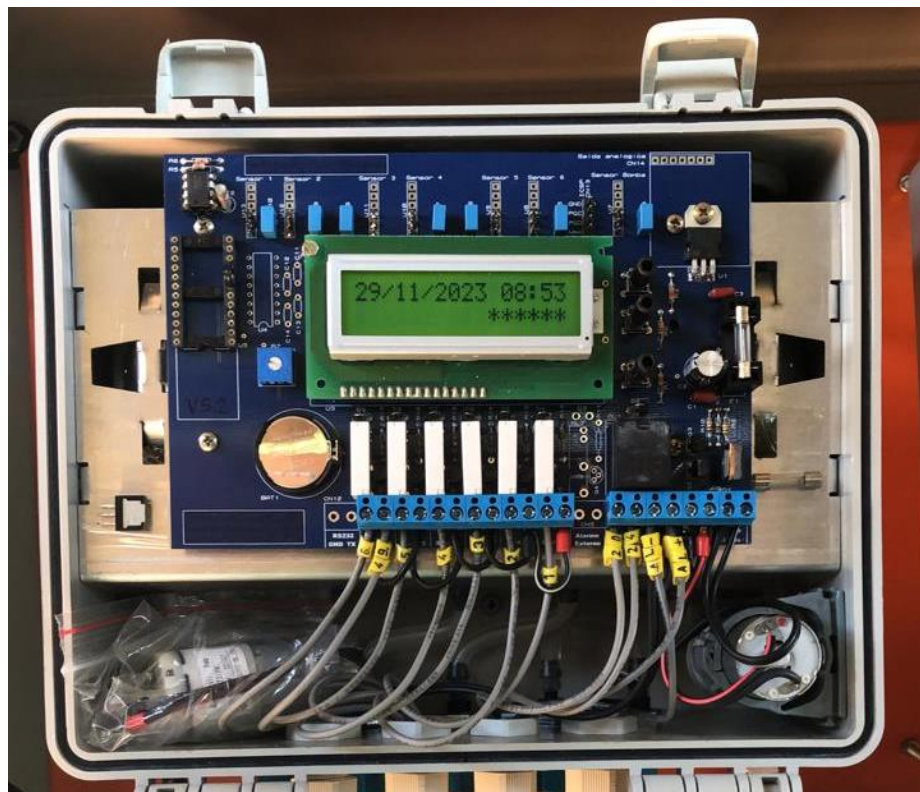


Figura 4.15. Central do dosador de fertilizante.
Fonte: Autor Próprio (2024).

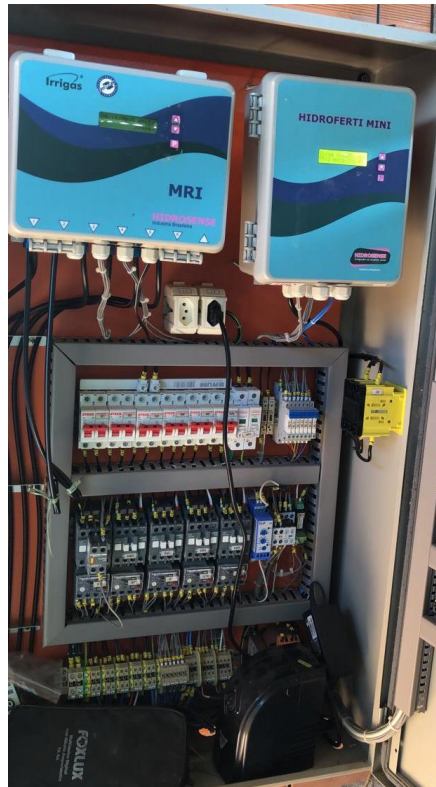


Figura 4.16. Quadro de controle e acionamento do dosador de fertilizante.
Fonte: Autor Próprio (2024).

Na Figura 4.17 é possível visualizar a qualidade e a produção desses tomates após feita a automação do sistema.



Figura 4.17. Produção dos tomates em estufa.
Fonte: IrricampoAgro (2024).

Na Tabela 4.6, está sendo demonstrada as características do sistema e realizada uma prévia comparação do tempo de funcionamento do sistema e o consumo de água por dia, antes e depois da automação do sistema:

Tabela 4.6: Comparação do sistema manual e automático- Características do Sistema de Gotejamento

Tipo de Sistema	Acionamento	Período de Funcionamento do Sistema (h)	Volume de Água Por Setor/Dia (L)	Volume de Água Total/Dia (L)
Sistema Manual	Disjuntor Trifásico	3	8.000	24.000
Sistema Automatizado	Automático- Controladores	1,5	4.000	12.000

Fonte: Autor Próprio (2024).

Conforme abordado na metodologia, foram levantados alguns dados e inseridos em tabelas para comprovar o aumento da eficiência energética após ser realizada a automação e redimensionamento do sistema.

Na Tabela 4.7, foi realizado comparativo entre o consumo energético dos sistemas manuais e automatizados.

Tabela 4.7: Comparativo do consumo energético manual e automatizado

Tipo de Sistema	Potência (CV)	Potência (W)	Nº de horas utilizadas por setor/dia	Qtd de Setores	Nº de horas utilizadas total/dia	Nº de dias utilizados/mês	Consumo Mensal (kWh)
Sistema Manual	3	2.206,5	1	3	3	30	242,76
Sistema Automatizado	3	2.206,5	0,5	3	1,5	30	121,38

Fonte: Autor Próprio (2024).

Observa-se que, com base nos dados da Tabela 4.7 e os cálculos de consumo mensal, para a realização do mesmo trabalho, houve uma diferença de 121,38 kWh por mês, diminuindo apenas a utilização do sistema de 3h por dia para 1,5h por dia. A redução observada decorre da otimização do sistema e de uma gestão eficiente. A automação permitiu a operação em períodos de menor vento, melhorando a eficiência na aplicação da água e reduzindo as perdas por deriva. Segundo análises de uma equipe técnica especializada, verificou-se que, com menor índice de perdas e maior eficiência, cada setor pode operar apenas 1,5 horas diárias para realizar a mesma quantidade de trabalho que seria realizada pelo sistema manual em 3 horas por dia.

