

TATIANE BORTOLETTO GOMES DA SILVA

**SOFTWARE PARA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DO
INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM PIVÔ CENTRAL**

**Botucatu
2020**

TATIANE BORTOLETTO GOMES DA SILVA

**Software para avaliação da viabilidade econômica do uso do inversor de
frequência em pivô central**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia: Irrigação e
Drenagem.

Orientador: Enzo Dal Pai
Coorientador: Diego Augusto de Campos
Moraes

**Botucatu
2020**

S586s	Silva, Tatiane Bortoletto Gomes da Software para avaliação da viabilidade econômica do uso do inversor de frequência em pivô central / Tatiane Bortoletto Gomes da Silva. -- Botucatu, 2020 82 p. : il., tabs., fotos, mapas Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Enzo Dal Pai Coorientador: Diego Augusto de Campos Moraes 1. Agricultura e energia. 2. Irrigação agrícola. 3. Software. 4. Conversores de corrente elétrica. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

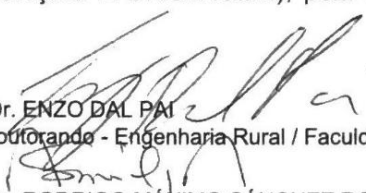
TÍTULO DA TESE: SOFTWARE PARA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM PIVÔ CENTRAL

AUTORA: TATIANE BORTOLETTO GOMES DA SILVA

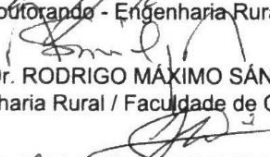
ORIENTADOR: ENZO DAL PAI

COORIENTADOR: DIEGO AUGUSTO DE CAMPOS MORAES

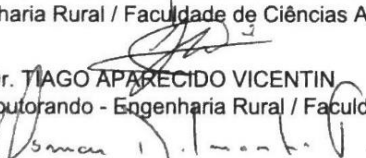
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ENZO DAL PAI
Pós-Doutorando - Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu



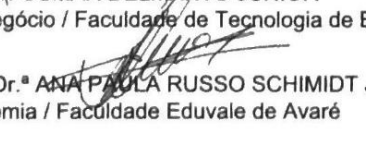
Prof. Dr. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN
Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. TIAGO APARECIDO VICENTIN
Pós-Doutorando - Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu



Prof. Dr. OSMAR DELMANTO JUNIOR
Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Botucatu



Prof.ª Dr.ª ANA PAULA RUSSO SCHIMIDT JEFERY
Agronomia / Faculdade Eduvale de Avaré

Botucatu, 30 de janeiro de 2020

*“A Felicidade não se resume na ausência
de problemas, mas sim na sua
capacidade de lidar com eles.”*

(Albert Einstein)

*À minha família e meu noivo Gabriel
Henrique, por incentivar meus estudos e
me ensinar bons princípios, necessários
para a construção de um bom caráter.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

- ❖ A Deus, por ter me dado força para a realização desse trabalho e ter colocado pessoas competentes no meu caminho.
- ❖ Aos meus pais, Josué e Odete, que sempre me deram todo o suporte emocional e financeiro para que eu continuasse com meus estudos. Ensinarão-me a nunca desistir e que sacrifícios são necessários para o desenvolvimento pessoal.
- ❖ À minha irmã, Sabrina, que sempre foi um exemplo a ser seguido. Muito estudiosa, disciplinada e aplicada. Além disso, uma grande amiga.
- ❖ Ao meu irmão, Bruno Augusto, pelo carinho e dedicação de sempre.
- ❖ Ao meu namorado, Gabriel Henrique, por dividir comigo os momentos difíceis e também os de alegria, sendo parceiro e incentivador da minha carreira acadêmica.
- ❖ À família do meu namorado, pelo carinho, companheirismo e apoio.
- ❖ Aos Professores Enzo Dal Pai e Diego Augusto de Campos Moraes pela orientação e apoio.
- ❖ Ao Professor João Carlos Cury Saad e Rafael Ludwig pela disponibilização de dados para o desenvolvimento desse trabalho.
- ❖ Aos amigos, que me apoiaram e ajudaram durante toda essa jornada. Em especial à Flávia, Renata, Franciana, Evanize, Donizeti, Carlos, Luiz e André.
- ❖ À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

RESUMO

O sistema de irrigação por pivô apresenta um potencial de redução de consumo de energia elétrica quando está irrigando em declive, uma vez que é projetada para atender o ponto de maior demanda de potência, em auge. Sendo assim, o inversor de frequência é uma alternativa para essa redução de consumo de energia elétrica em pivô central. O inversor de frequência permite um ajuste na demanda de potência no motor, através do controle da velocidade de rotação. O objetivo desse trabalho foi obter uma ferramenta computacional para análise da viabilidade econômica do uso do inversor de frequência em pivô central. Essa ferramenta computacional foi desenvolvida em linguagem de programação Object Pascal por meio do ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) Delphi Community Edition. Esse software realiza simulações da operação do pivô central nas diferentes posições na área irrigada gerando dados de saída de desempenho do pivô central com e sem a interferência do inversor de frequência. Por fim, o software indica a viabilidade ou não da aquisição do inversor de frequência considerando a topografia local, os indicadores econômicos, a tarifa de energia elétrica local, as horas trabalhadas anuais e o custo do inversor de frequência. Esses dados considerados são variáveis que alteram a viabilidade econômica da utilização do inversor de frequência. De acordo com a simulação realizada pelo software, o inversor de frequência diminuiu a média da pressão no sistema, de 39,2 mca (sem inversor) para 19,8 mca (com inversor), diminuindo a potência e, conseqüentemente, o consumo e custo de energia elétrica do sistema, apresentando uma redução de custo energético de 31,6 %.

Palavras-chave: Economia de energia. Índices econômicos. Irrigação. Programa Computacional.

ABSTRACT

Center pivot irrigation system has the potential to reduce electricity consumption when irrigating downhill, since it is designed to meet the point of greatest power demand, on a uphill. Thus, frequency inverter is an alternative for this reduction of electric power consumption in center pivot, after all, this equipment allows an adjustment in power demand in the motor, through the control of the rotation speed. The purpose of this work was to obtain a computational tool to analyze the economic viability of using the frequency inverter in center pivot. This computational tool was developed in the Object Pascal programming language through the Delphi Community Edition integrated development environment (IDE). This software performs simulations of the center pivot operation in different positions in the irrigated area, generating performance output data from the center pivot with and without the frequency inverter interference. Finally, the software indicates the viability or not of the frequency inverter acquisition considering local topography, economic indicators, local electricity tariff, hours worked annually and the frequency inverter cost. These data considered are variables that alter the economic viability of using the frequency inverter. According to the simulation performed by the software, the frequency inverter decreased the average pressure in the system, from 39.2 mca (without inverter) to 19.8 mca (with inverter), decreasing power and, consequently, consumption and electricity cost of the system, presenting a reduction of energy cost of 31.6%.

Keywords: Computational Program. Economic Indexes. Energy Saving. Irrigation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pivô central (A) e Torre fixa (B).....	23
Figura 2 - Curva característica com nova rotação.....	28
Figura 3. Esquema demonstrativo de como a alteração da frequência de um motor altera o consumo de energia elétrica	29
Figura 4 - Pressão ao longo da linha lateral de um pivô central irrigando em nível, em aclave (A') e em declive (A).....	30
Figura 5 - Gráfico de VPL em função da TIR	34
Figura 6 - Variograma experimental e seus parâmetros	37
Figura 7. Comparação entre o software desenvolvido por Ludwig (2015) e o software desenvolvido por Silva (2020)	41
Figura 8 – Dados de entrada e saída do software.....	42
Figura 9 - Fluxograma da simulação da pressão otimizada com uso do inversor de frequência.....	44
Figura 10 - Sub-rotina de testes para obter o valor da pressão no último emissor por meio da pressão estabelecida pelo usuário	45
Figura 11 - Sub-rotina de ajuste da pressão mínima necessária para funcionamento dos emissores e finalização dos cálculos.....	46
Figura 12 - Fluxograma da simulação da otimização energética	48
Figura 13 - Imagem da área irrigada pelo Pivô Central e mapa de curvas de nível da área irrigada	52
Figura 14 - Curva da bomba IMBIL ITAP 150/400 (1750 rpm)	54
Figura 15 - Identificação do Pivô Central avaliado e acesso às demais janelas do software.....	57
Figura 16 – Janela de inserção dos dados do sistema de irrigação por Pivô Central	58
Figura 17 – Janela de inserção dos dados da área irrigada pelo Pivô Central	59
Figura 18 - Janela da pressão em cada emissor e posição do pivô central sem o inversor de frequência.....	60
Figura 19 - Janela de apresentação da pressão presente no sistema de bombeamento sem inversor de frequência	60
Figura 20 - Janela de apresentação da simulação das pressões nos emissores considerando a atuação do inversor de frequência.....	62

Figura 21 - Janela da otimização do pivô central com a atuação do inversor de frequência.....	63
Figura 22 - Comportamento da curva da bomba IMBIL® ITAP 125/400 em diferentes velocidades de rotação do motor considerando as Relações de Rateaux	63
Figura 23 – Curva de rendimento da bomba considerando diferentes velocidades de rotação do motor segundo o fabricante	64
Figura 24 - Janela da otimização energética e da viabilidade econômica	65
Figura 25 – Demonstração da divisão das seções	67
Figura 26 - Distribuição de frequência de dados (A) e Frequência cumulativa (B) da pressão no pivô central sem inversor de frequência. Distribuição de frequência de dados (C) e Frequência cumulativa (D) da pressão no pivô central sem inversor de frequência.....	70
Figura 27 - Variograma (A) e Representação gráfica (B) da pressão no pivô central sem inversor de frequência. Variograma (C) e Representação gráfica (D) da pressão no pivô central com inversor de frequência	71
Figura 28 - Representação gráfica da pressão no pivô central sem inversor de frequência.....	72
Figura 29 - Representação gráfica da pressão no pivô central com inversor de frequência.....	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVO	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1	O Sistema de Irrigação Pivô Central.....	22
3.1.1	Determinação da pressão na linha lateral.....	24
3.1.2	Determinação da pressão em um ponto na linha lateral.....	25
3.1.3	Sistemas de bombeamento	26
3.2	Inversor de frequência	27
3.3	Análise econômica.....	32
3.4	Tarifação de energia elétrica no Brasil.....	35
3.5	Análise Geoestatística	36
3.6	Metodologia do Erro Médio.....	38
3.7	Software para avaliação de desempenho de pivô central.....	38
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
4.1	Desenvolvimento do software	41
4.1.1	Simulação do pivô central sem inversor de frequência.....	42
4.1.2	Simulação do pivô central com inversor de frequência.....	43
4.1.3	Simulação da otimização energética	46
4.1.4	Análise econômica.....	50
4.2	Caracterização do sistema de irrigação avaliado	52
4.2.1	Características do pivô central.....	53
4.2.2	Características sistema de bombeamento.....	53
4.2.3	Base de dados operacionais.....	54
4.3	Análise Geoestatística	55
4.4	Metodologia do Erro Médio.....	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1	O software	57

5.1.1	Dados do sistema de irrigação por Pivô Central	57
5.1.2	Dados da área.....	58
5.1.3	Pivô Central sem inversor de frequência.....	59
5.1.4	Otimização da pressão nos emissores.....	61
5.1.5	Pivô central com inversor de frequência	61
5.1.6	Análise viabilidade econômica	65
5.2	Análise econômica	65
5.3	Análise de variáveis	66
5.4	Análise da Diferença Média (DM).....	67
5.5	Análise Geoestatística.....	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
7	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A irrigação por aspersão é responsável por 54% das áreas irrigadas no Brasil, sendo que 19,6% são por pivô central segundo o Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2012). No entanto, em um estudo realizado por ANA (2016) calculou-se um crescimento de 43,3% da área equipada por pivô central em relação ao Censo Agropecuário de 2006, tendo-se identificado 19.892 equipamentos ocupando 1,275 milhão de hectares.

As principais culturas sob pivôs centrais são: algodão, soja, cana-de-açúcar, milho (maior peso da classe cereais), feijão e batata e, dentre as lavouras permanentes, destacam-se café e laranja (IBGE, 2009; ANA, 2016).

O sistema de irrigação por pivô central está presente em áreas extensas de plantio comercial. Nas áreas irrigadas com acentuada declividade e em equipamentos de grande porte, geralmente encontramos uma considerável variabilidade de pressão ao longo da linha lateral do sistema, acreditando-se existir um potencial de redução de consumo de energia quando este opera na condição em declive, principalmente.

A agricultura moderna para suprir as necessidades do mercado que cada dia se mostra mais competitivo e exigente, depende da energia elétrica para aumentar sua produtividade. Nas condições brasileiras, a variável mais importante no custo final da irrigação é a energia elétrica. Esse recurso, aliado à escassez de água e a rápida elevação dos custos de produção tornam interessante o uso racional de energia elétrica e da água, afinal podem resultar em uma economia considerável, além de ser ambientalmente correto. Uma solução para economizar energia elétrica é variar a altura manométrica ao longo do giro do pivô central, mantendo a uniformidade (CARVALHO e OLIVEIRA, 2014).

O inversor de frequência é uma boa alternativa para economia de energia elétrica em pivô central. Esse equipamento é instalado no motor que alimenta o bombeamento e, através do controle da velocidade de rotação desse motor, ocorre a variação da sua potência de acordo com uma programação prévia realizada no inversor de frequência.

Na situação de operação do pivô central irrigando em declive (maior altura manométrica), onde a solicitação de potência no eixo do motor elétrico é menor, a potência demandada no motor poderá ser menor que na situação irrigando em auge (menor altura manométrica), gerando economia no consumo de energia.

No entanto, a viabilidade econômica do inversor de frequência depende de muitas variáveis, tais como: topografia da área; características do sistema de bombeamento e do sistema de irrigação pivô central; número de horas de irrigação por ano; taxa mínima de atratividade; custo do inversor de frequência; e custo da energia elétrica local. Variáveis essas, específicas para cada caso devendo ser analisada caso a caso.

Há necessidade ainda de uma adequada simulação do desempenho hidráulico do pivô central com o inversor de frequência para quantificar a economia de energia gerada. Esta avaliação envolve coleta de dados e diversos cálculos e simulações, os quais são complexos.

Dada a ausência de um software específico, torna-se oportuno e relevante o desenvolvimento de um programa computacional que permita realizar, a partir de dados básicos, as simulações necessárias para avaliar a viabilidade econômica da adoção do inversor de frequência no pivô central.

2 OBJETIVO

Obter uma ferramenta computacional para análise da viabilidade econômica do uso do inversor de frequência em pivô central.

2.1 Objetivos específicos

- Desenvolvimento de um módulo para cálculos envolvendo a atuação do inversor;
- Desenvolvimento de um módulo para execução da análise de viabilidade econômica;
- Execução da análise geoestatística para caracterização da dependência espacial da pressão com a atuação do inversor de frequência e sem a atuação do inversor de frequência.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O Sistema de Irrigação Pivô Central

Em 1948, Frank L. Zybach construiu o primeiro pivô central e em 1954 vendeu os direitos de fabricação para a empresa americana Valley. No Brasil, esse equipamento apenas apareceu em meados de 1970 (LIMA, 2019).

O sistema de irrigação pivô central é muito utilizado por apresentar algumas vantagens em relação a outros sistemas de irrigação, tais como: alto potencial de uniformidade se bem dimensionado e manejado, alto grau de automação, capacidade de aplicação de água e nutrientes em vários tipos de solos, culturas e condições topográficas (VALÍN et al., 2012).

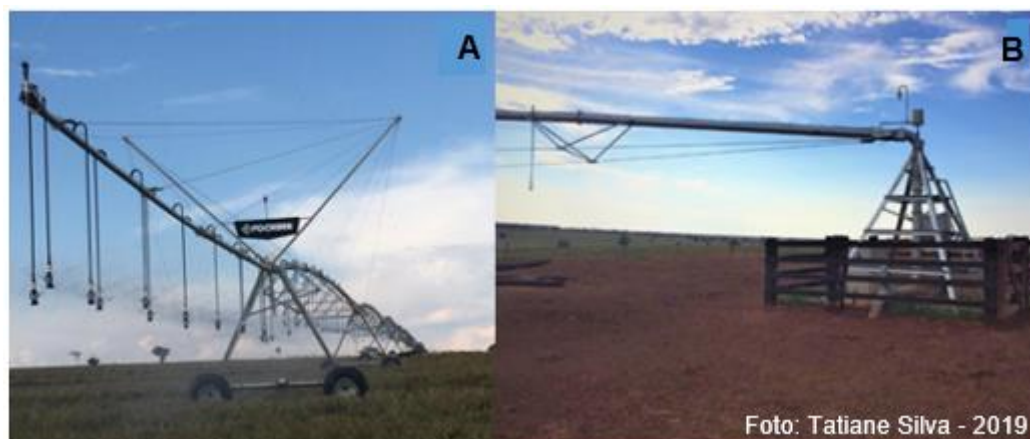
Estruturalmente, o pivô central (Figura 1A) apresenta um ponto fixo (Figura 1B) ao qual estão conectadas torres móveis que sustentam a linha lateral, cada torre apresenta duas rodas em sua base, as quais se deslocam ao longo da área formando um círculo. A água é emitida sob pressão pelos emissores montados na linha lateral ou suspensos por mangueiras flexíveis (ALMASRAF et al., 2011).

O pivô central, que consiste de uma única lateral, gira em torno do centro de um círculo, nesse centro está presente a torre fixa. Nessa torre fixa, ocorre o suprimento de água. A água é conduzida até o centro da área a ser irrigada por adutora enterrada ou, então, a fonte de água encontra-se no centro da área. A linha lateral, que se inicia a partir dessa torre fixa, é metálica, escorada por torres em formato de “A” e conectadas entre si por juntas flexíveis. Em cada torre está presente um motor elétrico permitindo o acionamento independente das torres móveis (IBGE, 2009).

A movimentação das torres ocorre através do ajuste da velocidade da última torre com as torres internas, toda vez que o ângulo de declinação entre cada vão supera um ângulo limite pré-determinado, a torre se desloca. A canalização entre duas torres é chamada de lance, onde estão alocados os emissores que distribuem a água enquanto o sistema se movimenta pelo campo (PICCOLI, 2011).

Recomenda-se que pivôs centrais sejam empregados para irrigar áreas de até 117 hectares (BRASIL, 2006), no entanto, na prática tem-se pivôs centrais com área superior à essa recomendação.

Figura 1 - Pivô central (A) e Torre fixa (B)



Devido ao sistema de irrigação por pivô central ser instalado geralmente em grandes áreas, é comum essas áreas apresentarem diferenças topográficas significativas. Por exemplo, a recomendação segundo alguns autores é de tolerância de até 30% de declividade na direção radial para vãos entre torres de até 30 metros. Outros autores afirmam que essa mesma declividade (30%) pode ser tolerada ao longo dos círculos, na direção tangencial (BRASIL, 2006).

Essa considerável variação topográfica aceitável para esse sistema de irrigação acarreta variações de pressão ao longo do sistema. Ao se realizar o projeto do pivô central é considerado apenas a condição mais crítica (active), o que pode gerar um gasto de energia desnecessário quando o sistema se encontra em uma posição de declividade diferente (BERNARDO et al., 2006; LIMA, 2009; LUDWIG, 2015).

Para minimizar os efeitos dessa variação de pressão são utilizados reguladores de pressão que dissipam a pressão na descarga deles em valores desejados dentro de uma faixa definida de pressão de entrada (LIMA et al., 2009), ou seja, dissipam a pressão excessiva que ocorre em determinadas posições da linha lateral mantendo um valor ajustado de pressão na entrada dos emissores, garantindo uma melhor uniformidade de aplicação de água no solo.

