

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

VIABILIDADE DO USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA O
CONTROLE DE SISTEMAS DE MICROIRRIGAÇÃO

DIEGO JOSÉ DE SOUSA PEREIRA

2016



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL

VIABILIDADE DO USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA O
CONTROLE DE SISTEMAS DE MICROIRRIGAÇÃO

DIEGO JOSÉ DE SOUSA PEREIRA

Sob orientação do Professor

Marinaldo Ferreira Pinto

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
obtenção do título de Engenheiro
Agrícola e Ambiental da Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro.

Seropédica, RJ

Junho, 2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL**

DIEGO JOSÉ DE SOUSA PEREIRA

Trabalho de conclusão de curso submetido como requisito parcial para
obtenção de grau de **Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental**

Aprovada em 29/06/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof ° Dr. Marinaldo Ferreira Pinto

Prof ° Dr. Daniel Fonseca de Carvalho

Prof ° Dr. Conan Ayade Salvador

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pela fé, saúde e oportunidades oferecidas.

A AGEVAP pelo financiamento desta pesquisa por meio do auxílio financeiro 025/2016.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela oportunidade da realização do curso de Engenharia Agrícola e Ambiental e momentos inesquecíveis.

Aos meus pais e minha irmã, pela dedicação e apoio durante minha vida, proporcionando o suporte necessário para completar mais essa etapa.

A minha família e amigos que já faziam presentes antes da UFRRJ, que devido a distância não pude estar presente em alguns momentos especiais.

Ao meu orientador, Marinaldo Ferreira Pinto pela amizade, dedicação e instruções durante a realização do trabalho.

Ao técnico Senhor Genaro pelo apoio e serviço prestado para a realização do trabalho.

Aos professores da UFRRJ por contribuírem para minha formação acadêmica e profissional.

Aos colegas que a UFRRJ me deu, pelos momentos de estudos, risadas, conquistas e crescimento pessoal, em especial Camila Guimarães, Camila Madureira, Juliana Oliveira, Luana Mendes, Lizandra Oliveira e Nathan Oliveira. Sem vocês seria muito mais difícil!

Aos amigos do condomínio, Alan, Edu, Lucas pela amizade e companheirismo durante essa jornada.

Aos demais amigos, que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

Muito obrigado!

RESUMO

A irrigação é indispensável para o desenvolvimento das culturas em regiões com escassez ou distribuição pluviométrica irregular, possibilitando altas produtividades, visto que essa técnica complementa a demanda de água à cultura. No entanto, ao utilizar-se de recursos hídricos e energia elétrica, surge uma preocupação com a eficiência da irrigação. Adicionalmente, a viabilidade econômica é um fator de extrema importância. Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade econômica do uso do inversor de frequência para o controle da microirrigação. A metodologia adotada consistiu em simulações da área a ser irrigada, para diferentes declividades e considerando o uso ou não do inversor de frequência. Foram obtidos dados de potência elétrica consumida, potência hidráulica e realizada a análise econômica, considerando as tarifas elétricas (convencional e horo-sazonal). Os resultados demonstram grande potencial de economia de energia elétrica com o uso do inversor de frequência. Para o caso da área simulada, pode-se concluir por meio de análise econômica que o uso do inversor de frequência apresentou-se como a melhor alternativa comparado com método dissipativo.

Palavras-chave: sistema de bombeamento, eficiência energética, análise econômica.

ABSTRACT

Irrigation is essential for the development of crops in regions with scarce or irregular rainfall distribution, enabling high productivity, since this technique complements the demand for water culture. However, to be used for water and electricity resources, comes a concern with the efficiency of irrigation. In addition, the economic viability is a factor of utmost importance. This work aims to analyze the economic viability of the use of the variable frequency drive to control the microirrigation. The methodology consisted of simulations of the area to be irrigated, for different slopes and considering the use or not of the variable frequency drive, consumed electric power data were obtained, hydraulic power and conducted economic analysis, considering the electricity rates (conventional and horo-seasonal). The results show great potential for energy savings with the use of the frequency inverter. In the case of the simulated area, it was conclude by economic analysis use of the variable frequency drive presented itself as the best alternative compared to dissipative method.

Keywords: pumping system, energy efficiency, economic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. a) Motobomba e b) inversor de frequência. Fonte: DANCOR® e WEG®. ...	15
Figura 2. Regulador de pressão associado aos bocais emissores.	16
Figura 3. Medidor de vazão eletromagnético.	16
Figura 4. a) Manômetro digital e b) Multímetro digital.	17
Figura 5. Bancada de ensaio para as simulações da área.	17
Figura 6. Esquema da área a ser irrigada, com dimensões expressas em metros.	19
Figura 7. Pontos de medições com uso do inversor de frequência.	24
Figura 8. Potência consumida com o uso do inversor de frequência: a) em nível; b) 5% e c) 10% de declividade.	29
Figura 9. Potência consumida pelo método dissipativo.	30
Figura 10. Potência consumida com e sem o uso do inversor de frequência: a) em nível; b) 5% e c) 10% de declividade.	31
Figura 11. Porcentagem de economia com o uso do inversor de frequência.	32
Figura 12. Potência hidráulica com e sem o uso do inversor de frequência para as declividades de 0, 5 e 10%.	34
Figura 13. Rendimento do conjunto motobomba com e sem o uso do inversor de frequência: a) em nível; b) 5% e c) 10% de declividade.	35
Figura 14. Consumo anual total com e sem o uso do inversor de frequência a) tarifa convencional e b) horo-sazonal.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de pressão em cada subunidade para as declividades de 0, 5 e 10%. 23	
Tabela 2. Valores da tarifa convencional e tarifas horo-sazonal..... 25	
Tabela 3. Custo de aquisição das válvulas hidráulicas e inversor de frequência para cada método analisado. 25	
Tabela 4. Consumo de potência para as diferentes condições de declividade com e sem a uso do inversor de frequência..... 36	
Tabela 5. Estimativa de economia do custo total anual com e sem o uso do inversor de frequência, considerando as tarifas convencional e horo-sazonal. 38	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. Microirrigação	8
2.2. Bombas hidráulicas.....	10
2.3. Motores Elétricos	11
2.4. Inversores de frequência	13
2.5. Estrutura tarifária no uso de energia elétrica	14
3. METODOLOGIA	15
3.1. Caracterização do experimento.....	15
3.2. Definição das características da área simulada e do projeto hidráulico.....	18
3.3. Dimensionamento das tubulações.....	19
3.4. Cálculo da pressão na entrada das subunidades e no conjunto motobomba....	21
3.5. Determinação da potência consumida	23
3.6. Análise Econômica	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1. Consumo de potência elétrica	28
4.2. Potência hidráulica.....	33
4.3. Rendimento do motor	34
4.4. Análise Econômica	36
5. CONCLUSÕES.....	40
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. INTRODUÇÃO

O uso de tecnologias que visam o desenvolvimento da agricultura é indispensável para atender a atual e futura demanda de alimentos a nível mundial. A utilização da irrigação é uma necessidade para aumentar a produtividade das culturas em regiões onde há escassez de água ou irregularidade de chuva.

No Brasil, a área irrigada compreendeu 4,45 milhões de hectares ou 7,4% da área total em lavouras temporárias e permanentes. Sendo 24,0% dessa área irrigada por sistemas de inundação, 5,7% por sulcos, 18,0% sob pivô central, 35,0% em outros métodos de aspersão, 7,3% com métodos localizados e 8,3% com outros métodos (IBGE, 2006).

Diante da significativa área irrigada no país por meio dos métodos de aspersão e de irrigação localizada (2,68 milhões de hectares), onde é indispensável o uso do conjunto motobomba, a preocupação com a eficiência energética fica evidente, visto que exigem elevada potência de energia para realizar o bombeamento hidráulico (PEREIRA et al., 2013; PERRONI et al., 2015).

Os custos com energia elétrica são evidentes nos sistemas de aspersão convencional e pivô central, em que o mau dimensionamento do sistema pode acarretar em aumento de até 25% dos custos de produção, reduzindo a renda do produtor. Esse aumento é proveniente de procedimentos operacionais mal executados, lâmina aplicada excedente ao projeto e, baixa eficiência dos equipamentos elétricos e hidráulicos (MORAES et al., 2014).

Os sistemas de irrigação são projetados para trabalhar na condição de máxima vazão e altura manométrica que atendem à todas as irrigações, ou subunidades. No entanto, quando o sistema trabalha em condições mais favoráveis de relevo ou de vazão, é necessário se ajustar o ponto de funcionamento da motobomba, a fim de evitar perdas de energia consideráveis quando se usa métodos dissipativos (ARAÚJO, 2003).

No caso da microirrigação que se adapta às mais diversas condições topográficas e formato da área a ser irrigada, podem ocorrer diferenças significativas de demanda de potência entre as subunidades de irrigação. Essas diferenças são decorrentes de fatores como declividade e/ou comprimento de linha lateral diferente e altura geométrica, proporcionando pressão no início de linha de derivação também diferenciada. Para se ajustar a pressão e vazão nas subunidades, de maneira que o projeto atenda toda área a ser irrigada, faz-se o uso de reguladores de pressão e, em

alguns casos de emissores autocompensantes. No entanto, o uso desses dispositivos ocasiona dissipação da energia hidráulica, o que reflete na dissipação de energia elétrica.

O uso do inversor de frequência pode minimizar a dissipação da energia hidráulica, pois o ponto de operação do conjunto motobomba irá se ajustar ao ponto de projeto de cada subunidade, reduzindo de forma significativa o consumo de energia elétrica, aumentando a eficiência global do sistema. Ao controlar a frequência da rede de elétrica de alimentação do motor, a rotação do motor é controlada e, conseqüentemente a vazão e a altura manométrica da bomba serão adequadas à demanda no momento (HANSON et al., 1996; ARAÚJO et al., 2004). Muitos trabalhos relatam o uso do inversor de frequência em sistemas de irrigação por pivô central, sendo que os sistemas de microirrigação tem características desejáveis para aplicação dessa tecnologia.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a viabilidade econômica da utilização de um inversor de frequência para o acionamento do conjunto motobomba em sistemas de microirrigação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Microirrigação

A microirrigação ou irrigação localizada consiste na aplicação de água em pequeno volume, porém com alta frequência, na fração do solo onde há concentração das raízes, sendo em pontos discretos ou em faixa contínua, com turno de rega de 1 a 4 dias, mantendo assim a umidade do solo próxima à capacidade de campo (BERNARDO, 1995; FRIZZONE et al., 2012).

