



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

DISSERTAÇÃO

**Desenvolvimento e avaliação de um sistema automático de controle
da pressão em ensaios de caracterização de aspersores rotativos**

Mateus Gomes Corrêa de Melo

**Seropédica - RJ
2023**



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

**Desenvolvimento e avaliação de um sistema automático de controle
da pressão em ensaios de caracterização de aspersores rotativos**

Mateus Gomes Corrêa De Melo

Sob a orientação do Professor
Marinaldo Ferreira Pinto

Dissertação submetida como requisito
parcial para obtenção do grau de
**Mestre em Engenharia Agrícola e
Ambiental**, no curso de Pós-Graduação
em Engenharia Agrícola e Ambiental,
Área de Concentração: Sistemas
Agrícolas

**Seropédica - RJ
2023**

“É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte”

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M528d Melo, Mateus Gomes Corrêa de, 1995-
Desenvolvimento e avaliação de um sistema
automático de controle da pressão em ensaios de
caracterização de aspersores rotativos / Mateus Gomes
Corrêa de Melo. - Barra Mansa, 2023.
50 f.: il.

Orientador: Marinaldo Ferreira Pinto.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
e Ambiental, 2023.

1. Engenharia de irrigação. 2. Aspersão. 3.
Controle de processos. 4. Controlador PI. I. Pinto,
Marinaldo Ferreira, 1984-, orient. II Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola e Ambiental III. Título.

“O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de
Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001”

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

MATEUS GOMES CORRÊA DE MELO

Dissertação submetida como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, área de Concentração em Sistemas Agrícolas.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 28/02/2023

Membros da Banca:

Dr. Marinaldo Ferreira Pinto (Orientador/Presidente da Banca)

Dr. Leonardo Duarte Batista da Silva

Dr. Hermes Soares da Rocha



Emitido em 03/05/2023

HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 30/2023 - IT (12.28.01.27)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 03/05/2023 09:46)

LEONARDO DUARTE BATISTA DA SILVA

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)

Matrícula: ###531#1

(Assinado digitalmente em 03/05/2023 13:18)

MARINALDO FERREIRA PINTO

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

CoordCGEAA (12.28.01.00.00.00.35)

Matrícula: ###324#4

(Assinado digitalmente em 03/05/2023 09:34)

HERMES SOARES DA ROCHA

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.436-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: **30**, ano: **2023**, tipo:
HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, data de emissão: **03/05/2023** e o código de
verificação: **db06e51b7f**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Robson e Elane, em retribuição a todo amor, carinho, ensinamentos e apoio que recebi durante minha caminhada. A eles serei eternamente grato, pois por diversas vezes abriram mão dos seus sonhos para que os meus pudessem se tornar realidade. A vocês dedico todos os meus esforços e conquistas.

À minha noiva, Rafaela, por todo amor, carinho, apoio e companheirismo, pois mesmo acompanhando de longe, por diversas vezes estive ao meu lado me dando forças para que eu me mantivesse firme nesse desafio. A ela, dedico essa conquista, e espero dedicar muitas outras que virão ao longo de nossa caminhada juntos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me guiado nessa jornada e por ter me dado forças e sabedoria para superar os obstáculos e as adversidades.

A minha família, amigos e a minha noiva, pela ajuda, incentivo, paciência e apoio que tiveram comigo.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental (PGEAAMB) pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Marinaldo Ferreira Pinto por ter acreditado em meu potencial, me orientando e contribuindo para o meu desenvolvimento profissional e pessoal. Por meio de sua simplicidade, profissionalismo, e amor a sua profissão de educador, proveu todos os meios de ajuda para a realização deste trabalho.

Ao meu amigo Engenheiro Eletricista David Henrique Martins, pela amizade e por diversas vezes me ajudar a sanar dúvidas e problemas que apareceram ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A todos os colegas e amigos que direta ou indiretamente contribuíram profissionalmente ou com uma convivência harmoniosa.

EPÍGRAFE

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda.”

Paulo Freire

“Se você puder chegar através da neve, da tempestade e da chuva, saberá que poderá chegar quando brilhar o sol e tudo estará bem.”

Malcolm X

RESUMO

MELO, Mateus Gomes Corrêa de. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema automático de controle da pressão em ensaios de caracterização de aspersores rotativos**. 2023. 50p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental, Sistemas Agrícolas). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

Ensaaios de caracterização de materiais de irrigação são essenciais para o correto dimensionamento de novos sistemas, melhorias de sistemas em operação e o desenvolvimento de novos produtos. Esses ensaios são realizados em laboratórios específicos e necessitam da supervisão de profissionais qualificados e treinados, além de demandar tempo e capital para serem realizados. O emprego de sistemas automáticos para realização desses ensaios é uma forma de reduzir custos, otimizar o tempo gasto para realização dos mesmos e agregar qualidade aos resultados obtidos por eles. Nesse sentido, a presente pesquisa teve como objetivo desenvolver, implementar e avaliar um sistema de controle automático da pressão em ensaios para determinação da curva vazão versus pressão de aspersores rotativos. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Automação e Controle de Sistemas Agrícolas e no Laboratório de Hidráulica e Irrigação, situados no Departamento de Engenharia do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), no município de Seropédica/RJ. O sistema proposto foi desenvolvido por meio da plataforma de prototipagem arduino (Mega), utilizando como técnica de controle as ações do controlador PI (Proporcional-Integrativo). Um transdutor realizava as tomadas de pressão no tubo de subida do aspersor e enviava essas informações para o arduino, que por meio de um algoritmo previamente programado, realizava o controle da pressão, de modo a fazer com que essa variável atingisse os valores de setpoint desejados e se mantivesse estabilizada durante a execução dos ensaios. Avaliou-se outros modos de controle da pressão, utilizando o controlador PI do inversor de frequência e o controle manual por meio de potenciômetro, e por meio da interface (IHM) do inversor de frequência. Foram avaliados os coeficientes de variação e o desvio (erro), a integral do erro absoluto (IEA), integral do erro quadrático (IEQ) e a integral do erro ponderado pelo tempo (IEAT), o tempo de subida (t_r) e o tempo de assentamento (t_s). Os resultados expressos pelos índices de desempenho baseados na integral do erro mostram que o controlador PI do arduino (bocais 4,0 x 2,8 mm) obteve melhor desempenho para IEA, IEQ e IEAT, 20 mca, enquanto o PI do inversor de frequência obteve melhor desempenho apenas para IEQ, 40 mca. O controlador PI arduino (bocais 6,4 x 3,2 mm) apresentou melhor desempenho para IEA, IEQ e IEAT para as três pressões ensaiadas, exceto para o índice IEA, 40 mca, onde não houve diferença entre os controladores. Para os índices t_r e t_s , o controlador PI do inversor de frequência (bocais 4,0 x 2,8 mm) obteve melhor desempenho para 30 e 40 mca. Os coeficientes de variação registrados em todas as modalidades de ensaio foram aceitáveis, com variações inferiores a 4%. O controlador PI do arduino apresentou os menores valores de desvio, enquanto o controle manual com inversor de frequência (4,0 x 2,8 mm) e o PI do inversor de frequência (6,4 x 3,2 mm) registraram os maiores desvios. Conclui-se que o controlador PI do arduino obteve melhor desempenho frente às demais modalidades de ensaio, sendo o método de controle da pressão mais indicado para determinação da curva vazão versus pressão de aspersores rotativos. O controlador PI do inversor de frequência e o controle manual com inversor de frequência não apresentam resultados compatíveis com o controlador PI.

Palavras-chave: Engenharia de irrigação, aspersão, controle de processos, controlador PI.

ABSTRACT

MELO, Mateus Gomes Correa de. **Development and evaluation of an automatic pressure control system in characterization tests for rotary sprinklers**. 2023. 50p. Dissertation (Master in Agricultural and Environmental Engineering, Agricultural Systems). Institute of Technology, Department of Engineering, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

Irrigation materials characterization tests are essential for the correct design of new systems, improvements of systems in operation and the development of new products. These tests are carried out in specific laboratories and require the supervision of qualified and trained professionals, in addition to demanding time and capital to be carried out. The use of automatic systems to carry out these tests is a way to reduce costs, optimize the time spent to carry them out and add quality to the results obtained by them. In this sense, the present research aimed to develop, implement and evaluate an automatic pressure control system in tests to determine the flow versus pressure curve of rotary sprinklers. The work was carried out at the Laboratory of Automation and Control of Agricultural Systems and at the Laboratory of Hydraulics and Irrigation, located in the Engineering Department of the Institute of Technology of the Federal Rural University of Rio de Janeiro (UFRRJ), in the municipality of Seropédica/RJ. The proposed system was developed using the Arduino prototyping platform (Mega), using the actions of the PI controller (Proportional-Integrative) as a control technique. A transducer performed the pressure measurements in the sprinkler riser pipe and sent this information to the arduino, which, through a previously programmed algorithm, controlled the pressure, in order to make this variable reach the desired setpoint values and remained stabilized during the execution of the tests. Other modes of pressure control were evaluated, using the PI controller of the frequency inverter and manual control through a potentiometer, and through the interface (HMI) of the frequency inverter. The coefficients of variation and the deviation (error), the integral of the absolute error (IEA), integral of the squared error (IEQ) and the integral of the weighted error by time (IEAT), the rise time (t_r) and the settling time (t_s). The results expressed by the performance indices based on the error integral show that the arduino PI controller (4.0 x 2.8 mm nozzles) obtained better performance for IEA, IEQ and IEAT, 20 mca, while the frequency inverter PI obtained better performance only for IEQ, 40 mca. The Arduino PI controller (nozzles 6.4 x 3.2 mm) showed better performance for IEA, IEQ and IEAT for the three tested pressures, except for the IEA index, 40 mca, where there was no difference between the controllers. For the t_r and t_s indices, the frequency inverter PI controller (4.0 x 2.8 mm nozzles) obtained the best performance for 30 and 40 mca. The coefficients of variation recorded in all test modalities were acceptable, with variations of less than 4%. The arduino PI controller showed the lowest deviation values, while the manual control with frequency inverter (4.0 x 2.8 mm) and the frequency inverter PI (6.4 x 3.2 mm) recorded the highest values. deviations. It is concluded that the Arduino PI controller performed better compared to the other test modalities, being the most suitable pressure control method for determining the flow versus pressure curve of rotary sprinklers. The frequency inverter PI controller and the manual control with frequency inverter do not show PI controller compatible results.

Keywords: Irrigation engineering, sprinkling, process control, PI controller.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Corte esquemático de um aspersor rotativo. Fonte: Pereira (2003).....	5
Figura 2. Diagrama de blocos para um sistema de controle em malha aberta. Fonte: Adaptado de Oliveira (1999).....	7
Figura 3. Diagrama de blocos para um sistema de controle em malha fechada. Adaptado de Oliveira (1999).....	8
Figura 4. Características da resposta transitória. Fonte: Ogata (2010).....	11
Figura 5. Bancada de ensaios para controle da pressão fornecida a aspersores rotativos. Fonte: Autor.....	13
Figura 6. Acionamento do inversor de frequência CFW-10 via potenciômetro eletrônico. Fonte: Adaptado do manual do usuário CFW-10.....	14
Figura 7. Acionamento do inversor de frequência CFW-10 via teclas da HMI. Fonte: Manual do usuário CFW-10.....	15
Figura 8. Acionamento do inversor de frequência CFW-10 via sinal PWM emitido por hardware de controle externo. Fonte: Autor.....	15
Figura 9. Bomba de aferição utilizada para determinação da curva de calibração do transdutor de pressão. Fonte: Autor.....	16
Figura 10. Curva de calibração do transdutor de pressão utilizado para determinação da curva vazão-pressão em ensaios de caracterização de aspersores rotativos. Fonte: Autor.....	17
Figura 11. Esquema elétrico para determinação da curva de calibração do transdutor de pressão. Fonte: Adaptada do manual ZURICH - PSI.420 (2018).....	17
Figura 12. Medidor de energia utilizado para monitoramento dos parâmetros da rede elétrica. Fonte: Manual do usuário SM-3W lite.....	19
Figura 13. Aplicação do inversor de frequência com a função de controle PID. Fonte: Manual do usuário CFW-10.....	20
Figura 14. Oscilação sustentada em resposta a ação proporcional para a pressão de ensaio de 20 mca e bocal de 2,8 x 4,0 mm.....	23
Figura 15. Fluxograma da programação utilizada para implementação do controlador PI. Fonte: Autor.....	24
Figura 16. Resposta transitória dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência para o bocal 4,0 x 2,8 mm.....	29
Figura 17. Resposta transitória dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência para o bocal 6,4 x 3,2 mm.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Método de sintonia de Ziegler-Nichols em malha aberta.....	10
Tabela 2 – Método de sintonia de Ziegler-Nichols em malha fechada.....	10
Tabela 3 - Vazões equivalentes para cada combinação de bocais utilizada, sob diferentes pressões.....	18
Tabela 4 - Parâmetros da rede elétrica que podem ser monitorados pelo medidor de energia trifásico SM-3W lite.....	19
Tabela 5 - Parâmetros de ajuste do inversor de frequência para utilização do controlador PI.	21
Tabela 6 - Valores de setpoint utilizados no parâmetro P525.....	22
Tabela 7 - Parâmetros de ajuste do inversor de frequência para operar via sinal PWM.....	22
Tabela 8 - Ganhos utilizados para o controlador PI do inversor de frequência para os bocais de 4,0 x 2,8 mm e 6,4 x 3,2 mm.....	23
Tabela 9 - Ganhos utilizados para o controlador PI do arduino para os bocais 4,0 x 2,8 mm e 6,4 x 3,2 mm.....	23
Tabela 10 – Quantidade de dados utilizados para realização da análise estatística.....	25
Tabela 11 – Coeficiente de variação da tensão da rede elétrica para as quatro modalidades de ensaio e para as duas combinações de bocais utilizadas.....	27
Tabela 12 – Índices de desempenho dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência para os bocais 4,0 x 2,8 mm.....	28
Tabela 13 – Índices de desempenho dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência para os bocais 6,4 x 3,2 mm.....	28
Tabela 14 – Índices de desempenho baseados na resposta transitória dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência, para os bocais 4,0 x 2,8 mm.....	30
Tabela 15 – Índices de desempenho baseados na resposta transitória dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência, para os bocais 6,4 x 3,2 mm.....	30
Tabela 16 – Resultado dos coeficientes de variação e desvio, para os bocais 4,0 x 2,8 mm....	31
Tabela 17 - Resultado dos coeficientes de variação e desvio, para os bocais 6,4 x 3,2 mm.....	31