Von Bernuth e Baird (1990) citado por Lima et al. (2007) citam que a pressão na entrada de um emissor pode variar por fatores hidráulicos ou diferenças topográficas, dessa forma o regulador de pressão tem a função de manter a pressão de saída dentro de um intervalo de pressão, independentemente da pressão de entrada. Sendo assim, é um equipamento dissipativo de pressão.

Visando a necessidade de regular a pressão na linha lateral e, também diminuir o desperdício de energia elétrica que esse excesso de pressão no sistema acarreta, um recurso que tem sido utilizado é o inversor de frequência que, por meio da mudança na velocidade de rotação do motor reduz a potência do sistema motobomba (AZEVEDO, 2003), economizando, assim, energia elétrica.

Segundo Marcuzzo e Wendland (2010), a tarifa da energia elétrica está entre os fatores que influenciam no custo operacional de um sistema de irrigação.

3.1.1 Determinação da pressão na linha lateral

Para determinar a pressão na linha lateral, trecho-a-trecho, é necessário determinar primeiramente outros itens, como: vazão e perda de carga trecho-a-trecho.

A vazão de entrada do pivô central (Equação 1) será o somatório das vazões dos emissores (Equação 2) segundo Frizzzone et al.(2011).

$$Q = \sum_{i=0}^n q_0 \quad (1)$$

Em que: Q - vazão de entrada do pivô central, m³ s⁻¹; q₀ - Vazão do emissor, m³ s⁻¹.

$$q_0 = C_d A \sqrt{2gH} \quad (2)$$

Em que: q₀ - Vazão do emissor, m³ s⁻¹; C_d - Coeficiente de descarga do emissor, adimensional; A - área do orifício do emissor, m²; g - aceleração da gravidade, m s⁻²; H - pressão no emissor, mca.

De acordo com Silva (2011), o coeficiente de descarga (C_d) varia entre 0,88 e 0,98. Para bocais do fabricante Senninger, estimou-se um valor médio de 0,93 na pressão de operação de 10 PSI.

A perda de carga trecho-a-trecho pode ser determinada pela equação de Darcy-Weisbach (Equação 3), também conhecida como fórmula universal por ser aplicável para cálculo de escoamento de qualquer líquido em condutos forçados (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

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

Em que: h_f - Perda de carga, mca; Q - vazão na entrada da linha, $m^3 s^{-1}$; v - velocidade média da água na tubulação, $m s^{-1}$; L - comprimento do trecho da tubulação, m; D - diâmetro interno da tubulação, m; f - coeficiente de atrito, adimensional; g - aceleração da gravidade, $m s^{-2}$.

O coeficiente de atrito pode ser obtido pelo Ábaco de Moody ou calculado pela equação de Swamee (Equação 4) que pode ser utilizada na situação de regime laminar ou turbulento, em condutos lisos ou rugosos de diversas formas (Swamee, 1993).

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right) \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (4)$$

Em que: Re - número de Reynolds, adimensional; ε - rugosidade absoluta, m e D - diâmetro da tubulação, m.

A rugosidade absoluta recomendada para o aço galvanizado novo é de 0,00015 m segundo Azevedo Netto et al. (1998). O número de Reynolds pode ser determinado pela Equação 5.

$$Re = \frac{v D}{\vartheta} \quad (5)$$

Em que: v - velocidade a água, $m s^{-1}$; ϑ - viscosidade cinemática da água ($m^2 s^{-1}$); D - diâmetro da tubulação, m.

A pressão ao longo da linha lateral de pivôs centrais deve ser calculada trecho-a-trecho.

3.1.2 Determinação da pressão em um ponto na linha lateral

Para a determinação matemática da pressão em um ponto qualquer na linha lateral de pivô central pode-se utilizar a Equação 6 (adaptada de: SCALOPPI e ALLEN, 1993; MORENO et al., 2012; citada em LUDWIG, 2015).

$$H_x = H_{ant} - hf_s - \Delta z_s \quad (6)$$

Em que: H_x - pressão no ponto x ao longo da tubulação, mca; H_{ant} - pressão no emissor anterior, mca; h_{fs} - perda de carga no trecho s (entre emissores adjacentes), mca; Δz_s - diferença de cota entre emissores adjacentes, m.

A diferença de cota pode ser calculada de acordo com a Equação 7.

$$\Delta z_s = z_s - z_{s-1} \quad (7)$$

Em que: z_s = cota emissor s, m; z_{s-1} = cota emissor anterior à s, m.

A pressão disponível no pivô central está diretamente relacionada com a declividade da área e, no caso do pivô central, como ele caminha por uma área extensa, ocorre uma variação, ora está em aclave maior ou menor, ora está em declive maior ou menor. No dimensionamento do pivô central, essa variação não é atendida, considera-se apenas a condição crítica de aclave (LIMA, 2009).

Medeiros et al. (2004) analisando o potencial de economia de energia elétrica em sistemas de irrigação tipo pivô central classificou os equipamentos pela área irrigada e pela inclinação do terreno. Realizou essa classificação em função da importância da inclinação do terreno verificada por Alves (2001) e Cendes (2004) que concluíram que a economia de energia cresce conforme aumenta a declividade do terreno. Justificaram isso pelo maior desnível entre o ponto central e o ponto mais externo da área irrigada que pode ser compensado pelo acionamento da velocidade variável no sistema de bombeamento.

3.1.3 Sistemas de bombeamento

O sistema de bombeamento é o encarregado de fornecer pressão e vazão ao sistema de irrigação, sendo assim, o responsável pela maior parte do consumo da energia no sistema de irrigação. Dessa forma é importante que se realize um perfeito dimensionamento do sistema de bombeamento para redução de custos (MORAES et al., 2011).

Esse dimensionamento é realizado a partir da determinação da demanda de pressão que corresponde a altura manométrica (H_{bomba}) do sistema e pode ser obtida pela equação 8, adaptada de AZEVEDO NETTO et al. (1998).

$$H_{bomba} = H_0 + hf + \Delta z \quad (8)$$

Em que: H_{bomba} = pressão na saída da bomba, mca; H_0 - pressão demandada na base do pivô central, mca; h_f - perda de carga na tubulação de recalque, mca, desde o sistema de bombeamento até a base do pivô central; Δz - diferença de cota entre base pivô e o eixo da bomba, m.

Com a pressão demandada na saída da bomba determinada realiza-se o cálculo da potência demandada na bomba pela Equação 9 (AZEVEDO, 2003).

$$P_1(kW) = \frac{9,80665 Q_1 H_{bomba}}{\eta_m \eta_b} \quad (9)$$

Em que: P_1 – potência ativa, kW; Q_1 – Vazão na bomba, $m^3 h^{-1}$; H_{bomba} - altura manométrica bomba, m; η_m e η_b - rendimento do conjunto elevatório, motor e bomba, em decimal.

3.2 Inversor de frequência

O inversor de frequência é um equipamento que varia a rotação de acionamento de um motor elétrico com rapidez e eficiência. Este equipamento altera a frequência de tensão aplicada no motor o que permite controlar sua rotação, sendo que as mudanças operacionais podem ser descritas pelas relações de Rateaux (LIMA et al., 2015) (Equações 10, 11 e 12 e Figura 2).

Segundo Carvalho (2003), a variação da velocidade de rotação da bomba ocasiona uma mudança na curva característica dessa bomba. Cada ponto $H \times Q$ com rotação n corresponde a outro ponto $H' \times Q'$ com rotação n' . As relações de Rateaux, dadas pelas equações 10, 11 e 12 se aplicam a esses pontos, ou seja, pontos de mesmo rendimento.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (10)$$

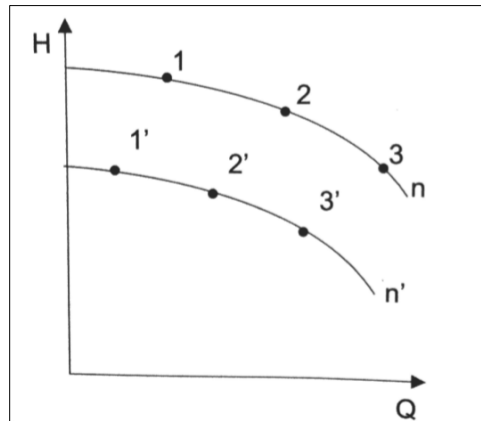
$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (11)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (12)$$

Em que: Q = vazão recalçada; H = altura manométrica; P = potência necessária ao acionamento; n = velocidade de rotação da bomba. Lembre-se: deve haver padronização das unidades das grandezas.

A variação que ocorre na curva da bomba devido a variação de velocidade da rotação da bomba é exemplificada na Figura 2.

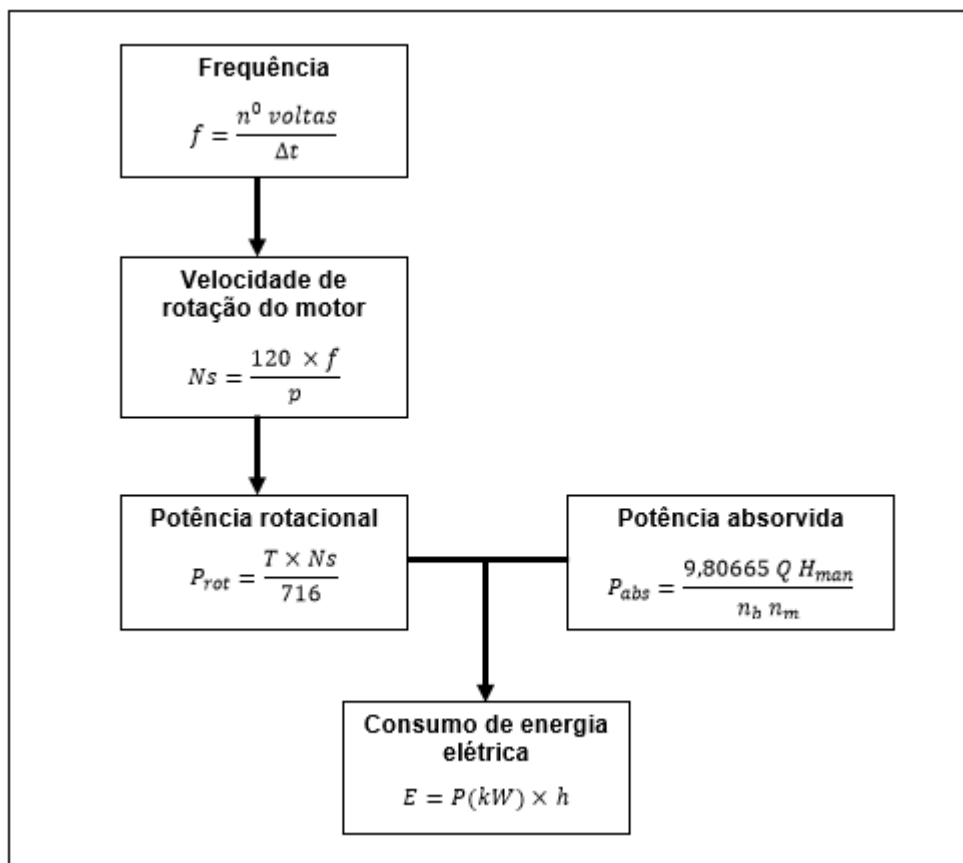
Figura 2 - Curva característica com nova rotação



Fonte: Carvalho e Oliveira (2014)

Essa variação da velocidade de rotação que ocasiona variação da curva característica da bomba não deve ultrapassar de 30 a 40%, a fim de manter o rendimento da bomba (CARVALHO; OLIVEIRA, 2014).

Figura 3. Esquema demonstrativo de como a alteração da frequência de um motor altera o consumo de energia elétrica



Em que: f = frequência, Hz; Δt = intervalo de tempo, h; Ns = velocidade de rotação do motor, rpm; p = número de pólos; $P_{rotacional}$ = Potência rotacional motor, cv; T = torque do motor, kgfm; P_{abs} = Potência absorvida pela bomba, kW; Q = vazão da bomba, $m^3 h^{-1}$; H_{man} = Altura manométrica bomba, mca; N_b = rendimento da bomba, decimal; N_m = rendimento motor, decimal; E = consumo energia, kWh; h = tempo funcionamento equipamento, h. Fonte: Autor.

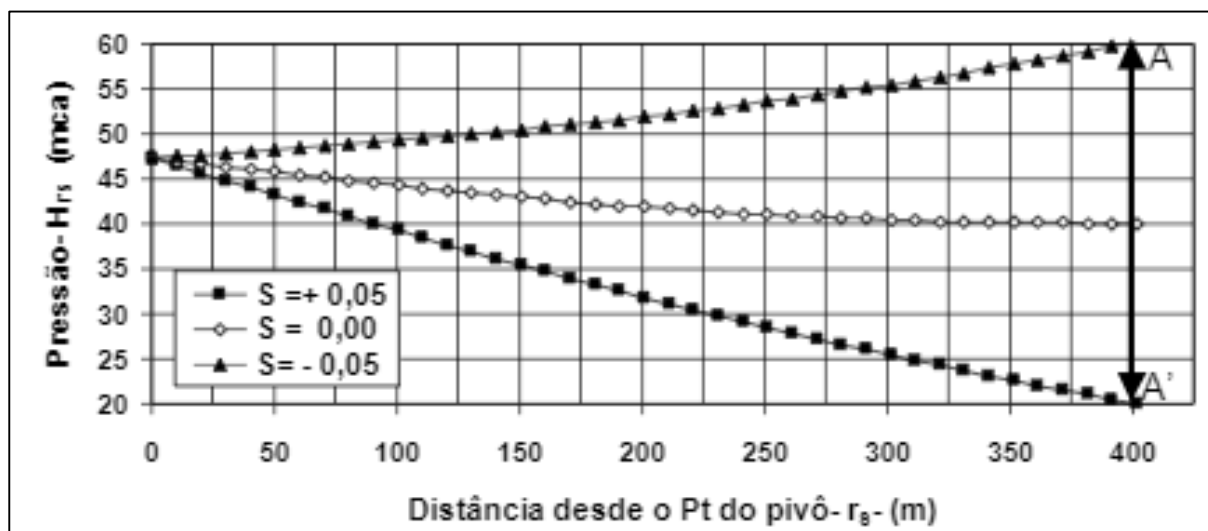
Araújo (2003) define os inversores de frequência como controladores da frequência de alimentação dos motores elétricos, adequando-os à solicitação de carga e confirma que os inversores de frequência proporcionam grande potencial de economia de energia elétrica (Figura 3).

Essa solicitação de carga refere-se à altura manométrica exigida pelo sistema de irrigação pivô central. No sistema de irrigação tipo pivô central tem-se diferentes condições topográficas ao longo do círculo irrigado e, desconsiderando a atuação de válvulas reguladoras de pressão, essas diferentes condições topográficas conduzem a diferentes demandas de altura manométrica. Sendo assim, quando o sistema de irrigação estiver irrigando a parte que apresenta a menor altura manométrica, a

solicitação de potência no eixo do motor elétrico será máxima. Quando estiver irrigando a parte com maior altura manométrica, a solicitação de potência do motor será mínima (CAMPANA et al., 2003). Ou seja, no declive, onde se tem a maior altura manométrica, a exigência de potência do motor é menor, o que permite que o motor trabalhe em uma menor rotação, gerando economia de energia elétrica.

A Figura 4 representa graficamente a pressão ao longo da linha lateral de um pivô central irrigando em nível, em aclive (A') e em declive (A). Verifica-se que a pressão, quando está irrigando em nível, diminui no sentido da ase do pivô central até o último emissor da linha lateral devido à perda de carga que ocorre na tubulação. Quando está irrigando em aclive também tem-se uma perda de pressão ao longo da linha lateral, porém mais acentuada. Quando está irrigando em declive, ocorre o contrário do aclive, aumenta no sentido da base do pivô até o último emissor. Essa variação ocorre devido à força gravitacional da Terra, perde-se pressão quando a água está sendo conduzida em aclive e ganha-se pressão quando a água está sendo conduzida em declive (COLOMBO, 2003).

Figura 4 - Pressão ao longo da linha lateral de um pivô central irrigando em nível, em aclive (A') e em declive (A)



Fonte: Colombo (2003)

Lima et al. (2015) afirmam que o inversor de frequência, além de reduzir o consumo de energia elétrica, melhora o desempenho operacional do conjunto motobomba do sistema pivô central uma vez que ajusta a rotação da motobomba em função das condições topográficas do local.

Pereira et al. (2013) observaram que, com a utilização do inversor de frequência, conseguiram uma redução de 19% na potência ativa consumida pelo conjunto motobomba e uma melhora no fator de potência.

Moraes et al. (2014) comentam que os inversores de frequência oferecem alguns benefícios como: correção do fator de potência; adequação de carga; partidas suaves; maior flexibilidade de operação; redução de perdas nas válvulas; melhor controle sobre parâmetros do processo, e menor ruído.

Alves et al. (2002) verificaram se as relações de Rateaux e a redução no consumo da potência consumida no bombeamento eram verdadeiras quando se utiliza o inversor de frequência. Reduziram a rotação de 1800 para 1500 rpm e de 1800 para 1100 rpm e obtiveram uma redução da potência média consumida de 40,7 e 75,0%, respectivamente. Esse trabalho concluiu que é possível utilizar essas relações para estimar grandezas como a altura manométrica, a vazão e a potência.

Medeiros (2010) analisou dois sistemas de irrigação, um novo e outro já existente no local e comparou esses dois sistemas com e sem o uso do inversor de frequência. O resultado dos cálculos realizados foi uma economia de energia elétrica de 9,23% e 10,6% para o sistema de irrigação pivô central existente e para o novo sistema, respectivamente. Esse mesmo autor concluiu que o uso de inversores de frequência tem retorno, mas de longo prazo, sendo inviável a curto prazo, considerando a taxa de juros com 12,25% a.a.

Ribeiro (2008), com o objetivo de racionalizar água e energia elétrica em sistema de irrigação pivô central, construiu um protótipo de pivô central com inversor de frequência que era acionado manualmente e alcançou uma economia de energia elétrica de 26% para a inclinação máxima de 20% da linha lateral do sistema.

Lima (2009) analisou os efeitos do uso do inversor de frequência na lâmina e na uniformidade de distribuição de água e verificou que o equipamento influenciou na rotação do conjunto motobomba e na lâmina de água aplicada, no entanto, não influenciou na uniformidade de distribuição de água, que foi classificada como boa. Esses mesmos autores recomendam que se avalie o pivô central após a instalação do inversor de frequência, pois verificaram que os valores de lâmina de água aplicada para os ensaios ficaram acima do especificado na ficha técnica fornecida pelo fabricante do equipamento.

No momento, três fatores contribuem para a continuidade deste quadro de estagnação no uso de inversores de

frequência em sistemas de irrigação: (i) as estratégias para controle dos inversores nos pivôs centrais ainda são um desafio para os profissionais da automação que atuam na área agrícola, (ii) existem discrepâncias entre valores esperados e valores realizados (observados) de redução no consumo de energia elétrica; e, (iii) são raras as oportunidades de se observar equipamentos de irrigação do tipo pivô central operando com inversores de frequência (PEREIRA et al., 2013).

Além desses fatores, existe a questão financeira da aquisição do inversor de frequência e demais equipamentos necessários para o bom funcionamento dessa tecnologia. Portanto, antes de aderir à essa tecnologia é necessário avaliar a viabilidade econômica individualmente. Campana et al. (2003) afirmaram que a utilização do inversor de frequência em conjunto motobomba de sistema de irrigação foi viável economicamente. No entanto, é necessária a realização de análise econômica para cada caso em estudo.

Mesquita et al. (2006) relataram que o uso de inversores de frequência sempre conduziu a economia de energia elétrica, porém deve-se analisar o retorno financeiro.