O sistema da microirrigação é composto basicamente por: estação de bombeamento, cabeçal de controle, linha principal, válvulas, linhas de derivação, linha lateral e emissores. No cabeçal de controle estão presentes os sistemas de filtragem da água e de injeção de fertilizantes, as válvulas de controle de pressão e medidores de vazão. A partir desse ponto, a água é derivada para a linha principal que é responsável por conduzir a água para as linhas secundárias. Em cada subunidade de irrigação há um cavalete com as válvulas de controle (responsável por controlar a pressão e o volume de

água na entrada da linha de derivação), de onde a água segue para as linhas de derivação e linhas laterais, até ser aplicada pelos emissores.

Os emissores são os principais componentes do sistema de microirrigação. Estes são os dispositivos utilizados para a dissipação de pressão, afim de ocasionar vazão pequena e uniforme. Devido às diferentes condições de projetos, foram desenvolvidos inúmeros tipos de emissores com características que permitem agrupá-los em quatro grupos: fitas gotejadoras, tubos gotejadores ou gotejadores, microaspersores e bubblers (FRIZZONE et al., 2012). Para selecionar o tipo de emissor a ser utilizado no projeto, deve-se atentar a alguns fatores, tais como: tipo de solo, vazão do emissor, sensibilidade ao entupimento, estabilidade da relação vazão-pressão.

Quando bem projetado e manejado, a microirrigação apresenta vantagens sobre os demais sistemas. Dentre as vantagens pode-se relacionar:

- Maior eficiência no uso d'água - visto a aplicação de água é efetuada em apenas uma fração do solo e em menor quantidade, evitando a percolação e escoamento superficial.
- Fertirrigação e Quimigação - aumenta a eficiência de aplicação de agroquímicos, pois os nutrientes e defensivos são aplicados próximos da zona radicular.
- Maior eficiência no controle fitossanitário- por molhar somente a fração de interesse para o desenvolvimento da cultura, não irriga ervas daninhas e a parte aérea da cultura, facilitando o combate a doenças e pragas.

Por outro lado, as limitações do sistema são:

- Alto custo de investimento - apresenta custo inicial superior aos demais sistemas de irrigação, além de necessitar de maior custo de manutenção;
- Obstrução - pelo tamanho pequeno dos orifícios, os emissores podem obstruir com facilidade. Com isso, a água deve apresentar boa qualidade dentre os fatores físicos, químicos e biológicos; e
- Limitação do desenvolvimento do sistema radicular - com a manutenção do bulbo ou faixa molhada ao redor da planta, há a concentração das raízes numa região mais superficial do solo, o que pode diminuir a estabilidade

das árvores, podendo ocorrer o tombamento em regiões de ventos mais intensos.

2.2. Bombas hidráulicas

As bombas hidráulicas são máquinas que transformam a energia mecânica em energia hidráulica, transferindo ao fluido um acréscimo de energia sob forma de pressão, energia cinética ou ambas (CARVALHO, 2014). Existem diversas fontes de energia para o acionamento das bombas hidráulicas empregada em sistemas de irrigação, dentre as quais, a elétrica e o diesel são as mais utilizadas no Brasil. Segundo Monteiro et al. (2007), os motores elétricos apresentam maior viabilidade econômica quando comparados aos motores a diesel, quando a potência instalada é alta e, quando a distância de acesso a rede elétrica é curta.

As bombas hidráulicas são classificadas como volumétricas ou turbobombas, sendo que as bombas tipo volumétricas transmitem energia ao fluido em forma de pressão, por meio de um órgão propulsor. Já as turbobombas transferem energia para o fluido em forma de energia cinética, por meio da rotação do rotor. Essas bombas podem ser classificadas quanto a trajetória do fluido em radiais ou centrífugas, axiais e mistas (diagonais)..

As bombas centrífugas são as mais empregadas no campo da irrigação, sendo que apresentam a característica de reduzir a altura manométrica com o aumento da vazão. Essa variação pode ser aproveitada para o ajuste do ponto operação de sistema de bombeamento ao ponto de projeto. No caso de sistemas de irrigação, principalmente sistemas móveis, frequentemente o ponto de projeto é diferenciado entre as irrigações (ALVES et al., 2002), de tal modo que para cada irrigação é necessário se fazer esse ajuste.

Afim de caracterizar uma bomba hidráulica, são elaborados gráficos que representem os diversos parâmetros durante o funcionamento. Essa representação gráfica, é chamada de curva característica (PORTO, 2006). Geralmente essas curvas características apresentam a variação altura manométrica em função da vazão, potência em função da vazão, e do rendimento em função da vazão.

Ao modificar a rotação do rotor, as condições iniciais de vazão e altura manométrica (Q_i e H_i), serão alteradas para novos valores, conforme as equações (1) e (2):

$$\frac{Q_i}{Q_p} = \frac{n_i}{n_p} \quad (1)$$

$$\frac{H_i}{H_p} = \left(\frac{n_i}{n_p}\right)^2 \quad (2)$$

em que:

Q_i - vazão da motobomba para a rotação n_i ;

Q_p - vazão de projeto;

N_i - rotação no tempo nominal, rpm;

n_p - rotação necessária para o ponto de projeto, rpm;

H_i - altura manométrica para a rotação n_i , metros; e,

H_p - altura manométrica de projeto, metros.

A potência necessária do motor para atender a demanda de operação da bomba é representada pela equação (3):

$$Pot_m = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{\eta} \quad (3)$$

em que:

Pot_m - potência absorvida pela bomba, W;

γ - peso específico da água, $N \cdot m^{-3}$.

Q - vazão, $m^3 \cdot s^{-1}$;

H_{man} - altura manométrica, m; e,

η - rendimento da bomba, adimensional.

2.3. Motores Elétricos

Os motores elétricos são máquinas que transformam a energia elétrica em energia mecânica. Na irrigação, os motores mais utilizados são os trifásicos assíncronos. Esses motores apresentam uma pequena variação em sua velocidade de rotação, devido às variações de carga que estão sendo aplicadas no seu eixo. São mais utilizados do que os síncronos devido a sua robustez, baixo custo e simplicidade (WEG, 2015).

Durante o acionamento dos motores elétricos a corrente elétrica exigida aumenta, podendo ocasionar uma queda de tensão e como consequência, afetar demais cargas necessárias. Afim de evitar possíveis danos, são utilizados alguns dispositivos para auxiliar o acionamento do motor. Entre eles pode-se destacar: chaves de partida estrela-triângulo, conversores de corrente contínua, inversores de frequência e reguladores de tensão (SCHNEIDER, 2003).

Para analisar o rendimento de um motor elétrico assíncrono, deve-se primeiramente analisar o ângulo de defasagem existente entre a corrente e a tensão elétrica. Como consequência, são geradas as potências aparente, ativa e reativa no motor. O fator de potência, expresso na equação (4), é um indicativo da relação entre a corrente e a tensão elétrica.

$$\text{fator de potência} = \frac{P}{S} = \cos(\alpha) \quad (4)$$

em que:

P- potência ativa, kW;

S- potência aparente, kVA; e,

α - ângulo de defasagem entre a corrente e tensão elétrica.

Esse fator expressa a relação entre energia total que foi transformada em trabalho e a energia utilizada para a magnetização do circuito. O fator de potência demonstra através de seu valor (0 a 1), a eficiência dos sistemas elétricos. Valores próximos de 1, indicam um uso de energia mais eficiente.

Existem inúmeros fatores que afetam o rendimento dos motores. Entre eles estão a seleção incorreta, desequilíbrio entre fases, tensão de alimentação em relação à nominal e baixo fator de potência (CAMPANA et al., 2000).

O rendimento do motor elétrico é expresso pela relação entre a potência útil e a potência ativa, expressa na equação (5):

$$n_m = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{ativa}}} \quad (5)$$

em que:

n_m - rendimento do motor, adimensional;

$P_{\text{útil}}$ - potência disponível no eixo do motor, W; e.

P_{ativa} - energia transformada em trabalho, W.

Nos sistemas de bombeamento para irrigação, se determina a potência de acionamento do sistema, levando- se em consideração o rendimento do motor. Assim, a potência demandada pode ser obtida pela da equação (6):

$$Pot = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{\eta_b \cdot \eta_m} \quad (6)$$

em que:

Pot - potência absorvida pelo conjunto motobomba, W;

γ - peso específico da água, $N.m^{-3}$.

Q - vazão, $m^3.s^{-1}$

H_{man} - altura manométrica, m;

η_b - rendimento da bomba, em decimal; e,

η_m - rendimento do motor, em decimal.

2.4. Inversores de frequência

Os inversores de frequência são equipamentos que permitem o controle de velocidade de rotação e, como consequência o torque de motores elétricos. Ao regular a frequência de rede elétrica que alimenta o motor, o inversor de frequência garante que a potência de trabalho do motor seja em torno da potência requerida pelo sistema, aumentando a eficiência energética (OLIVEIRA FILHO et al., 2003).

O uso do inversor de frequência proporciona o deslocamento da curva característica da bomba fazendo com que o ponto de operação seja coincidente com ponto de projeto, ou seja, ajusta-a para a demanda de vazão e altura manométrica exigida para determinada subunidade de irrigação ou uma posição qualquer da área irrigada, promovendo a racionalização de energia (MORENO et al., 2009)

Os sistemas de bombeamento convencionais são operados de acordo com o controle de vazão, através da regulagem por meio de registro/válvula de gaveta ou válvulas reguladoras de pressão até atingir o ponto de projeto. Ao realizar esse procedimento, há um desperdício de energia, pois o motor estará fornecendo potência maior do que a necessária.

Comparado aos métodos hidráulicos de controle de vazão e velocidade dos motores elétricos (métodos dissipativos), os inversores de frequência podem resultar em economia cerca de três vezes superior aos demais métodos (CARVALHO, 2014). Adicionalmente, além do controle de velocidade de um motor, o uso do inversor de frequência traz outros benefícios, tais como: correção do fator de potência, adequação de carga, partidas suaves, maior flexibilidade de operação, redução de perdas nas válvulas, melhoria e conforto nas condições operacionais (MORAES et al., 2014).

O uso de inversores de frequência para o acionamento de motobombas para irrigação vem sendo difundido nos últimos anos, principalmente em pivô central, sendo que segundo Medeiros (2005) a declividade do terreno é o principal fator que justifica a sua utilização. Quanto maior o desnível maior será a economia de energia elétrica.

2.5. Estrutura tarifária no uso de energia elétrica

A divisão dos consumidores de energia elétrica é realizada de acordo com a finalidade da unidade consumidora (residencial, indústria e demais setores) associada à tensão de atendimento ao consumidor, podendo ser classificada como alta, média ou baixa (FUGIMOTO, 2010).

