

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Jhosefe Bruning

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE MÉTODOS DE CONTROLE DE TAXA
DE APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO
CONVENCIONAL**

Santa Maria, RS

2018

Jhosefe Bruning

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE MÉTODOS DE CONTROLE DE TAXA DE
APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina

Santa Maria, RS
2018

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com dados fornecidos pelo (a) autor (a).

Bruning, Jhosefe

Avaliação energética de métodos de controle de taxa de aplicação em sistemas de irrigação por aspersão convencional / Jhosefe Bruning.- 2018.

62 p.; 30 cm

Orientador: Adroaldo Dias Robaina

Coorientador: Marcia Xavier Peiter

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2018

1. Economia de energia 2. Controle de vazão 3. Eficiência energética I. Robaina, Adroaldo Dias II. Peiter, Marcia Xavier III. Título.

© 2018

Todos os direitos autorais reservados a Jhosefe Bruning. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

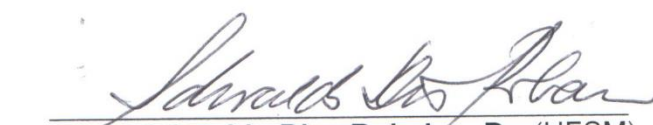
E-mail: Jhosefe.b@gmail.com

Jhosefe Bruning

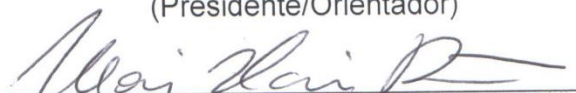
**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE MÉTODOS DE CONTROLE DE TAXA DE
APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**

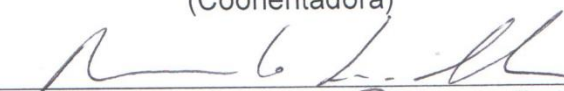
Aprovado em 23 de fevereiro de 2018:


Adroaldo Dias Robaina, Dr. (UFSM)

(Presidente/Orientador)


Marcia Xavier Peiter, Dr^a. (UFSM)

(Coorientadora)


Ricardo Luis Schons, Dr. (IFFarroupilha)


Tonismar dos Santos Pereira, Dr. (UFPEl)

Santa Maria, RS
2018

Dedico esta pesquisa à minha família em especial aos meus pais Senildo e Cleusa

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por sempre iluminar meus caminhos.

Ao professor orientador Adroaldo Dias Robaina pela oportunidade, pelos ensinamentos, atenção, amizade, profissionalismo e paciência depositada.

À professora coorientadora Marcia Xavier Peiter pela oportunidade, carinho, amizade, ensinamento e amizade e profissionalismo.

À minha família: meu Pai, Senildo Bruning e minha Mãe, Cleusa Vanes Bruning pelo apoio e base de vida em minha trajetória.

À minha namorada e companheira amada Aline Munekata Gonçalves pelo cuidado, carinho, compreensão, incentivo e companheirismo, sempre dando forças para seguir em frente.

Ao meu irmão Eduardo Bruning pelo apreço, carinho e apoio.

Aos meus amigos por sempre estarem me apoiando em todas as etapas da vida, também por todos os momentos de lazer, diversão e descontração.

Aos colegas do laboratório de hidráulica e engenharia de irrigação da UFSM, por toda amizade, compreensão, amparo e troca de conhecimentos.

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) pela oportunidade e estrutura disponibilizada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Muito obrigado!

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Martin Luther King)

RESUMO

AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE MÉTODOS DE CONTROLE DE TAXA DE APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL

AUTOR: Jhosefe Bruning
ORIENTADOR: Adroaldo Dias Robaina

O Rio Grande do Sul apresenta um crescente aumento da produção agrícola, entretanto, a ocorrência de fenômenos que causam anomalias no volume pluviométrico afeta de forma negativa o desenvolvimento agrícola. Frente a esta situação, destaca-se a irrigação como uma possível solução oferecida à agricultura. Em propriedades com áreas de até 10 ha, a utilização do sistema de irrigação por aspersão convencional se apresenta como uma alternativa viável. Entretanto, esta é uma das responsáveis por grande parte do consumo de energia no meio rural, em função do descontrole em relação a vazão necessária para atender a área a ser irrigada. Este fato é decorrente da falta de controle ou embasamento técnico acerca da relação volume real distribuído por unidade de tempo. Com isso, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho de diferentes métodos de controle de vazão em sistemas de irrigação por aspersão convencional, através de simulações de diferentes configurações do sistema. Isto se justifica em função do consumo de energia elétrica ser um dos grandes responsáveis pelo aumento dos custos de produção na agricultura irrigada e também pela real possibilidade de crise no setor energético. Diante desta situação, pode-se citar diferentes métodos de controles de vazão em sistema de irrigação, como os que não alteram a velocidade de rotação e os que alteram a velocidade rotação do conjunto motobomba em sistema de bombeamento. Desta forma, foram dimensionados sistema de irrigação para atender áreas irrigadas com tamanhos que variaram de 1, 3, 5, 7 e 10 hectares, compreendendo diferentes combinações de espaçamentos entre aspersores e ramais de irrigação. Foram considerados os espaçamentos de 12 x 12 m; 12 x 18 m; 18 x 18 m; 18 x 24 m e 24 x 24 m, onde, foram aplicados diferentes métodos de aplicação: nenhum controle de vazão e tempo de irrigação fixo - M0 (método de referência); nenhum controle de vazão e tempo de irrigação variável - M1; controle por estrangulamento da válvula e tempo de irrigação fixo - M2; variação da frequência elétrica e tempo de irrigação fixo - M3 para realizar a estimativa do consumo de energia. Contudo foi possível revelar a importância da inserção da utilização de método controle de vazão nos projetos de sistema de irrigação por aspersão convencional, de modo a melhorar a eficiência energética com valores que variaram de 9,12% até 50,45% na redução do consumo de energia. Além disso, pode-se concluir que o método que ajusta a vazão através da variação da rotação dos sistemas de bombeamento foi o que apresenta os melhores resultados.

Palavras-chave: Economia de energia. Controle de vazão. Eficiência energética

ABSTRACT

EVALUATION OF THE ELECTRIC ENERGY OF THE APPLICATION RATE CONTROL METHODS IN CONVENTIONAL SPRINKLER IRRIGATION SYSTEMS

AUTHOR: Jhosefe Bruning
ADVISOR: Adroaldo Dias Robaina

Rio Grande do Sul presents a growing increase in agricultural production, however, the occurrence of phenomena that cause anomalies in the rainfall volume, affects negatively the agricultural development. Faced with this situation, irrigation stands out as a possible solution offered to agriculture. In properties with areas of up to 10 ha, the use of the conventional sprinkler irrigation system is a viable alternative; however, this is one of the main factors responsible for a large part of the consumption of energy in rural areas due to the lack of control in relation to the flow needed to meet the area to be irrigated. This fact is due to the lack of control or technical background regarding the real volume ratio distributed per unit of time. Thus, the objective of this work is to analyze the performance of different flow control methods in sprinkler irrigation systems conventional through simulations of different system configurations. This is justified by the fact that electricity consumption is one of the main factors responsible for increasing production costs in irrigated agriculture and also because of the real possibility of a crisis in the energy sector. In view of this situation, it is possible to mention different methods of flow control in an irrigation system, such as those that do not change the speed of rotation and those that change the speed of rotation of the pump motor in a pumping system. In this way, irrigation systems were designed to serve irrigated areas with sizes ranging from 1, 3, 5, 7 and 10 hectares, comprising different combinations of spacings between sprinklers and irrigation extensions. The spacings of 12 x 12 m were considered; 12 x 18 m; 18 x 18 m; 18 x 24 m and 24 x 24 m, where different application methods were applied: no flow control and fixed irrigation time - M0 (reference method); no flow control and variable irrigation time - M1; control by valve bottleneck and fixed irrigation time - M2; variation of the electric frequency and fixed irrigation time - M3 to carry out the estimation of the energy consumption. However, it was possible to reveal the importance of insertion of the use of flow control method in the projects of conventional sprinkler irrigation system, in order to improve energy efficiency with values ranging from 9.12% to 50.45% in the reduction of consumption power. In addition, it can be concluded that the method that adjusts the flow through the variation of the rotation of the pumping systems was the one that presents the best results.

Keywords: Energy saving. Flow control. Energy Efficiency

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da área irrigada no Brasil através de diferentes métodos de irrigação.....	19
Figura 2 - Comparação do comportamento da curva da bomba através da utilização métodos de controle de vazão (válvula estranguladora e inversor de frequência)	28
Figura 3 - Representação esquemática de um sistema de irrigação.....	32
Figura 4 - Comportamento do consumo unitário de energia elétrica ($\text{kWh mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) em função da área irrigada (ha) em cada combinação de espaçamento .	38
Figura 5 - Consumo de energia necessária para realizar uma irrigação em cada tamanho de área com o método M0.....	39
Figura 6 - Comportamento referente ao consumo de energia elétrica em relação aos espaçamentos entre aspersores e ramais de irrigação em todas as áreas estudadas com a utilização do método M0	41
Figura 7 - Comportamento do consumo unitário médio de energia em função dos espaçamentos entre aspersores e ramais de irrigação para o método M0	43
Figura 8 - Gráfico do comportamento da econômica de energia obtida com a utilização do método de controle com variação do tempo de irrigação (M1) em relação com método de referência (M0).....	44
Figura 9 - Gráfico do comportamento da econômica de energia obtido com a utilização do método de controle com utilização de válvulas de estrangulamento com tempo de irrigação fixo (M2) em relação com método de referência.....	45
Figura 10 - Gráfico do comportamento da econômica de energia obtido com a utilização do método de controle utilizando inversor de frequência com tempo de irrigação fixo (M3) em relação com método de referência.....	46
Figura 11 - Amplitude de economia de energia obtido com a utilização do método de controle com variação do tempo de irrigação (M1) em função dos espaçamentos analisados	50
Figura 12 - Amplitude de economia de energia obtido com a utilização do método de controle com utilização de válvulas de estrangulamento com tempo de irrigação fixo (M2) em função dos espaçamentos analisados	51
Figura 13 - Amplitude de economia de energia obtido com a utilização do método de controle utilizando inversor de frequência com tempo de irrigação fixo (M3) em função dos espaçamentos analisados.....	52
Figura 14 - Consumo de energia total necessário para realização de uma irrigação em cada tamanho de área, espaçamentos e método de controle de vazão ..	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características técnicas dos aspersores selecionados e utilizados	33
Tabela 2 - Definições das potências necessárias e as utilizadas comercialmente em cada uma das situações estudadas	34
Tabela 3 - Valores de coeficiente de correlação, coeficiente de determinação e parâmetros das equações referente a cada método de controle de vazão	47
Tabela 4 - Valores referentes a economia de energia (%) através da utilização de três métodos de controle de vazão adotados em função das diferentes áreas e dos espaçamentos analisados	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO	17
2.2	SISTEMAS DE BOMBEAMENTOS DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO	18
2.3	SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO	19
2.4	DEMANDA DE RECURSOS HÍDRICOS E ENERGÉTICOS.....	20
2.5	MÉTODOS DE CONTROLE DE VAZÃO.....	22
2.5.1	Controle de vazão sem variação da velocidade da bomba hidráulica e do motor	25
2.5.2	Controle de vazão com variação de velocidade da bomba hidráulica e sem variação do motor	25
2.5.3	Controle de vazão com variação de velocidade da bomba hidráulica e do motor	26
3	MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1	DESENVOLVIMENTO DOS PROJETOS DE IRRIGAÇÃO	30
3.2	LEVANTAMENTO DE DADOS.....	30
3.3	CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO	31
3.4	ALTURA GEOMÉTRICA DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO.....	33
3.5	ALTURA MANOMÉTRICA DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO.....	34
3.6	MÉTODOS DE CONTROLE DA VAZÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO	35
3.7	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSÕES	36
4.1	CONSUMO DE ENERGIA POR UNIDADE DE ÁREA	36
4.2	AVALIAÇÃO DO CONSUMO UNITÁRIO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES ESPAÇAMENTOS	39
4.3	UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS DE CONTROLE DE VAZÃO NA AVALIAÇÃO DO CONSUMO ENERGIA.....	43
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a agricultura brasileira apresenta crescente aumento da produção agrícola. Isto ocorre em função de novos padrões socioculturais e formatos econômicos ocasionados pela necessidade de elevar a produção de alimentos em função do aumento da necessidade alimentícia por parte da população e também pelo aumento populacional.

Entretanto, em virtude do grande número de fatores envolvidos, a agricultura é uma atividade que apresenta alto risco econômico em comparação com outros empreendimentos. Deste modo, com o propósito de garantir e aumentar a produtividade das culturas, fica evidenciada a necessidade do emprego de técnicas e tecnologias para reduzir os riscos dos investimentos.

Dentre os riscos inerentes à produção agrícola, destacam-se os relacionados ao clima. No estado do Rio Grande do Sul, a probabilidade de ocorrência de estiagens prejudiciais à agricultura é de sete a cada dez anos (SEAPA, 2012). Segundo Gross e Cassol (2015), um dos fatores que contribuem para a ocorrência de estiagens no estado é o fenômeno climático conhecido como La Niña, que ocasiona a redução no volume pluviométrico. Este fenômeno influencia de forma negativa no desenvolvimento agrícola da região afetada. Diante dos aspectos apresentados, fica evidenciada a necessidade da irrigação suplementar como alternativa, que permita a melhoraria da produção agrícola ao longo do ano, além da garantia de segurança alimentar. Com isso uma solução encontrada no estado foi a criação de programas que incentivaram a implantação de sistema de irrigação como uma ferramenta para amenizar os danos causados pelas estiagens.

Entretanto, de acordo com Mantovani et al. (2009), a produção agrícola irrigada é um dos grandes usuários dos recursos hídricos. Além disso, estas atividades apresentam grande consumo de água entre os processos que utilizam este recurso natural. O consumo varia de acordo com a eficiência do sistema de irrigação empregado. Usualmente os métodos com menor eficiência de aplicação de água são relacionados à irrigação por superfície em suas variantes. Nesta classe de sistemas estima-se que a eficiência varia de 23% até 77,8% (RODRÍGUEZ GONZÁLEZ et al., 2013).

Segundo Paulino et al. (2011), no estado do Rio Grande do Sul, a maior área irrigada é cultivada com arroz onde ocupa 82,6% das áreas com sistema de irrigação por inundação. Em segundo lugar identificam-se os sistemas de irrigação por aspersão (pivô central e aspersão convencional) cuja eficiência de aplicação é maior que a inundação. De acordo com Schons et al. (2014), estes índices de eficiência de aplicação no sistema tipo pivô central são de 85,89% a 87,40% para duas regiões do estado Rio Grande do Sul sendo estes valores considerados bons de acordo com os requisitos da norma técnica NBR 14244.

Sistemas de irrigação inadequadamente dimensionados, operando de forma desregulada e com baixa eficiência de aplicação implicam em baixa eficiência energética. Além disso, estas situações causam aos irrigantes o aumento dos custos de produção em função do desperdício de recursos hídricos e desuniformidade na produção agrícola, conforme mencionado por Feitosa et al. (2014).

Em função da escassez e dos possíveis conflitos pelo uso da água e da energia elétrica, torna-se evidente a preocupação a respeito da utilização destes recursos. A adoção de estratégias de manejo que propiciem a economia, sem causar prejuízos à produtividade das culturas, se fazem necessárias através da realização de estudos voltados para elementos que visam a melhoria do desempenho hidráulico e elétrico, com vistas a minimização dos custos de produção.

Segundo Turco et al. (2009), no meio rural um sistema de irrigação pode ser responsável por grande parte do consumo de energia. Este fato é decorrente da falta de controle em relação ao volume real distribuído por unidade de tempo, além disso, a falta de critério técnicos de dimensionamento influencia diretamente para este consumo.

A utilização de métodos controle de vazão em sistemas de irrigação podem ser alternativas viáveis, pois proporcionam melhoria na eficiência das bombas de irrigação, incluindo conseqüentemente, melhoria da rentabilidade do usuário. A utilização de métodos de controle de vazão se justifica pelo fato de que os gastos com energia elétrica podem representar cerca de 30% dos custos de produção (ARAUJO et al., 2011).

A agência americana NRCS (2014) e Lima et al. (2015) citam que quando ocorre a necessidade da utilização de uma bomba para diferentes sistemas de irrigação, a escolha se dá de modo a atender a maior demanda de vazão e altura

manométrica solicitada para o funcionamento do sistema. Assim, quando o sistema opera de forma parcial, pode ocorrer um superdimensionamento em termos de energia elétrica requerida pela força motriz, causando um aumento no seu consumo bem como a maior potência reativa ocasionando um baixo fator de potências que conseqüentemente leva a multas. Com isto, verifica-se um potencial expressivo para a racionalização do uso da energia elétrica nestas condições de operação. Yacoubi et al. (2010) relatam que o crescente aumento dos custos com energia são fatores importantes para melhorar o desempenho dos sistemas irrigação por aspersão.