3.3 Análise econômica

O estudo de uma determinada tecnologia não pode ficar focado apenas aos resultados técnicos da avaliação, é imprescindível que exista uma ferramenta de análise econômica para colaborar na tomada de decisão (REIS, 1997).

A análise econômica faz um levantamento dos custos e benefícios em função dos preços de mercado e relaciona com indicadores econômicos, afim de avaliar se é justificável os investimentos realizados dos bens e serviços resultantes do projeto em análise (ARCO-VERDE; AMARO, 2014).

Uma das ferramentas que auxiliam na análise econômica é o cálculo do fluxo de caixa, que compreende os registros e os controles existente da movimentação do caixa, entradas e saídas dos recursos financeiros, em um determinado tempo (FRIEDRICH, 2005). O fluxo de caixa pode ser simples (Equação 13) ou descontado (Equação 14), sendo que, o descontado é o fluxo de caixa futuro de um ativo estimado que por meio de uma taxa atrelada à riscos e benefícios traz para valor presente (CLASSEN et al., 2019).

$$FC = Receita - Despesa \quad (13)$$

Em que: FC = fluxo de caixa simples, R\$; Receita – valor de entrada, R\$; Despesa - valor de saída, R\$.

$$FCD = \frac{FC}{(1+i)^n} \quad (14)$$

Em que: FCD = fluxo de caixa descontado, R\$; i – taxa mínima de atratividade (TMA), decimal; n – vida útil do equipamento, anos.

Com o fluxo de caixa determinado, é possível calcular o Valor Presente Líquido (VPL) (Equação 15) que auxilia na tomada de decisão quanto à viabilidade ou não de um projeto ou investimento.

$$VPL = \sum_{n=0}^t \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad (15)$$

Em que: n - o número de períodos t (vida útil do equipamento); i - Taxa mínima de atratividade (TMA), decimal.

O VPL é o valor econômico na data zero de um fluxo de caixa que é descontado uma taxa de juros determinada pelo mercado. Esse indicador econômico estima o valor de fluxo de caixa atual usando a taxa mínima de atratividade (TMA), que varia de acordo com o investidor. O investimento pode ser realizado por meio de recursos próprios ou por contratação de empréstimos. No primeiro caso, a TMA deve ser igual às taxas de descontos de outros projeto que apresentem o mesmo grau e risco e se o investimento for realizado por meio de empréstimo, a TMA deverá apresentar valor superior à taxa de empréstimo porque o investidor deseja ter lucratividade e também pelo risco do empreendimento (SANGUINO, 2009).

No cálculo do VPL também considera-se a vida útil do equipamento. Segundo Dorfman (1988) para a análise econômica de um equipamento é necessário o conhecimento de sua vida útil, afinal esse parâmetro pode influenciar diretamente no resultado de sua análise. A vida útil do equipamento pode ser considerada igual à vida física do mesmo, uma vez que o equipamento só será útil enquanto, tecnicamente,

estiver em condições de funcionar. Outra forma de considerar a vida útil é como sendo o tempo considerado para avaliação econômica, devendo ser no máximo igual à vida útil técnica do equipamento ou aquele exigido pelo financiamento.

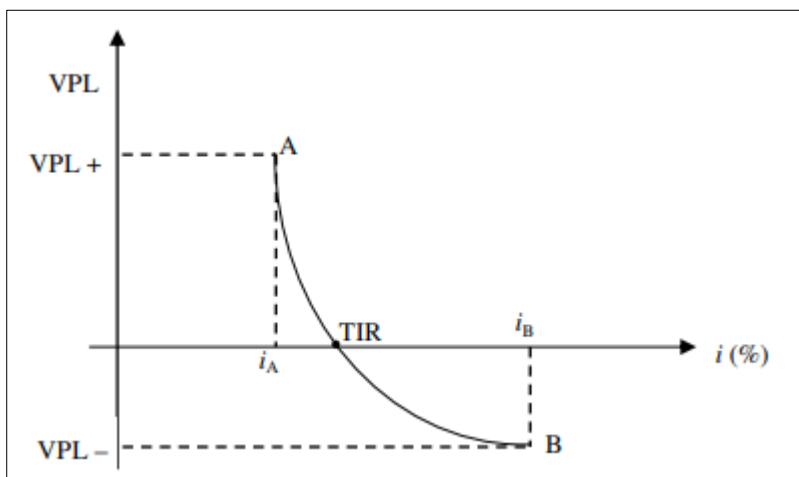
De acordo com BRASIL (2005), a análise da viabilidade econômica por meio do VPL é usual na comparação de alternativas de projeto, pois o investimento a ser feito para conseguir a redução do consumo de energia pode, eventualmente, não ser viável economicamente porque não compensa a redução da despesa com o custo da energia elétrica.

A taxa de juros que anula o VPL do fluxo de caixa de um investimento é a Taxa Interna de Retorno (TIR) (Figura 5) (Equação 16). Segundo Barbieri et al. (2007) é um parâmetro notável que se associa à análise de fluxo de um projeto. Um projeto é considerado viável economicamente se apresentar $VPL > 0$ e $TIR > TMA$ (Taxa mínima de atratividade).

$$TIR \rightarrow \sum_{n=0}^t \frac{FC_n}{(1+i)^n} = 0 \quad (16)$$

Em que: n - o número de períodos t (vida útil do equipamento); i - Taxa mínima de atratividade (TMA), decimal.

Figura 5 - Gráfico de VPL em função da TIR



Fonte: Pereira e Almeida (2010).

Medeiros et al. (2004) realizaram um levantamento com 178 sistemas de pivôs centrais no Estado de Goiás e observaram que para a maior parte dos sistemas

analisados o retorno financeiro é de dois ou três anos. Esse retorno financeiro é calculado segundo a Equação 17.

$$Payback\ Simple = \frac{VI}{FC} \quad (17)$$

Em que: VI – Valor de investimento, R\$; FC – Fluxo de caixa simples, R\$.

3.4 Tarifação de energia elétrica no Brasil

A tarifa de energia elétrica no Brasil varia de acordo com a infraestrutura de geração, transmissão e distribuição e fatores econômicos de incentivos à modicidade tarifária e sinalização ao mercado (BRASIL, 2019).

As unidades consumidoras brasileiras são classificadas em dois grupos tarifários: Grupo A e Grupo B, tarifa binômia e tarifa monômia, respectivamente. Esse agrupamento é definido em função de dois fatores: nível de tensão em que são atendidos e da demanda (kW), consequentemente (BRASIL, 2011).

Dessa forma, o Grupo B compreende as unidades consumidoras atendidas em tensão abaixo de 2,300 kV (baixa tensão), na sua maioria são atendidos nas tensões de 127 ou 220 V. Dentro do Grupo B existem os sub-grupos que são dividido de acordo com a atividade do consumidor: Subgrupo B1 – residencial e residencial baixa renda, Subgrupo B2 – rural e cooperativa de eletrificação rural, Subgrupo B3 – demais classes e Subgrupo B4 – iluminação pública. O Grupo A compreende os consumidores atendidos em alta tensão, acima de 2,3 kV. Esse grupo também apresenta uma subdivisão: Subgrupo A1 para o nível de tensão de 230 kV ou mais, Subgrupo A2 para o nível de tensão de 88 a 138 kV, Subgrupo A3 para o nível de tensão de 69 kV, Subgrupo A3a para o nível de tensão de 30 a 44 kV, Subgrupo A4 para o nível de tensão de 2,3 a 25 kV e Subgrupo AS para sistema subterrâneo (BRASIL, 2011).

Segundo a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, a ANEEL disponibiliza descontos que são praticados na tarifa de energia elétrica, entre eles está para a atividade de irrigação em horário especial tanto para os consumidores que se enquadram no Grupo A quanto para os que se enquadram no Grupo B. No caso dos usuários que se enquadram no Grupo B, o desconto é de 70 a 90% e para os usuários que se enquadram no Grupo A, o desconto é de 63 a 70% no valor do kWh.

De acordo com a ANEEL, Art. 25 da Lei nº 11.196, de 21 de novembro de 2005 (BRASIL, 2019):

Os descontos especiais nas tarifas de energia elétrica aplicáveis às unidades consumidoras classificadas na Classe Rural, inclusive Cooperativas de Eletrificação Rural, serão concedidos ao consumo que se verifique na atividade de irrigação e aquicultura desenvolvida em um período diário contínuo de 8h30m (oito horas e trinta minutos) de duração, facultado ao concessionário ou permissionário de serviço público de distribuição de energia elétrica o estabelecimento de escalas de horário para início, mediante acordo com os consumidores, garantido o horário compreendido entre 21h30m (vinte e uma horas e trinta minutos) e 6h (seis horas) do dia seguinte (BRASIL, 2019).

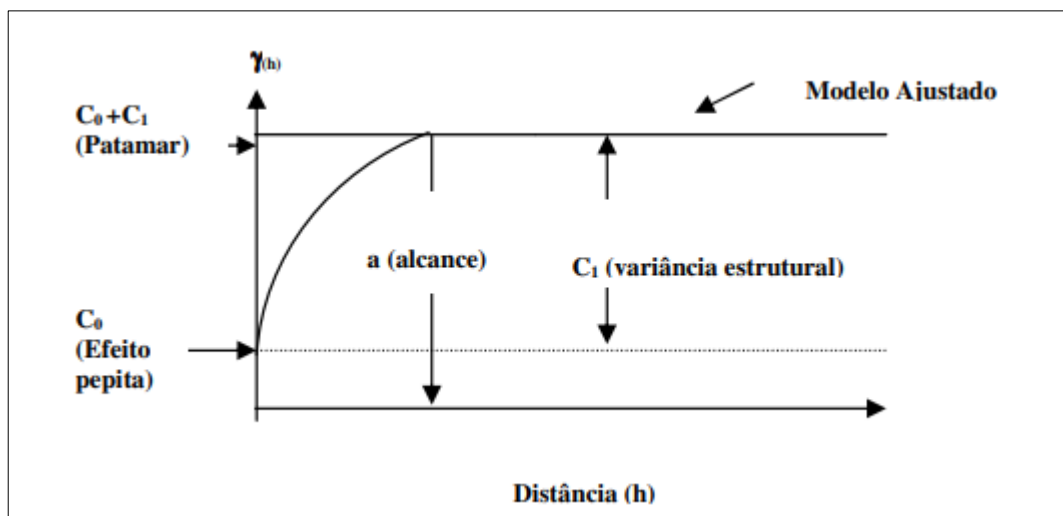
3.5 Análise Geoestatística

A teoria fundamental da geoestatística afirma que as amostras próximas em tempo e espaço apresentam maior similaridade do que as amostras mais distantes (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

O estudo geoestatístico se inicia com uma coleta de dados amostrais, que deve ser realizada em disposição regular ou o mais próximo disso ou, então, amostragens preferenciais em zonas de maior interesse que acabam produzindo agrupamentos de pontos. Esses agrupamentos são atenuados, a fim de não distorcer as estatísticas globais por meio do histograma e do variograma (YAMAMOTO; LANDIM, 2015).

O variograma pode apresentar três tipos: observado ou experimental (amostras colhidas em campo); verdadeiro, que é o real (desconhecido e teórico) e de referência, que é o utilizado para ajuste de modelo (GUERRA, 1988). Na Figura 6 está demonstrado um variograma experimental com os parâmetros que o definem.

Figura 6 - Variograma experimental e seus parâmetros



Fonte: PELÁ (2007).

O variograma representa um padrão com características considerável próximo ao ideal e, intuitivamente, espera-se que os dados analisados decresçam conforme a distância que os separa diminui. Em outras palavras, amostras vizinhas devem apresentar comportamento mais análogo que as amostras mais distantes entre si (VIEIRA, 2000).

O variograma é denominado isotrópico quando depende apenas da distância e não da orientação.

Os parâmetros do variograma, como mostrados na Figura 5, são: Alcance, Patamar e Efeito Pepita. O Alcance é a distância em que as amostras apresentam correlação espacial, ou seja, a partir dessa distância as amostras tornam-se independentes (PELÁ, 2007). O Patamar é o ponto no qual a variabilidade das amostras é aleatória, sendo assim deve-se trabalhar com a estatística clássica (TRANGMAR et al., 1985). O Efeito Pepita é o ponto de descontinuidade do variograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras, no entanto, pode ser também devido à erros de coleta de amostras, medição (ISAKS; SRIVASTAVA, 1989).

O variograma é a ferramenta base de suporte para as técnicas de krigagem que representam quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (HUIJBREGTS, 1975).

A krigagem usa informações a partir do variograma a fim de conseguir os pesos ótimos que serão concatenados às amostras da estimativa de uma área. Essa técnica estima variáveis ao longo do tempo e/ou espaço a partir de valores próximos

considerados interdependentes no variograma. O uso do variograma para estimativa por krigagem exige que os dados apresentem distribuição simétrica, com diversos valores diferentes, e não exige distribuição normal, afinal a krigagem é um estimador linear (LANDIM, 2006).

3.6 Metodologia do Erro Médio

A metodologia do erro médio da estimativa é método comum de avaliação de previsões, estimativas, simulações que incluem o erro médio de polarização (MBE) (Equação 18), erro absoluto médio (MAE) (Equação 19) e erro quadrado médio (RMSE) (Equação 20) (Kato, 2016).

O MBE (Mean Bias Error) é o erro médio da simulação que representa o erro sistemático de um modelo estimado para sub ou superestimação. O MAE (Mean Absolute Error) fornece a média absoluta dos erros da simulação e o RMSE (Mean Square Error) atribui mais peso aos maiores erros, pois eleva ao quadrado (Kato, 2016).

Se o MBE resultar em um valor positivo, significa que, na média, os valores simulados estão superestimados, caso contrário, se resultar em um valor negativo, significa que, na média, os valores simulados estão subestimados (Kato, 2016).

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_s - x_m) \quad (18)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_s - x_m| \quad (19)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_s - x_m)^2} \quad (20)$$

Em que: x_s – média simulada; x_m – média medida.

3.7 Software para avaliação de desempenho de pivô central

O software desenvolvido por Ludwig (2015) foi criado para avaliar a distribuição de pressão em diferentes posições do pivô central e determinar a pressão mínima

necessária por posições do giro do pivô central. Com esses dados determinados, o software continua a simulação verificando possibilidades de intervenção a fim de reduzir o gasto energético fazendo ajustes de percentímetro.

Ludwig (2015) afirma que esse software é uma alternativa para avaliação do desempenho do sistema de irrigação pivô central uma vez que permite o usuário analisar a possibilidade de intervir na vazão e pressão a fim de reduzir custos operacionais. Além disso, permite avaliar a influência da declividade do terreno na distribuição das pressões no sistema.

Ludwig (2015) utilizou a linguagem de programação Pascal, por meio do software Delphi e associou o Access 2013 para criar um banco de dados onde o software armazena os dados inseridos pelo usuário.

Segundo Ludwig (2015), na primeira etapa do software, “Situação atual”, realiza-se uma análise de como está o funcionamento do pivô central, apresentando os valores de pressão emissor à emissor e a cada 45°, 15°, 9° ou 3° do giro do pivô central.

Na segunda etapa, “Otimização da pressão”, o programa indica a condição ideal de pressão na base do pivô central para cada posição, respeitando a pressão mínima necessária para o funcionamento adequado dos reguladores de pressão e identifica as posições que apresentam sobre pressão (LUDWIG, 2015).

No final da análise, o programa disponibiliza três possibilidades de irrigação e seus respectivos consumos energéticos, bem como a lâmina fornecida em cada posição. Os resultados foram sistematizados de forma comparativa entre os ajustes de percentímetro (100, 90, 80, 70, 65, 60, 55, 50%), auxiliando na tomada de decisão quanto a necessidade de intervenções no funcionamento do pivô central (LUDWIG, 2015). Essa última análise, denominada “Otimização energética”, apresenta valores de simulações de economia de consumo de energia elétrica, em kWh.

De acordo com a simulação dos dados a partir do software desenvolvido por Ludwig (2015), o pivô estudado operava com excesso de pressão e estava ultrapassando o limite máximo indicado pelo fabricante do regulador de pressão. Sendo assim, a simulação demonstrou a necessidade de intervenção no funcionamento.

Ludwig (2015) concluiu que o software desenvolvido pode ser utilizado para avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por pivô central e permite que o

usuário analise a necessidade de intervenção na vazão e pressão para minimizar custos operacionais.

Por fim, Ludwig (2015) complementa a conclusão comentando sobre a necessidade de maior aprofundamento ao implementar um sistema de irrigação por pivô central desenvolvendo projetos e equipamentos mais eficientes hidráulica e energeticamente. Sendo assim, resultaria em maiores lucros ao produtor, com redução de energia e manutenção nos equipamentos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Desenvolvimento do software

Este trabalho desenvolveu uma nova versão do software de Ludwig (2015), em linguagem de programação Object Pascal por meio do ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) Delphi Community Edition, visando ampliar sua aplicabilidade, dotando-o da capacidade de avaliar a viabilidade econômica do uso de inversor de frequência em sistemas de irrigação pivô central. As diferenças entre o software de Ludwig (2015) e o software deste trabalho estão apresentadas na Figura 7.

Figura 7. Comparação entre o software desenvolvido por Ludwig (2015) e o software desenvolvido por Silva (2020)

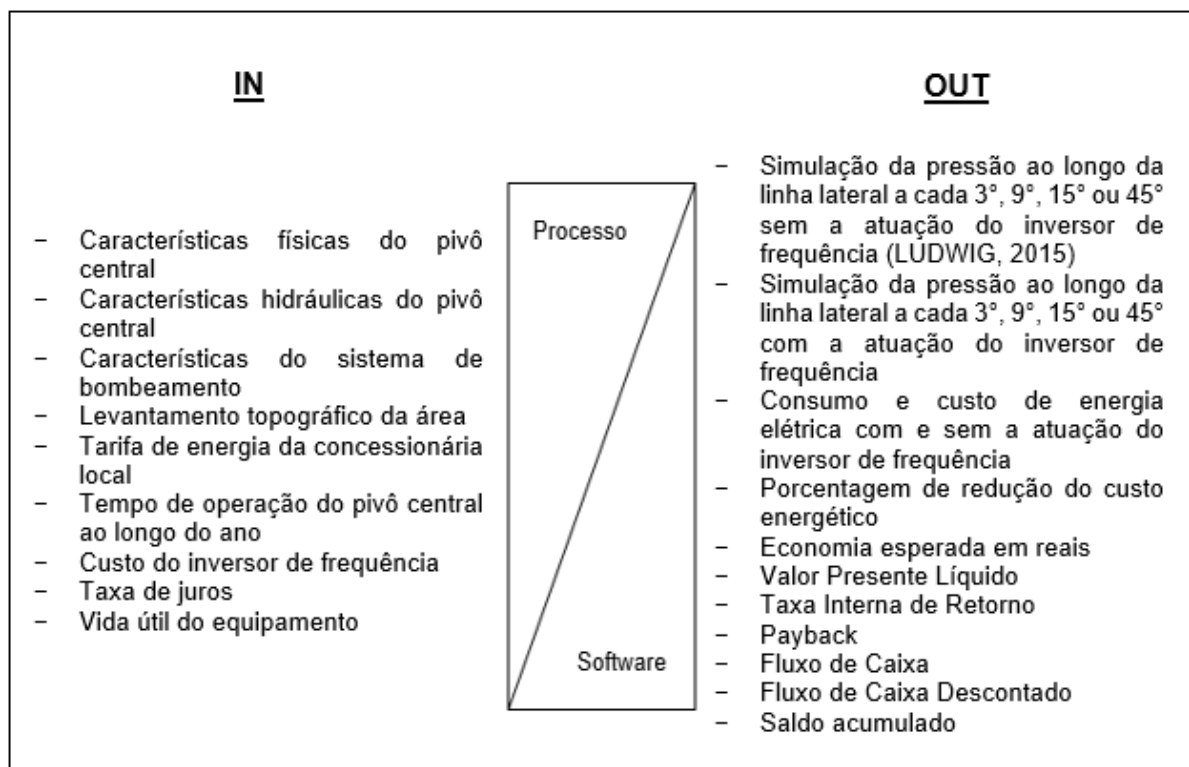
	Ludwig (2015)	Silva (2020)
Linguagem computacional	Object Pascal	Object Pascal
Ambiente de Desenvolvimento Integrado	Delphi Community Edition	Delphi Community Edition
Objetivo geral	Avaliar a influência da declividade do terreno nas pressões e no gasto energético em um sistema pivô central.	Avaliar a viabilidade econômica do uso do inversor de frequência no sistema de irrigação por pivô central.
Objetivo específico	Avaliar a distribuição de pressão em diferentes posições do pivô central.	Avaliar a distribuição de pressão em diferentes posições do giro do pivô central com a atuação do inversor de frequência.
Solução para otimização da pressão e consumo de energia elétrica	Alteração da velocidade de giro do pivô central, modificando o percentímetro.	Alteração da velocidade de rotação do conjunto motobomba por meio da instalação do inversor de frequência no motor.

