

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA POLITÉCNICA

**SISTEMA EM MALHA FECHADA COM BOMBA CENTRÍFUGA E
ANÁLISE DO SISTEMA OPERACIONAL**

Porto Alegre, vinte e sete de novembro de 2024

Autor: Lucas Gutierrez Mendes

Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Graduação em Engenharia de Controle e Automação
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - CEP: 90619-900 - Porto Alegre - RS - Brasil
Email: lucas.antoniolli@edu.pucrs.br

Orientador: Prof. Milton Machado de Souza Junior

Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Bloco F - Sala 117 - CEP: 90619-900 - Porto Alegre - RS -
Brasil
Email: milton.junior@pucrs.br

RESUMO

Este trabalho aborda a instrumentação e o controle de uma planta piloto de bombeamento de água localizada no laboratório de sistemas fluido-térmicos da PUCRS. A planta é composta por um sistema de bombeamento que utiliza uma bomba centrífuga, acionada por inversor de frequência. Como instrumentos de mensuração, são utilizados transmissores de pressão e de fluxo. Para garantir que o sistema opere sempre com o mesmo valor de pressão, o estudo buscou implementar um controle em malha fechada, tendo como parâmetro de “*Setpoint*” a pressão de operação desejada. Para ajustar esse parâmetro, o sistema atua na RPM da bomba, variando a frequência do inversor. A IHM (Interface Homem-Máquina) é responsável pela malha de controle, realizando funções típicas de um CLP.

Embora o sistema utilize equipamentos e instrumentos industriais, suas dimensões reduzidas acabam por potencializar as respostas, permitindo mudanças praticamente instantâneas. O projeto utilizou o software “*EasyBuilder Pro*” para a programação do CLP e a aquisição de dados de rotação por minuto (RPM) e pressão do sistema (BAR). Os dados coletados foram analisados com metodologias de controle, como a identificação da função de resposta (IDENT) e a aplicação do sistema de controle (RLTOOL) utilizando a ferramenta MATLAB.

O comportamento do sistema inviabilizou o uso de técnicas de controle PID. Como alternativa, foram utilizados métodos empíricos para a aferição dos parâmetros, aplicando um controle proporcional em malha fechada. O sistema apresentou resultados promissores, mantendo a pressão desejada, mesmo diante de variações no processo.

Palavras-chave: Malha Aberta, PID, Motobomba, Malha Fechada.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de bombeamento de água são cada vez mais essenciais para o desenvolvimento das grandes cidades, sendo partes importantes na capacidade e no gerenciamento das demandas de consumo de uma cidade. As variações apresentadas nos sistemas bem como a complexidade no fornecimento adequado em uma cidade que apresenta malhas de distribuição gigantes e com muitas variáveis de influência. Torna a necessidade de diversos sistemas de bombeamentos espalhados pelas cidades. (Rodrigues, 2007)

As bombas centrífugas são essenciais no transporte destes fluidos, onde é crucial manter parâmetros como pressão e vazão dentro dos limites operacionais. Para atender a essa necessidade, sistemas de controle em malha fechada permitem ajustar automaticamente a

operação da bomba, aumentando a precisão e a estabilidade do sistema. A necessidade de realizar o controle de forma eficiente e constante, torna o controle em malha fechada uma necessidade do processo.

Este projeto realizou desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada para uma bomba centrífuga, utilizando um controlador Proporcional, sintonizado pelo método de Ziegler-Nichols. A metodologia inclui a caracterização inicial da curva de desempenho em malha aberta, seguida pela implementação e análise do controle em malha fechada em um CLP. O estudo visa aprimorar a precisão e confiabilidade operacional da bomba, oferecendo contribuições para o controle automatizado para suas diversas aplicações.

1.1 Motivação

Com experiência na área de motobombas, o objetivo foi expandir o conhecimento sobre a identificação e o controle de processos em sistemas de pressurização de água. Esse aprimoramento contribui para a execução mais precisa e eficiente de futuros projetos, reduzindo divergências técnicas, aumentando a confiabilidade dos clientes e gerando resultados positivos.

1.2 Objetivo

O objetivo deste projeto é desenvolver e implementar um sistema de controle em malha fechada para o processo de pressurização de água em uma planta piloto de bombeamento. Busca-se garantir a estabilidade da pressão do sistema, ajustando a variável manipula (RPM) da bomba conforme necessário.

1.3 Delimitações do Trabalho

Este trabalho tem como delimitação a modificação de um processo de controle em malha aberta para malha fechada. O foco será a análise das adaptações necessárias para a integração do sistema de controle, além de examinar as melhorias no desempenho e na estabilidade do processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos e os principais componentes do sistema de motobombas centrífugas, essenciais para o transporte de fluidos em aplicações industriais. Inicia-se com uma análise do funcionamento das motobombas centrífugas, detalhando a interação entre o motor elétrico e a bomba para gerar energia mecânica de transporte de fluidos (PROCEL, 2009). A seguir, são abordados os transdutores de pressão e os inversores de

frequência, dispositivos fundamentais para o controle preciso de pressão e velocidade do motor, assegurando eficiência no uso de energia. O Controlador Lógico Programável (CLP) é descrito como um sistema de automação central que gerencia a operação e coordena o funcionamento integrado dos componentes. O capítulo também explica o uso do protocolo MODBUS para comunicação entre dispositivos, favorecendo o monitoramento e ajuste contínuos do sistema. Por fim, são apresentados os princípios de controle em malha aberta e fechada, abordando as vantagens do controle em malha fechada para manter a precisão e a estabilidade dos processos industriais.

2.1 Princípios de Processo de Controle

Os processos de controle são essenciais para garantir a operação estável e eficiente de sistemas em diversas aplicações industriais. Baseiam-se na capacidade de ajustar variáveis de saída para alcançar o desempenho desejado. Este controle é crucial para a segurança, produtividade, economia de energia e otimização de recursos (OGATA, 2010).

Sistemas de controle podem ser definidos de diversas maneiras, mas, em essência, são formados pela integração de diferentes elementos, como sensores, atuadores, o processo em si e o controlador. O objetivo principal é regular as variáveis de um processo dinâmico para que permaneçam dentro de limites previamente estabelecidos, utilizando dados fornecidos pelos sensores. Esses limites são chamados de valores de referência, ou setpoints, e representam as condições ideais para o funcionamento eficiente do processo.

De maneira geral, os sistemas de controle são categorizados em dois tipos: malha aberta e malha fechada. A seguir, será apresentada uma breve descrição de cada tipo, acompanhada de seus respectivos diagramas de blocos para facilitar a compreensão.

2.2 Identificação de sistemas em Malha Aberta

Entre os métodos estudados neste projeto, o da resposta ao degrau é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e facilidade de interpretação.

O estudo utilizando método de Ziegler e Nichols na sua maioria propõem uma técnica para a estimação de um modelo de primeira ordem com atraso de transporte, que envolve a determinação dos parâmetros do modelo através de uma reta tracejada no ponto de máxima inclinação da curva de resposta ao degrau (OGATA, 2010).

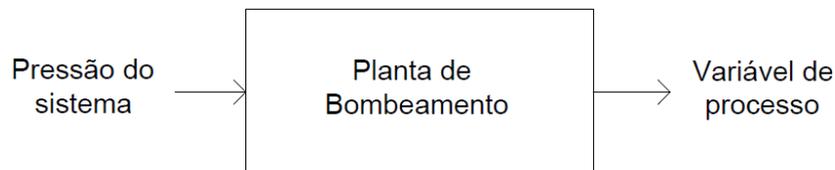
Já o método de Yuwana e Seborg (1982) são voltados para a identificação de um sistema de primeira ordem com atraso de transporte, considerando uma malha de controle com controlador proporcional em série ao sistema, acompanhado de realimentação unitária negativa.