Desta forma, a adoção de técnicas que possam contribuir para melhorar o uso de água e da energia elétrica se fazem necessários, de modo a produzir com sustentabilidade, aproveitando melhor os recursos e reduzindo o consumo de energia no emprego das atividades de irrigação (TARJUELO et al., 2015; REIS et al., 2017).

Com a concepção de analisar o dimensionamento dos sistemas de irrigação e avaliar os impactos causados em função do fator energia no custo de produção agrícola irrigado, a realização de estudos voltados para redução do consumo energético e da aplicação de água de forma mais eficiente, são assuntos de importante relevância.

Considerando o exposto apresentado, os objetivos geral e específicos deste trabalho foram:

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o desempenho de diferentes métodos de controle de vazão em sistemas de irrigação por aspersão convencional através de simulações de diferentes configurações do sistema.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desenvolver projetos de irrigação por aspersão convencional que apresentem características de variação nos quesitos de área, espaçamentos entre aspersores, número e extensão de ramais;

Quantificar o consumo de energia dos projetos nas configurações estabelecidas, utilizando diferentes métodos de controle de vazão;

Comparar estatisticamente a resposta do consumo de energia nos diferentes métodos de controle de vazão, identificando o desempenho das configurações de projetos para variável resposta;

Identificar o arranjo de projeto que apresenta maior eficiência energética.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo se dedica a uma revisão dos principais assuntos que fundamentaram este trabalho, através dos quais foi possível estudar as características do sistema de irrigação e suas práticas de manejo, bem como obter informações relacionadas aos métodos testados.

2.1 NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO

No estado do Rio Grande do Sul (RS) um dos principais fatores na produção agrícola está relacionado a necessidade hídrica das culturas, sendo este um dos responsáveis pela oscilação frequente do rendimento das culturas.

Muitas vezes o potencial produtivo das culturas agrícolas, em diversas regiões é limitado pela ocorrência de estiagens que afetam diretamente a produção agrícola em períodos críticos, em função, da irregularidade pluviométrica que afeta o desenvolvimento das culturas. Como a produção agrícola é o alicerce da economia do estado do Rio Grande do Sul, a produtividade agrícola vem a ser a grande responsável por determinar a continuidade e crescimento financeiro dos agricultores.

Entretanto Gross e Cassol (2015) relatam o aumento dos períodos com redução pluviométrica, na qual é agravada pela ocorrência do fenômeno “LA NIÑA”, esses eventos constituem um obstáculo à produção agropecuária, tornando assim uns dos fatores determinantes no rendimento das culturas.

Na busca por práticas agrícolas que minimizem os prejuízos causados pelos impactos das estiagens e possível aumento na produção pode-se destacar o incentivo ao uso de irrigação. Desta forma, a irrigação tem como objetivos principais o aumento dos lucros através do aumento da produção e da qualidade além de também permitir a abertura de novas áreas para agricultura em locais onde não seria possível a implantação de culturas agrícolas (VIEIRA et al., 2011; FRIGO et al., 2013; MORAES et al., 2014).

2.2 SISTEMAS DE BOMBEAMENTOS DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO

Os sistemas de bombeamento de água são utilizados para conduzir água de pontos com cota geométrica inferior até outro em determinada área. Fornecer energia para água de forma contínua e vazão suficiente, deve ser a razão a ser projetada para atender a demanda de consumo exigida (WU et al., 2014; SANTOS et al., 2016).

Em linhas gerais, um sistema de bombeamento de irrigação é constituído por apenas três elementos que são: a tubulação de sucção, o conjunto motobomba, a tubulação de recalque com acessórios (ROBAINA, 2015).

Projetos com falhas de planejamento e dimensionamento são práticas usuais em estações de bombeamento, sendo, muitas vezes, desenvolvidos por pessoas não habilitadas. Este fato é responsável por baixas eficiências em estação de bombeamento (ROCAMORA et al., 2013).

Um dos critérios de projetos de sistema de bombeamento que deve ser levado em consideração, são os diâmetros das tubulações pois, refletem no consumo de energia. Peças especiais e os acessórios instalados na tubulação também são elementos responsáveis por perdas de energia e merecem atenção (KÖPP et al., 2016).

O diâmetro das tubulações subdimensionadas faz com que ocorra o aumento das perdas de carga pelo excesso de velocidade e conseqüentemente o aumento da potência necessária pelo conjunto motobomba. Este incremento de potência, proporciona o aumento dos custos com conjunto elevatório e, também, provoca maiores despesas com energia. Entretanto, com o uso de diâmetros maiores estes custos apresentam comportamento inverso, tornando-se assim economicamente viável ao longo da vida útil dos equipamentos (LIMA et al., 2009).

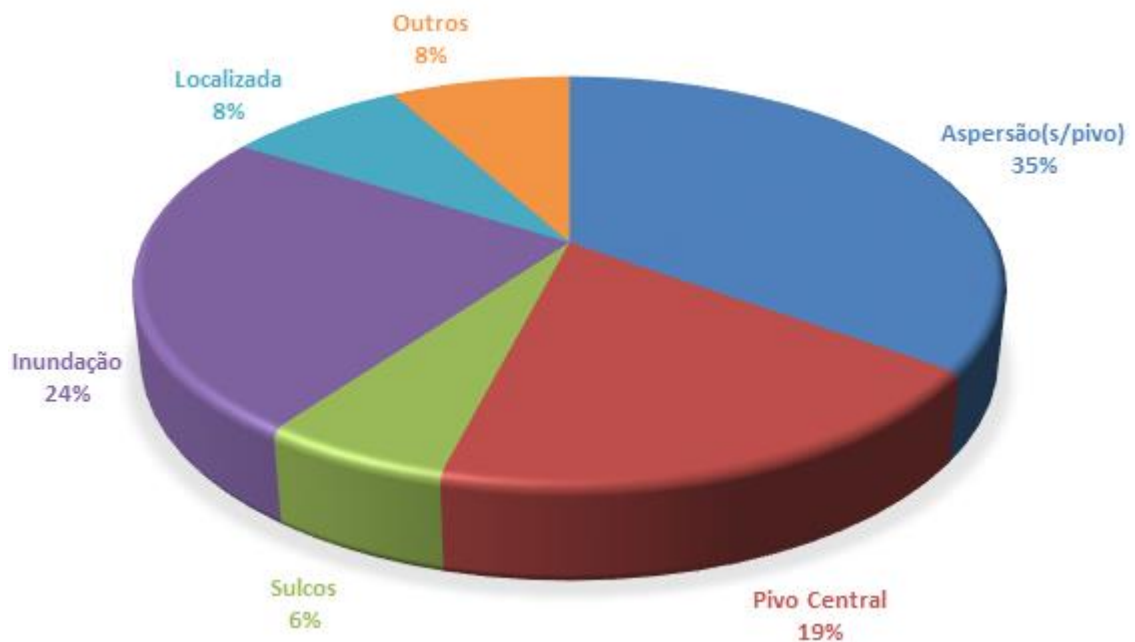
Sendo assim, o dimensionamento das tubulações é um aspecto de grande importância para a questão da eficiência energética, pois as perdas de pressão na tubulação têm conseqüências diretas na vazão de projeto, que por sua vez tem influência na potência da bomba, resultando em maior ou menor consumo de energia.

Desta forma, a escolha adequada da tubulação é importante para a eficiência energética, pois tem conseqüências diretas na vazão de projeto, que influencia diretamente a potência da bomba resultando numa perda maior ou menor de energia (FORTES et al., 2012).

2.3 SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

Segundo Paulino et al. (2011), em relação aos métodos de irrigação utilizados no Brasil, nota-se que a produção agrícola irrigada do país se encontra em um patamar diferenciado quando comparada com o restante dos países. Enquanto grande parte do mundo utiliza métodos de irrigação por superfície, no Brasil a irrigação pressurizada é a que apresenta maior destaque, onde o método por aspersão (sem pivô) é o mais utilizado conforme é mostrado na Figura 1. O mesmo autor ressalta que no estado do Rio Grande do Sul o sistema de irrigação que se destaca é o de inundação, sendo o método por aspersão (sem pivô central) o quarto mais usado no estado.

Figura 1 - Distribuição da área irrigada no Brasil através de diferentes métodos de irrigação



Fonte: Autor (adaptado de Paulino et al., 2011).

A irrigação por aspersão consiste em um método onde a água é aspergida sobre uma determinada área, assemelhando-se a uma chuva, sendo em função do fracionamento do jato de água em pequenas gotas, através da passagem da água pelos bocais dos aspersores sob uma determinada pressão (BERNARDO; SOARES;

MANTOVANI, 2006). Os métodos de irrigação por aspersão são divididos em dois sistemas de irrigação: aspersão convencional e aspersão mecanizada, onde este primeiro a movimentação do sistema se dá de forma manual ou de forma fixa dentro da área irrigada. Já no segundo sistema a movimentação ocorre através de elementos mecânicos para efetuar a distribuição da água (AZEVEDO NETO, 1998).

Conforme Martins et al. (2011), os sistemas de irrigação por aspersão convencional destacam-se pela sua utilização em pequenas e médias áreas, devido a sua ampla adequabilidade em diversos locais. Esse sistema caracteriza-se por apresentar um consumo médio de energia e uma grande exigência em mão-de-obra para efetuar as mudanças de linhas (linha principal fixa e laterais móveis). Em relação ao custo de implantação, apresenta custo por unidade de área mais baixo quando comparado aos sistemas automatizados do tipo pivô central, lateral móvel e irrigação localizada em todas as suas variantes (microaspersão, gotejamento tradicional, subsuperficial). Além do custo reduzido em relação a outros sistemas, possui também a facilidade de manejo, o que o torna o sistema preferencial para produtores rurais que desejam introduzir a irrigação em suas propriedades e para agricultura familiar. (REIS et al., 2017).

Farias et al. (2009) citam que os sistemas de irrigação por aspersão convencionais devem ser projetados para aplicar água da maneira mais uniforme possível na área a ser irrigada, visto que a desuniformidade de aplicação da água diminui o retorno econômico e aumenta o impacto ambiental da irrigação, em função da queda na produtividade das culturas irrigadas e do consumo desnecessário de energia e de água.

2.4 DEMANDA DE RECURSOS HÍDRICOS E ENERGÉTICOS

Na situação atual da agricultura verifica-se a crescente escassez e conflitos em relação ao uso da água e da energia elétrica, evidenciando a preocupação a respeito da utilização destes recursos de forma eficiente. Martins et al. (2011) e Lima et al. (2015), relatam que a disponibilidade de recursos hídricos e energéticos tem sido continuamente esgotada, tornando-se cada vez mais um fator limitante em função da inadequada utilização, seja pela falta de dimensionamento, critério técnico ou até mesmo pelo aumento da demanda mundial.

Segundo Feitosa et al. (2014) a energia elétrica é um dos parâmetros mais importantes tanto para o crescimento econômico quanto para o desenvolvimento social de uma região. A energia elétrica está presente nos mais diversos setores de produção. No caso dos sistemas de bombeamento de água para irrigação, na maioria dos casos é grande a dependência da energia elétrica. Isto é devido a necessidade de manter a produção durante períodos de escassez hídrica e assim suprir as necessidades impostas pelo mercado consumidor que se encontra cada vez mais competitivo.

O consumo de energia em sistemas de irrigação, está em crescente aumento devido a modernização das atividades empregadas. Assim, o uso eficiente de água e energia está assumindo um papel de grande importância na agricultura devido a tendência ascendente do preço da energia, tornando-se um dos principais custos para os irrigantes (RODRÍGUEZ DÍAZ et al., 2011; CÓRCOLES et al., 2016).

Conforme relatado por Sánchez et al. (2008) e Turco et al. (2009) a irrigação é responsável por grande parte do consumo de energia no meio rural, e este é parte considerável dos custos operacionais na produção agrícola irrigada. Este consumo pode ter uma maior amplitude quando não é aplicado nenhum tipo de controle durante a irrigação.

Segundo Lima et al. (2009) os proprietários de sistemas de irrigação, normalmente, não buscam obter informações a respeito do rendimento energético dos equipamentos. De forma geral, os proprietários obtêm os projetos de irrigação desenvolvidos pelos fornecedores dos sistemas de irrigação. Assim, na busca por um investimento inicial menor, muitas vezes ocorre a desconsideração dos custos decorrentes do aumento da relação potência instalada por unidade de área.

O racionamento dos recursos hídricos e energéticos e o seu alto custo nos últimos anos, levou o setor agrícola a conviver com um cenário onde se faz necessária a utilização de artifícios tais como previsões científicas, análises de consumo, planejamento e estratégias para melhor utilização do uso de energia. Através destes estudos visando uma melhor eficiência energética, obtém-se melhoria na competitividade, através da redução de custos, bem como minimização dos problemas relacionados à energia (MOUSAVI-AVVAL et al., 2011).

De acordo com Moraes et al. (2014) e Camboim et al. (2014), os excessivos gastos com energia em sistemas de irrigação são decorrentes de problemas como:

procedimentos operacionais; equipamentos de bombeamento de baixo rendimento (velhos, antigos e mal dimensionados tecnicamente); de linhas adutoras com excesso de perda de carga; deficiência da manutenção preventiva ou corretiva; baixa eficiência dos equipamentos elétricos ou hidráulicos; contratos de energia elétrica inadequados e inadequada lâmina d'água aplicada.

James et al. (2002), relatam que na maioria dos sistemas de distribuição de água em uma escala mundial observa-se potencial de redução de, pelo menos, 25% no consumo de energia, através da adoção de medidas de eficiência energética e hidráulica.

Muitas ações baseadas na economia destes recursos estão ligadas a sistemas de bombeamento, principalmente no que se refere a sistemas de irrigação. Desta forma, busca-se dispositivos e aprimoramentos que tornem o uso desses recursos cada vez mais eficiente em sistemas de irrigação (FERNANDES et al., 2015). Assim, através da redução dos gastos com a energia elétrica, serão observados retornos aos produtores em forma de diminuição dos custos de produção.

Rodríguez Diaz et al. (2009), Cobo et al. (2011) e Navarro Navajas et al. (2012), referenciam na literatura a possibilidade da setorização nos projetos de irrigação, sendo destacados os possíveis impactos positivos e potenciais para obter resultados a respeito da economia de energia de forma mais eficaz, através da utilização de sistemas de irrigação setorizados.

Estudos realizados na Espanha mostraram importantes ganhos econômicos em sistemas de irrigação após terem sido realizadas auditorias energéticas, que resultaram em maior eficiência energética dos sistemas como um todo (MORENO et al., 2010).

2.5 MÉTODOS DE CONTROLE DE VAZÃO

No setor da agricultura irrigada gastos com energia elétrica são responsáveis por cerca de 30% dos custos de produção (ARAUJO et al., 2011). Estes valores muitas vezes estão ligados a ineficiência do sistema de irrigação por razão de dimensionamento, equipamentos e até mesmo pela falta de manejo do sistema, resultando em gastos de energia (MESQUITA, 2009).

Além disso, o desperdício de energia elétrica encontra-se em um patamar muito elevado, onde a cada ano no Brasil, verifica-se uma perda de energia elétrica equivalente à produção de duas usinas de Itaipu, sendo que em 2006 a perda de energia elétrica foi da ordem de 38 bilhões de kWh, o que corresponde a 10% do consumo interno (ZOCOLER et al., 2008).

Assim a utilização de estratégias que possam reduzir ou controlar o consumo de energia são alternativas que possibilitam a redução dos custos relacionados à energia. Portanto, se faz necessário uma análise do desempenho das estações de bombeamento de modo a determinar estratégias de gerenciamento para aumentar a eficiência energética (CÓRCOLES et al., 2015). Para atender estas estratégias de modo a realizar o controle de vazão em sistemas de irrigação, são necessários os conhecimentos de alguns artifícios ou técnicas, que podem ser mecânicos, elétricos ou eletrônicos.

Segundo a agência americana NRCS (2014), destaca os diferentes métodos de controle de vazão para aplicação de água nas diversas posições do sistema de irrigação que podem ser utilizados, pode-se destacar: a) os métodos que não apresentam variação da velocidade da bomba hidráulica tampouco do motor de acionamento; b) os métodos que apresentam variação da velocidade da bomba hidráulica e não do motor elétrico; c) os métodos que apresentam variação tanto da velocidade da bomba hidráulica quanto do motor elétrico.

O mesmo órgão, na modalidade de controle de vazão sem variação da velocidade da bomba hidráulica e do motor pode-se citar: a) controle por estrangulamento da válvula; b) retorno de excesso para o manancial (recirculação ou desvio, "by-pass"); c) uso de válvula reguladora de vazão na linha principal; d) uso de válvulas reguladoras de vazão na linha secundária.

O uso de válvulas é o método mais comum de variar a vazão em sistemas de irrigação em pequena escala. Na maioria das aplicações, o controle da taxa de fluxo é feito através do uso de uma válvula na linha de sucção, linha de pressão ou linha de by-pass sem a utilização de controle de velocidade do impulsor da bomba, (ROCAMORA et al., 2013).

