

**Métodos de controle de vazão para racionalização de energia elétrica na irrigação por aspersão convencional****Control methods for energy electric rationalization in conventional sprinkler irrigation**

DOI:10.34117/bjdv6n10-585

Recebimento dos originais: 13/09/2020

Aceitação para publicação: 27/10/2020

**Jhosefe Bruning**

Doutorando em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Santa Maria  
Instituição: Universidade Federal de Santa Maria  
Endereço: Avenida Roraima, 1000 -Camobi, Santa Maria –RS, Brasil  
E-mail: Jhosefe.b@gmail.com

**Adroaldo Dias Robaina**

Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo  
Instituição: Universidade Federal de Santa Maria  
Endereço: Avenida Roraima, 1000 -Camobi, Santa Maria –RS, Brasil  
E-mail: diasrobaina@gmail.com

**Marcia Xavier Peiter**

Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos  
Instituição: Universidade Federal de Santa Maria  
Endereço: Avenida Roraima, 1000 -Camobi, Santa Maria –RS, Brasil  
E-mail: mpeiter@gmail.com

**Luis Humberto Bahú Ben**

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Santa Maria  
Instituição: Universidade Federal de Santa Maria  
Endereço: Avenida Roraima, 1000 -Camobi, Santa Maria –RS, Brasil  
E-mail: luishumbertoben@gmail.com

**Rogério Ricaldi Torres**

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Santa Maria  
Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) -  
Campus Vacaria  
Endereço: Estrada Engenheiro João Viterbo de Oliveira, 3061 - Zona Rural- Vacaria-RS, Brasil  
E-mail: rogeriocprtorres@gmail.com

**Silvana Antunes Rodrigues**

Doutoranda em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Santa Maria  
Instituição: Universidade Federal de Santa Maria  
Endereço: Avenida Roraima, 1000 -Camobi, Santa Maria –RS, Brasil  
E-mail: rodrigues.silvana.a@gmail.com

**Miguel Chaiben Neto**

Doutorando em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Santa Maria

Instituição: Universidade Federal de Santa Maria

Endereço: Avenida Roraima, 1000 -Camobi, Santa Maria –RS, Brasil

E-mail: miguelchaiben@gmail.com

**Bruna Dalcin Pimenta**

Doutoranda em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Santa Maria

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) -  
Campus Ibirubá

Endereço: Rua Nelsi Ribas Fritsch, 1111 - Bairro Esperança - Ibirubá–RS, Brasil

E-mail: brunadpimenta@gmail.com

**RESUMO**

O consumo de energia elétrica é um dos principais responsáveis pelos custos de produção na agricultura irrigada, mas um importante insumo para o crescimento e desenvolvimento econômico de uma região, em função da importância dos problemas relacionados ao consumo de energia no meio rural, é de grande valia a adoção de técnicas para reduzir o consumo de energia por meio da inserção de método de controle de vazão em sistemas de irrigação. Teve-se por objetivo no presente estudo analisar diferentes métodos de controle de vazão em sistemas de irrigação por aspersão convencional, com diferentes configurações de espaçamentos e áreas irrigadas, com enfoque no consumo de energia elétrica em projetos teóricos e simulados. Foram dimensionados sistemas de irrigação para cinco tamanhos de área (1, 3, 5, 7 e 10 ha), com diferentes combinações de espaçamentos entre aspersores e ramais de irrigação (12 x 12; 12 x 18; 18 x 18; 18 x 24 e 24 x 24 m), totalizando 25 projetos, em que foram aplicados três métodos de controle (nenhum controle de vazão e tempo de irrigação variável; controle por estrangulamento da válvula e tempo de irrigação fixo; variação da frequência elétrica e tempo de irrigação fixo) para a análise do consumo de energia elétrica. Portanto, a utilização de métodos de controle de vazão proporciona reduções no consumo de energia elétrica com valores de 9,12 até 50,45%, o método de controle que apresenta os melhores resultados de economia de energia é o com variação da frequência elétrica e tempo de irrigação fixo (inversor de frequência).