Neste caso, é feita uma aproximação matemática para o atraso de transporte, tratando-o como uma não linearidade do sistema, e o modelo estimado é baseado em pontos específicos da curva de resposta ao degrau (AGUIRRE, 2015).

Os trabalhos de Ljung e Glad (1987), Söderström e Stoica (1989) e Ljung (1996) foram pioneiros na área de identificação de sistemas, abordando diversas técnicas de modelagem, tanto físicas quanto empíricas. A abordagem empírica foi aplicada a sistemas lineares e não lineares, e essas obras destacam teorias voltadas para a identificação no domínio da frequência, além de diferentes métodos de estimação de parâmetros. Outro aspecto importante dessas pesquisas são os métodos recursivos de identificação, aplicáveis em tempo real. Nesses casos, o modelo ajusta seus parâmetros à medida que o sistema sofre variações, sendo uma técnica fundamental para o desenvolvimento de sistemas de controle adaptativo, especialmente em sistemas complexos (COELHO, 2004).

O controle em malha aberta (figura 01) não faz uso de realimentação. Ele opera com base nas condições iniciais presumidas e constantes dos dados de entrada. Não há meios de eliminar possíveis erros na saída da mesma em relação ao valor desejado (SANTANA, 1998).

Figura 01 – Controle malha aberta.

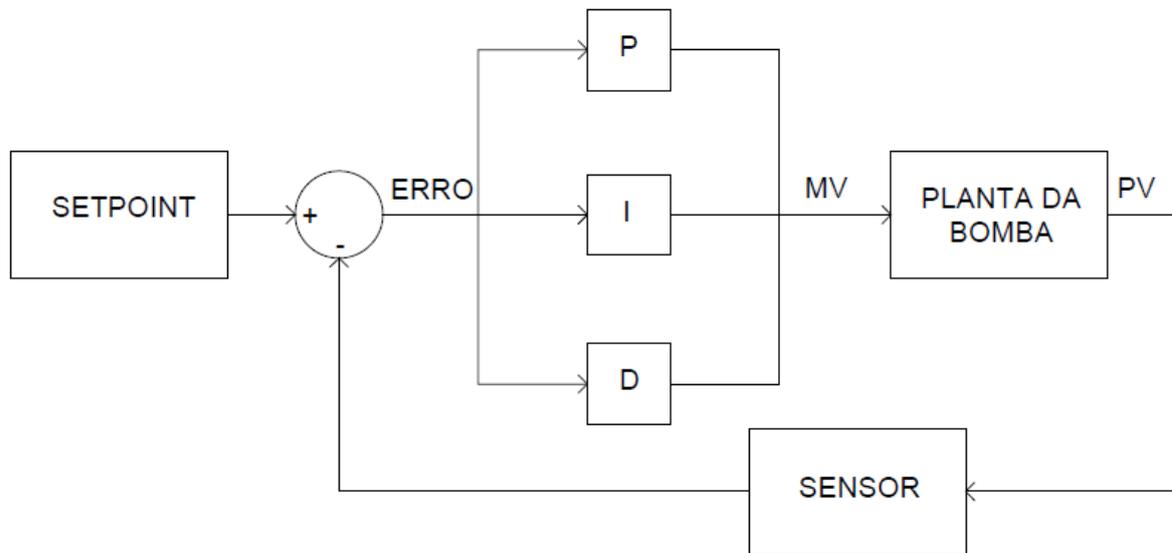


Fonte: Desenho adaptado de SANTANA (1998)

2.3 Controle em Malha Fechada

Segundo Ogata (2010) os sistemas de controle com retroalimentação são frequentemente chamados de controle em malha fechada. Em um sistema de controle em malha fechada, o sinal que representa a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de retroalimentação é denominado sinal de erro. Esse sinal é responsável por ativar o controle, que ajusta o sistema de forma a reduzir o erro até um valor igual ou próximo a zero. Dessa maneira, o sistema garante que o sinal de saída atinja o valor desejado de referência. Como mostrado na figura 02.

Figura 02 – Controle malha fechada.



Fonte: Desenho adaptado de Ogata (2010)

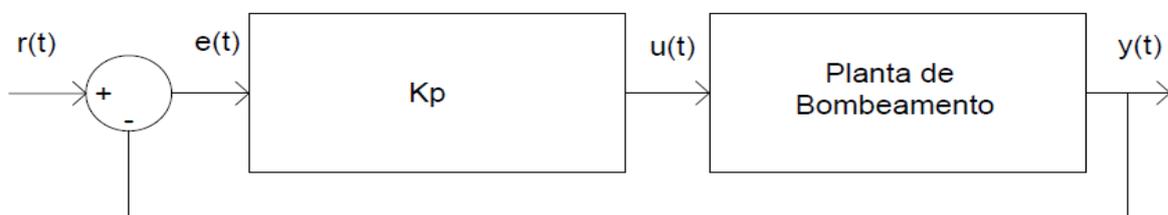
2.3.1 Proporcional

O controle proporcional é uma das formas mais básicas de controle por feedback, amplamente empregada em malhas de controle (figura 03). Nesse método, o sinal de erro é ajustado por meio de uma constante antes de ser transmitido ao atuador (T. Wescott, 2000).

A relação entre o sinal de saída e o sinal de erro nesse tipo de driver é expressa pela Equação (OLIVEIRA, 1994):

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

Figura 03 – Controle malha fechada por ganho proporcional.

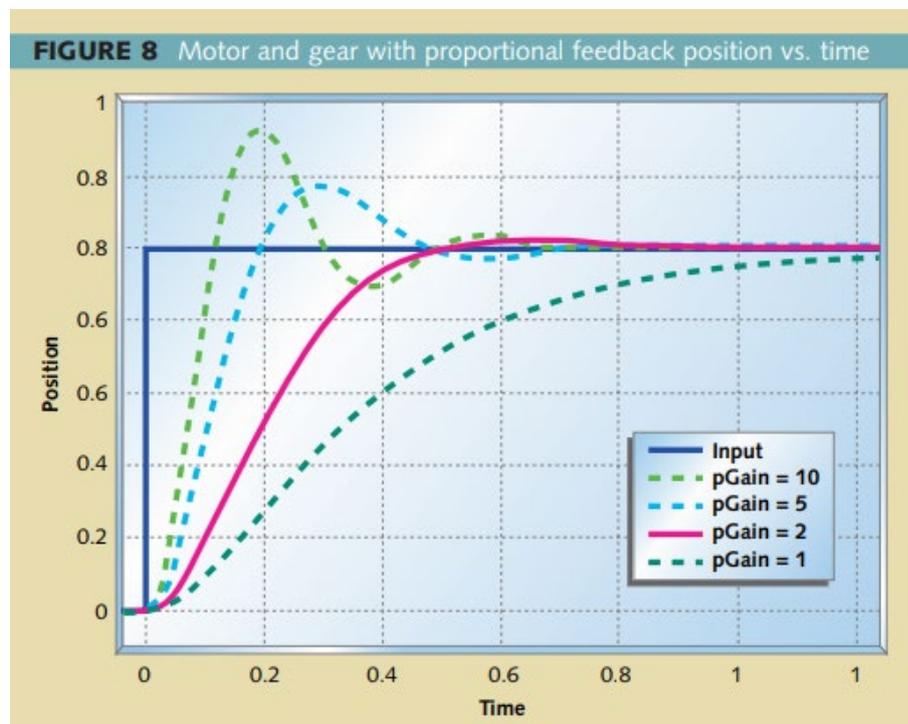


Fonte: Desenho adaptado de Ogata (2010)

A figura 04 ilustra o efeito da realimentação proporcional em um sistema composto por motor e engrenagem. Com um ganho baixo, como $K_p = 1$, o motor atinge o alvo desejado, mas

de forma lenta. Ao aumentar o ganho para $Kp = 2$, a resposta se torna mais rápida, até certo limite. Entretanto, para ganhos mais elevados, como $Kp=5$ e $Kp=10$, o motor responde mais rapidamente, mas ocorre ultrapassagem (overshoot) em relação ao alvo. Se o ganho continuar a aumentar, o sistema poderá alcançar um ponto onde oscila constantemente em torno do setpoint, sem se estabilizar, tornando-se instável. O overshoot ocorre em ganhos altos devido ao atraso (delay) na resposta do motor. Como o sistema apresenta um polo na origem, a resposta proporcional elimina a ocorrência do erro de offset mesmo em uma ação puramente proporcional.

