



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

FRANCISCO AÉCIO DE LIMA PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM
SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE PRECISÃO PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA
UTILIZANDO ARDUINO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

MOSSORÓ
JANEIRO DE 2017

FRANCISCO AÉCIO DE LIMA PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM
SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE PRECISÃO PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA
UTILIZANDO ARDUINO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

Tese apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água.

Orientador: Prof. Dr. Suedêmio de Lima Silva/UFERSA

MOSSORÓ/RN
JANEIRO DE 2017

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

P436d PEREIRA, FRANCISCO AÉCIO DE LIMA.
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE PRECISÃO
PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA UTILIZANDO ARDUINO E
INVERSOR DE FREQUÊNCIA / FRANCISCO AÉCIO DE LIMA
PEREIRA. - 2017.
59 f. : il.

Orientador: SUEDEMIO DE LIMA SILVA.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2017.

1. Agricultura irrigada. 2. controle de
pressão. 3. potência ativa. 4. válvula
hidráulica. 5. controlador de irrigação. I. SILVA,
SUEDEMIO DE LIMA, orient. II. Título.

Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)

FRANCISCO AÉCIO DE LIMA PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM
SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE PRECISÃO PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA
UTILIZANDO ARDUINO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

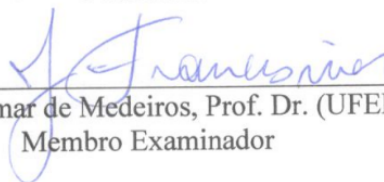
Tese apresentada a Universidade Federal Rural
do Semi-Árido - UFRSA, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Doutor em
Manejo de Solo e Água.

Defendida em: 30 / 01/ 2017

BANCA EXAMINADORA



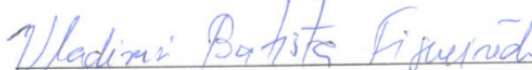
Suedêmio de Lima Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



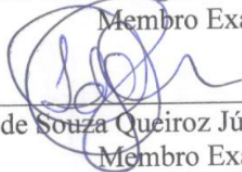
José Francismar de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto, Prof. Dr. (IFRN)
Membro Examinador



Vladimir Batista Figueirêdo, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Idalmir de Souza Queiroz Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Ao meu irmão Raimundo Pereira Lima, (In Memoriam), que com grande sabedoria soube ensinar que nos caminhos difíceis com dedicação e esforço se chega ao longe.

Ofereço!

Ao meu filho João Pedro de Oliveira Lima e minha esposa Jordanna Ariele de Oliveira Lima, pelo carinho, pelo incentivo e pela paciência

Dedico, com muito amor e carinho

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me iluminado e guiado meus passos.

Aos meus pais pela grande ajuda e colaboração, pois sem eles não teria chegado até aqui.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido e ao Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água.

A um grande amigo André Moreira, pela contribuição e incentivo no término desse trabalho.

Aos professores José Francismar de Medeiros, Vladimir Batista Figueirêdo e Rafael Oliveira Batista, pela sua atenção e disponibilidade, pois sempre buscaram auxiliar-me no decorrer do trabalho com sugestões e orientações na análise dos dados.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água.

Ao professor Suedêmio de Lima Silva, pela confiança, pela paciência na transmissão dos conhecimentos, e por demonstrar sempre prontidão nas vezes que necessitei, sempre com muita simplicidade, dignidade, caráter e respeito.

Agradeço aos professores Idalmir de Souza Queiroz Júnior e Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto, em aceitarem o convite para participar da banca examinadores.

Aos colegas: Anailson de Souza Alves, Edmilson Gomes Cavalcante Junior, Wesley de Oliveira Santos, Jonatan Levi Ferreira de Medeiros, Rafael, Antônio Fabrício, Rafael Vagner de Oliveira Machado e Jorge Luiz pela amizade e colaboração na realização da pesquisa.

CNPq- Projeto Casadinho/Procad pelo apoio financeiro.

A todas as pessoas que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos!

"Deus não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo só depende da nossa vontade e perseverança."

Albert Einstein

RESUMO

PEREIRA, F. A. de L. Universidade Federal Rural do Semi-árido. **Desenvolvimento e análise da eficiência energética de um sistema de automação de precisão para irrigação localizada utilizando arduino e inversor de frequência.** Orientador: D. Sc. Suedêmio de Lima Silva.

A taxa de crescimento da população mundial diminuiu, mas mesmo assim continua a ter crescimentos absolutos consideráveis, tornando os recursos hídricos e energéticos cada vez mais limitados. Para torna-se viável ao longo do tempo, a irrigação, que é o maior consumidor de água doce e grande consumidor de energia, precisa ficar cada vez mais eficiente. Um dos caminhos para melhorar esse quadro é o uso de tecnologias. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de automação de precisão para controlar a pressão de serviço na irrigação localizada. Construiu-se uma bancada de testes composta de reservatório de água, conjunto motobomba trifásico (380 V), válvulas hidráulicas e controlador eletrônico comercial para abertura e fechamento das válvulas. O controlador de irrigação comercial abriu e fechou as válvulas a cada 20 min, que foram reguladas de forma a inserir uma perda de carga crescente da válvula 1 a 6. Foram realizados dois ensaios com acionamentos distintos, um utilizando o sistema automatizado, no qual a alimentação da bomba foi feita pelo inversor de frequência, e o segundo ensaio utilizando alimentação direta da rede de energia elétrica. O sistema automatizado foi composto por uma placa Arduino Mega que controlava o inversor de frequência, monitorava e gravava os dados de rotação, pressões das linhas de alimentação e retorno, status de cada válvula (aberta ou fechada) e data e hora do ensaio. No modo automático, o sistema trabalhava em malha fechada, monitorando as variáveis de processo e atuando no inversor de frequência, para alterar a rotação da bomba e, conseqüentemente, ajustar a pressão de saída das válvulas para o valor previamente programado, mantendo a pressão de saída constante. No acionamento direto da rede, o sistema trabalhou em malha aberta, e a placa Arduino apenas monitorou e gravou as variáveis de processo. Foram analisados parâmetros elétricos e hidráulicos do modo automático com inversor de frequência e comparou com um sistema convencional acionando direto da rede elétrica. Os resultados mostraram que a placa arduino controlou de forma satisfatória a pressão de saída quando utilizou o inversor de frequência. A rotação no modo automático variou de 2.924 a 3.646 rpm, correspondendo a uma variação de frequência de 49,67 a 62,29 Hz respectivamente, bem como reduziu a potência ativa em 42,8%. Para o acionamento direto da rede a rotação do motor foi de $3.519 \pm 4,64$ rpm, com baixa variação de potência ativa de $2.320,55 \pm 87,54$ W. Na válvula 6, para o sistema automático, os parâmetros de frequência e rotação ficaram acima do especificado para o motor 62,29 Hz e 3.646 rpm. Comparando ambos os sistemas de acionamento até a válvula 5, que é o ponto de equilíbrio direto da rede elétrica com o sistema automático, observou-se que na rede elétrica a potência ativa foi de 11.728,70 W e no modo automático foi de 8.341,01 W. Em relação ao modo automático, a redução foi de 40,61%. A potência aparente e a reativa indutiva em termos absolutos subiram das válvulas 1 para 6, mas se analisarmos em relação a potência ativa ela reduziu, indicando que o sistema ficou mais eficiente, como conseqüência o fator de potência subiu de 0,52 para 0,67.

Palavras-chave: Agricultura irrigada, controle de pressão, potência ativa, válvula hidráulica, controlador de irrigação.

ABSTRACT

PEREIRA, F. A. de L. Universidade Federal Rural do Semi-árido. **Development and analysis of the energy efficiency of a precision automation system for irrigation located using arduino and converter frequency.** Advisor: Suedêmio de Lima Silva.

The rate of growth of the world's population declines, but nonetheless continues to grow considerably, making water and energy resources increasingly limited. To become viable over time, irrigation, which is the largest consumer of fresh water and a large consumer of energy, needs to be increasingly efficient. One of the ways to improve this framework is the use of technologies. The objective of this work was to develop a precision automation system to control the service pressure in localized irrigation. A test bench was built consisting of a water reservoir, a three-phase motor pump (380 V), hydraulic valves and a commercial electronic controller for opening and closing valves. The commercial irrigation controller opened and closed the valves every 20 min, which were adjusted so as to insert an increasing load loss from valve 1 to 6. Two tests were performed with distinct drives, one using the automated system, in which the Pump was made by the converter frequency, and the second test using direct power from the electric power grid. And the second test using direct mains power supply. The automated system consisted of an Arduino Mega board that controlled the converter frequency, monitored and recorded rotational data, power and return line pressures, status of each valve (open or closed) and date and time of the test. In automatic mode, the system worked in a closed loop, monitoring the process variables and acting on the converter frequency to change the pump speed and, consequently, to adjust the output pressure of the valves to the previously programmed value, maintaining the pressure of Constant output. In the direct drive of the network, the system worked in open loop, and the Arduino board only monitored and recorded the process variables. Electrical and hydraulic parameters were analyzed from the automatic mode with converter frequency and compared with a conventional system directly driving the electric network. The results showed that the Arduino board satisfactorily controlled the outlet pressure when using the converter frequency. The rotation in the automatic mode varied from 2,924 to 3,646 rpm, corresponding to a frequency variation of 49.67 to 62.29 Hz respectively, as well as reducing the active power by 42.8%. For the direct drive of the network, the engine speed was $3,519 \pm 4.64$ rpm, with a low active power variation of $2,320,55 \pm 87,54$ W. On valve 6, for the automatic system, the frequency and rotation parameters Were above that specified for the engine 62.29 Hz and 3,646 rpm. Comparing both drive systems to valve 5, which is the direct balance point of the electric grid with the automatic system, it was observed that in the electric grid the active power was 11,728.70 W and in the automatic mode was 8,341, 01 W. Regarding the automatic mode, the reduction was 40.61%. The apparent power and the inductive reactive in absolute terms rose from valves 1 to 6, but if we analyze in relation to the active power it reduced, indicating that the system became more efficient, as a consequence the power factor rose from 0.52 to 0, 67.

Keywords: Irrigated agriculture, rotation variation, active power, hydraulic valve, irrigation controller.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I -SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE PRECISÃO UTILIZANDO ARDUINO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

Figura 1. Desenho esquemático da bancada de ensaio	17
Figura 2. Diagrama de fluxo das leituras dos sensores e processamento dos dados no modo REDE.....	18
Figura 3. Diagrama de fluxo das leituras dos sensores e processamento dos dados no modo AUTO	19
Figura 4. Arduino Mega® 2560 R3, com ligações de entrada e saída	19
Figura 5. Circuito de monitoramento do status da válvula (ligada/desligada)	20
Figura 6. Circuito multiplexador para monitorar as válvulas.....	21
Figura 7. Circuito para ligar e desligar o motor via inversor	21
Figura 8. Placa com os transdutores de pressão modelo ASDX100GR.....	22
Figura 9. Circuito de monitoramento do encoder.....	22
Figura 10. Modulo RTC – relógio de tempo real	23
Figura 11. Sistema de armazenamento de dados em cartão MICRO SD	23
Figura 12. Interface homem-máquina (IHM).....	24
Figura 13. Analisador de energia Minipa ET-5061C.	24
Figura 14. Foto dos equipamentos montador na protoboard.....	25
Figura 15. Pressões de entrada nas válvulas, no modo AUTO e no modo REDE.	26
Figura 16. Pressão média na entrada das válvulas para os dois modelos de acionamento.....	27
Figura 17. Pressão de saída nas válvulas de 1 a 6, para os dois modelos de acionamento	28
Figura 18. Rotação (A); frequência (B) e Tensão entre as fases (C) nas válvulas de 1 a 6, para os dois modelos de acionamento	30
Figura 19. Vazão observado nas válvulas de 1 a 6, para os dois modelos de acionamento.	31

CAPÍTULO II - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE PRECISÃO UTILIZANDO ARDUINO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA APLICADO A SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

Figura 1. Desenho esquemático da bancada de ensaio composta por: 1 – sistema de alimentação trifásica, 2- inversor de frequência, 3 – analisador de energia, 4 – motobomba, 5 – encoder rotativo, 6 – controlador eletrônico, 7 – válvulas elétricas, 8 – sensores de pressão, 9 – manômetros analógicos, 10 – sistema microcontrolado e 11 – sensor de vazão.....	43
Figura 2. Diagrama de fluxo do sistema de automação e analisador de energia.....	44
Figura 3. Placa protoboard com circuitos eletrônicos interligados ao Arduino Mega®.	45
Figura 4. Pressão de entrada e saída nas válvulas e a rotação do motor	48
Figura 5. Potência ativa e frequência de saída do inversor de frequência.....	50
Figura 6. Potência aparente e potência reativa indutiva	52
Figura 7. Fator de potência indutivo.....	53
Figura 8. Tensão de saída do inversor e corrente do motor.....	54

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE PRECISÃO UTILIZANDO ARDUINO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA APLICADO A SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

Tabela 1. Análise variância das pressões de entrada e saída, vazão, rotação, potência ativa e frequência	47
Tabela 2. Análise variância das características potência aparente, potência reativa indutiva, fator de potência, tensão e corrente.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMAq	Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos.
ANEEL	Agência Nacional de Energia elétrica
AUTO	Sistema de irrigação sendo controlado de forma automática pelo Arduino
CLP	Controlador Lógico Programável
CSEI	Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação
CV	Cavalo-vapor
Hz	Hetz
IHM	Interface Homem-Máquina
kPa	KiloPascal
LCD	Display de cristal líquido
LEPA	Low Energy Precision Application
LIMMA	Laboratório de instrumentação de máquinas e mecanização agrícola
mm	Milímetro
REDE	Sistema de irrigação sendo acionado direto da rede de alimentação
rpm	Rotação por minuto
RTC	Relógio de tempo real
TXT	Arquivo com extensão de texto
V	Tensão em Volts
VA	Volt Ampere
VAC	Tensão corrente alternada
VDC	Tensão corrente continua
W	Watts

LISTA DE SÍMBOLOS

- ® Marca registrada
- % Porcentagem
- ” Polegada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO	3
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7
CAPÍTULO I - SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE PRECISÃO UTILIZANDO ARDUINO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA.....	9
1. RESUMO	10
2. ABSTRACT.....	11
3. INTRODUÇÃO	12
4. MATERIAL E MÉTODOS	16
5. RESULTADOS E DISCURSSÕES.....	25
6. CONCLUSÕES.....	32
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
CAPÍTULO II - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE PRECISÃO UTILIZANDO ARDUINO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA APLICADO A SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA.....	35
1. RESUMO	36
2. ABSTRACT.....	37
3. INTRODUÇÃO	38
4. MATERIAL E MÉTODOS	42
5. RESULTADOS E DISCURSSÕES.....	47
6. CONCLUSÕES.....	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
APÊNDICE A – RESUMO DOS QUADRADOS MÉDIOS	58
ANEXO A – CURVA DE SELEÇÃO BOMBA DANCO CAM W-19/21	59

1 - INTRODUÇÃO GERAL

A velocidade de crescimento da população mundial está diminuindo, mas mesmo assim a previsão é de que tenhamos crescimento absolutos significativos. A consequência disso é o aumento da demanda por produtos em todas as áreas, inclusive na de alimentos ocasionando uma maior utilização nos recursos naturais existentes.

Atualmente, estima-se que 19% da área cultivada no mundo seja irrigada e esta contribui com 44% dos alimentos produzidos, mas em alguns anos estima-se que mais da metade seja proveniente de áreas irrigadas. A irrigação é uma técnica agrícola que permite ao produtor controlar a quantidade de água aplicada as plantas, ou seja, coloca o recurso produtivo água sobre o controle do, especialmente em regiões áridas e semiáridas.

As áreas irrigadas no mundo têm produtividade de 2,7 vezes maior que áreas tradicionais de sequeiro, já no Brasil essa produtividade chega a 3,5 vezes, gerando um retorno econômico de 7 a 8 vezes quando comparadas com as áreas tradicionais. Entretanto o grande problema da irrigação é que consome mais de 70% de toda a água utilizada pelo homem, além disso ainda é um grande consumidor de energia elétrica. Contudo para a irrigação manter-se sustentável ambientalmente e economicamente é imprescindível torna-se mais eficiente, pois devido ao custo de energia no Brasil e os constantes aumentos de tarifa, inclusive com bandeiras e tarifação por cores, onde a cor vermelha e amarela tem que pegar sobre taxa.

Em decorrência do custo da energia, que pode chegar a 25% do custo total, a busca por equipamentos mais eficientes na aplicação de água e na redução de energia vem crescendo, e deve-se manter assim nas próximas décadas, destacando nesses quesitos os pivôs centrais e a irrigação localizada.

A irrigação localizada é um sistema que além de reduzir o consumo de energia devido à baixa pressão de serviço do sistema, reduz o consumo de água por molhar apenas a região das raízes das plantas que é a região onde a planta consegue absorver água. Entretanto na questão do consumo de energia ainda pode melhorar bastante com uso de tecnologias. Devido a características inerente ao sistema de irrigação localizado que necessita de divisão das áreas em unidade e até subunidades operacionais faz-se necessário a instalação de válvulas manuais ou hidráulicas.

Essas válvulas são instaladas a diferentes distâncias do sistema de bombeamento e normalmente em diferentes cotas do terreno, conseqüentemente cada válvula necessita de uma pressão diferente, e no momento do dimensionamento do sistema de bombeamento é considerado no cálculo a situação mais crítica, maiores pressões e vazões. Com isso, as válvulas

mais próximas e de cotas mais baixas necessitam de menor pressão, ocorrendo sobra de pressão. No sistema tradicional essa sobra de pressão é desperdiçada através da utilização de estrangulamento mecânicos, provocando perda de carga para corrigir essa pressão, conseqüentemente desperdiçando energia. Enquanto que na automação de precisão esse desperdício é reduzido pela variação de rotação do motor.

Na irrigação localizada para manter a pressão de saída constante é bastante complexa, pois se for feita com registros apenas estrangulando, existe vários fatores que interferem nessa situação, tais como: oscilação da energia, vazamentos e obstruções de emissores. Já se for feita com válvulas hidráulicas e sistema de regulação de pressão automáticos também usando estrangulamento mecânico, praticamente não sofre variação, porém o custo é elevado e também desperdiçam energia.

O uso de tecnologias existente na irrigação localizada permite corrigir a pressão de saída com menor desperdício energia, utilizando principalmente o inversor de frequência para variar a rotação e ajustar a pressão de forma manual ou automática. Contudo a melhor aplicação para irrigação seria regular a pressão de forma automática, e para isso é necessário a utilização de controlador lógico programável - CLP ou microcontroladores para fazer as leituras dos sensores e controlar a rotação do motor para chegar a pressão ajustada.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de automação de precisão para irrigação localizada para manter a pressão de saída constante reduzindo a demanda de potência, utilizando inversor de frequência controlado por uma sistema microcontrolado com Arduino.

2 - REFERENCIAL TEÓRICO

A taxa de crescimento da população mundial está caindo, mas segundo as Nações Unidas (2009) estima-se crescimento absolutos significativos da população mundial de 8,3 bilhões para 2030 e 9,1 bilhões para 2050. Já a expectativa para a demanda de alimentos e produtos agrícolas é de elevação de 50% e 70% respectivamente para os anos de 2030 e 2050 (Rocha & Christofidis, 2015).

Para elevar a produção de produtos agrícolas existe duas maneiras básicas, uma é elevando a área plantada e outra é elevando a produtividade por área, sendo uma das melhores maneiras de elevar a produtividade é a utilização da irrigação, que permite ao produtor controlar a quantidade água aplicada nas plantas, ou seja, permite colocar o recurso produtivo água sobre o controle do produtor. Um sistema de irrigação visa proporcionar condições de produzir economicamente, o que se consegue pelo aumento de produtividade e redução dos custos de produção por unidade produzida (Lima et al., 2009).