**Palavras-chave:** Eficiência energética, Estações de bombeamento, Inversor de frequência

**ABSTRACT**

The Electricity consumption is one of the factors responsible for production costs in irrigated agriculture, but an important input for the growth and economic development of a region, due to the importance of problems related to energy consumption in rural areas, is of great importance the adopting techniques to reduce energy consumption by inserting a flow control method in irrigation systems. The objective of the present study was to analyze different flow control methods in conventional sprinkler irrigation systems, with different spacing and sizes area, with a focus on electricity consumption in theoretical and simulated projects. Irrigation systems were designed for five area sizes (1, 3, 5, 7 and 10 ha), with different combinations of spacing between sprinklers and irrigation extensions (12 x 12; 12 x 18; 18 x 18; 18 x 24 and 24 x 24 m), totaling 25 projects, in which three control methods were applied (no flow control and variable irrigation time; control by valve throttling and fixed irrigation time; electric frequency variation and fixed irrigation time ) for the analysis of electricity consumption. Therefore, the use of flow control methods provides reductions in the consumption of electrical energy with values from 9.12 to 50.45%, the control method that presents the best energy saving results is the one with variation of the electrical frequency and fixed irrigation time (frequency inverter).

**Keywords:** Energy efficiency, Pumping stations, Frequency inverter

**1 INTRODUÇÃO**

A agricultura brasileira está apresentando um crescente aumento da produção agrícola (GARCIA; VIEIRA FILHO, 2014). Entretanto, a atividade apresenta alto risco econômico, devido aos períodos com déficit hídrico, assim se faz necessário incorporar técnicas para atender esta demanda. Diante disso, a energia elétrica nas áreas rurais é um fator de estímulo para este aumento da produtividade e produção agrícola por meio de irrigação (DOGAN et al., 2016).

A agricultura irrigada foi um dos setores que aumentaram significativamente o consumo de energia devido à mecanização e aplicações de tecnologia avançada, sendo necessário aumentar a eficiência da utilização de energia (GARCIA; YOU, 2016; LANGARITA et al., 2017). No entanto, sistemas de irrigação mal dimensionados, operando desregulados e com baixa eficiência de aplicação implicam em baixa eficiência energética, resultando no aumento dos custos de produção, em função do desperdício de recursos hídricos e energia elétrica (FEITOSA et al., 2014).

Sabendo que a irrigação é responsável por grande parte do consumo de energia no meio rural, estes problemas acabam ficando mais evidente (VENANCIO et al., 2016). Em função dos gastos com energia na irrigação representarem um forte componente nos custos totais dos sistemas, podendo estes valores ficarem entre 30 e 35% dos custos de produção para acionar os sistemas de irrigação (ARAUJO et al., 2011; FEITOSA et al., 2015). Os autores García et al. (2016) relatam diversas medidas que podem ser utilizadas para promover a redução das exigências energéticas em sistemas de irrigação, por meio de auditorias energéticas, setorização (GARCÍA et al., 2014), controle de pontos críticos (Díaz et al., 2012), gerenciamento de estações de bombeamento (LAMADDALENA; KHILA, 2012).

Segundo Langarita et al. (2017), o consumo de energia está intimamente associado a modernização dos sistemas de irrigação. Com isso, o uso de métodos de controle de vazão, pode ser uma alternativa possibilitando melhor eficiência e maior rentabilidade.

Para NRCS (2014) e Lima et al. (2015) os sistemas de irrigação são dimensionados para atender a maior vazão e altura manométrica requeridas. Desta forma, quando o sistema opera fora do ponto ideal da curva de trabalho do conjunto motobomba, favorece o aumento do consumo de energia elétrica, sendo este é um ponto potencial de racionalização de energia elétrica. Diante disso, há necessidade de melhorar o desempenho dos sistemas de irrigação por aspersão em função do aumento dos custos com energia (YACOUBI et al., 2010; SALES et al., 2017). Desta forma, se faz necessário adotar técnicas para melhorar o uso e reduzir o consumo de energia elétrica na irrigação (Tarjuelo et al., 2015; Reis et al., 2017).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi analisar diferentes métodos de controle de vazão em sistemas de irrigação por aspersão convencional com diferentes configurações de espaçamentos e áreas irrigadas com enfoque no consumo de energia elétrica, através da realização de projetos de forma teórica e simulada.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para realização deste estudo foram desenvolvidos diferentes projetos de irrigação de forma teórica e simulada, atendendo requisitos básicos de projeto de irrigação por aspersão convencional. A realização dos projetos de forma teórica e simulada foi para abranger diferentes configurações de sistemas de irrigação por aspersão com diferentes tamanhos área, diferentes espaçamentos entre aspersores e ramais de irrigação. Desta forma, foram dimensionados sistemas de irrigação por aspersão convencional móvel, para atender áreas irrigadas de até 10 hectares.