Segundo Camoirano e Dellepiane (2005), os sistemas de bombeamento possuem grandes possibilidades de adequação a projetos para conservação de energia. Em sistemas de irrigação convencionais são utilizados métodos de controle

da taxa de aplicação, sendo o método mais comum, o uso de válvulas para o controle de vazão do sistema, sem alterar a rotação do conjunto motobomba. Deste modo, o sistema opera fora do ponto de trabalho projetado, assim modificando a curva de carga, gerando grande desperdício de energia elétrica e diminuindo a vida útil dos equipamentos (ZOCOLER et al., 2012; ARSLAN; SAHIB., 2016).

Na modalidade de controle de vazão com variação de velocidade da bomba hidráulica e sem variação do motor citam-se: a) combinação de polias e correias e b) outras formas semelhantes (CARVALHO; OLIVEIRA., 2008).

Na modalidade de controle de vazão com variação de velocidade da bomba hidráulica e do motor cita-se o uso dos inversores de frequência da corrente elétrica, aplicados aos sistemas de bombeamentos conforme Bridi (2013).

Os dimensionamentos dos motores são realizados para atender a potência máxima necessária. Assim, quando atuam na máxima velocidade de rotação de forma constante, fornecem a máxima carga projetada. No entanto, com a redução da carga, podem ser alcançadas expressivas economias de energia, quando a velocidade de rotação do motor é reduzida para assim coincidir com a carga demandada (SAIDUR; MAHLIA., 2010).

A utilização dos inversores de frequência segundo Sobhy et al. (2011), Moraes et al. (2011), Lamaddalena e Khila. (2012) e Lima et al. (2015), resulta em melhoria do desempenho operacional do conjunto motobomba utilizados na irrigação tipo pivô central. Este uso ajusta a rotação do sistema em função das condições topográficas do local, conseqüentemente, implica em redução do consumo de energia, através do aproveitamento da sua altura manométrica resultante da diferença de nível em declive. Köpp (2015) relata que a utilização de inversores de frequência apresenta-se como uma grande possibilidade de inserção na lavoura de arroz, entretanto, a baixa qualidade da energia fornecida em determinadas localidades, limita o funcionamento do equipamento, uma vez que o mesmo requer estabilidade de tensão para funcionamento.

2.5.1 Controle de vazão sem variação da velocidade da bomba hidráulica e do motor

O método de controle por válvula de estrangulamento consiste em controlar a vazão do sistema em função da abertura e fechamento parcial de uma válvula instalada em série com a bomba. Esse tipo de controle é possível em bombas centrífugas porque estas possuem um limite inerente maior de pressão na descarga, portanto, a bomba pode sofrer estrangulamento na descarga sem sofrer danos. (AMERICO, 2004).

Guimarães (2008), cita que através do fechamento progressivo da válvula estrangulamento a vazão do sistema vai sendo reduzida, conseqüentemente, a pressão vai aumentando gradualmente na qual se transforma em perda de carga adicional.

Esse método é comumente utilizado em processo onde se faz necessário o controle de vazão, e é um pouco mais eficiente, em termos energéticos, quando comparados aos métodos de controle de by-pass.

O método conhecido como desvio “by-pass” apresenta o simples princípio de fazer com que parte do fluido da descarga da bomba retorne novamente para a sucção. Esse processo de desvio é realizado através de uma válvula de controle, embora seja bastante difundido em bombas de água de chillers de prédios comerciais. O controle by-pass também é comum em bombas de deslocamento positivo (AMERICO, 2004).

Arslan e Sahib (2016), relatam que o método mais eficiente encontrados em seu estudo foi através da utilização de by-pass que proporcionou economia de 66% seguido do método de estrangulamento da válvula. Entretanto os mesmos autores salientam que a utilização destes métodos só é viável quando não se tem a possibilidade do uso de métodos que alteram a rotação do sistema.

2.5.2 Controle de vazão com variação de velocidade da bomba hidráulica e sem variação do motor

A transmissão por meio de correias é uma das técnicas mais utilizadas no setor industrial para realizar o acoplamento de motores e máquinas. Isto ocorre devido à

facilidade de ajustar a velocidade do motor a da máquina ou, no caso de irrigação, a bombas hidráulicas, permitindo diferentes geometrias de conexão entre o motor e a respectiva carga (GUIMARÃES, 2008). A alteração de velocidade de rotação da máquina movida ocorre através da relação de combinação de tamanhos de polias.

Este tipo de acoplamento, no entanto apresenta, perdas de energia com valores consideráveis que, podem ser melhorados através da utilização de correias que proporcionem maior eficiência, em função do seu formato. A eficiência está relacionada com o tipo de correia utilizada, além disso, está eficiência tem relação ao longo do tempo em função de deslizamentos nas polias e também pelos desgastes causados nos equipamentos pelos sua utilização.

Este tipo de método opera de forma que o motor mantenha-se com velocidade constante, e através do acoplamento, realize a alteração da velocidade de rotação da bomba. Desta forma, com o aumento da carga na saída do acoplamento irá aumentar a carga de torque do motor (SAIDUR et al., 2012).

Entretanto este tipo de controle não apresenta redução no consumo de energia, apenas é uma forma de adequação para atender uma determinada situação de necessidade (CAMPANA et al., 2000).

2.5.3 Controle de vazão com variação de velocidade da bomba hidráulica e do motor

De acordo com a agência NRCS (2010), quando se trata do consumo de energia em sistemas de bombeamento, o melhor método para reduzir o consumo de energia é através do controle de velocidade variável das bombas de modo a atender as demandas variáveis, uma vez que uma ligeira redução na velocidade pode resultar em uma redução expressiva na potência de entrada do sistema.

Os inversores de frequência, segundo Panesi (2006) são dispositivos eletrônicos, que atuam sobre a frequência da corrente elétrica dos motores, variando a sua rotação. Considerando que as bombas hidráulicas operam com variação de vazão e que estas estão linearmente relacionadas com a rotação da máquina, a utilização dos inversores possibilita o ajuste da vazão através da alteração da rotação do sistema.

Segundo Bezerra e Silva (2009), o inversor de frequência, consome de 4 a 10% da energia absorvida para o acionamento das motobombas. Estes autores citam que o rendimento do inversor diminui com a redução da frequência de saída e com a redução da carga acionada. Quando aplicado corretamente, essas perdas tornam-se insignificantes se comparado com a redução do consumo de energia proveniente da operação da bomba com rotação variável. Na maioria dos sistemas de elevação de água que requerem o controle de vazão, os mesmos autores, afirmam que o controle mais eficiente de velocidade é através do controle da velocidade de rotação da bomba.

Segundo Aquino et al. (2008), em bombeamentos de água nos quais é requerido velocidade variável, o uso de inversores de frequência apresenta grande potencial de economia tanto de água quanto de energia. Relatam ainda que os benefícios obtidos com o uso de inversores vão além da redução do consumo energético como o aumento da vida útil dos equipamentos do sistema, pois a aplicação destes equipamentos permite o controle preciso da vazão, proporcionando o mesmo efeito de estratégias mecânicas.

Conforme citado por Lima et al. (2015) o uso do inversor de frequência mostra-se um equipamento viável, eficaz e capaz de realizar a variação da rotação conforme a necessidade de pressão estabelecida em pontos considerados críticos na área irrigada. Além de apresentar melhoria em relação ao desempenho operacional do conjunto motobomba.

Assim para conferir confiabilidade e credibilidade ao tema de pesquisa proposto neste projeto, na sequência da revisão bibliográfica, serão condensados alguns trabalhos relevantes a respeito do tema.

Moraes et al. (2014) estudando a redução dos custos de energia elétrica para irrigação utilizando inversores de frequência em um protótipo de pivô central, encontrou resultados para diferentes declividades linha lateral (0; 10; 20 e 30%), que foram capazes de proporcionar economia de energia elétrica de aproximadamente 48; 37; 26 e 16 % para as respectivamente inclinações.

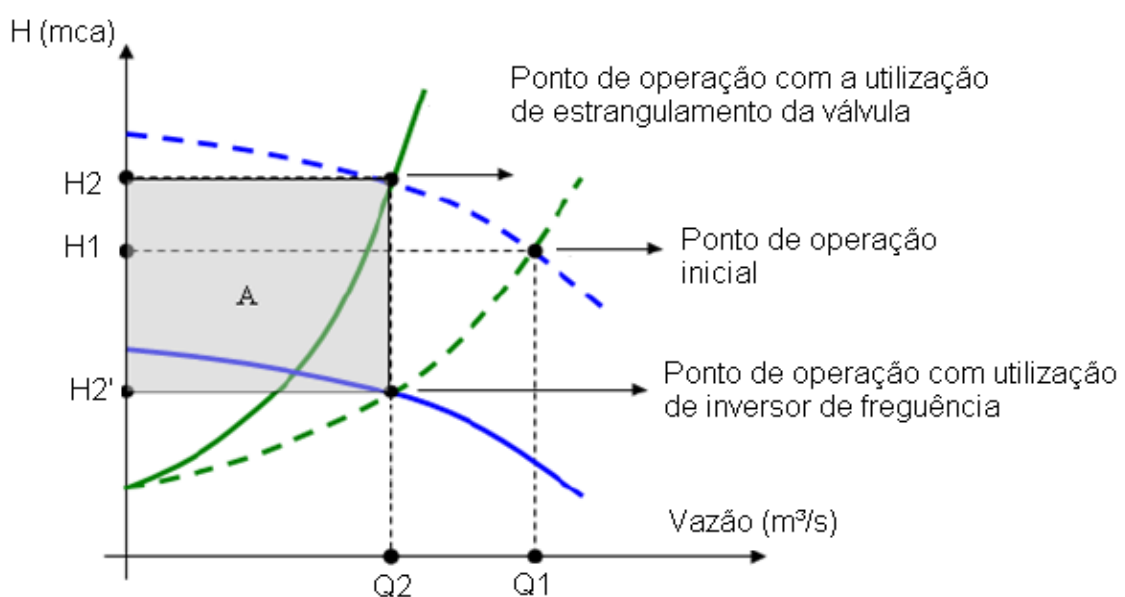
Trabalho realizado por Araújo et al. (2004) avaliando a aplicação do inversor de frequência em um sistema de irrigação por aspersão com 4 linhas manejadas alternadamente, onde foram feitas diferentes aberturas de 1, 2, 3 e 4 linhas simultaneamente. Os autores encontraram resultados que permitiram avaliar que o sistema com inversor de frequência, apresenta redução do consumo de energia na

ordem de 58%. e a pressão de serviço dos aspersores foi mantida, variando apenas a vazão requerida, conforme o manejo de cada uma das linhas.

Oliveira Filho et al. (2000) avaliaram o comportamento do índice de carregamento, rendimento, fator de potência e rotação de motores elétricos utilizados sistemas de irrigação tipo pivô central, com e sem a utilização de inversores de frequência. Concluíram que com a utilização do inversor em relação ao rendimento, apresenta acréscimo na ordem de 6%. Já o fator de potência pode ser corrigido a valores próximos a unidade, desta forma, não necessitando do uso de banco de capacitores para realizar a correção. Assim, a utilização deste equipamento se apresenta como alternativa para a racionalização do uso da energia elétrica em áreas com diferentes declividades com sistemas de irrigação tipo pivô central.

Fortes et al. (2012) mostram o comportamento da curva característica de uma bomba com aplicação de dois métodos de controle de vazão utilizados em sistema de bombeamento de água. A utilização de válvulas estranguladora e uso de inversor de frequência conforme a Figura 2, onde a região A do gráfico representa um menor consumo de energia através do utilização do inversor de frequência em comparação com a utilização de válvulas de estrangulamento.

Figura 2 - Comparação do comportamento da curva da bomba através da utilização métodos de controle de vazão (válvula estranguladora e inversor de frequência)



Fonte: Fortes et al. (2012).

Em função do que foi supracitado é possível constatar que a utilização de metodologia para a redução de energia são de grande importância para a utilização em sistema de irrigação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos empregados para o desenvolvimento de todas as etapas do proposto estudo. Deste modo, serão expostos os procedimentos utilizados no experimento que foram desenvolvidos de forma teórica.

3.1 DESENVOLVIMENTO DOS PROJETOS DE IRRIGAÇÃO

Os projetos de irrigação utilizados neste estudo foram desenvolvidos de forma teórica atendendo requisitos básicos de um projeto de irrigação. Além disso, a opção de fazer de forma teórica foi para atender os diferentes tamanhos de áreas juntamente com diferentes espaçamentos entre aspersores, extensão e números de ramais de irrigação. Para todas as situações desenvolvidas foram aplicados os métodos de controle de vazão. Para realizar o dimensionamento foi utilizado a planilha eletrônica do Excel e o programa Autocad da Autodesk®.

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

Neste estudo foi utilizado o sistema de distribuição de água por aspersão do tipo convencional móvel, onde foram realizados os dimensionamentos de diferentes projetos de sistema de irrigação para atender pequenas áreas.

Para realizar o dimensionamento dos sistemas de irrigação foram coletados dados de evapotranspiração de referência (ET_o) para o município de Santiago.

Neste trabalho considerou-se irrigação de pastagem anual de verão, utilizando-se os coeficientes de cultura e a metodologia proposta por Doorenbos e Kassam (1994) para manejo de água ao longo do ciclo.

A lâmina de irrigação a ser aplicada foi determinada de modo a atender no mínimo o critério de ser igual ou inferior a capacidade real de água no solo (CRA). Para fins de cálculo da lâmina líquida, a eficiência de aplicação fixada para os sistemas de irrigação foi de 85% a qual é considerada adequada para sistemas de irrigação por aspersão (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

Para determinar o turno de rega possível entre as irrigações foram utilizados dados de capacidade real de água no solo (CRA) e evapotranspiração da cultura (ETc). A partir destes dados determinou-se a taxa de aplicação necessária para atender a demanda. Obteve-se um turno de rega máximo de 7 dias, sendo este valor adotado em função dos dados calculados anteriormente. Considerou-se que um trabalhador deve ter um dia de folga na semana, e foram estabelecidos para fins de projeto, 6 dias úteis para realizar as irrigações.

O tempo de irrigação diário foi definido de modo a não ultrapassar dez horas, devido a questões trabalhistas legais. Do mesmo modo, o tempo mínimo de trabalho foi definido em aproximadamente oito horas diárias, pois deste modo, quanto maior o tempo de aplicação de água para uma mesma área, menor será a vazão requerida pelo sistema e, conseqüentemente, redução da potência requerida pela motobomba.

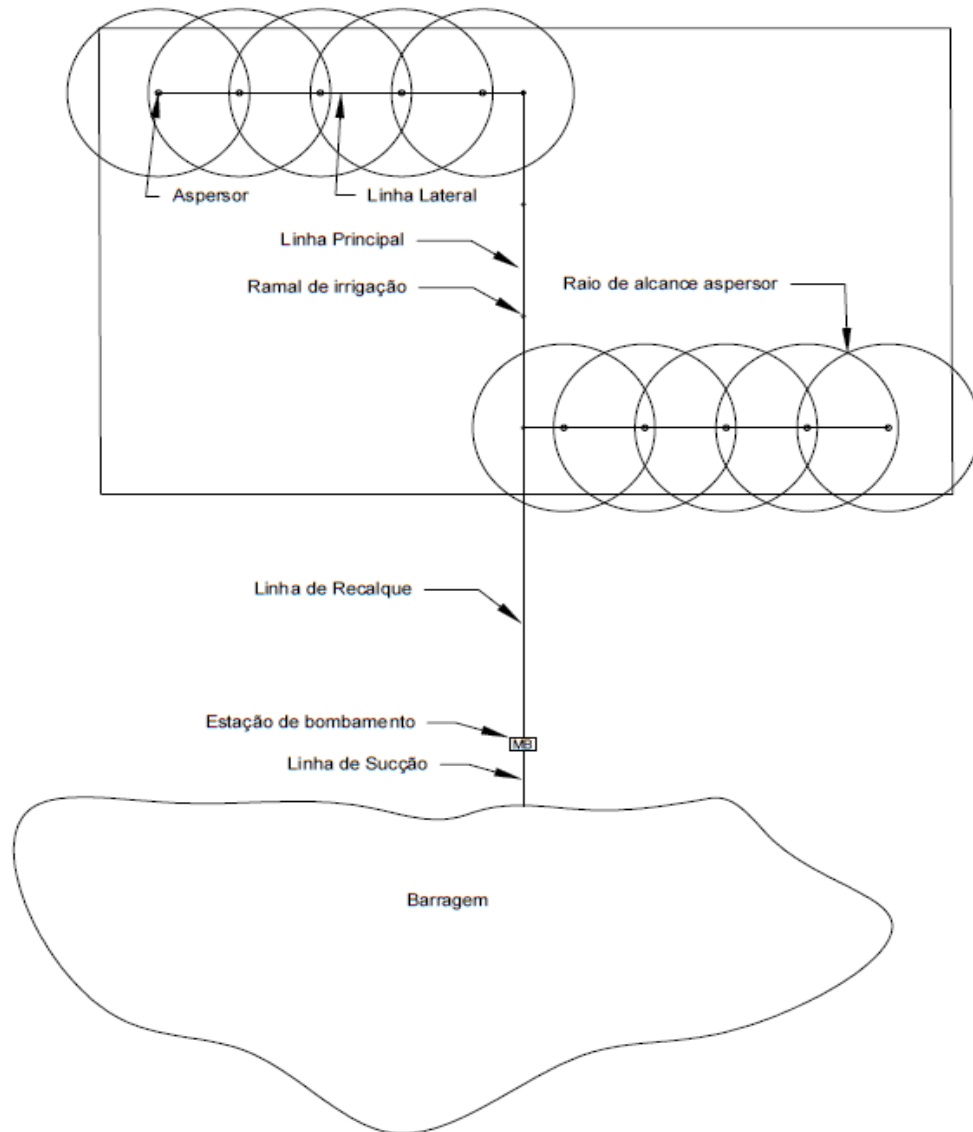
Para obter um melhor aproveitamento dos recursos e também a redução em relação aos custos com tubulação e conjunto motobomba do sistema de irrigação, realizou-se à divisão dos sistemas em forma de setores de irrigação, com diferentes números de linhas laterais operando simultaneamente. Desta maneira, pode-se atender toda a área pretendida seguindo os critérios supracitados.