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Irrigação.....	3
2.1.1. Métodos de irrigação.....	3
2.1.2. Irrigação por aspersão.....	4
2.1.3. Aspersores rotativos.....	5
2.1.4. Ensaios de caracterização de aspersores.....	6
2.2. Automação de Ensaios de Caracterização de Materiais de Irrigação.....	6
2.3. Sistemas de controle.....	7
2.4. Controlador PID.....	8
2.4.1. Sintonia do controlador PID.....	9
2.4.2. Método de sintonia de Ziegler-Nichols.....	9
2.4.3. Desempenho do controlador PID.....	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
3.1. Bancada de ensaio e sistema automático de controle da pressão.....	13
3.2. Inversor de frequência.....	14
3.3. Sistema automático de controle da pressão.....	15
3.4. Calibração e caracterização dos instrumentos de medição.....	16
3.5. Ensaios de controle da pressão na determinação da curva vazão versus pressão do aspersor.....	18
3.5.1. Ensaios com controle manual por potenciômetro.....	19
3.5.2. Ensaios com controle manual pela HMI do inversor de frequência.....	20
3.5.3. Ensaios com controlador PI do inversor de frequência.....	20
3.5.4. Ensaios com controlador PI projetado no arduino.....	22
3.6. Sintonia dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência.....	22
3.7. Lógica de controle PI arduino.....	24
3.8. Determinação do desempenho dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência.....	25
3.9. Análise estatística.....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1. Avaliação das variações de tensão da rede elétrica.....	27
4.2. Avaliação do desempenho dos controladores PI.....	27
4.3. Avaliação dos modos de controle na estabilidade da pressão e no erro.....	31
5 CONCLUSÕES.....	34
REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

Uma das atividades mais antigas desenvolvidas pelo ser humano ao longo da história, é a agricultura. Atualmente ela é responsável por produzir alimentos para abastecer, diariamente, uma população de mais de 8 bilhões de pessoas em todo o mundo. Dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), indicam que até 2030 a produção mundial de cereais deverá aumentar em cerca de 1 bilhão de toneladas, a fim de suprir o crescimento populacional e atender as demandas por alimentos (OLIVEIRA, 2018). Nesse cenário, a utilização da irrigação se torna indispensável, pois permitirá um aumento da produção agrícola, principalmente em regiões onde há irregularidade do período de chuvas e escassez de água (TESTEZLAF, 2017; MANTOVANI et al., 2009).

A irrigação por aspersão é o método de irrigação mais utilizado no Brasil, representando 48% da área total irrigada (IBGE, 2017). Tal crescimento está atrelado a algumas características proporcionadas por esse método, como, adaptação a diferentes condições de solo, topografia e cultura, a possibilidade da aplicação de fertilizantes juntamente à água da irrigação, e pode conduzir ao uso mais racional da água de irrigação, pois permite o controle da quantidade de água a ser aplicada (PEREIRA, 2003).

De acordo com Pizarro (1996), informações referentes aos emissores e ao seu regime de fluxo são obtidas por meio do coeficiente de variação de fabricação (CVF) e da curva vazão versus pressão. Ainda, para o mesmo autor, o mercado apresenta grande variedade de emissores, onde muitos deles são importados e colocados diretamente à disposição do consumidor, apresentando pouca ou nenhuma informação sobre suas características hidráulicas. Dessa forma, para que os sistemas de irrigação consigam dispor de ótima eficácia na irrigação, a seleção dos equipamentos de irrigação deve ser criteriosa, considerando suas especificações, informações sobre constantes construtivas, e indicadores de desempenho, os quais são objetivo principal dos ensaios de equipamentos de irrigação (LIMA et al., 2003; OLIVEIRA et al., 2010).

A caracterização dos equipamentos de irrigação, por meio da realização de ensaios laboratoriais é fundamental, pois permitirá o aperfeiçoamento de equipamentos e sistemas existentes e o desenvolvimento de novos produtos. Os ensaios de caracterização de aspersores rotativos são convencionalmente realizados de forma manual, exigindo a supervisão de técnicos qualificados e treinados, e demandando tempo e capital para serem realizados. Outro ponto relevante diz respeito aos recorrentes problemas inerentes às instabilidades nas condições de ensaio, como por exemplo, a instabilidade da pressão fornecida aos aspersores. Esse problema afeta, de forma direta, a qualidade dos resultados obtidos nos ensaios, ocasionando imprecisão e/ou erros nos dados gerados (ROCHA, 2016).

Para execução de tarefas dessa natureza, o emprego de sistemas automatizados de controle devidamente projetados e validados, proporcionam não somente estabilidade das condições de ensaio e redução de falhas humanas, como também otimização do tempo de operação, agregando qualidade aos resultados gerados pelos ensaios. A eficiência proporcionada pelos sistemas de controle, em especial o controlador PID, têm demonstrado a importância da utilização dessa técnica de controle para melhoria dos ensaios realizados em bancadas de ensaio, bem como na obtenção dos dados coletados e no controle das variáveis de processo (SARETTA, 2016; ROCHA, 2016; PINTO, 2013; BOMBARDELLI et al., 2017).

O controlador PID emprega uma das técnicas de controle mais utilizadas no setor industrial. De acordo com Åström e Hägglund (2001), mais de 90% de todas as malhas existentes são do tipo PI/PID, atingindo uma larga faixa de aplicações. O sucesso alcançado pelo controlador PID se deve à simplicidade no ajuste dos parâmetros e aplicabilidade na

maioria dos sistemas de controle, em especial quando não se conhece o modelo matemático da planta e não se pode utilizar os métodos analíticos de projeto (OGATA, 2010).

A hipótese deste estudo é que as instabilidades da rede elétrica provocam incertezas nos dados dos ensaios de caracterização de aspersores rotativos, em especial no ensaio da determinação da curva vazão-pressão, afetando os resultados gerados por esse ensaio.

Os objetivos da pesquisa foram desenvolver, implementar e avaliar o desempenho de um sistema automático de controle da pressão aplicado a ensaios para determinação da curva vazão versus pressão de aspersores rotativos, utilizando o controlador PI, e avaliar o desempenho do controlador PI do inversor de frequência e modos de controle manual, por meio de potenciômetro e da interface HMI do inversor de frequência.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Irrigação

A irrigação é um conjunto de técnicas utilizadas na agricultura que visa fornecer, de forma controlada, água para as plantas em quantidades e momentos certos, proporcionando aumento da produtividade e continuidade das culturas (BARRETO; FREITAS; OLIVEIRA, 2009). A irrigação é de fundamental importância, pois proporcionará aumento de produtividade das áreas cultivadas, principalmente em regiões onde há escassez de água e/ou irregularidade do período de chuvas.

Historicamente, a agricultura irrigada já era uma prática utilizada pelas grandes civilizações que se instalaram às margens dos grandes rios, como o Nilo (Egito), Tigre e Eufrates (Mesopotâmia), Amarelo ou Huang (China) e Hindus (Índia) (TESTEZLAF, 2017). Isso proporcionou a subsistência e continuidade dessas civilizações, uma vez que a água captada nesses rios era utilizada para consumo próprio, criação de animais, e para a irrigação das plantações.

A agricultura irrigada no Brasil teve início na década de 1900 nas lavouras de arroz do Rio Grande do Sul. A partir das décadas de 1970 e 1980 houve uma intensificação dessa atividade em outras regiões do país. Fatores como o crescimento agrícola em regiões com climas desfavoráveis e escassez de água, iniciativas governamentais de desenvolvimento regional e a disponibilidade de financiamentos, tendo em vista a observação dos benefícios práticos atingidos pela irrigação (ANA, 2017), contribuíram para a intensificação e difusão dessa atividade.

O Brasil está entre os dez países com maior área equipada para irrigação do mundo, com 8,2 milhões de hectares (ANA, 2021). Os países líderes em irrigação, de forma geral, se aproximam da utilização total do seu potencial estimado, contudo, a irrigação no Brasil é tida como pequena diante das disponibilidades do país, como extensão territorial, fatores físico-climáticos favoráveis e elevada disponibilidade hídrica (ANA, 2017).

O crescimento da agricultura irrigada no Brasil gera preocupação a respeito da utilização dos recursos hídricos, uma vez que o aumento dessa atividade também gera o aumento do uso de água, seja pelo crescimento populacional, gerando maior necessidade de produção de alimentos, seja pelo aumento de terras favoráveis ao uso dessa técnica (CHRISTOFIDIS, 2002). Logo, uma vez que há tendência do aumento da demanda de água, mas não há estimativa para o aumento de água doce no planeta (COELHO, FILHO e OLIVEIRA, 2005), se faz necessária a busca por uma irrigação que seja verdadeiramente sustentável.

Existem propostas de alternativas que buscam o desenvolvimento sustentável da irrigação, como a substituição de sistemas de irrigação com baixa eficiência por métodos e/ou sistemas de irrigação aplicados às culturas com maior valor agregado e atrelados à otimização do uso de energia e o uso racional de água (CHRISTOFIDIS, 2013).

2.1.1. Métodos de irrigação

Métodos de irrigação se referem ao modo de aplicação da água nas culturas, podendo ser divididos em quatro principais métodos (TESTEZLAF, 2017): superfície, subterrânea, aspersão e localizada. Ressalta-se que para cada um dos métodos citados, existem diferentes

sistemas, e de acordo com Testezlaf (2017), os métodos de irrigação podem ser caracterizados como:

Irrigação por superfície: a água é aplicada diretamente sobre a superfície do solo, se movimentando e infiltrando no mesmo por meio da gravidade. Podem ser aplicados por meio de sulcos, faixas e inundação, podendo esta ser contínua ou intermitente. Nesse método, de modo a proporcionar melhor escoamento da água, é necessário que o solo disponha de textura e declividade adequados.

Irrigação localizada: é feita a aplicação da água sobre o solo somente em uma área restrita, visando umedecer apenas a parte do solo utilizado pelo sistema radicular da planta. Comparados aos outros sistemas de irrigação, esse método utiliza pequenas vazões de água, devido à utilização de emissores com diâmetro reduzido e submetido a baixas pressões. Os sistemas de irrigação localizada podem ser classificados como:

- **Sistema por gotejamento:** a aplicação da água no solo se dá por meio de gotas sob baixa vazão, por meio da utilização de gotejadores.
- **Sistemas de microaspersão:** esse sistema possui área e vazão de aplicação superior ao sistema por gotejamento. A água é aplicada sobre a forma de jatos ou aerossol, por meio da utilização de microaspersores.

Irrigação por aspersão: nesse método, a água é aplicada no solo e nas culturas por meio de gotas, criando o efeito de uma chuva artificial. O dispositivo responsável pela criação dessas gotas é denominado aspersor. Os sistemas de irrigação por aspersão podem ser divididos em:

- **Sistemas convencionais:** podem ser móveis ou fixos, e são compostos por componentes convencionais de aspersão, como conjunto motobombas, tubulações e acessórios, além dos aspersores.
- **Sistemas mecanizados:** são sistemas automatizados, nos quais os aspersores são instalados em estruturas metálicas que se movimentam pela área a ser irrigada. Os equipamentos com deslocamentos radial (ou pivô central) e linear (rolamento lateral ou linear móvel) e o carretel enrolador (aspersor autopropelido), enquadram-se nos sistemas mecanizados.

2.1.2. Irrigação por aspersão

A irrigação por aspersão teve sua origem como alternativa ao método de irrigação por superfície, pois devido à percolação e ao escoamento superficial, geravam baixa eficiência para esse método (ALENCAR et al., 2007). De acordo com o censo agropecuário de 2017 (IBGE, 2017), a irrigação por aspersão representa 48% da área total irrigada, sendo o método de irrigação mais utilizado no Brasil. Tal crescimento está atrelado há algumas características proporcionadas por esse método, como adaptação a diferentes condições de solo, topografia e cultura, permite a possibilidade da aplicação de fertilizantes juntamente com a água da irrigação, e pode conduzir ao uso mais racional da água de irrigação, pois permite o controle da quantidade de água a ser aplicada (PEREIRA, 2003).

Outro importante fator que contribuiu para o aumento da utilização dessa técnica de irrigação foram os avanços tecnológicos nas indústrias de fabricação de tubulações, no início do século XX, através da utilização de materiais plásticos, como o policloreto de vinila (PVC) e o polietileno, estimulando, dessa forma, esse método de irrigação em diversos tipos de culturas e por agricultores com diferentes tipos de aquisição financeira (TESTEZLAF, 2017).

Os principais componentes de um sistema de irrigação por aspersão convencional são o sistema de bombeamento, responsável por fornecer a energia necessária para que o transporte da água aconteça; as tubulações, por meio das quais a água será transportada; e os aspersores, responsáveis pela distribuição da água no solo.

2.1.3. Aspersores rotativos

Os aspersores são responsáveis pelo fracionamento e distribuição do jato de água sobre o terreno (MANTOVANI et al., 2009), sendo peças fundamentais para os sistemas de irrigação por aspersão. Em operação, o jato de água depois de passar pelo bocal é lançado em alta velocidade para o ar, dividindo-se em gotas devido ao atrito entre o fluxo de água e o ar, fazendo com que haja uma precipitação sobre o solo, simulando uma chuva. A Figura 1 apresenta o corte esquemático de um aspersor rotativo.

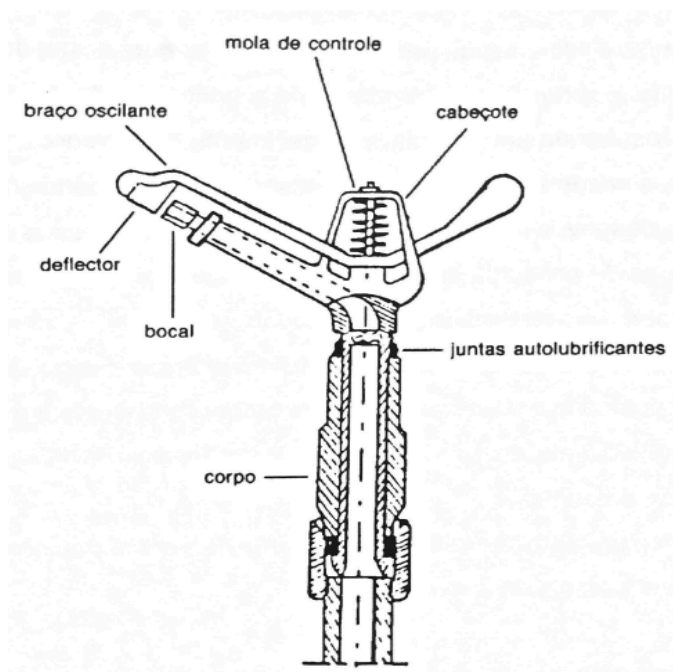


Figura 1. Corte esquemático de um aspersor rotativo. Fonte: Pereira (2003)

De acordo com Testezlaf (2017), alguns critérios podem ser utilizados para realizar a classificação de um aspersor, entre eles: alcance do jato, pressão de serviço, movimentação do jato, tamanho das gotas, ângulo de lançamento do jato de água, entre outros. Porém, o mesmo autor salienta que um dos principais critérios para a classificação de aspersores é o tipo de mecanismo responsável pela movimentação e fragmentação do jato de água do aspersor, sendo classificados como: estacionário (fixo) ou rotativo.