Para o dimensionamento dos sistemas de irrigação foram utilizados dados de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na qual foram obtido por meio de oito anos de dados históricos da região de Santiago/Rs e calculados por meio da equação de Penman-Monteith durante o período da cultura, os dados de coeficiente de cultura (k<sub>c</sub>) utilizados foram de pastagem anual de verão com o valor de 1,2. Foram consideradas as características físico-hídricas de um Latossolo vermelho distrófico típico, Tabela 1, assim foram utilizadas as mesmas características para o dimensionamento de todos os sistemas de irrigação.

Tabela 1. Características físico-hídrica do solo

Horizonte	Profundidade (cm)	CC (%)	PMP (%)	ds (g.cm <sup>3</sup> )	CTA (mm)	f	CRA (mm)	CRA Total (mm)
1	20	18,80	9,05	1,65	32,18	0,57	18,34	65,15
2	40	22,55	11,38	1,44	32,17		18,34	
3	60	26,00	13,48	1,27	31,80		18,13	
4	70	28,91	13,78	1,20	18,16		10,35	

CC- Capacidade de campo, PMP – Ponto de murcha permanente, ds – densidade do solo, CTA – Capacidade total água no solo, CRA – Capacidade real de água no solo, f- fator de depleção. Fonte: Próprio autor.

A metodologia proposta por Doorenbos & Kassam (1994) foi utilizada para o manejo de água, onde foi considerado para o período crítico da cultura uma lâmina de 6,48 mm.dia<sup>-1</sup>. A eficiência de aplicação fixada para os sistemas de irrigação para determinar a lâmina líquida foi de 85%, sendo esta considerada adequada para sistemas de irrigação do tipo aspersão convencional.

Para realizar as irrigações foi adotado turno de rega de 6 dias. A partir destes dados, foi determinada a taxa de aplicação necessária para atender a demanda de cada projeto. O tempo de

irrigação diário foi definido de modo a não ultrapassar 8 h, devido a questões trabalhistas legais. Desta forma, o tempo mínimo de trabalho foi definido em aproximadamente 6 h diárias, pois, quanto maior o tempo de aplicação de água para uma mesma área, menor será a vazão requerida pelo sistema e, conseqüentemente, há redução da potência requerida pela motobomba.

Para o melhor aproveitamento dos recursos e redução dos custos com os sistemas de irrigação, foram realizadas a setorização das áreas de irrigação, de forma a não ultrapassar o turno de rega definido, com diferentes números de linhas laterais operando simultaneamente, atendendo toda a área pretendida.

Foram dimensionados 25 projetos de sistemas de irrigação em formato retangular, de forma a atender as áreas irrigadas de 1, 3, 5, 7 e 10 ha, com a distribuição das linhas laterais de maneira que os espaçamentos entre aspersores e ramais de irrigação utilizados sejam de 12 x 12; 12 x 18; 18 x 18; 18 x 24 e 24 x 24 m. Foi considerado em todos os projetos que as linhas principais fossem posicionadas no centro da área, contendo assim, linhas laterais em ambos os lados.

A altura de instalação dos aspersores nas linhas de irrigação em todas as configurações dos sistemas foi considerada de dois metros em relação ao solo. Para determinar as alturas geométricas nos pontos de irrigação nos diferentes sistemas de irrigação foram adotados os valores de declividades para linha de sucção de 4%, linha de recalque de 7% e na linha principal de 6%. As linhas de irrigação em todos os projetos foram consideradas em nível. 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. Assim, para realizar o cálculo das perdas de carga principal ou distribuída ao longo da linha principal e das linhas de irrigação foi utilizada a fórmula de Hazen-Williams, conforme exposta na Eq. 1. Já as perdas de carga secundária ou localizada na linha de irrigação foram determinadas através do método dos coeficientes das peças, conforme a Eq. 2. Com isso, os diâmetros das tubulações foram definidos de maneira que a velocidade máxima de escoamento não ultrapasse 2 m.s<sup>-1</sup>. Considerando para a tubulação de sucção um diâmetro comercial superior ao utilizado no recalque.

$$hf = 10,645 \frac{L}{D^{4,87}} \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85}} \quad (1)$$

$$hf_{loc} = \sum K \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Onde:  $H_f$  - Perda de carga principal (m);  $h_{floc}$  - Perda de carga localizada (m);  $L$  - Comprimento (m);  $D$  - Diâmetro da tubulação (m);  $Q$  - Vazão ( $m^3.s^{-1}$ );  $C$  - Coeficiente Hazen Willians;  $K$  - Coeficiente de peça;  $v$  - Velocidade de escoamento ( $m.s^{-1}$ );  $g$  - Aceleração da gravidade ( $m.s^{-1}$ ).