Para os consumidores de média e baixa tensão, as tarifas são cobradas pelo consumo e pela máxima potência utilizada (demanda). Assim as tarifas podem ser classificadas em:

Convencional- A aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência, independem das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.

Horo-sazonal- Esta estrutura tarifária se caracteriza pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, conforme especificação a seguir:

- Tarifa Azul: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia;

- Tarifa Verde: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de uma única tarifa de demanda de potência.

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização do experimento

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica e Irrigação e no Laboratório de Automação e Controle em Sistemas Agrícolas situado no Departamento de Engenharia, do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), campus Seropédica- RJ.

Foram realizadas simulações de pressão na entrada de subunidades de microirrigação, considerando diferentes declividades (0, 5 e 10%) na direção do maior comprimento, e em nível, na direção do menor comprimento e duas formas de regulagem da pressão no início da linha de derivação. Os métodos de regulagem de pressão considerados foram o com uso de válvulas (método dissipativo) e com o uso do inversor de frequência (método não dissipativo).

Para os ensaios, foi montada uma bancada experimental, composta de uma motobomba (DANCOR, Série CAM, Padrão 630, JM, 5CV - Figura 1a), inversor de frequência (WEG, CFW 10 – Figura 1b), reguladores de pressão, manômetros, válvulas, medidor de vazão eletromagnético e emissores para proporcionar a vazão da subunidade.

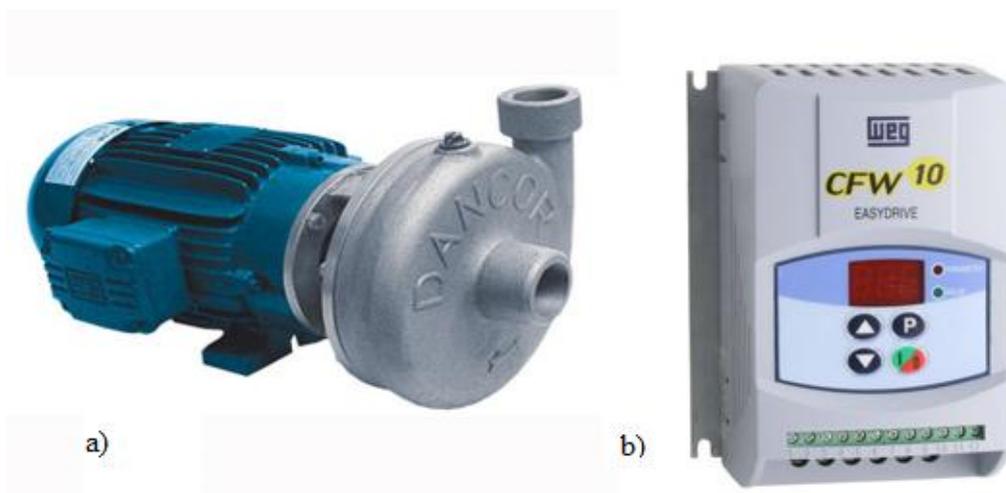


Figura 1. a) Motobomba e b) inversor de frequência. Fonte: DANCOR® e WEG®.

Para se obter a vazão do projeto foram utilizados dois bocais para pivô central, com as seguintes características: diâmetro do bocal 9,2 mm, vazão $3,78 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e pressão de serviço 14 mca. Associado a esses bocais, os reguladores de pressão, eram responsáveis por garantir a faixa ideal de trabalho nos bocais (Figura 2). A vazão do sistema foi determinada por um medidor de vazão eletromagnético de fabricante Krohne Conaut, modelo OPTILUX KC 1000C/6 IFC 100C, com capacidade de medição de até $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Figura 3).



Figura 2. Regulador de pressão associado aos bocais emissores.



Figura 3. Medidor de vazão eletromagnético.

As pressões na saída do conjunto motobomba e no ponto correspondente ao início da linha de derivação foram mensuradas com o auxílio de manômetro digital (Figura 4a). Para a aquisição das variáveis elétricas (diferença de potencial e corrente) foi utilizado um multímetro digital, modelo Minipa ET-3110 (Figura 4b).



Figura 4. a) Manômetro digital e b) Multímetro digital.

O esquema da bancada de ensaio pode ser visualizado na Figura 5.

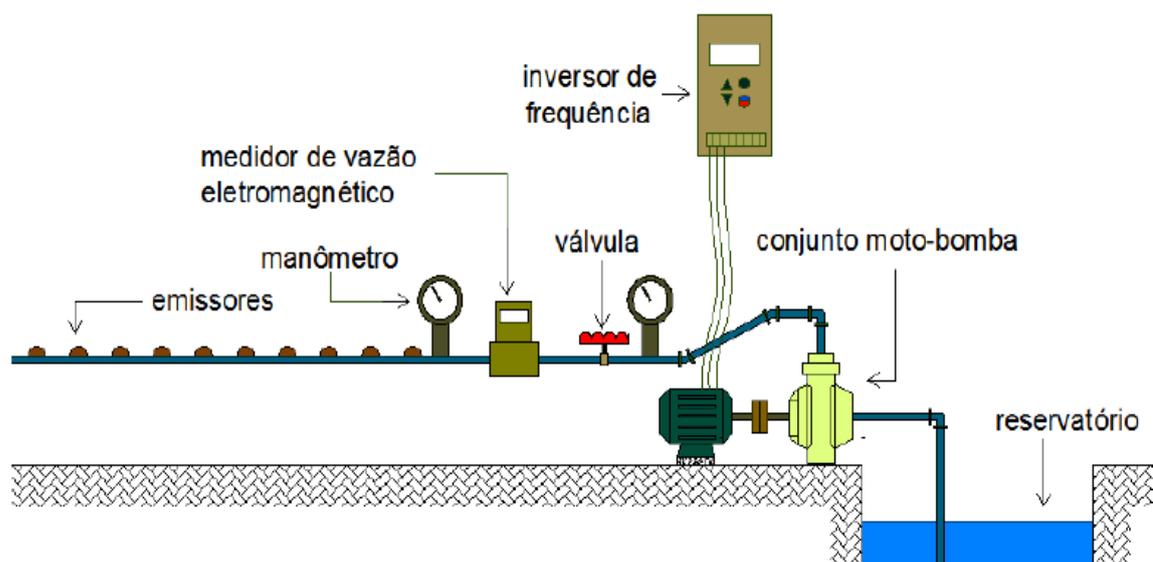


Figura 5. Bancada de ensaio para as simulações da área.

3.2. Definição das características da área simulada e do projeto hidráulico

Para se obter a máxima área a ser irrigada, foram considerados os seguintes fatores: vazão de maior rendimento do conjunto motobomba ($8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), lâmina de irrigação de $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (5 mm) e o tempo de irrigação disponível diariamente de 16 h. Assim, a área a ser irrigada foi de 2,3 hectares (23.000 m^2).

Dessa forma, foi considerado uma área com formato retangular (210m x 110m). O número de subunidades foi definido em função da vazão dos gotejadores ($4,6 \text{ L h}^{-1}$), do número de irrigações por dia e turno de rega de 1 dia, sendo a área então dividida em 14 subunidades de 55m X 30m (Figura 6).

De acordo com a divisão da área irrigada em 14 subunidades, foram estabelecidos os comprimentos da linha de derivação com 27 m e a linha principal com comprimento de 195 m, sendo o trecho em cada subunidade de 30 m. Nos casos em que as linhas de derivação e principal não estão em nível, são considerados os desníveis nas tubulações, ocasionando um aumento na demanda de pressão.

Por se localizarem na mesma cota do terreno, as subunidades 1 e 14 apresentam a mesma demanda de pressão no conjunto motobomba. O mesmo acontece nas subunidades 2 e 13, e assim por diante até o par de subunidades 7 e 8, sempre aumentando a demanda de pressão na motobomba, pois estão mais distantes do conjunto motobomba, e com isso há uma maior perda de carga, acrescido da declividade da área.

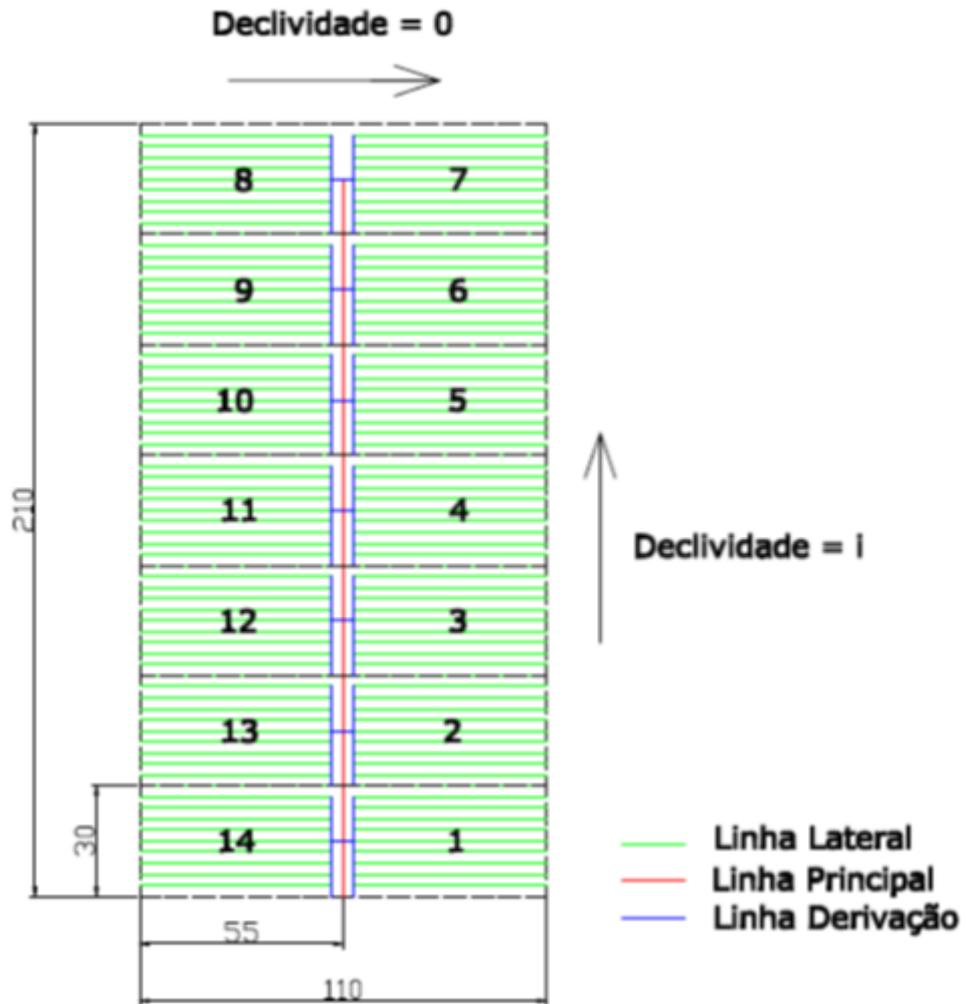


Figura 6. Esquema da área a ser irrigada, com dimensões expressas em metros.