De acordo com Bernardo et al. (2009), os aspersores rotativos podem ser de giro completo ou setorial, sendo este último usado apenas em áreas mais afastadas do campo, ou

sob condições específicas. Em relação ao tipo de rotação, o mesmo autor destaca que existem aspersores com a rotação oriunda da reação do jato de saída, e aqueles com rotação causada pelo impacto do braço oscilante, sendo acionado pela ação do jato de água atuante sobre o deflector desse braço. O primeiro tipo de aspersor é normalmente utilizado em sistemas de irrigação de jardins, pois dispõe de um menor diâmetro molhado e apresenta maior velocidade de rotação, enquanto que o segundo tipo de aspersor possui forte aplicação na irrigação de diversas culturas.

2.1.4. Ensaios de caracterização de aspersores

Para que os sistemas de irrigação consigam suprir as demandas hídricas exigidas pelas culturas de forma otimizada, é preciso dispor de equipamentos que garantam a eficiência desses sistemas. A caracterização de equipamentos de irrigação por meio de ensaios laboratoriais é de extrema importância para que tal objetivo seja alcançado. Além disso, é possível o desenvolvimento de novos produtos e o aprimoramento de produtos, processos e sistemas já existentes, além do fornecimento de uma sólida base de dados para o correto dimensionamento dos sistemas de irrigação.

Com os avanços tecnológicos, as tomadas de decisões estão cada vez mais dependentes de informações, dados e características sobre os equipamentos (LIMA et al., 2003). Essas informações servem de base para a escolha de equipamentos que melhor atendam às necessidades na identificação de falhas e também auxiliam na busca para correção das mesmas. Com a crescente modernização do mercado de irrigação, a busca por laboratórios especializados na caracterização de equipamentos de irrigação, bem como a de aspersores, tende a crescer. Os principais ensaios realizados na caracterização de aspersores são: perfil de distribuição de água, coeficiente de variação de fabricação e curva vazão versus pressão.

O ensaio para determinação da curva vazão versus pressão é executado seguindo as referências normativas da NBR ISO 7749 (2005). Esse ensaio tem por finalidade a determinação das vazões obtidas para cada pressão de ensaio e combinação de bocais (FRIZZONE, 2003). Os resultados gerados por esse ensaio fornecerão informações como: (a) estimativa da intensidade de precipitação; (b) tempo de operação do sistema de irrigação; e (c) determinação prévia para possibilidade de escoamento superficial. Esses dados servirão de base para que engenheiros e projetistas possam dimensionar sistemas mais eficazes e que supram, de forma correta, as demandas hídricas exigidas pelas culturas.

2.2. Automação de Ensaios de Caracterização de Materiais de Irrigação

Os ensaios de caracterização de equipamentos de irrigação demandam grande tempo e esforços para serem realizados, além de exigirem o acompanhamento de técnicos treinados para sua realização. Tais necessidades podem levar ao aumento de gastos para realização desses ensaios, e por se tratar de tarefas repetitivas, estão sujeitos a erros inerentes aos operadores. A automação aplicada a bancadas de ensaio de caracterização de equipamentos de irrigação tem por objetivo promover maior estabilidade das condições de ensaio, redução de falhas e erros humanos e, consequentemente, proporcionar resultados mais precisos e confiáveis (BOMBARDELLI et al., 2017). É importante ressaltar que a automação de ensaios na área permanece em constante melhoria (RICARDO et al., 2020), e vários trabalhos têm demonstrado a sua importância (QUEIROZ et al., 2008; ROCHA, 2016; SARETTA, 2016).

Queiroz et al. (2008) desenvolveram um coletor automático para obtenção do perfil de distribuição de aspersores rotativos em laboratório, com base em transdutores de pressão. Os

resultados obtidos pela pesquisa mostraram que os coletores desenvolvidos possuem plena capacidade para realizar os ensaios especificados, pois satisfazem as condições de volume coletado, e são facilmente implementados a uma automação economicamente viável.

Rocha (2016) desenvolveu um projeto cujo objetivo da pesquisa foi a avaliação de técnicas e ferramentas de controle estatístico da qualidade, aplicado a bancadas de ensaios de emissores de microirrigação. Os resultados alcançados pela pesquisa indicaram que melhorias no ajuste da pressão foram alcançados através da utilização de um sistema de controle, permitindo com que a pressão se mantivesse estável, independentemente das variações do sistema, agregando qualidade e confiabilidade ao produto final.

Saretta (2016) desenvolveu um sistema automatizado para ensaios radiais de aspersores, e realizou as análises de incerteza de medição. Utilizando um sistema automático de controle aplicado ao sistema de pressurização, tal autor concluiu que o sistema proposto possibilitou a obtenção de curvas de distribuição semelhantes ao sistema convencional e a otimização do tempo de realização dos ensaios.

2.3. Sistemas de controle

Um sistema de controle define-se pela interconexão de componentes que, juntos, formam uma configuração de modo a produzir uma resposta desejada para o sistema (DORF & BISHOP, 2001). A variável que se pretende controlar é denominada variável controlada, e a variável que será modificada pelo controlador, de modo a obter a saída desejada, é denominada variável de controle (OGATA, 2010).

Sistemas de controle visam manter a variável de processo estabilizada no valor de referência (“*setpoint*”) desejado, realizando correções em função do erro existente entre o valor de referência e o real valor assumido por essa variável (BEGA et al., 2006). É importante ressaltar que os sistemas de controle realizam esse processo de forma automática, sem a necessidade da intervenção de um operador. Os sistemas de controle são classificados em duas categorias: a) sistemas de controle em malha aberta; b) sistemas de controle em malha fechada (OGATA, 2010).

Sistemas de controle em malha aberta (sem realimentação): são aqueles em que as ações de controle não dependem do sinal de saída, ou seja, o sinal obtido na saída do sistema não é medido, e também não é utilizado para realimentar o sistema, de forma que não há comparação com o sinal de entrada. A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos para um sistema de controle em malha aberta.

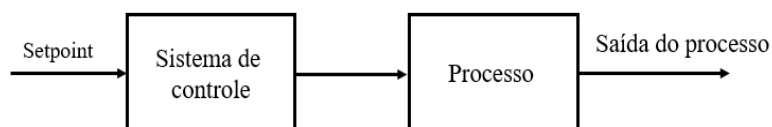


Figura 2. Diagrama de blocos para um sistema de controle em malha aberta. Fonte: Adaptado de Oliveira (1999).

Sistemas de controle em malha fechada (com realimentação): são aqueles em que as ações de controle são dependentes da saída. O controlador é realimentado com o sinal do erro, denominado erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de saída do

sistema, onde essa diferença deverá ser compensada pelo controlador. A Figura 3 apresenta o diagrama de blocos para um sistema de controle em malha fechada.

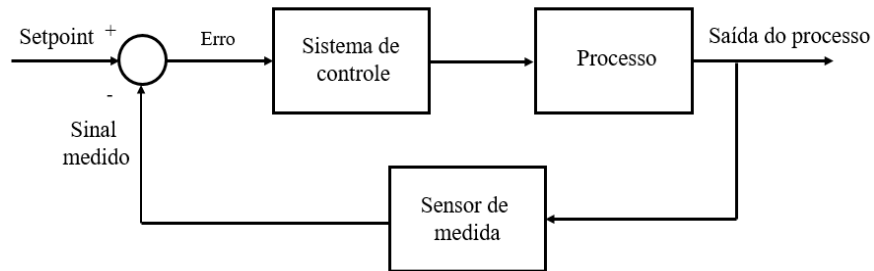


Figura 3. Diagrama de blocos para um sistema de controle em malha fechada. Adaptado de Oliveira (1999).

2.4. Controlador PID

De acordo com Bequette (2003), existe uma gama de controladores de processos que utilizam diferentes técnicas de controle, como por exemplo: Lógica Fuzzy (lógica nebulosa), Preditivo, Controle Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID), entre outros. O controlador PID é uma técnica de controle de processos, amplamente utilizada na indústria e recebe esse nome por utilizar as ações proporcional, integrativa e derivativa. A popularidade dessa técnica de controle está associado, principalmente, com a sua aplicabilidade na maioria dos sistemas, em especial, quando não se conhece o modelo matemático da planta, fazendo com que métodos de projetos analíticos não possam ser utilizados (OGATA, 2010).

Ação de controle proporcional (P): esse tipo de controle gera um sinal de saída $u(t)$ que age de forma proporcional ao sinal do erro atuante $e(t)$ do sistema, sendo K_p a constante de proporcionalidade (OGATA, 2010), conforme a Equação 1.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

em que:

$u(t)$ = saída do controlador

K_p = ganho proporcional

$e(t)$ = erro atuante

É importante ressaltar que a aplicação do controle proporcional puro possui como característica a presença de um erro residual permanente (“*offset*”). Esse erro pode ser minimizado com o aumento do ganho proporcional (K_p), porém, o aumento exagerado desse ganho produz oscilações na variável controlada, o que pode causar instabilidade para o processo (PIRES, 2014).

Ação de controle proporcional-integral (PI): a ação gerada pelo modo integral possui a função de realizar a integração do sinal de erro no tempo, de acordo com a Equação 2. A utilização dessa ação possibilita que o erro em regime permanente seja eliminado (OGATA, 2010).

$$u(t) = K_p e_{(t)} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e_{(t)} dt \quad (2)$$

em que:

Ti = tempo integrativo

De acordo com Pires (2014), o controlador PI possui a vantagem do aumento da velocidade de resposta do sistema, proveniente da ação integral, e não possui o *offset* relacionado à aplicação do controle proporcional puro, dessa forma, é o modo de controle mais utilizado em controle de processos. Bega et al. (2006) destaca que o controlador PI é mais utilizado em sistemas de controle de pressão, vazão, nível e variáveis que não apresentam atrasos relativamente grandes.

Ação de controle proporcional-integral-derivativo: esse modo de controle agrega as vantagens individuais obtidas por cada ação de controle, de acordo com a Equação 3. A ação do controle derivativo é adicionada para trazer estabilidade dinâmica ao controle, uma vez que essa ação é capaz de antever o comportamento do processo (ALTMANN, 2005).

$$u(t) = K_p e_{(t)} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e_{(t)} dt + K_p T_d \frac{de_{(t)}}{dt} \quad (3)$$

em que:

Td = tempo derivativo

2.4.1. Sintonia do controlador PID

O processo de determinação dos parâmetros do controlador PID, de forma a atender as especificações de desempenho, é conhecido como sintonia do controlador (OGATA, 2010). Para o mesmo autor, esse processo visa determinar os valores para o ganho proporcional (Kp), tempo integrativo (Ti) e tempo derivativo (Td), de modo a atender as especificações de projeto e proporcionar estabilidade para o sistema.

2.4.2. Método de sintonia de Ziegler-Nichols

Segundo Dorf e Bishop (2001), o método de sintonia de Zeigler-Nichols é um método analítico usado para determinação dos ganhos do controlador PID. É um método extremamente útil quando os modelos matemáticos do sistema são desconhecidos. Ressalta-se que esse método também se aplica a projetos de sistemas cujos modelos matemáticos são conhecidos (OGATA, 2010). De acordo com o mesmo autor, existem dois métodos de sintonia de Zeigler-Nichols: a) sintonia em malha aberta; e b) sintonia em malha fechada. Esses modos de sintonia possuem as seguintes características:

Sintonia em Malha Aberta: de forma experimental, obtém-se a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário. Caso a curva resposta ao degrau unitário de entrada se assemelhe com um S, então esse método se aplica. A curva, com o aspecto de S, pode ser determinada

por duas principais constantes, a constante de tempo (T) e o atraso (L). Ambas constantes são determinadas a partir da inserção de uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva, e determinando o cruzamento no eixo dos tempos (t) e a linha $c(t) = K$. A Tabela 1 apresenta a regra de sintonia de Ziegler-Nichols para o primeiro método.

Tabela 1- Método de sintonia de Ziegler-Nichols em malha aberta.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: Ogata (2010)

Sintonia em Malha Fechada: primeiramente é definido $T_i = \infty$, $T_d = 0$. Posteriormente, utilizando somente a ação do controle proporcional (K_p), será aumentado de zero até um valor crítico (K_{cr}), onde a saída exibirá uma oscilação sustentada. Dessa forma, o ganho crítico (K_{cr}) e o período crítico (P_{cr}) correspondente são determinados. Caso a saída não apresente oscilação sustentada para qualquer valor de K_p , então esse método não se aplica. Assim, os valores dos parâmetros K_p , T_i e T_d sugeridos por esse método estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Método de sintonia de Ziegler-Nichols em malha fechada

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: Ogata (2010)

2.4.3. Desempenho do controlador PID

Segundo Dorf e Bishop (2001), o projetista de um sistema de controle pode especificar, de forma quantitativa, o desempenho do sistema, de modo a atestar se o mesmo está em conformidade com as especificações do projeto. Para os mesmos autores, medir quantitativamente o desempenho de um sistema de controle se torna útil para sua correta operação, otimização de parâmetros e para melhor eficiência dos sistemas de controle.

Uma das formas de avaliar o desempenho de um sistema de controle é por meio da análise gráfica da resposta transitória do sistema submetido a uma entrada em degrau unitário (OGATA, 2010), conforme apresentado pela Figura 4.