Desta forma, a Tabela 2 mostra as vazões necessárias para atender cada um dos projetos e a potência necessária para cada situação de estudo.

Tabela 2. Vazões calculadas e potências utilizadas para atender à necessidade dos projetos de irrigação dimensionado

Espaçamento	Área irrigada (ha)					Potência utilizada (cv)				
	1	3	5	7	10	1	3	5	7	10
	Vazão do sistema ( $m^3.h^{-1}$ )									
12 x 12	14,58	34,99	58,32	87,48	122,47	5	15	25	40	50
12 x 18	14,10	38,07	67,68	84,60	126,90	7,5	15	25	40	50
18 x 18	12,84	38,52	68,48	85,60	154,08	7,5	15	25	40	50
18 x 24	17,40	34,80	60,90	78,30	139,20	10	15	30	40	60
24 x 24	15,20	30,40	45,60	79,80	121,60	7,5	15	25	40	60

Fonte: Próprio autor.

Após o dimensionamento dos sistemas de irrigação, foram aplicados métodos de controle de vazão que são comumente utilizados em sistemas de irrigação para quantificar o consumo de energia e analisar as possíveis reduções com a utilização dos mesmos. Desta forma os métodos utilizados foram: nenhum controle e tempo de irrigação fixo (M0) método de referência; nenhum controle e tempo de irrigação variável (M1), determinado em função o tempo necessário em cada setor de irrigação em relação a vazão em cada setor; controle por estrangulamento da válvula e tempo de irrigação fixo (M2) onde através da introdução de uma válvula estranguladora é possível determinar um novo ponto de operação do sistema de irrigação para atender a necessidade de cada setor a ser irrigado modificando a curva do sistema com uma rotação constante da bomba; uso de inversor de frequência e tempo de irrigação fixo (M3) sendo este método usado para variar a velocidade do motor de acionamento da bomba de recalque de um sistema de irrigação, de modo que o ponto de menor pressão necessário seja sempre mantido em seu valor mínimo, ou seja, a pressão de projeto.

Para determinar a vazão e o rendimento obtida em cada setor dos sistemas, foram plotadas as curvas características ( $H_m \times Q$  e  $Rend \times Q$ ) de cada motobomba selecionada em função da necessidade de cada projetos e determinadas as equações de cada curva.

Por meio da altura manométrica necessária para atender cada setor foi possível obter a vazão e o rendimento por meio da dedução das equações da curva características conforme ROBAINA (2017-informe verbal). Além disso, para determinar o tempo de operação de cada setor de irrigação foi utilizado a Eq 3.

$$T_i = \left( \frac{L_b}{Q} \right) EL \text{ CLI NL} \quad (3)$$

Onde:  $T_i$  - tempo de irrigação (h);  $L_b$  - lâmina bruta (mm),  $Q$  - vazão do gotejador ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ );  $EL$  - espaçamento entre linhas laterais (m);  $CLI$  - comprimento da linha lateral (m) e  $NL$  - número de linha laterais operando simultaneamente.

Em cada um dos métodos de controle de vazão citados foi quantificado o consumo de energia elétrica unitário ( $\text{kWh} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) consumido através das características de tempos de operação, altura manométrica e vazão de cada um dos métodos testados, posteriormente foram realizadas as diferenças percentuais do consumo de energia elétrica de cada um dos métodos em relação ao M0, sendo feita essas análises entre as áreas e combinações de espaçamentos entre aspersores e ramais, também foi realizada uma comparação entre os métodos tomando como referência o mais econômico, após foi quantificado o incremento de consumo dos demais. Todos os processos de dimensionamento, aplicação dos métodos de controle e quantificação do consumo de energia foram realizados com o auxílio das planilhas eletrônicas do Microsoft Office Excel.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a utilização dos métodos de controle de vazão para cada configuração dos sistemas de irrigação estudados, foi possível demonstrar o comportamento do consumo de energia dos métodos alternativos, em relação ao método referência. Desta forma, a Tabela 3, apresenta os valores obtidos de redução do consumo de energia unitário em percentual, através da utilização dos métodos de controle de vazão em cada uma das situações testadas (áreas e espaçamentos).