Figura 04 – Gráfico de um controle proporcional num sistema de motor de engrenagem.



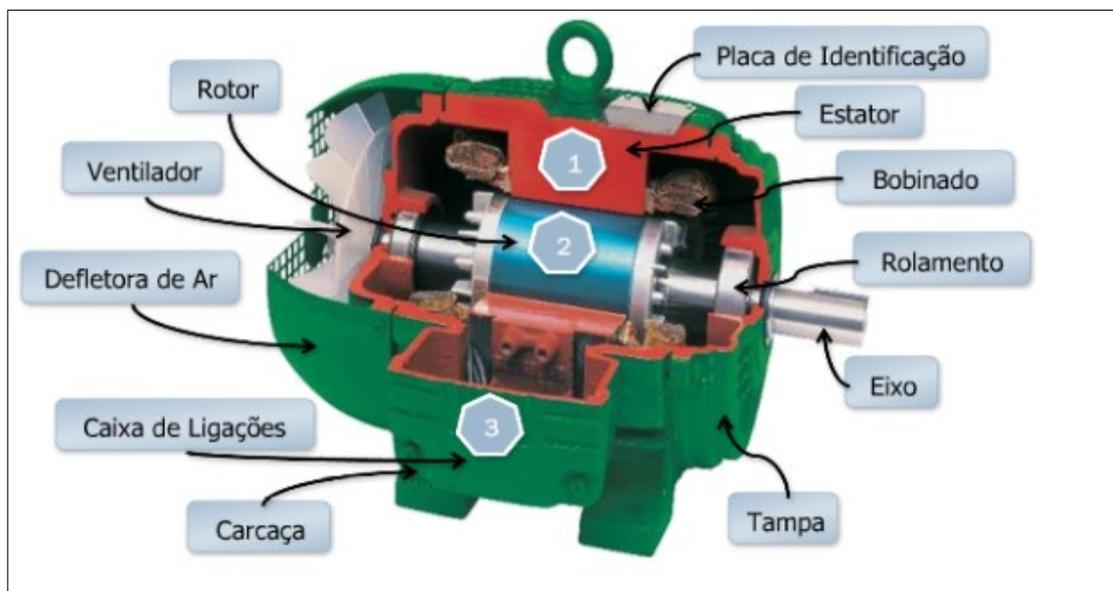
Fonte: Wescott , 2000

2.4 Bombas Motoras Centrífugas

As motobombas centrífugas é um equipamento que faz a combinação de um motor elétrico de indução e uma bomba centrífuga para fazer o transporte de fluidos, como por exemplo: água. O motor elétrico, geralmente é do tipo gaiola de esquilo, que faz a conversão da energia elétrica para energia mecânica, sendo transmitida pelo eixo da bomba (PROCEL, 2009). Os principais componentes desse motor são dois, o rotor e o estator. O rotor é responsável pela parte móvel do motor, enquanto o estator é a parte fixa do motor. O Rotor é composto por três principais componentes, sendo o núcleo de chapas que possuem as mesmas propriedades e características das chapas do estator. Outro componente é o eixo que faz a

transmissão da potência mecânica desenvolvida pelo motor, esse material é um metal tratado termicamente, o último componente do rotor são os rolamentos, como podemos observar na figura 05.

Figura 05 – Partes de um motor de indução.



Fonte: Weg

Já no estator é composto também por três principais, sendo o primeiro a Carcaça, que é a estrutura que serve de suporte para todos os outros componentes do motor elétrico, feito de material metálico de ligas de aço ou alumínio. Outro componente é o Bobinado, que é composto pelas bobinas de fios de cobre para cada fase elétrica de alimentação do motor. Sendo esses componentes envolvidos pelo núcleo de chapas, que são compostas por aço magnético, pode ser visualizada no detalhe em laranja da figura 05. há também outros componentes que fazem parte do conjunto como um todo do motor elétrico, como o ventilador, defletora de ar, tampa, caixa de ligação e entre outros (Devitte,2012).

O motor de indução opera com base na indução de correntes no rotor a partir do campo magnético girante do estator. Essa indução ocorre devido ao movimento relativo entre rotor e campo magnético. Se o rotor girar na mesma velocidade do campo magnético (velocidade síncrona), não haverá variação do campo e, portanto, não haverá corrente induzida no rotor (Loureiro, 2009). A bomba centrífuga, por sua vez, utiliza a rotação do rotor para gerar força centrífuga, impulsionando o fluido do ponto de sucção para a descarga.

2.5 INVERSOR DE FREQUENCIA

Os inversores de frequência, também chamados de conversores estáticos de frequência, operam convertendo a tensão alternada senoidal da rede de entrada em uma tensão contínua. Esta, por sua vez, é transformada em uma nova tensão alternada com amplitude e frequência ajustáveis, de acordo com as necessidades específicas.

O funcionamento básico de um inversor de frequência envolve três blocos principais: um bloco retificador na entrada, seguido por um circuito intermediário que contém um banco de capacitores eletrolíticos, e, finalmente, o bloco inversor, responsável por gerar a corrente alternada na frequência desejada. Esse tipo de dispositivo permite o controle da velocidade de um motor de indução trifásico de corrente alternada, pois a velocidade angular do eixo do motor está diretamente ligada à frequência da rede elétrica. O ajuste ocorre por meio da variação do fluxo magnético, o qual depende da tensão e da frequência aplicadas. Para manter o torque constante, é necessário manter também o fluxo magnético constante, o que implica variar simultaneamente a tensão e a frequência. Até a frequência nominal do motor, essa variação é linear. Acima dessa frequência, entra-se na chamada “região de enfraquecimento de campo,” onde o fluxo magnético começa a diminuir, causando uma queda no torque. A potência também se ajusta proporcionalmente à variação de tensão e frequência (Azevedo, 2018).

2.6 Controlador Lógico Programável (CLP)

Os Controladores Programáveis (CLPs), conhecidos também como Controladores Lógicos Programáveis (PLC, do inglês Programmable Logic Controller), surgiram como solução para as necessidades de automação da indústria automobilística. Antes de sua criação, os sistemas de controle lógico baseavam-se em painéis eletromecânicos, cuja complexidade dificultava alterações e ajustes. Esses sistemas demandavam altos custos e longos períodos para modificações na lógica de funcionamento, fatores que prejudicavam a flexibilidade e a eficiência das linhas de produção.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), um CLP é definido como um equipamento eletrônico digital, projetado com hardware e software compatíveis com aplicações industriais. Por sua vez, a National Electrical Manufacturers Association (NEMA) o descreve como um dispositivo eletrônico digital que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e implementar funções específicas, como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética. Através de módulos de entrada e saída, os CLPs controlam diversos tipos de máquinas ou processos.