Não é fácil expandir a área irrigada, principalmente pelo custo de compra e instalação dos equipamentos, existe várias informações relevantes que devem ser levadas em consideração como: especialmente disponibilidade de água e energia e aptidão da área. Devido à escassez da água, e tendência de se agravar nas décadas seguintes, a irrigação tem de torna-se mais eficiente para conseguir produzir, pois as legislações ambientais para controle do uso da água estão limitando cada vez mais rigorosos com o uso e a eficiência.

No mundo, a área plantada é estimada em 1,56 bilhões de ha, dos quais 304 milhões são dotados de sistema de irrigação, ou seja, em torno de 20% da área plantada tem irrigação, mas é responsável de aproximadamente 44% da produção total de alimentos. A produtividade global em áreas irrigadas é 2,7 vezes maior que as áreas tradicionais de sequeiro (Christofidis, 2013).

No Brasil, a produtividade de áreas irrigadas que utilizam sistemas modernos de irrigação a produtividade física comprovada na ordem de 3,5 vezes superior a tradicional de sequeiro, além de proporcionar um retorno econômico por ha de sete a oito vezes maior que o cultivo tradicional de sequeiro (Rocha & Christofidis, 2015).

A área irrigada no Brasil segundo o Censo Agropecuário de 2006 foi de 4,45 milhões de ha, sendo as proporções por métodos de irrigação divididos em aspersão convencional – 35% (sem pivô), inundação – 24%, pivô central – 19%, Localizada – 8% e por sulco 8% (Paulino et al., 2011). Já em relação a eficiência de aplicação de água os piores valores são para as maiores áreas de irrigação, aspersão convencional 50 a 60%, inundação 25 a 40%, pivô central 80 a

85%, e localizada que tem maior eficiência, chegando a valores de acima de 90% (Coelho et al., 2005). Essa eficiência vai impactar diretamente na quantidade de água consumida por ha.

Além de ser o maior consumidor de água doce, a irrigação ainda é um dos grandes consumidores de energia, e devido aos aumentos de energias dos últimos anos, está obrigando o irrigante a procurar alternativas para reduzir o consumo de energia (Lima et al., 2015). o custo somente com energia em uma área com sistema de irrigação pode chegar em torno de 25% e maior parte é com os motores elétricos do sistema de bombeamento (Bernardo et al., 2008; Moreno et al., 2010).

A previsão das Nações Unidas (2009) em relação ao consumo de energia hidroelétrica e outras fontes, estimada para 2050, é de elevação de 60%. Com o custo da energia elétrica ficando cada vez mais elevado e demanda crescente, deve continuar crescendo nas próximas décadas a busca por técnicas e dispositivos que aprimorem o uso destes recursos (Lima et al., 2015).

A irrigação localizada é um dos sistemas de irrigação que mais economiza água, pois molha basicamente próximos as raízes, que é o local onde a cultura absorver água o que diminui as perdas, além disso, devido à baixa pressão de serviço na operação do sistema necessita de menor potência no motor para o bombeamento, conseqüentemente gasta menos energia (Coelho et al., 2005). Vieira et al., (2011) analisando custo por ha da irrigação por aspersão e gotejamento durante o período de 10 anos concluiu que o método de irrigação mais economicamente viável neste estudo foi o gotejamento.

Apesar dos sistemas de irrigação localizada serem os mais eficientes, ainda tem pouca participação na irrigação nacional, apenas 8%, mas nos últimos anos a tendência é da busca por equipamentos com eficiência mais elevada. Dados da Câmara Setorial de Irrigação – CSEI da Associação Brasileira de Maquinas e Equipamentos – ABIMAQ, publicados por Rocha & Christofidis, 2015 mostram que a venda de equipamentos de irrigação entre 2000 a 2013 foi de 36,2% para pivô central; 29,6% para localizada; 19,4% para carretel e 14,8% aspersão convencional; a área total irrigada por cada sistema em 2013 foi 126.000; 72.576; 32.500 e 53.100 ha, respectivamente para pivô central, localizada, carretel e aspersão convencional.

O uso da tecnologia pode contribuir para melhorar a eficiência no sistema de irrigação. Uma dessas tecnologias é a automação convencional que controla muito bem os tempos de irrigação, correspondente abertura de fechamento das válvulas e ligar e desligar o motor automático, também facilita a irrigação noturna em horário reduzido de tarifa de energia. Os

principais equipamentos utilizados são válvulas hidráulicas, sistema de comando de válvulas, controladores.

Segundo Gornat & Silva (1990) as principais vantagens da automação convencional são precisão nos tempos de irrigação, economia de mão de obra e energia. Já os pontos negativos são auto custo inicial, interfaces complexas, mão de obra deficiente para montagem e operação do sistema, e por último, confiança excessiva no sistema. Porém essa automação não se ajusta para manter se manter na máxima eficiência energética, sendo para necessário uma irrigação de precisão para o sistema se ajustar e manter a máxima eficiência.

Na automação de precisão a quantidade de equipamento é maior que na automação convencional, com isso o custo fica mais elevado que automação convencional, devido a instalação de mais equipamentos e sensores de monitoramento do sistema de irrigação, o que favorece a redução de custos. Um dos principais equipamentos que podem ser instalados na irrigação de precisão é inversor de frequência, a economia de energia gerada com uso do inversor de frequência se iguala com custo de equipamento por volta de 7 anos, com variações para mais e para menos dependendo do projeto (Lima et al., 2015)

Os inversores de frequência são equipamentos que controlam a rotação do motor através da variação da frequência, mantendo o torque do motor constante através de variação da relação tensão / frequência (Lima et al., 2015). A aplicação desse equipamento permite regular a pressão e vazão de forma precisa proporcionando o mesmo efeito do estrangulamento mecânico.

O uso do inversor de frequência já vem sendo pesquisado e difundido para irrigação a algum tempo, porém a maioria das pesquisas estão direcionadas para utilização em pivô central instalados em áreas inclinadas, com objetivo de controlar a pressão de serviço e reduzir o consumo de energia. Sendo quanto mais inclinado o terreno maior a economia com uso do inversor de frequência (Lima et al., 2015; Masiero et al., 1999; Morais et al., 2014; Araújo et al., 2004).

Nos sistemas de irrigação localizado, devido a característica de divisão da área em unidade operacionais e até subunidades, e em cada uma dessas é instalado uma válvula manual ou uma válvula hidráulica, cada uma fica a uma distância diferente da bomba e podem ficar em cotas diferentes, onde cada uma terá uma pressão diferente na entrada. Isso ocorre devido as perdas de cargas nas tubulações e também das cotas do terreno onde está instalada (Bernardo et al., 2008; Moreno et al., 2010). Para ajustar a pressão de saída das válvulas, a forma tradicional é com estrangulamento mecânico, que consiste em causar uma perda de carga

localizada na válvula, sendo que essa maneira desperdiça energia, já com uso inversor de frequência reduz a rotação e conseqüentemente gera economia de energia.

Projetos de irrigação localizado instalados em terrenos planos é similar o mesmo comportamento de pivô central instalados em terrenos inclinados, e se for instalado em terrenos com alicive, tem comportamentos de pivôs centrais instalados em terrenos muito inclinados, sendo esse com maior capacidade de viabilidade de aquisição do inversor de frequências devido a economia de energia gerada. Campana et al. (2000) estudando viabilidade de inversor de frequências em pivô central, verificou que a utilização do inversor de frequências resulta em uma economia de energia três vezes superior aos demais métodos. Além de contribuir para redução do desgaste do motor, redução da demanda de energia e do fator de potência.

Apesar das vantagens de utilização do inversor de frequência em pivô central não é observado um crescimento da utilização desse tipo de equipamento, três fatores contribuem para estagnação do uso: controle do inversor em sincronia com o pivô ainda é uma desafio para automação na área agrícola, discrepância dos valores calculados com os valores observados da redução de energia, são raras as oportunidades onde esses equipamentos estão em funcionamento (Pereira et al., 2013). Esses equipamentos são pouco utilizados em pivô e raridades na aspersão convencional e na irrigação localizada.

Pereira et al. (2013), trabalhando com engenharia de automação em pivô central inclinado obteve redução de energia na ordem de 19% e melhoria no rendimento do motor e no fator de potência que passou de 0,84 para 0,88. Araújo et al. (2004) utilizando o inversor de frequência em aspersão convencional reduziu o consumo de energia elétrica da ordem de 58%.

Os inversores podem ser operados de forma manual ou automática, sendo interessante para irrigação de forma automática, para isso é necessário algum tipo de microcontrolador para atuar em cima do inversor, alterando a rotação do conjunto motobomba. Pereira et al. (2013) e Lima et al. (2015), utilizaram um CLP programado para fazer as leituras dos sensores e controlar a frequência de saída do inversor, e reduzir o consumo de energia. O CLP é um dos melhores equipamentos para fazer essa função, mas tem custo elevado.

3 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araujo, J. A. B. de, Seraphim, O. J.; Siqueira, J. A. C. Avaliação de um sistema irrigação por aspersão com aplicação do inversor de frequência. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 5. 2004.

Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de Irrigação. 8ª ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. 625 p.

Campana, S., Oliveira Filho, D., Soares, A.A. et al. Inversores de frequência: uma alternativa para racionalização do uso da energia elétrica em sistemas de irrigação pivô central. In: Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural. 2000.

Coelho, E. F.; Coelho Filho, M. A.; Oliveira, S. L. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. Bahia Agrícola, v. 07, n. 01, p. 57-60, 2005

Christofidis, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. Revista de política agrícola, Brasília, DF, ano 22, nº1, p 115 a 127. 2013.

Gornat, B. E Silva, W. L. C. Sistemas de Controle e Automatização da Irrigação. Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília, DF, v.41,p 20 a 24, 1990.

Lima, A. dos S.; Zocoler, J. L.; Jadoski, S. O.; Maggi, M. F.; Amarante, R. R. Desempenho Operacional no Bombeamento em Pivô Central utilizando Inversor de Frenquência. Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science, v. 8, n. 2, 2015.

Masiero, L.A.M., Oliveira Filho, D., Oliveira, R.A. Utilização de inversores de frequência para racionalização do uso da energia elétrica em sistemas de irrigação por pivô central. Engenharia na Agricultura, Viçosa; v.7.; p.35-45, 1999

Morais, M. J.; Oliveira Filho, D.; Mantovani, E. C.; Monteiro, P. M. B.; Mendes, A. L. C.; Damião, J. H. A. C.; Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. Engenharia Agrícola, v. 34, n. 6, p. 1075-1088, 2014

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, London,v. 107, n. 4, p. 349-363, 2010.

NAÇÕES UNIDAS. The United Nations World Water Development Report 3: water in a changing world. Paris: Unesco Publishing, World Water Assessment Programme; London: Eartscan, 2009. WWDR3.

Paulino, C. A.; Ramán, R.M.S.; José, J. F. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com censo agropecuário 2006. Irriga, Botucatu; v. 16.; nº 2. 163-176 p. 2011.

Pereira, P. H. C.; Colombo, A.; Rabelo, G. F. O uso da engenharia de automação na redução do consumo de energia elétrica em um sistema de irrigação por pivô central. In: XI – Simpósio brasileiro de automação inteligente – SBAI, Fortaleza / CE. 2013.

Rocha, C. T. D. da; Christofidis, D. Vantagens da opção pela agricultura irrigada. Revista de Política Agrícola, v. 24, n. 2, p. 17-25, 2015.

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, v. 19, p. 53-61, 2011.

1 – CAPÍTULO I

SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE PRECISÃO UTILIZANDO ARDUINO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

1. RESUMO

A previsão da população mundial é de aumento mais lento nas próximas décadas, mas estima-se que a demanda por alimentos será maior que o crescimento da população. Para atender essa necessidade espera-se que mais da metade dos alimentos venha de áreas irrigadas. Entretanto para manter-se sustentável, a irrigação tem que ficar cada vez mais eficiente pois é grande consumidor de energia e o maior de água potável. Os sistemas de irrigação localizado geralmente são os mais eficientes de aplicação de água, devido serem desenvolvidos mais recentes e emprega mais tecnologias, podendo ainda melhorar consideravelmente na parte energética do bombeamento com uso do inversor de frequência. O objetivo deste trabalho foi construir um sistema de automação de precisão baseado em Arduino e inversor de frequência, para manter a pressão de saída constante independente da perda de carga. Foi construída uma bancada de teste com bomba, válvulas hidráulicas simulando perdas de cargas, controle com inversor de frequência, sensores de pressão e um sistema microcontrolado com arduino. Foram feitos dois ensaios com quatro repetições. O primeiro experimento foi com sistema Arduino mantendo a pressão de saída constante em 20 kPa, sendo o processo em malha fechada fazendo as leitura e atuando sobre o inversor, mantendo a pressão constante quando submetido a seis perdas de cargas. O segundo experimento foi com o acionamento do motor direto da rede elétrica, e o sistema automático somente monitorou as variáveis do processo. Os resultados mostraram que o arduino controlou satisfatoriamente a pressão de saída usando o inversor, variando a rotação do motor de 2924 a 3646 rpm, enquanto que direto da rede a variação foi baixa, ficando com valor médio de $3519 \pm 4,64$. O sistema automático, trabalhou com variação de rotação que controlou o inversor de frequência na faixa de 49,67 a 62,29 Hz, O uso do inversor de frequência operando na frequência de 60 Hz tem as mesmas características de alimentação da rede. Esse sistema de automação aplica-se a várias finalidades, como controle da vazão e pressões de entrada e saída, e também da diferença de pressão. O controle da pressão com inversor evita o uso de estranguladores mecânicos.

PALAVRAS-CHAVES: controlador de irrigação, válvulas hidráulicas, agricultura irrigada, microcontrolador.

2. ABSTRACT

The world population is forecast to continue to grow in the coming decades, hence the demand for food. To meet this need, it is expected that more than half will come from irrigated areas. But to remain sustainable irrigation has to become increasingly efficient, as it is a major consumer of energy and the largest of drinking water. The localized irrigation system is generally the most efficient, and can greatly improve on the energy part of the pumping using the drive inverter. The objective of this work was to develop a precision automation system based on Arduino and frequency inverter. A test bench was built with pump, hydraulic valves simulating load losses, control with frequency inverter, pressure sensors and arduino microcontroller. Two experiments were done with four replicates each, the first experiment was with Arduino system maintaining the output pressure constant at 20 kPa, the process in closed loop being read and acting on the inverter, maintaining constant pressure even when submitted To six different load losses. The second experiment was to drive the direct motor of the network, and the arduino system only monitors the sensors. The results showed that arduino controlled very well the output pressure using the inverter, varying the rotation from 2924 to 3646 rpm, while the direct variation of the arduino was low, with an average value of 3519.35 ± 4.64 , proven With low coefficient of variation. The automatic system worked with rotation variation that controlled the converter frequency in the range of 49.67 to 62.29 Hz. The use of the frequency inverter operating at the frequency of 60 Hz has the same power characteristics of the network. This automation system applies to various purposes, such as flow control and inlet and outlet pressures, as well as pressure difference. Pressure control with inverter prevents the use of mechanical throttles.

Keywords: Energy efficiency, irrigation controller, hydraulic valves, irrigated agriculture, microcontroller.

3. INTRODUÇÃO

O crescimento da produção mundial desacelera, mas espera-se que os aumentos absolutos sejam significativos, com previsão para 2050 de mais de 9 bilhões de habitantes. Contudo, estimativas indicam que a produção agrícola global e demanda de fontes energéticas deverá ser elevada em mais de 60% que em 2005/2007 (Alexandratos & Bruinsma, 2012; Rocha & Christofidis, 2015). Já para atender essa demanda, mais da metade da produção serão provenientes da agricultura irrigada.

A irrigação é uma técnica agrícola alternativa que visa o aumento de produtividade das culturas, colocando o recurso produtivo, água, sob controle do agricultor, especialmente em regiões áridas e semiáridas, garantindo sustentabilidade econômica à atividade agrícola, eliminando riscos de perdas ocasionadas por estiagens e secas. Essa técnica tem grande impacto na disponibilidade hídrica devido ao elevado consumo de água requerida pelos sistemas de irrigação, e conseqüentemente grande consumo de energia.

O crescimento da área irrigada no mundo passou de 8 milhões de hectares em 1800 para 48 milhões em 1900. Enquanto em 2008 as estimativas de Congrove & Cosgrove (2012) foram de 304 milhões de hectares irrigados, representado quase 20% de toda a área cultivada do mundo, sendo essa responsável por aproximadamente 44% da produção mundial de alimentos.

Paulino et al. (2011), analisando os dados do Censo Agropecuário 2006, concluíram que o Brasil ocupa a 16ª posição nos países com maior área irrigada, com 4,45 milhões de ha. Já a estimativa da área irrigada do Brasil no ano de 2012 foi 5,8 milhões de hectare (Rocha & Christofidis, 2015), indicando que cresceu nos últimos anos. Entretanto o consumo de água foi aproximadamente 30% menor do que os estimados para 1998, em decorrência principalmente das melhorias no manejo e tecnologias, destacando ainda que o potencial de irrigação sustentável do Brasil é de quase 30 milhões de hectares (ANA, 2012).

Christofidis (2013), analisou globalmente a produtividade obtida em áreas irrigadas e determinou que esta foi 2,7 vezes maior que a agricultura tradicional de sequeiro. Enquanto no Brasil, a produtividade de áreas irrigadas equivale a 3 ha do método tradicional de sequeiro em produtividade física, e até 7 ha em produtividade econômica (ANA, 2004). Para Lima et al. (2009) o principal objetivo da irrigação é proporcionar condições para produzir economicamente, o que se consegue com elevação da produtividade e redução dos riscos.

Um acordo no âmbito da política nacional de irrigação com várias instituições governamentais, pretendem implantar ações que visam atingir as metas para 2030 de elevar a

eficiência de irrigação em 25% e ampliar a participação de produtos irrigados de 20% para 48% (Rocha & Christofidis, 2015).

Os sistemas localizados permitem ter uma maior uniformidade de aplicação de água, mas são mais exigentes quanto a pressão de serviço, por isso que cada fabricante tem sua faixa ideal de pressão, onde sistema mais eficiente. Para conseguir isso normalmente já na fase de elaboração de projeto divide a área em parcelas e até subparcelas. Onde cada uma tem uma válvula para abertura e se necessário controlar a pressão (Bernardo et al., 2008)

Devido a necessidade de parcela ou subparcelas, cada uma fica uma distância da casa de bomba, ocasionando diferentes perdas de cargas e ainda estar em diversas alturas no terreno, fazendo com que cada parcela necessite de uma pressão diversa. Caso essa pressão saia da faixa recomendada é necessários fazer uso de reguladores de pressão, o que normalmente ocorre nas parcelas próximo a bomba ou de cota mais baixa, pois o bombeamento é dimensionado para situação mais crítica. Os reguladores mais usados são os reguladores mecânicos que causam perdas de cargas, e conseqüentemente um desperdício de energia.

A tecnologia também pode melhorar a atividade de produzir alimentos elevando a eficiência, contribuindo para permanência dos trabalhadores no campo, gereando eficiência principalmente no uso da energia e da água, proporcionando ganhos ambientais e na qualidade de vida (Gornat & Silva, 1990). A automação tradicional de irrigação é uma dessas tecnologias, que atualmente está mais acessível e mais simples de programar, fazendo abertura e fechamento de válvulas e acionando o comando do motor, facilitando inclusive a irrigação noturna. Enquanto que no manejo manual da irrigação, os tempos não são seguidos precisamente como no controlador de irrigação. Ambos os modos acima não controlam a pressão de maneira inteligente com a redução da rotação do motor.