3.3 CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional foram dimensionados de forma a atender áreas irrigadas com tamanhos que variaram de 1, 3, 5, 7 e 10 hectares. Assim, as distribuições das linhas de irrigação do sistema foram configuradas de maneira a utilizar diferentes tamanhos de áreas, compreendendo diferentes combinações de espaçamentos entre aspersores e ramais de irrigação. Desta forma os espaçamentos dos aspersores e dos ramais considerados foram de 12 x 12 m; 12 x 18 m; 18 x 18 m; 18 x 24 m e 24 x 24 m, distribuídos de maneira a atender na área supracitadas.

O dimensionamento dos diferentes sistemas de irrigação considerou a linha principal do sistema posicionada de forma centralizada na área a ser irrigada. Na Figura 3 é apresentado uma representação esquemática do sistema de irrigação padrão contendo as linhas laterais em ambos os lados da principal, além dos seus elementos básicos.

Figura 3 - Representação esquemática de um sistema de irrigação



Fonte: Acervo do autor.

A altura para instalação dos aspersores nas linhas de irrigação, que foram consideradas em todas as configurações dos sistemas foi de 2 (dois) metros em relação ao solo. Os aspersores utilizados neste estudo foram selecionados a partir de catálogos de fabricantes nacionais.

Os aspersores empregados possuem diferentes diâmetros de bocais para atender à necessidade hídrica de acordo com o espaçamento entre aspersor e ramal

de irrigação. Na Tabela 1 estão apresentadas as características técnicas dos modelos utilizados.

Tabela 1 - Características técnicas dos aspersores selecionados e utilizados os sistemas de irrigação

Espaçamento	ASPERSOR						
	Marca	Modelo	∅ Bocais (mm)	Vazão (m ³ h ⁻¹)	∅ molhado (m)	Pressão de serviço (m c a)	Taxa de aplicação (mm h ⁻¹)
12X12	Agropolo	NY 25	3,5 x 2,5	0,972	26	25	6,7
12X18	Fabrimar	Midi	4,0 x 2,8	1,41	27	25	6,5
18X18	Fabrimar	Midi	5,2 x 3,2	2,14	29	25	6,6
18X24	Fabrimar ECO	A232	5,6 x 3,2	3,08	33	40	7,1
24X24	Fabrimar ECO	A232	6,4 x 3,2	3,9	38	40	6,8

A taxa de aplicação considerada como base no estudo para os diferentes espaçamentos foi de 6.48 mm h⁻¹. Os aspersores utilizados foram do tipo círculo completo (360°), selecionados de acordo com os espaçamentos entre aspersores e ramais. Desta forma cada aspersor irá conduzir uma determinada vazão, conforme Tabela 1.

3.4 ALTURA GEOMÉTRICA DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

Para determinar as alturas geométricas nos pontos de inserção dos ramais de irrigação nos diferentes sistemas de irrigação foram adotados valores de declividades para linha de sucção, linha de recalque e linha principal de 4%, 7% e 6%, respectivamente. As linhas de irrigação em todos os projetos foram consideradas em nível.

3.5 ALTURA MANOMÉTRICA DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

As alturas manométricas dos pontos de inserção dos ramais de irrigação foram determinadas através da soma da perda de carga na linha principal em cada configuração somada a sua respectiva altura geométrica do ponto de inserção.

Utilizou-se, neste estudo para determinar a perda de carga principal ou distribuída ao longo da linha principal e das linhas de irrigação a fórmula de Hazen-Williams adotando-se o coeficiente de rugosidade do material das tubulações de PVC, onde o valor adotado do coeficiente C do material é 150.

As perdas de carga secundária ou localizada na linha de irrigação foram determinadas através do método dos coeficientes de atrito das peças. As determinações dos diâmetros das tubulações de foram definidas de maneira que a velocidade máxima de escoamento não ultrapasse 2 m s^{-1} , sendo utilizados para as tubulações de sucção diâmetros comerciais acima dos definidos para as respectivas tubulações de recalque.

Através das definições das alturas manométricas e vazões requeridas por cada um dos sistemas de bombeamentos foram determinadas a potência necessária para cada uma das situações estabelecidas, sendo adequadas as potências necessárias de acordo com as potências comerciais conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Definições das potências necessárias e as utilizadas comercialmente em cada uma das situações estudadas

Área irrigada (ha)	Potência necessária (cv)					Potência comercial utilizada (cv)				
	Espaçamentos					Espaçamentos				
	12x12	12x18	18x18	18x24	24x24	12x12	12x18	18x18	18x24	24x24
1	3,89	5,03	5,33	8,72	5,61	5	7,5	7,5	10	7,5
3	11,74	13,93	13,79	14,98	14,01	15	15	15	15	15
5	22,3	24,3	24,36	25,12	22,65	25	25	25	30	25
7	29,08	28,86	28,71	35,3	33,46	40	40	40	40	40
10	40,21	44,5	47,55	57,26	55,08	50	50	50	60	60

3.6 MÉTODOS DE CONTROLE DA VAZÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO

Com o objetivo de quantificar e analisar as possíveis reduções no consumo de energia nos sistemas de irrigação foram aplicados métodos de controle da vazão da aplicação de água nas diferentes posições das linhas de irrigação. Desta forma, os métodos utilizados para realizar a estimativa do consumo de energia foram:

- a) nenhum controle e tempo de irrigação fixo - M0 (método de referência);
- b) nenhum controle e tempo de irrigação variável - M1;
- c) controle por estrangulamento da válvula e tempo de irrigação fixo - M2;
- d) uso de inversor de frequência e tempo de irrigação fixo – M3.

A aplicação dos métodos de controle de vazão foi implementada de maneira a considerar a alteração das características que norteiam cada um dos métodos. Desta forma, nos dois primeiros métodos, a característica na qual foi alterada foi unicamente o tempo de funcionamento do sistema de irrigação, sendo considerado para o método M0 um tempo de funcionamento único, no método M1 foi utilizado o tempo de funcionamento de acordo com a vazão necessária para o setor a ser irrigado. Para o terceiro método (M2) foi considerado a altura manométrica total necessária para cada sistema, e o rendimento nominal do conjunto motobomba para atender a demanda necessária. Já para o método M3 foram considerados a vazão e a altura manométrica para cada um dos setores considerando o rendimento do conjunto.

3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através dos métodos de controle de vazão citados foi alterado o comportamento referente ao consumo de energia elétrica dos sistemas de irrigação desenvolvidos. Para avaliar os resultados encontrados considerou-se, para fins de análise dos resultados, o tratamento M0 como testemunha. Foram quantificados os consumos unitários de energia gasto em função das áreas irrigadas e dos espaçamentos entre os aspersores e ramais. A comparação entre os tratamentos estabelecidos foi feita através do consumo de energia, onde verificou-se a economia do consumo de energia entre os tratamentos.

4 RESULTADOS E DISCUSÕES

Os resultados estão apresentados neste capítulo de forma a analisar os benefícios e as consequências das medidas de eficiência energética em sistema de irrigação por aspersão, onde realizou-se a comparação entre os três métodos de controle de vazão em relação ao sistema sem controle, considerou-se cinco diferentes tamanhos de áreas e cinco diferentes espaçamentos de ramais de irrigação e aspersores, para identificação e quantificação do consumo de energia elétrica.

4.1 CONSUMO DE ENERGIA POR UNIDADE DE ÁREA

Em uma análise do consumo de energia nos sistemas de irrigação tomando como referência o método sem controle de vazão (M0) é possível verificar que o comportamento do consumo de energia, onde foi considerando de maneira unitário, sendo o consumo por milímetro por unidade de área ($\text{kWh mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$). O consumo apresenta uma tendência de redução em relação ao aumento da área irrigada, conforme mostrado na Figura 4, que representa a relação do consumo em cada um dos espaçamentos entre aspersores e ramais utilizados, com relação aos cinco tamanhos de área analisadas. Estes resultados encontrados concordam com o estudo de Viera et al. (2011), onde analisando áreas de 3 a 50 ha verificou que o custo de energia elétrica apresentou tendência de queda em relação ao aumento da área irrigada.

Para realização das avaliações, foram considerados de acordo com a necessidade de cada área, a utilização do mesmo tipo de motobomba com potências instaladas idênticas, de modo a atender o dimensionamento correto de cada sistema de irrigação. Em função disto, em algumas situações não foi possível utilizar as mesmas potências dos demais sistemas, como no caso do espaçamento de 12 x 12 m para 1 ha, onde a potência dimensionada foi menor. Já para o espaçamento 24 x 24 m para 10 ha a potência foi maior que a utilizada nos outros espaçamentos na mesma área, além deste, o espaçamento de 18 x 18 m nas áreas de 1, 3 e 10 ha necessitaram a utilização de potências instaladas superiores ao demais espaçamentos, conforme foi relatado na Tabela 2 anteriormente. Este fato ocorreu

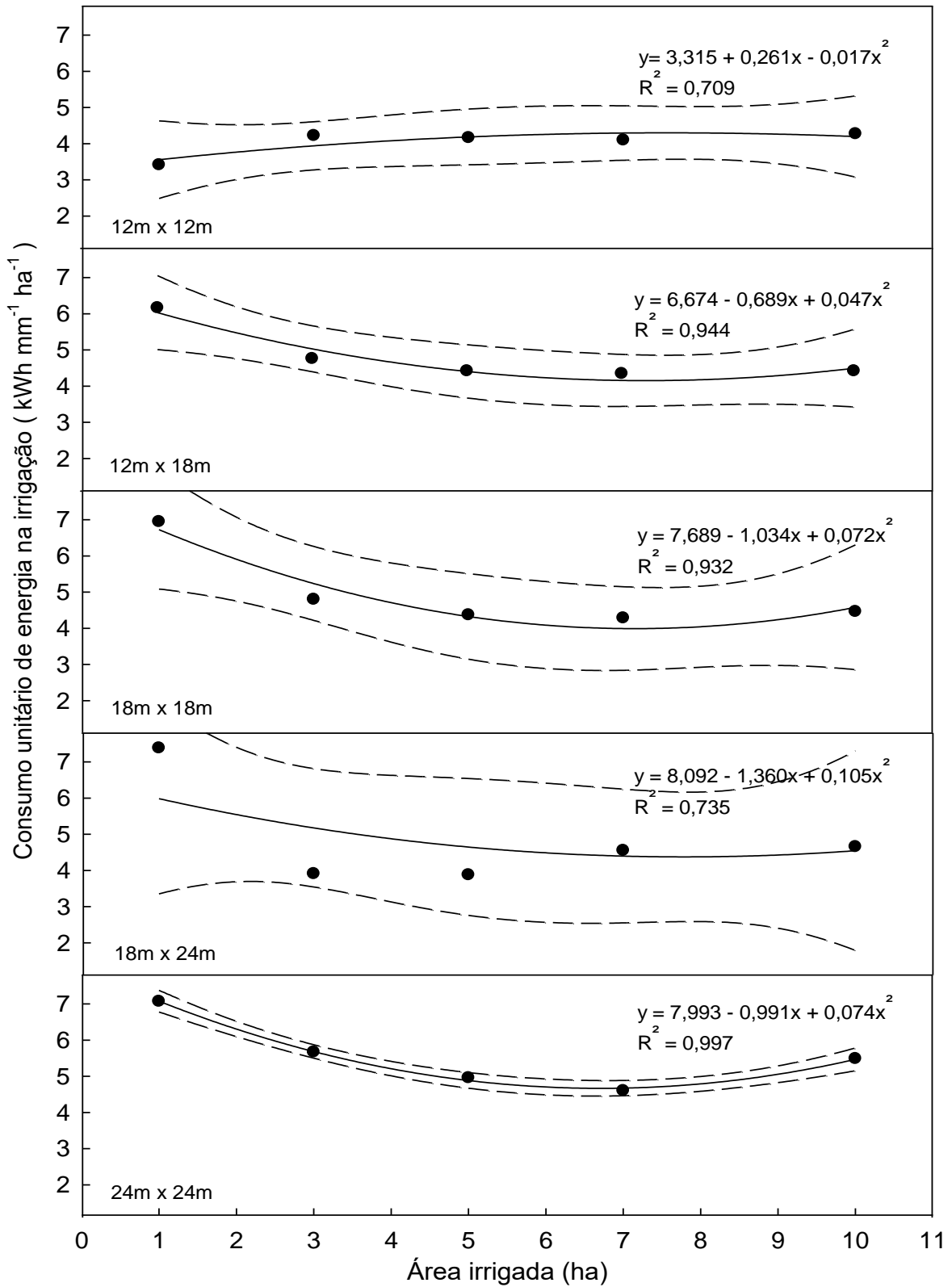
para atender o correto dimensionamento, de tal forma que não ocorresse um superdimensionamento e nem uma sobrecarga no sistema.

Em função disto, pode ser visto na Figura 4, que o menor consumo que ocorreu no espaçamento 12 x 12 m para atender a área de 1 ha, mostrando assim um comportamento contrário em relação ao aumento da área irrigada. Comportamento semelhante, entretanto, de forma inversa, pode ser visto no espaçamento 24 x 24 m, onde o consumo apresentou tendência de aumento na área de 10 ha.

O consumo de energia de maneira geral apresentou comportamento de redução com o aumento da área irrigada, com exceção do espaçamento de 18 x 24 m que a partir de 3 ha ocorreu um pequeno aumento em relação as áreas irrigadas.

Os dados analisados ajustaram-se a uma equação polinomial de 2° ordem, através de uma análise de regressão entre consumo de energia com o aumento da área irrigada. Os coeficientes de determinação mostraram uma boa aderência das equações de regressão aos dados analisados. Desta forma, o espaçamento que apresentou o melhor valor de R^2 foi o 24 x 24 m com valores de 0,997, sendo seguido pelo 12 x 18 m, 18 x 18 m, 18 x 24 m com valores de 0,944, 0,932, 0,735 respectivamente. O espaçamento 12 x 12 m que apresentou o pior desempenho em relação ao coeficiente de determinação com valor de 0,709.

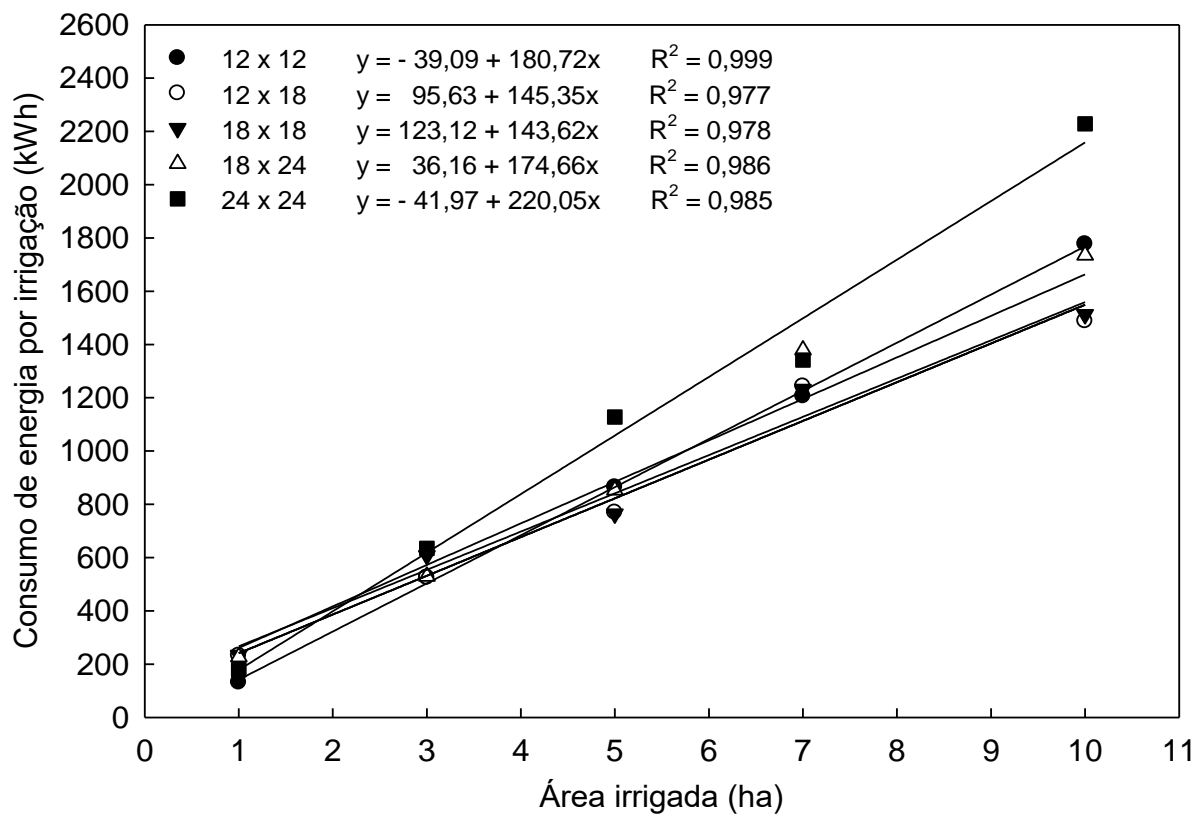
Figura 4 - Comportamento do consumo unitário de energia elétrica (kWh mm⁻¹ ha⁻¹) em função da área irrigada (ha) em cada combinação de espaçamento



O consumo de energia total necessário para realizar uma irrigação é apresentado na Figura 5. Pode-se verificar que em todos os espaçamentos adotados o consumo total de energia apresentou comportamento linear crescente com o aumento da área irrigada, sendo estes resultados de acordo com os encontrados por Rodríguez Díaz et al. (2011) em estudo realizado em diferentes regiões da Espanha.