Os CLPs de quinta geração apresentam avanços significativos, como a padronização de protocolos de comunicação. Isso facilita a interface com outros dispositivos e sistemas supervisórios, ampliando sua aplicabilidade. Esses avanços, aliados à redução dos custos de fabricação e à crescente diversidade de modelos e fabricantes, possibilitaram o uso de CLPs em diferentes áreas, incluindo automação industrial, comercial e residencial (ZANCAN, 2011).

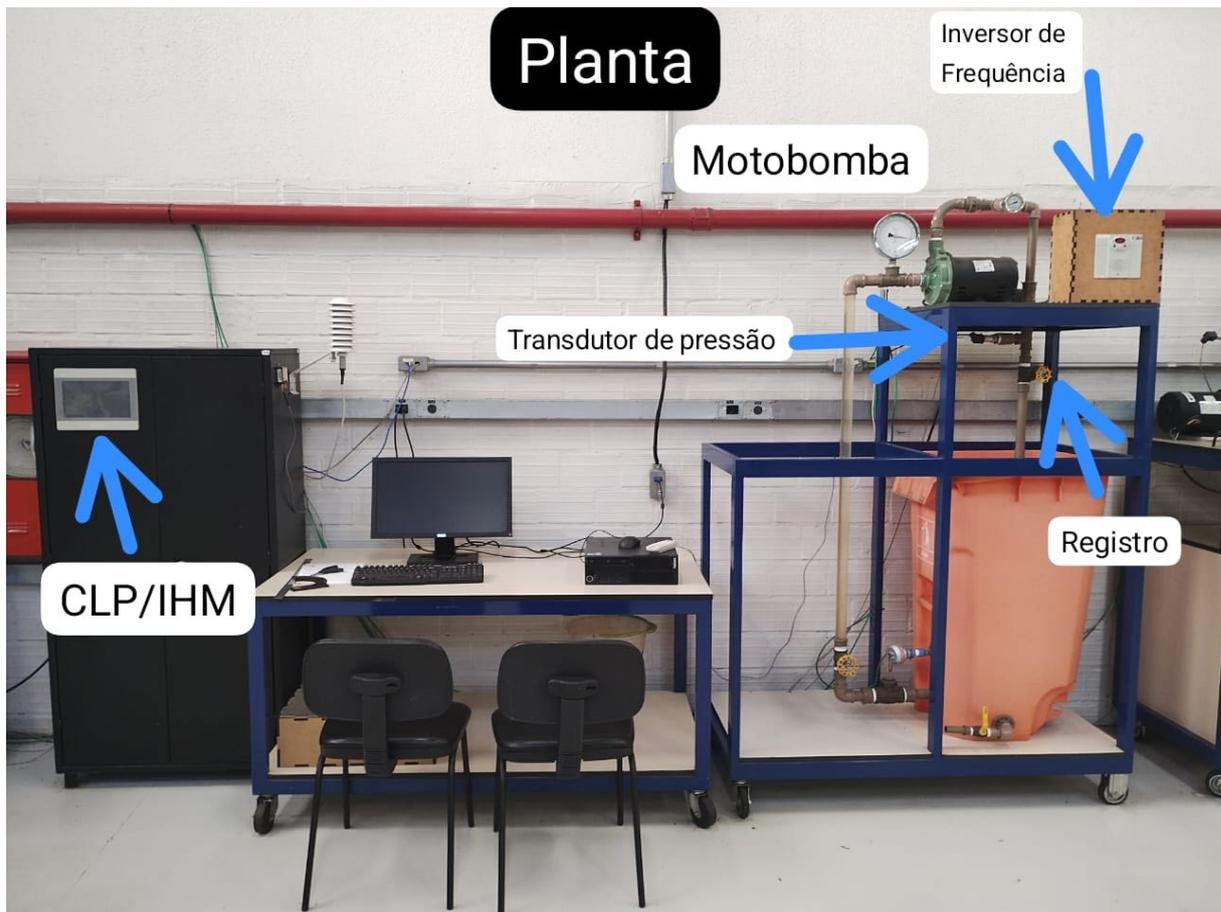
Os Controladores Programáveis oferecem diversas vantagens em relação aos painéis eletromecânicos tradicionais:

- Maior confiabilidade e flexibilidade;
- Redução do espaço físico necessário;
- Menor consumo de energia;
- Facilidade na programação e reprogramação;
- Reutilização para outros processos;
- Maior rapidez no desenvolvimento de projetos;
- Capacidade de comunicação com outros dispositivos.
- Esses fatores tornam os CLPs indispensáveis para soluções de automação modernas.

3 METODOLOGIA

A metodologia nesse trabalho abrange duas etapas principais para a análise e controle de uma planta de uma motobomba presente na PUCRS (figura 06). Na primeira etapa, realiza-se a coleta de dados em malha aberta com a relação entre pressão e rotação por minuto (RPM) para montar graficamente a curva de saída do sistema. Utiliza-se um transdutor de pressão para captar os valores de pressão da motobomba, enquanto o inversor de frequência ajusta a rotação do motor, com todos os dados sendo monitorados e adquiridos via comunicação MODBUS com o CLP. Na segunda etapa, configura-se o sistema em malha fechada, implementando um controlador no CLP que utiliza os dados da etapa anterior para ajustar a pressão de forma automática e precisa. O CLP monitora continuamente o transdutor de pressão e controla o inversor de frequência para manter a pressão conforme os parâmetros de controle estabelecido.

Figura 06 – Planta.



Fonte: laboratório de sistemas fluidotérmicos da PUCRS

Neste trabalho é buscado a resposta com a estabilização mais rápida. Para isso, foi colocado diferentes ganhos onde foram visualizadas suas diferentes respostas.

Com a realização deste trabalho foi observado que para um sistema de pressurização de água, é vantajoso utilizar um sistema em malha fechada para manter estável a pressão do sistema e até mesmo diminuir o consumo de energia elétrica por não precisar usar a rotação máxima da motobomba modulando a rotação do motor através do inversor de frequência.

Ao invés de usar toda a capacidade de potência do motor elétrico toda vez que a pressão cair, o sistema só utilizará a rotação necessária para manter a pressão estável e apenas variando a velocidade do motor para atingir o setpoint desejado.

Para chegar nessa observação, foi realizado duas etapas. Na etapa 1 foi feita a coleta de dados e posteriormente analisados para que com essas informações pudesse ser executado a segunda etapa. Na etapa 2, foi fechado a malha pelo meio do ganho proporcional e calibrado o sistema com três ganhos diferentes como analisaremos a seguir.

3.1 Etapa 1: Retirando dados da malha aberta.

Nesta etapa foi caracterizado a curva de resposta da motobomba em malha aberta, estabelecendo a relação entre a pressão e a rotação (RPM) do motor. Esse processo é essencial para entender como o sistema responde em diferentes condições, sem qualquer controle ativo, o que permite determinar o comportamento da motobomba ao variar a frequência da entrada.

Passo 1 – Configurações dos equipamentos e comunicação:

- Foi utilizado um CLP para controlar e monitorar o sistema. O CLP foi responsável pela aquisição e registro dos dados de pressão e rotação.
- Foi configurado o inversor de frequência para ajustar a rotação do motor da motobomba. Através do inversor, foi possível definir diferentes pontos de operação, variando a frequência e conseqüentemente, a velocidade do motor.
- Há instalado um transdutor de pressão no sistema de recalque da motobomba para medir a pressão de saída em tempo real. O transdutor está conectado diretamente no CLP, que fez a leitura e armazenamento dos dados de pressão.