Tabela 3. Economia de energia (%) com a utilização dos métodos de controle de vazão adotados em projetos variando áreas e espaçamentos

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

Fonte: Próprio autor.

A utilização dos métodos de controle de vazão em sistema de irrigação por aspersão convencional, de modo geral apresentaram valores de economia de energia que variaram de 9,12 a 50,45%. Sendo que, as menores economias de energia encontrados, foram observados na área de 5 ha, com exceção do 24 x 24 m na aplicação dos três métodos de controle. Já os maiores percentuais de economia não apresentaram uma tendência a ser seguida em relação aos espaçamentos, sendo estes, obtidos na área de 1 ha, com valores superiores a 20% de economia de energia elétrica.

Em relação aos espaçamentos utilizados para todas áreas, pode-se verificar, que ocorreu uma tendência do espaçamento de 24 x 24 m alcançar as maiores economias de energia em relação aos demais, chegando a uma média de economia superior a 26%, para os três métodos de controle. Analisando os valores encontrados de economia de energia em relação a área irrigada para todos os

espaçamentos testados é possível constatar que os maiores percentuais de economia foram obtidos para a área de 1 ha nos três métodos testados, chegando a valores médios de 34,8% de redução do consumo, a menor economia de energia encontrada foi para a área de 5 ha, com valores médios de 18,7%.

O método que utiliza válvula de estrangulamento (M2) é o que apresenta os menores valores de economia em relação a não utilização de controle de vazão, com valores variando de 9 a 38%, sendo este método com menor eficiência em relação aos outros dois métodos testados (M1 e M3). Do mesmo modo, Ferreira et al. (2011) relatam as diversas desvantagens em relação à utilização do método de controle M2, pois, este favorece o aumento das perdas de carga em função da alteração do ponto de operação do conjunto motobomba através das modificações das condições de funcionamento por meio de válvulas para atingir o ponto desejado do sistema.

É possível verificar em relação a utilização do método com inversores de frequência em sistemas de irrigação os valores de economia de energia obtidos variaram de 18,5 a 50,4%. Marchi et al. (2012) relatam que os sistemas de distribuição de água dispõem de uma parcela significativa na redução do consumo de energia através de sua utilização, proporcionando a alteração das rotações do conjunto motobomba. Isso ficou bem definido neste estudo onde, o método M3 foi o que apresentou os maiores valores de economia de energia, estando de acordo com Alves et al. (2020) que demonstrou o menor consumo de energia com a utilização de inversores de frequência. 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 diferentes condições de inclinação de linha lateral, sendo de 0, 10, 20 e 30% respectivamente, estes valores coerentes com os resultados encontrados neste estudo.