Os dados analisados apresentaram um comportamento linear onde os valores de coeficiente de determinação foram superiores a 0,97 em todos os espaçamentos estudados.

Figura 5 - Consumo de energia necessária para realizar uma irrigação em cada tamanho de área com o método M0



4.2 AVALIAÇÃO DO CONSUMO UNITÁRIO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

O consumo de energia elétrica foi analisado em função dos diferentes espaçamentos entre aspersores e ramais de irrigação adotados. Estes comportamentos estão representados na Figura 6 que mostra a variação do consumo

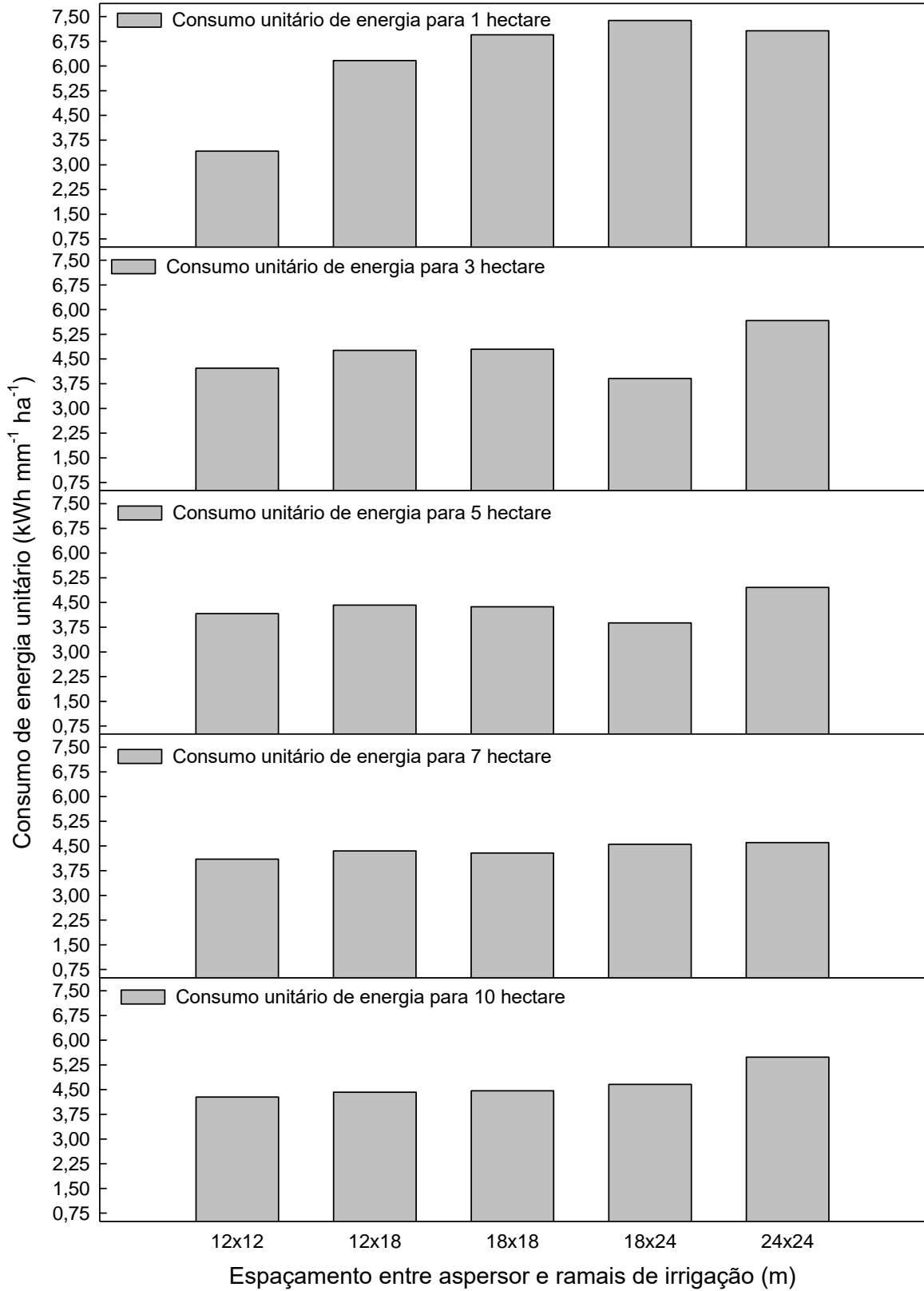
de energia elétrica em todos os tamanhos de áreas estudados em relação aos espaçamentos.

É possível verificar que o consumo unitário de energia apresentou um aumento na comparação entre os espaçamentos, onde verifica-se que os menores valores foram encontrados nos espaçamentos de 12 x 12 m, apresentando valores entre 3,4 a 4,27 kWh mm⁻¹ ha⁻¹. Já para o espaçamento 24 x 24 m os valores encontrados foram 5,48 a 7,07 kWh mm⁻¹ ha⁻¹.

Além disso, pode-se verificar que através da Figura 6, que o comportamento com consumo de energia mostrou-se semelhante em valores a partir de 3 ha onde os valores de consumo variaram de 3,88 kWh mm⁻¹ ha⁻¹ para área de 5 ha e 5,67 kWh mm⁻¹ ha⁻¹ para área de 3 ha. Sendo os maiores valores de consumo de energia encontrados para a área de 1 ha.

Os valores encontrados apresentaram-se de forma crescentes em relação ao aumento dos espaçamentos estudados, sendo que os maiores valores de consumo de energia de forma geral foram encontrados nos espaçamentos de 24 x 24 m.

Figura 6 - Comportamento referente ao consumo de energia elétrica em relação aos espaçamentos entre aspersores e ramais de irrigação em todas as áreas estudadas com a utilização do método M0



Analisando os gráficos da Figura 6, pode ser verificado que os maiores consumos unitários de energia ocorreram nos espaçamentos da área de 1 ha, com exceção do espaçamento de 12 x 12 m em função do que foi citado em relação conjunto motobomba. conforme é mostrado na tabela 2 na página 34.

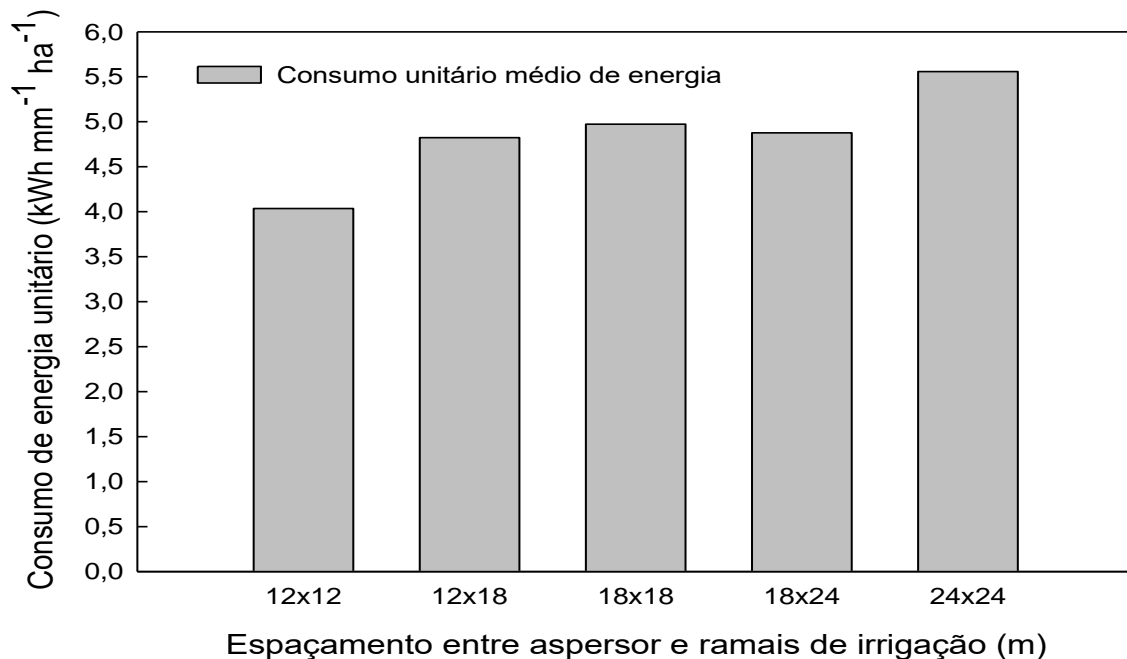
Moreno et al. (2016) em estudo realizado com cultivo de milho com duas parcelas irrigadas por aspersão, verificaram que o consumo de energia apresentou valores ligeiramente maiores no espaçamento de 15 x 15 m em relação ao espaçamento de 18 x 18 m. Este resultado é semelhante ao encontrados neste estudo em áreas maiores que 1 ha. Onde os valores de consumo de energia para o espaçamento de 18 x 18 m nas áreas de 5 e 7 ha foram menores em relação ao 12 x 18 m. Já nas áreas de 3 e 10 ha este comportamento não ocorreu, entretanto, a diferença entre os valores de consumo foi mínima.

De maneira geral pode-se verificar que a medida que aumenta o espaçamento entre aspersores e ramais de irrigação o consumo unitário de energia tende a crescer. Isto pode ser verificado na Figura 7, que mostra a média do consumo unitário ($\text{kWh mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$) em função dos espaçamentos.

Os valores encontrados neste estudo estão de acordo com o relatado por Marouelli e Silva (1998), que apresentaram valores de consumo de energia para sistemas de irrigação convencional com variação de 3 a 6 $\text{kWh mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$. Já no estudo realizado por Lima et al. (2009) com o uso de três pivô central, encontraram resultados de energia total ($\text{kWh mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$) com valores de 5,37; 8,30 a 12,40 sendo estes valores relativamente superiores aos encontrados neste estudo, entretanto os valores normalizados para os pivôs foram de 31,24; 12,89 e 14,91 $\text{kWh mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$ para fornece um milímetro de água em pelo menos 80% da área irrigada quando a altura geométrica é igual a 100 m.

O espaçamento 18 x 24 m pode-se verificar que o consumo apresentou uma pequena redução em relação ao espaçamento ao 18 x 18 m, mostrando assim uma possível utilização deste espaçamento, em função de uma possível redução na quantidade no número de tubulações que seriam utilizadas, além disso, a possível redução nos custos com o uso deste espaçamento.

Figura 7 - Comportamento do consumo unitário médio de energia em função dos espaçamentos entre aspersores e ramais de irrigação para o método M0



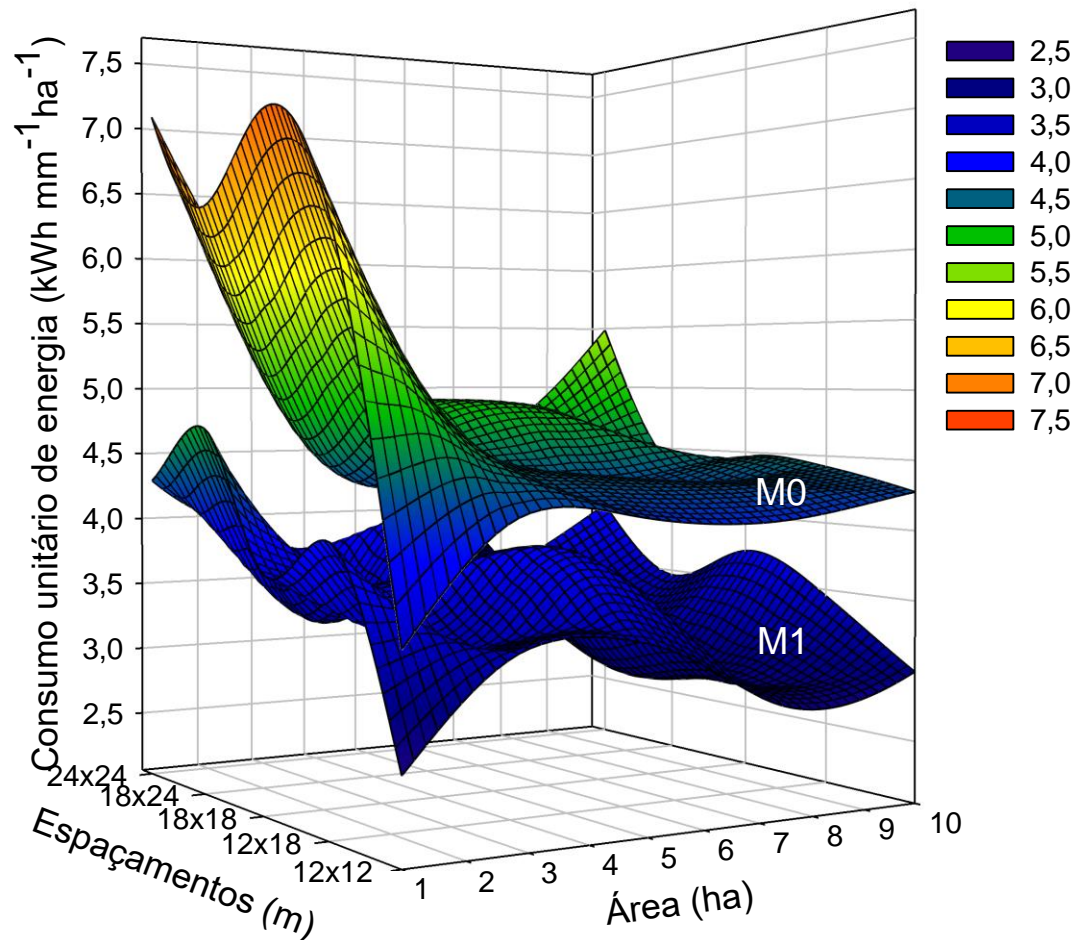
4.3 UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS DE CONTROLE DE VAZÃO NA AVALIAÇÃO DO CONSUMO ENERGIA

Para realizar a avaliação dos métodos de controle utilizados neste estudo foi feita uma análise em relação a comparação com o método de referência (M0). Assim, na Figura 8 está representado o comportamento do consumo unitário de energia em função aos diferentes espaçamentos e tamanhos de área irrigada.

Analisando o espaçamento de 12 x 12 m é possível verificar que ocorreu uma redução do consumo unitário de energia variando de 0,78 a 1,28 kWh mm⁻¹ ha⁻¹. Neste espaçamento a economia de energia apresentou tendência de aumento com o aumento da área. No espaçamento de 24 x 24 m os valores de economia de energia apresentaram-se maiores quando utilizados em menores áreas, comportamento inverso em relação ao espaçamento citados anteriormente.

Para os demais espaçamentos, os valores de consumo unitário de energia apresentaram redução com o aumento da área irrigada, sendo este comportamento ocorrido em áreas de até 5 ha. A partir da área de 7 ha ocorreu um aumento na economia de energia e, novamente, reduzindo para a área de 10 ha.