Portanto, é perceptível, com base nos dados, que houve redução de 50% no consumo energético, apenas com o redimensionamento e automação do sistema, diminuindo a quantidade horas utilizadas diariamente.

Na Tabela 4.8, foi realizado comparativo entre o consumo de água dos sistemas manuais e automatizados.

Tabela 4.8: Comparativo do consumo de água manual e automatizado

Tipo de Sistema	Consumo de Água Diário Por Setor (L)	Qtde de Setores	Consumo de Água Diário Total (L)	Nº de dias utilizados/mês	Consumo de Água Mensal (L)
Sistema Manual	8.000	3	24.000	30	720.000
Sistema Automatizado	4.000	3	12.000	30	360.000

Fonte: Autor Próprio (2024).

Essa diminuição de 720.000L para 360.000L mensais se dá devido a utilização do sistema ser menor, pois o sistema automatizado reduziu o tempo de utilização diário.

Comparando os resultados das Tabelas 4.7 e 4.8 do antes e depois do sistema, foi constatado a diminuição da quantidade de água utilizada por mês e a economia de energia elétrica mensal.

Na Tabela 4.9, foi possível demonstrar o cálculo de economia mensal e o valor economizado mensal. Os cálculos para economia foram os descritos em (5), citados na metodologia.

Tabela 4.9: Cálculo de economia financeira entre os sistemas manual e automatizado

Tipo de Sistema	Consumo Mensal (kWh)	Valor da Tarifa (R\$/kWh)	Valor Total (R\$)
Sistema Manual	242,76	0,71063	172,51
Sistema Automatizado	121,38	0,71063	86,26

Fonte: Autor Próprio (2024).

Pôde-se observar o valor economizado, levando em consideração o consumo mensal antes e após a implantação do sistema automatizado, e o valor da tarifa, mostrado na Tabela 3.1, praticado pela distribuidora de energia, Equatorial Goiás, e assim, perceber que a economia mensal foi de R\$ 86,25.

O orçamento para implantação do sistema foi considerado e está expresso na Figura 4.18, abaixo.

Produto	Descrição	Nro. Req.	Prateleira	NCM	UN	CST	Qtde	Preço unit.	Descontos	ICMS ST	Valor total
2801	INJETOR VENTURI SI 109 1X3/4 2	0		84139190	UN	0	1,0000	10.255,00	0,00	0,00	10.255,00
6056	CONTROLADOR ESP RZX 4 ESTA	0		84248229	UN	20	1,0000	590,00	0,00	0,00	590,00
6432	QUADRO DE COMANDO COMPLE	0		85371019	UN	0	1,0000	1.500,00	0,00	0,00	1.500,00
7632	VALV.SOL.CORP.PLAST. 1.1/2 N.C	0		84818092	PC	0	3,0000	355,00	0,00	0,00	1.065,00
Valor Icm Subst.		0,00	Valor IPI	0,00	Total:		12.700,00	0,00	0,00	13.410,00	

Quantidade de itens:	4	Despesas:	0,00	Seguro:	0,00	Frete:	0,00	Total dos itens:	13.410,00
Total IPI:	0,00	Descontos:	0,00	Serviços:	0,00	Mercadorias:	13.410,00	Total da nota:	13.410,00
Transportadora:	0								

Figura 4.18. Composição orçamentária para implantação do sistema do Estudo de Caso 2.
Fonte: Autor Próprio (2024).

Tal custo de implantação foi considerado para se obter o Payback Simples que se trata de um modelo que leva em consideração exclusivamente duas variáveis para estimar o retorno do capital investido: o investimento inicial e a projeção média do fluxo de caixa esperado, ou seja, vamos considerar para o tempo de retorno do valor investido (Payback Simples), o custo da implantação do sistema e o abatimento do valor economizado com a diminuição do consumo de energia elétrica mensal. Tais dados podem ser observados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Payback (Tempo de Retorno do Valor Investido)

Investimento Inicial (R\$)	Abatimento da Economia Mensal (R\$)	Tempo de retorno do investimento (mês)
13.410,00	86,25	155,48

Fonte: Autor Próprio (2024).

Ao analisar a implantação do sistema, percebemos que o retorno do investimento ocorre em 155,48 meses, levando em consideração exclusivamente a economia mensal no consumo de energia elétrica.

A implantação do sistema implica em um custo inicial um pouco elevado. Em cenários de menor consumo, como no estudo de caso 2, o período de retorno (payback) tende a se estender, principalmente devido à redução proporcional no abatimento dos custos mensais. No entanto, é crucial notar que ocorreu uma diminuição significativa de 50% tanto na utilização do sistema quanto no consumo de energia elétrica. Isso resultou em uma redução correspondente de 50% nos custos mensais de energia elétrica, o que, considerando uma perspectiva de longo prazo, representa um benefício substancial para o investidor.

Além disso, é crucial observar outro ponto relevante: a incorporação ao sistema do equipamento identificado como produto 2801 - Injetor Venturi, conforme ilustrado na Figura 4.18. Esse dispositivo desempenha fundamentalmente a função de dosar fertilizantes, conforme previamente explicado nesse Estudo de Caso. Contudo, vale ressaltar que apenas esse equipamento acarreta um custo de R\$ 10.255,00. A sua implementação contribui de maneira significativa para o aumento na produção de tomates. Embora o aumento da produtividade não

tenha sido abordado no estudo, uma vez que não é o seu foco principal, essa variável tem um impacto direto na extensão do período de retorno (payback).

Vale ressaltar ainda que, anteriormente demandava um colaborador dedicado apenas para as operações manuais de ligar e desligar o sistema. Além disso, não podemos ignorar as falhas humanas que ocorriam, como o esquecimento ocasional de deixar o sistema ligado por um período maior do que o necessário.