Partindo das características hidráulicas e operacionais do pivô, considerando a topografia local, o número de horas trabalhadas, a tarifa de energia, o custo do inversor e os indicadores econômicos, o software realiza simulações da operação do pivô central nas diferentes posições na área irrigada.

As simulações geram dados de saída, como: vazão, pressão, potência, consumo e custo de energia nas duas condições, sem inversor de frequência e com inversor de frequência. Dessa forma, é possível comparar estas duas condições e, posteriormente, por meio da análise do fluxo de caixa e dos índices econômicos de Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback, o software indica se investir na aquisição do inversor de frequência é viável ou não para

determinado pivô central, conforme suas condições operacionais e as características locais (Figura 8)

Figura 8 – Dados de entrada e saída do software



4.1.1 Simulação do pivô central sem inversor de frequência

Nesta etapa, a nova versão do programa computacional utiliza parte das rotinas de cálculo desenvolvidas por Ludwig (2015), requerendo dados básicos do sistema pivô central, que pode ser tanto um projeto de pivô central a ser instalado ou um equipamento já em operação no campo. A pressão na torre fixa do pivô é calculada para cada posição avaliada, podendo variar a cada 9°, 15° ou 45° de deslocamento do equipamento.

A nova versão do programa adiciona, nessa primeira análise, os cálculos da potência consumida na bomba na rotação normal de fábrica (Equação 9). No entanto, primeiramente, deve-se calcular a pressão na bomba que é de acordo com o cálculo da pressão na base do pivô central (H_0) (Equação 8).

Sem a utilização do inversor de frequência, Ludwig (2015) considerou que a bomba mantém a mesma pressão na base do pivô em todo o caminhamento do pivô

central na área irrigada. Desse modo, a vazão, a pressão da bomba e a potência serão consideradas constantes também. Sabe-se que isso não é o que ocorre no campo, no entanto, Ludwig (2015) realizou a validação de seu software e observou uma diferença estatística apenas em 3 posições das 8 posições avaliadas e justificou esse resultado considerando um possível desgaste dos reguladores de pressão e emissores por apresentarem um tempo de uso de aproximadamente nove anos e ser realizado a fertirrigação, interferindo assim, na eficiência do equipamento avaliado.

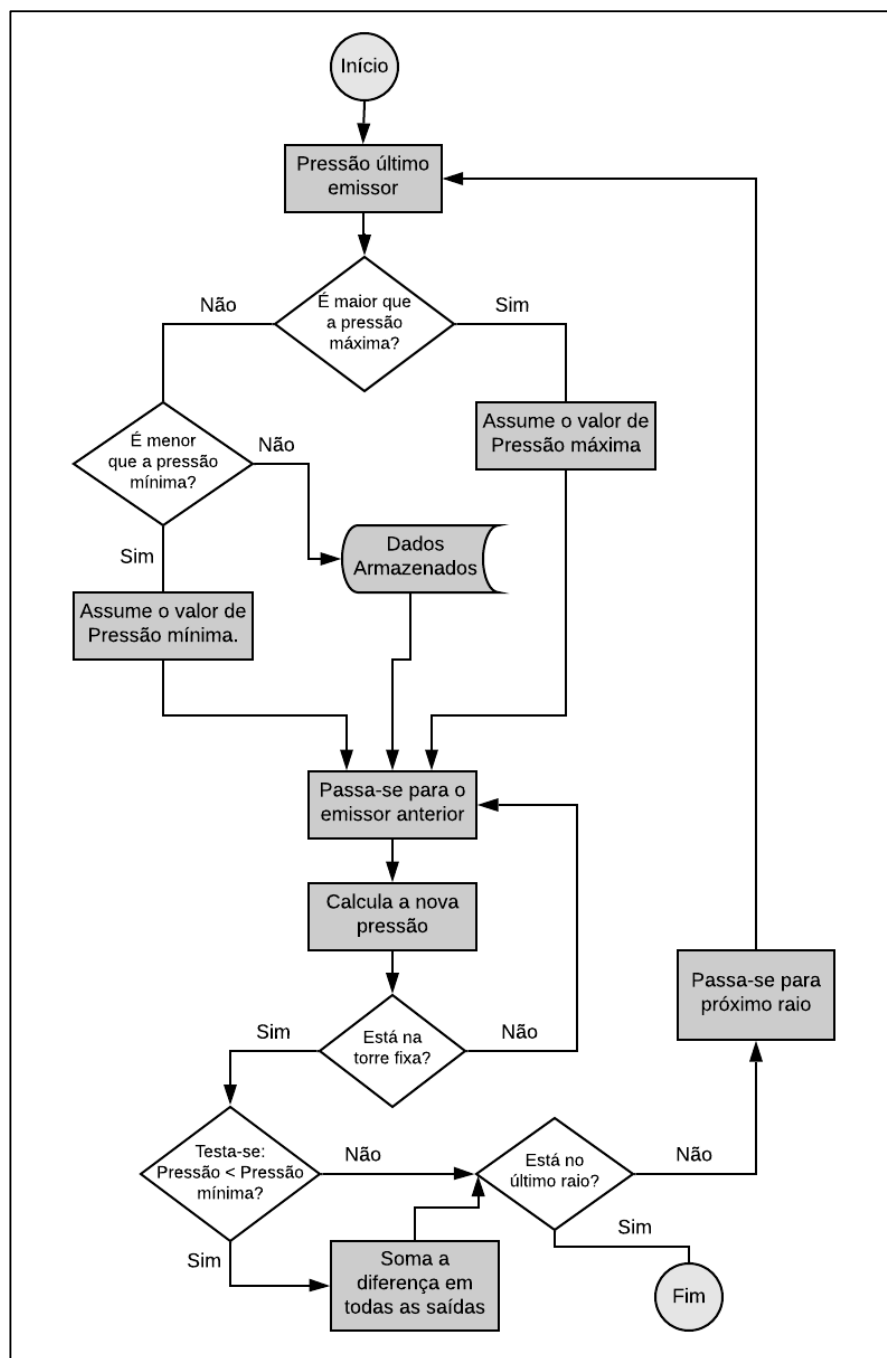
Com os dados de pressão, pressão na bomba e potência consumida pela bomba determinados, é possível passar para a próxima etapa do programa que é a simulação da pressão otimizada com a instalação do inversor de frequência. Esses dados são apresentados em uma tabela no programa e calculados por posição, afinal o inversor de frequência altera a rotação do motor e, conseqüentemente, a vazão, a pressão e a potência do sistema.

4.1.2 Simulação do pivô central com inversor de frequência

Para essa nova simulação, utiliza-se parte da rotina desenvolvida por Ludwig (2015) que resulta em um valor de pressão mínima necessária nos emissores da linha lateral do pivô central para atender o requerimento de pressão em cada posição de operação. As posições de operação são definidas pelo usuário, as opções que o software permite são a cada 45°, a cada 15°, a cada 9° ou a cada 3° da área irrigada. Ao final dos cálculos, é gerada uma planilha com dados de cota, perda de carga, vazão e pressão no emissor, além dos dados de sobre pressão, que é a indicação de quanto a pressão de projeto está acima da mínima necessária para os emissores.

Na figura 9 está apresentado o fluxograma da simulação com uso do inversor de frequência.

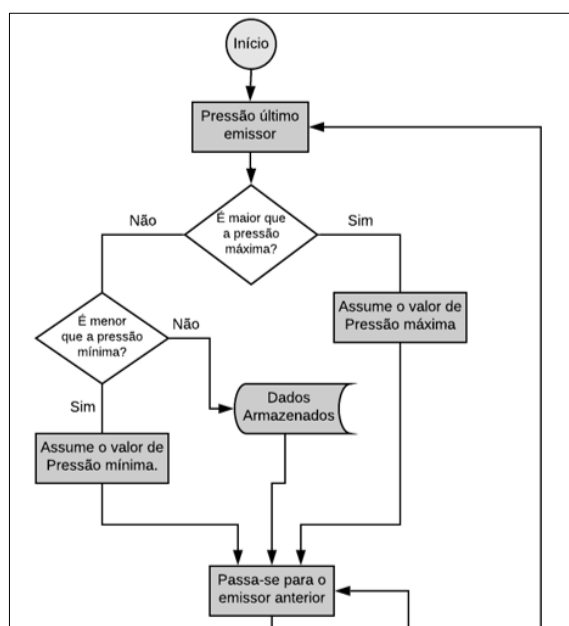
Figura 9 - Fluxograma da simulação da pressão otimizada com uso do inversor de frequência



Essa etapa do programa inicia-se pelo último emissor, o usuário deve estipular um intervalo de pressão, um valor máximo e um mínimo: o programa lê os valores do intervalo e faz o ajuste da rotação dentro desse intervalo de pressão para o último emissor. Exemplo: se a pressão demandada no último emissor for menor que o maior valor de pressão máxima definido pelo usuário, armazena o valor da pressão; se for maior, assume-se o valor da pressão máxima estabelecida pelo usuário. Se a pressão

demandada no último emissor for maior que o menor valor de pressão definido pelo usuário, armazena o valor da pressão; se a pressão demandada no último emissor for menor que o menor valor de pressão mínima definido pelo usuário, assume-se o valor da pressão mínima estabelecida pelo usuário para atender a necessidade de pressão mínima em cada posição dos emissores (Figura 10).

Figura 10 - Sub-rotina de testes para obter o valor da pressão no último emissor por meio da pressão estabelecida pelo usuário



No emissor anterior, utiliza-se a Equação 18 adaptada da Equação 6.

$$H_{at} = H_{ant} + hf_s + \Delta z_s \quad (18)$$

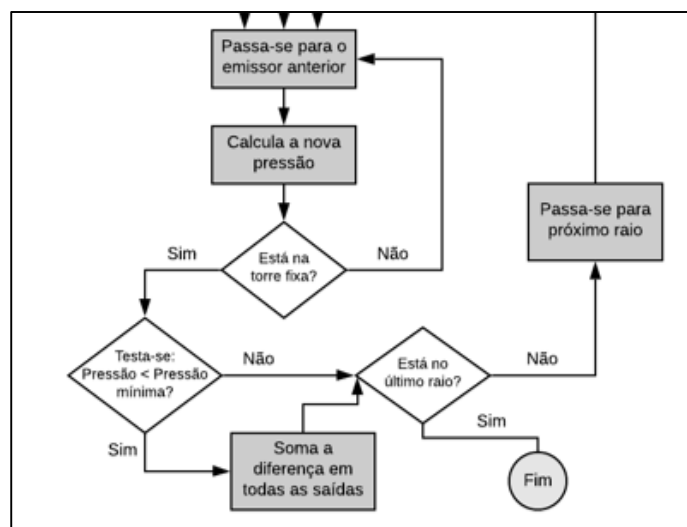
Em que: H_{at} - Pressão no ponto atual, mca; H_{ant} - Pressão no ponto anterior, mca; hf_s - perda de carga no trecho, entre emissores, mca; Δz_s - diferença de cota entre emissores, m.

Para cada repetição, o software testa se a pressão encontrada é suficiente para atender as exigências do regulador de pressão, ou seja, a pressão mínima é menor que a pressão calculada. A pressão mínima é igual a pressão de saída do regulador mais a pressão adicional necessária para o seu ideal funcionamento, indicada pelo fabricante. Caso a pressão não atenda essa exigência, é calculada a diferença entre

as duas pressões e esse valor é somado em todas as saídas subsequentes ao longo da linha lateral (Figura 11).

Após isso, o software verifica se já foi realizado o cálculo em todas as posições radiais da área irrigada (giro do pivô central), se ainda não estiver na última posição, passa-se para o próximo raio e para a última saída até que se atinja a base do pivô central no último raio.

Figura 11 - Sub-rotina de ajuste da pressão mínima necessária para funcionamento dos emissores e finalização dos cálculos



O fim dessa rotina de cálculos gera o resultado sobre qual deverá ser a pressão mínima fornecida na base do pivô central quando ele estiver passando em cada posição.

Com esse dado determinado, permite-se obter o valor da pressão demandada na bomba em cada posição radial do pivô central (Equação 8) e, também, o valor da potência necessária em cada posição, pela Relação de Rateaux (Equação 12) sem que ocorra um desperdício de energia elétrica, visando assim, simular a otimização energética.

4.1.3 Simulação da otimização energética

Essa etapa o programa computacional realiza uma estimativa da economia de energia gerada pela utilização do inversor de frequência durante a operação do

equipamento comparando com os valores de potência, consumo e custo de energia sem o inversor de frequência.

Por meio da informação de potência calculada nas diferentes posições do equipamento, sem (Equação 9) e com o uso de inversor de frequência (Equação 12), calcula-se o consumo e o custo da energia elétrica nas duas situações: sem inversor de frequência (Equações 21, 22 e 23) e com o inversor de frequência (Equações 24, 25 e 26).

4.1.4.1 Consumo e custo da energia elétrica sem inversor de frequência

- Consumo da energia elétrica atual (sem inversor)

$$Consumo_{atual}(kWh) = P_1(kW) \times \text{horas de funcionamento} \quad (21)$$

Em que: Horas de funcionamento - total de horas anuais de operação do pivô central;

- Custo da energia elétrica atual (sem inversor)

$$G_{atual}(R\$) = Consumo_{atual} \times \text{custo kWh} \quad (22)$$

- Custo total da energia elétrica atual (sem inversor)

$$G_{atual_{total}}(R\$) = G_{atual}(R\$) \quad (23)$$

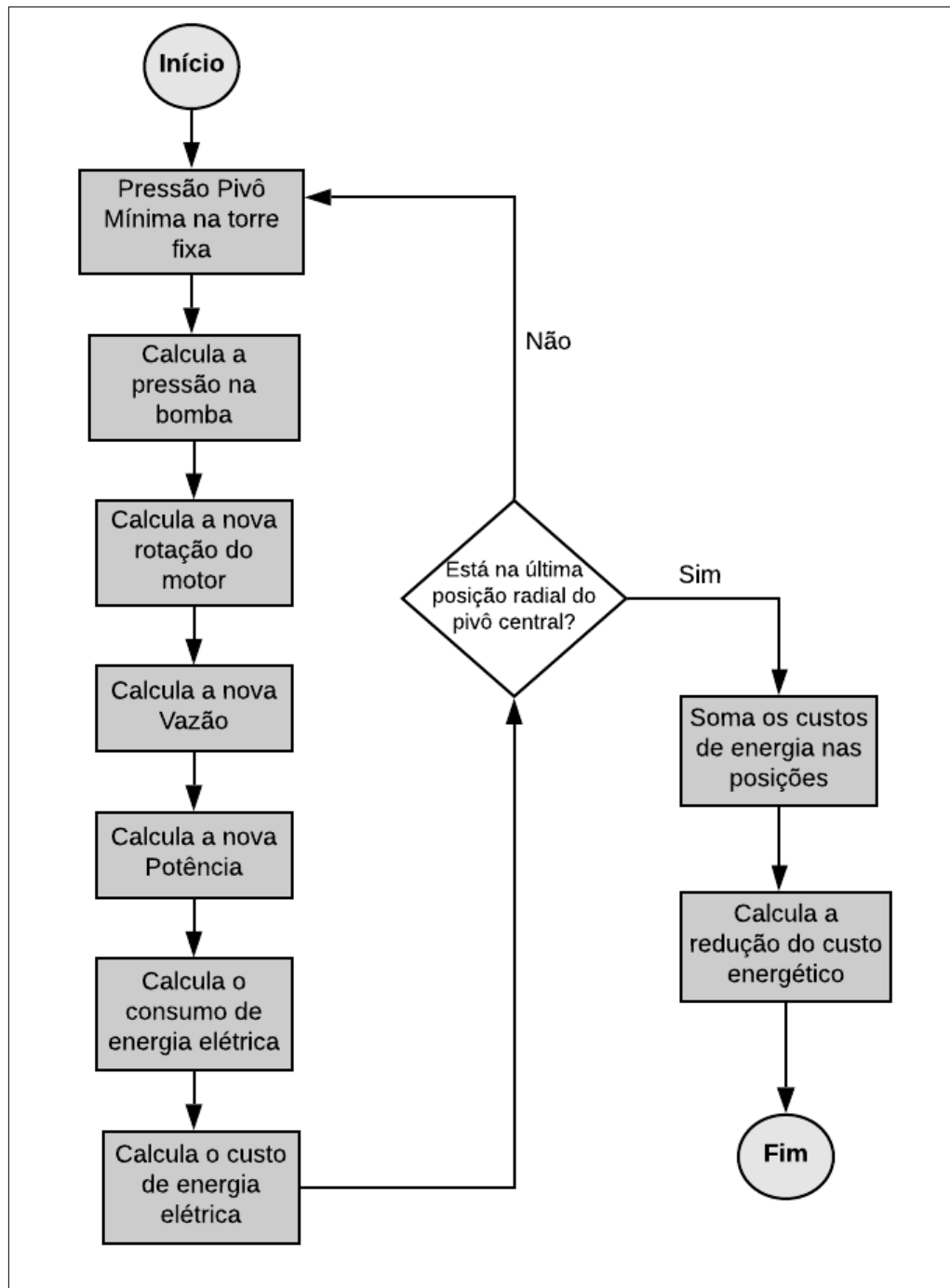
Sem a utilização do inversor de frequência, considera-se que a bomba mantém a mesma potência em todo o caminhamento do pivô central na área irrigada, sendo assim, a vazão e pressão da bomba se mantém constante e o custo total da energia elétrica é constante em todo o caminhamento do pivô central (Ludwig, 2015).

4.1.4.2 Consumo e custo da energia elétrica com inversor de frequência

Para a simulação dos dados com o inversor de frequência, criou-se um Fluxograma (Figura 12) para facilitar o entendimento. A simulação inicia-se lendo a

pressão mínima necessária na torre fixa calculada em cada posição radial do giro do pivô central na etapa da simulação do pivô central com inversor de frequência.

Figura 12 - Fluxograma da simulação da otimização energética



As equações utilizadas na simulação da otimização energética estão listadas a seguir.

- Consumo da energia elétrica com inversor

Nessa etapa, deve-se dividir as horas de funcionamento pelo número de posições que se está realizando a simulação. Exemplo: no caso estudado, realizou-se a simulação a cada 15°, portanto, o número de posições é 24 ($360^\circ/15^\circ = 24$ posições).

$$Consumo_{inversor}(kWh) = P_2(kW) \times \frac{\text{horas de funcionamento}}{n^\circ \text{ de posições}} \quad (24)$$

Em que: horas de funcionamento – total de horas anuais de operação do pivô central;
nº de posições – número de posições que o usuário escolheu.