As principais vantagens da automação convencional para Gornat & Silva (1990), são: Melhor administração da propriedade, principalmente com os tempos de irrigação; precisão nos tempos e turnos de irrigação; economia de mão de obra no manejo, energia e fertilizantes; menor custo com energia, principalmente pela facilidade de operacionalizar no período de tarifa reduzida, devido a possibilidade de irrigações noturnas sem necessidade de acompanhamento. Já as principais limitações da automação convencional são: Alto custo inicial da automação; interfaces complexas com texto em inglês ou espanhol; mão de obra técnica deficiente, principalmente montagem e assistência técnica; operadores de campo com pouco conhecimento; confiança excessiva no sistema. Apesar dessas observações terem algum tempo, elas ainda são bastante pertinentes para os dias atuais.

Na automação de precisão, a quantidade de equipamentos é maior que na automação convencional, em especial com sensores de monitoramento do processo. Como consequência, o custo será um mais elevado que na automação convencional, entretanto o controle do sistema de irrigação é bem maior, o que favorece a redução no consumo de insumos, como energia. Os equipamentos que podem ser usados na automação de precisão é o inversor de frequência e uma CLP ou uma placa Arduino. Como exemplo a economia com energia gerada em pivô central inclinado que utilizando sistema inversor de frequência se equilibra com custo de compra dos equipamentos por volta de 7 anos (Lima et al., 2015), com variações para mais e para menos dependendo do projeto e da inclinação do terreno, já a vida útil do equipamento é de 15 anos.

Segundo Pereira et al. (2013), os três principais fatores que contribuem para o pouco uso dos inversores de frequência são: 1- as estratégias para o controle dos inversores ainda é um desafio para os profissionais da automação; 2- existe discrepância entre os valores esperados de redução e os valores observados após a instalação; 3- são raras as oportunidades de se observar equipamentos de irrigação sendo operados com inversores de frequência.

Um dos principais custos dos sistemas de irrigação é com a energia elétrica. Podendo chegar a 25% do custo total da área irrigada é gasto com energia do sistema de bombeamento (Bernardo et al., 2008; Moreno et al., 2010). O uso da automação de precisão contribui para redução do consumo de energia. Um exemplo é o uso de pivôs centrais instalados em áreas inclinadas que utilizam o inversor de frequência, reduzem o consumo de energia de 4 a 67%. Apesar dessa grande variação, as maiores reduções ocorrem quanto maior for a declividade (Masiero et al., 1999; Lima et al., 2009)

O uso dos microcontroladores está ficando cada vez mais popular nos últimos anos, mas no passado os micro controladores eram bastante caros e tinham várias limitações comparado com os atuais, mas estão se popularizando cada vez mais. Muitos produtos passaram a utilizar, como som, televisores, cafeteiras, micro-ondas, geladeiras, etc. Na maioria das vezes sua aplicação não está só em fazer um serviço, mas sim em elevar a eficiência e minimizar as perdas. Atualmente existe vários modelos de microcontroladores e têm grande facilidade de aquisição via internet.

Com interligação dos processadores a controles em um mesmo chip, formando os microcontroladores, permitem fazer muitos comandos sem a necessidade de acessórios. A evolução aliado ao baixo custo e a facilidade de compra na internet, elevou bastante o uso. No Brasil, alguns modelos dos mais usados foram basic step, PIC e recentemente o Arduino. Os microprocessadores da família basic step tinham mais limitações de memória, o PIC é melhor,

mas tinha o trabalho de fazer conexões dos pinos. O Arduino desenvolvido para uso didático melhora essas duas características, vem com mais memória para programação e pronto para uso com facilidade de conexão, além disso existe a facilidade de várias bibliotecas de comandos prontos (Evans et al.,2013; Almeida, 2012; Machado, 2016).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de automação para controlar a pressão de serviço na irrigação localizada, utilizando microcontroladores, sensores de pressão e inversor de frequência, e quantificar a redução da demanda de potência.

4. MATERIAL E MÉTODOS

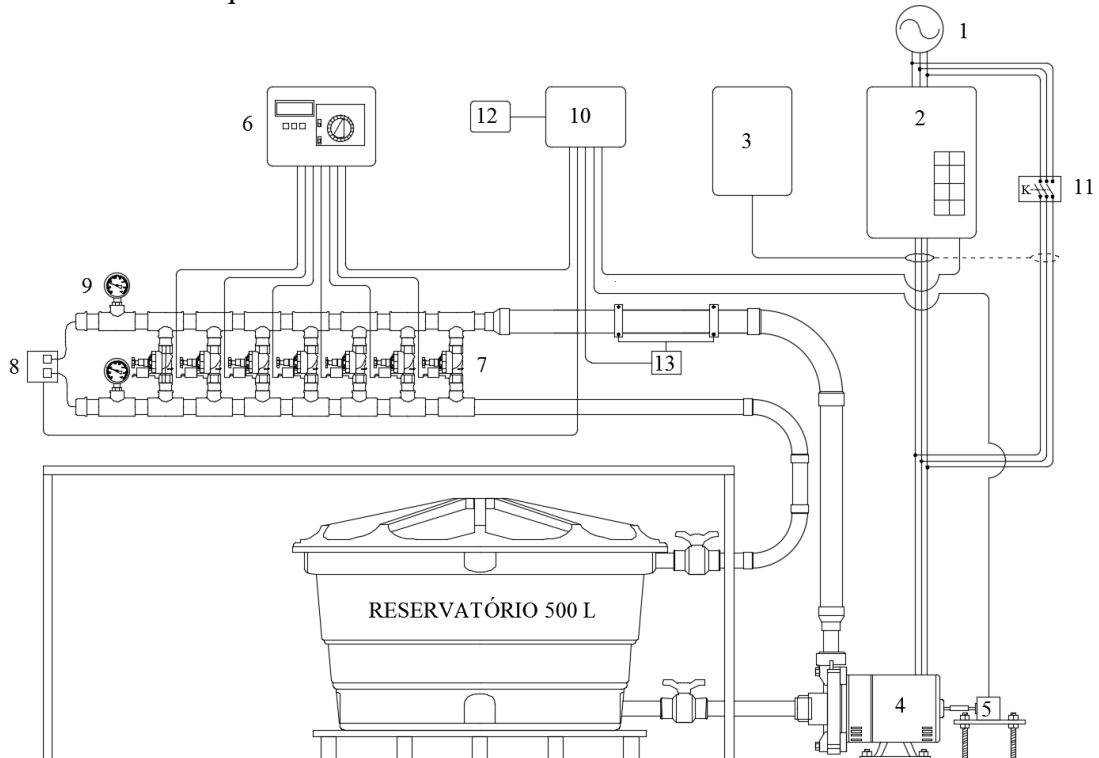
O experimento foi realizado no laboratório de instrumentação de máquinas e mecanização agrícola (LIMMA), pertencente ao curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da UFERSA.

Para a realização do experimento construiu-se uma bancada de ensaios, Figura 1, composta por: reservatório de água com capacidade para 500 litros; 1- Sistema de alimentação trifásica (380 V) e frequência nominal de 60 Hz; 2- inversor de frequência fabricado AAB, modelo ACS355-03E, com alimentação trifásica (380 V), com controle manual e automático e entradas digitais; 3- analisador de energia da marca Minipa, modelo ET- 5061C; 4- Bomba da marca Dancor acoplado a um motor marca WEG, alimentação trifásica (380 V) com potência de 2,20 kW (3 cv), bombeador modelo CAM-W21 com sucção de 2. ½” e recalque de 2” e vazão recomendada de trabalho de 18,6 a 34,3 m³ h⁻¹; 5- Encoder rotativo da S&E instrumentos modelo GI-U, com 60 pulsos por volta; 6- Controlador comercial de irrigação fabricado pela Rain Bird, modelo ESP-4Mi Modular, com comando de válvulas elétrico de saída 24 VAC (corrente alternada), com modulo de expansão de três válvulas, totalizando sete; 7- Válvulas hidráulicas marca Rain Bird, modelo DVF 100, com acionamento elétrico/mecânico, permitindo a regulação manual da vazão (fecho) com uso indicado para água; 8- Transdutor de pressão marca Honeywell, modelo ASDX100G24R ; 9- manômetros analógicos ¼” glicerinado; 10- sistema microcontrolado de monitoramento, controle e armazenamento de dados utilizando placa Arduino; 11- Disjuntor tripolar; 12- fonte de tensão CC para alimentação do sistema arduino; 13 – sensor de vazão marca Micronics LTD, modelo Portaflow 216.

O trabalho consistiu em dois experimentos, ambos referente a modos de acionamentos para um motor conjugado à bomba. O primeiro foi usando um inversor de frequência controlado de forma automática por uma placa microprocessada (AUTO); em que o programa inserido foi para manter a pressão de saída das válvulas com valores constantes de 20 kPa. O segundo, foi acionando direto da rede trifásica com disjuntor (REDE). Cada acionamento foi submetido a seis perdas de cargas localizadas, provocada nas válvulas hidráulicas com estrangulamento mecânico, reguladas de forma escalonada e crescente. A válvula de número 7, ficou aberta durante todo o experimento para manter a vazão e pressão da bomba dentro da faixa especificada pelo fabricante. Foram feitas quatro repetições em cada tipo de acionamento, sendo

cada repetição com duração de 20 minutos por válvula, totalizado 120 minutos em cada repetição.

Figura 1. Desenho esquemático da bancada de ensaio



Fonte: Autoria própria

No modo AUTO, o conjunto motobomba foi ligado ao inversor de frequência, sendo este responsável pelo controle da frequência de alimentação do motor e, conseqüentemente a rotação. Quando ocorria mudança de válvula de 1 até 6, ou seja, as válvulas ficavam mais estranguladas, o inversor aumente a frequência, aumentando a rotação para elevar a pressão de entrada; mantendo dessa forma a pressão de saída constante, compensando a elevação da perda de carga localizada na válvula.

Utilizou-se uma tubulação de recalque com diâmetro de 75 mm até o início das válvulas, sendo o restante com diâmetro de 50 mm. No final da tubulação de retorno foi instalado um registro de gaveta de ± 40 mm (1 1/2") que foi utilizado para regular a vazão para mantê-la dentro da faixa de operação especificada pelo fabricante da bomba, no momento da calibração do sistema. Depois de calibrado, o registro foi mantido fixo durante todo experimento.

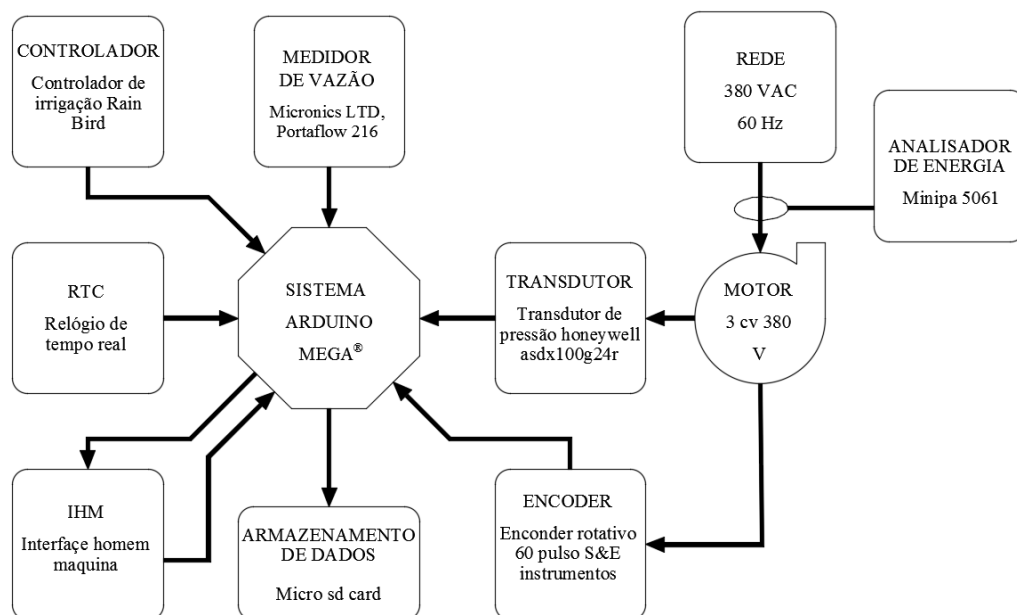
As válvulas de 1 a 6 foram instaladas em paralelo, figura 1, em uma tubulação de PVC com diâmetro de 50 mm; os fechos foram regulados de forma a causar uma elevação na perda de carga da válvula 1 para 6, ou seja, a 1 estava totalmente aberta e a 6 mais fechada.

O controlador de irrigação foi responsável por abrir e fechar as válvulas de 1 a 6 de acordo com cada tempo pré-programado, abrindo sequencialmente de maneira automática a cada 20 minutos, exceto a primeira que ficava 10 minutos em funcionamento para o sistema hidráulico entrar em equilíbrio e depois os 20 minutos de gravação de dados.

No final do eixo do motor foi acoplado um encoder incremental de 60 pulsos por volta (Figura 1), para monitorar a rotação do mesmo. Para monitorar as pressões, na entrada e na saída das válvulas, utilizou-se transdutores de pressão, sendo estes previamente calibrados com auxílio de um manômetro digital de precisão da ZURICH modelo Z-10-B. Além disso, próximos a esses pontos de leituras digitais, foram instalados manômetros analógicos, nas tubulações de entrada e saída das válvulas, para acompanhamento simultâneo digital e analógico.

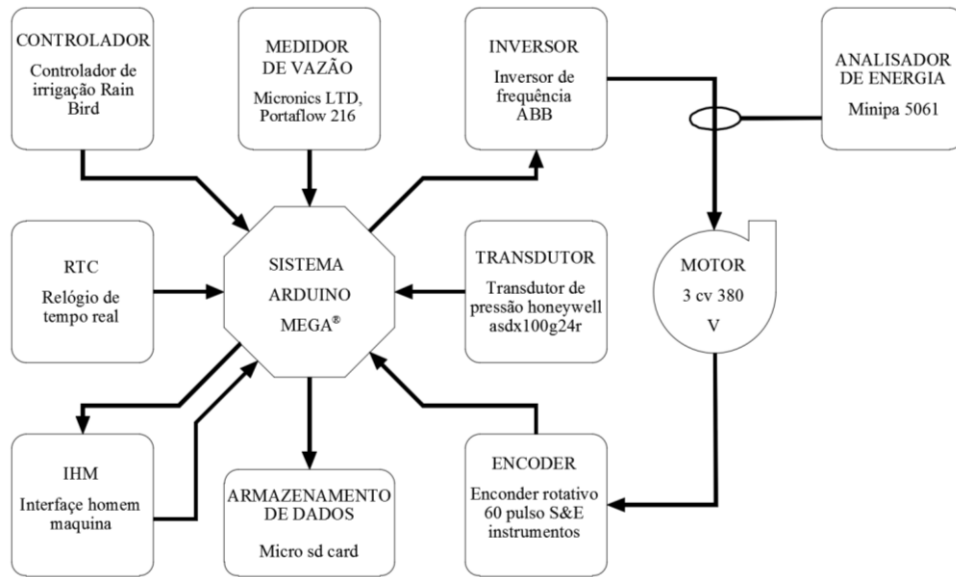
No modo REDE, com alimentação da rede, o monitoramento e armazenamento dos dados de pressão, rotação e status da válvula acionada e vazão, foi realizado por uma placa Arduino Mega®, conforme o diagrama de fluxo da Figura 2. Já no modo AUTO, o sistema além de monitorar e armazenar os dados, também atuava diretamente no inversor de frequência, deixando o circuito em malha fechada (Figura 3). Neste caso, o inversor estava no modo automático onde a frequência foi regulada para atender a pressão de saída das válvulas com valor constante pré-programado.

Figura 2. Diagrama de fluxo das leituras dos sensores e processamento dos dados no modo REDE



Fonte: autoria própria

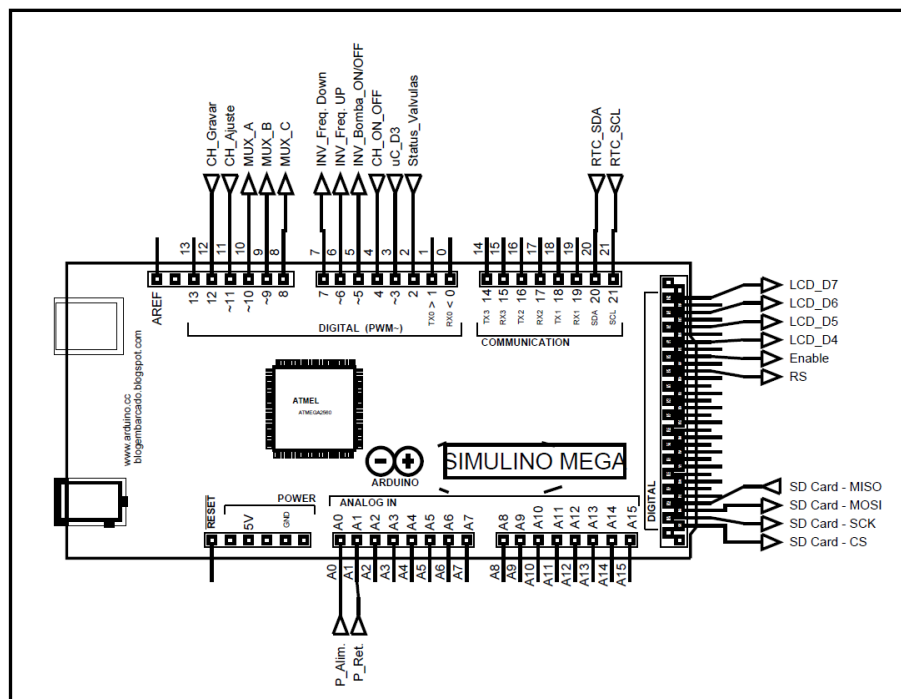
Figura 3. Diagrama de fluxo das leituras dos sensores e processamento dos dados no modo AUTO



Fonte: autoria própria

A placa Arduino utilizada foi a Mega® 2560 R3 (Figura 4) que executava o programa desenvolvido para microcontrolador, utilizando uma plataforma de código aberto Arduino Software IDE (Integrated Development Environment), Ambiente de Desenvolvimento Integrado, que é um software livre no qual o código foi escrito em linguagem C.

Figura 4. Arduino Mega® 2560 R3, com ligações de entrada e saída

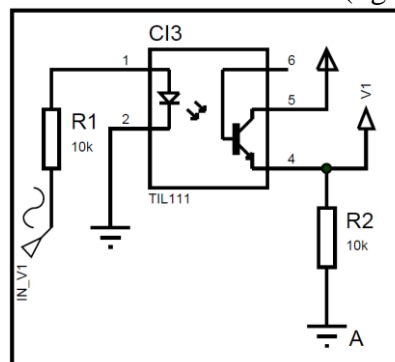


Fonte: autoria própria

Quando ocorria uma mudança de válvula, o sistema de monitoramento dos sensores e controle do inversor, detectava a mudança de pressão devido à mudança da perda, e o sistema ajustava a frequência, que por sua vez ajustava a rotação e regulando a pressão de saída para valor pré-determinado.