3.3. Dimensionamento das tubulações

Para o dimensionamento da linha lateral foi selecionado o tubo gotejador Amanco, cujo diâmetro fornecido foi de 16 mm e vazão de $4,6 \text{ L h}^{-1}$, sendo os emissores espaçados em 0,4 m. A pressão de serviço estabelecida foi de 10 mca. O coeficiente (x) da relação vazão versus pressão foi determinado de acordo com os dados do fabricante, sendo o valor deste de 0,626. Diante dessas informações foi possível calcular a variação de pressão permitida para o sistema (equação 7):

$$\Delta P = \left((1 + q_{var})^{\frac{1}{x}} - 1 \right) \cdot P_s \quad (7)$$

em que:

ΔP – variação de pressão, mca;

q_{var} – variação de vazão permitida;

x – expoente da equação da vazão em função da pressão; e,

P_s – pressão de serviço do emissor, mca.

Assim a perda de carga permitida, o diâmetro das tubulações e a pressão no início das linhas lateral e de derivação foram calculados (Equações 8 e 12):

$$hf_{LL\limite} = 0,5 \cdot \Delta P \pm \Delta Z \quad (8)$$

$$hf = \frac{0,022458 \cdot \mu^{0,25} \cdot Q^{1,75} \cdot L \cdot F \cdot \lambda}{D^{4,75}} \quad (9)$$

$$P_{inLL} = P_s + \left(\frac{m+1}{m+2} \right) \cdot hf_{LL} + \frac{\Delta Z}{2} \quad (10)$$

$$hf_{LD\limite} = \Delta P - hf_{LL} \pm \Delta Z \quad (12)$$

em que:

$hf_{LL\limite}$ - perda de carga permitida na linha lateral, mca;

ΔP - variação de pressão, mca;

ΔZ - variação de altura, m;

μ - viscosidade da água, $m^2 s^{-1}$;

Q - vazão nas tubulações, $m^3 s^{-1}$;

L - comprimento das tubulações, m;

F - fator de perda de carga, adimensional;

λ - fator de perda de carga localizada, adimensional;

D - diâmetro das tubulações, m;

P_{inLL} - pressão no início da linha lateral, mca;

m - expoente da vazão da equação de perda de carga, adimensional;

$hf_{LD\limite}$ - perda de carga limite na linha de derivação, mca; e,

hf_{LD} - perda de carga na linha de derivação, mca.

Para o dimensionamento da tubulação da linha principal, foi utilizado o critério de velocidade, em que a velocidade deve estar entre 1,0 a 2,5 m.s⁻¹. Como a área a ser irrigada é de apenas uma subunidade por vez, a vazão da linha principal é a mesma da linha de derivação. Diante das características do projeto hidráulico foi calculado o diâmetro e perda de carga da linha principal (Equação 13 e 14):

$$v = \frac{Q_{LP}}{\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)} \quad (13)$$

$$hf_{LP} = \frac{0,022458 \cdot \mu^{0,25} \cdot Q_{LP}^{1,75} \cdot L_{LP} \cdot \lambda}{D^{4,75}} \quad (14)$$

em que:

v- velocidade de escoamento, m s⁻¹; e,

Q_{LP}- vazão da linha principal, m³ s⁻¹.

3.4. Cálculo da pressão na entrada das subunidades e no conjunto motobomba

A pressão na entrada de cada subunidade foi determinada de acordo com a perda de carga limite das linhas lateral e derivação e em função do desnível da linha de derivação (Equação 15):

$$P_{inLD} = P_{inLL} + hf_{LD} + \frac{\Delta Z}{2} \quad (15)$$

em que:

P_{inLD}- pressão no início da linha de derivação, mca;

P_{inLL}- pressão no início da linha lateral, mca;

hf_{LD}- perda de carga na linha de derivação, mca; e,

ΔZ- variação de altura, m.

Somando a perda de carga de carga ao longo da linha principal e a diferença de cota, se obteve a pressão necessária no conjunto motobomba para o correto funcionamento do sistema (Equação 16):

$$H_m = P_{inLD} + hf_{LP} + \Delta Z \quad (16)$$

em que:

H_m – altura manométrica, mca;

P_{inLD} – pressão no início da linha de derivação, mca;

hf_{LP} – perda de carga na linha principal, mca; e,

ΔZ – variação de altura, m.

Na simulação sem o uso do inversor de frequência, foi necessária a altura manométrica que atendesse a todas as subunidades, a qual foi calculada para as diferentes declividades. Ou seja, a altura manométrica considerada para atender toda a área correspondente à condição de maior demanda (subunidades 7 e 8). As pressões necessárias para atender toda a área em nível, com declividade de 5% e declividade de 10% foram, respectivamente, 28,49; 38,84 e 49,19 mca. No entanto, devido à perda de carga e as cotas topográficas do terreno diferentes, a pressão em cada subunidade foi ajustada pelo fechamento do registro de gaveta (método dissipativo de energia).

Para as simulações com o uso do inversor de frequência, o ajuste foi realizado controlando a frequência de alimentação do motor para cada subunidade. A simulação da perda de carga na linha principal foi efetuada por meio do fechamento parcial de um registro de gaveta instalado na tubulação de recalque. Na Tabela 1, estão apresentados os valores da pressão necessária em cada subunidade para as declividades de 0, 5 e 10%.

Tabela 1. Valores de pressão em cada subunidade para as declividades de 0, 5 e 10%.

Declividade	Subunidades	PiLD (mca)	hfLP (mca)	ΔZ LD (m)	ΔZ LP (m)	HMB (mca)
Em nível	1 e 14	20	0,592	0	0	20,59
	2 e 13	20	1,908	0	0	21,91
	3 e 12	20	3,225	0	0	23,22
	4 e 11	20	4,541	0	0	24,54
	5 e 10	20	5,857	0	0	25,86
	6 e 9	20	7,173	0	0	27,17
	7 e 8	20	8,489	0	0	28,49
5%	1 e 14	20	0,592	0,675	0,675	21,94
	2 e 13	20	1,908	0,675	2,175	24,76
	3 e 12	20	3,225	0,675	3,675	27,57
	4 e 11	20	4,541	0,675	5,175	30,39
	5 e 10	20	5,857	0,675	6,675	33,21
	6 e 9	20	7,173	0,675	8,175	36,02
	7 e 8	20	8,489	0,675	9,675	38,84
10%	1 e 14	20	0,592	1,35	1,35	23,29
	2 e 13	20	1,908	1,35	4,35	27,61
	3 e 12	20	3,225	1,35	7,35	31,92
	4 e 11	20	4,541	1,35	10,35	36,24
	5 e 10	20	5,857	1,35	13,35	40,56
	6 e 9	20	7,173	1,35	16,35	44,87
	7 e 8	20	8,489	1,35	19,35	49,19

PiLD- Pressão no início da linha de derivação; hfLP- Perda de carga na linha principal; ΔZ LD- variação de cota na linha de derivação; ΔZ LP- variação de cota na linha principal; HMB- altura manométrica na motobomba.

3.5. Determinação da potência consumida

Para a determinação da potência elétrica útil consumida pelo motor nos diferentes cenários, foram medidas a corrente e diferença de potencial, por meio de multímetro digital. No cenário com o uso do inversor de frequência foram realizadas as medições de corrente e tensão entre as fases na entrada e saída do inversor (Figura 7), para se calcular a potência consumida pelo inversor. A potência consumida pelo conjunto motobomba nesse cenário, foi calculada apenas nas fases na saída do inversor, pela equação 17, considerando o uso do inversor de frequência e o uso válvulas para regular o ponto de operação do sistema de bombeamento. O fator de potência considerado foi o indicado no motor (0,87).

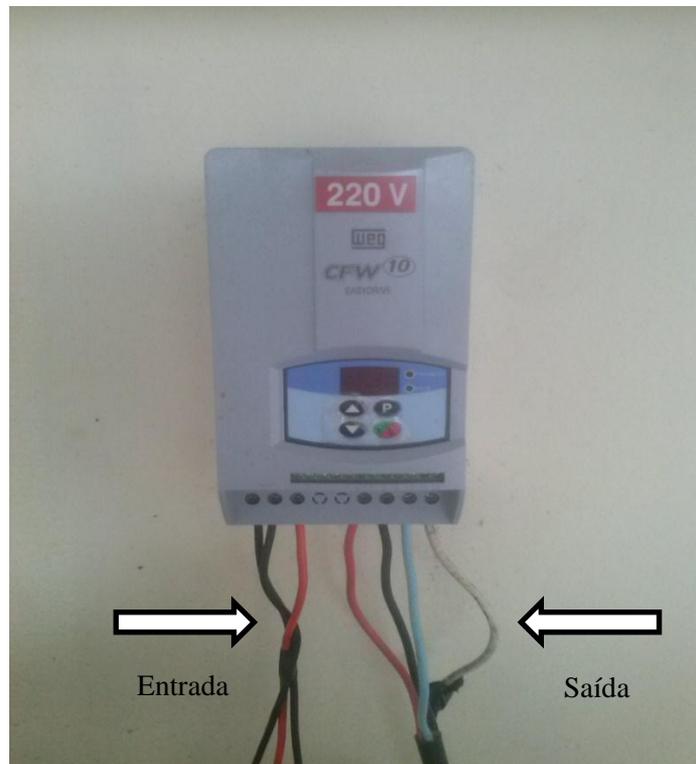


Figura 7. Pontos de medições com uso do inversor de frequência.

$$Pot = \sqrt{3}.V.I.\cos \alpha \quad (17)$$

em que:

Pot- Potência consumida, W;

V- diferença de potencial da rede elétrica, V;

I- corrente elétrica, A; e,

cos α - fator de potência.

Com a pressão e vazão obtidas nos ensaios para as diversas condições, além do rendimento da bomba, fornecido no catálogo do fabricante para a vazão do projeto hidráulico, a potência hidráulica foi determinada (Equação 6). Assim, com a potência hidráulica em cada situação de declividade, foi possível comparar o rendimento do conjunto motobomba nas situações com e sem a utilização do inversor de frequência (Equação 5).