Figura 8 - Gráfico do comportamento da econômica de energia obtida com a utilização do método de controle com variação do tempo de irrigação (M1) em relação com método de referência (M0)



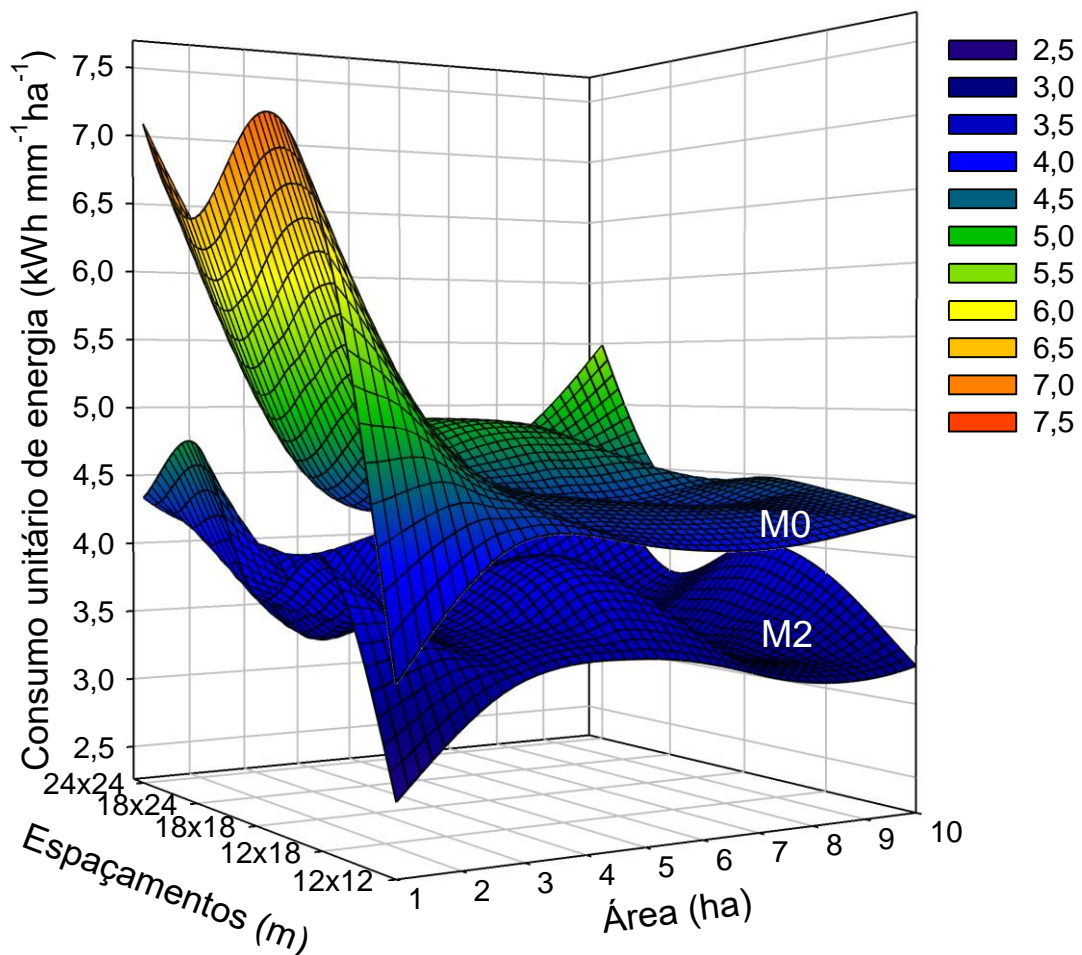
Na Figura 9 é mostrado o comportamento referente ao consumo de energia através do uso do método M2 juntamente com o método de M0 em função das áreas e espaçamentos. Os valores do consumo de energia com a utilização deste apresentaram comportamento similar ao encontrado com o método citado anteriormente para o espaçamento de 12 x 12 m onde ocorreu um aumento da economia com o aumento da área a ser irrigada. Já para os demais espaçamentos a redução do consumo apresentou comportamento inverso, ou seja, reduziu com o aumento da área irrigada.

Os valores de economia no consumo unitário de energia com a utilização do M2 para os espaçamentos de 12 x 12 m, 12 x 18 m, 18 x 18 m, 18 x 24 m e 24 x 24

m apresentaram variação de 0,70 a 1,02; 0,40 a 2,08; 0,47 a 3,18; 0,45 a 2,13 e 0,87 a 2,73 kWh mm⁻¹ ha⁻¹ respectivamente para cada espaçamento, sendo os maiores valores encontrados nas áreas de 1 ha, com exceção do espaçamento 12 x 12 m.

A utilização do método por válvula de estrangulamento como controle de vazão apresenta menores valores de redução de energia em relação ao demais métodos. Isso é possível verificar através da análise gráfica que mostra um menor distanciamento dos pontos em relação ao método de controle de referência.

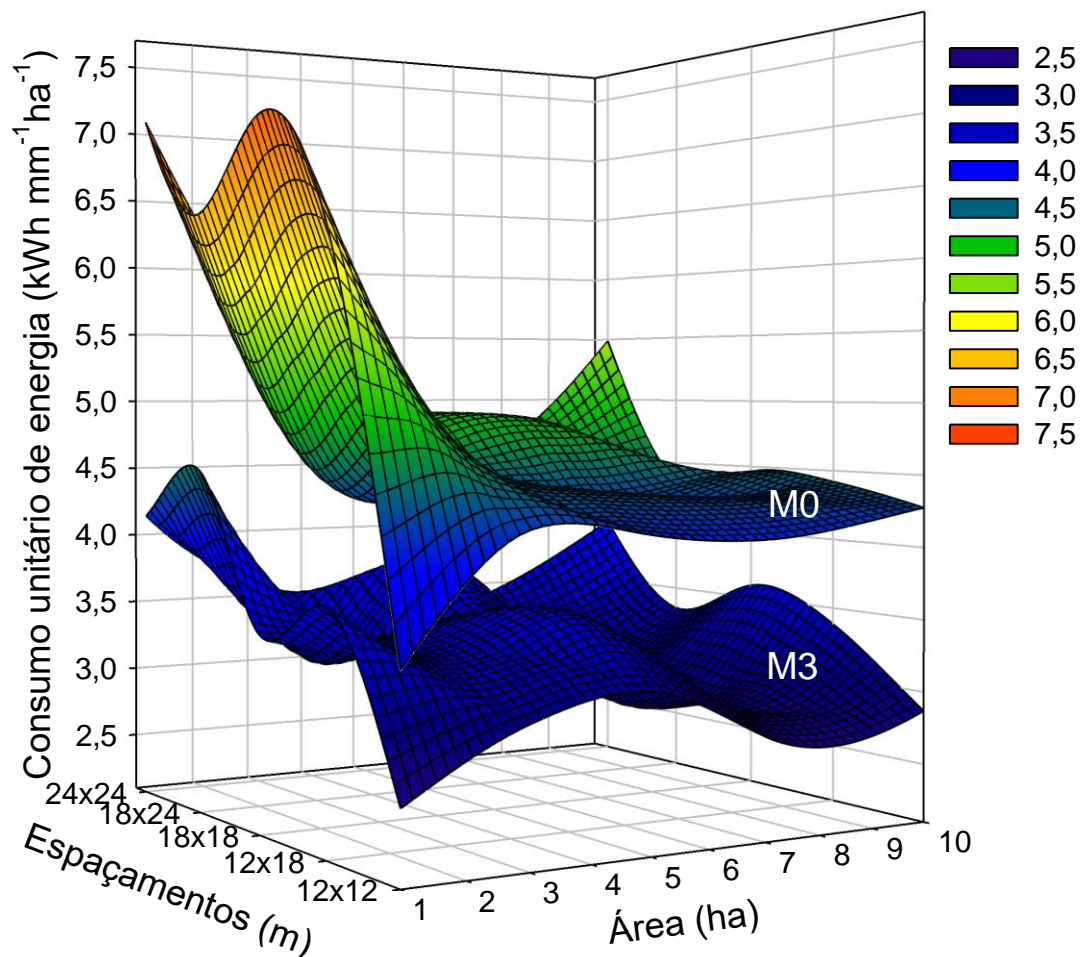
Figura 9 - Gráfico do comportamento da econômica de energia obtido com a utilização do método de controle com utilização de válvulas de estrangulamento com tempo de irrigação fixo (M2) em relação com método de referência



Na Figura 10, observa-se o comportamento do método M3 juntamente com o método de referência. Os resultados encontrados com a utilização deste método de controle de vazão foram semelhantes ao já relatado pelos métodos citados

anteriormente. Entretanto, em relação aos valores de redução do consumo, estes apresentaram-se superiores aos demais métodos com valores de economia que variaram de 0,83 até 3,50 kWh mm⁻¹ ha⁻¹ entre os espaçamentos, apresentando um valor médio de 1,46 kWh mm⁻¹ ha⁻¹ nas situações analisadas neste estudo. Conseqüentemente, é o método que proporciona maior economia de energia elétrica na utilização para sistemas de irrigação por aspersão convencional em todas as situações analisadas.

Figura 10 - Gráfico do comportamento da econômica de energia obtido com a utilização do método de controle utilizando inversor de frequência com tempo de irrigação fixo (M3) em relação com método de referência



Na tabela 3 são apresentados os valores dos coeficientes determinação, desvio padrão e os parâmetros de ajuste de regressão para cada um dos métodos de controle, onde observa-se que o ajuste se deu ao modelo parabólico.

O valor do coeficiente de determinação para os dados do método M0 foi o que apresentou o melhor valor sendo superior a 60%, já para os métodos M1, M2 e M3 os valores foram de 44,6%, 43,9% e 49,8%, mostrando que o entre os métodos de controle testado o M3 foi o que apresentou o maior valor, ficando atrás apenas o M0. Além disso, pode-se verificar que o M3 foi o que apresentou o menor desvio padrão entre os métodos testados mostrando assim uma maior homogeneidade entre os valores testados. O método M0 foi o que apresentou o maior valor de desvio padrão.

Tabela 3 - Valores de coeficiente de correlação, coeficiente de determinação e parâmetros das equações referente a cada método de controle de vazão

Métodos	R ²	dp	Z=a+bx+cy+dx ² +ey ²				
			a	b	c	d	e
M0	0,643	0,911	5,216	-0,599	0,545	0,042	-0,038
M1	0,446	0,447	3,201	-0,213	0,495	0,015	-0,055
M2	0,423	0,439	3,234	-0,158	0,440	0,013	-0,045
M3	0,498	0,349	3,057	-0,203	0,412	0,015	-0,039

Sendo: Z é a variável consumo de energia; x é os valores referentes ao tamanho da área irrigada; y é os valores referentes a áreas ocupada pelos espaçamentos adotados entre aspersor e ramal de irrigação e dp é o desvio padrão.

Através dos dados encontrados foi possível demonstrar o quanto se obteve de redução no consumo de energia com adoção de cada um dos métodos. A Tabela 4, apresenta os valores em percentual de redução de energia com a utilização de cada método de controle de vazão em cada um dos espaçamentos e tamanhos de áreas testados.

Os menores valores de economia de energia obtidos através da utilização dos métodos de controle citados, foram encontrados para áreas de 5 ha para a maioria dos espaçamentos com exceção de 24 x 24 m. Entretanto os maiores percentuais de economia não apresentaram uma tendência a ser seguida, onde na sua maioria foram obtidos no menor tamanho de área estudado (1 ha), com valores superiores a 20% de economia de energia elétrica.

A utilização dos métodos de controle de vazão em sistema de irrigação por aspersão convencional, de modo geral apresentaram valores de economia que variaram de 9,12% a 50,45%. O método que utiliza válvula de estrangulamento apresentou a menor redução e o método com inversor de frequência apresentou a

maior redução no consumo de energia. Sendo estes valores coerente com os encontrados por Aquino et al. (2008) testando diferentes percentuais de estrangulamento da válvula e comparando com o uso de inversores de frequência obtiveram valores semelhantes de redução de energia com valores variando de 6%, 39% e 74 % o que confirma a verificação exposta neste estudo.

Tabela 4 - Valores referentes a economia de energia (%) através da utilização de três métodos de controle de vazão adotados em função das diferentes áreas e dos espaçamentos analisados

Área (ha)	Espaçamento	Métodos de controle de vazão		
		M1	M2	M3
1	12x12	22,80	20,52	24,30
	12x18	34,81	33,74	39,81
	18x18	46,33	45,72	50,45
	18x24	30,30	28,81	32,14
	24x24	39,19	38,57	41,29
3	12x12	20,43	20,17	28,50
	12x18	31,28	24,40	29,56
	18x18	24,53	24,15	29,51
	18x24	18,93	13,66	19,88
	24x24	32,33	29,79	36,32
5	12x12	19,84	17,22	24,09
	12x18	12,15	9,12	18,71
	18x18	13,66	10,73	20,32
	18x24	19,04	11,59	18,58
	24x24	32,97	27,22	33,72
7	12x12	28,77	19,80	31,75
	12x18	29,32	21,04	31,62
	18x18	30,99	22,99	33,58
	18x24	28,94	21,39	28,94
	24x24	27,18	18,92	26,72
10	12x12	29,92	23,77	32,91
	12x18	21,86	13,57	23,44
	18x18	16,49	11,25	19,47
	18x24	20,18	13,16	21,15
	24x24	27,26	18,95	27,43

M1 - sem controle de vazão com tempo de irrigação variável; M2 - controle por estrangulamento da válvula com tempo de irrigação fixo; M3 - métodos de controle com uso de inversor de frequência com tempo de irrigação fixo.

Em relação a utilização de inversores de frequência em sistemas de irrigação Moraes et al. (2014), em estudo com protótipo de pivô central, simulando condição

real, verificou uma economia de energia elétrica de aproximadamente 48%; 37%; 26% e 16% para as condições com linha lateral inclinada em 0%; 10%; 20% e 30%. Este valor é coerente com os resultados encontrados neste estudo, entretanto para a condição em nível o valor é superior ao encontrados neste estudo.

Já em estudos realizados na Itália, em estações de bombeamento verificou-se uma economia no consumo de energia de 27% e 35% com a utilização de variação na rotação (LAMADDALENA; KHILA., 2012) sendo estes valores mais próximos aos encontrados neste estudo. Resultados semelhantes foram encontrados em estudo de caso realizado no instituto CIHEAM-IAMB na Itália. Em diferentes condições, com a utilização de inversores para alterar a velocidade de rotação observou-se economia de energia em torno de 33% (BARUTÇU et al., 2007), concordando com resultados encontrados neste estudo.

Resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho estão de acordo com Dutra e Altafini (2014), que obtiveram uma redução estimada de 37,7% através de uma proposta de substituição de conjuntos de bombeamento e utilização de inversor de frequência. Concordando também com estudo realizados por Haddad et al. (2010) verificou que com a utilização de inversores de frequência ocorreu uma redução de até 32% o consumo de energia, quando comparado à operação com a rotação nominal do sistema de bombeamento.

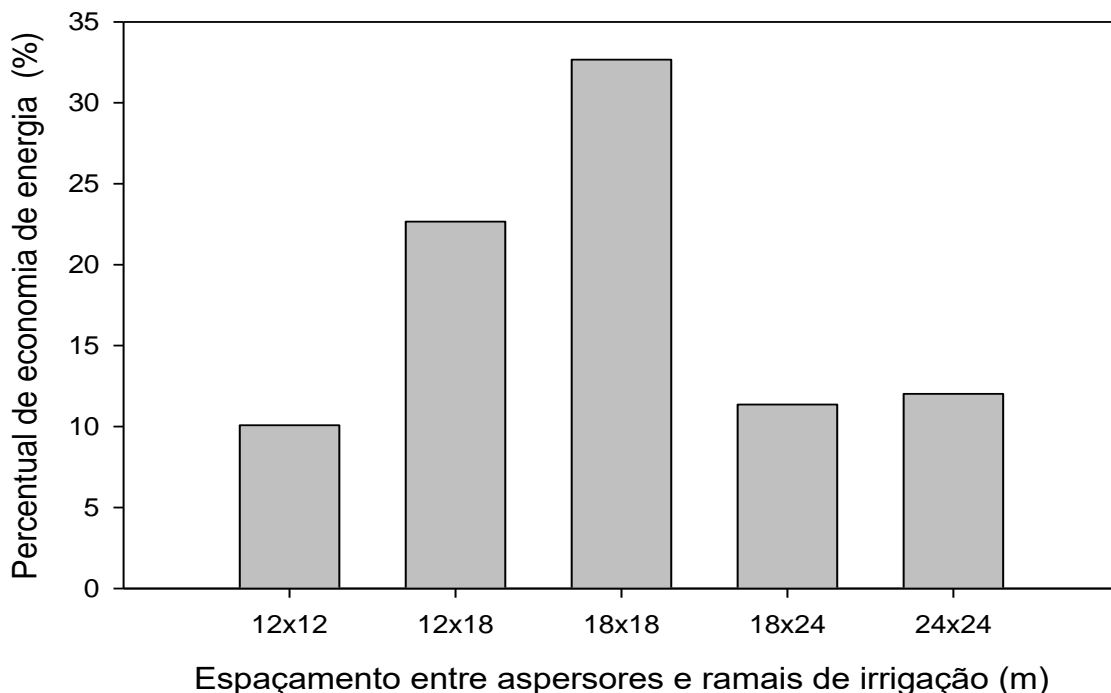
Além disso, a utilização de inversor favorece o ajustamento da frequência dos motores elétricos de modo a manter o rendimento o mais próximo ao nominal, isto é, rendimento do motor atuando para a condição equivalente a 100% da carga nominal. Podendo ainda, favorecer com que ocorra acréscimos no rendimento (OLIVEIRA FILHO et al., 2000). O benefício da instalação de unidades de velocidade variáveis em sistemas de bombeamento além da economia de energia também favorece a maior confiabilidade do sistema e o melhor controle do processo (TUTTEROW; MCKANE, 2004).