O sistema de controle consta de circuitos condicionadores adequando os sinais recebidos ou enviados pela placa Arduino. Para monitorar o status das válvulas (ligada/desligada), interligou-se os comandos elétricos do controlador de irrigação ao sistema arduino. Quando o controlador acionava uma válvula, (24 VAC), esse sinal era enviado também para o circuito mostrado na Figura 5, o qual enviava um sinal de tensão (5 VDC) para o circuito multiplexador mostrado na Figura 6. O objetivo desse circuito foi de isolar e proteger os equipamentos, devido a tensão do controlador que é 24 VAC ser diferente do arduino, (5 VDC). Somente neste caso foi utilizado um terra específico para as válvulas, devido a tensão ser alternada. Para fazer esse isolamento utilizou-se o optocoplador TILL 111. Foram montados seis circuitos semelhantes, um para cada válvula monitorada.

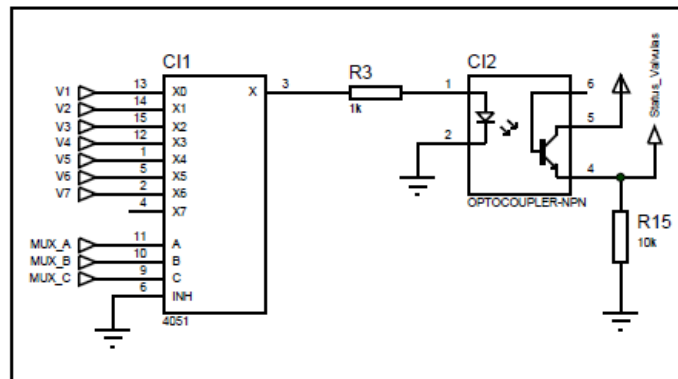
Figura 5. Circuito de monitoramento do status da válvula (ligada/desligada)



Fonte: autoria própria

Para diminuir o número de entradas e saídas do Arduino, utilizou-se um circuito integrado multiplexador 8x1 modelo HCF4051BE, compostos por oito entradas e uma saída, conforme Figura 6.

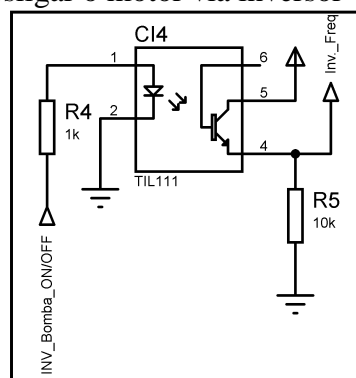
Figura 6. Circuito multiplexador para monitorar as válvulas



Fonte: autoria própria

O circuito para ligar/desligar a bomba via inversor de frequência (Figura 7) é similar ao circuito de monitoramento da válvula, porém, na ligação com inversor de frequência, esse circuito usa 24 VDC da própria fonte do inversor. A função desse circuito foi de controlar o acionamento da bomba. Sendo que para ligar a bomba bastava que qualquer válvula estivesse acionada para simultaneamente ligar o motor. Mais dois circuitos iguais a esses foram utilizados para controlar a frequência, um foi ligado à porta UP do inversor, onde cada pulso acrescentava 0,1 Hz e o outro na entrada Down com redução da frequência também de 0,1 Hz.

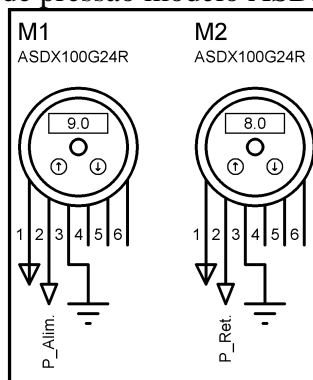
Figura 7. Circuito para ligar e desligar o motor via inversor



Fonte: autoria própria

Os transdutores de pressão instalados nas linhas de alimentação e retorno, no acionamento direto da REDE, tinha a função de medir as respectivas pressões, ou seja, fazer apenas o monitoramento. No modo AUTO, o valor da leitura de pressão na linha de retorno foi utilizada como referência para manter a pressão de saída constante. Os transdutores foram montados em uma placa separado da protboard (Figura 8).

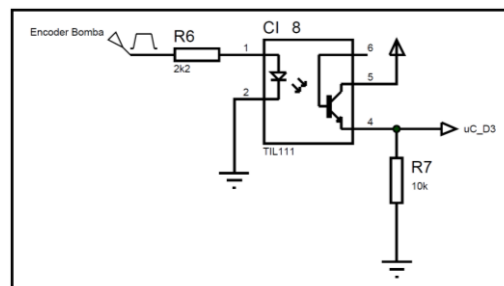
Figura 8. Placa com os transdutores de pressão modelo ASDX100GR



Fonte: autoria própria

Para condicionar o circuito do gerador de pulsos responsável pelo monitoramento da rotação do motor, utilizou-se o circuito mostrado na (Figura 9). Esse circuito se fez necessário uma vez que a amplitude dos pulsos de saída do encoder era de 12 VDC e a placa arduino tem limitação nas suas entradas digitais de 5 VDC. Via programação os pulsos foram convertidos para rpm.

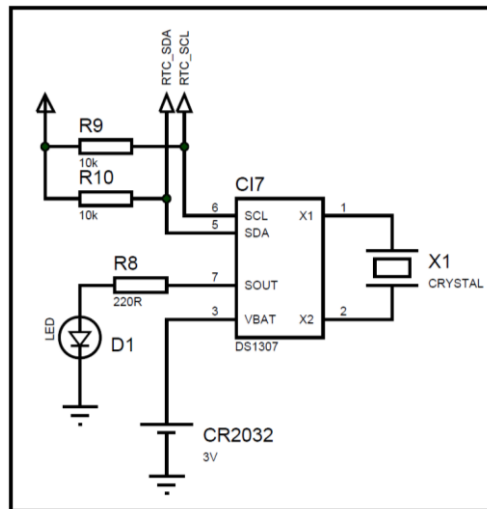
Figura 9. Circuito de monitoramento do encoder



Fonte: autoria própria

Modulo RTC – relógio de tempo real (Figura 10), forneceu as informações de hora, minuto, segundo, dia da semana, dia, mês e ano. As informações geradas pelo RTC foram usadas para referenciar todos os dados que foram armazenados e posteriormente juntados com os dados do analisador de energia.

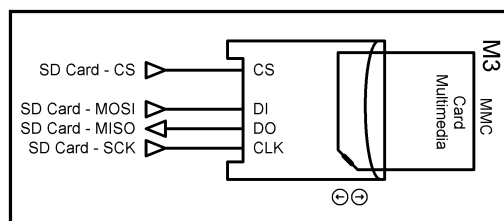
Figura 10. Modulo RTC – relógio de tempo real



Fonte: autoria própria

Para o armazenamento dos dados utilizou-se um shield com cartão MICRO SD (Figura 11) devido ao seu baixo custo e elevada capacidade de armazenamento. Os dados foram armazenados em formato ASCII, utilizando o COMMA como separador de campos e gravado com extensão txt. Durante o processo de leituras, o Arduino executou dez leituras consecutivas, demorando aproximadamente 0,34 segundos em cada. E na programação utilizou essas dez leituras para calcular a média. Os valores médios juntamente com os dados do RTC foram enviados para armazenamento.

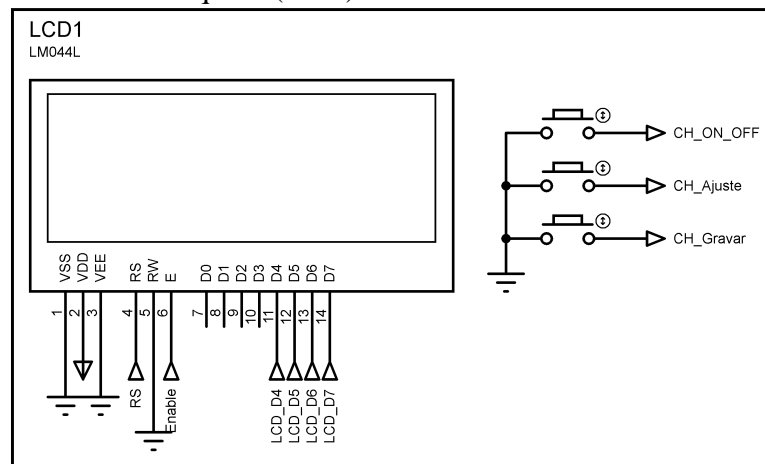
Figura 11. Sistema de armazenamento de dados em cartão MICRO SD



Fonte: autoria própria

A interface homem-máquina (IHM) é composta por display LCD (20x4), vinte colunas e quatro linhas e três interruptores de pressão do tipo push button (Figura 12). No display, são exibidas as informações sobre o status de todas as válvulas, a pressão ajustada bem como as pressões nas linhas de entrada e saída e a rotação do motor. Exibia ainda se os dados estavam ou não sendo gravados. Os interruptores de pressão também podiam ser utilizados para ligar/desligar o motor manualmente e inserir/alterar os parâmetros do sistema.

Figura 12. Interface homem-máquina (IHM)



Fonte: autoria própria

Para monitorar os parâmetros elétricos frequência e potência ativa, utilizou-se um analisador de energia (Figura 13), o qual foi ligado diretamente à alimentação no modo REDE, conectando-se as garras aos fios logo após o disjuntor. Para o modo AUTO, o analisador de energia foi ligado após o inversor de frequência. Essas medições foram parametrizadas no analisador de energia para fornecer médias a cada 5 segundos.

Figura 13. Analisador de energia Minipa ET-5061C.

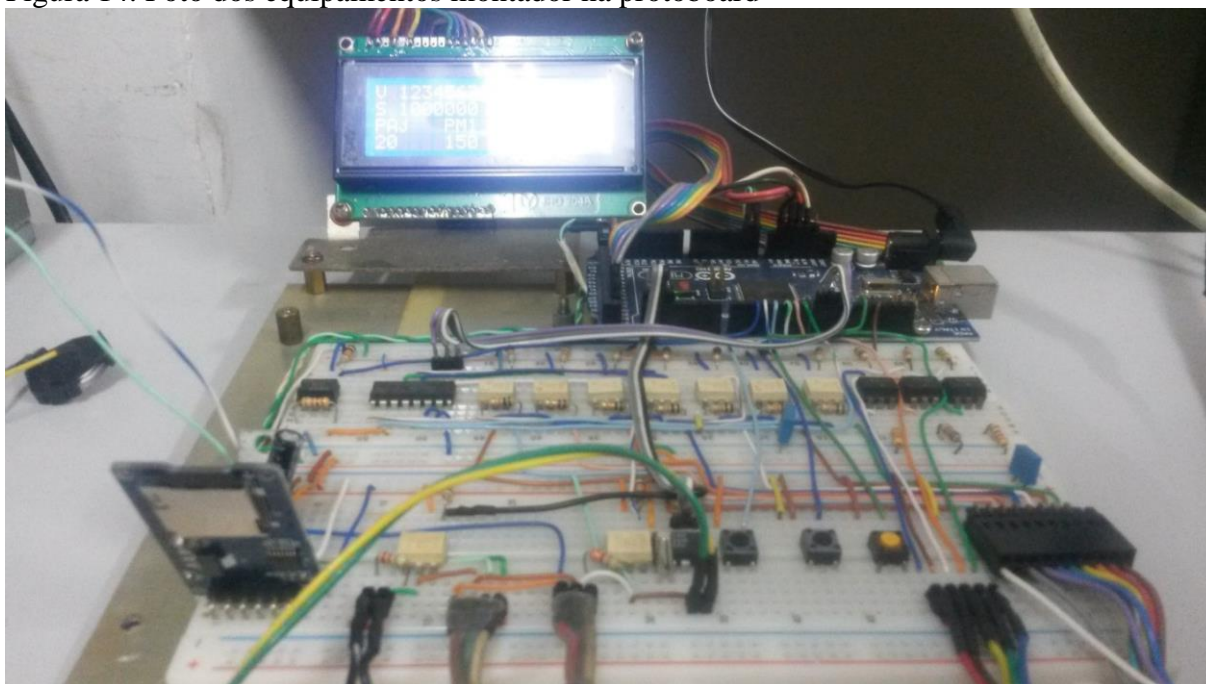


Fonte: Minipa do Brasil

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Arduino armazenou 413 leituras médias para cada parâmetro monitorado em cada válvula, totalizando 2.478 resultados por parâmetro nas seis válvulas, durante cada repetição do experimento. A Figura 14 mostra a placa Arduino e os equipamentos discretos, ligados utilizando placas protoboard, durante o experimento.

Figura 14. Foto dos equipamentos montador na protoboard



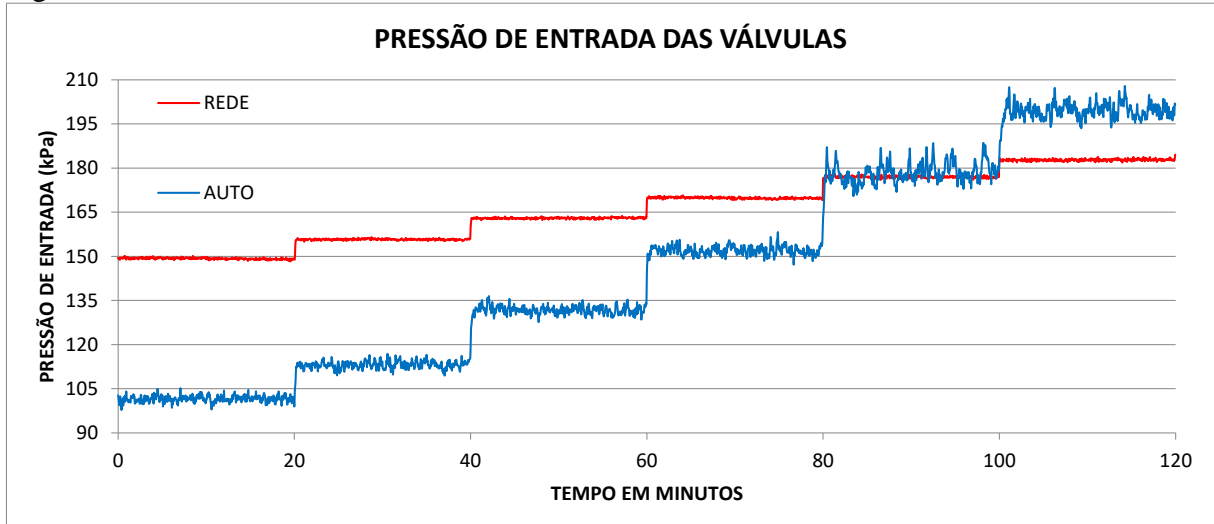
Fonte: autoria própria

O comportamento da pressão de entrada, gravada pelo arduino ao longo de 120 minutos de duração (Figura 15). Observou-se que, a pressão no modo AUTO, quando chegou aos valores mais elevadas, apresentou maior oscilação. Provavelmente provocadas pelas pequenas oscilações do sistema hidráulico, isso aliado ao tempo de reação do sistema, dificultou a correção de maneira exata pelo Arduino. Outro fator de contribuiu foi o próprio erro de leituras inerente ao sensor de pressão.

Já nos resultados direto da REDE verificou-se maior uniformidade, sendo que nesse caso pode ser justificado pois foi alimentado direto da rede e quase não tem alteração. Ou seja, neste caso não teve ajuste pela pressão.

Para comparação das médias dos dois modos de acionamento, foi utilizado para cada válvula valores médios das repetições, ou seja para cada válvula tem-se 1.652 leituras das quatro repetições.

Figura 15. Pressões de entrada nas válvulas, no modo AUTO e no modo REDE.

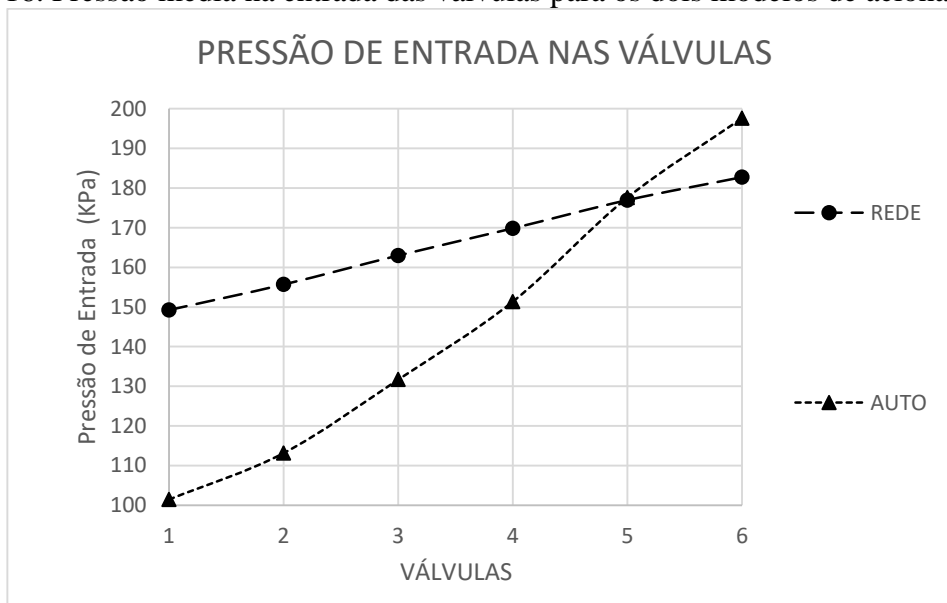


Fonte: autoria própria

As pressões de entrada nas válvulas, tanto no modo AUTO como no REDE tiveram um comportamento crescente. Isso ocorre devido à elevação das perdas de cargas localizadas nas válvulas (Figura 16). Contudo, no modo AUTO observa-se uma elevação mais acentuada, comparando com a REDE para as válvulas 1 para 6. Isso ocorreu devido a pressão de saída no modo AUTO ser mantida constante e com valor relativamente baixo, apenas 20 kPa.

No modo AUTO, as válvula iniciais tiveram menor perda de carga, com isso, necessitam de baixa pressão de entrada diferentemente das válvulas finais que, com elevada perda de carga, necessitou de pressão elevada na entrada, chegando no modo AUTO valores maiores que o da REDE. Dados similares foram publicados por Araújo et al. (2004) que trabalharam com inversor de frequência em aspersão convencional, mantendo abertas de um a quatro linhas de aspersores obteve pressão de saídas constantes, conseqüentemente também variou a pressão de entrada.

Figura 16. Pressão média na entrada das válvulas para os dois modelos de acionamento.



Fonte: autoria própria

A média das pressões na linha de entrada em todas as válvulas foram 166,25 e 145,47 kPa respectivamente para os modos REDE e AUTO. Considerando isso uma situação real, e comparar relativamente em relação ao modo AUTO, o modo REDE estaria desperdiçando em média 14,28% da pressão. Se considerando até a válvula 5, esse valor sobe para 20,67%, consequentemente mais energia desperdiçada para gerar essa pressão. Em sistemas irrigados pressurizados que utilizam válvulas ou registros em diferentes distancias da bomba, exigem pressões diferentes, devido as perdas de cargas serem diferente, mesmo estando em terreno plano, modo AUTO otimizaria o uso da energia nestas situações.