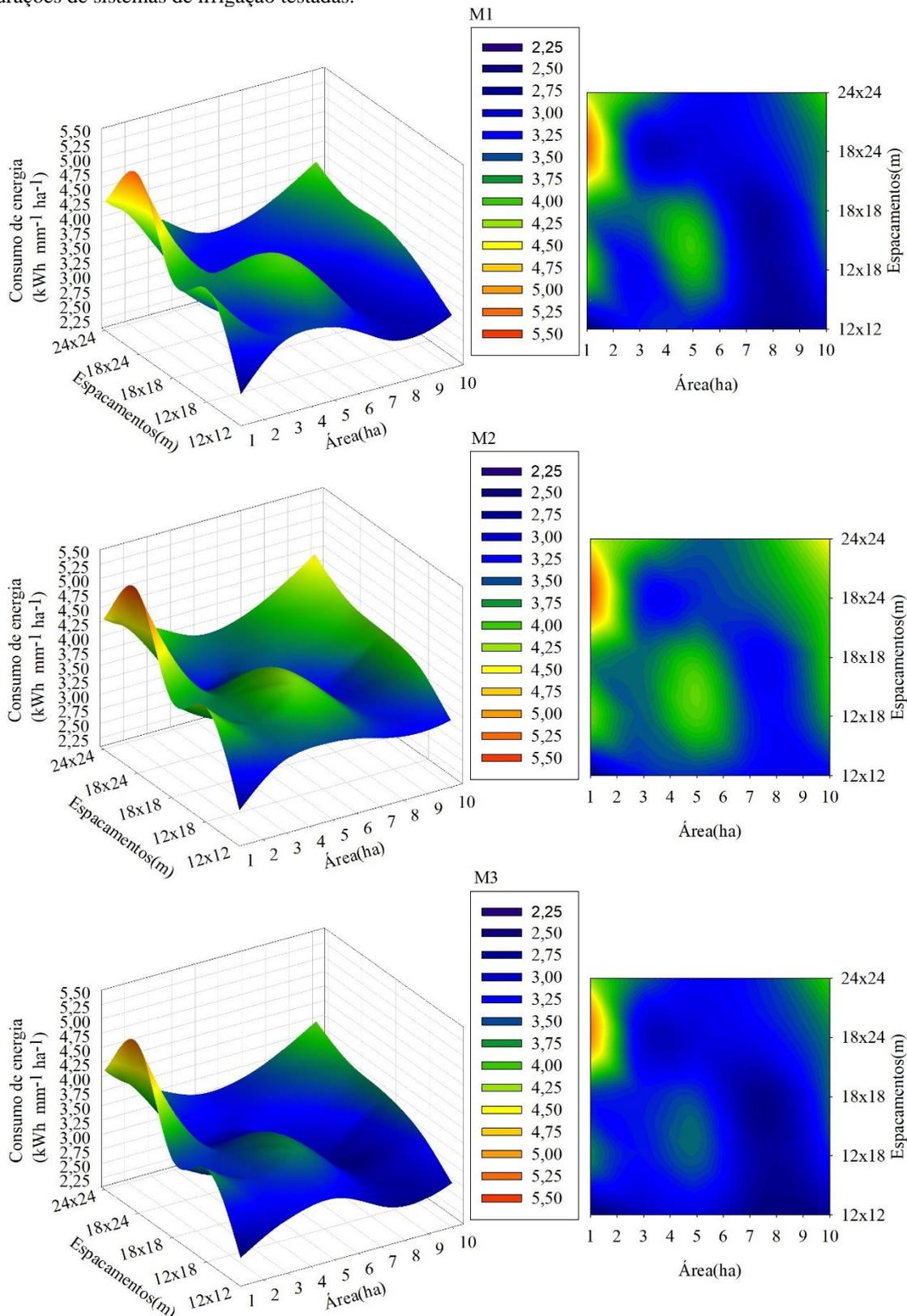
Lamaddalena & Khila (2012) em estudos realizados na Itália, em estações de bombeamento evidenciaram uma economia no consumo de energia de 27 e 35% com a utilização de sistema com variação na velocidade de rotação do eixo da bomba. Resultados semelhantes foram encontrados em estudo de caso realizado no instituto CIHEAM-IAMB na Itália, onde, em diferentes condições, a utilização de inversores de frequência para variar a velocidade de rotação gerou uma economia de energia em torno de 33% (BARUTÇU et al., 2007), sendo estes valores de economia de energia supracitados em ambos os trabalhos estão corroborando com os resultados deste estudo com a utilização de inversores de frequência.

Os resultados encontrados neste trabalho assemelham-se aos encontrados por Dutra & 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) que verificaram que com a utilização de inversores de frequência ocorreu uma redução de até 32% no consumo de energia, quando comparado à operação com a rotação nominal do sistema de bombeamento.

O comportamento do consumo de energia elétrica em kWh.mm<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup> nas configurações estudadas através da utilização dos métodos de controle de vazão em sistemas de irrigação, é verificado na Figura 1. Estes resultados demonstram os pontos onde se tem os menores consumos de energia, com destaque para os métodos M1 e M3 na área de 7 ha para todos os espaçamentos testados.

Figura 1. Consumo de energia elétrica (kW h. mm<sup>-1</sup>. ha<sup>-1</sup>) com os métodos de controle M1, M2 e M3, nas diferentes configurações de sistemas de irrigação testadas.



Fonte: Próprio autor.

Além disso, outro fator de relevância da utilização do inversor de frequência, é o de favorecer o ajuste dos motores elétricos de modo a manter o rendimento próximo ao nominal, isto é, o rendimento do motor atuando para a condição de 100% da carga nominal. Podendo ainda, favorecer com que ocorra acréscimos no rendimento do sistema. 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.