3.6. Análise Econômica

De posse das potências ativa consumida para cada subunidade, considerando a regulação dissipativa (válvula) e não dissipativa (inversor), foram calculados os gastos com energia elétrica a partir das tarifas convencional e horo-sazonal do Estado do Rio de Janeiro.

Visto que a irrigação apresentava um turno de rega diário, e que cada subunidade tem um tempo de irrigação aproximado de 32 minutos, chegou-se em um tempo anual de irrigação de 2714 horas.

Na Tabela 2 são apresentados os valores da tarifa convencional e as tarifas horo-sazonais verde e azul, para a carga de instalação de 30 a 44 kV, de acordo com a Light (2016). Foram considerados apenas a demanda de potência e consumo fora do horário de ponta, visto que o tempo de irrigação disponível, já desconsidera o horário de ponta.

Tabela 2. Valores da tarifa convencional e tarifas horo-sazonal da concessionária Light.

Tarifa	Nível de Tensão	Demanda R\$.kW ⁻¹	Consumo R\$.MWh ⁻¹
Convencional	A3a (30 a 44kV)	29,17	382,11
Horo-sazonal	A3a (30 a 44kV)	12,35	370,23

Fonte: Adaptado LIGHT.

Além disso, foram avaliados o custo de investimento entre as alternativas de regulação de dissipativa, utilizando válvulas automáticas, e o inversor de frequência. Na Tabela 3, são apresentados os custos de aquisição das válvulas e do inversor de frequência

Tabela 3. Custo de aquisição das válvulas hidráulicas e inversor de frequência para cada método analisado.

Método	Material	Preço unitário	Quantidade	Total
Método	Válvula Hidráulica	R\$ 271,87	14	R\$ 3.806,18

Dissipativo				
Método Não Dissipativo	Inversor de Frequência	R\$ 1.500,00	1	R\$ 1.500,00

Para comparação entre as duas alternativas foi calculado o custo fixo anual, considerando a soma entre o custo com energia e o custo de investimento com o inversor e as válvulas (Equações de 18 a 21):

$$FRC = \frac{(1 + i)^n \cdot i}{(1 + i)^n - 1} \quad (18)$$

$$CAF = I \cdot FRC \quad (19)$$

$$CAE = D \cdot Pot. 12 + C \cdot Pot. tempo \quad (20)$$

$$CAT = CAF + CAE \quad (21)$$

em que:

FRC- fator de recuperação de capital, adimensional;

i- taxa anual de juros, adimensional;

n- vida útil dos equipamentos, anos;

CAF- custo anual fixo, R\$ ano⁻¹;

I- investimento inicial, R\$;

CAE- custo anual de energia, R\$ ano⁻¹;

D- preço da energia pela demanda, R\$ W⁻¹;

C- preço da energia pelo consumo, R\$ J⁻¹;

Pot- demanda de potência, W;

tempo - tempo anual de irrigação, horas; e,

CAT – custo anual total, R\$.

A avaliação da análise econômica se baseou em uma vida útil dos equipamentos de 10 anos e uma taxa anual de juros (Taxa Selic) de 12,54% a.a., conforme a Receita Federal do Brasil (2015). A taxa de juros anual foi considerada constante ao longo dos 10 anos avaliados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Consumo de potência elétrica

Na Figura 8 estão apresentados a potência elétrica consumida em cada subunidade pelo do uso de frequência para as condições em nível, 5 e 10% de declividade. A potência consumida é a soma do consumo do uso do inversor de frequência com o consumo do próprio conjunto motobomba.

De modo geral, a potência consumida em cada subunidade é diretamente proporcional a pressão necessária no conjunto motobomba. Nas subunidades 1, são observadas as menores potências consumidas (Figura 8).

As maiores potências são observadas na subunidade 7, nos casos da declividade de 0 e 5%. A mesma situação é observada na subunidade 5 considerando a declividade de 10% (Figura 8).

Diante das condições de funcionamento do conjunto motobomba não foi possível mensurar as potências consumidas nas subunidades 1 e 2 quando o terreno estava em nível. O mesmo acontece para as subunidades 6 e 7, quando considerado a declividade de 10% (Figura 8).

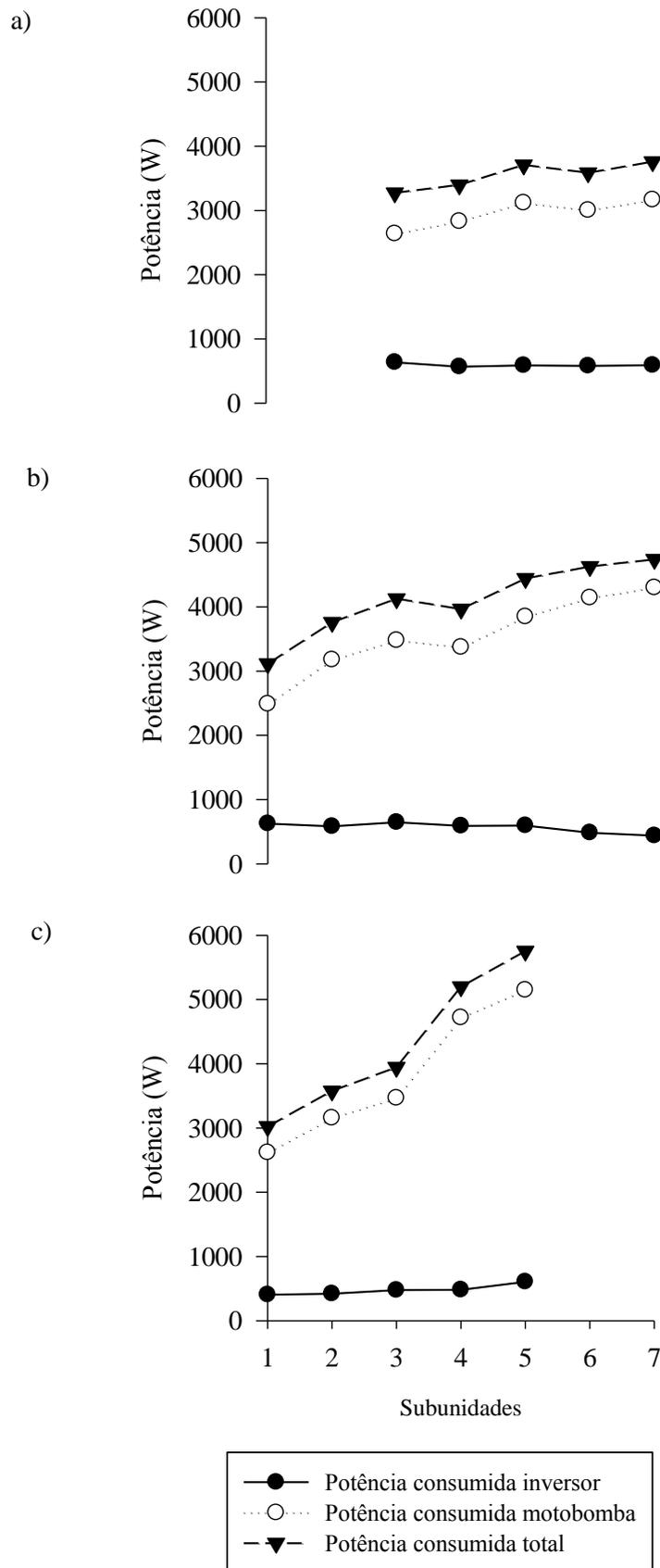


Figura 8. Potência consumida com o uso do inversor de frequência: a) em nível; b) 5% e c) 10% de declividade.

Já para as análises sem o uso do inversor de frequência, a potência consumida nas diferentes condições de declividade e entre as subunidades são próximas (Figura 9). Fato explicado pela dissipação de energia nas diferentes subunidades, em que o ponto de operação do sistema de bombeamento é ajustado ao ponto de projeto.

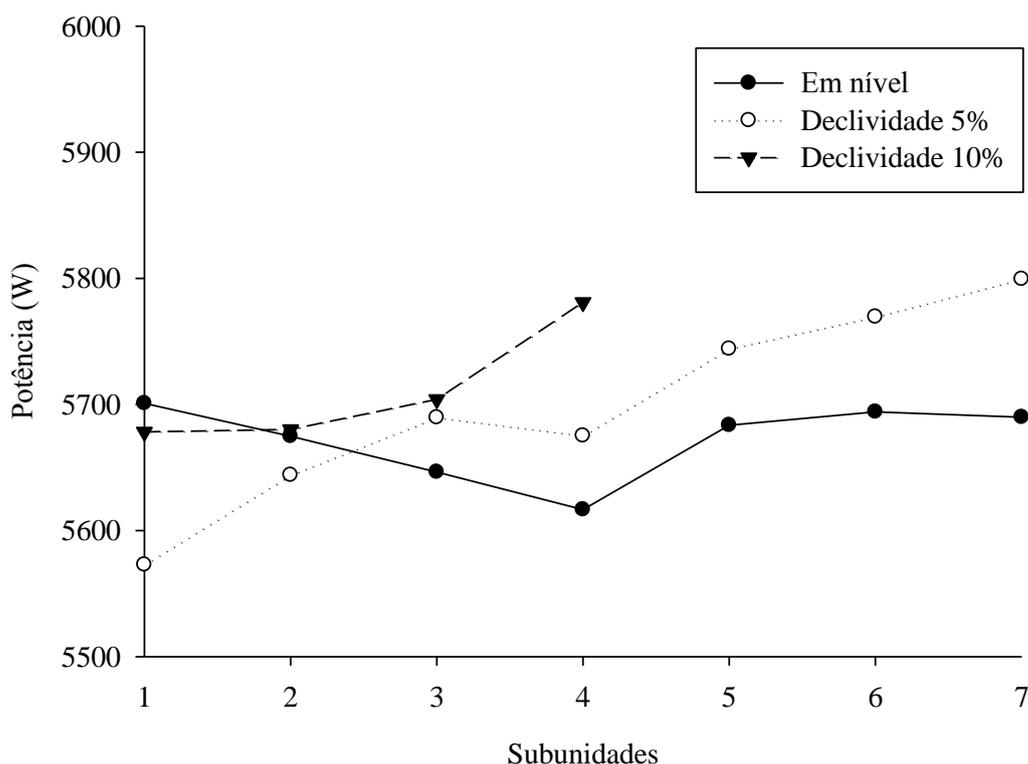


Figura 9. Potência consumida pelo método dissipativo.

Realizando a comparação entre a declividade e os cenários com e sem o uso do inversor de frequência, foi possível observar a queda de potência consumida quando há utilização do inversor. Na condição em que o terreno está em nível, a potência consumida não apresenta aumentos significativos ao longo das subunidades. Fato esse devido a pequena diferença de altura manométrica requerida pelo sistema de bombeamento (Figura 10).