4.1.3 ESTUDO DE CASO 3: IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO PARA BANANA

O sistema é composto por 8 setores, numa área total de 28 hectares. O espaçamento plantado das bananas é de 3x2,5 metros. A vazão de cada setor é de 108 m³/h. É utilizado o microaspersor de modelo rondo ultra de 75 l/h (Figura 4.19). Cada microaspersor abastece 4 plantas. A pressurização do sistema é feita por uma motobomba ETA 80-250 de 100 cv trifásica (Figura 4.20) e um conjunto de filtros com elemento filtrante em areia (Figura 4.21).

A banana precisa em média de 30 litros de água por dia.



Figura 4.19. Microaspersor rondo.
Fonte: Rivulis (2024).



Figura 4.20. Conjunto Motobomba 100CV.
Fonte: Autoria própria (2024).



Figura 4.21. Conjunto Filtros de areia.
Fonte: Autoria própria (2024).

No sistema manual, era utilizado registros de PVC (Figura 4.22) para acionar os 8 setores. Nesse sistema manual cada setor funcionava 2,5 horas por dia. Cada setor consumia 270 m³ por dia. Ou seja, cada planta recebia aproximadamente 47 litros de água por dia.



Figura 4.22. Registro de abertura e fechamento do setor.
Fonte: Autor Próprio (2024).

Na automatização do sistema, foi mantido a mesma motobomba, foi adicionado um quadro de comando e proteção e um controlador de 12 setores (Figura 4.23). Os setores passaram a ser acionados por meio de válvulas hidráulicas com regulador de pressão (Figura 4.24) e (Figura 4.25). Após essa automatização, cada setor passou a 1,6 horas por dia, fazendo com que cada setor consumisse 172,8 m³ por dia.

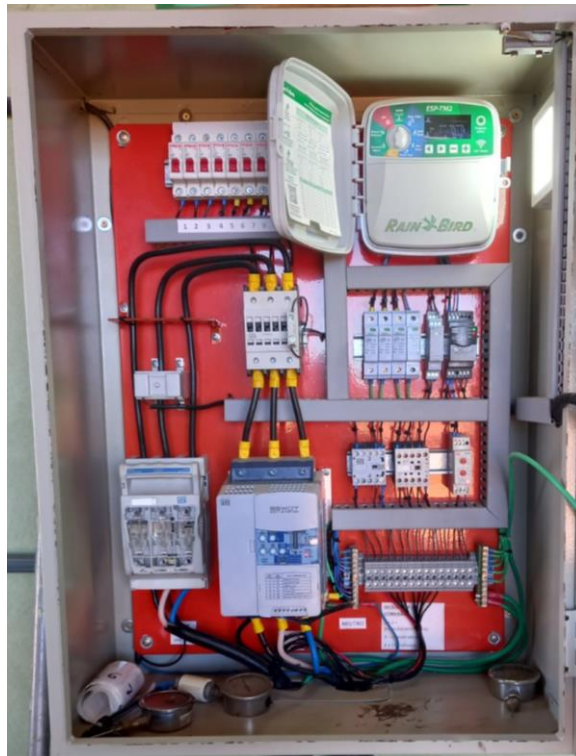


Figura 4.23. Quadro de comando e proteção.
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.24. Válvulas elétricas.
Fonte: Autor Próprio (2024).

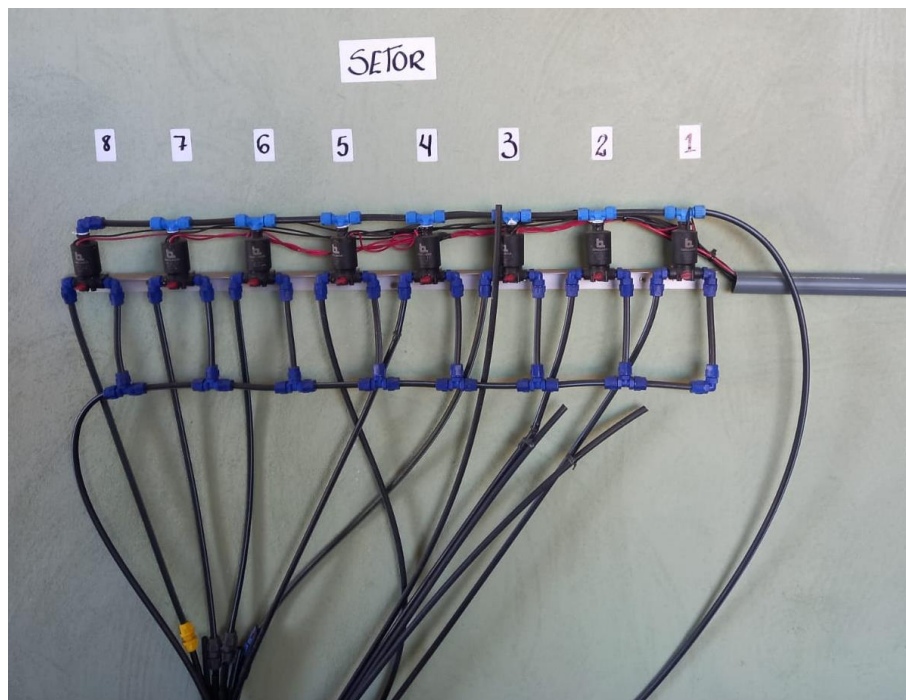


Figura 4.25. Conjunto solenoides.
Fonte: Autor Próprio (2024).

Na Tabela 4.11, está sendo demonstrada as características do sistema e realizada uma prévia comparação do tempo de funcionamento do sistema e o consumo de água por dia, antes e depois da automação do sistema:

Tabela 4.11: Comparação do sistema manual e automático- Características do Sistema de microaspersão

Tipo de Sistema	Acionamento	Período de Funcionamento do Sistema (h) / dia	Volume de Água Por Setor/Dia (L)	Volume de Água Total/Dia (L)
Sistema Manual	Disjuntor Trifásico	20	270.000	2.160.000
Sistema Automatizado	Automático- Controladores	12,8	172.800	1.382.400

Fonte: Autor Próprio (2024).

Conforme abordado na metodologia, foram levantados alguns dados e inseridos em tabelas para comprovar o aumento da eficiência energética após ser realizada a automação e redimensionamento do sistema.