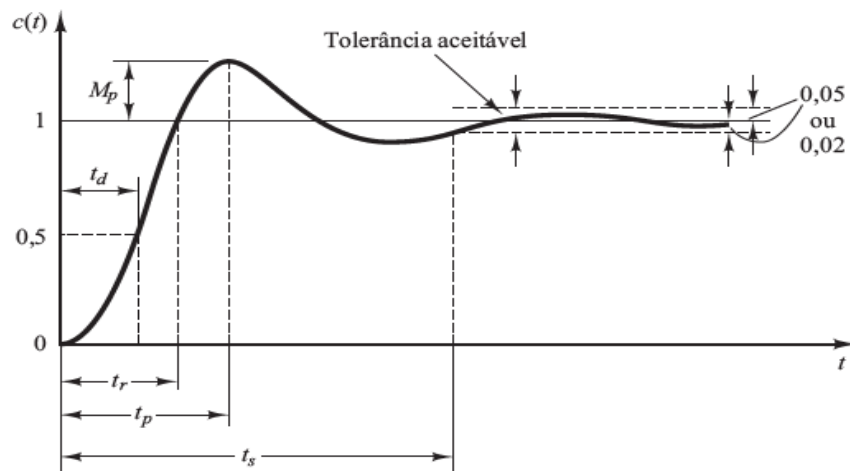


Figura 4. Características da resposta transitória. Fonte: Ogata (2010).

em que:

t_d = tempo de atraso

t_r = tempo de subida

t_p = tempo de pico

M_p = máximo sobressinal

t_s = tempo de acomodação

Pires (2014) ressalta que apenas a análise por meio da visualização gráfica da resposta do sistema e a comparação de simulações para avaliação do desempenho de controladores é algo subjetivo, pois analisam parâmetros isolados, de forma que, para alguns casos, há a necessidade de utilizar outros índices de desempenho. Os critérios de desempenho baseados na integral do erro são comumente utilizados, dada sua versatilidade, pois analisam todo o comportamento dinâmico do processo. As Equações 4, 5 e 6 apresentam os índices de desempenho baseados na integral do erro:

Integral do erro absoluto (IEA): um sistema baseado nesse critério de desempenho tende a ter uma resposta transitória satisfatória e bom amortecimento do sinal da variável de controle (ALT; LAGES, 2003).

$$IEA = \int_0^t |e(t)| dt \quad (4)$$

Integral do erro quadrático (IEQ): os sistemas que conseguem minimizar esse índice de desempenho apresentam respostas rápidas, porém oscilatórias, podendo levar o sistema a instabilidade. Isso ocorre pois esse índice penaliza erros grandes, que geralmente ocorrem no início do processo, enquanto que erros pequenos são pouco penalizados (ALT; LAGES, 2003).

$$IEQ = \int_0^t e^2(t) dt \quad (5)$$

Integral do erro ponderado pelo tempo (IEAT): sistemas que conseguem minimizar esse índice de desempenho tendem a possuir um *overshoot* (sobressinal) pequeno e oscilações bem

amortecidas. Isso ocorre porque um erro inicial grande é ponderado com menor peso, enquanto que erros que ocorram mais tarde, são bastante penalizados (ALT; LAGES, 2003).

$$IEAT = \int_0^t t|e(t)|dt \quad (6)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Automação e Controle de Sistemas Agrícolas e no Laboratório de Hidráulica e Irrigação, situados no Departamento de Engenharia do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), no município de Seropédica/RJ. O sistema proposto tem sua atuação no controle da pressão fornecida a aspersores rotativos, de modo a manter constante as pressões de ensaio mesmo diante das variações da rede elétrica, e foi aplicado a ensaios de determinação da curva vazão-pressão.

3.1. Bancada de ensaio e sistema automático de controle da pressão

Para realização dos ensaios, foi projetada e montada uma bancada de ensaios composta pelos seguintes componentes: conjunto motobomba (WEG - 5 cv) equipado com inversor de frequência, transdutor de pressão (PSI.420 - ZURICH), hidrômetro multijato com saída pulsada (CIASEY – 1P/10L), manômetro (WILLY - PBIN) utilizado para a aferição da pressão de ensaio, aspersor rotativo (Fabrimar - Eco A232), sistema eletrônico de controle e aquisição de dados e um microcomputador, pelo qual foi possível o desenvolvimento e implementação da lógica de controle, ajuste das pressões de ensaio e o armazenamento e tratamento dos dados coletados. A Figura 5 ilustra a bancada de ensaios utilizada.

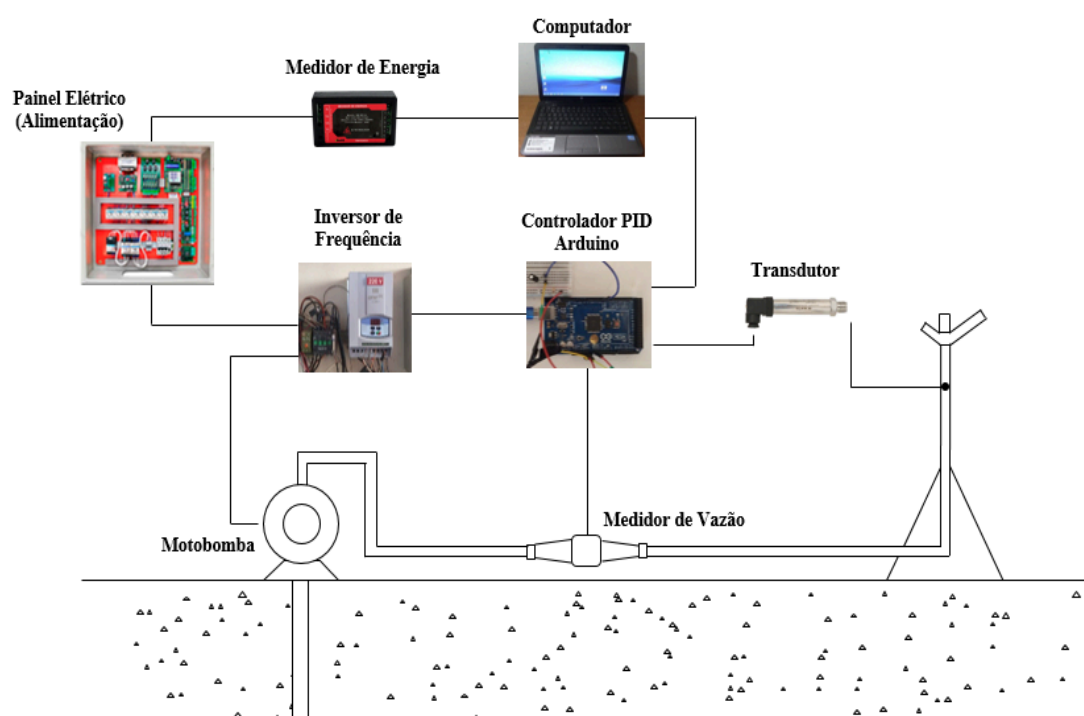


Figura 5. Bancada de ensaios para controle da pressão fornecida a aspersores rotativos.
Fonte: Autor

3.2. Inversor de frequência

O inversor de frequência utilizado na bancada de ensaios foi o WEG-CFW 10 Easydrive, que possui tensão de alimentação e saída de 200 a 240V, entrada analógica de tensão (0-10V), modulação PWM e regulador PID. Esse dispositivo eletrônico tem a função de controlar a velocidade de motores elétricos trifásicos por meio da variação da frequência fornecida ao motor. A frequência de saída do inversor pode ser controlada por algumas fontes de referência, sendo que as mais utilizadas são: a) Potenciômetro eletrônico; b) Interface Homem-Máquina (HMI); e c) Modulação por Largura de Pulso (PWM).

O potenciômetro eletrônico atua na regulação da tensão fornecida ao inversor de frequência, por meio da sua entrada analógica AI1 (borne 9), dessa forma, conforme a resistência do potenciômetro varia, a tensão na entrada analógica do inversor também irá variar, possibilitando que a velocidade do conjunto motobomba seja controlada. A Figura 6 mostra o esquema de ligação para o acionamento do inversor de frequência via potenciômetro eletrônico. É importante ressaltar que a entrada analógica do inversor de frequência possui tensão de trabalho de 0 a 10V, sendo 0V equivalente à frequência mínima, e 10V equivalente a frequência máxima. Os limites de frequência são regulados por meio dos parâmetros P133 (frequência mínima) e P134 (frequência máxima).

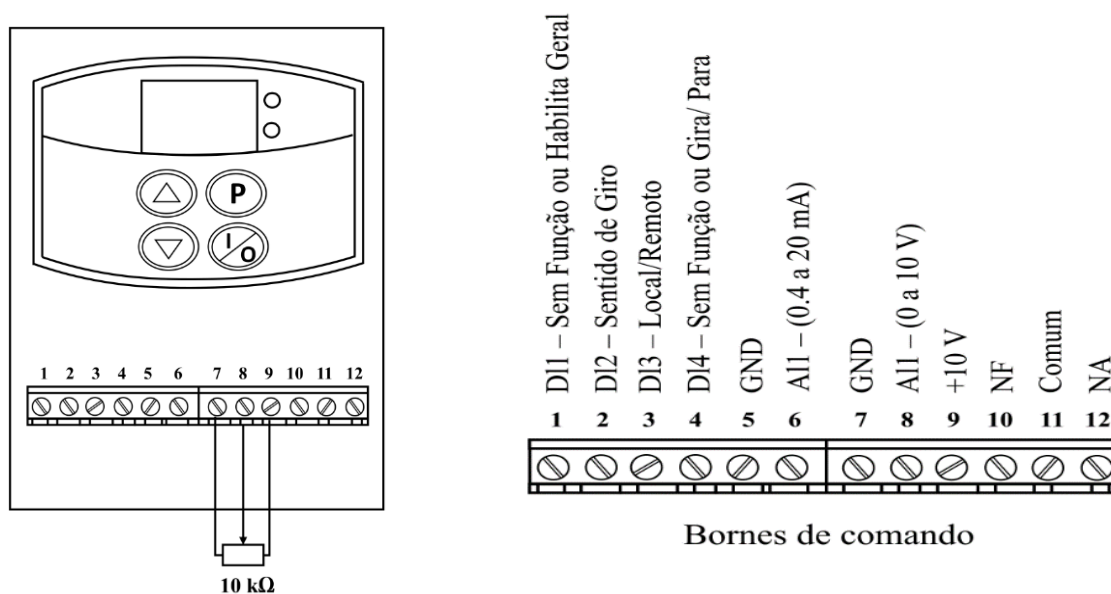


Figura 6. Acionamento do inversor de frequência CFW-10 via potenciômetro eletrônico.

Fonte: Adaptado do manual do usuário CFW-10.

A HMI é uma interface simples e que permite a parametrização do inversor de frequência e o ajuste dos modos de operação. A variação da velocidade é realizada via teclas (incrementar/decrementar) presentes em sua interface. Para que essas teclas estejam aptas a operar, é necessária a regulação dos seguintes parâmetros: a) ajustar a fonte de referência de frequência para as teclas ($P221 = 0$ para o modo local e/ou $P222 = 0$ para o modo remoto); e b) ajustar os valores dos limites de frequência máxima e mínima ($P133$ e $P134$). O valor da frequência de saída do inversor pode ser observado por meio do parâmetro $P005$ (frequência de saída do inversor). A Figura 7 mostra o acionamento do inversor via teclas da HMI.

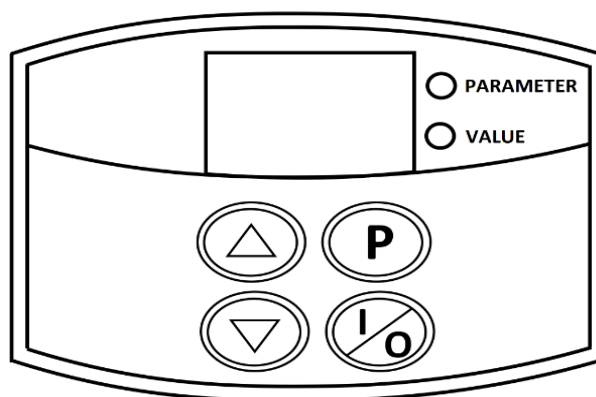


Figura 7. Acionamento do inversor de frequência CFW-10 via teclas da HMI. Fonte: Manual do usuário CFW-10.

Ainda, é possível controlar a frequência de saída do inversor via sinal PWM. Para isso, é necessário utilizar de um hardware de controle externo, como por exemplo, a plataforma de prototipagem arduino. A Figura 8 exemplifica o funcionamento para esse tipo de controle. Primeiramente, a variável de processo é medida por um sensor e tem essa informação enviada para o sistema de controle. Esse sistema, com auxílio de um algoritmo previamente programado, é responsável por realizar o controle da variável de processo de modo a atender os requisitos de projeto. Uma vez realizada essa etapa, o hardware de controle emite, por meio de sua saída PWM, o sinal controlado que será enviado para um circuito de amplificação de sinal, e em seguida será transmitido para o inversor de frequência que acionará o conjunto motobomba.

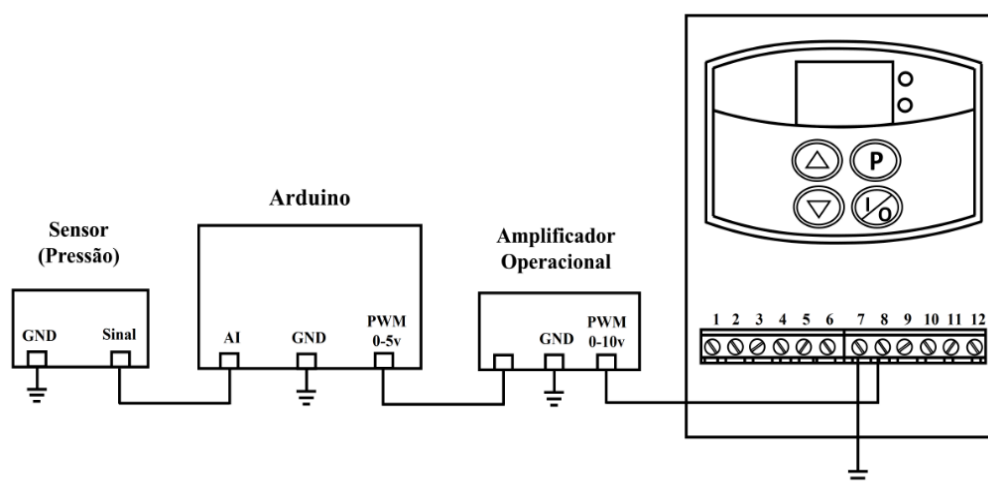


Figura 8. Acionamento do inversor de frequência CFW-10 via sinal PWM emitido por hardware de controle externo. Fonte: Autor.

3.3. Sistema automático de controle da pressão

O sistema automático de controle da pressão foi desenvolvido com base na utilização do controlador proporcional integrativo (PI), e implementado por meio da utilização da plataforma de prototipagem Arduino Mega, sendo este equipado com um microcontrolador

ATmega 2560, memória flash de 256 Kbytes, dispondo de entradas e saídas analógicas e digitais, interface serial/USB para programação e comunicação com o computador, e linguagem de programação C++. O arduino também foi utilizado para realizar a coleta dos dados obtidos pelos ensaios.