Nas condições de declividade de 5% e 10%, é possível verificar que conforme as subunidades vão se distanciando do conjunto motobomba, a diferença entre as potências consumidas sem e com o uso do inversor de frequência diminui (Figura 10).

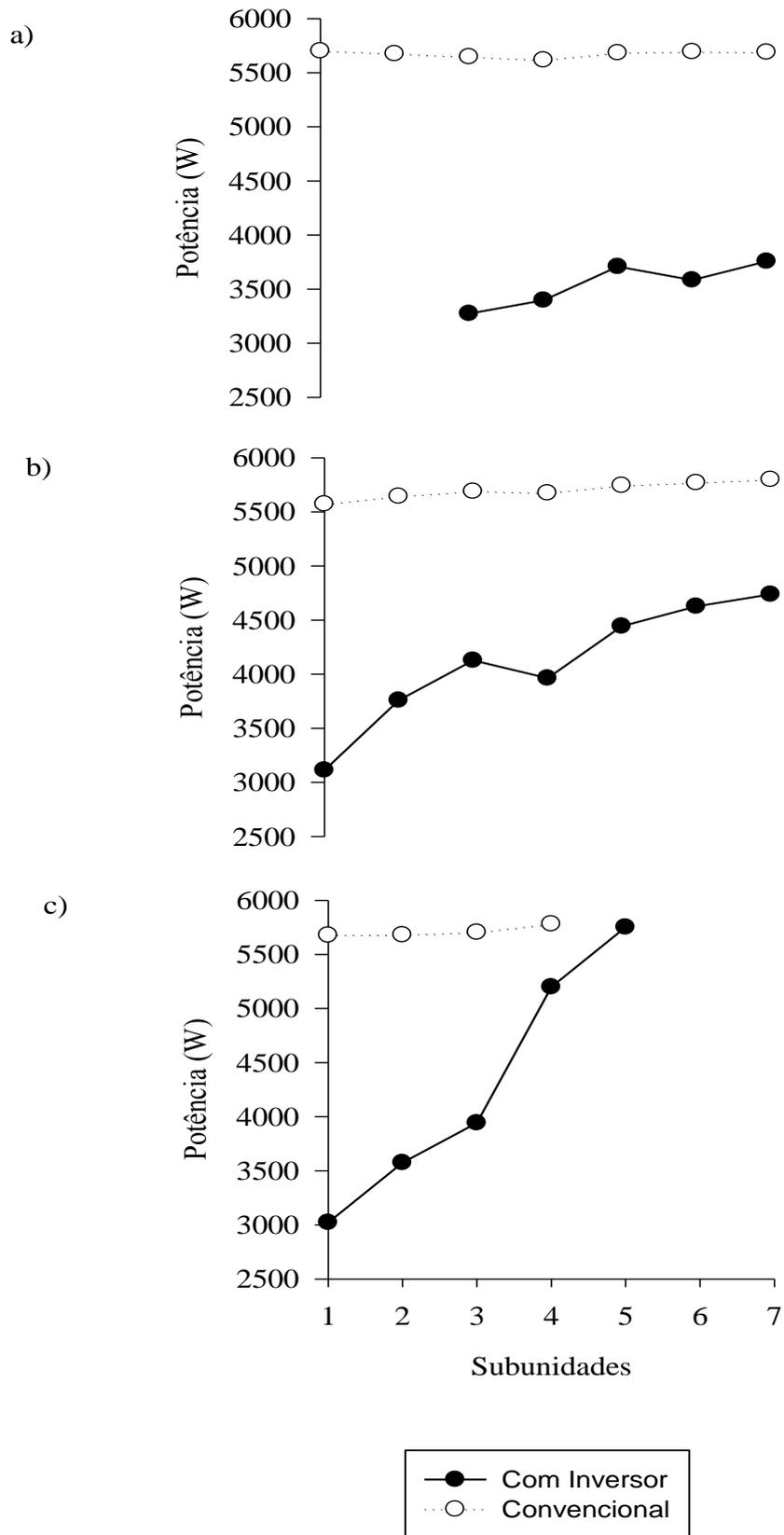


Figura 10. Potência consumida com e sem o uso do inversor de frequência: a) em nível; b) 5% e c) 10% de declividade.

Nas subunidades mais próximas ao conjunto motobomba, o uso do inversor proporcionou as maiores economias de demanda de potência (Figura 11). Conforme a subunidade a ser irrigada ia se afastando do sistema de bombeamento, menor o potencial de economia, fato esse explicado pela proximidade de demanda de pressão entre o método convencional e com o uso do inversor de frequência.

Na condição em que o terreno está nivelado, o potencial de economia apresenta valores entre 33 a 42%, sendo o menor valor na subunidade mais distante. Na condição de declividade de 5%, a subunidade 1 apresentou uma economia de 44,1% e a subunidade 7, a de condição crítica de demanda de pressão, apresentou uma economia de 18,3%. Para a declividade de 10%, foram observados valores entre 46,8 a 10,1% de economia de potência elétrica (Figura 11).

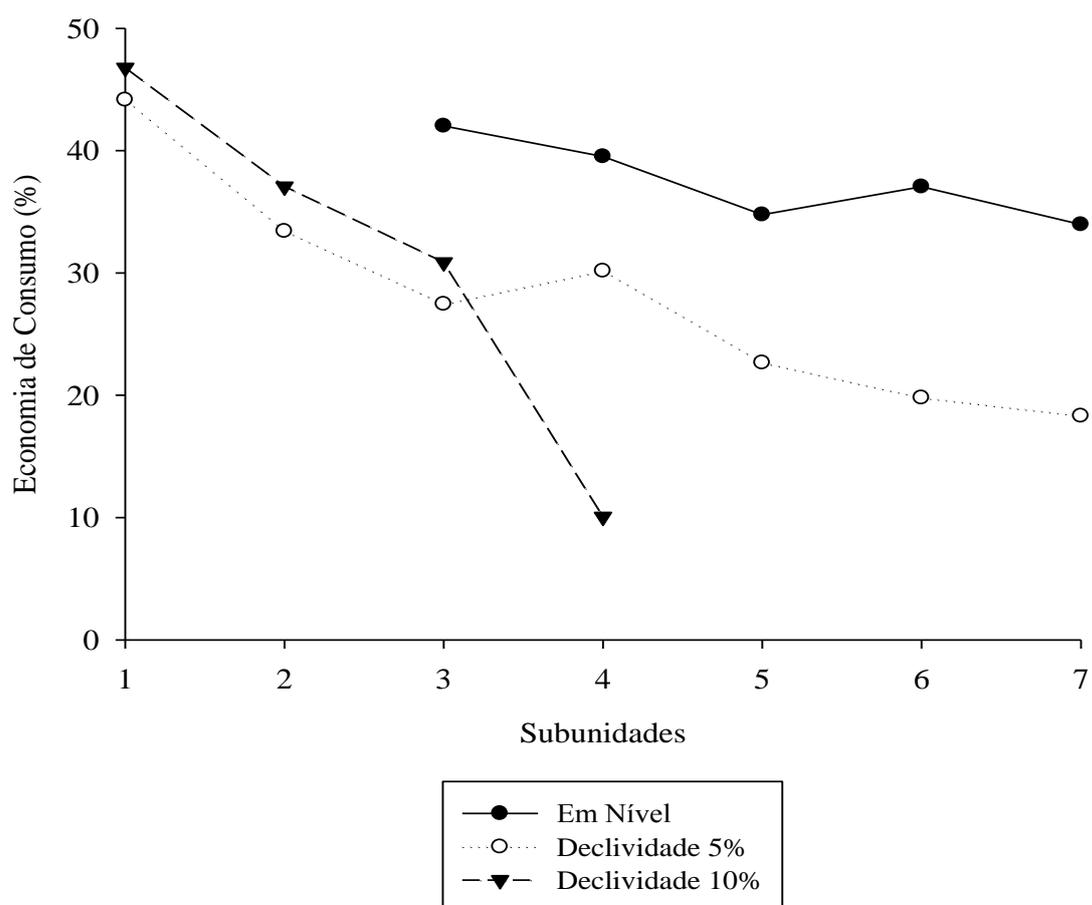


Figura 11. Porcentagem de economia com o uso do inversor de frequência.

Analisando a área do projeto hidráulico como um todo, o uso do inversor de frequência promoveu uma redução da potência consumida de 37,46% no terreno em nível, 28% para a declividade de 5% e 31,19% para a declividade de 10%. Esses resultados corroboram com os obtidos por Moraes et al. (2014), em que ao avaliarem diferentes inclinações para um pivô central (0; 10; 20 e 30%) encontraram uma economia de energia 48; 37; 26 e 16%, respectivamente. Valores esses próximos aos encontrados por Azevedo (2003) analisando oito pivôs centrais nos estados de São Paulo e Minas Gerais, em que a economia ficou entre 15,9 e 32,2%. Araújo (2003) obteve uma redução de potência na ordem de 30%, através do uso do inversor de frequência em um sistema de aspersão convencional considerando o número de linhas laterais em funcionamento simultâneo.

4.2. Potência hidráulica

A potência hidráulica requerida pela bomba aumenta conforme a distância da subunidade para o conjunto motobomba, sendo maior nas subunidades 6 e 7. A condição do terreno afeta diretamente a potência hidráulica, sendo observadas a maior potência na condição de 10% de declividade, quando utilizado o inversor de frequência (Figura 12).

Quando analisado o método convencional de ajuste de pressão, a potência hidráulica fornecida pelo sistema de bombeamento é constante para as diversas condições do terreno, sendo esta superior aos valores da potência hidráulica quando utilizado o inversor de frequência (Figura 12).