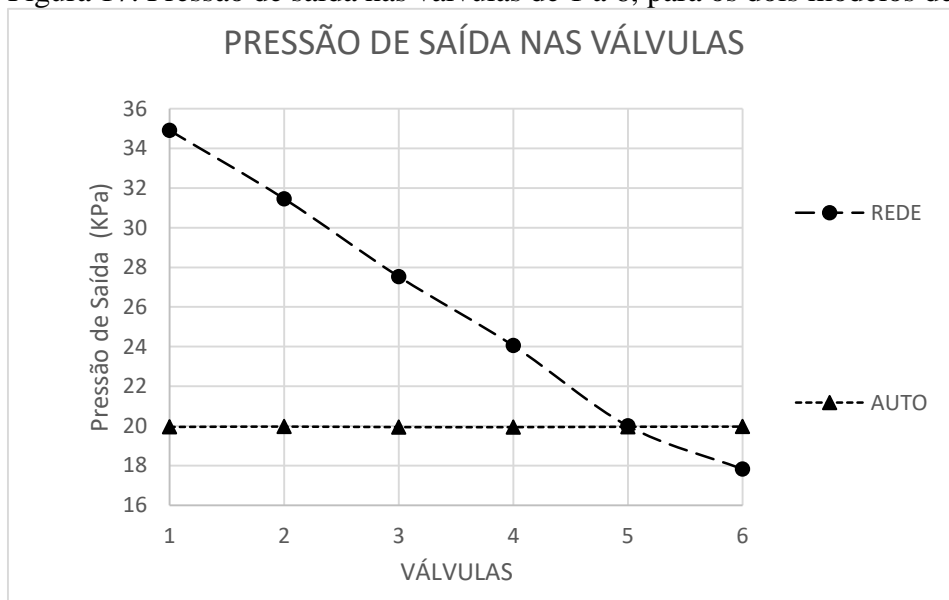
Caso o terreno seja inclinado essa diferença de pressão será acrescida do desnível geométrico, existe uma forma de amenizar essas perdas é ajustando a área da parcela à curva de vazão da bomba, mas são raros os casos desse tipo de compensação, pois tem o inconveniente de toda parcela ser diferente, complicando várias outras atividades do manejo como: adubação, pulverização, etc. Mesmo assim, ainda existe a questão da margem de segurança, que acrescenta mais potência no dimensionamento do motor, que o sistema tradicional não ajusta.

Na válvula 6 ocorre o pico de pressão de entrada no modo AUTO 197,61 kPa, mas para chegar a esses valores o inversor de frequência estava com frequência de 62,29 Hz, acima da distribuidora de energia. Isso para irrigação não é vantajoso, sendo recomendado o uso abaixo de 60 Hz para economizar energia, sendo que o ponto de equilíbrio foi na válvula 5. Analisando somente os dados do nodo AUTO da válvula 1 e 5, a redução na pressão em relação maior

pressão foi de 42,97%, Lima et al. (2015) analisando pivô central em aclave e declive com inversor de frequência obteve variação de pressão de entrada na ordem de 37,73%

Analisando a pressão de saída das válvulas (Figura 17), fica comprovado que o sistema arduino no modo AUTO controlou de forma eficiente a pressão de saída, enquanto que no modo REDE a pressão veio decrescente, sendo que a pressão acima de 20 kPa é considerada como desperdício do sistema, caso o necessário fosse apenas 20 kPa. Em uma situação prática, para a pressão não ficar acima do recomendado nas válvulas de 1 a 4 necessitaria utilizar estranguladores mecânicos. Com a variação de pressão elevada pode ocorrer momentos que o sistemas trabalhe fora da faixa recomendada de pressão, e com isso diminuir a uniformidade de emissão e em casos extremos de chegar até a danificar o sistema de irrigação.

Figura 17. Pressão de saída nas válvulas de 1 a 6, para os dois modelos de acionamento



Fonte: autoria própria

Analisando a pressão de saída das válvulas no modo AUTO, verifica-se que o sistema de automação conseguiu atuar no inversor, alterando a rotação do motor, mantendo a pressão de saída constante em 20 kPa, valor este pré-programado, corroborando com os dados de Araújo (2004); que utilizando acionamento com inversor para aspersão, conseguiu manter a pressão de saída constante, mantendo de uma a quatro linhas funcionando.

A diferença de pressão nos dois modos tem comportamento similar ao da pressão de entrada, onde as válvulas iniciais do modo REDE apresentam os valores mais elevados. Isso ocorre devido a pressão de entrada no modo REDE ser mais elevada no início, conseqüentemente a pressão de saída também no início é maior. As médias de pressões de saída

nas válvulas no modo REDE e AUTO foram respectivamente de 25,96 e 19,95 kPa, neste caso a sobra de pressão do modo REDE foi 30%. Resultados parecidos com modo AUTO foram observados em pivô central instalados em terreno inclinado, onde a automação de precisão manteve a pressão constante no final da linha, compensando as oscilações do terreno e reduzindo consumo de energia (Masiero et al., 1999; Morais et al., 2014).

A rotação nominal do motor em plena carga especificado pelo fabricante é de 3.460 rpm, já a média da rotação observada no experimento no modo REDE foi de $3.519 \pm 4,64$ rpm aumento de 1,71% (Figura 18 A). Esse pequeno acréscimo de rotação em relação a nominal pode ter várias razões como: rendimento do motor elevado pois foi a primeira vez que foi usado, inexistência de queda de tensão pois o experimento ocorreu no período de menor demanda do bloco de laboratórios.

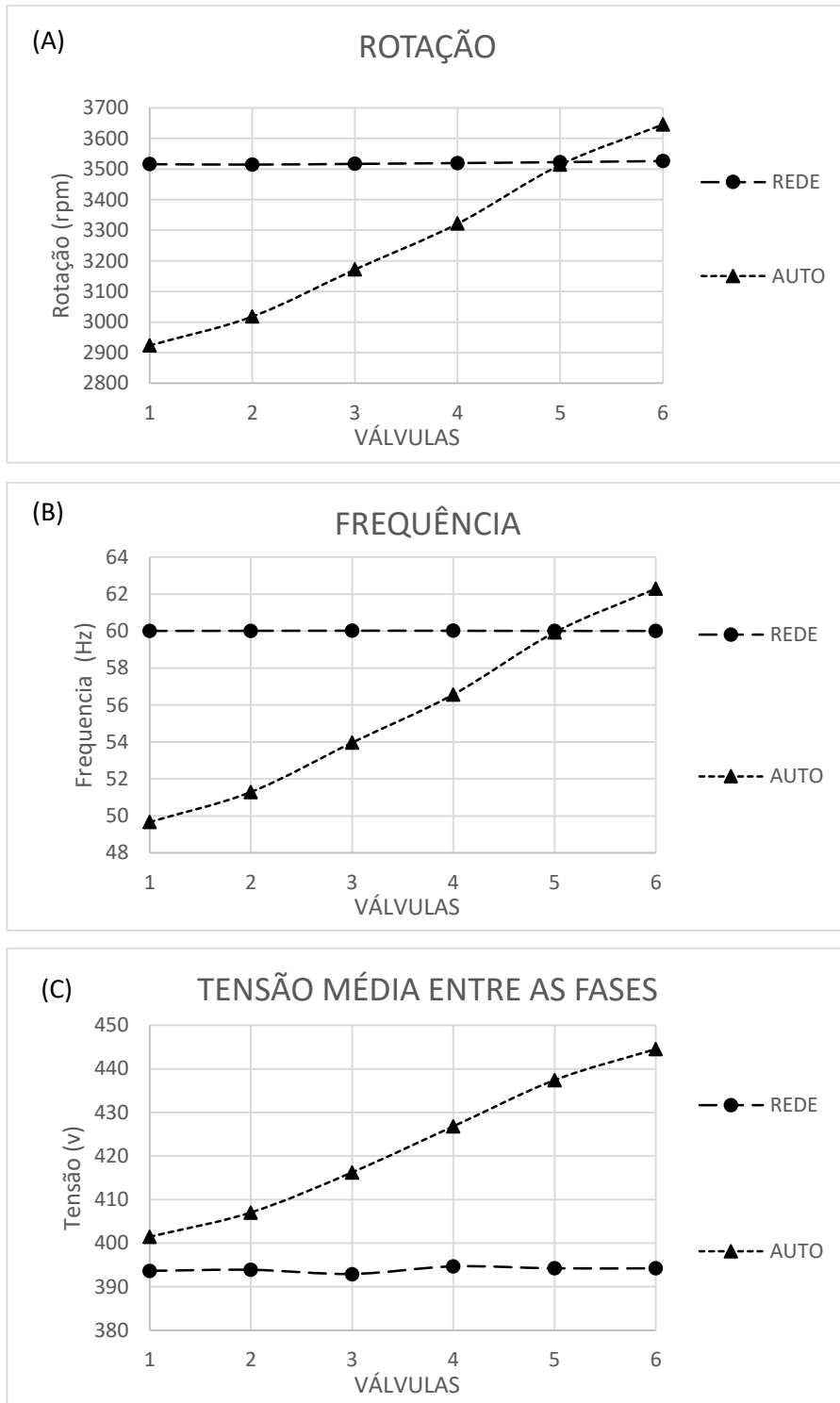
A tensão média nas três fases durante o experimento no modo REDE foi de 393,91 V (Figura 18 C). Conforme regulamentação da qualidade da ANEEL (2016) os valores de tensão da REDE estão dentro da faixa recomendada que é de $380 \text{ V} \pm 5\%$ para grandes intervalos. A tensão no modo AUTO teve elevada variação devido as características inerente ao inversor de frequência, que para manter o torque constante precisa adequar a relação de equilíbrio da tensão com a frequência de saída do equipamento (Lima et al., 2015).

No modo AUTO, a rotação variou em função do uso do inversor de frequência, de 2924 rpm na válvula 1 para 3646 rpm na válvula 6, uma diferença de 19,8%. Verifica-se ainda que na válvula 5 a rotação foi de 3514 rpm, ficando bem próximo aos valores da REDE.

Mesmo com rotação abaixo do nominal do motor, no modo AUTO, o funcionamento foi considerado normal não sendo observado alterações no motor, tais como: vibrações, aquecimento, elevação de ruídos, etc. Os trabalhos de Lima et al. (2009) e Moraes et al. (2014) que avaliaram o uso do inversor de frequência em irrigação também não citam alterações no motor.

A rotação é dependente da frequência, com isso os dados de frequência tem o mesmo comportamento da rotação (Figura 17 A e B). A frequência da REDE se manteve dentro dos padrões definidos pela ANEEL (2016), com média geral de 60,01 Hz e, e os valores de máximos e mínimos foram respectivamente 60,09 e 59,93 Hz, sendo verificando que atende as normativos da ANEEL (2016) que recomenda a faixa de 59,9 a 60,1 Hz.

Figura 18. Rotação (A); frequência (B) e Tensão entre as fases (C) nas válvulas de 1 a 6, para os dois modelos de acionamento



Fonte: autoria própria

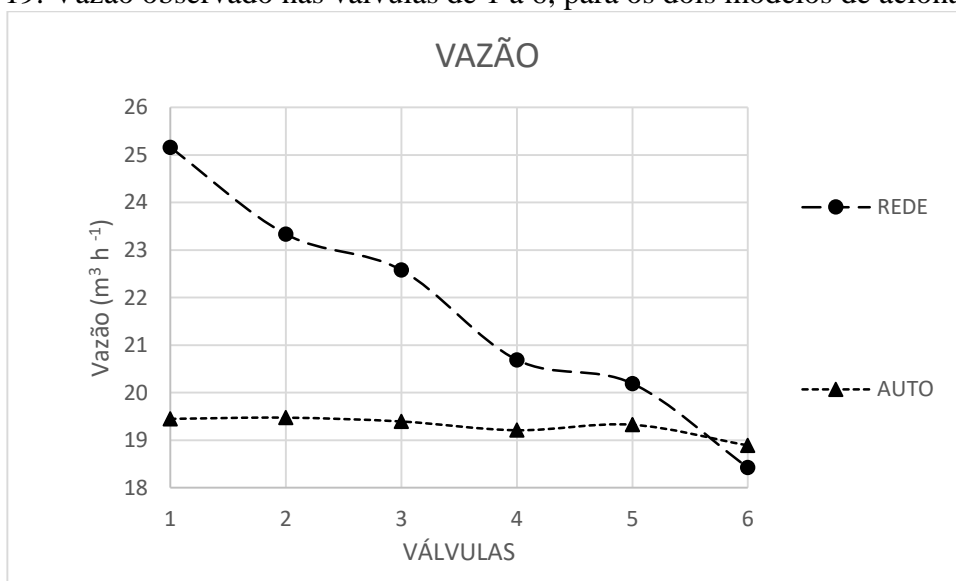
No modo AUTO, observou-se que para o motor manter a pressão de saída constante, o inversor de frequência elevou a frequência de 49,67 para 62,29 Hz, respectivamente para as válvulas 1 e 6. Resultados similares foram verificados em pivô central em áreas inclinadas que utilizaram inversor de frequência, sendo a linha lateral na posição de mais aclave com maior

frequência, e na de mais declive maior com menor frequência (MORAIS et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2014).

Analisando a vazão do sistema, fica confirmado que o sistema de automação funcionou a contento, onde as vazões observadas tiveram um comportamento praticamente igual pressão de saída (Figura 18). A vazão média observada no modo AUTO é praticamente constante $19,52 \pm 0,41 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, enquanto que a vazão no modo REDE decresce da válvula 1 para 6 e o valor médio é $21,73 \pm 2,23 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, dados de vazão com comportamento semelhantes foram observados por Araújo et al. (2004).

Quando analisarmos a curva característica da bomba, a faixa de vazão recomendada pelo fabricante é de $18,6$ a $34,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Anexo A) e verifica-se que a vazão que apresenta melhor rendimento é próximo de $20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. O fabricante especifica que o rendimento da bomba nessa vazão é de 60% o que está aceitável para esse tipo bomba de baixa potência, e que no sistema no modo AUTO é interessante pois trabalhou todo o tempo próximo a essa vazão.

Figura 19. Vazão observado nas válvulas de 1 a 6, para os dois modelos de acionamento.



Fonte: autoria própria

6. CONCLUSÕES

O sistema de automação desenvolvido controlou de forma precisa e exata a pressão de saída, mantendo constante e no valor desejado de 20 kPa mesmo com variações causadas pelas perdas de carga, podendo ser aplicada em uma saída de válvula no campo.

O uso do inversor de frequência operando na frequência de 60 Hz tem as mesmas características de alimentação da rede.

Esse sistema de automação aplica-se a várias finalidades, como controle da vazão e pressões de entrada e saída, e também da diferença de pressão.

O controle da pressão com inversor evita o uso de estranguladores mecânicos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Resolução normativa N° 414, de 9 de setembro de 2010

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Modifica a abrangência na aplicação do fator de potência para faturamento do excedente de reativos de unidades consumidoras e altera a Resolução Normativa n°. 414, Resolução normativa N° 569, de 23 de julho de 2013.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 7, publicado: 27/01/2016.

Alexandratos, N.; Bruinsma, J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Rome, FAO: ESA Working paper, 2012.

Almeida, S. S. Sistema de aquisição de dados para leituras analógicas de tensão utilizando um microcontrolador PIC (interface controladora de periféricos). Mossoró: UFERSA, 2012. 66 f. Dissertação Mestrado.

ANA 2004: Agência nacional de água. Agricultura irrigada: estudo técnico preliminar. Brasília-DF, 2004, 107p.

ANA 2012: Agência nacional de água. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2012. Brasília-DF, 2012, 215 p.

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

Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de Irrigação. 8ª ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. 625 p.

Christofidis, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. Revista de política agrícola, Brasília, DF, ano 22, nº1, p 115 a 127. 2013.

Congrove, C. E.; Cosgrove, W. J. (Org.). The dynamics of global water futures: driving Forces 2011 - 2050. Paris: Unesco, 2012. (Global water futures 2050, 02).

Evans, M.; Noble, J.; Hochenbaum, J. Olá Arduino. In: Evans, M.; Noble, J.; HOCHENBAUM, J. Arduino em ação. Primeira edição. São Paulo: Novatec, 2013. p. 24 – 45.

Gornat, B. E Silva, W. L. C. Sistemas de Controle e Automatização da Irrigação. Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília, DF, v.41,p 20 a 24, 1990.

Lima, A. dos 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*, v. 8, n. 2, 2015.

Lima, A. dos S.; Zocoler, J.L.; Maggi, M. F.; Lima, H. K. DE. Uso do inversor de freqüência em sistema de irrigação do pivô central e seu efeito na lâmina e uniformidade de distribuição de água. *Pesquisa aplicada & agrotecnologia*, v. 2, n. 1, 2009

Machado, R. V. de O. Sistema de aquisição de dados utilizando microcontrolador arduino para a tecnologia de aplicação agroquímicos. Mossoró: UFERSA, 2016. 70 f. Dissertação Mestrado

Masiero L.A.M., Oliveira filho, D., Oliveira, R.A. Utilização de inversores de freqüência para racionalização do uso da energia elétrica em sistemas de irrigação por pivô central. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa; v.7.; p.35-45, 1999

Morais, M. J.; Oliveira filho, D.; Mantovani, E. C.; Monteiro, P. M. B.; Mendes, A. L. C.; Damião, J. H. A. C.; Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. *Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 6, p. 1075-1088, 2014

Moreno, M. A., Córcoles, J. I., Tarjuel, J. M., Ortega, J. F. Energy efficiency of pressurized irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule. *Biosystems Engineering*, London, p. 349-363, 2010.

Oliveira, L. F. C. de; Medeiros, A. M. de M.; Silveira, P. M. da S. Otimização de sistema pivô central de irrigação por aspersão. In: XLII Congresso brasileiro de Engenharia Agrícola – COMBEA 2014. Campo Grande / MS.

Paulino, C. A.; Ramán, R.M.S.; José, J. F. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com censo agropecuário 2006. *Irriga, Botucatu*; v. 16.; nº 2. 163-176 p. 2011

Pereira, P. H. C.; Colombo, A.; Rabelo, G. F. O uso da engenharia de automação na redução do consumo de energia elétrica em um sistema de irrigação por pivô central. In: XI – Simpósio brasileiro de automação inteligente – SBAI, Fortaleza / CE. 2013.

Rocha, C., Christofidis, D. Vantagens da opção pela agricultura irrigada. *Revista de Política Agrícola*, 24, Ago. 2015.

2 – CAPÍTULO II

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE PRECISÃO UTILIZANDO ARDUINO E INVERSOR DE FREQUÊNCIA APLICADO A SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

1. RESUMO

O crescimento da população mundial desacelera, mas terá crescimento absolutos significativos, de modo que a demanda de alimento crescerá proporcional. Estima-se que no futuro mais da metade dos alimentos sejam provenientes de áreas irrigadas, fazendo com que ocorra maior pressão sobre o consumo de água e de energia. O uso da tecnologia pode amenizar esse quadro tornando o processo mais eficiente. O objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência energética de um sistema de automação utilizando Arduino e inversor de frequência aplicado em sistemas de irrigação localizada. O experimento consistiu em manter a pressão de saída constante em função de seis perdas de carga aplicada ao sistema através de estrangulamento mecânico de válvulas hidráulicas. Para isso foi construído uma bancada de testes composta por conjunto motobomba, inversor de frequência, controlador de irrigação comercial e válvulas hidráulicas, transdutores de pressão e encoder incremental. Para o monitoramento e aquisição de dados utilizou-se uma placa Arduino Mega e circuitos condicionadores de sinal. A programação executada deixava a pressão de saída constante quando submetida a diferentes perdas de cargas. Os resultados mostram que a placa Arduino controlou de forma satisfatória todo o sistema, mantendo a pressão de saída das válvulas em 20 kPa, independente da pressão de entrada e das perdas de cargas das válvulas 1 até 6. Esse controle foi consequência da aceleração da rotação pelo inversor. Analisando a válvula 1 e 6, a frequência variou de 49,67 a 62,29 Hz, elevando a rotação de 2923 para 3646 rpm, e a potência ativa de 1322 para 2315 W, resultando em uma redução de potência ativa de 42,9% em relação a válvula 6. A potência aparente e reativa indutiva em termos absolutos subiu mas se for relativo em relação a potência ativa ela caiu. Isso ocorreu devido a melhoria da eficiência do sistema, como consequência o fator de potência aumentou de 0,52 para 0,67.

PALAVRAS-CHAVES: Potência ativa, controlador de irrigação, válvulas hidráulicas, agricultura irrigada, micro controlador.