Na Tabela 4.12, foi realizado comparativo entre o consumo energético dos sistemas manuais e automatizados.

Tabela 4.12: Cálculo do Consumo Energético do Conjunto Motobomba

Tipo de Sistema	Potência (CV)	Potência (W)	Nº de horas utilizadas por setor/dia	Qtd de Setores	Nº de horas utilizadas total/dia	Nº de dias utilizados/mês	Consumo Mensal (kWh)
Sistema Manual	100	73.550	2,5	8	20	30	46.452,63
Sistema Automatizado	100	73.550	1,6	8	12,8	30	29.729,68

Fonte: Autor Próprio (2024).

Observa-se que, com base nos dados da Tabela 4.12 e os cálculos de consumo mensal, para a realização do mesmo trabalho, houve uma diferença de 16.722,95 kWh por mês, diminuindo apenas a utilização do sistema de 2,5h por dia para 1,6h por dia. A redução observada decorre da otimização do sistema e de uma gestão eficiente. A automação permitiu a operação em períodos de menor vento, melhorando a eficiência na aplicação da água e reduzindo as perdas por deriva. Segundo análises de uma equipe técnica especializada, verificou-se que, com menor índice de perdas e maior eficiência, cada setor pode operar apenas 1,6 horas diárias para realizar a mesma quantidade de trabalho que seria realizada pelo sistema manual em 2,5 horas por dia.

Na Tabela 4.13, foi realizado comparativo entre o consumo de água dos sistemas manuais e automatizados.

Tabela 4.13: Comparativo do consumo de água manual e automatizado

Tipo de Sistema	Consumo de Água Diário Por Setor (L)	Qtde de Setores	Consumo de Água Diário Total (L)	Nº de dias utilizados/ mês	Consumo de Água Mensal (L)
Sistema Manual	270.000	8	2.160.000	30	64.800.000
Sistema Automatizado	172.800	8	1.382.400	30	41.472.000

Fonte: Autor Próprio (2024).

Essa diminuição de 64.800.000L para 41.472.000L mensais se dá devido a utilização do sistema ser menor, pois o sistema automatizado reduziu o tempo de utilização diário.

Comparando os resultados das Tabelas 4.12 e 4.13 do antes e depois do sistema, foi constatado a diminuição da quantidade de água utilizada por mês e a economia de energia elétrica mensal.

Na Tabela 4.14, foi possível demonstrar o cálculo de economia mensal e o valor economizado mensal. Os cálculos para economia foram os descritos em (5), citados na metodologia.

Tabela 4.14: Cálculo do consumo entre os sistemas manual e automatizado

Tipo de Sistema	Consumo Mensal (kWh)	Valor da Tarifa (R\$/kWh)	Valor Total (R\$)
Sistema Manual	46.452,63	0,71063	33.074,58
Sistema Automatizado	29.729,68	0,71063	21.126,80

Fonte: Autor Próprio (2024).

Pôde-se observar o valor economizado, levando em consideração o consumo mensal antes e após a implantação do sistema automatizado, e o valor da tarifa, mostrado na Tabela 3.1, praticado pela distribuidora de energia, Equatorial Goiás, e assim, perceber que a economia mensal foi de R\$ 11.947,78.

O orçamento para implantação do sistema foi considerado e está expresso na Figura 4.26.

Produto	Descrição	Nro. Req.	Prateleira	NCM	UN	CST	Qtde	Preço unit.	Descontos	ICMS ST	Valor total
3548	TUBO COMANDO 8 MM R500M	0		84248229	MT	20	5000,00	0,80	0,00	0,00	4.000,00
5732	CONTROLADOR 12 SETORES ES	0		84248229	UN	20	1,0000	3.080,69	0,00	0,00	3.080,69
5826	SOLENOIDE 1/8 N.O. 3VIAS 24V	0		84248229	UN	20	8,0000	144,66	0,00	0,00	1.157,28
7192	QUADRO DE COMANDO COMPLE	0		85371019	UN	0	1,0000	33.000,00	0,00	0,00	33.000,00
7692	CONJ.IRRIG.COMP.VALV.HID.3 +R	0		84248229	CJ	20	8,0000	1.215,75	0,00	0,00	9.726,00
Valor Icm Subst.		0,00	Valor IPI	0,00	Total:			37.441,90	0,00	0,00	50.963,97

Quantidade de itens:	5	Despesas:	0,00	Seguro:	0,00	Frete:	0,00	Total dos itens:	50.963,97
Total IPI:	0,00	Descontos:	0,00	Serviços:	0,00	Mercadorias:	50.963,97	Total da nota:	50.963,97
Transportadora:	0								

Figura 4.26. Composição orçamentária para implantação do sistema do Estudo de Caso 3.
Fonte: Autor Próprio (2024).

Tal custo de implantação foi considerado para se obter o Payback Simples que se trata de um modelo que leva em consideração exclusivamente duas variáveis para estimar o retorno do capital investido: o investimento inicial e a projeção média do fluxo de caixa esperado, ou seja, vamos considerar para o tempo de retorno do valor investido (Payback Simples), o custo da implantação do sistema e o abatimento do valor economizado com a diminuição do consumo de energia elétrica mensal. Tais dados podem ser observados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Payback (Tempo de Retorno do Valor Investido)

Investimento Inicial (R\$)	Abatimento da Economia Mensal (R\$)	Tempo de retorno do investimento (mês)
50.963,97	11.947,78	4,27

Fonte: Autor Próprio (2024).

Ao analisar a implantação do sistema, percebemos que o retorno do investimento ocorre em 4,27 meses, levando em consideração exclusivamente a economia mensal no consumo de energia elétrica.

Ao contrário do que ocorre no Estudo de Caso 2, uma leve modificação no sistema, com a redução de apenas 0,9 horas diárias de operação em cada setor, resulta em um impacto financeiro considerável. Isso se deve principalmente à elevada potência da bomba, já que apenas uma pequena diminuição em sua utilização acarreta em uma significativa redução nos custos e no consumo de energia elétrica.