O sistema de controle operou em malha fechada (com realimentação), de forma que o transdutor de pressão realizava a tomada de pressão no tubo de subida do aspersor e realimentava o controlador PI com os valores de pressão medidos. De posse dos dados de pressão coletados, o controlador realizava a comparação entre o valor requerido para pressão (*setpoint*), e o real valor de pressão medido na saída do sistema, realizando a correção da variável de processo até que a mesma se estabilizasse nos valores de *setpoint* desejados.

3.4. Calibração e caracterização dos instrumentos de medição

As determinações das pressões de ensaio foram realizadas por meio da utilização de um transdutor de pressão (PSI.420 - ZURICH), com faixa de pressão de 0 a 70 mca, precisão do sinal de 0,1% e alimentação de 12 a 35 Vcc. Esse sensor emite em sua saída um sinal analógico que pode variar de 4 a 20 mA, sendo 4 mA equivalente a 0 mca, e 20 mA equivalente a 70 mca. A curva de calibração do transdutor foi obtida por meio da utilização da bomba de aferição (ZURICH – 800.D), conforme Figura 9. Primeiramente, utilizando um manômetro de referência, o volante do pistão da bomba de aferição era acionado até que a pressão desejada fosse alcançada. De posse disso, o transdutor enviava as informações para o arduino, onde por meio de seu monitor serial, foi possível realizar a leitura, em bytes, das pressões medidas. Para calibração do transdutor, utilizou-se faixa de pressão de 0 a 40 mca, (com variação de 5 mca) e um total de 10 repetições. Os dados gerados foram anotados e armazenados em uma planilha eletrônica, onde foi possível a elaboração da curva de calibração. A curva de calibração obtida para o transdutor de pressão é apresentada pela Figura 10.



Figura 9. Bomba de aferição utilizada para determinação da curva de calibração do transdutor de pressão. Fonte: Autor.

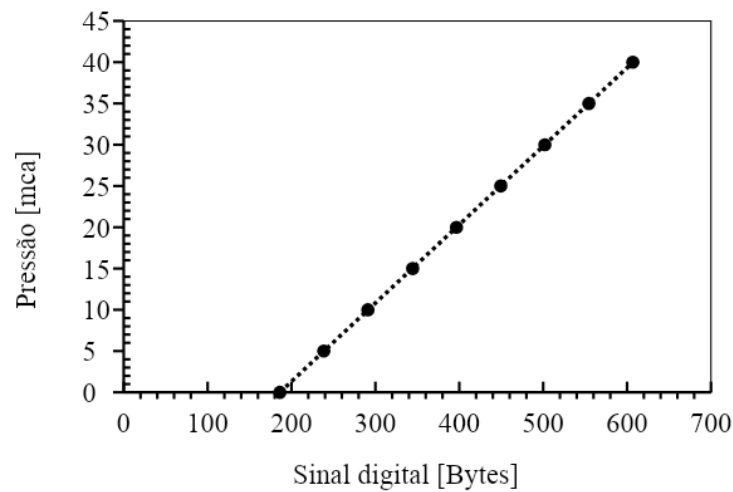


Figura 10. Curva de calibração do transdutor de pressão utilizado para determinação da curva vazão-pressão em ensaios de caracterização de aspersores rotativos. Fonte: Autor.

É importante ressaltar que como as informações do transdutor de pressão são transmitidas por meio de sinais em corrente elétrica (4-20mA), houve a necessidade de realizar a conversão desses sinais para sinais em tensão elétrica, pois as entradas analógicas presentes no arduino possuem a capacidade de leitura de sinais que variam de 0 a 5V. Dessa forma, foi necessário utilizar um resistor de 220Ω inserido entre a saída analógica do transdutor (pino 2), e o terra (GND), conforme a Figura 11. O sinal em corrente elétrica emitido pelo transdutor passa pelo resistor gerando uma queda de tensão no mesmo. Essa queda de tensão é medida pelo arduino, o que possibilita a leitura dos valores de pressão medidos pelo sensor.

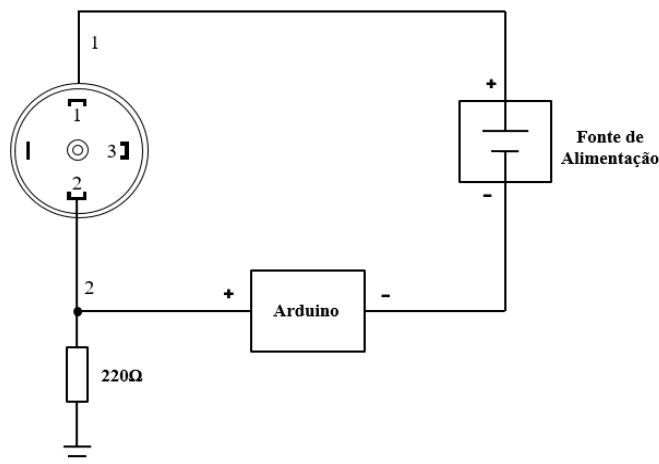


Figura 11. Esquema elétrico para determinação da curva de calibração do transdutor de pressão. Fonte: Adaptada do manual ZURICH - PSI.420 (2018).

As determinações de vazão foram feitas utilizando medidor do tipo hidrômetro com saída analógica de 1 pulso por 10 L, ou seja, a cada 10 L que passavam pelo medidor, o mesmo emitia um pulso elétrico. Para que a vazão pudesse ser medida, foi desenvolvida no

arduino uma lógica de programação capaz de ler e decodificar os pulsos elétricos emitidos pelo instrumento de medição, retornando o valor da vazão medido em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$.

3.5. Ensaios de controle da pressão na determinação da curva vazão versus pressão do aspersor

Os ensaios para determinação da curva versus pressão foram divididos em dois grupos: ensaios manuais e ensaios com controlador PI, ambos visando o controle das pressões de ensaio. Os ensaios manuais foram assim definidos por não disporem de um sistema de controle que mantivesse a pressão de ensaio estabilizada no valor de *setpoint*. Esses ensaios foram divididos em dois subgrupos: a) ensaios manuais com potenciômetro; b) ensaios manuais com inversor de frequência. Os ensaios com controlador PI foram assim definidos, pois ao contrário dos ensaios manuais, estes possuem um sistema automático de controle da pressão de ensaio. Esse grupo de ensaios também foi dividido em outros dois subgrupos: c) ensaios com controlador PI do inversor de frequência; d) ensaios com controlador PI do arduino.

Para cada uma das modalidades de ensaio foram avaliadas três diferentes pressões, sendo: 20, 30 e 40 mca. Cada ensaio teve duração de 10 minutos, sendo realizadas 5 repetições para cada pressão ensaiada. Foram utilizadas duas combinações de bocais, 4,0 x 2,8 mm e 6,4 x 3,2 mm, visando ampliar a faixa de vazão dos ensaios. A Tabela 3 apresenta as vazões disponibilizadas pelo fabricante do aspersor juntamente com as vazões medidas durante a execução dos ensaios, para as três pressões ensaiadas. Ressalta-se que as vazões equivalentes às pressões de 20 e 40 mca para os bocais 6,4 x 3,2 e 4,0 x 2,8 mm, respectivamente, não são disponibilizadas pelo fabricante.

Tabela 3 - Vazões equivalentes para cada combinação de bocais utilizada, sob diferentes pressões

Vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	20 mca	30 mca	40 mca
	4,0 x 2,8 mm		
Fabricante	1,29	1,59	-
Medida	1,31	1,60	1,87
	6,4 x 3,2 mm		
	20 mca	30 mca	40 mca
Fabricante	-	3,36	3,90
Medida	2,76	3,31	3,89

Fonte: Adaptado da tabela de desempenho do aspersor Eco A232

Os parâmetros da rede elétrica foram monitorados por meio da utilização do medidor de energia trifásico (SM-3W lite), com tensão de entrada de 127/220V, possuindo três transformadores de corrente (TC's) com corrente máxima de 100A e dispondo de uma interface de comunicação WI-FI, conforme Figura 12. Depois de realizada a instalação do equipamento, o mesmo cria uma rede WI-FI própria que possibilita sua conexão com um computador. Uma vez conectado à rede, é necessário abrir uma nova aba no navegador web e inserir o número de IP (192.168.4.1) para ter acesso ao sistema do medidor de energia.

Para realização dos ensaios, foi utilizada a opção de monitoramento da rede elétrica em tempo real, sendo os dados coletados em intervalos de 1 minuto e armazenados em uma

planilha eletrônica. A Tabela 4 apresenta os parâmetros da rede elétrica disponibilizados pelo medidor de energia.



Figura 12. Medidor de energia utilizado para monitoramento dos parâmetros da rede elétrica.
Fonte: Manual do usuário SM-3W lite.

Tabela 4 - Parâmetros da rede elétrica que podem ser monitorados pelo medidor de energia trifásico SM-3W lite

Variável	Descrição	Unidade de medida
Pa	Potência fase a	W
Pb	Potência fase b	W
Pc	Potência fase c	W
Pt	Potência total	W
Ua	Tensão fase a	V
Ub	Tensão fase b	V
Uc	Tensão fase c	V
Ia	Corrente fase a	A
Ib	Corrente fase b	A
Ic	Corrente fase c	A
Ept	Consumo total	Kwh

Fonte: Manual do usuário – Medidor SM-3W lite

3.5.1. Ensaios com controle manual por potenciômetro

Foi denominado ensaio com controle manual por potenciômetro pois a realização do ajuste das pressões de ensaio foi feita de forma manual, por meio da utilização de um potenciômetro (10 k Ω). Esse componente eletrônico consiste em uma resistência elétrica que varia dentro de um range de valores (de 0 a 10 k Ω). Na bancada de ensaios o potenciômetro foi acoplado ao inversor de frequência, que possuía a função de controlar a velocidade de rotação do conjunto motobomba.

O ensaio foi realizado da seguinte forma: primeiramente acionava-se o potenciômetro ao mesmo tempo que se verificava a pressão do sistema por meio do manômetro. Dessa forma, conforme o giro do potenciômetro fosse aumentando, a rotação do conjunto motobomba também aumentava, e consequentemente a pressão na entrada do aspersor. Esse

processo de ajuste da pressão continuava até que a pressão desejada fosse alcançada, e quando isso acontecia, era dado início ao ensaio.

3.5.2. Ensaios com controle manual pela HMI do inversor de frequência

A realização dessa modalidade de ensaio se fez necessária, pois no decorrer dos ensaios manuais por potenciômetro, observou-se que esse componente poderia estar interferindo na estabilidade da pressão de ensaio. Isso ocorreu pelo fato do potenciômetro ser um componente que não se consegue dispor de precisão para o controle da pressão, bem como o ajuste inicial da pressão de ensaio.

Os ensaios manuais com inversor de frequência pela HMI foram conduzidos de forma a desabilitar o potenciômetro e realizar o ajuste da pressão de ensaio via teclas da interface homem-máquina (IHM), presentes no inversor de frequência. O parâmetro P005 (Frequência de saída do motor) foi utilizado para realizar a passagem das pressões de ensaio para o sistema. Esse parâmetro é responsável por variar a frequência (Hz) de saída do inversor de frequência, o que faz com que a velocidade do conjunto motobomba também varie.

O procedimento de ajuste da pressão foi o mesmo adotado no item 3.5.1.

3.5.3. Ensaios com controlador PI do inversor de frequência

Para realização dessa modalidade de ensaios, utilizou-se o regulador PID presente no inversor de frequência. Essa função se sobrepõe ao controle de velocidade do inversor, passando a controlar a velocidade do conjunto motobomba. A Figura 13 ilustra a aplicação do inversor de frequência utilizando a função regulador PID.

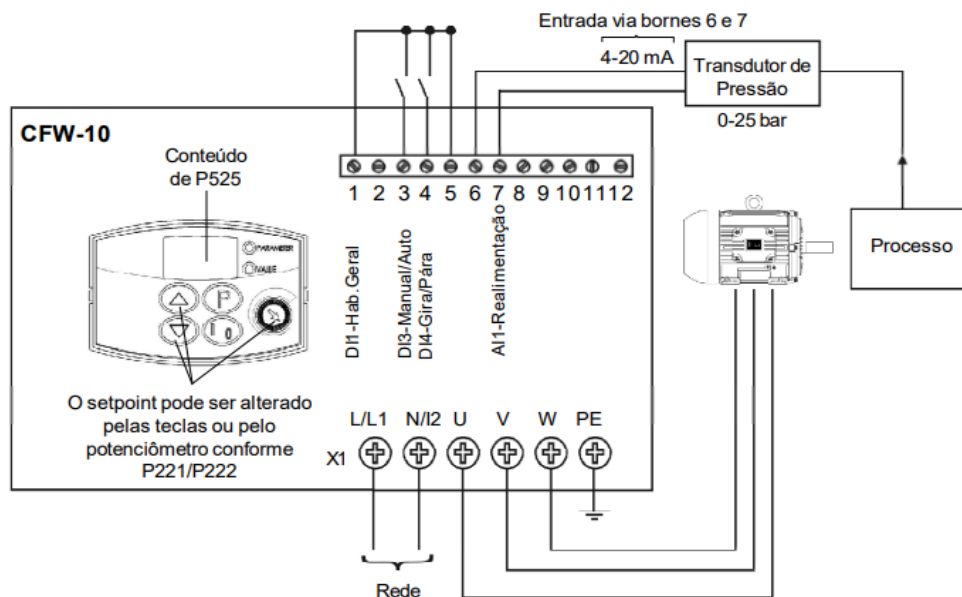


Figura 13. Aplicação do inversor de frequência com a função de controle PID. Fonte: Manual do usuário CFW-10.

A parametrização do inversor de frequência para utilização do controlador PI foi realizada conforme a Tabela 5. Primeiramente foram realizados os ajustes dos parâmetros de leitura do transdutor de pressão e a configuração das especificações do conjunto motobomba utilizado. Os parâmetros referentes aos ganhos do controlador PI foram ajustados por meio dos parâmetros P520 a P522.