2. ABSTRACT

Population growth in the world slows but will have significant absolute growth, so the demand for food goes hand in hand. It is estimated that in the future more than half of the food comes from irrigated areas, causing more pressure on water and energy consumption. The use of technology can soften this framework by making the process more efficient. The objective of this work was to evaluate the energy efficiency of an Arduino-based automation system and frequency inverter for use in localized irrigation systems. The experiment consisted in maintaining the output pressure constant in function of the losses of load applied to the system through hydraulic valves. For this, a test bench was built consisting of a motor pump, frequency inverter, commercial irrigation controller and hydraulic valves, pressure transducers and incremental encoder. For the monitoring and data acquisition, an Arduino Mega board and signal conditioning circuits were used. The programming performed left the output pressure constant when subjected to different load losses. The results show that the Arduino board satisfactorily controlled the entire system, maintaining the outlet pressure of the valves at almost 20 kPa, regardless of the inlet pressure and the valve load losses from valve 1 to 6. This control was a consequence of the acceleration of Rotation by the inverter. Analyzing valve 1 and 6 the frequency varied from 49.67 to 62.29 Hz, increasing the rotation from 2923 to 3646 rpm, and the active power from 1322 to 2315 W the power reduction was 42.9%. The apparent and reactive power inductive in absolute terms rose, but if relative relative to the active power it fell, due to improved efficiency of the system more efficient, and as a consequence power factor increased from 0.52 to 0.67.

Keywords: Active power, irrigation controller, hydraulic valves, irrigated agriculture, micro controller.

3. INTRODUÇÃO

Com a grande concorrência econômica dos dias atuais, até a irrigação para se manter viável necessita tornar-se mais eficiente, tanto do ponto de vista ambiental como o maior consumidor de água e também como um grande consumidor de energia. Por outro lado, tem o crescimento da população mundial que desacelera, mas mesmo assim espera-se aumentos absolutos significativos, com previsão para 2050 de mais de 9 bilhões de habitantes. A consequência disso é o aumento da demanda de alimentos, e em decorrência estima-se que mais da metade desse alimento deverá vir de áreas irrigadas (Alexandratos, N. & Bruinsma, 2012).

A área irrigada no mundo é de 16% da área total cultivada, sendo que essa mesma área é responsável 44% da produção agrícola mundial, mas é necessário consumir aproximadamente 70,2% de água doce (Rocha & Christofidis, 2015). No Brasil, a área irrigada cresceu nos últimos anos, sendo estimada em 2012 uma área de 5,8 milhões de hectare (Rocha; Christofidis, 2015). Entretanto o consumo de água foi aproximadamente 30% menor aos estimados para 1998, em decorrência principalmente das melhorias no manejo e utilização de novas tecnologias (ANA, 2012).

Para Christofidis (2013), a produtividade global em áreas irrigadas é 2,7 maior que em áreas tradicional de sequeiro. No Brasil implantação e modernização de sistemas de irrigação, possibilita aumento da produtividade física, na ordem de 3,5 vezes superior à agricultura tradicional, e em geral um retorno econômico de sete a oito vezes maior que a agricultura de sequeiro.

Assim, nas décadas seguintes deve crescer as buscas por maneiras e dispositivos que aprimorem o uso destes recursos tornando cada vez mais eficiente (Lima et al., 2015). A eficiência média de irrigação em nível nacional está estimada em 65,26%, significando que, para cada 1.000 litros de água necessária às plantas por hectare, são necessários 1.532 litros de água na irrigação. Com a elevação dessa eficiência de distribuição para 90%, a necessidade seria reduzida para 1.111 litros, representando uma economia de 421 litros por hectare ou expandir a área irrigada em mais de 1/3 utilizando a mesma quantidade de água e aproximadamente a mesma energia (Coelho, Coelho filho e Oliveira, 2005).

Na sua quase totalidade, os sistemas de irrigação necessitam de alguma energia no bombeamento, e com os constantes aumentos da tarifa de energia no Brasil nos últimos anos, fazendo com que o bombeamento da água se transformasse em um dos principais custos de produção, obrigando o irrigante a procurar alternativas para reduzi-los. Dependendo do projeto,

essa redução pode ocorrer com a utilização do inversor frequência, ajustando a rotação do motor para reduzir o consumo de energia elétrica. Enquanto isso, na Espanha, após análise detalhada em alguns sistemas de irrigação que já usam variação de velocidade, conseguiram melhorar mais ainda a eficiência energética (Moreno et al., 2010).

Paulino et al. (2011) verificaram que nos dados censo agrícola do Brasil de 2006 os principais sistemas de irrigação são: aspersão - 35% (sem pivô), inundação - 24%, pivô central - 19%, localizada - 8% e por sulcos - 8%. Porém, vale ressaltar, que os métodos predominantes são os que apresentam menos eficiência de aplicação.

Analisando as eficiências de aplicação dos sistemas de irrigação, observa-se que o pior resultado é para irrigação por inundação com eficiência que varia de 25 a 40%, já a aspersão convencional tem eficiência de 50 a 60%. Os pivôs centrais nos últimos anos tiveram duas grandes melhorias, baixando a pressão de serviço para economizar energia e elevando a uniformidade diminuindo o consumo de água, que com eficiência média de 80 a 85%, mas chegando a casos de equipamento acima de 90%, como o tipo Low Energy Precision Application - LEPA. A irrigação localizada é mais nova e incorpora bastante tecnologia, e por isso, em média, é o sistema mais eficiente de aplicação de água, além de trabalhar com baixa pressão, influencia economizando energia. A inundação é o sistema que necessita de menor pressão de serviço, porém devido à menor eficiência de aplicação gasta muita água, conseqüentemente tem de movimentar grandes volumes, o que acaba gastando também bastante energia (Coelho, Coelho filho e Oliveira, 2005; Marano, 2014)

Em geral, os métodos de irrigação localizados são mais eficientes quanto a economia de água e energia, contudo, mesmo tendo essas vantagens, ainda têm pouca participação na irrigação nacional. Porém, dados publicados por Rocha e Christofidis (2015) mostram uma tendência de mudança. A procura é maior por equipamentos de maior eficiência, verificaram isso, quando analisaram os dados da Câmara setorial de irrigação - CSEI e da Associação Brasileira de Maquinas e Equipamentos - Abimaq, que estimou uma venda de equipamentos novos de irrigação nos anos de 2007 a 2013, divididos em categorias, ficando em média 36,17% para pivô central e 29,58% irrigação localizada, respectivamente para primeiro e segundo lugar e demais métodos com o restante.

O alto custo da automação convencional é a principal desvantagem da utilização do sistema, que deve-se basicamente aos produtos e equipamentos utilizados, que tem preços elevados. Os principais equipamentos são controladores, solenoides, válvulas hidráulicas; além do sistema comando de válvulas, em especial para projetos extensos, onde as válvulas são

distantes dos controladores tem valores mais significativos (Gornat e Silva, 1990). Já a automação de precisão seria o processo de irrigar de maneira automática e dinâmica, objetivando manter a eficiência sempre elevada e reduzindo o consumo de insumos, principalmente da energia. A principal diferença da automação convencional para automação de precisão, é que na automação de precisão o sistema se auto ajusta para maximizar a eficiência do processo, também chamado na automação de sistema em malha fechada.

A energia gasta no sistema normalmente se refere a potência ativa, medida em W (Watts). Ela está relacionada à geração de calor, movimento ou luz. Basicamente, ela pode ser considerada como a média da potência elétrica gerada por um único dispositivo com dois terminais. Quanto a potência reativa não é propriamente consumida, mas gerada temporariamente utilizada e depois devolvida para rede elétrica, é produzida por reatâncias como capacitores e bobinas (capacitivas ou indutivas). É uma energia que reflete uma perda pois é utilizada basicamente para a carga nos capacitores e para produção de campos magnéticos nas bobinas dos motores e transformadores no armazenamento de energia, magnética ou elétrica. Contudo, é necessária para o devido funcionamento do sistema elétrico, a unidade é medida em Volt-Ampère reativo (var), (Franchi, 2008). A potência aparente é soma vetorial de todas a recebida pelo sistema (potências ativa e reativa), ou seja, é a potência total absorvida pela instalação, medida em volts-ampères (VA).

A potência aparente é toda a potência disponibilizada ao motor, sendo que parte dela retornará como potência reativa indutiva para rede, e a diferença é a potência ativa. Quanto menor a potência reativa melhor o funcionamento do sistema, por perder menos potência. O ideal é que potência reativa seja zero, ou seja a potência aparente seja igual a potência ativa. Onde toda energia recebida é consumida, mas isso só ocorre em cargas puramente resistivas, diferentemente das cargas indutivas e capacitivas que geram potência reativas (Franchi, 2008).

O fator de potência é uma relação entre potência ativa e potência reativa, consequentemente energia ativa e reativa. Ele indica a eficiência com a qual a energia está sendo usada, a sua escala é de 0 a 1. Um alto fator de potência (próximo de 1) indica uma eficiência alta, e inversamente, um fator de potência baixo indica baixa eficiência. A ANEEL (2016) exige que o fator de potência seja de 0,92 para consumidores do grupo “A”, que recebe energia da concessionária acima de 2300 V.

O uso do inversor de frequência controla a rotação do motor do conjunto motobomba, ajustando a pressão de saída ao valor desejado, geralmente reduzindo consumo da energia (potência Ativa), ou seja, o uso do inversor frequência economiza energia enquanto o sistema

tradicional com estranguladores mecânicos desperdiça energia. Nos últimos anos, com os aumentos de energia, e a criação da tarifação por bandeiras (verde, amarela e vermelha) fez com que o custo da energia ficasse cada vez mais elevado. Consequentemente, o bombeamento de água tornou-se uma importante parcela no custo do irrigante. Bernardo et al. (2008) estimam que 25% do custo da área irrigadas seja só energia. Segundo Lima et al. (2015), os motores elétricos são os equipamentos que normalmente consomem a maior parte da energia elétrica.

Quando um pivô central é instalado em áreas inclinadas, o dimensionamento do motor é feito para o ponto de maior aclave, condição crítica, que necessita de maior pressão e os outros pontos necessita de menos, mantendo a mesma vazão. O uso do inversor de frequência nestes casos tem como objetivo reduzir a potência nos pontos mais baixos, isso já vem sendo estudada e difundida a algum tempo (Lima et al., 2009; Masiero et al., 1999; Morais et al., 2014), Mas, em área que utilizam aspersão convencional ou irrigação localizada ainda tem poucos estudos. Mesmo com a vantagem de se comportarem como pivôs centrais em áreas inclinadas, mesmo estando instalados em terrenos planos. E se for em área inclinadas equivale a pivôs centrais instalados em áreas muito inclinadas, o que poderia ser mais eficiente em economizar energia com uso do inversor.

Os inversores podem ser operados de forma manual ou automática, sendo interessante para irrigação de forma automática, para isso é necessário algum tipo de microcontrolador para atuar em cima do inversor, alterando a rotação do conjunto motobomba. Pereira et al. (2013) e Lima et al. (2015), utilizaram um CLP programado para fazer as leituras dos sensores e controlar a frequência de saída do inversor, e reduzir o consumo de energia. O CLP é um dos melhores equipamentos para fazer essa função, mas tem custo elevado.

O objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência energética de um sistema de automação baseado em Arduino e inversor de frequência para uso em sistemas irrigação localizada.

4. MATERIAL E MÉTODOS

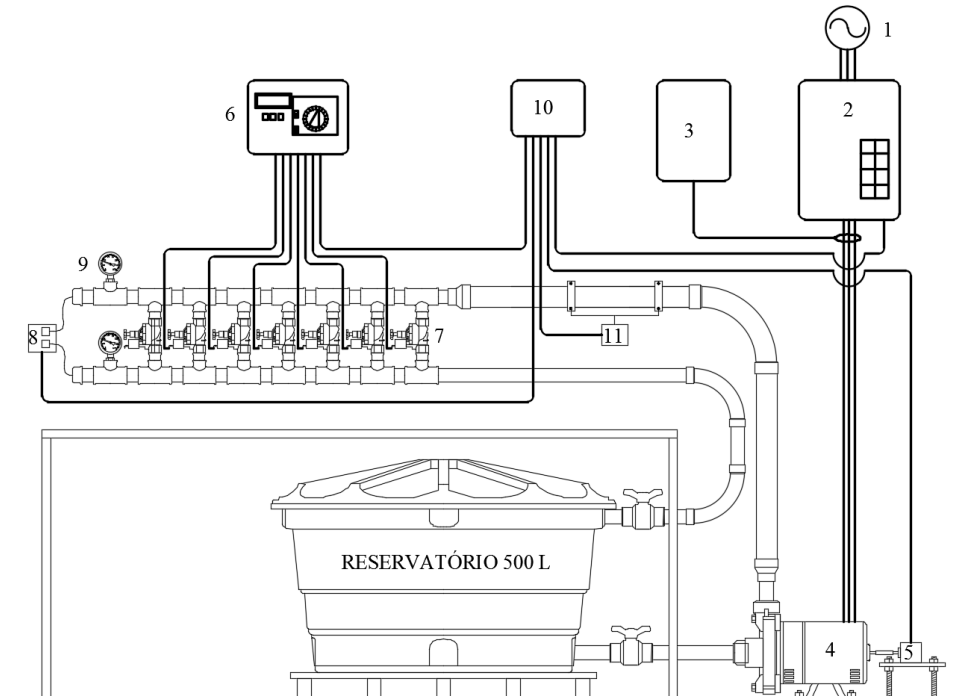
O experimento foi realizado no laboratório de instrumentação de máquinas e mecanização agrícola (LIMMA), pertencente ao Centro de Engenharia-CE da UFERSA.

Este trabalho foi baseado em uma automação com Arduino para controlar a pressão na saída das válvulas hidráulicas utilizadas na entrada das unidades e subunidades de irrigação localizada, configurada para se manter em 20 kPa, quando submetido a seis perdas de carga localizadas nas válvulas. Sendo utilizando para o controle de pressão a variação na rotação do conjunto motobomba, sendo para isso utilizado um inversor de frequência. Para controlar o tempo de funcionamentos das válvulas foi utilizado um controlador comercial que acionava cada uma das válvulas por 20 minutos, totalizado 120 minutos em cada repetição. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, sendo feito quatro repetições em cada válvula.

Para a realização do experimento construiu-se uma bancada de ensaios como mostrado na figura 1. Utilizou-se uma caixa de água de polietileno com capacidade para 500 litros. Para o bombeamento, foi utilizado um conjunto motobomba, composto por uma bomba marca Dancor, com bombeador CAM-W21, tubulação de sucção de 2 ½” e recalque de 2”, vazão de trabalho recomendada entre 18,6 a 34,3 m³ h⁻¹ (anexo A), acoplada a um motor marca WEG, trifásico (380 VAC), com potência de 2,20 kW (3 CV).

A tubulação de recalque utilizada foi de PVC de irrigação, sendo da saída do motor até o início das válvulas com diâmetro de 75 mm, e o restante de 50 mm. No final da tubulação de retorno foi instalado um registro de gaveta de ± 40 mm (1.½”) parcialmente fechado para manter a vazão dentro da faixa de trabalho da bomba. As válvulas estavam posicionadas em paralelo, bem próximo uma das outras, conectadas com uniões PVC de 1”.

Figura 1. Desenho esquemático da bancada de ensaio composta por: 1 – sistema de alimentação trifásica, 2- inversor de frequência, 3 – analisador de energia, 4 – motobomba, 5 – encoder rotativo, 6 – controlador eletrônico, 7 – válvulas elétricas, 8 – sensores de pressão, 9 – manômetros analógicos, 10 – sistema microcontrolado e 11 – sensor de vazão

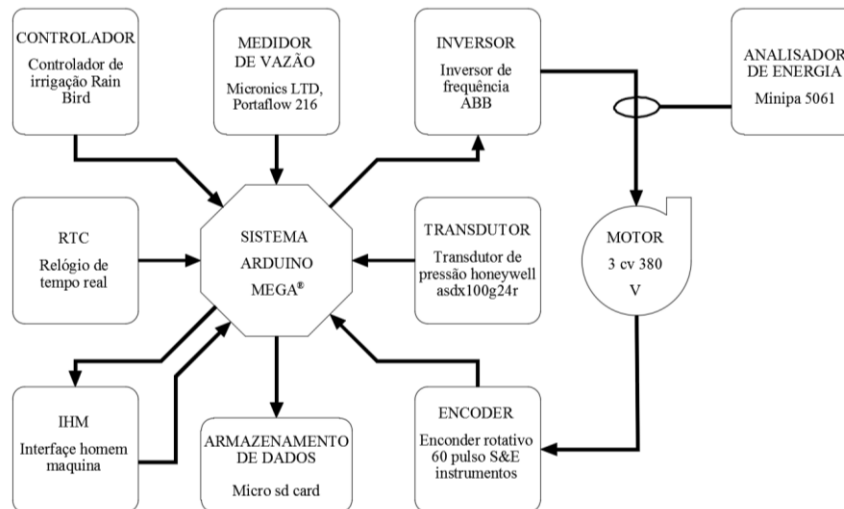


Fonte: autoria própria

Para simular as perdas de carga, foi utilizado um conjunto de sete válvulas hidráulicas, fabricadas pela Rain Bird, modelo DVF 100, com acionamento elétrico/mecânico, permitindo a regulação manual da vazão (fecho) com uso indicado para água. Para controle de abertura e fechamento das válvulas, tempo de permanência em que cada a válvula fica aberta, utilizou-se um controlador comercial de irrigação fabricado pela Rain Bird, modelo ESP-4Mi Modular, com comando de válvulas elétricas com saída de 24 VAC (corrente alternada), para controle de até quatro válvulas e modulo de expansão para três válvulas, totalizando sete saídas de controle. Porém só foram usados seis, a sétima ficou aberta durante todo o experimento para a vazão da bomba ficar dentro da faixa especificada pelo fabricante.

Para controlar a pressão de saída do sistema foi utilizado um inversor de frequência, marca AAB, modelo ACS355-03E, com alimentação trifásica (380 V), com controle manual e automático para controlar a rotação do conjunto motobomba. Utilizou-se uma placa Arduino Mega[®] 2560 R3 para acionar e controlar e regular a frequência do inversor de frequência, também de monitorar as pressões nas linhas de alimentação e retorno, rotação do motor, vazão e status das válvulas além de controlar a rotação do motor atuando diretamente no inversor de frequência e gravar os dados gerados pelos sensores (Figura 2)

Figura 2. Diagrama de fluxo do sistema de automação e analisador de energia



Fonte: autoria própria

Para monitorar os parâmetros elétricos, tensão, corrente, frequência, potências ativa, reativa e indutiva, fator de potência foi utilizado um analisador de energia marca Minipa, modelo ET- 5061C, inserido após o inversor de frequência, na saída de alimentação para o conjunto motobomba. O sistema foi programado para realizar a leitura e armazenamento dos dados a cada cinco segundos. Os dados armazenados foram posteriormente transferidos para o computador onde foram realizadas as análises dos parâmetros de eficiência energética do sistema, para cada condição de ensaio.