Essa situação eleva o valor inicial do investimento, contudo, resulta em uma considerável redução no tempo de retorno. Importante destacar que a ausência da necessidade de substituir o conjunto motobomba existente contribui para uma significativa diminuição do custo inicial, resultando em um período de retorno mais curto.

Vale ressaltar ainda que, anteriormente demandava um colaborador dedicado apenas para as operações manuais de ligar e desligar o sistema. Além disso, não podemos ignorar as

falhas humanas que ocorriam, como o esquecimento ocasional de deixar o sistema ligado por um período maior do que o necessário.

4.1.4 ESTUDO DE CASO 4: IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO DO TIPO PIVÔ CENTRAL

O sistema é composto por 1 pivô central de 102 hectares (Figura 4.27) com uma vazão de 440 m³/h. Para aplicar a lâmina geral de 9mm, esse pivô leva o período de 21 horas para completar uma volta.



Figura 4.27. Pivô central.
Fonte: IrricampoAgro (2024).

O sistema antigo era utilizado um painel (Figura 4.28) para acionar a motobomba de 200CV (Figura 4.29) de forma manual e outro painel para acionar o pivô de maneira manual (Figura 4.30 e Figura 4.31). Esse equipamento funcionava em média 23 dias por mês com uma vazão diária de 9.240 m³ por dia.



Figura 4.28. Painel para acionar a motobomba.
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.29. Motobomba 200 CV.
Fonte: Autor Próprio (2024).

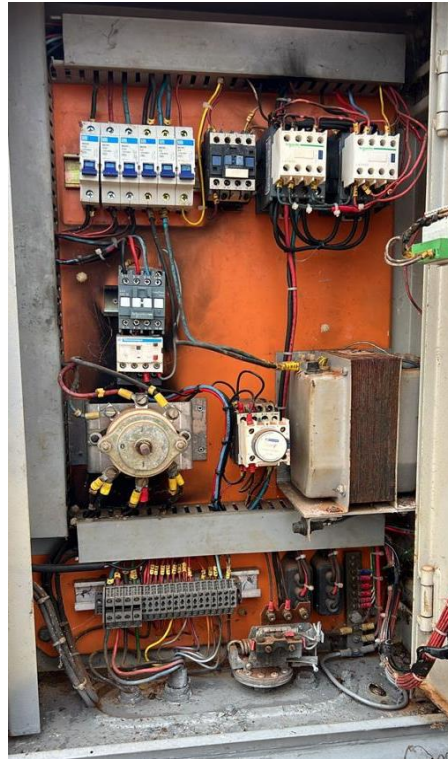


Figura 4.30. Parte interna do painel do pivô.
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.31. Parte externa do painel do pivô.
Fonte: Autor Próprio (2024).

Para melhorar a eficiência de todo o sistema e automatizar, foi trocado o conjunto motobomba antigo, que possuía uma eficiência de 80,5% por um conjunto mais novo (Figura

4.32), porém de mesmo modelo e mesma potência, com uma eficiência de 96,2%. Foi trocado também o painel central do pivô (Figura 4.33 e Figura 4.34) e o painel da bomba (Figura 4.35, Figura 4.36 e Figura 4.37). Juntamente com esse sistema, foi implantado na área desse pivô, um conjunto de 3 sensores de umidade (Figura 4.38) do modelo tensiômetro e uma estação meteorológica (Figura 4.39). Esses sensores transmitem as informações para a central e juntamente com a estação meteorológica, esse pivô é programado, para que ele acione nos dias certos e aplique a lâmina suficiente para cada fase das plantas. Após feita essa troca e automação, o pivô passou a ser ligado em média 16 dias por mês.



Figura 4.32. Conjunto Motobomba 200cv.
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.33. Vista externa do painel do pivô.
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.34. Vista interna do painel do pivô.
Fonte: Autor Próprio (2024)



Figura 4.35. Vista externa do painel da motobomba.
Fonte: Autor Próprio (2024)



Figura 4.36. Vista interna do painel da motobomba.
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.37. Vista interna do painel da motobomba.
Fonte: Autor Próprio (2024).



Figura 4.38. Tensiômetro.
Fonte: Autor Próprio (2024)



Figura 4.39. Estação meteorológica.
Fonte: Metos (2024).

Na Tabela 4.16, está sendo demonstrada as características do sistema e realizada uma prévia comparação do tempo de funcionamento do sistema e o consumo de água por dia, antes e depois da automação do sistema:

Tabela 4.16: Comparação do sistema manual e automático- Características do Sistema Pivô Central

Tipo de Sistema	Acionamento	Período de Funcionamento do Sistema (h) / dia	Volume de Água Por/Dia (L)
Sistema Manual	Disjuntor Trifásico	21	9.240.000
Sistema Automatizado	Automático- Controladores	16	9.240.000

Fonte: Autor Próprio (2024).

Conforme abordado na metodologia, foram levantados alguns dados e inseridos em tabelas para comprovar o aumento da eficiência energética após ser realizada a automação e redimensionamento do sistema.

Na Tabela 4.17, foi realizado comparativo entre o consumo energético dos sistemas manuais e automatizados.

Tabela 4.17: Comparativo do consumo energético manual e automatizado

Tipo de Sistema	Potência (CV)	Potência (W)	Nº de horas utilizadas total/dia	Nº de dias utilizados/mês	Consumo Mensal (kWh)
Sistema Manual	200	147.100	21	23	88.260
Sistema Automatizado	200	147.100	21	16	51.377,96

Fonte: Autor Próprio (2024).

Observa-se que, com base nos dados da Tabela 4.17 e os cálculos de consumo mensal, para a realização do mesmo trabalho, houve uma diferença de 36.882,04 kWh por mês, diminuindo apenas a utilização do sistema de 23h por dia para 16h por dia. A redução observada decorre da otimização do sistema e de uma gestão eficiente. A automação permitiu a operação em períodos de menor vento, melhorando a eficiência na aplicação da água e reduzindo as perdas por deriva. Segundo análises de uma equipe técnica especializada, verificou-se que, com menor índice de perdas e maior eficiência, cada setor pode operar apenas 16 horas diárias para realizar a mesma quantidade de trabalho que seria realizada pelo sistema manual em 23 horas por dia.