Tabela 5 - Parâmetros de ajuste do inversor de frequência para utilização do controlador PI

Parâmetro	Valor ajustado	Unidade	Função do parâmetro
P000	5	-	Alteração das funções
P133	3	Hz	Frequência mínima
P134	60	Hz	Frequência máxima
P203	1	-	Modo de controle - PID
P221	0	-	Seleção de referência - teclas
P222	0	-	Seleção de referência - teclas
P229	1	-	Seleção de comandos - bornes
P234	100	%	Ganho da entrada analógica A11
P235	1	-	Sinal da entrada analógica (4 a 20 mA)
P263	1	-	Função da entrada digital - habilita geral
P265	27	-	Função da entrada digital manual/automático (PID)
P266	4	-	Função entrada digital - gira/para
P520	-	%	Ganho proporcional
P521	-	%	Ganho integral
P522	-	%	Ganho derivativo
P525	-	%	<i>Setpoint</i>

Fonte: Manual inversor de frequência WEG – modelo CFW10

A passagem do *setpoint* para o sistema foi feita utilizando o parâmetro P525 (*setpoint* digital), contudo é importante ressaltar que esse parâmetro utiliza valores de entrada em percentual, sendo necessária a realização de testes para correlacionar os valores das pressões de ensaio com os valores, em porcentagem, a serem inseridos nesse parâmetro. Os valores utilizados no parâmetro P525 foram obtidos confrontando as indicações dos valores de

pressão fornecidos pelo instrumento de medição (manômetro) com a frequência de saída do inversor de frequência, por meio do parâmetro P005. A Tabela 6, apresenta os valores de *setpoint* utilizados para as duas combinações de bocais.

Tabela 6 - Valores de *setpoint* utilizados no parâmetro P525

Pressão (mca)	P525 (%)	
	2,8 x 4,0	3,2 x 6,4
20	46,6	45,8
30	62,8	63,3
40	78	78,3

3.5.4. Ensaios com controlador PI projetado no arduino

Os ensaios com controlador PI do arduino foram realizados conforme descrito no item 3.2 (passagem de referência via sinal PWM). É importante ressaltar que para essa modalidade de ensaio, o inversor de frequência não exerceu nenhuma ação de controle sob as pressões de ensaio. Sua função foi controlar a velocidade do conjunto motobomba de acordo com as informações enviadas pelo arduino, via sinal PWM. Para que o inversor de frequência estivesse apto a operar dessa forma, foi necessária a configuração de alguns parâmetros, conforme se mostra na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de ajuste do inversor de frequência para operar via sinal PWM

Parâmetro	Valor ajustado	Função do parâmetro
P005	5	Alteração das funções
P221	1	Seleção de referência - A11
P229	1	Seleção de comandos - via bornes
P235	0	Sinal da entrada analógica A11 (0-10v)

Fonte: Manual do usuário CFW-10

3.6. Sintonia dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência

Foi utilizado o método de sintonia em malha fechada de Zielger e Nichols para determinação dos parâmetros dos dois controladores. Os ganhos críticos (K_{cr}) e os seus respectivos períodos críticos (P_{cr}) foram determinados a partir dos seguintes procedimentos: a) as ações integral e derivativa foram reduzidas ao seu efeito mínimo ($T_i = 0$ e $T_d = 0$); b) utilizando apenas a ação proporcional, foi introduzido um pequeno ganho no sistema e observada a curva de resposta gerada por ele; c) o ganho proporcional foi aumentado até que a curva de saída do sistema gerasse uma oscilação sustentada de amplitude constante, conforme Figura 14, sendo determinado o valor do ganho crítico; d) a partir da oscilação sustentada gerada, foi possível a determinação do período crítico; e) de posse de K_{cr} e P_{cr} , e utilizando a Tabela 2, calculou-se os valores para os parâmetros T_i e T_d . As Tabelas 8 e 9 mostram os

valores utilizados para os parâmetros do controlador PI do inversor de frequência e PI do arduino, respectivamente.

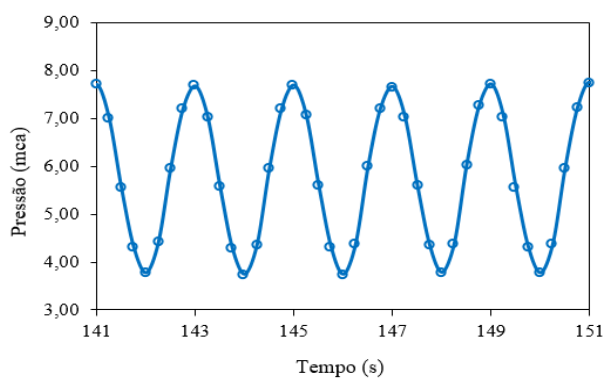


Figura 14. Oscilação sustentada em resposta a ação proporcional para a pressão de ensaio de 20 mca e bocal de 2,8 x 4,0 mm.

Tabela 8 - Ganhos utilizados para o controlador PI do inversor de frequência para os bocais de 4,0 x 2,8 mm e 6,4 x 3,2 mm

Ganhos	4,0 x 2,8			6,4 x 3,2		
	20	30	40	20	30	40
P520 (Kp)	22,0	28,0	17,8	23,1	36,0	17,8
P521 (Ti)	14,1	16,4	20,3	13,6	18,2	20,3

Tabela 9 - Ganhos utilizados para o controlador PI do arduino para os bocais 4,0 x 2,8 mm e 6,4 x 3,2 mm

Ganhos	4,0 x 2,8			6,4 x 3,2		
	20	30	40	20	30	40
Kp	2,25	1,35	1,35	1,50	1,35	1,35
Ti	1,67	1,60	2,00	1,80	1,60	2,00
Td	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Intervalo entre leituras (s)	1300	850	850	850	850	850

O parâmetro P521 (Ti) do inversor de frequência, é o tempo necessário para que a saída do controlador varie de 0 até a frequência máxima (P134). O cálculo desse parâmetro foi realizado por meio da Equação 7, disponibilizada no manual do usuário do inversor.

$$P521 = \frac{1600}{P_{cr} P525} \quad (7)$$

3.7. Lógica de controle PI arduino

A lógica de programação do controlador PI desenvolvida no arduino é ilustrada pela Figura 15. Após iniciado o algoritmo é preciso que o usuário informe o *setpoint* a ser utilizado, assim como seus respectivos ganhos proporcional e integral. Depois da etapa de definição das variáveis do controlador, o sistema calcula a média aritmética dos valores de pressão medidos pelo transdutor de pressão e enviados para o arduino, por meio da sua entrada analógica (A0). Após essa etapa, são realizados os comandos para ajuste do intervalo de tempo de cálculo, que é o tempo necessário para que o sistema realize as rotinas de cálculo. A próxima etapa realiza a conversão dos valores de pressão que foram enviados para o controlador, convertendo-os de bytes para mca, utilizando para isso a equação da curva de calibração apresentada pela Figura 10.

Depois de realizado o cálculo do erro, essa informação é enviada para a lógica de controle PI, Equação 2, que realiza suas rotinas de cálculos com base no erro do sistema e os valores dos ganhos proporcional e integral, previamente definidos. A saída do controlador consiste no sinal de pressão controlado que será enviado para inversor de frequência por meio da saída PWM (Modulação por largura de pulso), pino 10. Essa saída possui faixa de atuação de 0 a 255 (0 a 5 volts), dessa forma, foi necessário a realização de um ajuste para que os valores calculados pelo controlador ficassem dentro da faixa de atuação. Desse modo, se a saída fornecer um valor menor que 0 ou maior que 255, esses valores são reajustados para 0 e 255, respectivamente, fazendo com que a ação do inversor de frequência não seja comprometida.

Por último, antes do algoritmo repetir as ações de controle, é necessário a inserção de um intervalo entre leituras. Esse intervalo gera um atraso na programação, sendo necessário para que o sistema tenha um tempo para responder às ações de controle gerados pelo arduino.

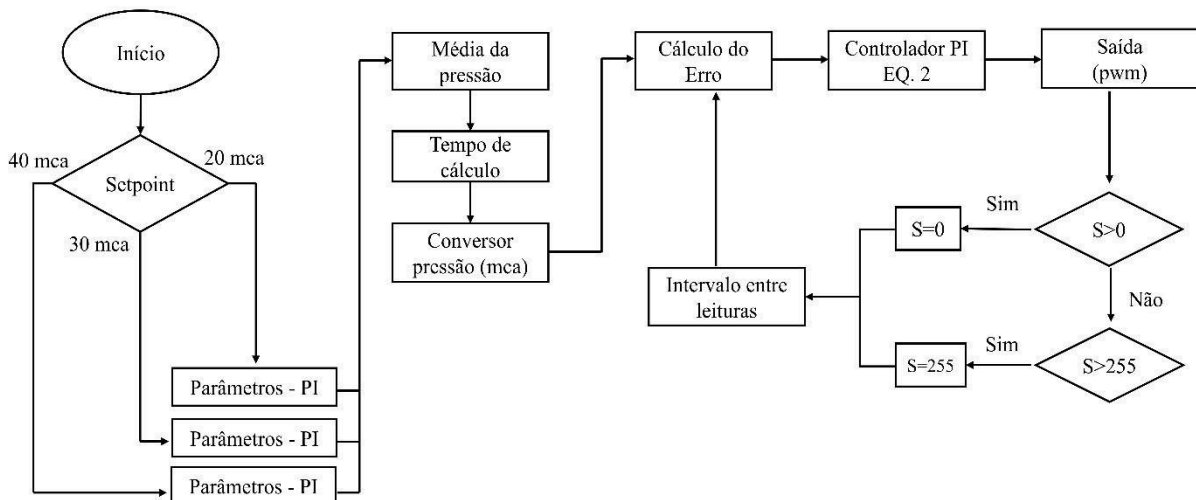


Figura 15. Fluxograma da programação utilizada para implementação do controlador PI.
Fonte: Autor.

3.8. Determinação do desempenho dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência

Um controlador pode ser considerado ótimo quando este consegue minimizar os critérios de desempenho escolhidos para avaliá-lo, de modo a atender as necessidades de operação requeridas para ele. Para essa pesquisa, o melhor tipo de controlador a ser utilizado, é aquele que depois de alcançar o valor de *setpoint* desejado, consiga manter a pressão de ensaio estabilizada com o mínimo de variação possível.

O desempenho dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência para os parâmetros de sintonia calculados, foram determinados a partir da análise gráfica das respostas geradas pelo sistema para cada *setpoint* de pressão ensaiada. Foram utilizados os índices: a) tempo de subida (*tr*); b) tempo de acomodação (*ts*).

É importante ressaltar que as comparações gráficas fornecem características isoladas, não levando em consideração todo o comportamento dinâmico do processo, dessa forma, também foram utilizados os critérios de desempenho baseados na integral do erro para avaliar o desempenho dos controladores para cada valor de *setpoint* ensaiado. Os índices de desempenho utilizados foram: c) integral do erro absoluto (IEA); d) integral do erro quadrático (IEQ); e) integral do erro ponderado pelo tempo (IEAT), de acordo com as Equações 4, 5 e 6, respectivamente.

3.9. Análise estatística

Após a realização dos ensaios, os dados gerados foram organizados e armazenados em planilhas eletrônicas. Antes da realização da análise estatística, foi necessária a organização dos dados de modo que todos possuíssem a mesma quantidade de dados para cada modalidade de ensaio, repetições e bocais utilizados. A Tabela 10 mostra a quantidade de dados utilizados. É importante ressaltar que para pressão de 20 mca e bocal 4,0 x 2,8 mm, utilizou-se um total de 395 dados para cada modalidade de ensaio. Isso se deve ao fato de que o intervalo entre leituras utilizado na programação precisou ser ajustado para, aproximadamente, 1,5 segundos. Esse ajuste foi necessário, pois o intervalo utilizado para as demais pressões ensaiadas, 1 segundo, não foi suficiente para que o controlador conseguisse realizar suas rotinas de cálculo, gerando instabilidade para a pressão ensaiada.

Tabela 10 – Quantidade de dados utilizados para realização da análise estatística

Pressão (mca)	Quantidade de Dados	
	4,0 x 2,8	6,4 x 3,2
20	395	575
30	575	575
40	575	575

Para análise estatística realizou-se o teste de análise de variância (ANOVA) para as seguintes variáveis: a) coeficiente de variação (CV) e desvio (erro) da pressão para todos os modos de controle; b) CV da tensão elétrica para todas as modalidades de ensaio; c) índices de desempenho baseados na integral do erro (IEA, IEQ e IEAT) e aplicados aos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência; d) índices de desempenho baseados na curva de

resposta (t_r e t_s) dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência. Após realização do teste de variância, para as variáveis que apresentaram diferença estatística, foi aplicado o teste de comparação de médias (teste Tukey), com nível de significância de 5%. Os testes foram realizados por meio do software computacional de análise estatística e planejamento de experimentos Sisvar (FERREIRA, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação das variações de tensão da rede elétrica

A Tabela 11 apresenta os resultados dos CV's referentes aos dados de energia elétrica (tensão elétrica), para as quatro modalidades de ensaio (PI do arduino, PI do inversor de frequência, manual com potenciômetro e manual com inversor de frequência), para as duas combinações de bocais utilizadas (4,0 x 3,2 mm e 6,4 x 3,2 mm).

Analisando os resultados referentes aos bocais 4,0 x 2,8 mm é possível observar que durante a execução dos ensaios, para a pressão de 20 mca, não houve diferença estatística entre os ensaios PI do arduino, PI do inversor de frequência e o ensaio manual com inversor de frequência, de forma que as mesmas condições de ensaio foram mantidas para essas modalidades. Para a pressão de 30 mca, o ensaio com controlador PI do arduino foi o único que apresentou diferença entre os demais, isso mostra que a rede elétrica resultou maior oscilação durante a realização desse ensaio. O ensaio manual com inversor de frequência, juntamente com o PI do arduino mantiveram as mesmas condições de ensaio entre si, enquanto que o ensaio manual com potenciômetro e o PI do inversor de frequência, apresentaram diferença entre si e entre as demais modalidades de ensaio.

Para os ensaios que empregaram os bocais 6,4 x 3,2 mm constatou-se que para pressão de 20 e 40 mca, o ensaio com controlador PI do arduino foi o único que apresentou diferença para os demais tipos de ensaio. Os resultados registrados para a pressão de 30 mca mostram que as quatro modalidades de ensaio possuíram condições diferentes, sendo o PI do arduino o que registra maior variação da energia elétrica.

Tabela 11 – Coeficiente de variação da tensão da rede elétrica para as quatro modalidades de ensaio e para as duas combinações de bocais utilizadas.