A Figura 11 apresenta os valores de amplitude de economia de energia para o método M1 em cada um dos espaçamentos testados. A utilização deste método de controle apresentou resultados de amplitude de economia do consumo de energia, para o espaçamento de 12 x 12 m, que variou de 19,84% a 29,92% sendo o maior percentual atingido na maior área de estudo, para o espaçamento de 12 x 18 m a variação ficou entre 12,15% a 34,81%, no 18 x 18 m a variação ficou entre 13,66% a

46,33%, no 18 x 24 m variou de 18,93% a 30,30% já para o espaçamento de 24 x 24 m a variação ficou entre os valores de 27,18% a 39,19%.

Através destes resultados encontrados pode-se evidenciar o espaçamento que apresentou os maiores valores de amplitude de economia. Sendo representado que a maior amplitude de econômica ocorre com a utilização do espaçamento de 18 x 18 m, onde está amplitude de valor foi superior a 30%. Além disso, conforme foi relatado anteriormente as maiores economias encontradas com a utilização deste método de controle foram nos espaçamentos de 24 x 24 m e 18 x 18 m respectivamente.

Figura 11 - Amplitude de economia de energia obtido com a utilização do método de controle com variação do tempo de irrigação (M1) em função dos espaçamentos analisados

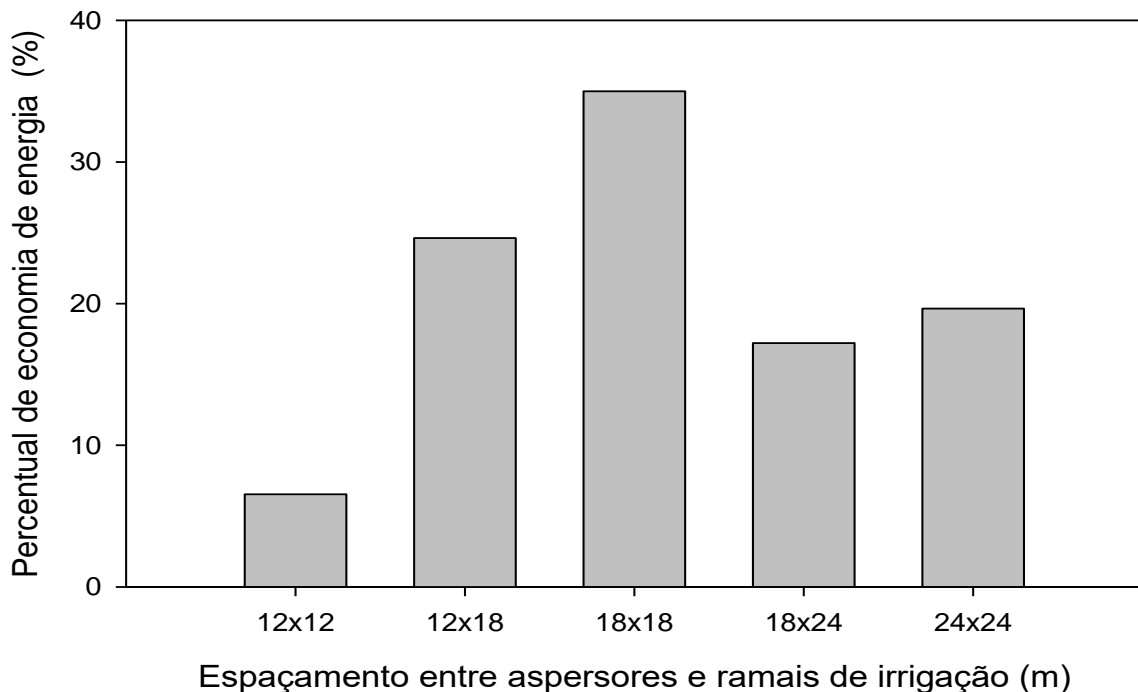


Na Figura 12 apresenta os valores de amplitude de economia através da utilização do método de controle de vazão M2.

Desta forma, os resultados encontrados de amplitudes de economia de energia obtidas nos espaçamentos de 12 x 12 m, 12 x 18 m, 18 x 18 m, 18 x 24 m e 24 x 24 m variam entre aos valores de 17,22% a 23,77%, 9,12% a 33,74%, 10,73% a 45,72%, 11,59% a 28,81% e 18,92% a 38,57% respectivamente.

Através desta análise, o espaçamento 18 x 18 m novamente foi o que apresentou o maior intervalo de redução no consumo de energia em comparação com os demais espaçamentos analisados, com valor de 34,99% de redução no consumo de energia. Apesar deste método apresentar as maiores amplitudes de economia, o mesmo foi o que apresentou os menores valores de economia em todas as situações analisadas neste estudo em comparados com os demais métodos.

Figura 12 - Amplitude de economia de energia obtido com a utilização do método de controle com utilização de válvulas de estrangulamento com tempo de irrigação fixo (M2) em função dos espaçamentos analisados

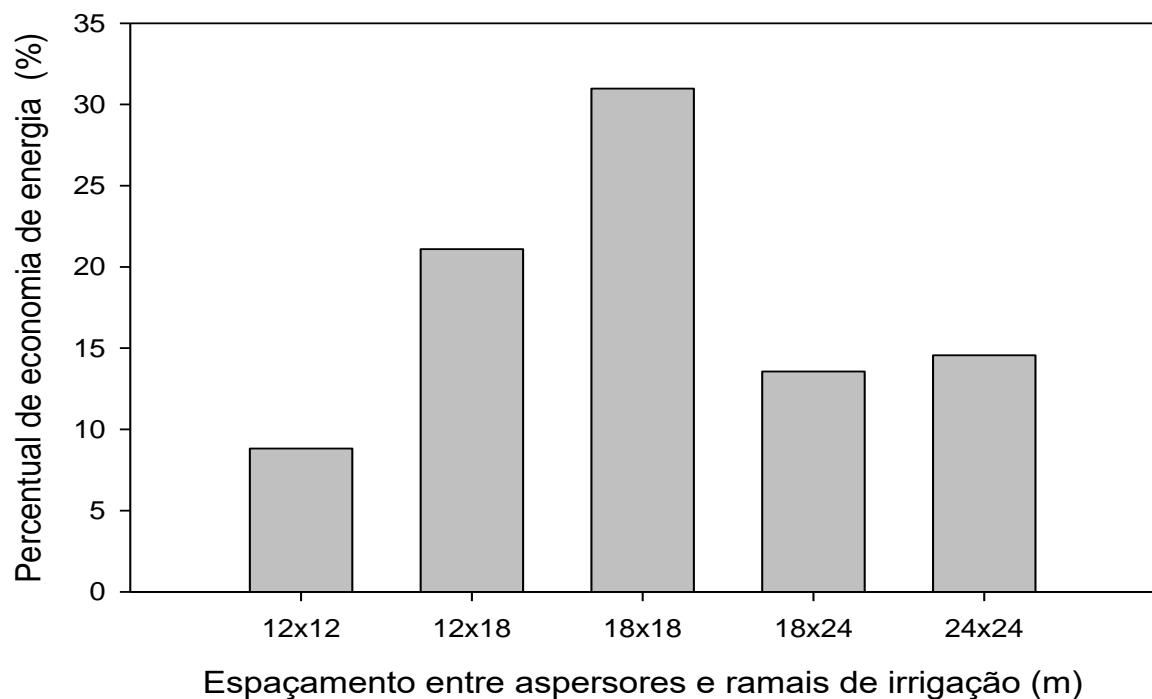


A Figura 13, apresenta os valores de amplitude entre o maior e o menor valor de redução do consumo de energia elétrica obtidos através de utilização do método IF-TIV em cada espaçamento. A utilização deste método de controle apresentou amplitudes de economia que variaram de 18,71% a 50,45%, sendo o método que apresentou os maiores valores de economia em todas as situações analisadas quando comparados com os demais métodos analisados.

Os resultados encontrados de amplitude de economia para cada espaçamento variaram entre 24,09% a 32,91%, 18,71% a 39,81%, 19,47% a 50,45%, 18,58% a 32,14% e 26,72% a 41,29% para os espaçamentos 12 x 12 m, 12 x 18 m, 18 x 18 m,

18 x 24 m e 24 x 24 m respectivamente. Sendo novamente o espaçamento de 18 x 18 m foi o que apresentou o maior intervalo de redução do consumo de energia com valor superior a 30% de redução. Com a utilização de inversor de frequência as amplitudes de economias do consumo foram menores comparando com outros métodos citados.

Figura 13 - Amplitude de economia de energia obtido com a utilização do método de controle utilizando inversor de frequência com tempo de irrigação fixo (M3) em função dos espaçamentos analisados



Através da análise de todos os métodos utilizados, o uso do inversor de frequência foi o que apresentou os maiores valores de economia. Desta forma realizou-se uma análise de comparação entre o método com inversor frequência (M3) em relação aos métodos M1 e o M2 para demonstrar o percentual de economia. Sendo assim o método M3 apresentou uma economia média de 5,17% em relação ao M1 e 10,08% em relação ao M2 para o espaçamento de 12 x 12 m, para o espaçamento de 12 x 18 m a economia foi de 3,58% em relação ao M1 e 10,27% em relação ao M2. No espaçamento de 18 x 18 m a economia ficou entre 5,86% e 9,90% em relação ao M1 e M2 respectivamente, valores de 0,89% e 7,72% foram encontrados para o espaçamento de 18 x 24 m em relação aos métodos M1 e M2 respectivamente e já

para o espaçamento de 24 x 24 m e economia a foi de 2,01% e 8,54% em relação ao M1 e M2.

Arslan e Sahib. (2016) em seu estudo encontraram redução do consumo de energia com o uso de variadores de rotação em sistema de bombeamento em relação ao uso de outros sistemas que não realizam alteração na rotação do sistema, sendo os valores encontrados relativamente superior ao encontrados neste estudo.

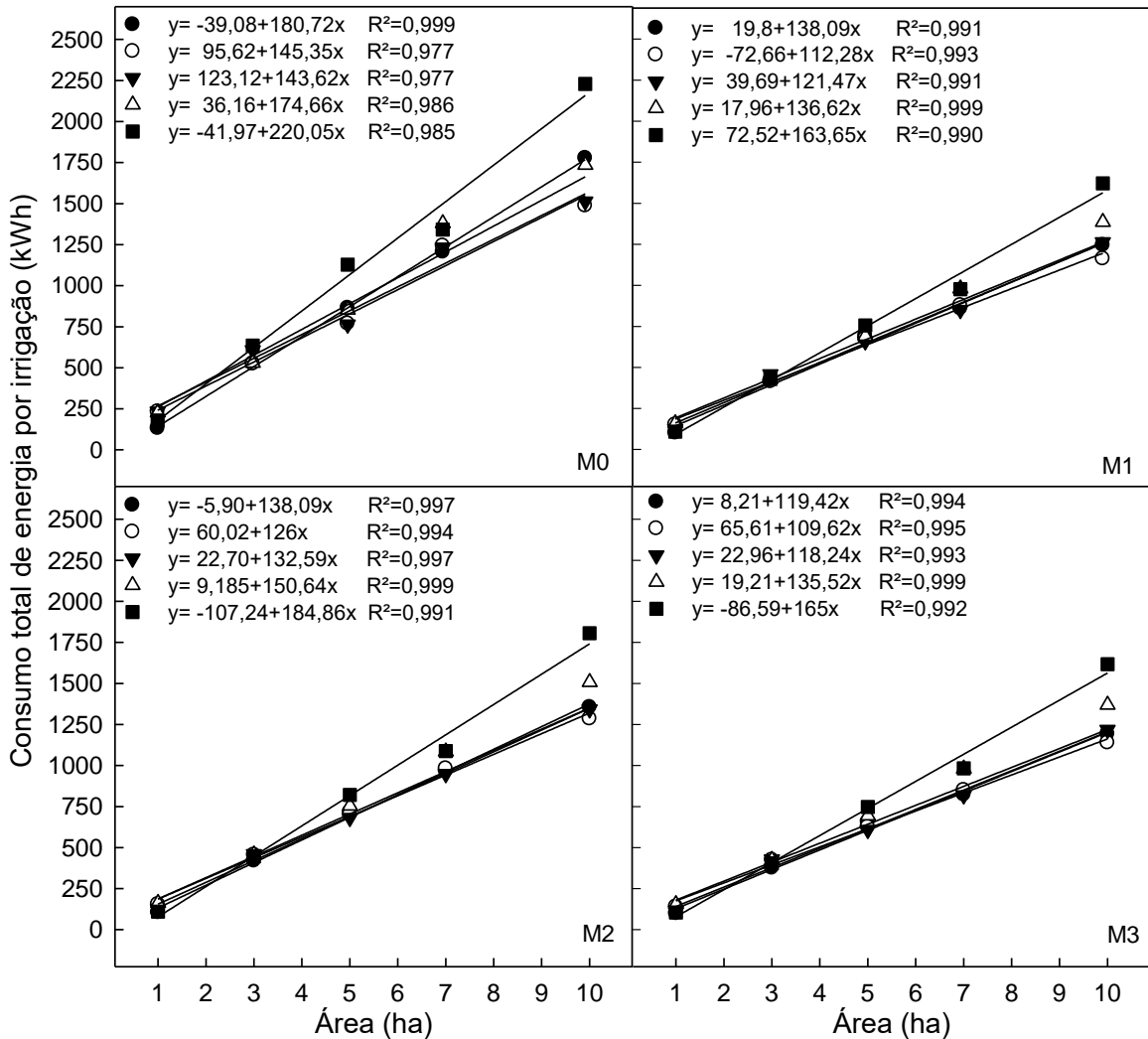
Este comportamento referente a utilização do inversor de frequência fica evidente analisando a Figura 14, que apresenta o consumo total de energia necessário para realização de uma irrigação em cada uma das situações testadas. É possível verificar o quanto se alcança de economia de energia em apenas uma irrigação através da utilização deste método.

A economia de energia comportou-se de forma proporcional ao aumento de área em todas as situações, entretanto, nos espaçamentos de 12 x 18 m, 18 x 18 m e 18 x 24 m este comportamento ocorreu até áreas de 7 ha, diminuindo o percentual de economia nas áreas de 10 ha. Além disso, o mesmo não pode ser dito em relação ao consumo de energia e o aumento dos espaçamentos, sendo para as áreas de 1 e 7 ha os maiores valores de economia foram encontrados para os espaçamentos de 18 x 18 m e 18 x 24 m respectivamente. Já para as demais áreas os maiores de economia foram para o espaçamento de 24 x 24 m em todos os métodos testados.

Nos três métodos de controle utilizados evidencia-se os maiores valores de economia de energia foram alcançados no espaçamento de 24 x 24 m com valores de economia variando de 189 kWh com a utilização de método M2 até 611 kWh, com a utilização do método M3.

Vieira Júnior et al. (2010), utilizando simulações matemáticas em sistema de abastecimento de água em Belém-PA, concluiu em seu estudo uma redução no consumo de energia de 22,7% com a utilização de instalações com variação de rotação nas motobombas, quando comparado sem a variação de rotação nos mesmos equipamentos. Rolam et al. (2016) estudando sistema de pressurização de água da SANEPAR de Telêmaco Borba-PR através de simulação verificou uma redução de 30,66% no consumo de energia elétrica (kWh), com variação da rotação da motobomba, comparando com sua velocidade de rotação nominal nas mesmas condições. Valores estes de acordo com os resultados encontrados para este estudo.

Figura 14 - Consumo de energia total necessário para realização de uma irrigação em cada tamanho de área, espaçamentos e método de controle de vazão



Símbolos correspondente a cada espaçamento ● - 12x12; ○ - 12x18; ▼ - 18x18; △ - 18x24 e ■ - 24x24.

Além disso, segundo Vieira Júnior et al. (2010) com a utilização de métodos que alteram a rotação de sistema de bombeamento a economia no consumo de energia não é a única vantagem pois, além disso, ocorre a eliminação do uso de válvulas, o alto custo de manutenção e a simplificação da montagem na tubulação do sistema. O método de controle da vazão por velocidade variável prolonga a vida útil das tubulações, acessórios e a motobomba do sistema, em função, da eliminação dos golpes de aríete e cavitação.

5 CONCLUSÃO

Através da proposta deste trabalho pode-se concluir que existe a necessidade da verificação da economia de energia com a utilização de métodos de controle de vazão para sistema de irrigação por aspersão convencional.

O consumo de energia unitário ($\text{kWh mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) em sistemas de irrigação independente dos espaçamentos entre aspersores apresenta a tendência de redução com o aumento da área irrigada e o consumo de energia total por irrigação apresenta comportamento linear crescente com o aumento da área.