Passo 2 – Procedimento da coleta de dados:

- Foi definido uma faixa de RPM a serem testadas, com pontos de operação específico de 2000 rpm e 4000 rpm.
- Foi armazenado todos os dados de pressão e rotação salvos pelo CLP num pendrive, criando uma tabela de valores de RPM x pressão.
- Todas as aferições foram feitas num intervalo de 1 segundo.

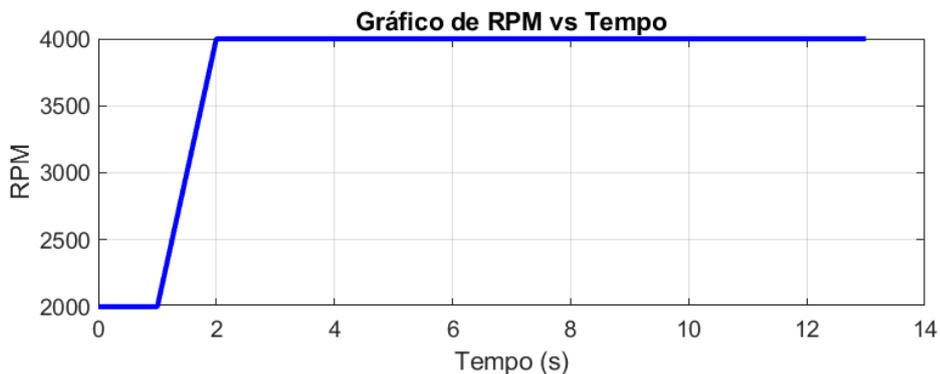
Passo 3 – Registro e armazenamento de dados:

- Os dados coletados foram exportados para o software de análise MATLAB para posterior análise.
- Esses dados serviram de base para traçar a curva de resposta da motobomba em malha aberta. A curva relacionou a pressão de saída em função da rotação (figura 07 e figura 08).

Passo 4 – Análise dos dados e geração da curva de desempenho.

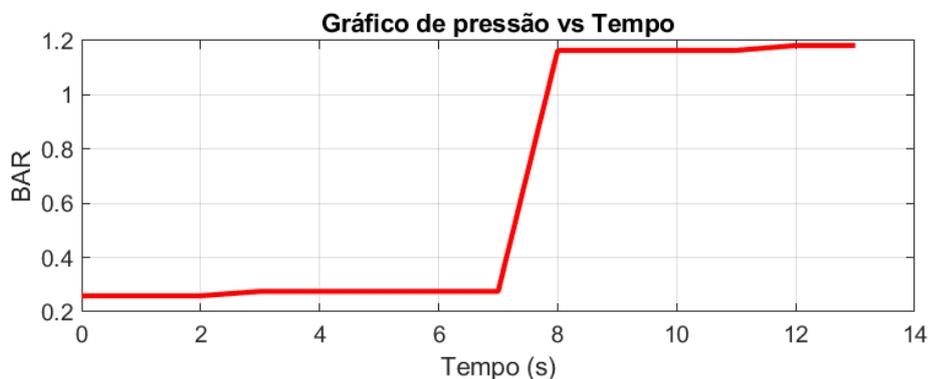
- Com os dados coletados, foi criado um gráfico de pressão x rotação em relação aos tempos de aferição.

Figura 07 – Gráfico de RPM x tempo.



Fonte: Própria através do software MATLAB.

Figura 08 – Gráfico de pressão x tempo.

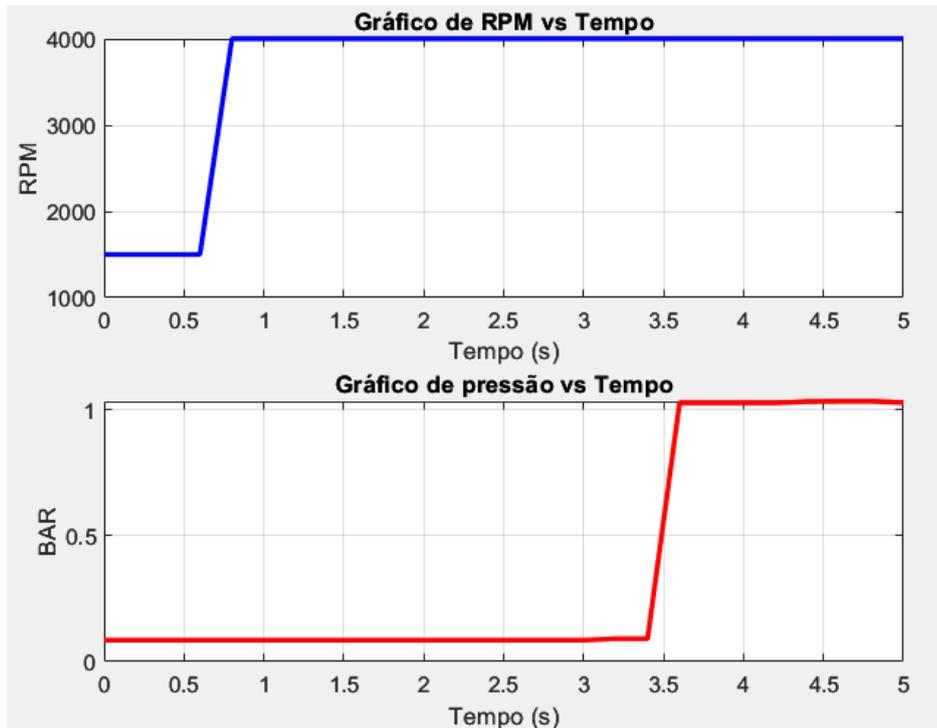


Fonte: Própria através do software MATLAB.

- A curva resultante indicou como a pressão de saída varia em função da rotação sem nenhum controle ativo (malha aberta). Esses gráficos foram essenciais para entender a dinâmica do sistema e os pontos de operação onde a motobomba pode operar com eficiência.

Continuando ainda na etapa 1, foi visto que o gráfico referente a pressão não está correto devido ao tempo de aferição ser muito espaçado. Foi refeito o passo 2 com pontos de operação específico de 1500 rpm e 4000 rpm. Nesta segunda análise o tempo de aferição foi calibrado em 0,2 segundos (o tempo mais rápido que o equipamento presente pode realizar) e obtivemos um novo gráfico (figura 09).

Figura 09 – Gráfico de RPM e Pressão em relação ao tempo.