A análises referente a diferença de economia encontrada entre os métodos testados, foi tomado como base o método M3, os resultados destas análises são apresentados na Tabela 3. Entretanto, em três situações o método M1 foi mais eficiente que M3, sendo estas nas áreas de 3 ha (12 x 18 m), 5 ha (18 x 24m) e 7 ha (24 x 24 m). Para as demais situações o método M3 foi mais eficiente e apresenta valores até 11,29%.

Tabela 4. Percentual de energia economizado com a utilização do método M3 quando comparados com os métodos M1 e M2

Espaçamentos	Área (ha)				
	1	3	5	7	10
Relação de economia entre M3 com M1 (%)					
12 x 12	1,97	11,29	5,60	4,36	4,46
12 x 18	8,30	-2,44	8,07	3,36	2,07
18 x 18	8,31	7,06	8,36	3,90	3,70
18 x 24	2,71	1,18	-0,57	0,00	1,23
24 x 24	3,57	6,26	1,13	-0,62	0,23
Relação de economia entre M3 com M2 (%)					
12 x 12	4,99	11,65	9,05	17,51	13,63
12 x 18	10,08	7,33	11,80	15,47	12,88
18 x 18	9,53	7,60	12,03	15,95	10,21
18 x 24	4,91	7,76	8,58	10,63	10,13
24 x 24	4,63	10,25	9,80	10,64	11,68

Fonte: Próprio Autor.

Os valores de consumo de energia foram de 4,63 a 17,51% superiores com a utilização do método M2, quando realizada a análise da relação entre os métodos M3 e M2, este comportamento está de acordo com o estudo realizado por Diniz *et al.* (2017) testando um sistema de abastecimento de água obteve uma economia de 27,1% no consumo de energia, valores estes superiores aos encontrados neste estudo.

Vieira Júnior *et al.* (2010) salientam que a economia de energia com o uso de métodos que alteram a rotação de sistema de bombeamento, não é a única vantagem pois, ocorre a eliminação do

uso de válvulas, o alto custo de manutenção, simplificação da tubulação, eliminação do excesso de pressão no sistema e picos na corrente elétrica.

#### **4 CONCLUSÕES**

Para os espaçamentos estudados os maiores valores de economia de energia elétrica foram obtidos para os espaçamentos 24 x 24 m e 18 x 18 m respectivamente.

A utilização do inversor de frequência como método de controle de vazão é a alternativa que apresenta os maiores valores de economia de energia em relação ao demais métodos testados neste estudo. Proporcionando elevadas reduções no consumo de energia frente a outros métodos tradicionalmente utilizados no meio rural.

#### **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, por meio da bolsa de estudo concedida.

**REFERÊNCIAS**

ALVES, M. C. S.; DA SILVA FILHO, J. I. Uso de Inversores de frequência em Aplicações de Bombeamento de Água para Instalações Prediais/Use of Inverters in Water Pumping Applications in Building Installations. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 1, p. 13-23, 2020. <https://doi.org/10.34115/basrv4n1-002>

ARAÚJO, A.C.D.; DANTAS NETO, J.; 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**, [s. n.], v. 7, p. 178-187, 2011.

BARUTÇU, F.; LAMADDALENA, N.; FRATINO, U. Energy saving for a pumping station serving an on-demand irrigation system: A study case. In: Water saving in Mediterranean agriculture and future Research needs. options Mediterranéennes, v.1, n.56, p.367-379, 2007.

DÍAZ, J.A.R.; MONTESINOS, P.; POYATO, E. C. Detecting critical points in on-demand irrigation pressurized networks—a new methodology. **Water resources management**, v.26, n.6, p.1693-1713, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-9981-8>.

DINIZ, C.F.D.; SILVA, L.H.P. DA; DIAS FILHO, R.F. Diagnóstico energético em um sistema de abastecimento de água. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v.2, n.4, 2017. <http://dx.doi.org/10.25286/rep.v2i4.271>.

DOGAN, E.; SEBRI, M.; TURKEKUL, B. Exploring the relationship between agricultural electricity consumption and output: New evidence from Turkish regional data. **Energy Policy**, v. 95, p. 370-377, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.018>.

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, p.1-9, 2014. <http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v2iss1p1>.