- Custo da energia elétrica com inversor

$$G_{inversor}(R\$) = Consumo_{inversor} \times Custo kWh \quad (25)$$

Essa sequência de cálculos também é realizada em cada posição radial da área irrigada, repetindo-se até a última posição na área irrigada. Os valores também são apresentados em forma de tabelas no software, na aba “pressão pivô com inversor” e alimentam o banco de dados.

O efeito de possíveis reajustes tarifários que possam ocorrer ao longo do período analisado não foi considerado, pois o respectivo reflexo sobre os fluxos de caixa em questão seriam nulos, uma vez que o reajuste ocorreria tanto no valor total da conta com inversor quanto sem inversor.

Com o custo da energia elétrica, com o inversor de frequência, em cada posição calculada realiza-se a soma desses valores.

- Somatório do custo da energia elétrica com inversor

$$G_{total\ inversor}(R\$) = \sum G_{inversor} \quad (26)$$

4.1.4.3 Redução do custo energético

Por meio dos resultados obtidos dos somatórios dos custos gerado sem e com a instalação do inversor de frequência no conjunto motobomba, calcula-se a porcentagem de economia que o inversor de frequência pode trazer para o irrigante. A Equação 27 demonstra como é realizado esse cálculo.

$$\text{Redução do custo energético} = \frac{G_{total_{atual}} - G_{total_{inversor}}}{G_{total_{atual}}} \times 100 \quad (27)$$

A partir dos resultados obtidos nessa etapa, realiza-se a análise da viabilidade econômica da adoção do inversor de frequência para as condições específicas do pivô central avaliado.

4.1.4 Análise econômica

Para análise da viabilidade econômica utiliza-se dos dados de entrada:

- a) Custo do inversor de frequência e kit de sensores (Despesa);
- b) Economia do custo da energia elétrica devido à utilização do inversor de frequência (Receita);
- c) Vida útil do pivô central e do inversor de frequência;
- d) Taxa de juros.

A análise econômica da utilização do inversor de frequência é realizada avaliando se a economia de energia elétrica gerada pelo inversor de frequência compensa o custo do investimento do equipamento.

Nessa etapa do programa computacional executa-se o Fluxo de Caixa do investimento, calcula o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Payback para avaliar se o projeto é economicamente viável ou não.

O Fluxo de Caixa Simples é o resultado da diferença entre as despesas e as receitas, podendo ser positivo ou negativo. O Fluxo de Caixa Descontado considera a taxa de juros, que é a Taxa Mínima de Atratividade do investimento. Para calcular o fluxo de caixa anual do investimento utilizou-se as Equações 28 e 29.

A receita anual da economia gerada devido ao uso do inversor de frequência no sistema pivô central é a diferença entre a soma do custo da energia elétrica, no ano, sem o inversor de frequência e a soma do custo da energia elétrica, no ano, com o inversor de frequência. Representando, assim, a economia esperada pelo funcionamento desse equipamento no conjunto motobomba do pivô central.

A Equação 28 demonstra o cálculo da receita anual a partir do cálculo do consumo de energia elétrica em cada posição do pivô central.

- Receita anual (R\$)

$$Receita\ anual = G\ atual_{total} - G\ inversor_{total} \quad (28)$$

Em que: Receita anual = economia esperada (R\$); G atual total = soma do custo da energia elétrica sem o inversor de frequência (R\$); G inversor total = Soma do custo da energia elétrica com o inversor de frequência (R\$).

- Despesa – Valor do investimento inicial - VI (R\$)

$$VI = (\text{Valor inversor} + \text{kit sensores}) - \text{Valor chave de partida} \quad (29)$$

Com os valores de receita e despesa anual determinados, calcula-se o Fluxo de Caixa Simples (Equação 13) e, posteriormente, o Fluxo de Caixa Descontado (Equação 14).

O Fluxo de Caixa Descontado considera a taxa de juros e é apresentado ano a ano, dessa forma o usuário tem a visualização em números do seu caixa ao longo do tempo considerando a TMA.

Consequente aos cálculos acima, calcula-se o Valor Presente Líquido (VPL) que é um método muito utilizado para a determinação da viabilidade de um investimento dentro de um determinado período. O VPL considera a variação monetária ao longo do tempo e o custo de oportunidade do capital, que é a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) (Equação 15).

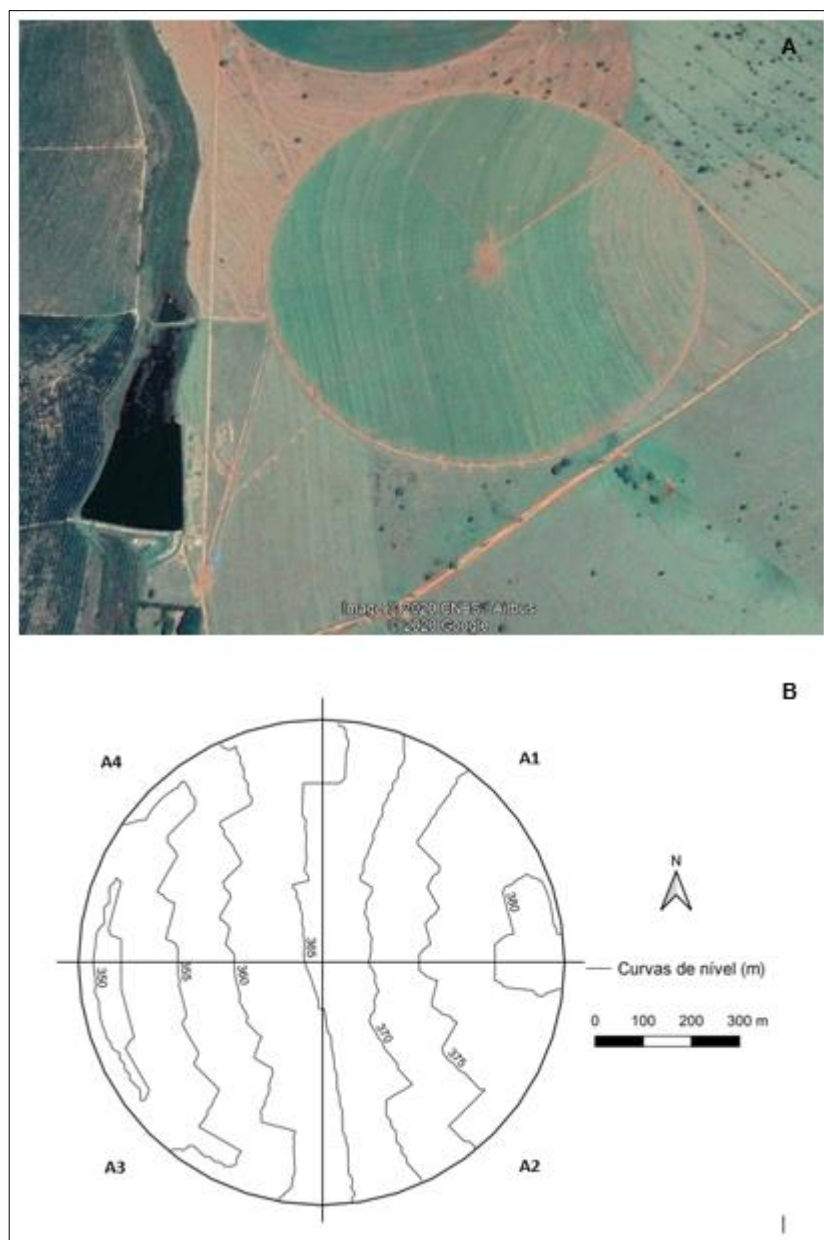
Se o valor do VPL for positivo, significa que investir em um inversor de frequência no sistema pivô central avaliado é viável economicamente, gerando lucro ao produtor. Caso seu valor seja nulo (zero), significa que o investimento se paga ao longo dos anos, mas sem gerar lucro ao produtor. Por fim, se o valor for negativo, significa que o investimento é inviável economicamente e, portanto, não gera lucro ao produtor.

O próximo cálculo realizado é o da Taxa Interna de Retorno (TIR). A TIR é matematicamente definida como a taxa de juros que tornaria o VPL nulo (Equação 16). Sendo assim, caso a TMA seja menor que a TIR, o investimento com essa taxa é viável, caso contrário ($TMA > TIR$), o investimento não é viável. Seguindo esse conceito, a TIR nos mostra qual a taxa máxima a ser considerada para o investimento ser viável economicamente.

E, por fim, calcula-se o Payback Simples. O Payback é o tempo de recuperação do investimento, esse indicador econômico indica o período (tempo) que o investidor irá precisar para recuperar o capital investido, no entanto, desconsidera-se a taxa de juros (Equação 17).

4.2 Caracterização do sistema de irrigação avaliado

Figura 13 - Imagem da área irrigada pelo Pivô Central e mapa de curvas de nível da área irrigada



Fonte: A) Google Earth Pro® (2020). B) Fonte: Autor.

O pivô central avaliado está localizado na Fazenda Santa Rosa, no município de Bataguassu, Estado do Mato Grosso do Sul, cujas coordenadas geográficas são: Latitude 21°54'18" sul e longitude 52°35'60" oeste e 366 m de altitude (Figura 13 A - B).

4.2.1 Características do pivô central

Para uma avaliação inicial do programa computacional que foi desenvolvido utilizou-se os dados do pivô central fornecido pela empresa Fockink®. Esse pivô central apresenta 9 lances e 1 balanço (9 torres móveis, 1 torre fixa) totalizando um comprimento de 498,70 m e área irrigada total (incluindo o canhão) de 80,04 ha.

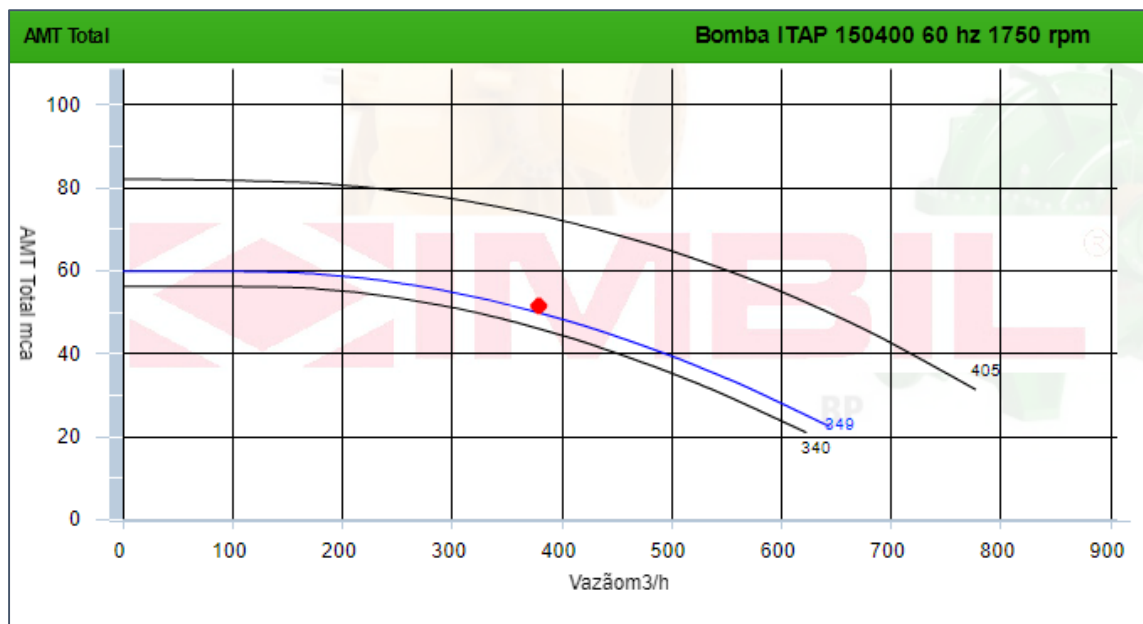
A linha lateral é composta por 202 emissores do modelo "IWob UP3", pressão de operação 7 mca, do fabricante Senninger® e 1 canhão "End Spray", pressão de operação 13,8 mca, também do fabricante Senninger®. O primeiro emissor encontra-se à uma distância de 8,4 m da torre fixa do pivô e os demais estão com espaçamento de 2,1 m entre os emissores próximos às torres móveis e 2,24 m para os emissores nos lances. A lâmina bruta é de 10 mm dia⁻¹.

O canhão final apresenta um raio médio de alcance de 6,06 m, lâmina bruta de 7,57 mm dia⁻¹ (6,88 m³ h⁻¹).

4.2.2 Características do sistema de bombeamento

O sistema de bombeamento é composto por 2 bombas IMBIL® ligadas em série, com vazão de 378,94 m³ h⁻¹ e altura manométrica de 51,56 mca cada bomba e rotação de 1750 rpm (Figura 14). Nos motores elétricos de 100 CV estão conectados 2 inversores de frequência de 100 CV cada.

Figura 14 - Curva da bomba IMBIL ITAP 150/400 (1750 rpm)



4.2.3 Base de dados operacionais

O valor do painel elétrico de controle de bombeamento com 2 inversores de frequência de 100 CV é de R\$59.288,98¹.

A vida útil do pivô central considerada na simulação foi de 15 anos de acordo com Azevedo (2003), Medeiros et al. (2004) e Oliveira; Zocoler (2013).

A taxa de juros, Taxa Mínima de atratividade (TMA), utilizada foi o valor da taxa Selic atual que é de 5,5% (Correio Braziliense, 2019).

O tempo de operação anual do pivô central utilizado foi de 800 horas². Esse é um dado de entrada fundamental para realização da análise da viabilidade econômica do investimento, no entanto, é um dado particular de cada irrigante que varia de acordo o planejamento anual da área irrigada e perspectiva de investimento/produtividade.

A tarifa de energia² utilizada para a análise da viabilidade econômica do investimento foi de acordo com Classe Rural A4, a qual o irrigante se enquadra, que é de R\$0,3866 kWh⁻¹ para o horário fora de ponta. Para o horário de ponta o custo do kWh é de R\$ 2,17 e para o horário reservado³ é de R\$0,0735.

¹ Informação obtida com a empresa Fockink®.

² Informação obtida com o gerente da Fazenda Santa Rosa.

³ Horário compreendido entre 21h30m (vinte e uma horas e trinta minutos) e 6h (seis horas) do dia seguinte.

4.3 Análise Geoestatística

Para análise exploratórias dos dados e confecção dos mapas utilizou-se a análise geoestatística a fim de avaliar a dependência espacial. Os dados experimentais foram submetidos ao ajuste de modelo teórico, no Programa Geoestatístico GS+ “Geostatistical for Environmental Sciences”.

Os parâmetros do modelo do variograma ajustado foram usados na interpolação dos dados por krigagem ordinária. A análise da variabilidade espacial seguiu o Índice de Dependência Espacial (IDE): índice $\leq 25\%$ – fraca dependência espacial; de 25 a 75% – moderada dependência espacial e $\geq 75\%$ – forte dependência espacial (Zimback, 2001).

Após as estimativas dos parâmetros dos variogramas experimentais realizou-se as interpolações de dados por krigagem, visando definir o padrão espacial das variáveis estudadas.

Realizou-se também a validação cruzada com base no coeficiente de regressão para verificar a qualidade do ajuste do variograma.

4.4 Metodologia do Erro Médio

A metodologia do erro médio (MBE) foi realizada comparando-se os resultados obtidos por meio da simulação realizada no software desenvolvido. Comparou-se os dados de pressão nos emissores em cada posição da linha lateral na situação com inversor de frequência e sem o inversor de frequência no conjunto motobomba. Dessa forma, determinou-se se a média das pressões nos emissores na situação com inversor de frequência foram maiores ou menores que na situação sem o inversor de frequência.

Quando o MBE resultar em um valor positivo, significa que, na média, os valores de pressão nos emissores na situação com inversor de frequência estão superestimados em relação aos valores de pressão nos emissores na situação sem inversor de frequência, caso contrário, se resultar em um valor negativo, significa que, na média, os valores de pressão nos emissores na situação com inversor de frequência estão subestimados em relação aos valores de pressão nos emissores na situação com inversor de frequência.

Para essa análise, utilizou-se a Equação 18 modificada (Equação 30) e Equação 31.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{ci} - x_{si}) \quad (30)$$

Em que: x_{ci} – média simulada com inversor, mca; x_{si} – média simulada sem inversor, mca.

$$MBE (\%) = \frac{MBE}{x_{si}} \times 100 \quad (31)$$

Não realizou-se essa metodologia devido às dificuldades encontradas para a realização da coleta dos dados em campo. Primeiramente, ocorreu uma dificuldade para encontrar um pivô central com o inversor de frequência instalado no sistema motobomba e este estar funcionando. Após encontrar esse equipamento, a dificuldade foi obter os dados técnicos do equipamento e da área irrigada, dependendo da disponibilidade das empresas em fornecer tais dados. Por fim, deparou-se com contratempos na gestão da propriedade em que se encontra o pivô central. Ao conseguir agendar a visita, dias antes, o equipamento foi danificado e não foi consertado em tempo hábil para coleta de dados.

Outra informação fornecida pelo gerente da fazenda foi o custo da energia elétrica para acionamento do sistema de irrigação que consiste em uma demanda mensal de R\$ 1.800,00 somado ao consumo (kWh) totalizando aproximadamente R\$ 3.000,00. Dessa forma, seria inviável, para o produtor, o acionamento do equipamento para realizar a coleta dos dados sem a necessidade da irrigação da área conjuntamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para apresentação dos resultados, primeiramente serão abordados as características do software e seu funcionamento, posteriormente, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com os dados do pivô central analisado.

5.1 O software

A primeira etapa do programa é para identificação do pivô central analisado, na qual o usuário insere o nome da fazenda, proprietário e o equipamento que está sendo avaliado. Nessa mesma janela pode-se acessar as demais janelas do programa: 1) Dados do Pivô Central; 2) Dados da área; 3) Pivô Central sem inversor; 4) Otimização da pressão e 5) Pivô Central com inversor; 6) Viabilidade Econômica (Figura 15).

Figura 15 - Identificação do Pivô Central avaliado e acesso às demais janelas do software

A imagem mostra a interface de um software com uma barra de menu no topo contendo: Arquivo, Etapa, Idioma, Darcy-Weisbach, Calculadora, Ajuda, Sobre. O conteúdo principal é dividido em seções. No topo, há uma seção "Dados do projeto" com campos de texto para "Fazenda" (contendo "Santa Rosa"), "Proprietário" (contendo "Cláudio") e "Identificação do Pivô Central" (contendo "1"). Um botão "Voltar" está no canto superior direito. Abaixo, há seis cartões de navegação, cada um com um botão "Avançar":

- 1. Dados do Pivô Central
- 2. Dados da área (com sub-opções "Digitar cotas" e "Carregar imagem")
- 3. Pivô Central sem inversor
- 4. Otimização da Pressão
- 5. Pivô Central com inversor
- 6. Viabilidade Econômica

5.1.1 Dados do sistema de irrigação por Pivô Central

Na janela "Dados do pivô central", primeiramente, o usuário deve inserir os dados do equipamento a ser analisado, tanto dados estruturais quanto dados operacionais, como: grau de giro do pivô, número de emissores; distância dos

emissores ao solo (m); distância do primeiro emissor (m); espaçamento entre emissores (m) e espaçamento das torres (m) (Figura15).

Após a inserção desses dados, deve-se inserir dados relacionados à tubulação e sua estrutura, que são: rugosidade relativa, número de lances com o mesmo diâmetro e comprimento, o número de emissores por vão (entre torres), o comprimento de cada vão e diâmetro da tubulação, indicando conforme a sequência, a partir da base do pivô, em que eles estão instalados. Na sequência, pede-se para que o usuário insira dados característicos dos emissores, reguladores de pressão, canhão e sistema de bombeamento (Figura 16).