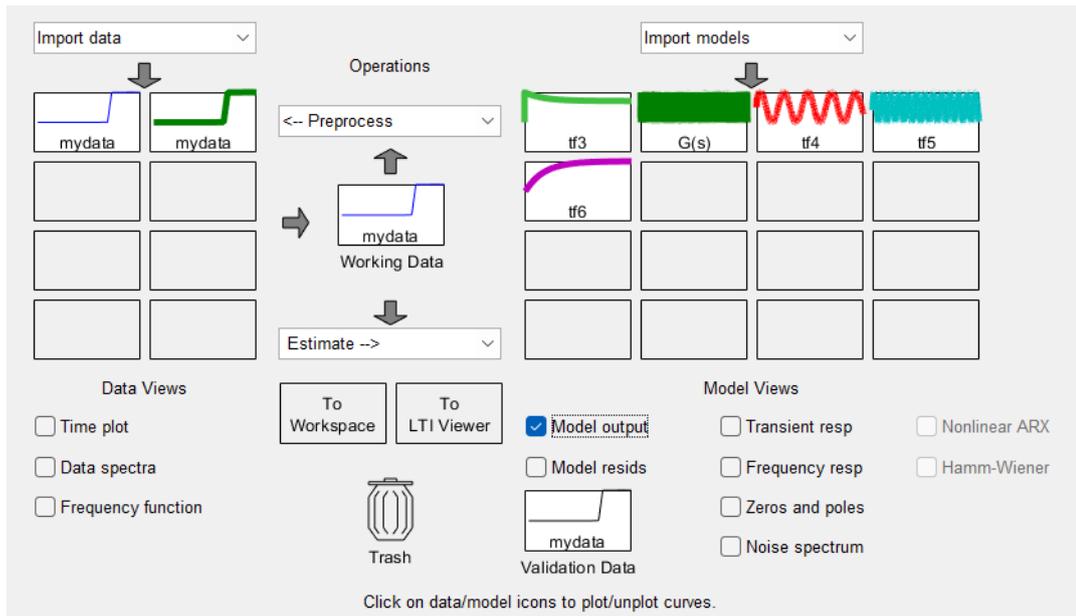
Fonte: Própria através do software MATLAB.

Percebe-se que graficamente não tivemos muitas mudanças, obtendo uma reta de subida novamente.

Continuando a partir desse último gráfico, foi usado no software do MATLAB a função “ident” para montar a função de transferência.

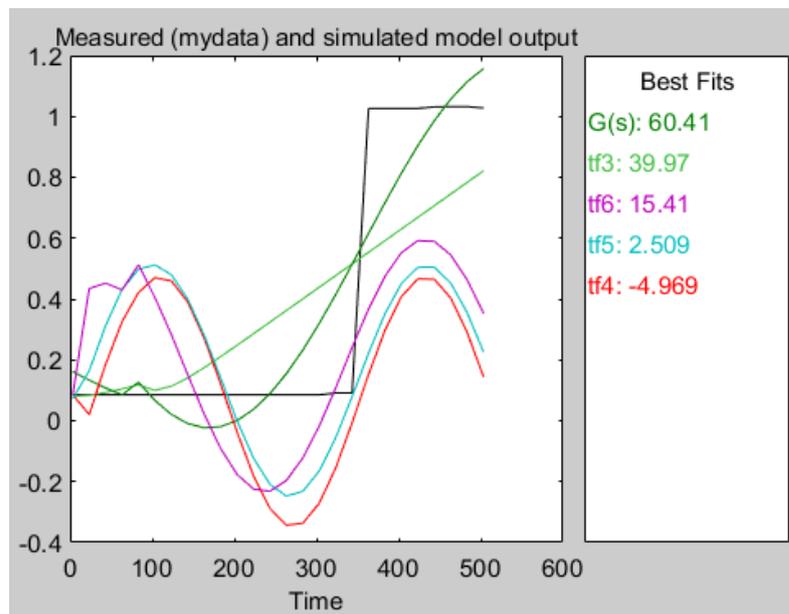
Na função ident (figura 10) foi calibrado que a entrada do sistema seria o RPM e a saída seria a pressão. A função onde conseguimos maior valor em porcentagem de semelhança com a curva, foi uma função de 2 polos e 2 zeros onde chegou a 60,41% conforme vemos na figura 11.

Figura 10 – Ident.



Fonte: Própria através do software MATLAB.

Figura 11 – Simulação da curva de função de transferência.



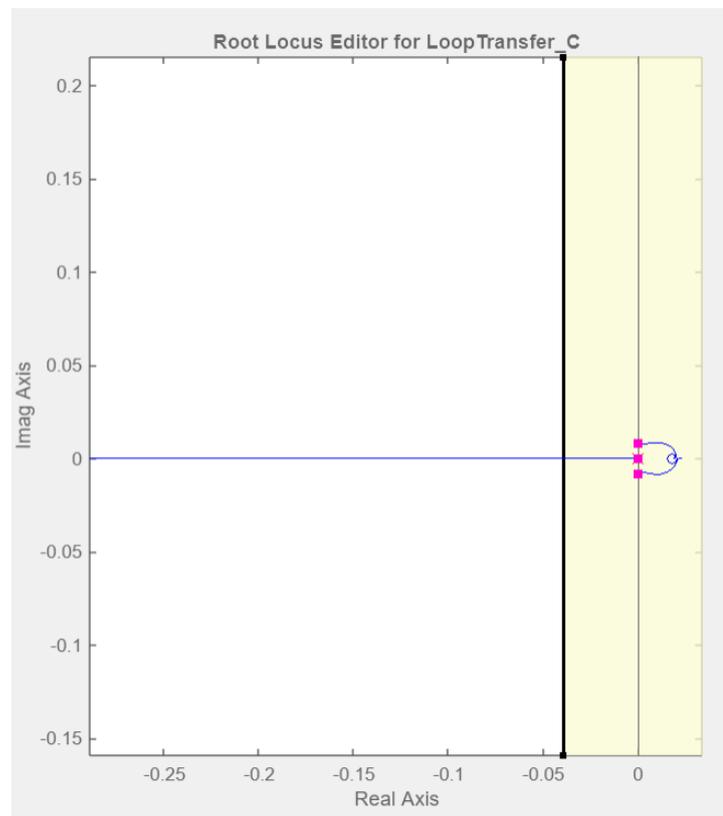
Fonte: Própria através do software MATLAB.

A função de transferência mais próxima da planta real encontrada através do software foi a seguinte:

$$G(s) = \frac{2.422e - 05 s^2 - 1.002e - 06 s + 1.021e - 08}{s^2 + 1.043e - 10 s + 6.977e - 05}$$

Para tentar fechar a malha, foi usado o rltool (figura 12), e assim com auxílio dele, encontrar o compensador. Foi visto que para estabilizar essa malha teria que haver um compensador muito elevado. Foi calibrado em 100 segundos como requerimento (figura 13) para o compensador estabilizar a malha. Mesmo com todo esse tempo, teria que gerar um compensador muito elevado (figura 14) para que isso ocorresse. Foi trocado diversas vezes e não foi obtido êxito na estabilidade da planta (figura 15).

Figura 12 – rltool.



Fonte: Própria através do software MATLAB.

Figura 13 – tempo de estabilização.