FEITOSA, E.O.; ALBIERO, D.; FERNANDES, F.R.B.; SANTOS, P.R.A. DOS; CHIODEROLI, C.A. Estimativa econômica da utilização do biogás para geração de energia elétrica no perímetro irrigado Quixabinha-Mauriti-CE. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.23, n.3, p.220, 2015. <https://doi.org/10.13083/reveng.v23i3.532>.

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, n.2, p. 65-79, 2014. <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v3i2.35560>.

FERREIRA, F.J.; FONG, J.A.; ALMEIDA, A.T. DE. Ecoanalysis of variable-speed drives for flow regulation in pumping systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v.58, n.6, p.2117-2125, 2011. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2010.2057232>.

GARCIA, D. J.; YOU, F. The water-energy-food nexus and process systems engineering: a new focus. **Computers & Chemical Engineering**, v. 91, p. 49-67, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.03.003>

GARCÍA, I.F.; MONTESINOS, P.; POYATO, E.C.; DÍAZ, J.R. Energy cost optimization in pressurized irrigation networks. **Irrigation science**, v.34, n.1, p.1-13, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-015-0475-3>.

GARCÍA, I.F.; MONTESINOS, P.; POYATO, E.C.; DÍAZ, J.R. Methodology for detecting critical points in pressurized irrigation networks with multiple water supply points. **Water Resour Manage**, v.28, n.4, p.1095-1109, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0538-x>.

GARCIA, J.R.; VIEIRA FILHO, J.E.R. Política agrícola brasileira: Produtividade, inclusão e sustentabilidade. **Revista de Política Agrícola**, v.23, n.1, p.91-104, 2014.

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. [http://www.lenhs.ct.ufpb.br/wp-content/uploads/arquivos/Livro\\_Eficiencia\\_Energetica.pdf](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/wp-content/uploads/arquivos/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf). 28 Set. 2017.

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. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0271-7>.

LANGARITA, R.; CHÓLIZ, J.S.; SARASA, C.; DUARTE, R.; JIMÉNEZ, S. Electricity costs in irrigated agriculture: A case study for an irrigation scheme in Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.68, n.2, p.1008-1019, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.075>.

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 frequência. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v.8, n.2, p.51-61, 2015. <https://doi.org/10.5935/PAeT.V8.N2.06>.

MARCHI, A.; SIMPSON, A.R.; ERTUGRUL, N. Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems. **Drinking Water Engineering and Science**, v.5, n.1, p.15-21, 2012. <https://doi.org/10.5194/dwes-5-15-2012>.

MORAES, M.J.; OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, E.C.; MONTEIRO, P.M.B.; MENDES, A.L.C.; DAMIÃO, J.H.A.C. Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. **Revista Engenharia Agrícola**, v.34, n.6, p.1075-1088, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162014000600005>.

NRCS - Natural Resources Conservation Service. Variable Speed Drive (VSD) for irrigation pumping. **Water Management Technical Note**, n.1, Washington, p.1-44. 2014. <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=36264.wba>.

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. <http://ruc.unimontes.br/index.php/unicientifica/article/view/392/404>. 21 Set. 2018.

SALES, D.L.A.; JUNIOR, J.A.; PEREIRA, R.M.; RODRIGUEZ, W.D.M.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A.W.P. Viabilidade econômica da irrigação por pivô central nas culturas de soja,

milho e tomate. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v.22, n.1. 2017. <https://doi.org/10.12661/pap.2017.011>.

TARJUELO, J.M.; RODRÍGUEZ-DÍAZ, J.A.; ABADIAC, R.; CAMACHO, E.; ROCAMORAC, 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. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.009>.

VENANCIO, L.P.; CUNHA, F.F.; MANTOVANI, E.C. Demanda hídrica do cafeeiro conilon irrigado por diferentes sistemas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v.10, n.4, 2016. <https://doi.org/10.7127/RBAI.V10N400409>.

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. P 75-86 **In:** Gomes, H. P. (Org.). **Sistemas de saneamento: Eficiência Energética**. João Pessoa: Editora Universitária-UEPB, 2010. Cap. 6. p.75-86. [http://www.lenhs.ct.ufpb.br/wp-content/uploads/arquivos/Livro\\_Eficiencia\\_Energetica.pdf](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/wp-content/uploads/arquivos/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf). 11 Dez. 2017.

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, n.1, p.25-35, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.06.009>.