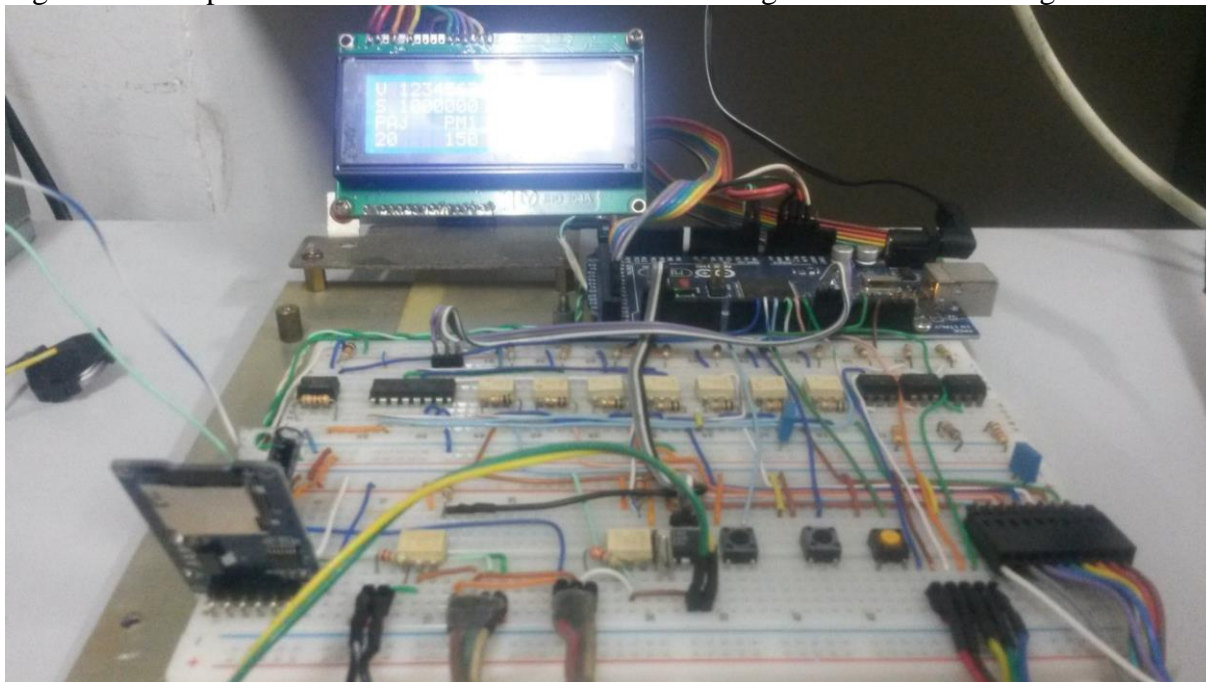
Para monitorar as pressões nas linhas de alimentação e retorno utilizou-se transdutores de pressão fabricado pela Honeywell, modelo ASDX100G24R, com range de pressão de 0 a 689,5 kPa (0 a 100 PSI), inseridos no final e início das linhas de alimentação e retorno, respectivamente.

Para monitorar a vazão utilizou-se um medidor de fluxo ultrassônico, marca Micronics LTD, modelo Portaflow 216, instalado na linha de alimentação.

A rotação do motor foi monitorada por um encoder rotativo incremental, marca S&E instrumentos, modelo GI-U, com 60 pulsos por volta e tensão de alimentação de 12 VDC. Um circuito condicionador de sinal foi utilizado para adequar o sinal de saída, com amplitude de 12 VDC para 5 VDC, valor máximo aceitável pelo microcontrolador.

Para realizar monitoramento dos transdutores de pressão, rotação do motor, vazão do sistema, exibição e armazenamento dos dados, e controle do inversor de frequência foi utilizada uma placa Arduino Mega®. O sistema foi programado para efetuar a média a cada dez leituras, os quais foram armazenados em um SD CARD (Figura 3).

Figura 3. Placa protoboard com circuitos eletrônicos interligados ao Arduino Mega®.



Fonte: autoria própria

Para diminuir o número de circuitos que chega ao Arduino oriundos das válvulas, foi utilizado um artifício da eletrônica através do Multiplexador que permitem conectar qualquer uma das entradas à saída. Neste trabalho foi usado o tipo 8x1 modelo HCF4051BE que disponibiliza até oito entradas porém só foram usadas seis.

Quando o Arduino detectava uma válvula aberta, ou seja, o status da válvula ficava ligado então ele mandava o comando para inversor de frequência ligar o motor, e acelerar ou reduzir a rotação depende de leitura do sensor de saída e do valor desejado de pressão. Para o ajuste da pressão através de rotação foi usado as entradas do inversor frequência UP e DOWN, onde cada pulso de 50 milissegundos equivale a 0,1 Hz.

Na parametrização do inversor, a partida foi configurada para uma partida suave, com aceleração em rampa constante de 20 segundos, até atingir uma frequência mínima parametrizada de 40 Hz também parametrizada. Após esse tempo, o controle do inversor ficava sendo realizado pela placa arduino.

Para a gravação dos dados não ficar aleatória, foi utilizado um Modulo RTC – relógio de tempo real, que fornecia as informações de data e hora em cada linha de gravação. A data foi do formato DD.MM.AAAA, já a hora foi de formato HH.MM.SS.

A interface homem-máquina (IHM) é composta por display LCD (20x4), vinte colunas e quatro linhas e três interruptores de pressão do tipo push button. No display são exibidas as informações sobre o status das válvulas, identificando qual válvula está aberta, pressão de saída das válvulas e rotação do motor. Os interruptores de pressão são utilizados também para ligar/desligar o motor e inserir/alterar a parametrização dos parâmetros de ensaios (figura 6).

Os dados foram submetidos à análise de variância, usando-se o software Sisvar desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa (Ferreira, 2011). As variáveis analisadas foram pressão de entrada, pressão de saída, vazão, rotação, potência ativa, frequência, potência aparente, potência reativa, fator de potência, tensão e corrente. As médias foram comparadas a 5 % de probabilidade, pelo teste de Tukey, quando o valor do teste F, na análise de variância for significativo. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Estatcamp, 2014) e homogeneidade (Bartlett, 1937) de variância antes da realização das análises estatísticas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados comprovam que o sistema microcontrolado com Arduino construído tanto monitorou e controlou muito bem os parâmetros do sistema estando apto a ser testado no campo. Verifica-se que na análise de variância, com exceção da pressão de saída e da vazão, que todas as outras variáveis analisadas tiveram significância. Como a pressão de saída estava programada para ficar constante, conseqüentemente nenhuma das válvulas apresentou diferenças significativas neste item (Tabela1), mesmo comportamento da vazão, pois depende da pressão, observa-se que os valores estão proporcionais, ambos sem significância nas médias. Com relação o coeficiente de variação os valores foram relativamente baixo (Apêndice 1)

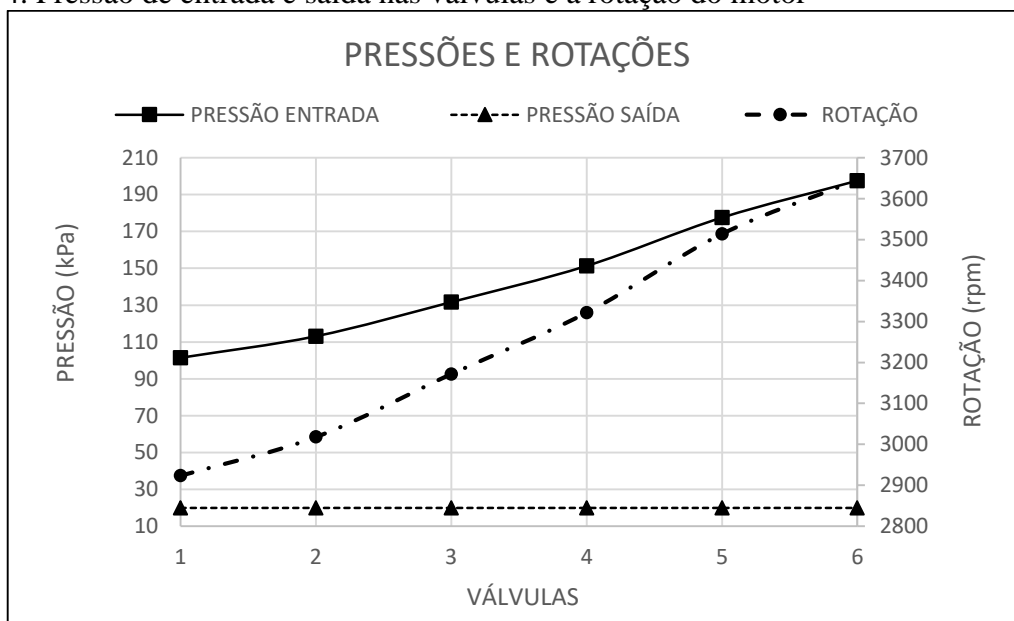
Tabela 1. Análise variância das pressões de entrada e saída, vazão, rotação, potência ativa e frequência

VÁLVULAS	VARIÁVEIS ANALISADAS					
	P. entrada kPa	P. saída kPa	Vazão m ³ h ⁻¹	Rotação rpm	P. ativa W	Frequência Hz
1	101,43 f	19,93 a	19,08 a	2.923,47 f	1.322,32 f	49,67 f
2	113,14 e	19,93 a	19,11 a	3.017,93 e	1.436,71 e	51,29 e
3	131,68 d	19,94 a	19,47 a	3.171,80 d	1.632,13 d	53,96 d
4	151,35 c	19,95 a	19,53 a	3.321,72 c	1.833,36 c	56,56 c
5	177,59 b	19,96 a	19,77 a	3.514,11 b	2.116,48 b	59,92 b
6	197,61 a	19,96 a	20,16 a	3.646,00 a	2.315,24 a	62,29 a

Médias seguidas pela mesma letra, e minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: autoria própria

De acordo com a programação, para toda mudança de válvula ocorria uma elevação da rotação para elevar a pressão de entrada, mantendo a pressão de saída constante, não sendo observado variação significativa. Os valores observados são praticamente 20 kPa, porém o valor médio das saídas medido pelo arduino foi de 19,95 kPa (Figura 4). O que equivale a uma diferença de 0,25% do valor medido para o predefinido. Esses valores para menos foi devido a programação do Arduino que verificava os valores, e se estivessem em uma faixa bem próximos não tomava a decisão, então na elevação de pressão antes de chegar exatamente em 20 kPa já parava de acelerar por entender que estava dentro da faixa, com isso os valores observados foram um pouco abaixo de 20 kPa.

Figura 4. Pressão de entrada e saída nas válvulas e a rotação do motor



Fonte: autoria própria

A melhor aplicação comercial para esse sistema seria controlar a pressão de saída das válvulas, com isso na irrigação localizada dispensava o uso de estranguladores mecânicos como a válvula piloto e estrangulamento de válvula manuais, e reduzindo a potência consumida. Araújo et al. (2004) e Masiero et al. (1999) também utilizaram em seus trabalhos de pesquisas a pressão de saída ajustada.

A pressão de entrada nas válvulas tiveram um comportamento crescente e significativas para todas as válvulas, compensando as perdas de carga localizadas nas válvulas. Isso ocorreu para manter a pressão de saída das válvulas no valor pré-programado. Os valores de pressão de entrada mínimos e máximos foram 101,43 e 197,61 kPa e para controlar essa pressão a rotação variou de 2924 para 3646 rpm respectivamente para as válvulas 1 e 6. A rotação por sua vez foi controlada pela respectiva frequência de saída do inversor (Figura 5).

Araújo et al. (2004), trabalharam com aspersão utilizando inversor de frequência que variou a rotação de 2400 a 3500 rpm, já Lima et al. (2015) trabalharam com motor de 1750 rpm em pivô variou a rotação de 1682 a 1375 rpm. Uma das grandes vantagens do inversor, é que permite trabalhar com rotação precisa para regular a pressão necessária, e quando rotação fica abaixo da rotação nominal do motor reduz a potência ativa consumida.

No dimensionamento dos sistemas de irrigação normalmente coloca-se margem de segurança para o motor de 7 a 15% (Bernardo et al., 2008), mas em casos extremos pode ficar muito mais, exemplo um motor é calculado em 11,76 kW (16 cv) como motores dessa potência é raro, o recomendado é usar um de 14,71 kW (20 cv), ou seja, uma folga de 25% e grande

probabilidade de viabilizar o inversor de frequência nestes casos. Outra vantagem do inversor de frequência é o menor desgaste devido as partidas e paradas suaves consequentemente sem pico de corrente.

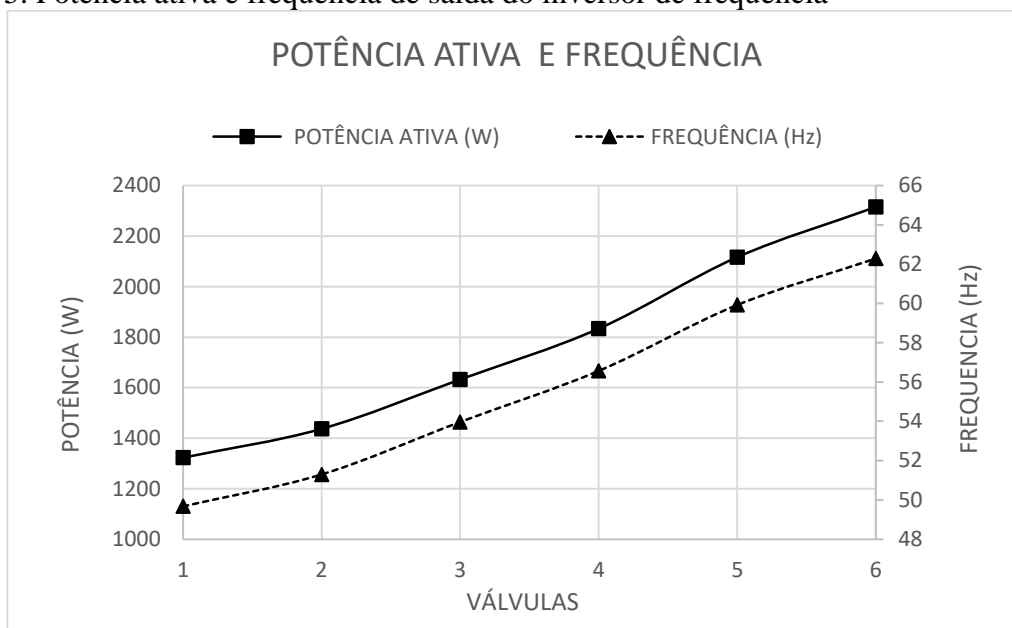
Quanto à vazão, foi observado que ficou praticamente constante, com o valor médio de $19,52 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Tabela 1). Sendo a faixa vazão recomendada pelo fabricante da bomba de $18,6$ a $34,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e ainda segundo fabricante da específica que o rendimento da bomba nessa vazão é de 59% o que está aceitável para esse tipo bomba que apresenta baixa potência (anexo A).

A frequência de saída do Inversor de frequência variou de 49,67 até 62,29 Hz, respectivamente da válvula 1 para a 6, com diferenças variação significativas das médias para todas as válvulas. Essa variação ocasionou uma redução da potência ativa de 42,8%, mas neste caso a frequência de 62,29 Hz está acima da rede, o que deixa a potência ativa medida em 2.315,24 W, ficando maior que a nominal do motor, que é 2.200 W (Figura 5), provocando uma redução no rendimento do motor o que eleva o consumo.

Quando analisado em relação a válvula 5 com frequência de 59,92 Hz, que seria bem próximo a frequência de alimentação da rede e comparamos com a válvula 1 teríamos uma redução de 794 W o que equivale a uma redução de 37,5%, valor mais provável de ser praticado comercialmente. A potência ativa na válvula 5 foi de 2116,48 W pouco abaixo na nominal do motor. Dados de um experimento com pivô central teve proporções parecidas, reduzindo a frequência de 57,03 para 54,66 redução de 4,15%, ocasionou uma redução na potência ativa de 7540 para 6747 W, o que equivale a 10% (Pereira et al., 2013).

Neste trabalho somente considerou-se o motor, não considerando o consumo do próprio inversor de frequência. No manual, o fabricante do inversor de frequência especifica as perdas para esse equipamento de 173W no circuito principal e mais no circuito de controle de no mínimo 12 W e no máximo 31,2 W. Totalizando 185 e 204,2 W respectivamente para valores mínimo e máximo.

Figura 5. Potência ativa e frequência de saída do inversor de frequência



Fonte: autoria própria

Resultados de trabalhos apresentam redução de potência em função da frequência, Araújo et al. (2004) trabalhando de uma a quatro linhas de aspersores aberta de chegou a reduzir 58% do consumo de energia elétrica quando trabalhava com inversor de frequência variando de 39,8 a 58,0 Hz. Com o uso do inversor de frequência aplicado a pivô central tem vários trabalhos com reduções variadas, Pereira et al. (2013) comparam o consumo de energia em uma volta completa do pivô em área inclinada, onde observou redução de 19% com uso do inversor de frequência. Lima et al. (2015) analisando a potência com o inversor de frequência em pivô central posicionado no aclave e declive obteve 185,36 e 110 kW respectivamente, uma redução de mais de 40% se considerado apenas os dois pontos.

Na tabela 2, referente ao resumo da análise de variâncias de algumas propriedades elétricas, com exceção da potência reativa, todas as outras variáveis analisadas tiveram as médias com diferenças significativas entre as válvulas. Os dados de potência reativa tiveram as duas primeiras e as duas últimas médias não significância de uma para outra, neste caso ficando apenas quatro níveis.

Tabela 2. Análise variância das características potência aparente, potência reativa indutiva, fator de potência, tensão e corrente

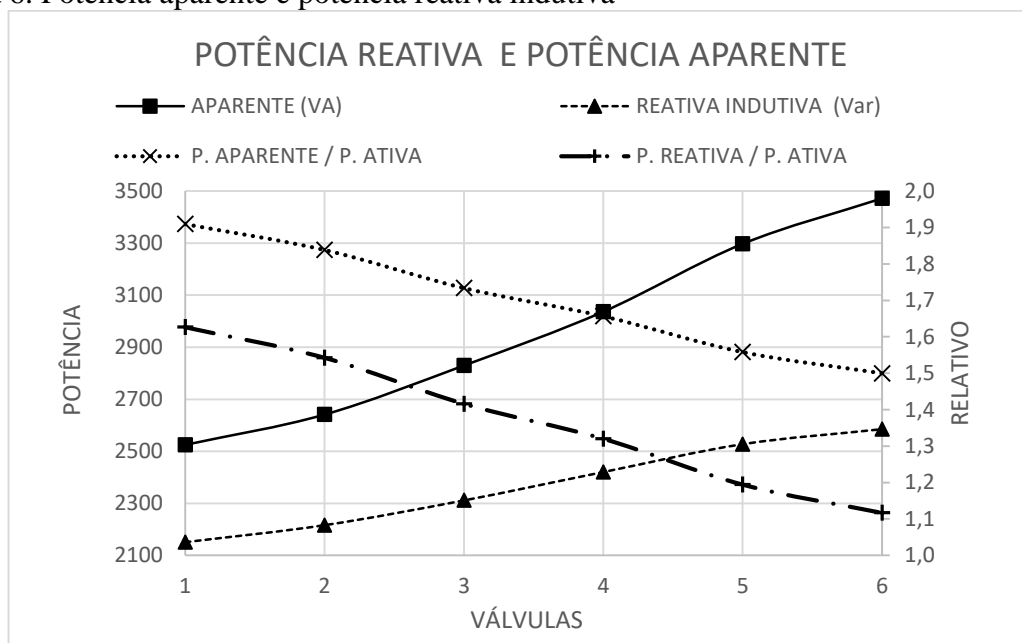
VÁLVULAS	VARIÁVEIS ANALISADAS				
	P. aparente	P. reativa ind.	Fator de pot.	Tensão	Corrente
	VA	Var	-	V	A
1	2524,84 f	2150,61 d	0,52 f	401,43 f	3,32 f
2	2641,29 e	2216,03 d	0,54 e	407,02 e	3,43 e
3	2829,80 d	2311,31 c	0,58 d	416,23 d	3,59 d
4	3036,67 c	2420,36 b	0,60 c	426,80 c	3,76 c
5	3297,37 b	2527,66 a	0,64 b	437,41 b	4,01 b
6	3472,15 a	2585,29 a	0,67 a	444,56 a	4,167 a

Médias seguidas pela mesma letra, e minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: autoria própria

Analisando a potência aparente observa-se que os valores são crescentes, com aumentos absolutos variando de 2524 até 3472 VA (Figura 6), porém quando comparado relativamente com a potência ativa essa potência aparente cai ficando a relação de 1,90 para 1,50 respectivamente para as válvulas 1 e 6. Quanto mais próximo a potência nominal do motor melhor. Como essas medições ocorre na ligação do inversor para o motor e devido a existência de capacitores no inversor de frequência espera-se que antes do inversor esses valores sejam melhores. Esses dados de potência aparente são utilizados para calcular a fator de potência (ANEEL, 2013)

Quanto a potência reativa, que é uma fração de toda a potência disponibilizada ao equipamento que volta para rede, nesse caso, observa-se que essa curva está mesmo acentuada que a da potência aparente, ou seja, os dados da potência relativa melhoram da válvula 1 para 6, e quanto maior a potência melhor o resultado.