O consumo de energia unitário apresenta comportamento crescente em relação ao aumento dos espaçamentos entre aspersores. O espaçamento 12 x 12 m apresenta os menores valores de consumo de energia e o 24 x 24 m os maiores.

O intervalo de economia médio foi de aproximadamente 25% do consumo de energia elétrica com aplicação dos métodos de controle, considerando que tanto o motor elétrico quanto a bomba estejam operando dentro de suas características operacionais.

O espaçamento entre aspersores de 18 x 18 m apresenta a maior amplitude de economia de energia em relação aos demais espaçamentos. O espaçamento que apresenta os maiores valores de economia no consumo de energia é o espaçamento 24 x 24 m, seguido de perto pelo 18 x 18 m.

O método de controle de vazão M3 é o que apresenta o menor consumo e as maiores economias de energia em relação ao demais métodos testados. O método M2 é o que apresenta os menores valores de economia.

O espaçamento que apresenta os menores valores de economia de energia é o 18 x 24 m em todos os métodos testados.

A variação máxima no consumo de energia dentro dos métodos de controle de vazão testados é de 10,27% utilizando método M3 em relação ao M2.

REFERÊNCIAS

- AMERICO, M. **Acionamento eletrônico**: guia avançado. Eletrobrás/Procel. Rio de Janeiro, dez / 2004.
- AQUINO, R. R. B.; LINS, Z. D.; ROSAS, P. A. C.; CORDEIRO, L. F. A.; RIBEIRO, J. R. C.; TAVARES, I. A.; AMORIM, P. S. **Eficientização energética em métodos de controle de vazão**. In: VIII Conferência internacional de aplicações industriais – VIII INDUSCON. Poços de Caldas/ MG. 2008.
- ARAUJO, A. C. D.; NETO, J. D.; LIRA, V. M.; LIMA, V. L. A. Avaliação dos custos de energia elétrica no contexto operação e manutenção dos projetos públicos de irrigação. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer -Goiânia, vol.7, N.12; 2011.
- ARAÚJO, J. A. B.; SERAPHIM, O, J.; SIQUEIRA, J. A. C.; e NETO, F. A. **Avaliação de um sistema irrigação por aspersão com aplicação do inversor de frequência**. In: Encontro de energia no meio rural, 5. Campinas-SP. 2004.
- ARSLAN, S.; SAHIB, A.A. Comparison of energy efficiencies of a small centrifugal pump at constant and variable speed operation. **Tarım Bilimleri Dergisi - Journal of Agricultural Sciences**.vol 22, issue 3, p 444-454. 2016.
- AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de Hidráulica**, 8 ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1998.
- BARUTÇU F.; LAMADDALENA N.; FRATINO U. Energy saving for a pumping station serving an on-demand irrigation system: A study case. In **Agricultural production farm and personal training center, Water saving in Mediterranean agriculture and future. Research needs options Mediterranéennes**; serie B. Etudeset Rescherches.n. 56, vol. 1. p. 367-379, 2007.
- BERNARDO, S; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Viçosa: UFV, 2006. 625P.
- BEZERRA, S. T. M.; SILVA, S. A. **Automação e controle. In Sistemas de bombeamento**: eficiência energética. Gomes. H. P. (Organizador). João Pessoa: Editora Universitária UFPB, p. 206-1250. 2009.
- BRIDI, A.B. **Avaliação do consumo energético no controle de vazão em sistema de bombeamento utilizando válvulas mecânicas e inversores de frequência – experiências laboratoriais e estudo de caso**. 138 p. Dissertação (mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá. 2013.
- CAMBOIM, W.L.L.; SILVA, S. A.; GOMES, H. P. Application of Fuzzy techniques to control pressure in water supply systems. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. vol.19 n 1. Rio de Janeiro. jan-mar. 2014.

- CAMOIRANO, R.; DELLEPIANE, G. Variable frequency drives for MSF desalination plant and associated pumping stations. **Desalination** 182,53–65. Santa Margherita, Italia. May. 2005.
- CAMPANA S.; OLIVEIRA FILHO D.; SOARES A.A.; OLIVEIRA R. A.; HERMSDORFF W. 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. Campinas. (2000).
- CARVALHO, J. A.; OLIVEIRA, L. F. C. **Instalações de bombeamento para irrigação- Hidráulica e consumo de energia**. Lavras, Editora UFLA, 2008.
- COBO, M.T. C.; DÍAZ, J.A. R.; MONTESINOS, P.; LUQUE, R. L.; POYATO, E. C. Low energy consumption seasonal calendar for sectoring operation in pressurized irrigation networks. **Irrigation Science**, v. 29, n. 2, p. 157-169, 2011.
- CÓRCOLES, J. I.; TARJUELO, J. M.; MORENO, M. A. Pumping station regulation in on-demand irrigation networks using strategic control nodes. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 48-56, 2016.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).
- DUTRA, R.F.; ALTAFINI, C.R. Melhorias em um sistema de bombeamento municipal visando à eficiência energética – Estudo de caso. **Scientia cum industria**, v.2, n.1, p.1-9, 2014.
- FARIA, L. C.; COLOMBO, A.; OLIVEIRA, H. F. E.; PRADO.P. Simulação da uniformidade da irrigação de sistemas convencionais de aspersão operando sob diferentes condições de vento. **Revista Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.29, n.1, p.19-27, jan-mar. 2009.
- FEITOSA, E. O.; ALBIERO, D.; PRACIANO, A. C.; MACEDO, D.X.S.; CHIODEROLI,C.A. Simulação do aproveitamento da energia eólica para irrigação no distrito de irrigado baixo-Acaraú – CE. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, p. 65-79, 2014.
- FERNANDES, R. F.; RUSSI, J. L.; DE SOUZA MUSWIECK, B.; BEHRENS, J.; DA SILVA, G. S. Sistema de Acionamento Elétrico para Motor de Indução Trifásico (MIT) Aplicado no Bombeamento de Água. In: VII Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão. **Anais** do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – Universidade Federal do Pampa. v.7, n. 2, 2015.
- FORTES, M. Z.; TAVARES, G. M.; DOS SANTOS RIGUEIRA, A.; ANTUNES, V. D. S. F.; PEREIRA, L. F. Eficientização energética com ajuste do ponto de operação de bombas centrífugas. **Anais** do 27º Congresso Brasileiro de Manutenção. ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção, Rio de Janeiro. v. 1. p. TT-015. 2012.

FRIGO, J. P.; BOAS, M. A. V.; FRIGO, E. P.; HERMES, E.; TESSARO, E. Irrigação diurna e noturna em um sistema de aspersão convencional em Palotina-Pr. **Irriga**, v. 18, n. 2, p. 318, 2013.

GROSS, J.A.; CASSOL, R. Rainfall anomaly index in the State of Rio Grande do Sul. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**. v.11 n.3. set./dez. 2015.

GUIMARÃES, R. **Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética**. 173 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2008.

HADDAD, J.; VIANA, A.N.C.; SANTOS, A.H.M.; BORTONI, E.C.; YAMACHITA, R.A.; MARTINS, A.R.S. Estudo de racionalização do consumo de energia elétrica em sistemas de tratamento e abastecimento de água. In: GOMES, H. P. (Org.). **Sistemas de saneamento: Eficiência Energética**. João Pessoa: Editora Universitária-UFPB, 2010. Cap. 22. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/wp-content/uploads/arquivos/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf>. Acesso em: 28 set. 2017.

JAMES, K.; GODLOVE, C.E.; CAMPBELL, S.L. **Água e Energia – Aproveitando as oportunidades de efficientização de água e energia não exploradas nos sistemas municipais**. Aliança para conservação de Energia. 159p. 2002.

KÖPP, L. M.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; TOESCHER, C. F. Characterization of pumping stations in irrigated rice crops from Rio Grande do Sul, Brazil. **Engenharia Agrícola**, 36(2), 342-351. 2016.

KÖPP, L. M. **Índices de desempenho para estações de bombeamento em lavouras de arroz irrigado**. 107 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015.

LAMADDALENA, N.; KHILA, S. Energy saving with variable speed pumps in on-demand irrigation systems. **Irrigation science**, v. 30, n. 2, p. 157-166, 2012.

LIMA, A. C.; GUIMARÃES JR.; SEBASTIÃO. C.; FIETZ, C. R.; CAMACHO, J. R. Avaliação e análise da eficiência energética na irrigação em sistemas pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.4, p.499–505, 2009.

LIMA, A. S.; ZOCOLER, J. L.; JADOSKI, S.O.; MAGGI, M. F.; AMARANTE, R.R. Desempenho Operacional no Bombeamento em Pivô Central utilizando Inversor de Freqüência. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, Guarapuava-PR, v.8, n.2, p.51-61, maio/ago. 2015.

MANTOVANI, E.C.; Bernardo, S.; Palaretti, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3.ed. Viçosa: UFV, 355p. 2009.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Seleção de sistemas de irrigação para hortaliças. **Embrapa Hortaliças-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 1998.

MARTINS, C. A. S.; REIS, E. F.; Passos, R.R.; Garcia, G.O. Desempenho de sistemas de irrigação por aspersão convencional na cultura do milho (*Zea mays* L.) **Revista IDESIA** (Chile), Vol 29, Nº3, p 65-74, Sept/Dic, 2011.

MESQUITA, R. P. **Análise de viabilidade técnica-econômica para a aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de baixa potência.** 99 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, São Paulo. 2009.

MORAES, M. J.; VIEIRA, G. H.; DE OC SCARCELLI, R. Gerenciamento do lado da demanda no bombeamento de água para perímetro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 15, n. 9, 2011.

MORAES, M.J.; FILHO, D. O.; 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. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.6, p. 1075-1088. nov/dez. 2014.

MORENO, M. A.; DEL CASTILLO, A.; MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; BALLESTEROS, R. Optimisation of the design of pressurised irrigation systems for irregular shaped plots. **Biosystems Engineering**, v. 151, p. 361-373, 2016.

MORENO, M.A.; CÓRCOLES, J.I.; TARJUELO, J.M.; ORTEGA, J.F. Energy efficiency of pressurised irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule. **biosystems engineering** 107, p 349 - 363. 2010.

MOUSAVI-AVVAL, S.H.; RAFIEE, S.; JAFARI, A.; MOHAMMADI, A. Optimization of energy consumption for soybean production using Data Envelopment Analysis (DEA) approach. **Applied Energy** 88, p 3765–3772. 2011.

Natural Resources Conservation Service- NRCS. **Variable Speed Drive (VSD) for irrigation pumping.** **Natural Resources Conservation Service**, Water Management Technical Note No. 1, Washington, US, pp. 1-44. 2014.

Natural Resources Conservation Service-NRCS. **Variable Speed Drive (VSD) for irrigation pumping.** **Natural Resources Conservation Service**, Engineering Technical Note No. MT-14, Montana, US, pp. 1-36. 2010.

NAVARRO NAVAJAS, J.M.; MONTESINOS, P.; POYATO, E. C.; DÍAZ, J.A.R. Impacts of irrigation network sectoring as an energy saving measure on olive grove production. **Journal of Environmental Management**, 111, 1-9. 2012.

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, Campinas-SP. 2000.

Anais... disponível

em:http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000100017&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 01 ago. 2016.

PANESI, A. R. Q. **Fundamentos de eficiência energética: industrial, comercial e residencial**. São Paulo: Ensino profissional Editora, 2006. 189p.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M.V.; ZOLIN, C. A.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; JOSÉ, J. V. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Revista Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 163-176, abril/junho, 2011.

REIS, M. M.; SANTOS, L. D. T.; OLIVEIRA, F. G.; SANTOS, M. V. Irrigação de pastagens tropicais: desafios e perspectivas. **Unimontes Científica**, v. 19, n. 1, p. 178-190, 2017.

ROBAINA, A. D. **Hidráulica agrícola**. Santa Maria: Departamento de Engenharia Rural, 2015, 98 p. Notas de aula.

ROCAMORA, C.; VERA, C.; ABADIA, R. Strategy for efficient energy management to solve energy problems in modernized irrigation: Analysis of the Spanish case. **Irrigation Science** 31: 1139-1158. 2013.

RODRÍGUEZ DÍAZ, J. A.; CAMACHOPOYATO, E.; BLANCÓPEREZ, M. Evaluation of water and energy use in pressurized irrigation networks in Southern Spain. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 137:644-650, 2011.

RODRÍGUEZ DÍAZ, J. A.; LÓPEZ LUQUE, R.; CARRILLO COBO, M. T.; MONTESINOS, P.; POYATO, E. C. Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurised irrigation networks. **Biosystems Engineering**, v. 104, n. 4, p. 552-561, 2009.

RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, M.; SANTANA SOTOLONGO, M.; BROWN MANRIQUE, O.; ALONSO DE LA PAZ, F. Riego por surco con caudal intermitente asociado al cultivo de la cebolla y su eficiencia en las pérdidas de suelo y agua por escorrentía. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, 22(4), 50-54. 2013.

ROLAM, M. E.; DE OLIVEIRA NETO, A. G.; BREDAS, G. T.; FERREIRA, J. A. M.; WAGNER, L. F. Redução do consumo energético em sistemas de pressurização de água, com variação de velocidade no conjunto moto-bomba. **Revista TechnoEng-ISSN 2178-3586**, v. 1, n. 13, 2017.

SAIDUR, R.; MAHLIA, T. M. I. Energy, economic and environmental benefits of using high-efficiency motors to replace standard motors for the Malaysian industries. **Energy policy**, v. 38, n. 8, p. 4617-4625, 2010.

SAIDUR, R.; MEKHILEF, S.; ALI, M. B.; SAFARI, A.; MOHAMMED, H. A Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 543-550, 2012.

SÁNCHEZ C. R.; L. SIRGADO, J. L.; PEÑUELAS, F. L.; VILLASANTE, A. L.; SINOBAS, L.R.; LIÓN, G.C. Consumo de energía con bombas de velocidad variable. In: "XXVI Congreso Nacional de Riegos", 24 - 26 de junho de 2008, Huesca, Madrid. **Anais XXVI Congresso nacional de Riegos**. 2008.

SANTOS, L. D. P. S.; SOARES, A. K.; da SILVA, S. S. Eficiência hidroenergética em sistemas de distribuição de água: uma discussão teórica. **Blucher Engineering Proceedings**, v. 3, n. 2, p. 383-392, 2016.

SCHONS, R.L.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X. Caracterização e avaliação de áreas irrigadas no Rio Grande do Sul. **Revista Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v.8, n.1, p.55-59, mar. 2014.

SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E AGRONEGÓCIO. (SEAPA). 2012. **Mais água, Mais Renda**. Disponível em: <http://www.agricultura.rs.gov.br/conteudo/1032/?Mais_%C3%81gua%2C_Mais_Renda> Acesso em: 19 de agosto de 2016.

SOBHY, M. G.; SAMIR, M.; DALIA, M. Dynamic performance application of a variable speed centrifugal pump. In: **National Water Research Center, Egypt Fifteenth International Water Technology Conference, IWTC 15**. Alexandria, Egypt. 2011.

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

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. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.29, p.311-320, abr./jun. 2009.

TUTTEROW, V.; MCKANE, A. T. **Variable Speed Pumping - A Guide to Successful Applications**. Washington., 2004.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E.C.; SOARES, A. A.; MONTES, D.R.P.; CUNHA, F. F. Custo da irrigação do cafeeiro em diferentes tipos de equipamento e tamanhos de área. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 19, p. 53-61, 2011.

VIEIRA JÚNIOR, P.; MESQUITA, A.L.A.; SOUZA, V.H.P DE.; MORAES, G.C. Utilização de modelo matemática para simulação da operação de sistema de bombeamento de água. In: GOMES, H. P. (Org.). **Sistemas de saneamento: Eficiência Energética**. João Pessoa: Editora Universitária-UFPB, 2010. Cap. 6. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/wp-content/uploads/arquivos/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2017.

WU, P.; LAI, Z.; WU, D.; WANG, L. Optimization research of parallel pump system for improving energy efficiency. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 8, p. 04014094.1-8, 2014.

YACOUBI, S.; ZAIANI, K.; ZAPATA, N.; ZAIRI, A.; SLATNI, A.; SALVADOR, R.; PLAYÁN, E. Day and night time sprinkler irrigated tomato: Irrigation performance and crop yield. **Biosystems Engineering**, v. 107, p. 25-35, 2010.

ZOCOLER, J. L.; LIMA, A. S.; HERNANDEZ, F.B.T.; MAGGI, M.F.; YANO, E.H. Eficiência de aplicação da irrigação em pivô central utilizando inversor de frequência no sistema de bombeamento. In: XXII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. Cascavel -PR. 2012. **Anais XXII CONIRD**. 2012.

ZOCOLER, J.L.; HERNANDEZ, F.B.T.; SAAD, J.C.C.; CRUZ, R.L. **Período de recuperação do investimento na bomba hidráulica de melhor rendimento em sistemas de bombeamento na tarifa horo-sazonal verde para irrigantes**. In: XVIII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. Julho, São Mateus, ES. 2008.