Ensaio	Tensão - CV (%)		
	20	30	40
4,0 x 2,8 mm			
PI - Arduino	0,720783 a	0,871933 a	0,824565 a
PI - Inversor F.	0,867624 a	0,512188 b	0,308872 c
Manual - Potenciômetro	0,323208 b	0,509092 b	0,575880 b
Manual - Inversor F.	0,684920 a	0,411278 b	0,767460 a
6,4 x 3,2 mm			
PI - Arduino	1,167911 a	1,399352 a	1,275725 a
PI - Inversor F.	0,738030 b	0,908516 b	0,667370 b
Manual - Potenciômetro	0,671226 b	0,642188 c	0,645648 b
Manual - Inversor F.	0,598453 b	0,885415 b	0,592601 b

4.2. Avaliação do desempenho dos controladores PI

As Tabelas 12 e 13 apresentam os valores médios dos índices de desempenho baseados na integral do erro (IAE, IEQ e IEAT), para os controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência, para as três pressões ensaiadas e para as duas combinações de bocais utilizadas.

Tabela 12 – Índices de desempenho dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência para os bocais 4,0 x 2,8 mm

Controladores	Pressão de ensaio (mca)		
	20	30	40
IEA			
PI - Arduino	133,16 b	304,20 a	340,0 a
PI - Inversor F.	371,22 a	306,60 a	397,19 a
IEQ			
PI - Arduino	1141,51 b	3742,94 a	7553,27 a
PI - Inversor F.	2578,34 a	4156,76 a	4588,99 b
IEAT			
PI - Arduino	14928,53 b	29794,99 a	27321,55 a
PI - Inversor F.	67660,55 a	35436,75 a	53818,98 a

Tabela 13 – Índices de desempenho dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência para os bocais 6,4 x 3,2 mm

Controladores	Pressão de ensaio (mca)		
	20	30	40
IEA			
PI - Arduino	258,87 b	314,68 b	419,14 b
PI - Inversor F.	834,23 a	879,80 a	1215,64 a
IEQ			
PI - Arduino	2593,74 b	4538,14 b	8212,06 a
PI - Inversor F.	7047,85 a	10339,96 a	12012,67 a
IEAT			
PI - Arduino	22665,32 b	28795,98 b	31600,23 b
PI - Inversor F.	124121,74 a	154920,37 a	286793,99 a

Para os ensaios utilizando os bocais 4,0 x 2,8 mm, Tabela 12, constata-se que o controlador PI do arduino obteve melhor desempenho para os índices IEA, IEQ e IEAT, para a pressão de 20 mca, enquanto o controlador PI do inversor de frequência obteve melhor desempenho apenas para o índice IEQ, relativo à pressão de 40 mca. Para a pressão de 30 mca, os índices de desempenho não apresentaram diferença estatística entre os controladores, logo, estatisticamente, os controladores possuem o mesmo desempenho.

Para a pressão de ensaio de 20 mca, o controlador PI do arduino apresenta um valor para IEAT de aproximadamente 4,5 vezes menor que o PI do inversor de frequência, isso evidencia que esse controlador obteve melhor estabilidade da pressão após atingir o valor de *setpoint* desejado. O critério IEA do PI do arduino para a mesma pressão, apresentou valores inferiores comparados ao PI do inversor de frequência, e de acordo com Alt e Lages (2003), isso mostra que esse controlador possui uma resposta transitória satisfatória e bom amortecimento do sinal de resposta. Ainda para os mesmos autores, controladores que conseguem minimizar a IEQ tendem a apresentar uma resposta mais rápida. Dessa forma, para a pressão de 20 mca, o PI do arduino possui melhor desempenho, enquanto que para a pressão de 40 mca, o PI do inversor de frequência possui um sinal de resposta mais rápido. Para a pressão de 20 mca, não houve diferença estatística entre os controladores.

É importante ressaltar que embora a minimização da IEQ tende a apresentar respostas mais rápidas para o sistema, uma vez que esse índice de desempenho penaliza erros maiores, que geralmente ocorrem no início da resposta, ela faz com que o sinal controlado tenha maior *overshoot* (sobressinal), além de comprometer a estabilidade do sistema, gerando maiores oscilações no sinal da resposta e consequentemente, maiores valores para IEAT. Conforme abordado por Pinto et al. (2013), outro importante ponto que ajuda a fundamentar tal afirmação, está relacionado ao cálculo de IEAT, Equação 6, pois por meio da ponderação no tempo, erros que ocorram em tempos maiores durante a realização do ensaio serão mais penalizados do que erros que ocorram no início da atuação do controlador.

Os resultados para os ensaios utilizando os bocais 6,4 x 3,2 mm, Tabela 13, mostram que o controlador PI do arduino obteve melhor desempenho frente ao PI do inversor de frequência, exceto para o índice IEQ, referente a pressão de 40 mca, onde os controladores possuem desempenho equivalente.

As respostas dos controladores para as pressões ensaiadas e para as duas combinações de bocais utilizadas são apresentadas pelas Figuras 16 e 17. É importante ressaltar que para melhor apresentação gráfica dos resultados, o valor do eixo do tempo foi ajustado para 120 segundos.

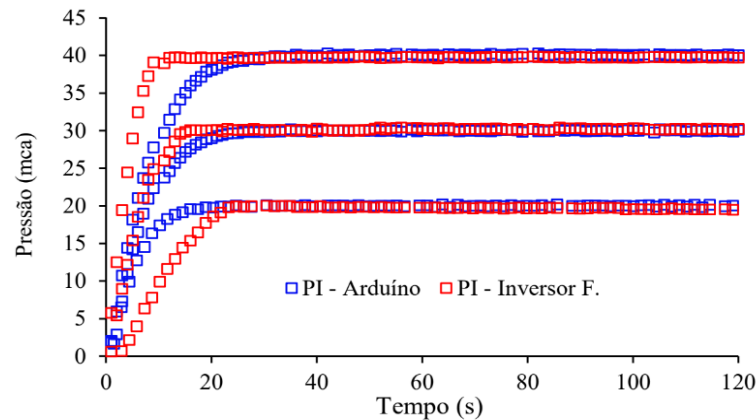


Figura 16. Resposta transitória dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência para o bocal 4,0 x 2,8 mm

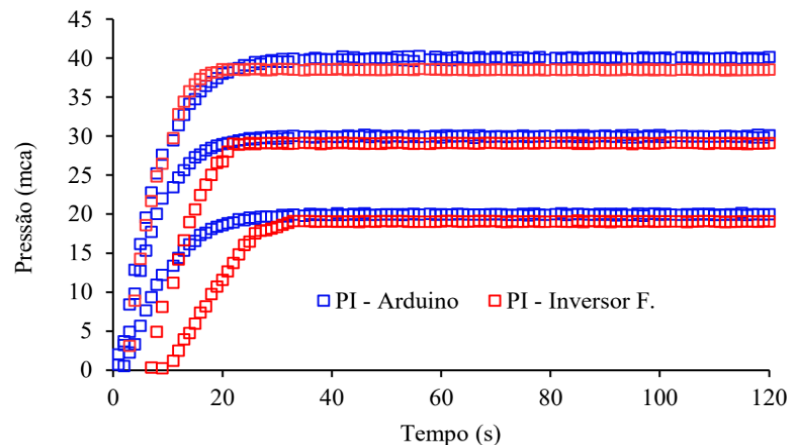


Figura 17. Resposta transitória dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência para o bocal 6,4 x 3,2 mm

As Tabelas 14 e 15 apresentam os valores dos índices de desempenho (tr e ts) obtidos a partir da curva de resposta do sistema, para as duas combinações de bocais utilizadas.

Tabela 14 – Índices de desempenho baseados na resposta transitória dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência, para os bocais 4,0 x 2,8 mm

Controladores	Pressão de ensaio (mca)		
	20	30	40
	tr (s)		
PI - Arduino	21,4 b	26,8 a	31,0 a
PI - Inversor F.	28,4 a	15,2 b	14,2 b
	ts (s)		
PI - Arduino	25,2 b	29,4 a	36,2 a
PI - Inversor F.	33,4 a	21,4 b	21,2 b

Tabela 15 – Índices de desempenho baseados na resposta transitória dos controladores PI do arduino e PI do inversor de frequência, para os bocais 6,4 x 3,2 mm

Controladores	Pressão de ensaio (mca)		
	20	30	40
	tr (s)		
PI - Arduino	30,0	28,8	31,0
PI - Inversor F.	-	-	-
	ts (s)		
PI - Arduino	35,6	32,0	37,0
PI - Inversor F.	-	-	-

Para os ensaios utilizando os bocais 4,0 x 2,8 mm, Tabela 14, é possível observar que o controlador PI do inversor de frequência obteve melhor desempenho do índice tr para as pressões de 30 e 40 mca, enquanto o controlador PI do arduino obteve melhor desempenho para a pressão de 20 mca. Isso mostra que a curva de resposta dos controladores, para essas pressões, conseguiram alcançar os valores de *setpoint* desejados de forma mais rápida, conforme apresentado pela Figura 16. Para ts, o PI do inversor de frequência também obteve melhor desempenho para as pressões de 30 e 40 mca, demandando menor tempo para que o sinal controlado da pressão alcançasse uma faixa de variação de até 5%.

Para os ensaios utilizando os bocais 6,4 x 3,2 mm, Tabela 15, não foi possível realizar a comparação dos índices tr e ts entre os controladores, pois o controlador PI do inversor de frequência não atingiu os valores de *setpoint* desejados para as pressões ensaiadas, conforme mostrado na Figura 17. Tal fato pode ser atribuído ao modo de passagem do *setpoint* para o inversor de frequência, conforme explicado no item 3.5.3. Embora não tenha sido possível realizar a comparação de tr e ts, pode-se observar que o controlador PI do arduino obteve um bom desempenho para esses índices, uma vez que ele tenha conseguido com que as pressões de ensaio se estabilizassem pouco tempo após alcançar os *setpoints* desejados.

Como dito anteriormente, os controladores que conseguem minimizar o valor da IEQ, tendem a possuir respostas mais rápidas. Tal fato pode ser confirmado confrontando os resultados desse critério de desempenho com os valores registrados em tr. Comparando os resultados da IEQ, Tabela 12, com os resultados de tr, Tabela 14, para os ensaios utilizando os

bocais 4,0 x 2,8 mm, é possível observar que o controlador PI do arduino, para a pressão de 20 mca, obteve menor valor da IEQ e menor tempo de tr. Da mesma forma, o controlador PI do inversor de frequência, para a pressão de 40 mca, obteve menor valor de IEQ e também menor tempo de tr. Para a pressão de 30 mca não houve diferença estatística entre os controladores para IEQ, logo, estatisticamente, eles possuem velocidade de resposta equivalente. Os resultados obtidos para os ensaios utilizando os bocais 6,4 x 3,2 mm, Tabela 15, mostram que o controlador PI do arduino registrou valores inferiores para IEQ e tr, para as três pressões ensaiadas.

De acordo com as recomendações normativas da NBR ISO 9261 (2006), para ensaios com ajuste manual da pressão, antes de efetuar a medição de vazão, é recomendado aguardar 3 minutos para que ocorra a estabilização da pressão de ensaio. Dessa forma, do ponto de vista prático, o controlador PI do arduino, para as duas combinações de bocais utilizadas, e o controlador PI do inversor de frequência, apenas para os bocais 4,0 x 2,8 mm, são considerados ótimos, pois os valores obtidos em tr e ts mostram que esses controladores conseguem alcançar a estabilidade das pressões de ensaio em um tempo inferior ao exigido pela norma.

4.3. Avaliação dos modos de controle na estabilidade da pressão e no erro

Os resultados referentes ao CV e ao Desvio (erro), sob as quatro modalidades de ensaios realizadas (manual com potenciômetro, manual com inversor de frequência, controlador PI do arduino e controlador PI do inversor de frequência), são apresentados pelas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 – Resultado dos coeficientes de variação e desvio, para os bocais 4,0 x 2,8 mm

Ensaio	Média					
	CV (%)			Desvio (erro)		
	20	30	40	20	30	40
PI - Arduino	-	0,66 b	0,50 ab	0,0007 c	0,0006 c	0,001 b
PI - Inversor F.	-	0,62 b	0,38 b	0,49 b	0,15 b	0,24 ab
Manual	-	0,37 b	0,28 b	0,71 b	0,02 c	0,26 a
Potenciômetro	-	0,37 b	0,28 b	0,71 b	0,02 c	0,26 a
Manual - Inversor F.	-	1,38 a	0,66 a	1,34 a	0,32 a	0,14 ab

Tabela 17 - Resultado dos coeficientes de variação e desvio, para os bocais 6,4 x 3,2 mm

Ensaio	Média					
	CV (%)			Desvio (erro)		
	20	30	40	20	30	40
PI - Arduino	0,81 a	0,63 b	0,53 a	0,002 c	0,0009 c	0,002 c
PI - Inversor F.	0,50 b	0,29 c	0,34 b	0,83 a	0,88 a	1,63 a
Manual	-	0,32 b	0,34 bc	0,27 b	0,40 b	0,08 bc
Potenciômetro	-	0,32 b	0,34 bc	0,27 b	0,40 b	0,08 bc
Manual - Inversor F.	0,48 b	1,67 a	0,25 b	0,15 c	0,14 b	0,66 b

Analisando os resultados dos CV's para os bocais de 4,0 x 2,8 mm, Tabela 16, é possível observar que o ensaio manual com inversor de frequência registrou maior variação para a pressão de ensaio de 30 mca. Para a pressão de 40 mca, o ensaio manual com inversor de frequência obteve o mesmo CV que o ensaio com controlador PI do arduino, e este por sua vez, obteve o mesmo desempenho que o ensaio manual com potenciômetro e o ensaio com controlador PI do inversor de frequência, considerando um nível de significância de 5%. Para a pressão de 20 mca os modos de controle não apresentaram diferença estatística.

Analisando o Desvio (erro) nos ensaios com os bocais 4,0 x 2,8 mm, Tabela 16, evidencia-se o ótimo desempenho do controlador PI do arduino, em termos de minimizar o erro da pressão controlada em relação ao *setpoint* desejado, para a pressão de 20 mca, obtendo o menor desvio frente as demais modalidades de ensaio. Para a pressão de 30 mca, esse controlador juntamente com o ensaio manual com potenciômetro obtiveram o mesmo desempenho, enquanto que para a pressão de 40 mca, o ensaio com controlador PI do inversor de frequência e o ensaio manual com inversor de frequência registraram o mesmo desempenho que o controlador PI do arduino. O ensaio manual com inversor de frequência, frente as demais modalidades de ensaio, mostrou ser o menos assertivo para as pressões de 20 e 30 mca, registrando maior diferença entre a pressão controlada por ele, e os valores de *setpoint* desejados. Para a pressão de 40 mca, o ensaio manual com potenciômetro apresentou o maior desvio.