Figura 16 – Janela de inserção dos dados do sistema de irrigação por Pivô Central

Dados característicos do Pivô

Estruturais

Giro do pivô: 360°

Número de emissores: 202

Altura dos aspersores: 4,2 m

Distância do primeiro emissor: 8,4 m

Espaçamento entre emissores: 2,24 m

Espaçamento nas torres: 2,1 m

Tubulação

Vãos	Emis. p/ vão	Diâmetro, mm	Comprimento, m	Total, m
1	9	217,98	48,1	48,1
1	11	217,98	48,1	48,1
1	17	217,98	48,1	48,1

Comprimento do pivô central: 502,2 m

☒ Aço galvanizado

Rugosidade: 0,15 mm

Emissores

Importar Exportar

Editar

Senninger (64)

Diâmetro em: ☐ Número ☐ mm ☐ Pol

Emis.	Bocal
1	6
2	6
3	6,5
4	7,5
5	8
6	8,5
7	9,5
8	10
9	10,5
10	10,5
11	10,5
12	12
13	12,5
14	12,5
15	13
16	13,5
17	14
18	14,5

Operação

Pressão de operação dos emissores: 7 m.c.a.

Pressão na torre fixa: 50,44 m.c.a.

Tempo de operação: 12 h 100%

Eficiência de irrigação: 90 %

Bombeamento

☒ Possui canhão?

Reg. de pressão

Editar

5.1.2 Dados da área

Nessa janela, o usuário insere as cotas de pontos ao longo do pivô central, nas diferentes posições de operação avaliadas. Quanto maior o número de dados de entrada, maior será a representatividade da declividade do terreno. Os dados inseridos devem apresentar a distância em relação ao ponto anterior e a cota do ponto (Figura 17).

Figura 17 – Janela de inserção dos dados da área irrigada pelo Pivô Central

Arquivo Etapa Idioma Darcy-Weisbach Calculadora Ajuda Sobre

Posição 1

Sítio	Distância	Cota
0	0	366
1	101	366
2	102	366
3	197	365
4	105	362

Σ distâncias 505 m

Posição 2

Sítio	Distância	Cota
0	0	366
1	101	369
2	102	372
3	197	377
4	105	379

Σ distâncias 505 m

Posição 3

Sítio	Distância	Cota
0	0	366
1	101	370
2	102	375
3	197	381
4	105	384

Σ distâncias 505 m

Posição 4

Sítio	Distância	Cota
0	0	366
1	101	368
2	102	372
3	197	375
4	105	375

Σ distâncias 505 m

Posição 5

Sítio	Distância	Cota
0	0	366
1	101	365
2	102	364
3	197	363
4	105	362

Σ distâncias 505 m

Posição 6

Sítio	Distância	Cota
0	0	366
1	101	363
2	102	360
3	197	353
4	105	349

Σ distâncias 505 m

Posição 7

Sítio	Distância	Cota
0	0	366
1	101	363
2	102	359
3	197	350
4	105	346

Σ distâncias 505 m

Posição 8

Sítio	Distância	Cota
0	0	366
1	101	364
2	102	362
3	197	356
4	105	351

Σ distâncias 505 m

Voltar

Cota base pivô: 366 m
Comprimento do pivô: 502,2 m

Calcular Cota

5.1.3 Pivô Central sem inversor de frequência

Nessa nova janela do programa é possível visualizar a situação do equipamento sem o inversor de frequência instalado, onde são apresentados os dados de cota, perda de carga, vazão e pressão demandada no ponto do pivô para atender cada emissor da linha lateral por posição do caminhamento do pivô central.

Os cálculos realizados pelo programa são realizados emissor a emissor, a partir da base do pivô até a última saída na última posição. Na aba “pressão selecionada” é apresentada as pressões em cada posição da área irrigada relativas ao emissor selecionado pelo usuário e a pressão na bomba referente às pressões selecionadas. Calcula-se, também, a potência na bomba em kilowatts (kW) (Figura 18 e 19).

Figura 18 - Janela da pressão em cada emissor e posição do pivô central sem o inversor de frequência

[illegible]

Figura 19 - Janela de apresentação da pressão presente no sistema de bombeamento sem inversor de frequência

[illegible]

Com os dados de pressão e de potência na bomba em cada posição determinados, passa-se para a próxima etapa de cálculos que é a otimização da pressão nos emissores em cada posição simulada, mostrando ao usuário que um sistema de bombeamento otimizado diminui a sobre pressão existente na linha lateral de sistemas não otimizados.

5.1.4 Otimização da pressão nos emissores

Para a otimização do pivô central, leva-se em consideração a pressão mínima necessária nos emissores em cada posição do pivô central para atender a demanda de pressão nos emissores, reguladores de pressão e, se houver canhão, a pressão de operação do canhão também. Nos cálculos é adicionado o efeito da declividade, subtraindo quando estamos em situação de aclave, pois há diminuição de pressão na linha lateral, e somando quando estamos em declive, pois há ganho de pressão na linha lateral.

Na aba “sobre pressão” é indicado quanto de pressão está acima da mínima necessária para os emissores em cada posição (Ludwig, 2015).

5.1.5 Pivô central com inversor de frequência

Consequente à apresentação dos valores de pressão considerando a ausência do inversor de frequência, com rotação do motor constante e o projeto considerando a posição crítica e, após a apresentação dos valores mínimos de pressão necessária em cada emissor por posição é apresentado as pressões nos emissores com a atuação do inversor de frequência (Figura 20).

Nessa etapa estabelece-se uma pressão máxima e uma pressão mínima. Esse intervalo deverá ser estabelecido pelo usuário levando em consideração a curva da bomba, pois ao alterar a rotação do motor, alteramos o rendimento da bomba (Figura 22 e 23; Tabela 1).

Figura 20 - Janela de apresentação da simulação das pressões nos emissores considerando a atuação do inversor de frequência

Arquivo Etapa Idioma Darcy-Weisbach Calculadora Ajuda Sobre

Deslocamento

15°

Pressão Máxima (mca): 15,4

Calcular

Voltar

Pressão Mínima (mca): 14

Pressão Pivô mínima, mca

Pressão Pivô com Inversor, mca

Simulação com inversor

Emissor	Distância acumulada	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	195°	210°	225°
0	0	23,95	20,25	16,15	11,15	6,85	4,55	45,95	42,75	39,85	37,25	31,85	26,85	22,84	19,3	17,2	15,3
1	8,4	23,95	30,15	36,05	40,95	42,65	44,25	45,65	42,45	39,65	37,05	31,75	26,85	22,94	19,4	17,4	15,5
2	10,6	23,51	29,71	35,51	40,41	42,11	43,71	45,11	42,01	39,11	36,61	31,31	26,41	22,5	19,06	16,96	15,2
3	12,9	23,43	29,63	35,33	40,23	41,93	43,53	44,93	41,83	38,93	36,43	31,13	26,33	22,42	18,98	16,98	15,2
4	15,1	23,35	29,55	35,25	40,15	41,75	43,45	44,75	41,65	38,85	36,35	31,15	26,35	22,44	19	16,9	15,1
5	17,4	23,27	29,37	35,07	39,97	41,57	43,27	44,57	41,47	38,67	36,17	30,97	26,17	22,36	18,92	16,92	15,1
6	19,6	23,19	29,29	34,99	39,79	41,39	43,09	44,39	41,29	38,59	36,09	30,89	26,09	22,28	18,84	16,94	15,1
7	21,8	23,11	29,21	34,91	39,71	41,31	42,91	44,21	41,11	38,41	35,91	30,81	26,01	22,2	18,76	16,86	15,1
8	24,1	23,03	29,03	34,73	39,53	41,13	42,73	44,03	41,03	38,33	35,83	30,73	26,03	22,22	18,78	16,88	15,1
9	26,3	22,95	28,95	34,55	39,35	40,95	42,65	43,95	40,95	38,25	35,75	30,65	25,95	22,14	18,8	16,9	15,1
10	28,4	22,87	28,87	34,47	39,27	40,87	42,47	43,77	40,77	38,07	35,57	30,47	25,77	22,06	18,72	16,82	15,0
11	30,7	22,8	28,8	34,4	39,1	40,7	42,3	43,6	40,6	37,9	35,5	30,4	25,7	21,99	18,65	16,75	15,0
12	32,9	22,72	28,62	34,22	38,92	40,52	42,12	43,42	40,42	37,72	35,32	30,32	25,62	21,91	18,67	16,77	15,1
13	35,1	22,64	28,54	34,14	38,84	40,44	41,94	43,24	40,34	37,64	35,24	30,24	25,64	21,93	18,59	16,69	15,0
14	37,4	22,56	28,46	33,96	38,66	40,26	41,76	43,06	40,16	37,46	35,06	30,06	25,46	21,85	18,61	16,71	15,0
15	39,6	22,48	28,38	33,88	38,48	40,08	41,58	42,88	39,98	37,38	34,98	29,98	25,38	21,77	18,53	16,73	15,0
16	41,9	22,4	28,3	33,8	38,4	39,9	41,4	42,7	39,8	37,2	34,8	29,9	25,3	21,69	18,45	16,65	14,9
17	44,1	22,32	28,12	33,62	38,22	39,62	41,32	42,62	39,72	37,12	34,72	29,82	25,32	21,71	18,47	16,67	15,0
18	46,3	22,25	28,05	33,55	38,15	39,65	41,15	42,45	39,55	36,95	34,55	29,65	25,25	21,64	18,4	16,6	14,9
19	48,6	22,18	27,98	33,38	37,98	39,48	40,98	42,28	39,38	36,78	34,48	29,58	25,18	21,57	18,33	16,53	14,9
20	50,8	22,11	27,91	33,21	37,81	39,31	40,81	42,11	39,21	36,61	34,31	29,51	25,01	21,5	18,36	16,56	15
21	52,9	22,04	27,74	33,14	37,64	39,14	40,64	41,94	39,14	36,54	34,24	29,44	25,04	21,53	18,39	16,59	15,0
22	55,2	21,97	27,67	33,07	37,57	39,07	40,57	41,77	38,97	36,47	34,17	29,37	24,97	21,46	18,32	16,52	14,9
23	57,4	21,9	27,6	32,9	37,4	38,9	40,4	41,6	38,8	36,3	34	29,3	24,9	21,39	18,25	16,55	14,9
24	59,6	21,83	27,43	32,73	37,23	38,73	40,23	41,43	38,63	36,13	33,93	29,23	24,83	21,32	18,18	16,48	15,0

Para passar para a próxima etapa do software é necessário o usuário selecionar o valor do primeiro emissor (emissor 0) e, após esses dados serem selecionados é realizado os cálculos referentes à otimização da pressão por meio da atuação do inversor de frequência, mudando a rotação do motor. Calcula-se, então, a nova rotação do motor, a nova vazão e a nova potência em cada posição da área irrigada. Os dados são apresentados no software e salvos no banco de dados (Figura 21).

Figura 21 - Janela da otimização do pivô central com a atuação do inversor de frequência

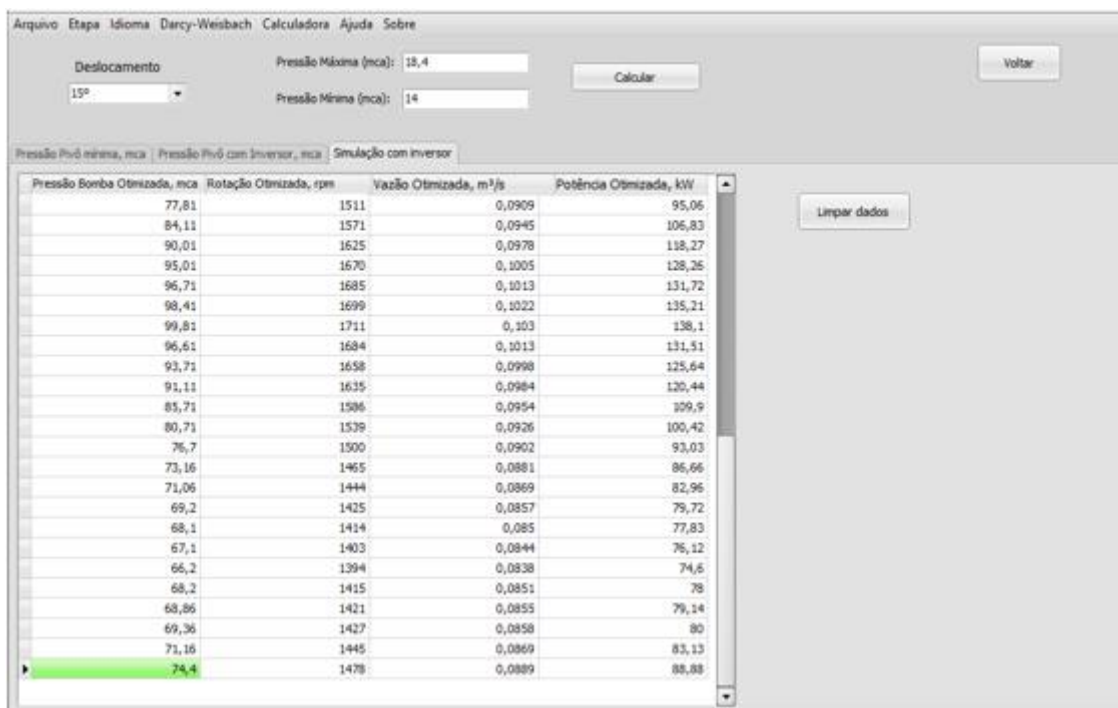
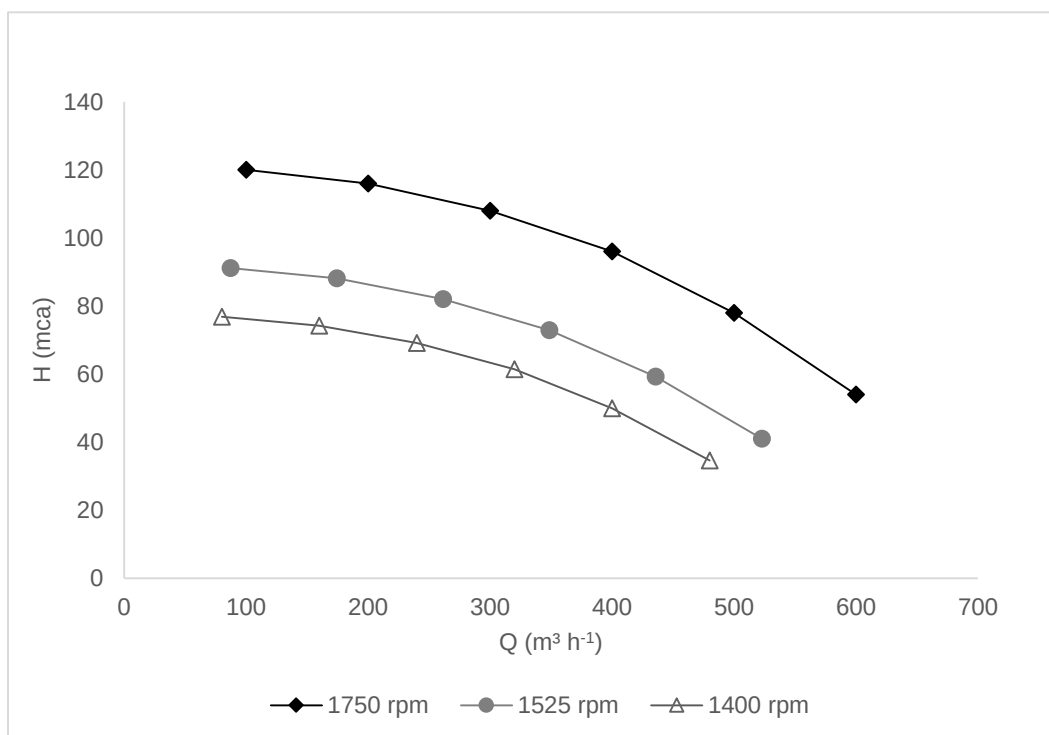
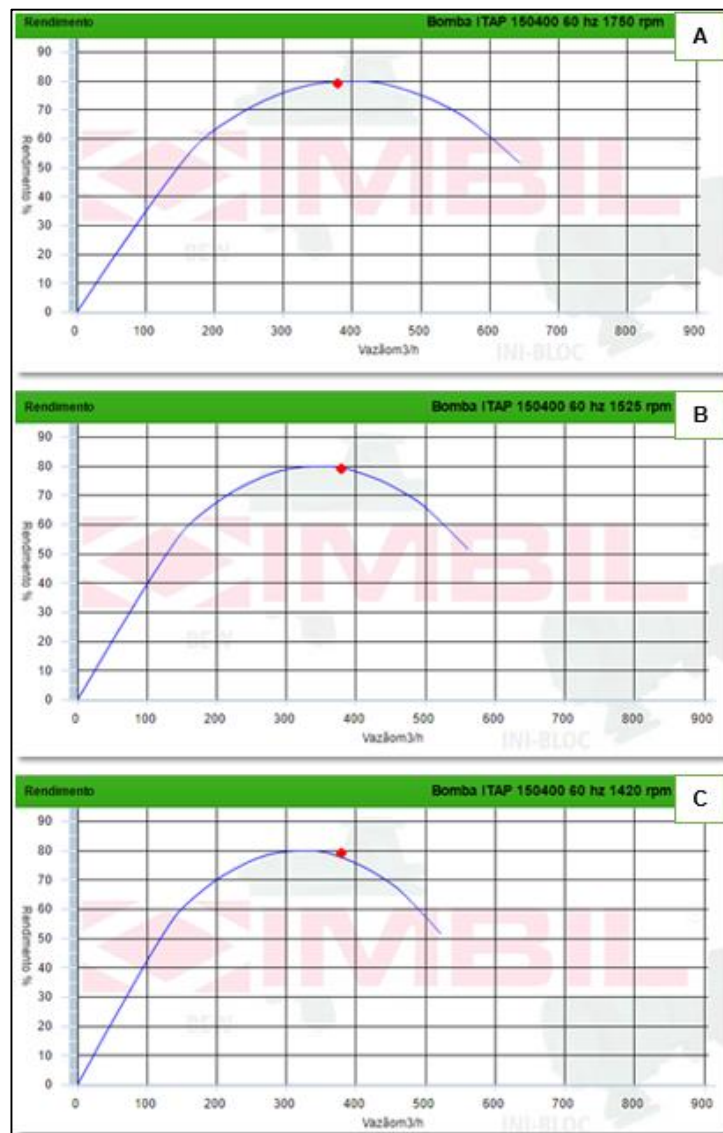


Figura 22 - Comportamento da curva da bomba IMBIL® ITAP 125/400 em diferentes velocidades de rotação do motor considerando as Relações de Rateaux



Fonte: Autor (2020)

Figura 23 – Curva de rendimento da bomba considerando diferentes velocidades de rotação do motor segundo o fabricante



Fonte: IMBIL (2020)

Tabela 1 - Velocidade de rotação do motor e rendimento da bomba IMBIL® ITAP 150/400 de acordo com o fabricante

Velocidade de rotação do motor	Rendimento da bomba
rpm	%
1750	80
1525	80
1400	Fora da curva rendimento

Fonte: adaptado de IMBIL (2020)

5.1.6 Análise da viabilidade econômica

A próxima janela do programa apresenta, primeiramente, os resultados dos cálculos de consumo e custo da energia elétrica, com e sem a instalação do inversor de frequência no sistema pivô central. A partir desses dados calculados, realiza-se a análise da viabilidade econômica apresentando em porcentagem a redução do custo da energia elétrica, a economia esperada pela aquisição do inversor de frequência (Receita anual), o Fluxo de Caixa Descontado, o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Payback do investimento (Figura 24).