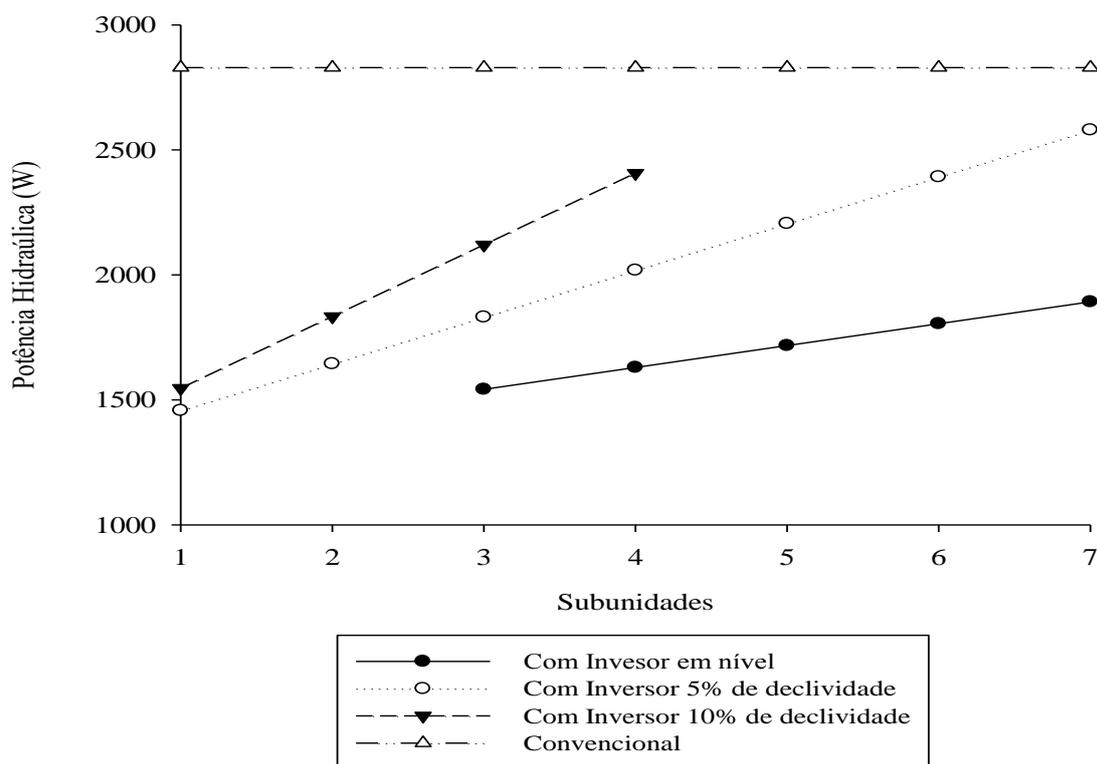


Figura 12. Potência hidráulica com e sem o uso do inversor de frequência para as declividades de 0, 5 e 10%.

4.3. Rendimento do conjunto motobomba

O rendimento do conjunto motobomba apresentou valores na faixa de 0,438 a 0,544, não apresentando diferenças significativas, considerando as condições de declividade e com e sem o uso do inversor de frequência (Figura 13).

Em termos percentuais, o uso do inversor proporcionou uma redução média de rendimento em cerca de 3,1 e 1,7%, para as declividades de 0 e 5%, respectivamente. Por outro lado, ao analisar a declividade de 10%, o uso do inversor apresentou um aumento médio no rendimento em torno de 2,2%.

Alguns autores, avaliaram o efeito do uso do inversor de frequência em área irrigadas pelo sistema de pivô central. Pereira (2003) verificou um pequeno aumento no rendimento do motor (cerca de 2,6%), enquanto Oliveira Filho et al. (2000) encontraram valores próximos a 6,0%, quando o pivô se encontrava na situação de maior declive. No entanto, Moraes et al. (2014) constataram uma redução do rendimento, fato explicado devido ao baixo índice de carregamento do motor (valores menores que 75%).

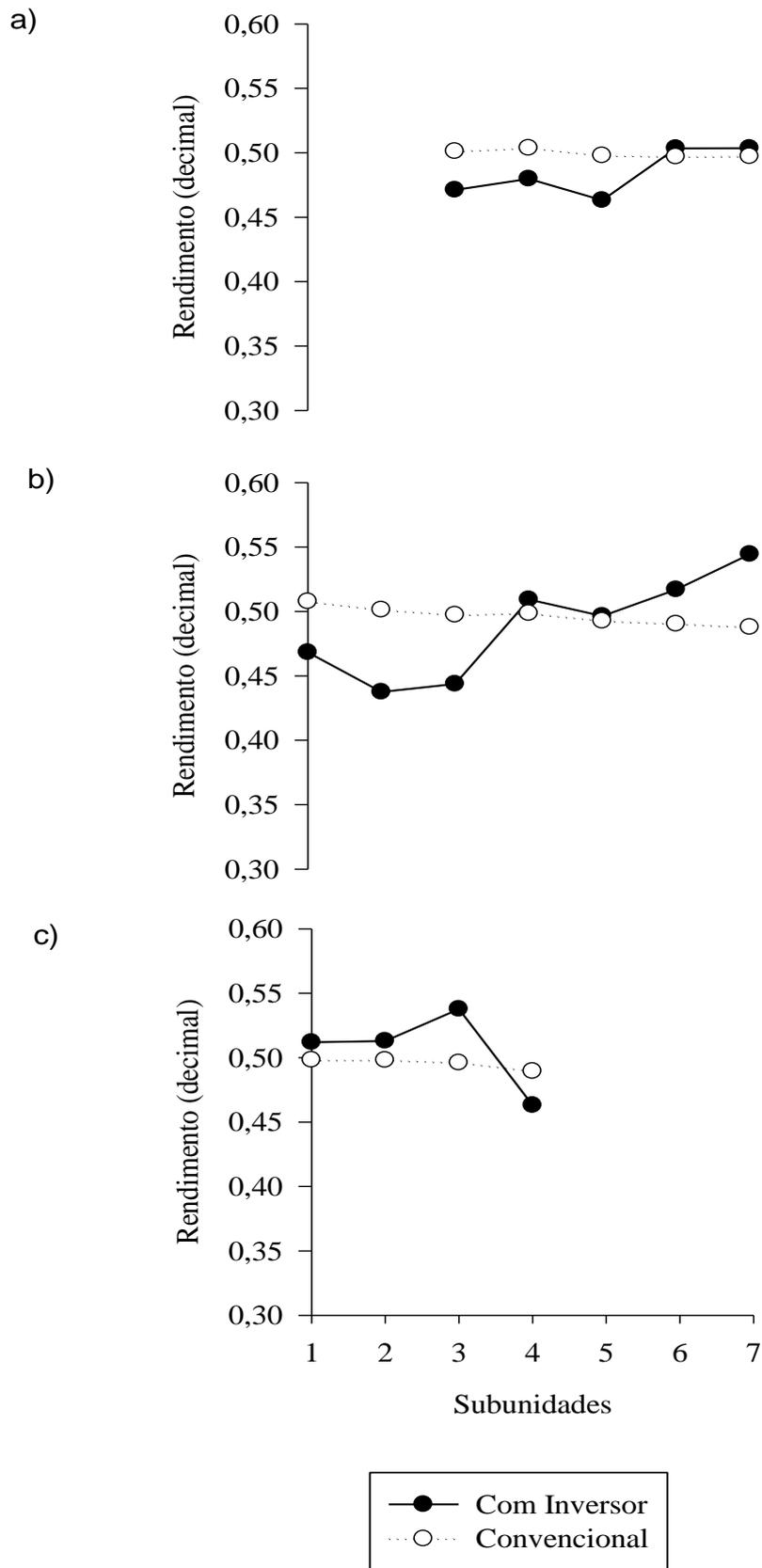


Figura 13. Rendimento do conjunto motobomba com e sem o uso do inversor de frequência: a) em nível; b) 5% e c) 10% de declividade.

4.4. Análise Econômica

Na Tabela 4 estão apresentados os dados de potência demandada para as diferentes condições de declividade avaliadas, com e sem a utilização do inversor de frequência. Observa-se que a potência demandada sem o uso do inversor é constante e superior quando há o uso do inversor. Além disso, a potência demandada com o uso do inversor de frequência depende da declividade, verificando-se o menor valor para a situação do terreno em nível.

Tabela 4. Potência para as diferentes condições de declividade com e sem a uso do inversor de frequência.

Declividade	Potência Consumida (kW)	
	Com Inversor	Sem Inversor
Em nível	40,487	79,412
5% de declividade	57,537	79,789
10% de declividade	65,987	80,371

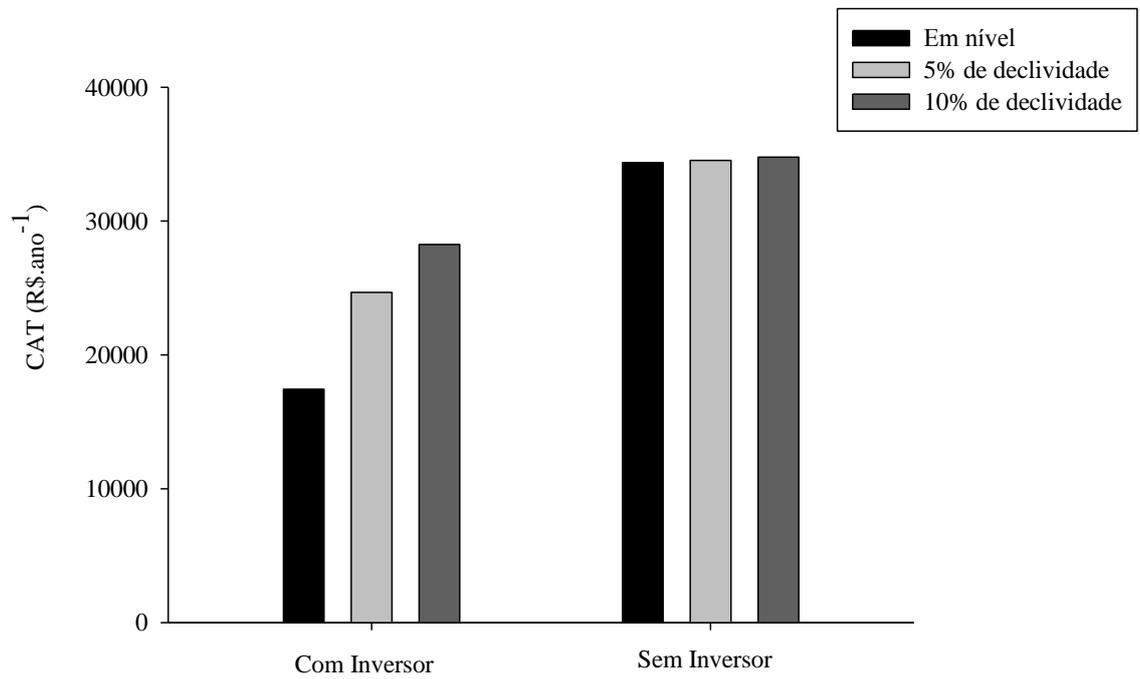
Na Figura 14 são apresentados os custos anuais totais para as situações analisadas, com e sem uso do inversor de frequência, e declividade do terreno (em nível, 5% e 10% de declividade), em função da tarifa (convencional e horo-sazonal).