Na Tabela 4.18, foi realizado comparativo entre o consumo de água dos sistemas manuais e automatizados.

Tabela 4.18: Comparativo do consumo de água manual e automatizado

Tipo de Sistema	Consumo de Água Diário (L)	Nº de dias utilizados/mês	Consumo de Água Mensal (L)
Sistema Manual	9.240.000	23	212.520.000
Sistema Automatizado	9.240.000	16	147.840.000

Fonte: Autor Próprio (2024).

Na Tabela 4.19, foi possível demonstrar o cálculo de economia mensal e o valor economizado mensal. Os cálculos para economia foram os descritos em (5), citados na metodologia.

Tabela 4.19: Cálculo do consumo mensal entre os sistemas manual e automatizado

Tipo de Sistema	Consumo Mensal (kWh)	Valor da Tarifa (R\$/kWh)	Valor Total (R\$)
Sistema Manual	88.260	0,71063	62.720,20
Sistema Automatizado	51.377,96	0,71063	36.510,72

Fonte: Autor Próprio (2024).

Pôde-se observar o valor economizado, levando em consideração o consumo mensal antes e após a implantação do sistema automatizado, e o valor da tarifa, mostrado na Tabela 3.1, praticado pela distribuidora de energia, Equatorial Goiás, e assim, perceber que a economia mensal foi de R\$ 26.209,48.

O orçamento para implantação do sistema foi considerado e está expresso na Figura 4.40.

Produto	Descrição	Nro. Req.	Prateleira	NCM	UN	CST	Qtde	Preço unit.	Descontos	ICMS ST	Valor total
1233	CJ PAINEL COMANDO TC 5001 -K	0		84248229	UN	20	1,0000	9.925,77	0,00	0,00	9.925,77
39695	QUADRO DE COMANDO COMPL	0		85371019	UN	0	1,0000	62.320,00	0,00	0,00	62.320,00
41371	MOTOBOMBA 100-065-200 GG D	0		84137090	UN	20	1,0000	239.250,00	0,00	0,00	239.250,00
Valor Icm Subst.		0,00	Valor IPI	0,00	Total:		311.495,77	0,00	0,00	311.495,77	
Quantidade de itens:	3	Despesas:	0,00	Seguro:	0,00	Frete:	0,00	Total dos itens:	311.495,77		
Total IPI:	0,00	Descontos:	0,00	Serviços:	0,00	Mercadorias:	311.495,77	Total da nota:	311.495,77		
Transportadora:	0										

Figura 4.40. Composição orçamentária para implantação do sistema do Estudo de Caso 4.

Fonte: Autor Próprio (2024).

Tal custo de implantação foi considerado para se obter o Payback Simples que se trata de um modelo que leva em consideração exclusivamente duas variáveis para estimar o retorno do capital investido: o investimento inicial e a projeção média do fluxo de caixa esperado, ou

seja, vamos considerar para o tempo de retorno do valor investido (Payback Simples), o custo da implantação do sistema e o abatimento do valor economizado com a diminuição do consumo de energia elétrica mensal. Tais dados podem ser observados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Payback (tempo de retorno do valor investido)

Investimento Inicial (R\$)	Abatimento da Economia Mensal (R\$)	Tempo de retorno do investimento (mês)
311.495,77	26.209,48	11,88

Fonte: Autor Próprio (2024).

Ao analisar a implantação do sistema, percebemos que o retorno do investimento ocorre em apenas 11,88 meses, levando em consideração exclusivamente a economia mensal no consumo de energia elétrica. Vale ressaltar que, anteriormente demandava um colaborador dedicado apenas para as operações manuais de ligar e desligar o sistema. Além disso, não podemos ignorar as falhas humanas que ocorriam, como o esquecimento ocasional de deixar o sistema ligado por um período maior do que o necessário.

Outro ponto importante a ser observado, foi a melhoria da eficiência da irrigação, sendo possível irrigar nos dias necessários com a quantidade de água que a planta exige. Com isso, foi observado a diminuição de doenças causadas pelo excesso de umidade e um aumento na produção.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou explorar e analisar quatro estudos de caso relacionados à implementação de sistemas de irrigação automatizados em diferentes contextos agrícolas. A diversidade dos estudos, que incluiu sistemas de aspersão convencional, gotejamento em estufas, microaspersão para cultivo de banana e um pivô central, proporcionou uma visão abrangente dos benefícios da automação na otimização do uso de recursos hídricos e energéticos na agricultura.

O estudo de caso realizado na Fazenda Caçapava, em Acreúna-Goiás mostrou que a automação e redimensionamento do sistema de aspersão convencional resultaram em uma significativa economia de água e energia. A introdução de válvulas hidráulicas e a substituição da motobomba por um modelo mais eficiente demonstraram não apenas uma redução no consumo de recursos, mas também uma considerável economia financeira de R\$ 769,30. O período de retorno do investimento, utilizando o conceito de Payback Simples, mostrou-se relativamente curto de 20,8 meses, indicando uma rápida recuperação do capital investido.

No segundo estudo de caso, focado no cultivo de tomate em estufas na Fazenda Lagoa Formosa, Itaberaí-Goiás, a automação do sistema de gotejamento resultou em uma redução expressiva no consumo de água e energia elétrica. A diminuição de 50% do tempo de funcionamento diário dos setores e a introdução de um sistema dosador de nutrientes contribuíram não apenas para a eficiência operacional, mas também para a qualidade do cultivo. O Payback Simples indicou um retorno a longo prazo de 155,48 meses em relação ao investimento inicial.

Na Fazenda AgroPillati, em Porto Alegre do Tocantins-Tocantins, o estudo de caso envolvendo a irrigação por microaspersão para o cultivo de banana evidenciou uma redução de 777.600 L no consumo de água e 16.722,95 kWh no consumo de energia mensal. A automação, aliada à instalação de sensores de umidade e uma estação meteorológica, possibilitou uma gestão precisa e eficiente dos recursos hídricos. O Payback Simples indicou um retorno financeiro atrativo em um curto período de 4,27 meses.