Figura 24 - Janela da otimização energética e da viabilidade econômica

Arquivo Etapa Idioma Darcy-Weisbach Calculadora Ajuda Sobre

Voltar

Otimização Energética

Análise Econômica

Valor do Inversor: 59288,98 R\$

Valor Kit Inversor: 0 R\$

Valor Chave de Partida: 0 R\$

Taxa Mínima de Atratividade (TMA): 0,055 decimal

Vida Útil do Equipamento: 15 anos

Calcular

Sem inversor			Com inversor	
Posição	Consumo Energia Elétrica (kWh)	Custo Energia Elétrica (R\$)	Consumo Energia Elétrica (kWh)	Custo Energia Elétrica (R\$)
0	118024	45628,08	3168,67	1225
15	118024	45628,08	3561,33	1376
30	118024	45628,08	3942,33	1524
45	118024	45628,08	4275,33	1652
60	118024	45628,08	4390,67	1697
75	118024	45628,08	4507	1742
90	118024	45628,08	4603,67	1779
105	118024	45628,08	4384	1694
120	118024	45628,08	4188	1619
135	118024	45628,08	4015	1551

Custo Total

R\$45628,08

R\$31205,71

Índices Econômicos e Financeiros

Redução de Custo Energético (%): **31,61**

Economia Esperada: **R\$ 14.422,37**

Investimento Inicial: **R\$ 59.288,98**

VPL: **R\$ 85.476,73**

TIR (%): **11,77**

Payback (anos): **4,11**

Ano	Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa Descontado	Saldo Descontado Acumulado
Ano 4	R\$ 14.422,37	R\$ 11.641,98	-R\$ 8.736,41
Ano 5	R\$ 14.422,37	R\$ 11.035,05	R\$ 2.298,65
Ano 6	R\$ 14.422,37	R\$ 10.459,76	R\$ 12.758,41
Ano 7	R\$ 14.422,37	R\$ 9.914,47	R\$ 22.672,88
Ano 8	R\$ 14.422,37	R\$ 9.397,60	R\$ 32.070,48
Ano 9	R\$ 14.422,37	R\$ 8.907,68	R\$ 40.978,16
Ano 10	R\$ 14.422,37	R\$ 8.443,30	R\$ 49.421,45
Ano 11	R\$ 14.422,37	R\$ 8.003,12	R\$ 57.424,58
Ano 12	R\$ 14.422,37	R\$ 7.585,90	R\$ 65.010,48
Ano 13	R\$ 14.422,37	R\$ 7.190,43	R\$ 72.200,91
Ano 14	R\$ 14.422,37	R\$ 6.815,57	R\$ 79.016,48
Ano 15	R\$ 14.422,37	R\$ 6.460,26	R\$ 85.476,73

5.2 Análise econômica

Para o pivô central avaliado o custo anual na condição sem inversor de frequência é de R\$ 45.628,08 e, na condição com o inversor de frequência, esse custo é de R\$ 31.205,71. Dessa forma, de acordo com a simulação realizada, obtém-se uma economia de R\$ 14.422,37 por ano, que representa 31,61% (Tabela 2).

Tabela 2 - Resultado da análise econômica

RCE (%)	31,61
VPL (R\$)	85.476,73
TIR (%)	11,77
Payback (anos)	4,11

RCE = Redução do custo energético.

O VPL apresentou um valor positivo, o que significa que o investimento é viável economicamente para o investidor e, continuará sendo viável com uma TMA de até 11,77%. A partir dessa TMA, o VPL passa a ser negativo e não viável ao investidor.

O investidor terá seu retorno financeiro em, aproximadamente 4 anos. A partir disso, o que o investidor obter de economia na sua conta de energia será seu lucro de investimento.

5.3 Análise de variáveis

Para o estudo de caso proposto, foram avaliadas combinações de dois tempos totais de operação, 800h anuais e 1600h anuais, e duas tarifas de energia, R\$0,9216/kWh que representa 70% do tempo de funcionamento do pivô fora do horário de ponta (R\$0,3866/kWh⁴) e 30% do tempo de funcionamento do pivô no horário de ponta (R\$ 2,17/kWh⁴) e R\$0,3866/kWh (Tabela 3).

Tabela 3 - Análise da viabilidade econômica do uso de inversor de frequência em diferentes cenários

800 horas				
	0,9216 (R\$/kWh)		0,3866 (R\$/kWh)	
	Sem inversor	Com inversor	Sem inversor	Com inversor
Custo Total (R\$)	108.770,92	74.390,02	45.628,08	31.205,71
Economia Esperada (R\$)	34.380,90		14.422,37	
VPL (R\$)	285.812,11		85.476,73	
TIR (%)	49,26		11,77	
Payback (anos)	1,72		4,11	
1600 horas				
	0,9216 (R\$/kWh)		0,3866 (R\$/kWh)	
	Sem inversor	Com inversor	Sem inversor	Com inversor
Custo Total (R\$)	217.541,84	148.780,03	91.256,16	62.411,42
Economia Esperada (R\$)	68.761,80		28.844,74	
VPL (R\$)	630.913,20		230.242,45	
TIR (%)	104,70		39,96	
Payback (anos)	0,86		2,06	

O maior valor de VPL encontra-se no cenário de 1600 horas anuais de operação do pivô central com a tarifa de energia elétrica custando R\$0,9216/kWh.

⁴ Informação obtida com o gerente da Fazenda Santa Rosa.

Dessa forma, constata-se que quanto maior for o tempo de operação do pivô central e a tarifa de energia elétrica maior, mais rápido será o retorno financeiro obtido com o investimento. Quanto maior for o valor da economia obtida, mais rápido será o retorno financeiro do investimento.

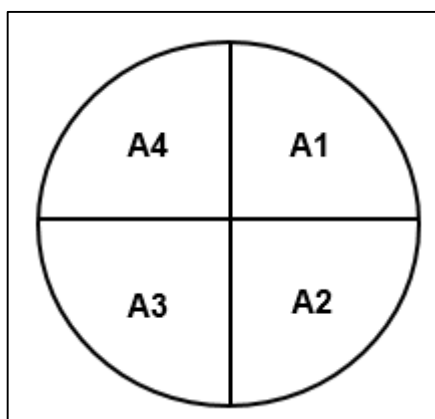
Outras variáveis que atuam nessa análise são o valor do investimento inicial e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Quanto maior for o investimento inicial, menor será o valor do VPL e quanto maior for a TMA, maior será o VPL.

Campana et al. (2003) observaram que o número de horas de operação anual, o valor da tarifa de energia elétrica e o valor do inversor de frequência influenciam na viabilidade econômica do investimento de um inversor de frequência no sistema de irrigação por pivô central, sendo que o valor do inversor de frequência e o número de horas trabalhadas foram os parâmetros mais representativos.

5.4 Análise da Diferença Média (DM)

Para essa análise, realizou-se a média do arco total (0° a 360°) da área irrigada e também a média a cada 90° , sendo as seções denominadas Arco 1 (0° a 90°), Arco 2 (90° a 180°), Arco 3 (180° a 270°) e Arco 4 (270° a 360°) (Figura 25).

Figura 25 – Demonstração da divisão das seções



A1 - Arco 1 (0° a 90°); A2 - Arco 2 (90° a 180°); A3 - Arco 3 (180° a 270°); A4 - Arco 4 (270° a 360°).

Fonte: Autor

A diferença média em todas situações apresentou valores negativos, isso mostra que em todas as posições a atuação do inversor de frequência atuou de modo a diminuir em maior ou menor porcentagem a pressão nos emissores. Considerando a área total, essa diminuição representou 49,60% e analisando de forma mais

segmentada observa-se que para os arcos 3 e 4 (linha lateral em declive) essa diminuição foi maior, 66,36% e 67,31%, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 - Análise da diferença média das pressões com inversor de frequência e sem inversor de frequência

	DM	X_{ci}		X_{si}		$X_{ci} - X_{si}$	
	%	mca		mca		mca	
Total	-49,60	19,75	±7,83	39,21	±7,33	19,45	±11,55
A1	-21,66	25,80	±7,56	32,94	±7,34	-7,14	±5,18
A2	-30,62	23,71	±7,04	34,18	±6,97	-10,46	±5,70
A3	-66,36	15,35	±1,38	45,62	±2,04	-30,27	±2,19
A4	-67,31	14,37	±1,60	43,96	±2,52	-29,59	±2,27

DM = Diferença média; X_{ci} = média pressão com inversor; X_{si} = média pressão sem inversor; A1 = Arco 1; A2 = Arco 2; A3 = Arco 3; A4 = Arco 4.

Na Tabela 4 pode-se observar, também, que a atuação do inversor de frequência tem maior representatividade nas áreas que a linha lateral apresenta declive, Arco 3 e 4, pois a diferença da média com inversor e sem inversor ($X_{ci} - X_{si}$) apresentaram valores maiores, 30,27 mca e 29,59 mca, respectivamente.

Observa-se também que quando tem-se um aclave maior, como é o caso do Arco 1 ($\Delta z = 18$ m), a atuação do inversor de frequência é menor do que quando o aclave é menor ($\Delta z = 9$ m), como no Arco 2.

5.5 Análise Geoestatística

Os valores de pressão no emissores em cada posição radial (a cada 15°) da área irrigada pelo pivô central foram analisados por meio da estatística descritiva para as duas condições, sem a atuação do inversor de frequência e com a atuação dele. Na Tabela 5 encontra-se os valores dos parâmetros estatísticos utilizados para descrever as distribuições dos dados medidos.

Tabela 5 - Valores da estatística descritiva das variáveis de pressão com e sem inversor de frequência

Variável	Média	S	Ck	Valor (mca)		CV
				Mínimo	Máximo	
Com inversor	19,75	7,34	1,00	11,97	45,85	53,86
Sem Inversor	39,21	7,83	-0,18	16,91	52,31	61,37

S = Desvio padrão; Ck = Coeficiente de curtose; CV = Coeficiente de variação

Nota-se que os valores mínimo de pressão nos emissores é 11,97 mca e 16,91 mca, apresentando pressão maior que a pressão mínima dos reguladores de pressão⁵. Sendo assim, observa-se que mesmo com o ajuste na pressão dos emissores gerada pelo inversor de frequência, os emissores terão pressão suficiente para distribuir água em qualquer posição que se encontrar a linha lateral.

Contudo, a pressão média para a condição sem inversor de frequência apresenta aproximadamente 20 mca a mais de pressão que a condição com inversor de frequência. Esse dado mostra o potencial de economia de energia que há nesse sistema pivô central.

Tabela 6 - Parâmetros dos modelos dos variogramas ajustados aos dados pressão nos emissores com e sem a atuação do inversor de frequência

	Modelo ajustado	Alcance m	Efeito Pepita	Patamar	R ² %	IDE %	Classe espacial
Sem inversor	Gaussiano	505,0	0,1	101,2	98,7	98,0	Forte
Com inversor	Exponencial	234,0	12,5	64,4	83,5	80,6	Forte

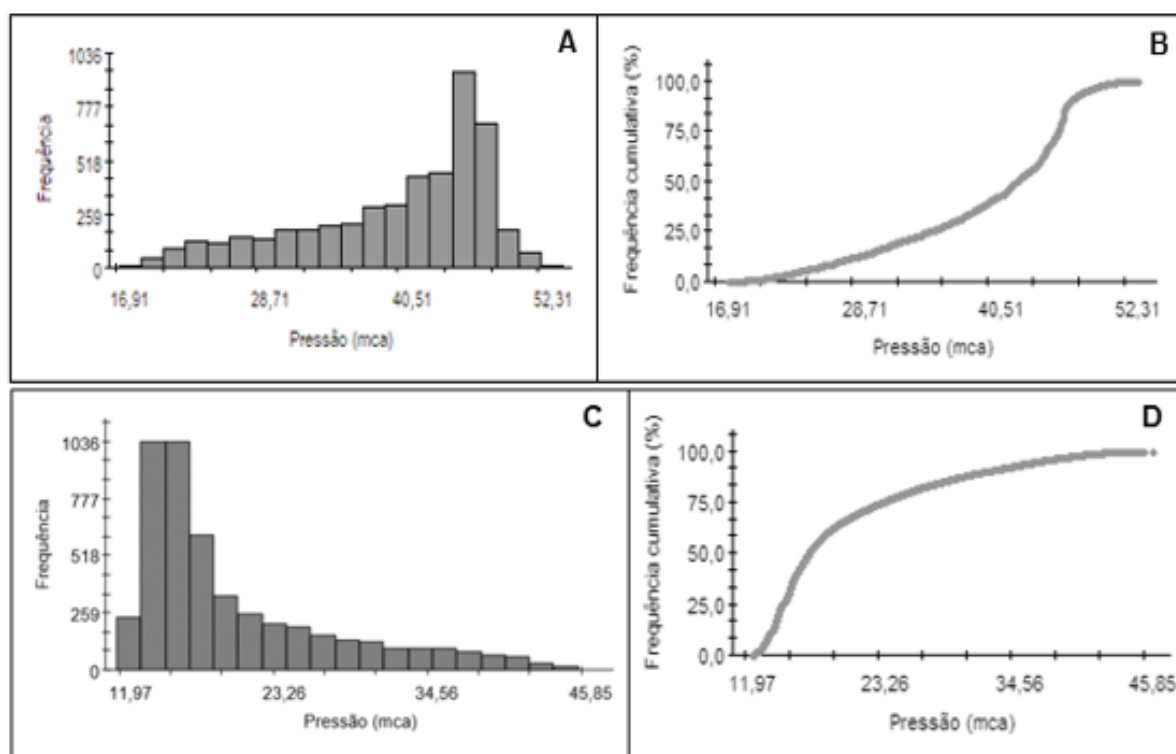
IDE = índice de dependência espacial

Analisando a distribuição da frequência dos dados verifica-se que 50% das pressões nos emissores para o pivô central sem inversor de frequência estão acima de 40 mca (Figura 26 B) e, a média encontra-se em 39,21 mca (Tabela 5). Realizando a mesma análise das pressões para o pivô central com inversor de frequência verifica-se que 50% estão abaixo de 17 mca (Figura 26 D) e, a média encontra-se em 19,75 mca (Tabela 5).

⁵ Pressão de saída do regulador de pressão somado à pressão sobressalente ($7 + 3,46 = 10,46$ mca). Dados fornecidos pelo fabricante.

Essa média de pressão nos emissores consideravelmente menor encontrada para a o pivô central com inversor não prejudicou a lâmina de irrigação aplicada na área, uma vez que o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) apresentou valor de 89,2%⁶ e o Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) apresentou valor de 86,8%⁶, ambos considerados bons por ASAE, 1997 e BERNANDO et al., 2006.

Figura 26 - Distribuição de frequência de dados (A) e Frequência cumulativa (B) da pressão no pivô central sem inversor de frequência. Distribuição de frequência de dados (C) e Frequência cumulativa (D) da pressão no pivô central sem inversor de frequência



De acordo com o variograma obtido para as duas condições, pressão nos emissores sem o inversor de frequência e pressão nos emissores com o inversor de frequência, verificou-se forte dependência dos dados nas duas condições.

Na Figura 27 A observa-se que o variograma apresentou tendência, onde o patamar não está definido e um alcance maior que a linha lateral do pivô central avaliado.

⁶ Informação obtida com o gerente da Fazenda Santa Rosa. Ensaio realizado pela empresa RASA – Assessoria e Consultoria em Irrigação, Recursos Hídrico e Ambiente.

Na Figura 27 C observa-se que o variograma apresenta um patamar, o que define a dependência dos dados em relação à distância.

Comparando-se as Figura 28 e 29 nota-se que com o inversor de frequência a pressão nos emissores é menor e consegue-se maior homogeneidade dos dados. Os valores de pressão nos emissores, no geral, estão mais próximos da pressão mínima, mostrando maior eficiência do sistema de irrigação. Essa maior eficiência do sistema significa economia de energia elétrica, consequentemente, significa menores custos para o funcionamento do sistema.

Figura 27 - Variograma (A) e Representação gráfica (B) da pressão no pivô central sem inversor de frequência. Variograma (C) e Representação gráfica (D) da pressão no pivô central com inversor de frequência

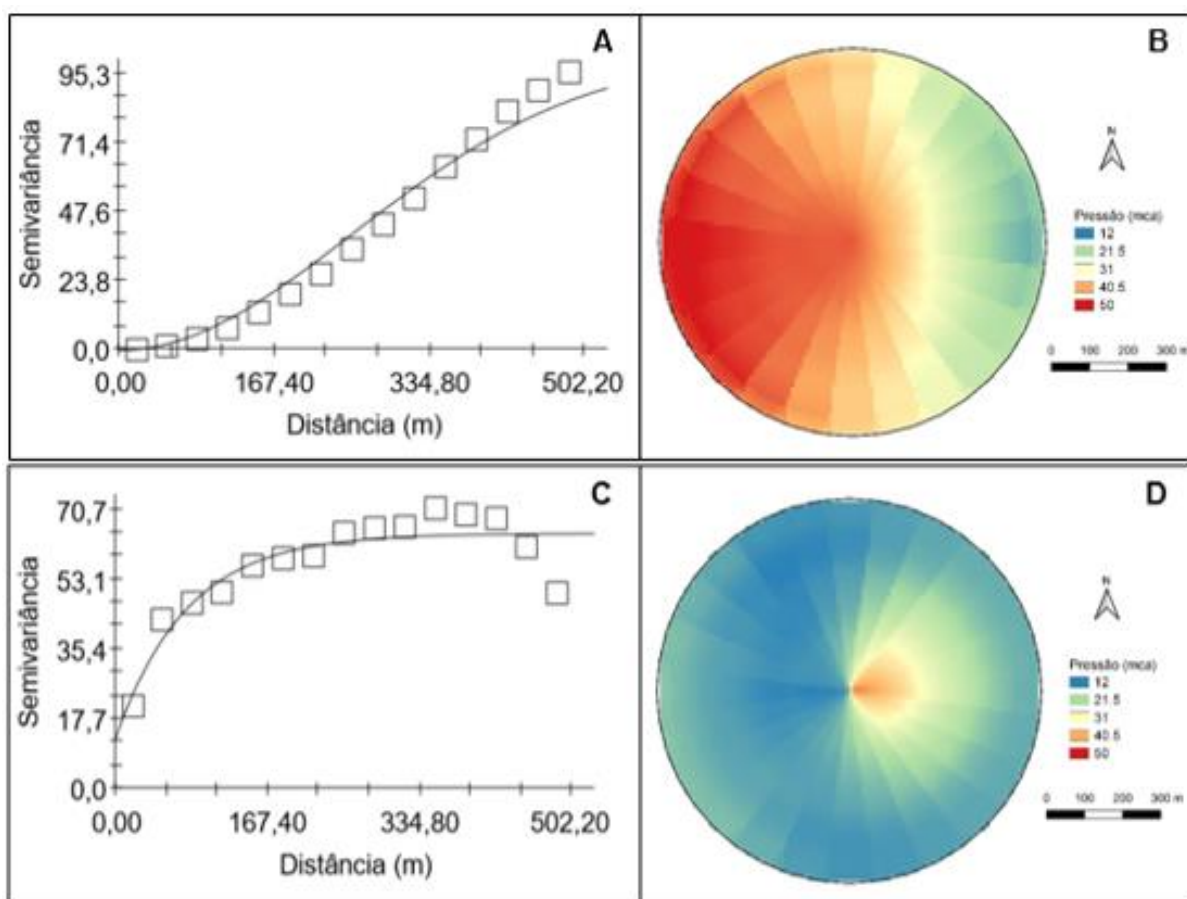


Figura 28 - Representação gráfica da pressão no pivô central sem inversor de frequência