Considerando as tarifas, independente da declividade do terreno e o uso ou não do inversor de frequência, a tarifa horo-sazonal apresentou o menor custo anual total quando comparada a tarifa convencional (Figura 14).

Quando não há o uso do inversor de frequência, o custo anual total é superior quando comparado com o uso do inversor. Outro ponto em destaque, para essa condição, é que considerando o mesmo tipo de tarifa, o custo não apresenta variações significativas sem o uso do inversor (Figura 14).

Em relação a declividade do terreno, quando há o uso do inversor de frequência e quanto menor a declividade, menor é o custo com energia. Sem o uso do inversor, a declividade do terreno não afeta os custos (Figura 14).

a)



b)

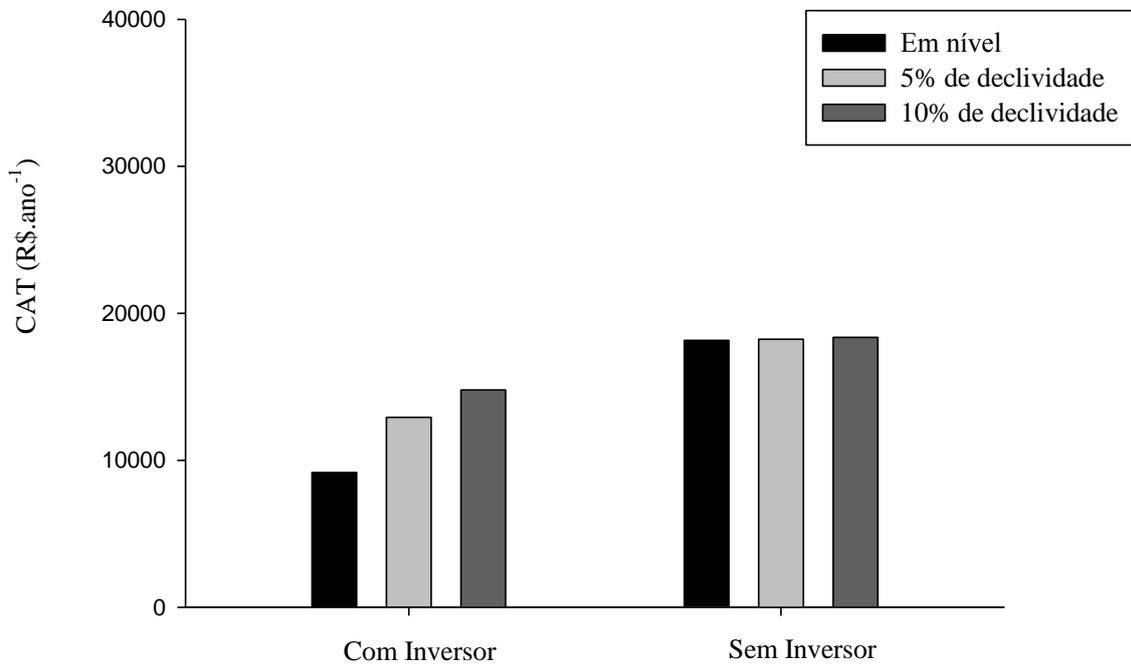


Figura 14. Consumo anual total com e sem o uso do inversor de frequência a) tarifa convencional e b) horo-sazonal.

Analisando-se a Figura 14, nota-se que o uso do inversor de frequência e a tarifa horo-sazonal apresentam menores custos anuais isoladamente. Dessa forma, na Tabela 5, são demonstradas as estimativas de economia de capital ao longo de um ano para as condições analisadas.

Tabela 5. Estimativa do custo total anual com e sem o uso do inversor de frequência, considerando as tarifas convencional e horo-sazonal.

Declividade (%)	Tarifa	Custo Anual Total (CAT) - R\$.ano ⁻¹		Economia (R\$)
		Sem Inversor	Com Inversor	
0		34.366,95	17.441,68	16.925,28
5	Convencional	34.526,63	24.672,77	9.853,85
10		34.773,61	28.256,34	6.517,27
0		18.155,47	9.176,54	8.978,92
5	Horo-sazonal	18.238,28	12.926,86	5.311,41
10		18.366,37	14.785,43	3.580,94

O uso do inversor de frequência promoveu uma redução de custos em todas as situações analisadas quando comparadas ao método dissipativo de energia (fechamento do registro de gaveta), sendo que para o terreno em nível foram obtidas as maiores economias anuais, R\$ 16.925,28 e R\$ 8.978,92 para as tarifas convencional e horo-sazonal, respectivamente. Conforme a declividade do terreno aumenta, a economia entre os métodos de dissipação de energia diminui e maiores os custos (Tabela 5).

A viabilidade econômica quanto a utilização do uso do inversor de frequência é comprovada por diversos autores. Araújo (2003) encontrou o ponto de nivelamento entre o número de horas trabalhadas considerando diversas potências de inversores associados a diferentes pressões de serviço. Azevedo (2003) vai além, e conclui que o fator que garante a viabilidade econômica do uso do inversor, é a lâmina aplicada. Em seu estudo, analisou oito pivôs centrais, em que cada um apresentava um número de horas diferente para aplicar a mesma lâmina.

Quanto as tarifas, os custos referentes a tarifa horo-sazonal são cerca de 52% mais barato do que os custos relacionados a convencional, sendo dessa forma a mais indicada para o uso em propriedades que possam assinar esse tipo de contrato (Tabela

5). Turco et al. (2009) avaliaram o consumo de energia elétrica no cultivo do feijoeiro irrigado por pivô central, e concluíram que as tarifas horo-sazonais apresentaram melhor desconto independentemente do manejo adotado (tensiometria ou balanço hídrico através do Tanque Classe-A).

5. CONCLUSÕES

O uso do inversor reduziu o consumo de energia de maneira significativa, permitindo o ajuste da potência hidráulica nas subunidades, quando comparado ao método dissipativo de energia.

O rendimento do motor na presença do inversor apresentou pequena variação, apesar da potência demandada ser inferior ao método convencional.

O uso do inversor de frequência apresentou-se como a melhor alternativa econômica, para todas as condições de relevo avaliadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A. J.; OLIVEIRA, L. F. C.; MELO, A. O. Verificação das relações de Râteaux pelo emprego de um inversor de frequência. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 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, 142f. Tese (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrônomicas do Campus de Botucatu – UNESP, Botucatu, 2003.

ARAUJO, J.A. B.; SERAPHIM, O.J.; SIQUEIRA, J.A.C. Avaliação de um sistema irrigação por aspersão com aplicação do inversor de frequência. In: Encontro de energia no meio rural, 5.,Campinas, 2004.

AZEVEDO, E.B. Viabilidade do uso do inversor de frequência em sistemas de irrigação tipo pivô central. 2003, 77f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem). UFLA, Lavras, 2003.

BERNARDO, S; Manual de irrigação, 6. ed.; 657 p.; Viçosa; 1995.

CAMPANA, S; OLIVEIRA FILHO, D; SOARES, A.A; OLIVEIRA, R.A. Estudo comparativo de métodos para estimativa do carregamento e rendimento de motores elétricos para auditoria energética. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, vol.4, n.2, 2000.

CARVALHO, J.A.; OLIVEIRA, L.F.C. Instalações de bombeamento para irrigação: hidráulica e consumo de energia. 2ed. rev. e. amp.- Lavras: UFLA, 2014. 429p.

FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. 1.ed. Maringá: Eduem, 2012. 356p.

HANSON, B.; WEIGAND, C., ORLOFF, S. Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, May/June, p. 179-82, 1996.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2006, Rio de Janeiro, p.1-777, 2006.

FUGIMOTO, S.K. Estrutura de tarifas de energia elétrica: análise crítica e proposições metodológicas. 2010, 195 p. Tese (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) – USP, São Paulo, 2010.

LIGHT- Light Serviços de Eletricidade S.A. Composição da tarifa. Disponível em <<http://www.light.com.br/para-residencias/Sua-Conta/composicao-da-tarifa.aspx>>. Acesso em 22 de maio de 2016.

MEDEIROS, A. M. de M. Potencial de economia de energia elétrica em sistemas de irrigação a pivô central no estado de Goiás. 2005. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

MONTEIRO, R.O.C; FERRAZ, P; COELHO, R.D; SANTOS, R.A. Distância da rede elétrica que viabiliza o uso de motores diesel em áreas irrigadas do Brasil. Irriga, Botucatu, v. 12, n. 2, p. 263-272, abril-junho, 2007.

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

MORENO, M. A.; PLANELLS, P.; CÓRCOLES, J.L.; TARJUELLO, J.M.; CARRION, P.A. Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. Biosystems Engineering, v.102, p. 95-105, 2009.

OLIVEIRA FILHO, D., CAMPANA, S., SOARES, A.A, OLIVEIRA, R. A. Estudo do comportamento de parâmetros elétricos e hidráulicos em sistema de irrigação tipo pivô central utilizando inversores de frequência para racionalização do uso da energia elétrica. In: Encontro de energia no meio rural, 3. 2003, Campinas.

PEREIRA, P.H.C.; Sistema Automatizado de irrigação por pivô central: uma proposta para melhoria da eficiência energética através do uso de controladores lógicos programáveis em conjunto com inversor de frequência e rede sem fio zigbee, 2011. 132 f. Tese (Área de concentração Engenharia Água e Solo). UFLA, Lavras, 2011.

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, July 07 - 10, Porto, Portugal, 2013.

PERRONI, B.L.T.; FARIA, L.C.; CARVALHO, J.A.; OLIVEIRA, H.F.E. Influência do custo da energia elétrica e do material da tubulação na velocidade econômica de bombeamentos. Irriga, Botucatu, v. 20, n. 1, p. 13-20, janeiro-março, 2015.

PORTO, R. M. Hidráulica Básica. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540 p.

RECEITA FEDERAL DO BRASIL. Taxa de juros Selic. Disponível em <<http://idg.receita.fazenda.gov.br/orientacao/tributaria/pagamentos-e-parcelamentos/taxa-de-juros-selic>>. Acesso em 09 de junho de 2016.

SCHNEIDER. Eficiência energética e acionamento de motores. In: Workshop Instalações de baixa tensão, 2003. Disponível em < http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/apostila_procobre_eficienc.pdf>. Acesso em 21/05/2016.

TURCO, J.E.P; RIZZATTI, G.S; PAVANI, L.C. Custo de energia elétrica em cultura do feijoeiro irrigado por Pivô central, afetado pelo manejo da irrigação e sistemas de cultivo. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.29, n.2, p.311-320, abr./jun. 2009.

WEG. Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção. Jaraguá do Sul: WEG, 2015. rev 3., 166p.