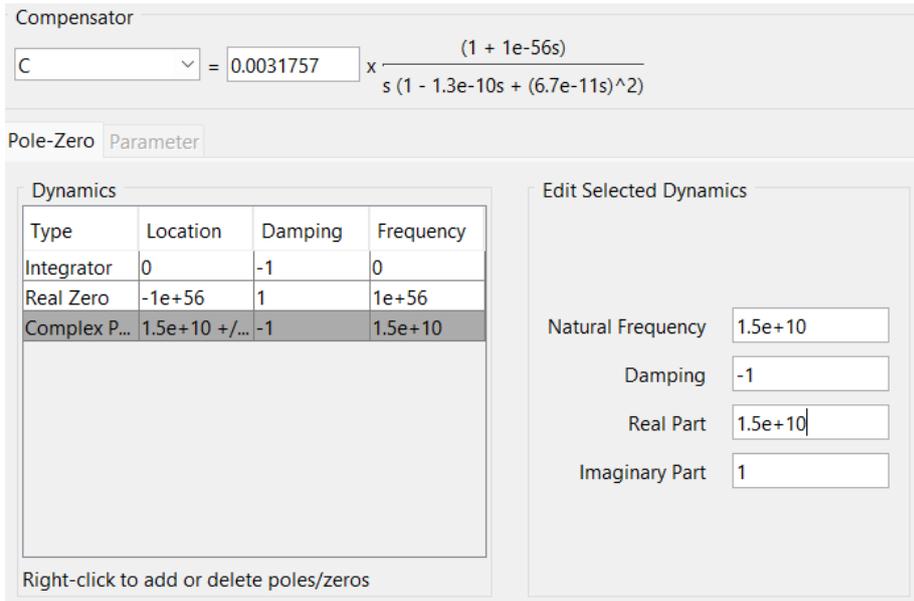
Design requirement: ▼

Design requirement parameters

Settling time < seconds

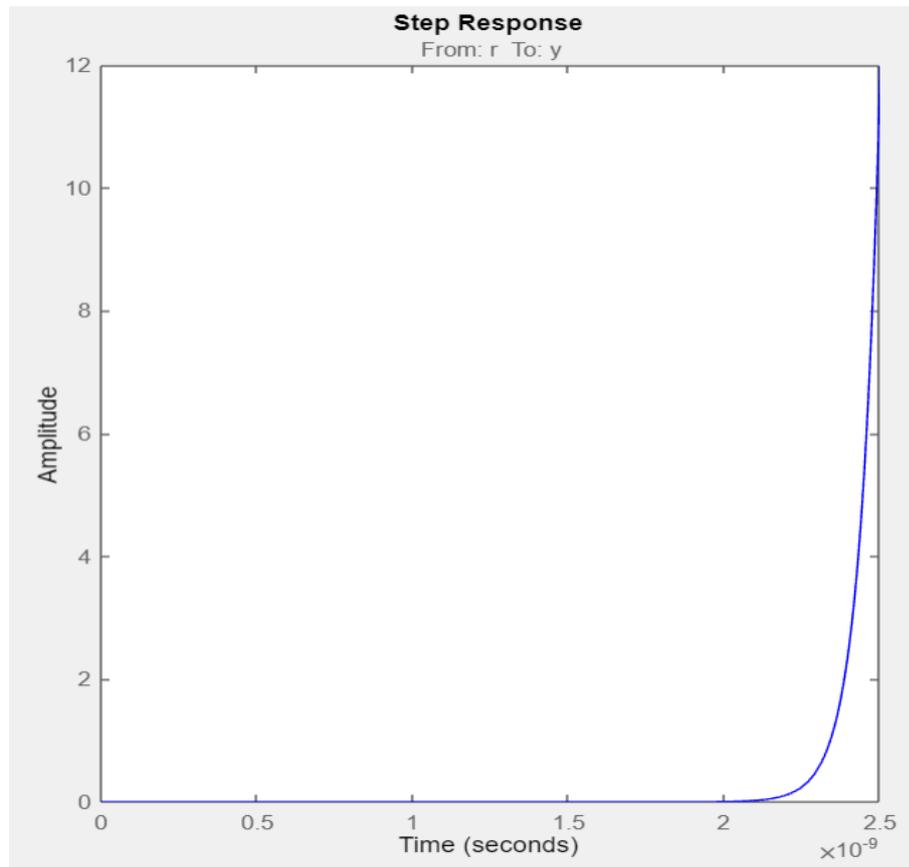
Fonte: Própria através do software MATLAB.

Figura 14 – Compensador.



Fonte: Própria através do software MATLAB.

Figura 15 – Resposta do Sistema.

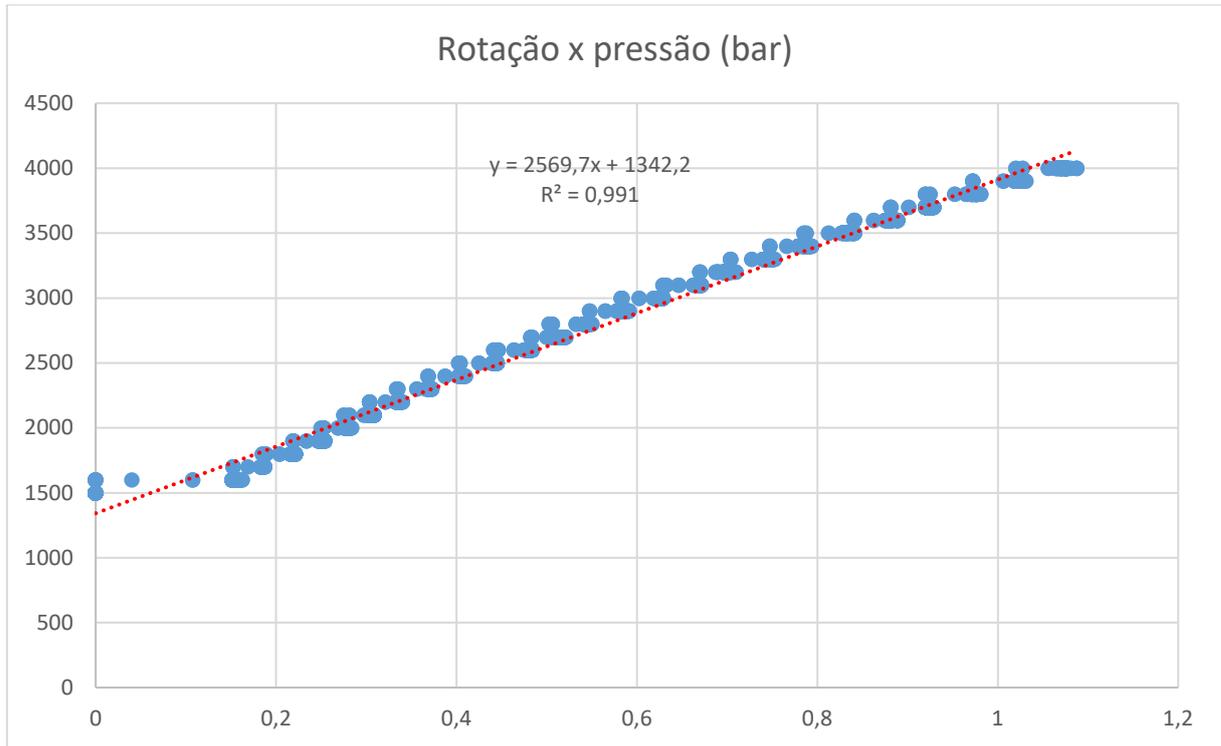


Fonte: Própria através do software MATLAB.

Visto que não será possível estabilizar a malha sem uma aferição mais detalhada da planta, foi começado um outro método para retirar a curva da bomba através de diferentes pressões x rpm da motobomba, fazendo assim um controle de malha aberta.

Nessa etapa foi aferido a pressão do sistema a cada rotação da bomba. Começou em 1500 rotações por minuto e terminou em 4000 rpm conforme dá para analisar no graficamente (figura 16).

Figura 16 – Resposta do Sistema.



Fonte: laboratório de sistemas fluidotérmicos da PUCRS.

Através desse levantamento, foi retirado uma equação de rampa $y = 2569,7 * x + 1342,2$ onde “y” se refere aos rpm do motor e “x” é a pressão do sistema. Essa equação só é válida para este sistema se não for alterada a regulagem de saída do registro de gaveta que está localizado no cano de recalque conectado a motobomba conforme a figura 17. Caso não fosse alterado, poderíamos controlar a motobomba por ajuste de declividade da função resposta (rampa) que refere-se a configurar o sistema para que a resposta ao comando siga uma inclinação desejada, controlando a taxa de variação da saída em relação ao tempo.

Figura 17 – Registro para estrangulamento da saída da motobomba.