O último estudo de caso, referente à irrigação por pivô central na Fazenda Caçapava, Acreúna-Goiás, destacou a importância da automação na gestão de grandes áreas agrícolas. A troca do conjunto motobomba e a introdução de sensores de umidade resultaram em uma economia expressiva de 64.680.000 L de água e 36.882,04 kWh de energia elétrica. O Payback Simples revelou um retorno do investimento em um período relativamente curto de 11,88 meses.

Em síntese, os estudos de caso corroboram a tese de que a automação dos sistemas de irrigação não apenas otimiza o uso de recursos, mas também traz benefícios econômicos substanciais para os produtores agrícolas. A redução nos custos operacionais, aliada à eficiência aprimorada, torna a automação uma estratégia viável e vantajosa para a agricultura sustentável. Entretanto, é crucial ressaltar a importância de análises específicas para cada caso, considerando as peculiaridades de cada sistema e cultura cultivada.

Dessa forma, os resultados obtidos nos estudos de caso proporcionam insights valiosos para a tomada de decisão de agricultores, gestores e demais envolvidos no setor, destacando a necessidade contínua de inovação e adoção de práticas sustentáveis para garantir a eficiência e a resiliência do sistema agrícola frente aos desafios ambientais e econômicos.

Através deste estudo, ficou evidenciado a eficiência energética aplicada aos modelos atuais de irrigação, pois produtores que realizam plantações de grande porte, ou até residências com jardins, ao adotarem tal sistema, irão assim ter um aumento significativo na eficiência energética na irrigação, pois este sistema apresenta viabilidade econômica ao longo da vida útil do equipamento de irrigação, além de apresentar contribuição nas despesas com energia elétrica, onde as mesmas serão reduzidas anualmente.

Além disso, para uma compreensão mais detalhada desse tema, sugere-se que futuras pesquisas abordem as implicações econômicas, sociais e ambientais que o aumento da eficiência energética na irrigação pode gerar. Outro ponto importante é a análise de modelos de negócios sustentáveis interligados a irrigação, explorar novas tecnologias que aumentem a eficiência, o custo de manutenção e operação de sistemas mais eficientes de irrigação e se é possível aumentar a eficiência do sistema, e se esse aumento da eficiência pode afetar de alguma maneira a produção.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL H. *et al.* An improved energy efficient system for IoT enabled precision agriculture. **J. Ambient Intell. Hum. Comput.** v. 11, p. 2337-2348, 2020.
- AKASHI, S.; ISHII, H.; CETINKAYA, A. Self-triggered control with tradeoffs in communication and computation. **Automatica.** v. 94, p. 373-380, 2018.
- ARAÚJO, J. *et al.* System Architectures, Protocols and Algorithms for Aperiodic Wireless Control Systems. **IEEE Trans. Ind. Inform.** v. 10, p. 175-184, 2014.
- BARBOSA, B.D.S. *et al.* Eficiência energética de um sistema de irrigação por pivô central, **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.38, n.2, p.284-292, 2018.
- BASSOI, L. H. *et al.* Agricultura de precisão e agricultura digital. **TECCOGS: Revista Digital de Tecnologias Cognitivas**, n. 20, p. 17-36, 2019.
- BUZURA, S. *et al.* Optimizations for Energy Efficiency in Software-Defined Wireless Sensor Networks. **Sensors.** v. 20, p. 2020.
- CHEN, J.; YANG, A. Intelligent Agriculture and Its Key Technologies Based on Internet of Things Architecture. **IEEE Access.** v. 7, p. 77134-77141.
- COBOS, D.R. *Calibrating ECH2O Soil Moisture Sensors. Application Note; Decagon Devices; Pullman, WA, USA: 2010.*
- CÓRCOLES, J.I. *et al.* Management evaluation of Water Users Associations using benchmarking techniques. **Agricultural Water Management.** v. 98, n. 1, p. 1-11, 2010.
- DE ALMEIDA, A.N.; COELHO, D.R.; COSTA, J. de O.; FARIAS, J.A.: “Methodology for Dimensioning of a Center Pivot Irrigation System Operating with Dripper Type Emitter”, **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 4, p. 828-837, 2017.
- DOMINGUEZ-NIÑO, J.M. *et al.* On the Accuracy of Factory-Calibrated Low-Cost Soil Water Content Sensors. **Sensors.** v. 19, p. 1-18, 2019.
- Eletrônica Embalagens. **Placa Arduino MKR.** 2023. Disponível em: <<https://www.eletronicaembajadores.com/pt/Productos/Detalle/LCA3012/modulos-eletronicos/arduino-mkr/arduino-mkr-zero-placa-original-com-atmel-samd21-para-iot-bus-i2s-e-sd-5-v-32-768-khz-48-mhz-abx00012/>>. Acesso em: 01 out. 2023.
- FOUNTAS, S. *et al.* Farm management information systems: Current situation and future perspectives. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 115, p. 40-50, 2015.
- GOAP, A. *et al.* An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. **Comput. Electron. Agric.** v. 155, p. 4-49, 2018.
- GUIMARAES, D.P.; LANDAU, E.C. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil em 2013.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1008950/1/bol106.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2023.

GUPTA, V.; TRIPATHI, S. Green Sensing and Communication: A Step Towards Sustainable IoT Systems. *J. Indian Inst. Sci.* 2020;v. **100**:383–398.

GUTIERREZ, J. *et al.* Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* v. 63, p. 166-176, 2014.

HU, X. *et al.* Review of operational management in intelligent agriculture based on the Internet of Things. *Front. Eng. Manag.* v. 7:309-322, 2020.

ISPA. **Internacional de Agricultura de Precisão**. Disponível em: <<https://www.ispag.org>>. Acesso em: 29 set. 2023.

JAWAD, H.M. *et al.* Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. *Sensors.* v. 17, p. 1-45, 2017.

JAWAD, H.M. *et al.* Power Reduction with Sleep/Wake on Redundant Data (SWORD) in a Wireless Sensor Network for Energy-Efficient Precision Agriculture. *Sensors.* v. 18, p. 1-26, 2018.