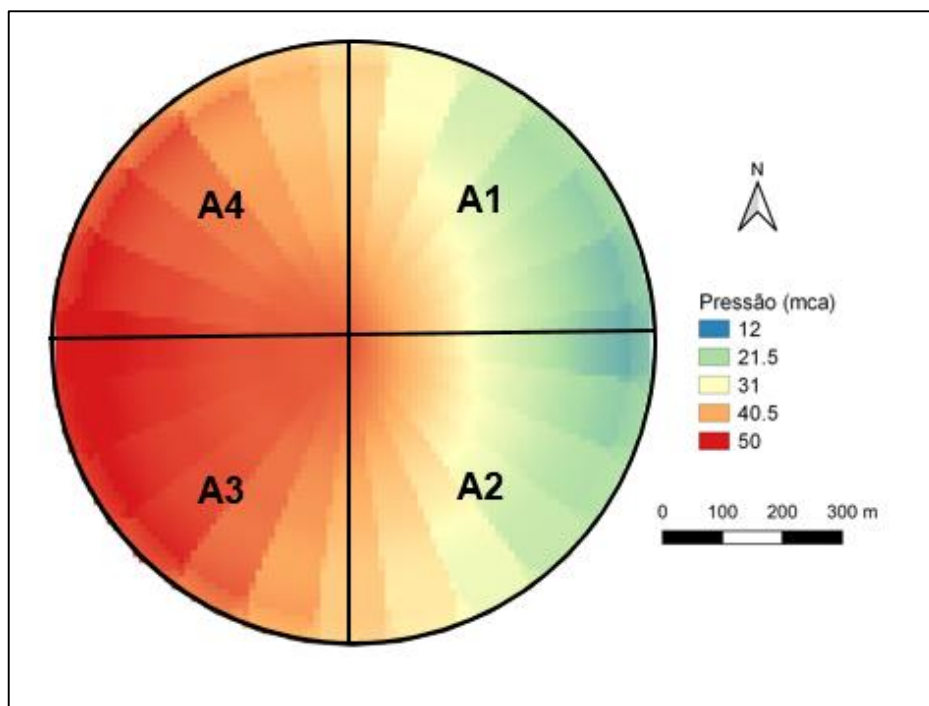
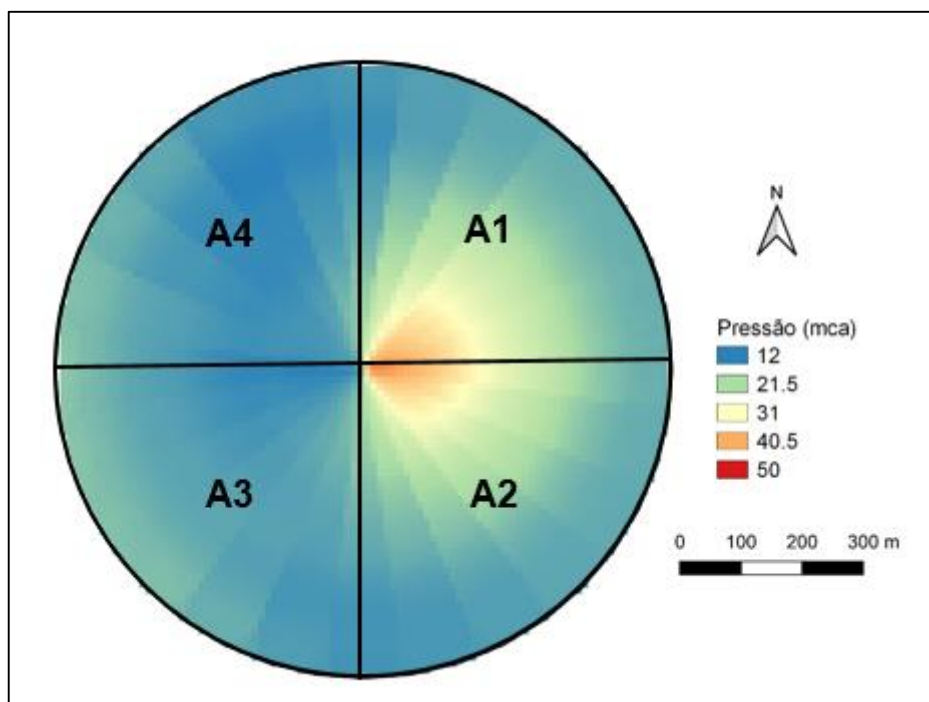


Figura 29 - Representação gráfica da pressão no pivô central com inversor de frequência



A economia de energia que a utilização do inversor de frequência pode gerar é de extrema importância econômica e de interesse individual para o irrigante. Contudo, deve-se analisar também que um menor consumo de energia apresenta uma questão ambiental, uma vez que acarreta em economia nos meios de geração de energia. Sendo assim, é ambientalmente correto evitar esse desperdício diminuindo a dissipação de pressão nos sistemas de irrigação, além de ser economicamente interessante ao produtor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a realização desse trabalho dependia-se de um pivô central que tivesse um inversor de frequência instalado no sistema motobomba. Na busca por esse pivô central, verificou-se que grande parte dos produtores desconheciam essa tecnologia.

Ao entrar em contato com as empresas que desenvolvem os projetos de pivôs central, identificou-se uma dificuldade de como realizar o projeto do pivô, entender como seria seu funcionamento e, assim, realizar a correta programação do inversor de frequência. Além disso, ao instalar o sistema de irrigação por pivô central no campo, as empresas esbarravam no problema da comunicação entre o inversor de frequência, instalado na casa de bomba, e o comunicador presente na linha lateral.

Em conversa com projetistas de diferentes empresas, esse tem sido um dos desafios que tem enfrentado para a expansão dessa tecnologia. Outro desafio é a questão da viabilidade econômica, uma vez que um sistema pivô central com inversor de frequência apresenta um valor maior de mercado.

Sendo assim, o software desenvolvido nesse trabalho pode colaborar tanto na questão de confecção dos projetos quanto na questão econômica, uma vez que apresenta uma visão detalhada da variação de pressão ao longo do caminhamento do pivô central e também uma análise econômica baseada em índices financeiros. Dessa forma, verifica-se a necessidade de extensão desse software para além das portas da Universidade.

Esse trabalho mostrou a necessidade de mais pesquisa relacionada ao uso do inversor de frequência no sistema pivô central para melhorias operacionais e estruturais.

7 CONCLUSÃO

A ferramenta computacional desenvolvida para avaliar a viabilidade econômica da utilização do inversor de frequência no sistema pivô central se mostrou adequado e eficiente para realizar essa análise.

O número de horas trabalhadas, a tarifa de energia, a declividade da área e o valor do inversor de frequência são variáveis que alteram a viabilidade econômica da utilização do inversor de frequência.

O inversor de frequência, por meio do ajuste da velocidade de rotação do motor, diminuiu a média da pressão no sistema, diminuindo a potência e, conseqüentemente, o consumo e custo de energia elétrica do sistema.

A geoestatística utilizada mostrou estatisticamente o comportamento da pressão nos emissores sem a atuação do inversor de frequência e com o inversor, comprovando que há uma diminuição da pressão nos emissores com a atuação do inversor de frequência.

REFERÊNCIAS

- ALMASRAF, S.; JURY, J.; MILLER, S. **Field Evaluation of Center Pivot Sprinkler Irrigation Systems in Michigan**. Department of Biosystem and Agricultural Engineering Michigan State University. 2011.
- ALVES, A. J. **Inversor de Frequência – Uma ferramenta para o acionamento e racionalização do consumo de energia elétrica em sistemas de irrigação a pivô central**. 2001. Coordenação Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás.
- ALVES, J.A., et al. Verificações das relações de Rateaux pelo emprego de um inversor de frequência. In: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v.6, n.3, p.523-525, 2002.
- ARAÚJO, J.A.B. **Aplicação de inversor de frequência para economia de energia elétrica, em sistema de irrigação por aspersão**. 2003. 62 p. Tese (Doutorado em Agronomia - Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, SP, 2003.
- ARCO-VERDE, M. F.; AMARO, G. C. **Análise financeira de sistemas produtivos integrados. Embrapa Florestas**. Colombo, PR. 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1014392/1/Doc.274ArcoVerde.pdf>. Acesso em: out. 2019.
- ASAE – American Society of Agricultural Engineers. Field Evaluation of microirrigation systems: ASAE EP 458. **ASAE Standards**. 1997. 44 ed. St. Joseph, p. 908-914, 1997.
- AZEVEDO NETTO, JOSÉ M. D. et al. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Blucher, 1998. 669 p.
- AZEVEDO, E. B. **Viabilidade do uso do inversor de frequência em sistema de irrigação do tipo pivô central**. 2003. Dissertação (Mestrado em engenharia Agrícola: Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2003.
- BARBIERI, J. C.; ÁLVARES A. C. T.; MACHLINE, C. **Taxa Interna de Retorno: controvérsias e interpretações**. In: GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas – Ano 2, vol. 5, 2007, p. 131-142.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MONTAVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. 2016 (Relatório Síntese). Brasília – DF, 2016, 33 p. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/arquivos/ProjetoPivos.pdf>. Acesso em: jan. 2018.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Lei nº 11.196 de 21 de novembro de 2005**. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11196.htm#art121. Acesso em: março. 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Tarifas de energia elétrica**. Disponível em:

http://www.aneel.gov.br/home?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=%2F&_101_assetEntryId=14748150&_101_type=content&_101_groupId=654800&_101_urlTitle=tarifas&inheritRedirect=true. Acesso em: março. 2019.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo Agropecuário 2006**. Segunda Apuração: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Rio de Janeiro: L. Gonzaga, 2012. 774 p.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Estatísticas do Século XX. **Censo Agropecuário 2006**. Rio de Janeiro: IBGE, 577 p. 2009. Disponível em: <https://seculoxx.ibge.gov.br/>. Acesso em: janeiro. 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Circular Técnica 86: Métodos de irrigação e quimigação. 1. ed. Sete Lagoas – MG: MAPA, 2006. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPMS/19630/1/Circ_86.pdf. Acesso em: out. 2019.

BRASIL. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). **Manual de tarifação de energia elétrica**, 2011. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf. Acesso em: março 2019.

BRASIL. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. 272 p.

CAMPANA, S., OLIVEIRA FILHO, D., SOARES, A.A. *et al.* Inversores de frequência: uma alternativa para racionalização do uso da energia elétrica em sistemas de irrigação pivô central. In: **Encontro de energia no meio rural**, 3, 2003, Campinas. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200029&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 26 Jan. 2018.

CARVALHO, J. D. A.; OLIVEIRA, L. F. C. D. **Instalações de Bombeamento para Irrigação: Hidráulica e Consumo de Energia**. Lavras: UFLA, 2014. 429 p.

CARVALHO, J.A. **Hidráulica básica**. In: MIRANDA, J.H. de; PIRE, R.C. de M. Irrigação. Piracicaba: FUNEP, 2003. cap. 15, v.2, p. 1-106.

CENDES, F. **Proposta de Automação de Sistemas de Irrigação com Pivô Central Baseados em Microprocessadores**. 2004. Coordenação Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal de Goiás.

CLASSEN, L. P.; SOUZA, J. S. de; AMORIN, A. L. W.; CORRÊA, R. G. de F.. Simulação de Monte Carlo incorporada ao método de fluxo de caixa descontado para determinação de valuation. **Contabilometria - Brazilian Journal of Quantitative Methods Applied to Accounting**, Monte Carmelo, v. 6, n. 1, p. 39-56, jan.-jun./2019.

COLOMBO, Alberto. Pivô central. **Irrigação: Engenharia Agrícola Irrigação**. Editores: Jarbas Honório de Miranda, Regina Célia de Matos. Piracicaba: FUNEP. 2003. SBEA. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. Volume 2. pag. 209-258.

CORREIO BRAZILIENSE. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/economia/2019/04/08/internas_economia,748153/mercado-projeta-selic-mais-alta-em-maio-de-2020-mostra-focus-do-bc.shtml. Acesso em: nov. 2019.

DORFMAN, R. Análise econômica de projetos de irrigação e drenagem. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENERGIA PARA IRRIGAÇÃO, 8, 1988, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1988. p. 225-302.

FRIEDRICH, J. Fluxo de Caixa – sua importância e aplicação nas empresas. **Revista eletrônica de Contabilidade**. Santa Maria-RS, v. 2, n 2, jun-nov, 2005.

FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L. D. **Irrigação por aspersão**. Maringá: Eduem, 2011. 271 p.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística operacional**. Brasília: Ministério das Minas e Energia - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, 1988. 145 p.

HUIJBREGTS, C.J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: DAVIS, J.C.; McCULLAGH, M.J. (Ed.). **Display and analysis of spatial data**. New York: John Wiley, 1975. p.38-53.

ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford Univ. Press., 1989. 600 p.

KATO, T. Prediction of photovoltaic power generation output and network operation. In: FUNABASHI, T. **Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems**. Institute of Materials and Systems for Sustainability (IMaSS), Nagoya, Japan. 2016. p. 77-108. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03911-1>. Acesso em: out. 2019.

LANDIM, P.M.B. Sobre geoestatística e mapas. **Terræ Didática**. Rio Claro-SP, 2(1):19-33. 2006. Disponível em: https://www.fca.unesp.br/Home/Instituicao/Departamentos/CienciadoSolo/gepag/t_didatica_2006_v02n01_p019-033_landim.pdf. Acesso em: out. 2019.

LIMA, A. D. S. **Uso de inversor de frequência em sistema de irrigação do tipo pivô central e seu efeito na lâmina e uniformidade de distribuição de água**. 2009. 115 p. Tese (Doutorado em Agronomia: Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Unesp, Botucatu, 2009.

LIMA, A. D. S.; ZOCOLER, J. L.; MAGGI, M. F.; LIMA, H. K. Uso de inversor de frequência em sistema de irrigação do tipo pivô central e seu efeito na lâmina e uniformidade de distribuição de água. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v.2, n.1, Jan.- Abr. 2009.

LIMA, A. D. S.; ZOCOLER, J. L.; JADOSKI, S. O.; MAGGI, M. F.; AMARANTE, R. R. Desempenho operacional no bombeamento em pivô central utilizando inversor de frequência. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, Guarapuava-PR, v.8, n.2, p.51-61, 2015.

LIMA, L. A. **Pivô central: história e características**. Disponível em: <http://irrigacao.blogspot.com/2010/02/pivo-central-historia-e-caracteristicas.html>
Acesso em: abr. 2019.

LIMA, S. C. R. V.; FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A.; TEIXEIRA, M. B.; CARVALHO, M. A. R.; GOMES, A. W. A. Comportamento de reguladores de pressão para pivô central após modificação interna. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v.1, n.1, p.9–14, 2007. Disponível em: <http://www.inovagri.com.br/revista/index.php/rbai/article/view/6/1>. Acesso em: out. 2019.

LUDWIG, R.; **Desenvolvimento de Software para avaliação dos desempenhos hidráulicos e econômicos de pivôs centrais**. 2015. 73 p. Tese (Doutorado em Agronomia: Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Unesp, Botucatu-SP, 2015.

LUDWIG, R.; NETO, G. D. S.; PUTTI, F. F.; SAAD, J. C. C. Software for evaluation of hydraulic and economic performances of center pivots. **IRRIGA**, v. 23, n. 1, p. 17-42, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2018v23n1p17>.

MARCUZZO, F.F.N.; WENDLAND, E. Otimização de rede de irrigação de microaspersão usando algoritmos genéticos sob diferentes declividades e tarifação de água e energia elétrica. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, v.18, n. 1, p. 50-62, 2010.

MEDEIROS, A. M. de M. **Otimização de sistema de irrigação por aspersão pivô central**. 2010. 131 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) - Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MEDEIROS, A. M.M.; NERYS, J. W. L.; OLIVEIRA, L. F. C.; MARRAS, E. G.; OLIVEIRA, L. F. C. Potencial de economia de energia elétrica em sistemas de irrigação tipo pivô central. 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242130155_POTENCIAL_DE_ECONOMIA_DE_ENERGIA_ELETRICA_EM_SISTEMAS_DE_IRRIGACAO_TIPO_PIVO_CENTRAL. Acesso em: jan. 2019.

MESQUITA, A. L. A.; SILVA, L. J. S.; ABRAHIM-JÚNIOR, O.; PEREIRA, J. A. R.; SILVA, A. C. P. Aspectos importantes na utilização de bombas centrífugas em velocidade variável para a redução do consumo de energia. VI SEREA - **Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água**, João

Pessoa. 2006. Disponível em:

[http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoA%20\(7\).pdf](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoA%20(7).pdf). Acesso em: jan. 2018.

MORAES, M. J. D. et al. Gerenciamento do lado da demanda no bombeamento de água para perímetro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 875-882. 2011.

MORAES, M. J., OLIVEIRA FILHO, D., MANTOVANI, E. C., MONTEIRO, P. M. B., MENDES, A. L. C., DAMIÃO, J. C. Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n.6, p. 1075-1088, 2014.

OLIVEIRA, J. S.; ZOCOLER, J. L. Custos da irrigação e receita líquida do feijoeiro em um sistema pivô central sob variação do comprimento da tubulação de recalque e desnível topográfico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal/SP, v.33, n.1, p.121-128, jan./fev. 2013. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/27837/S0100-69162013000100013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: junho. 2019.

PELÁ, G. M. **Mapeamento de atributos do solo para o planejamento da irrigação sob pivô central**. 2007. 118 p. Tese (Doutorado em Agronomia: Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Unesp, Botucatu-SP, 2007.

PEREIRA, P. H. C.; COLOMBO, A.; RABELO, G. F.; SOARES, D. A. O uso da engenharia de automação na redução do consumo de energia elétrica em um sistema de irrigação por pivô central. **XIII Safety, Health and Environment World Congress**. Porto – PT. July 07 – 10, 2013. DOI: 10.14684/SHEWC.13.2013.163-168.

PEREIRA, W. A.; ALMEIDA, L. S. **Método manual para cálculo da taxa interna de retorno**. 2010. Disponível em:

<http://www.home.ufam.edu.br/andersonlfc/Macrol/MetodoManualTIR.pdf>. Acesso em: set. 2019.

PICCOLI, J H. **Avaliação da viabilidade da instalação de sistema de pivô central na região de campos novos (SC)**. 2011. 37 p. Relatório de estágio de conclusão de curso (Título de Engenheiro Agrônomo) - Centro de Ciências Agrárias,

Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/120958/294723.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: maio. 2019.

REIS, R.P. **Introdução a teoria econômica**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 107 p.

RIBEIRO, M. C. **Eficientização e gerenciamento do uso de energia elétrica em perímetros irrigados**. 2008. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 2008.

SANGUINO, A. C. Custos de implantação e rentabilidade econômica de povoamentos florestais com teca no estado do Pará. **Revista Ciências Agrárias**, Belém-PA, n. 52, p. 61-78, jul./dez. 2009.

SILVA, R. M. **Coeficiente de descarga em emissores de pivô central**. 2011. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciências: Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2011.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, Orlando, v. 38, p. 45-94. 1985.

VALIN, M.I.; CAMEIRA, M.R.; TEODORO, P.R.; PEREIRA, L. S.; DEPIVOT: A model for center-pivot design and evaluation. **Computers and Electronics in Agriculture**. 2012. p.159-170.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. eds. **Tópicos em Ciência do Solo**. Sociedade Bras. de Ciênc. do Solo, 2000, p. 1-54.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística conceitos e aplicações**. 2015 Edição digital. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=QUsrBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP5&dq=geoestat%C3%ADstica+e+variograma&ots=grkHPvz3mP&sig=rEaPUNFC_ClqgYRjPqkiHqBeZZo#v=onepage&q=geoestat%C3%ADstica%20e%20variograma&f=true. Acesso em: out. 2019.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência)- Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.