Figura 6. Potência aparente e potência reativa indutiva



Fonte: autoria própria

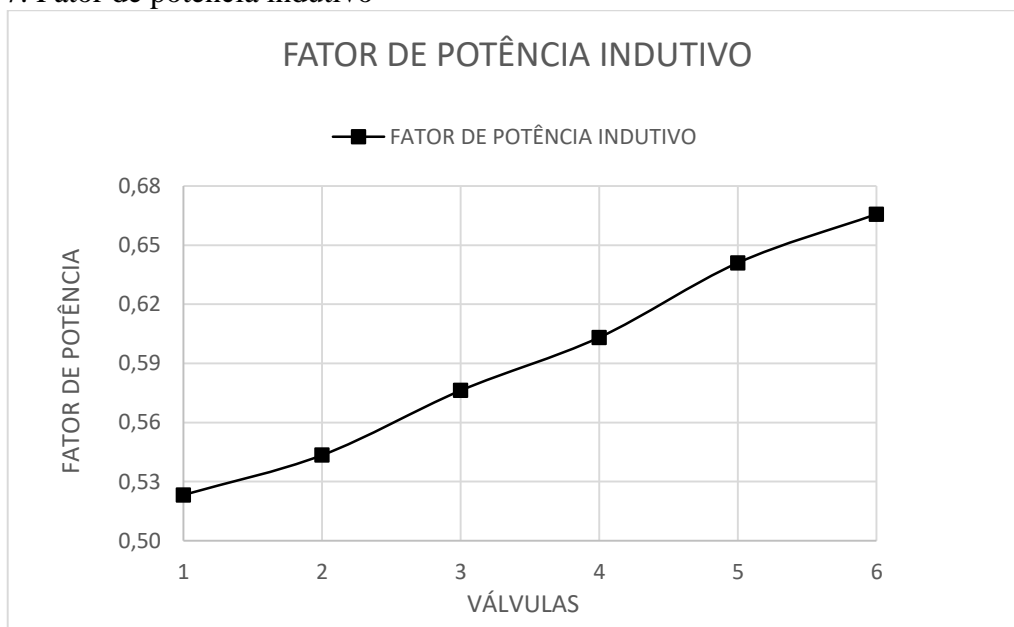
Na ligação do inversor de frequência para motor tem valores considerados elevados, e quanto mais elevado a frequência mais esses valores aumentam, ou seja, ocorre uma elevação absoluta da primeira para a última válvula, mas se analisamos em relação a potência ativa os valores ficam melhor, variando de 1,62 a 1,12, respectivamente para válvula 1 e 6. No passado as companhias de distribuição elétrica cobravam do grupo de consumidores A e B por essa potência utilizando o fator de potência (ANEEL, 2010) atualmente não está cobrado mais do grupo B que são os consumidores atendidos com baixa tensão.

O uso de motores elétricos de indução gera potência reativa indutiva. Uma das medidas utilizadas para reduzir essa potência reativa seria a utilização de um banco de capacitores. Como neste caso as leituras foram feitas entre o inversor e o motor, conforme figura 1, e devido a existência de capacitores no inversor, essa potência antes do inversor não deve ser a mesma que volta para rede. Alguns autores comentam que o inversor de frequência evita o uso de banco de capacitores (Lima et al., 2015; Lima et al., 2009).

Fator de potência é uma relação entre a potência ativa e potência aparente, em outras palavras, a relação entre a energia que foi realmente consumida na realização do trabalho com a energia total entregue (figura 7). O valor desejado do fator de potência é de no mínimo 0,92 utilizado pela ANEEL (2016), sendo cobrado uma taxa quando fica abaixo desse limite, somente para consumidores do grupo "A" que tem alimentação acima 2.300 V, ANEEL (2010).

Para o grupo “B”, que seria residencial, rural, indústria e comércio ambos de pequeno porte, foram taxados entre os anos de 2010 e 2013 segundo a ANEEL (2013)

Figura 7. Fator de potência indutivo



Fonte: autoria própria

Baseado nas informações acima, verifica-se que os dados analisados estão fora das recomendações da ANEEL (2016), os valores estão bem abaixo, em média de 0,59, porém vale reforçar que essas leituras foram feitas entre o inversor e o motor, e como inversor tem um banco de capacitores terão valores diferentes, provavelmente mais próximo do valor recomendado pela ANEEL (2016).

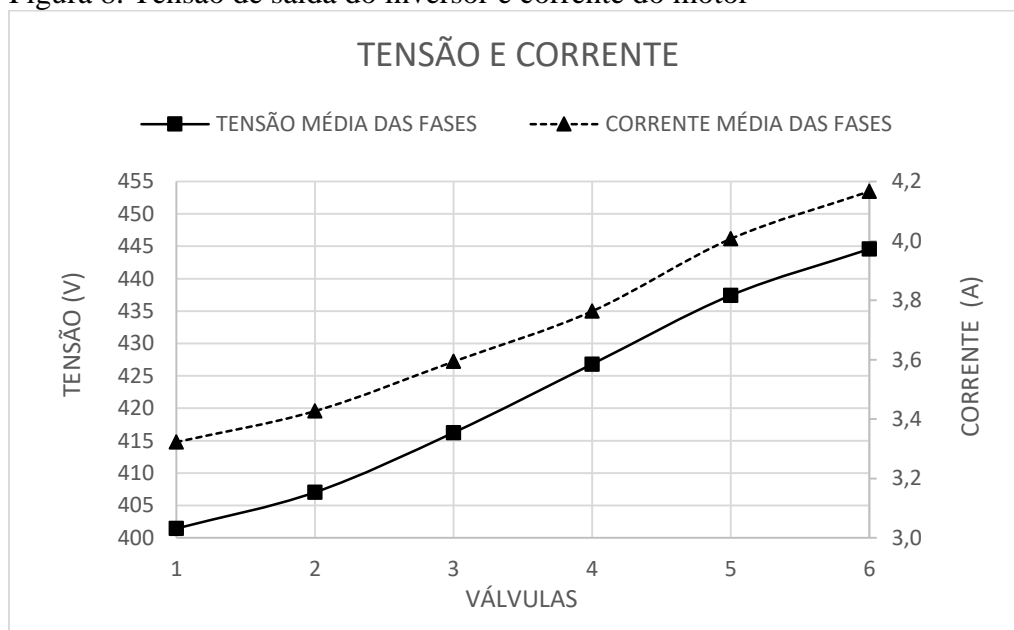
Araújo (2004) analisando o fator de potência em um inversor de frequência obteve resultados contrários ao desse trabalho, com o fator de potência variando de 0,83 para 0,77 para aumento da carga, já neste trabalho a variação foi de 0,52 para 0,67. Segundo Pereira et al. (2013), o fator de potência passou de 0,84 para 0,88 com diminuição da carga. Isso mostra que o fator de potência não depende só da carga, mas também de outros fatores tais como rendimento do motor, já para obter melhor rendimento do motor deve-se trabalhar na carga nominal, o que nem sempre é possível na irrigação.

Para a tensão de saída do inversor de frequência, os valores ficaram bem acima da alimentação de entrada da rede que é 380 V (Figura 8), ocorreu ainda um aumento gradativo da tensão, quando analisado da válvula 1 para 6, com tensões de 401,4 e 444,5 V respectivamente, ou seja o inversor de frequência funciona como transformador elevando a tensão, isso contribui para baixar a corrente. A ANEEL (2016) exige uma variação em grandes intervalos de mais ou

menos 5% da tensão de alimentação padrão, ou seja, como a alimentação padrão é 380 V, o valor máximo de 399 V e mínimo de 361 V. Mas nesse caso a variação só ocorre do inversor até o motor, o que não interfere na rede.

Os inversores têm a características de variar a tensão de acordo com a variação da frequência, mantendo a relação praticamente constante. No trabalho de Lima et al. (2015), essa relação é praticamente 6,31, já nesse trabalho a relação foi de 8,08 a 7,14 respectivamente para válvula 1 e 6.

Figura 8. Tensão de saída do inversor e corrente do motor



Fonte: autoria própria

Quanto a corrente, verifica similaridade com potência ativa e a frequência de saída, sendo que o valores observados da corrente ficou abaixo da corrente nominal do motor, especificado pelo fabricante WEG em 4,63 A, e neste trabalho a variação foi de 3,30 a 4,13 A, respectivamente para válvula 1 e 6. Observando os dados obtidos no acionamento da válvula 6, a corrente ainda ficou abaixo 0,5 A da corrente nominal motor, mesmo já estando acima da potência nominal. Diferente deste trabalho, Araujo et al. (2004) utilizando motor de 5 cv chegou a pico de corrente com inversor de frequência de 14 A com apenas 58 Hz, sendo a corrente média obtida direto da rede de apenas 10,72 A.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho o uso do inversor de frequência para frequência menores que 60 Hz, reduziu a potência ativa em aproximadamente 2,15% para cada redução de 1% na frequência.

O controle da pressão de saída das válvulas foi satisfatório, evitando o uso de estranguladores mecânicos e reduziu a potência ativa em até 42,8% para condição desse experimento.

O monitoramento dos outros parâmetros envolvidos para manter a pressão de saída também atendeu ao esperado e que possibilita o uso do sistema no campo com irrigação com válvulas.

O fator de potência medido entre o inversor e o motor é considerado baixo, sendo o valor médio observado de 0,59.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Modifica a abrangência na aplicação do fator de potência para faturamento do excedente de reativos de unidades consumidoras e altera a Resolução Normativa nº. 414, Resolução normativa Nº 569, de 23 de julho de 2013.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. resolução normativa Nº 414, de 9 de setembro de 2010

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 7, publicado: 27/01/2016.

Araújo, J. A. B. de, Aplicação de inversor de frequência para economia de energia elétrica, em sistema de irrigação por aspersão. Botucatu: Universidade Estadual Paulista “ Júlio de Mesquita Filho, 2003. tese de doutorado.

Alexandratos, N.; Bruinsma, J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Rome, FAO: ESA Working paper, 2012.

ANA 2004: Agência nacional de água. Agricultura irrigada: estudo técnico preliminar. Brasília-DF, 2004, 107p.

ANA 2012: Agência nacional de água. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2012. Brasília-DF, 2012, 215 p.

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

Bartlett, M. S. Some examples of statistical methods of research in agriculture and applied biology. Journal of the Royal Statistical Society, Malden, v. 4, n. 1, p. 137-183, 1937.

Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de Irrigação. 8ª ed. Viçosa, MG: UFV, 625 p, 2008.

Christofidis, D.; Goretti, G. Os dez mais da irrigação a adubação. Irrigação & Tecnologia Moderna, Brasília: v. 50, 54 p. 2009.

Christofidis, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. Revista de política agrícola, Brasília, DF, ano 22, nº1, p 115 a 127. 2013.

Coelho, E. F.; Coelho filho, M. A.; Oliveira, S. L. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. Bahia Agrícola, v. 07, n. 01, p. 57-60, 2005

Estatcamp. Software Action, versão 3.0. Estatcamp - Consultoria em estatística e qualidade, São Carlos - SP, Brasil, 2014. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br>>.

Ferreira, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

Franchi, Claiton Moro, *Inversores de Frequência, 1ª Edição - Teoria e Aplicações*. São Paulo: Editora Érica, 2008.

Gornat, B. E Silva, W. L. C. *Sistemas de Controle e Automatização da Irrigação*. Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília, DF, v.41,p 20 a 24, 1990.

Lima, A. Dos S.; Zocoler, J.L.; Maggi, M. F.; Lima, H. K. de. Uso do inversor de frequência em sistema de irrigação do pivô central e seu efeito na lâmina e uniformidade de distribuição de água. *Pesquisa aplicada & agrotecnologia*, v. 2, n. 1, 2009

Lima, A. dos S.; Zocoler, J. L.; Jadoski, S. O.; Maggi, M. F.; Amarante, R. R. Desempenho Operacional no Bombeamento em Pivô Central utilizando Inversor de Frenquência. *Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science*, v. 8, n. 2, 2015.

Morais, M. J.; Oliveira filho, D.; Mantovani, E. C.; Monteiro, P. M. B.; Mendes, A. L. C.; Damião, J. H. A. C.; Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. *Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 6, p. 1075-1088, 2014

Masiero L.A.M., Oliveira filho, D., Oliveira, R.A. Utilização de inversores de frequência para racionalização do uso da energia elétrica em sistemas de irrigação por pivô central. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa; v.7.; p.35-45,1999.

Oliveira, L. F. C. de; Medeiros, A. M. de M.; Silveira, P. M. da S. Otimização de sistema pivô central de irrigação por aspersão. XLII Congresso brasileiro de Engenharia Agrícola – COMBEA 2014. Campo Grande / MS.

Paulino, C. A.; Ramán, R.M.S.; José, J. F. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com censo agropecuário 2006. *Irriga*, Botucatu; v. 16.; nº 2. 163-176 p. 2011

Pereira, P. H. C.; Colombo, A.; Rabelo, G. F. O uso da engenharia de automação na redução do consumo de energia elétrica em um sistema de irrigação por pivô central. XI – Simpósio brasileiro de automação inteligente – SBAI, Fortaleza / CE. 2013.

Marano, R. P. Manejos da irrigação e da adubação na cultura de arroz (*Oryza sativa* L.) visando incrementar a eficiência do uso da água e do nitrogênio. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014. Tese de Doutorado.

Moreno, M. A., Córcoles, J. I., Tarjuel, J. M., Ortega, J. F. Energy efficiency of pressurized irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule. *Biosystems Engineering*, London, p. 349-363, 2010.

Rocha, C., Christofidis, D. Vantagens da opção pela agricultura irrigada. *Revista de Política Agrícola*, 24, Ago. 2015.

APÊNDICE A – RESUMO DOS QUADRADOS MÉDIOS

Tabela 3. Resumo dos quadras médios das variáveis, pressão de entrada, pressão de saída, vazão, rotação, potência ativa e frequência.

F. V.	QUADRADOS MÉDIOS						
	GL	P. entrada	P. saída	Vazão	Rotação	P. ativa	Frequência
Válvulas	5	5567,34**	0,000820 ^{ns}	0,67 ^{ns}	317439,99**	601303,74**	96,60**
CV		1,09	0,12	4,27	0,70	2,11	0,68
Média geral		145,47	19,95	19,52	3265,84	1776,04	55,62

(**) Significativo a 0,01 de probabilidade, (*) Significativo a 0,05 de probabilidade, (^{ns}) não Significativo a 0,05 de probabilidade.

Tabela 4. Resumo dos quadras médios das variáveis, pressão de entrada, pressão de saída, vazão, rotação, potência ativa e frequência.

F. V.	QUADRADOS MÉDIOS					
	GL	P. aparente	P. reativa i.	F. potência	Tensão	Corrente
Válvulas	5	551669,28**	119210,36**	0,01**	1160,21**	0,43
CV		1,16	1,29	1,36	0,44	0,97
Média geral		2967,02	2368,54	0,59	422,24	3,71

(**) Significativo a 0,01 de probabilidade, (*) Significativo a 0,05 de probabilidade, (^{ns}) não Significativo a 0,05 de probabilidade.

ANEXO A – CURVA DE SELEÇÃO BOMBA DANCO CAM W-19/21

CAM W-19/21 - Centrífuga de Aplicação Múltipla

Curvas de Performance

2 Polos - 3.500 rpm - 60 Hz

Série CAM 2 Polos

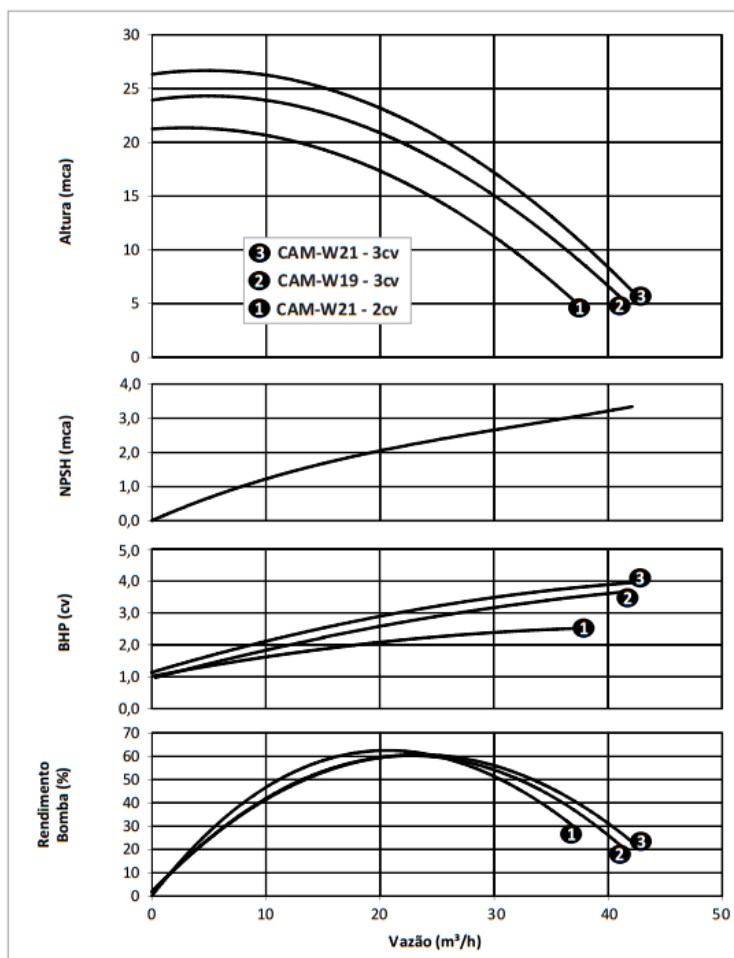


Tabela de Seleção

Modelo		Pot. (cv)	Tubulação		Diâmetro rotor (mm)	AMT max. (mca)	Altura Manométrica Total em metros de Coluna de Água (mca) Não estão incluídas as perdas por atrito										
Monofásico	Trifásico		Sucção (bsp)	Elevação (bsp)			6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
110V/220V	220V/380V	3	2½"	2"	120,0	24	Vazão (m³/h)										
CAM-W19	CAM-W19						40,5	38,6	36,5	33,9	31,4	29,4	26,5	23,1	18,2		
CAM-W21	CAM-W21						36,2	34,0	31,5	28,7	26,1	23,2	18,5	13,1			
		2			113,0	21											
		3			125,0	26				34,3	31,9	29,2	26,1	22,5	18,6		

IMPORTANTE: Não utilizar as bombas em alturas inferiores àquelas limitadas pela linha demarcativa, sob o risco de sobrecarga no motor elétrico, ocasionando a perda da GARANTIA.