KHANNA, A.; KAUR, S. Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. *Comput. Electron. Agric.* v. 157, p. 218-231, 2019.

KHASHOOEI, B.A. *et al.* Output-Based Event-Triggered Control with Performance Guarantees. *IEEE Trans. Autom. Control.* v. 72, p. 3646-3652, 2017.

KOZLOWSKI A., SOSNOWSKI J. Energy Efficiency Trade-Off Between Duty-Cycling and Wake-Up Radio Techniques in IoT Networks. *Wirel. Pers. Commun.* v. 107, p. 1951-1971, 2019.

LOZOYA, C. *et al.* Sensor-based Model Driven Control Strategy for Precision Irrigation. *J. Sens.* v. 2016, p. 1-12, 2016.

LOZOYA, C. *et al.* A precision Irrigation model using hybrid automata. *Trans. ASABE.* v. 62, p. 1639-1650, 2019.

LOZOYA, C. *et al.* Energy-Efficient Wireless Communication Strategy for Precision Agriculture Irrigation Control. *Sensors.* v. 21, p. 1-17, 2021.

LÓPEZ-SILVA, M. *et al.* Efficiency Criteria to Evaluate Sprinkler Irrigation. *Revista Ciências Técnicas Agropecuárias*, v. 28, n. 3, 2019.

LÓPEZ, S.M.; CARMENATES, H.D.; MUJICA, C.A.; PANEQUE, R.P.: “Nuevo criterio para el diseño hidráulico del sistema de riego de pivote central”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, v. 26, n. 3, p. 12-21, 2017.

MOLIN, J.P. *et al.* Agricultura de precisão e as contribuições digitais para a gestão localizada das lavouras. *Revista Ciência Agronômica*, v. 51, p. 1-140, 2020

MORENO, M.A. *et al.* Energy analysis of irrigation delivery systems: monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency. *Irrig Sci.* v. 3, p. 1-7, 2010.

MUANGPRATHUB, J. *et al.* IoT and agriculture data analysis for smart farm. *Comput. Electron. Agric.* v. 156, p. 467-474, 2019.

HADDAD, Jamil. *et al.* **Quem é Quem da Eficiência Energética**. 2019. Disponível em: <https://cooperacaobrasil-alemanha.com/SEF/Quem_e_quem_eficiencia_energetica.pdf>. Acesso em 18 de dezembro de 2023.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.991, de 24 de julho de 2000**. *Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências*. Brasília, DF, 2000.

MUZAKKARI, B.A. *et al.* Queue and Priority-Aware Adaptive Duty Cycle Scheme for Energy Efficient Wireless Sensor Networks. *IEEE Access.* v. 8, p. 17231-17242, 2020.

NAVARRO-HELLÍN, H., *et al.* A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management. *Agric. Water Manag.* v. 151, p. 64-74, 2015.

OJEDA, B.W.; SIFUENTES, I.E.; ROJANO, A.A.; IÑIGUEZ, M.: **Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático**, Primera edición ed., vol. 4, México, v. 65-113 p. 1-53, 2012.

POPOVIĆ, T. *et al.* Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study. *Comput. Electron. Agric.* v. 140, p. 255-265, 2017.

RAJESWARI, S.; SUTHENDRAN, K. C5.0: Advanced Decision Tree (ADT) classification model for agricultural data analysis on cloud. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 156, p. 530-539, 2019.

RODRÍGUEZ DÍAZ, J.A. *et al.* Evaluation of water and energy use in pressurized irrigation networks in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. v. 137, n. 10, p. 644-650, 2011.

RUPNIK, R. *et al.* AgroDSS: A decision support system for agriculture and farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 161, p. 260-271, 2019.

SCHONS, R.L. *et al.* Setting efficiency indicators for center pivots. *Engenharia Agrícola*. v. 32, n. 3, p. 459-466, 2012.

SERGIEIEVA, K. **Irrigação De Precisão: Métodos E Gerenciamento**. 2022. Disponível em: <<https://eos.com/pt/blog/irrigacao-de-precisao/>>. Acesso em: 01 out. 2023.

TARJUELO, J.M.; RODRIGUEZ, D.J.A.; ABADÍA, R.; CAMACHO, E.; ROCAMORA, C.; MORENO, M.A.: “Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies”, *Agricultural Water Management*, v. 162, p. 67-77, 2015.

YAZDANI, M. *et al.* A group decision making support system in logistics and supply chain management. *Expert Systems with Applications*, v. 88, p. 376-392, 2017.

ZHAI, Z. *et al.* Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 170, 2020.

ZHUO, L.; HOEKSTRA, A.Y.: “The effect of different agricultural management practices on irrigation efficiency, water use efficiency and green and blue water footprint”, **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 4, n. 2, p. 185-194, 2017.

WATTEYNE, T.; MOLINARO, A.; RICHICHI, M. G.; DOHLER, M. From MANET To IETF ROLL Standardization: A Paradigm Shift in WSN Routing Protocols. **Communications Surveys & Tutorials**, **IEEE**, v. 13, n. 4, p. 688-707, 2011.

VASCONCELOS, H.S. **Automação de sistema de irrigação em malha fechada utilizando rede sem fio de sensores capacitivos de umidade do solo**. Fortaleza, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/18180/1/2013_dis_hsvasconcelos.pdf>. Acesso em: 01 out. 2023.

ZIGBEE - **Connectivity Standards Alliance**. 2021. Disponível em: <<https://zigbeealliance.org/solution/Zigbee/>>. Acesso em: 01 out. 2023.

ABRHIDRO. **Principal fonte de energia de cada estado do Brasil**. 2023. Disponível em: <<https://www.site.abrhidro.org.br/post/principal-fonte-de-energia-de-cada-estado-do-brasil>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

EQUATORIAL/GO. **Valores de Tarifas e Serviços- Demais Classes**. 2023. Disponível em: <<https://go.equatorialenergia.com.br/valor-de-tarifas-e-servicos/#demais-classes>>. Acesso em: 18 nov. 2023.