Os resultados dos ensaios utilizando os bocais 6,4 x 3,2 mm, Tabela 17, mostram que o controlador PI do arduino obteve maior variação para as pressões de ensaio de 20 e 40 mca. Para a pressão de 30 mca, o ensaio manual com inversor de frequência apresentou maior variação, enquanto o ensaio com controlador PI do arduino registrou a mesma variação que o ensaio manual com potenciômetro, e este por sua vez, registrou a mesma variação da pressão de ensaio que o controlador PI do inversor de frequência.

Os ensaios utilizando a combinação de bocais 6,4 x 3,2 mm, Tabela 17, mostram que o PI do arduino e o ensaio manual com inversor de frequência, para a pressão de 20 mca, não apresentaram diferença estatística entre si, registrando o menor desvio frente as demais modalidades de ensaio. Os valores registrados para pressão de 30 mca, indicam que não houve diferença entre o ensaio utilizando o controlador PI do arduino e o ensaio manual com potenciômetro, e que também não houve diferença entre o ensaio manual com potenciômetro e o ensaio manual com inversor de frequência. Para a pressão de 40 mca, o controlador PI do arduino e o ensaio manual com potenciômetro foram as duas modalidades de ensaio, que juntas, apresentaram menor desvio para essa pressão de ensaio. O ensaio com controlador PI do inversor de frequência foi o que apresentou o maior desvio para as três pressões ensaiadas, conforme pode ser visualizado pela Figura 17.

Entre os métodos de ajuste manual da pressão, observa-se que, de forma geral, os ensaios manuais com inversor de frequência registraram as maiores instabilidades para as pressões de ensaio, evidenciando que esse método de controle possui dificuldade em manter as pressões de ensaio estabilizadas nos valores de *setpoint* desejados. Rocha et al. (2014) e Rocha (2016) também registraram instabilidades no controle manual dessa variável em ensaios de perdas de carga, e em ensaios para determinação da curva vazão versus pressão, respectivamente.

Do ponto de vista prático, os CV's registrados em todas as modalidades de ensaio, para as duas combinações de bocais utilizadas, apresentam variações aceitáveis para as pressões de ensaio, apresentando valores abaixo de 4%, conforme determinada pela NBR ISO 7749-2 (2005).

Os resultados obtidos pelo controlador PI do arduino, para as duas combinações de bocais utilizadas, mostram que as pressões de ensaio ajustadas por esse método de controle são extremamente assertivas, em relação ao alcance dos *setpoints* desejados, registrando

baixos valores de desvio. Rocha (2016) também observou a melhoria no ajuste da pressão de ensaio, em relação ao valor alvo, por meio da utilização de um controlador PID aplicado a ensaios para determinação da curva vazão versus pressão de microaspersores.

É importante destacar que apesar do controlador PI do arduino ter sido submetido as maiores variações de energia elétrica durante a execução dos ensaios, Tabela 11, o mesmo apresentou desempenho superior comparado às demais modalidades de ensaio, em relação a avaliação do desvio, dessa forma, pode-se afirmar que esse método de controle da pressão é o mais indicado. Dardengo, Antonio e Pereira (2011), destacam alguns problemas causados pelas variações de tensão de curta duração (VTCD's), dentre elas, a variação da velocidade de acionamentos (CA) e o torque de motores elétricos (CA). Da mesma forma Alvarenga et al. (2019) afirmam que as variações de tensão abaixo dos valores nominais, podem fazer com que motores de indução apresentem problemas no acionamento de cargas, uma vez que seu conjugado (torque) é diretamente proporcional ao quadrado da tensão.

A NBR ISO 7749-2 (2005) especifica que as pressões de ensaio podem apresentar variação de até 4%, porém não há especificações em relação ao desvio entre os valores de pressão desejada e a pressão média. Tal especificação é extremamente importante, pois os modos de controle da pressão que apresentem elevados valores de desvio poderão comprometer a veracidade dos dados obtidos pelos ensaios, gerando curvas vazão versus pressão erradas. Dessa forma, para futuras atualizações da Norma Regulamentadora vigente, recomenda-se que sejam acrescentados novos indicadores, como o desvio, para melhor avaliação dos modos de controle a serem utilizados, e que também sejam incluídas especificações para os modos de controle automático, pois as especificações atuais são baseadas apenas em modos de controle manual.

É importante ressaltar que embora o ensaio manual com inversor de frequência, para os bocais 4,0 x 2,8 mm, e o ensaio com controlador PI do inversor de frequência, para os bocais 6,4 x 3,2 mm, tenham apresentado variações de pressão abaixo do limite determinado pela NBR ISO 7749-2 (2005), eles não conseguiram atingir os *setpoints* desejados, registrando elevados valores de desvio. Dessa forma, a utilização do controlador PI do arduino, para as duas combinações de bocais, é o mais indicado, pois além de cumprir o requisito exigido pela norma, registrou os menores valores de desvio.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, podem-se verificar as seguintes constatações:

- Melhorias no ajuste e controle das pressões de ensaio foram alcançadas por meio da utilização do controlador desenvolvido (PI do arduino);
- O controle da pressão via controlador PI do arduino possibilitou com que as pressões de ensaio alcançassem os valores de *setpoint* desejados e se mantivessem estáveis durante a realização dos ensaios;
- O controlador PI do arduino obteve melhor desempenho frente as demais modalidades de ensaio, sendo o método de controle da pressão mais indicado para determinação da curva vazão versus pressão de aspersores rotativos;
- O controlador PI do inversor de frequência não atingiu os valores de *setpoint* desejados para os ensaios utilizando os bocais 6,4 x 3,2 mm;
- O controle manual com inversor de frequência não atingiu os valores de *setpoint* desejados para os ensaios utilizando os bocais 4,0 x 2,8 mm.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, A. B.; CUNHA, F. F.; RAMOS, M. M.; SOARES, A.A.; PIZZIOLO, T. A.; OLIVEIRA, R.A. Análise da automação em um sistema de irrigação convencional fixo por miniaspersão. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v. 15, n. 2, p. 109-118, 2007.
- ALT, G. H.; LAGES, W. F. Controle em tempo real de sistemas dinâmicos através de redes ip. In: Anais Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação, Sao Paulo, SP, Brasil. sn, 2003.
- ALTMANN, W. Practical Process Control for Engineers and Technicians. [S.l.]: Newnes, 2005.
- ALVARENGA, B. H.; ALMEIDA, D. M. de; CALENZANI, H. T.; CAMARGOS, I. A.; CENACHI, P. P.; PRIMO, H. F. A Influência da Variação de Tensão no Acionamento de Cargas por Motores de Indução: Um Estudo de Caso. In: XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2019, São Caetano do Sul. A Influência da Variação de Tensão no Acionamento de Cargas por Motores de Indução: Um Estudo de Caso, 2019.
- ANA - Agência Nacional das Águas. Atlas da Irrigação: Uso da água na agricultura irrigada. Brasília, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7749-2. Equipamentos de irrigação agrícola - Aspersores rotativos - Parte 2: Uniformidade de distribuição e métodos de ensaio. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 9261. Equipamentos de irrigação agrícola – Emissores e tubo emissores – Especificação e métodos de ensaio. 2006.
- ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. The future of PID control. Control Engineering Practice, Lund, v. 9, n.11, p. 1163-1175, 20 Nov. 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S09670666101000624?via%3Dihub>. Acesso em: 02/05/2021.
- BARRETO, L. .; FREITAS, A. C.; OLIVEIRA, M. . PANORAMA DA IRRIGAÇÃO NO BRASIL. ENCICLOPEDIA BIOSFERA, [S. l.], v. 5, n. 7, 2009. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/4868>. Acesso em: 30 jan. 2022.
- BEGA, E. A.; FINKEL, V. S.; KOCH, R. Instrumentação industrial, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, 2006.
- BEQUETTE, B. Wayne; Process control: modeling, design and simulation. Prentice-Hall. 2003.
- BERNARDO, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C.; Manual de irrigação. 8ª Ed. Viçosa: Ed. UFV, 2009.

- BOMBARDELLI, W, W, A. et al. Projeto e validação de uma bancada para ensaios de perda de carga localizada. *Brazilian Journal of Irrigation and Drainage*, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 1-10, 11 Set. 2017. Disponível em: <https://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/2789>. Acesso em: 28/04/2021.
- CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. *Revista de Política Agrícola*, v. 22, n. 1, p. 115-127, 2013.
- CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. *Irrigação e Tecnologia Moderna*, Brasília: ABID, n.54, p. 46-55, 2002.
- COELHO, E. F.; FILHO, M. A. C.; OLIVEIRA, S. L. de. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. *Bahia Agrícola*, v. 7, n. 1, p. 57-60, 2005.
- DARDENGO, V. P.; ANTÔNIO, A. S. da; PEREIRA, H. A. Impactos das Variações de Tensão de Curta Duração em uma Fábrica de Laticíneo In: IX Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2011, Cuiabá. IX Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2011.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de controle moderno*. 8ª. ed. LTC, 2001.
- FABRIMAR. (s.d.). Eco A232 - Tabela de desempenho. Acesso em 04/03/2022. Disponível em: [https://www.fabrimar.com.br/arquivos/produtos/994/fabrimar\(994\)_manual_tabela-de-desempenho-eco.pdf](https://www.fabrimar.com.br/arquivos/produtos/994/fabrimar(994)_manual_tabela-de-desempenho-eco.pdf)
- FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, [S. l.], v. 37, n. 4, pág. 529–535, 2019. DOI: 10.28951/rbb.v37i4.450. Disponível em: <https://biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/450>. Acesso em: 20 nov. 2022.
- FRIZZONE, J. A. Avaliação de sistemas de irrigação. In: MIRANDA, J. H. de; PIRES, R. Célia M. de. *Irrigação: Série engenharia agrícola*. 2a.ed. Piracicaba: Sbea, 2003. p. 581-582.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Agropecuário 2017. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 28 de junho de 2021.
- IE Tecnologia. (2021). SM-3W Lite - Manual do usuário. Acesso em 10/02/2022. Disponível em: https://www.dropbox.com/sh/xqfcnquyi99hjcp/AAAFSftFy3WDBaqqDeH5b6EFa/SM-3W_V4.pdf?dl=0
- LIMA, S. C. R. V.; FRIZZONE, J. A.; COSTA, R. N. T.; SOUZA, F.; PEREIRA, A. S.; MACHADO, C. C.; VALNIR JÚNIOR, M. Curvas de desempenho de válvulas reguladoras de pressão novas e com diferentes tempos de utilização. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.2, p.201-209, 2003.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. *Irrigação: princípios e métodos*. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2009.
- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5ª. ed. Pearson Education, 2010.

- OLIVEIRA, A. L. L.; Instrumentação – Fundamentos de Controle de Processo. SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Espírito Santo. 1999.
- OLIVEIRA, D.P.; VALNIR JÚNIOR, M.; CARVALHO, M.A.R.; CARVALHO, C.M.; LIMA, S.C.R.V.; CARVALHO, L.C.C. Análise de controle e confiabilidade de laboratórios em microaspersores utilizando testes estatísticos de Dixon. Revista Agropecuária Técnica, v.31, n.2, p.91-95, 2010.
- OLIVEIRA, F. Água – Uso Racional: Urgente necessidade de alimentar o mundo. Paracatu Rural, 2018. Disponível em: <https://www.paracaturural.com/agua-uso-racional-urgente-necessidade-de-alimentar-o-mundo/>. Acesso em: 30 jan. 2022.
- PEREIRA, G. M. Aspersão convencional. In: MRANDA, J. H., PIRES, R. C. M., editores. Irrigação. Vol. 2. Piracicaba: FUNEP, 2003. p. 107-178.
- PINTO, M. F. et al. Desempenho de lógicas de controle para o ajuste automático do ph da água utilizada em microirrigação. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage, Botucatu, v. 18, n. 4, p. 708-720, 12 Nov. 2013. Disponível em: <https://200.145.140.50/index.php/irriga/article/view/683>. Acesso em: 13/06/2021.
- PINTO, M. F. et al. Desempenho de lógicas de controle para o ajuste automático do pH da água utilizada em microirrigação. Irriga, v. 18, n. 4, p. 708-720, 2013.
- PIRES, P. V. Sintonia de um controlador pid em um sistema de controle de vazão. Revista da Graduação, [S. l.], v. 7, n. 2, 2014. Disponível em: <https://revistaseletronicas.pucrs.br/index.php/graduacao/article/view/19526>. Acesso em: 26 jan. 2023
- PIZARRO, F. R. Localizados de alta frecuencia - goteo - microaspersion – exudacion. 3o ed. Madri: Ed. Mundi, 1996. 513p.
- QUEIROZ, T. M.; LIMA, S. C. R.V.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A. Coletor automático para ensaio de aspersores em laboratório – desenvolvimento do modelo. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v.2, n.1, p.24–28, 2008.
- RICARDO, H. C. de.; SALVADOR, C. A.; PINTO, M. F.; ALVES, D. G.; CHARLES, T. S. da; CAMARGO, B. T de C.; ESTIMA, P. H. O. de. Automação em bancada para ensaios hidráulicos de válvulas reguladoras de pressão / Automação de bancada para testes hidráulicos de válvulas reguladoras de pressão. Revista Brasileira de Desenvolvimento, [S. l.], v. 6, n. 8, pág. 57121–57134, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n8-209. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/14824>. Acesso em: 27 jan. 2023.
- ROCHA, H, S. Controle estatístico de qualidade aplicado a ensaios de material de irrigação. Tese (Doutor em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, p. 88. 2016.
- ROCHA, H. S.; CAMARGO, A. P.; MARQUES, P. A. A.; PERBONI, A. P.; LAVANHOLI, R.; FRIZZONE, J. A. Estabilidade e índice de capacidade para processo de medição de

perda de carga. In: II Inovagri Internacional Meeting. Fortaleza-CE, Brasil, 2014. Anais... II Inovagri International Meeting. Fortaleza-CE, Brasil, 2014.

SARETTA, E. Análise da incerteza de um sistema automatizado para ensaios de aspersores de irrigação. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, p. 75. 2016.

TESTEZLAF, R. Irrigação: Métodos, sistemas e aplicações. Campinas: Unicamp/FEAGRI, 2017.

TESTEZLAF, R. Irrigação: Métodos, sistemas e aplicações. Campinas: Unicamp/FEAGRI, 2017.

WEG S/A. (2013). CFW10 - Manual do Usuário. Acesso em 25/04/2022. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0d/h99/WEG-cfw10-manual-do-usuari-o-0899.5860-2.xx-manual-portugues-br.pdf>

ZURICH INSURANCE GROUP LTD. (2018). PSI.420 – Manual do Usuário. Acesso em 02/05/2022. Disponível em: <https://www.zurichpt.com.br/pdf/psi.420.pdf>