Fonte: laboratório de sistemas fluidotérmicos da PUCRS

Se fosse estrangulado mais a saída do sistema, a pressão aumentará por motivos de que a resistência da bomba aumenta. Isso provoca um aumento na pressão de saída da bomba até que o fluxo seja completamente interrompido. O registro controla o volume de água que sai da bomba, reduzindo gradualmente o fluxo.

Este uso ou variação afeta a dinâmica do sistema causando variação na curva de resposta o que torna uma boa solução o controle por declividade da função resposta, porém, ainda não vamos usar esta solução.

Foi optada uma calibração no sistema do ganho proporcional por método empírico.

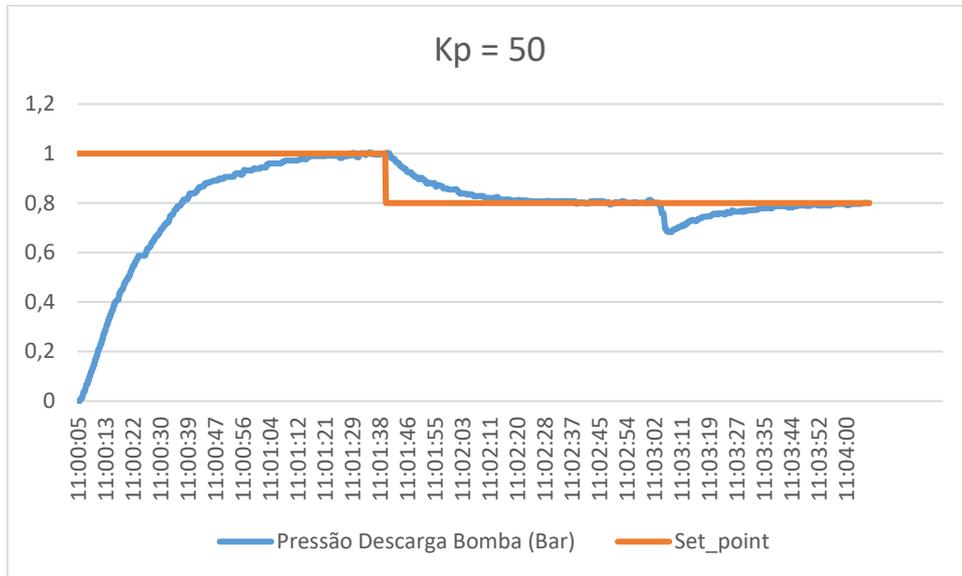
3.2 Etapa 2: Ganho Proporcional

Nessa etapa, foram feitos os testes já com a programação no CLP para o ganho proporcional, usando a fórmula $u(t) = Kp \cdot e(t)$.

Em todos os testes consiste em começar o sistema com o setpoint em 1,0 bar e analisar quanto tempo o sistema leva para atingir o setpoint desejado. Logo a seguir, o setpoint é trocado para 0,8 bar e é aguardado para ver a estabilização do sistema. Finalizando o teste, é aberto um pouco mais o registro de saída de recalque da bomba para que haja mais vazão estressando o sistema para que ele recupera essa perda de pressão.

Primeiro foi atribuído um ganho de $K_p = 50$ e foi obtido o seguinte resultado conforme mostra na figura 18

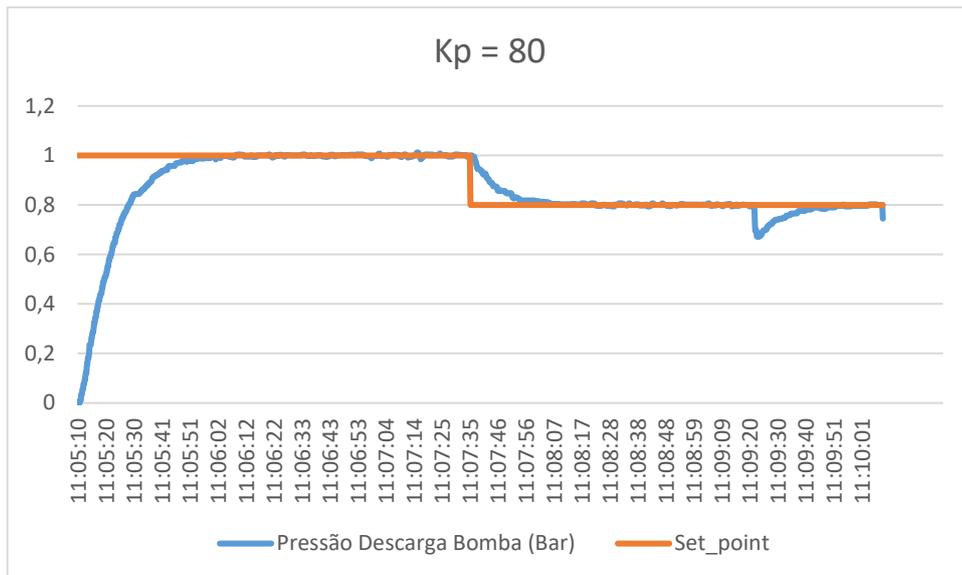
Figura 18 – Gráfico de resposta do sistema x setpoint x tempo. $K_p = 50$.



Fonte: laboratório de sistemas fluidotérmicos da PUCRS.

Segundamente, foi atribuído um ganho de $K_p = 80$ e foi obtido o seguinte resultado conforme mostra na figura 19.

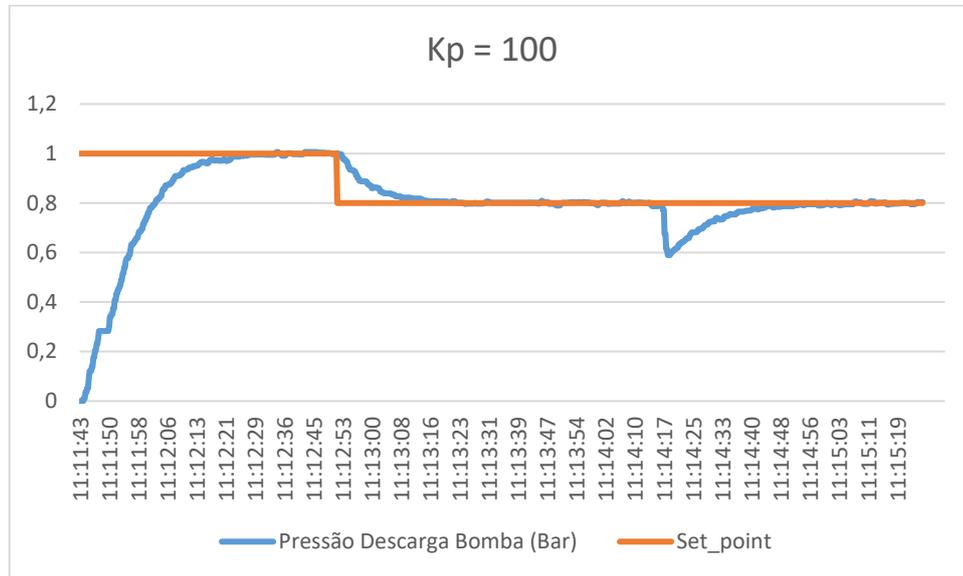
Figura 19 – Gráfico de resposta do sistema x setpoint x tempo. $K_p = 80$.



Fonte: laboratório de sistemas fluidotérmicos da PUCRS.

Foi finalizado o teste com um ganho de $K_p = 100$ e foi obtido o seguinte resultado conforme a figura 20.

Figura 20 – Gráfico de resposta do sistema x setpoint x tempo. $K_p = 100$.

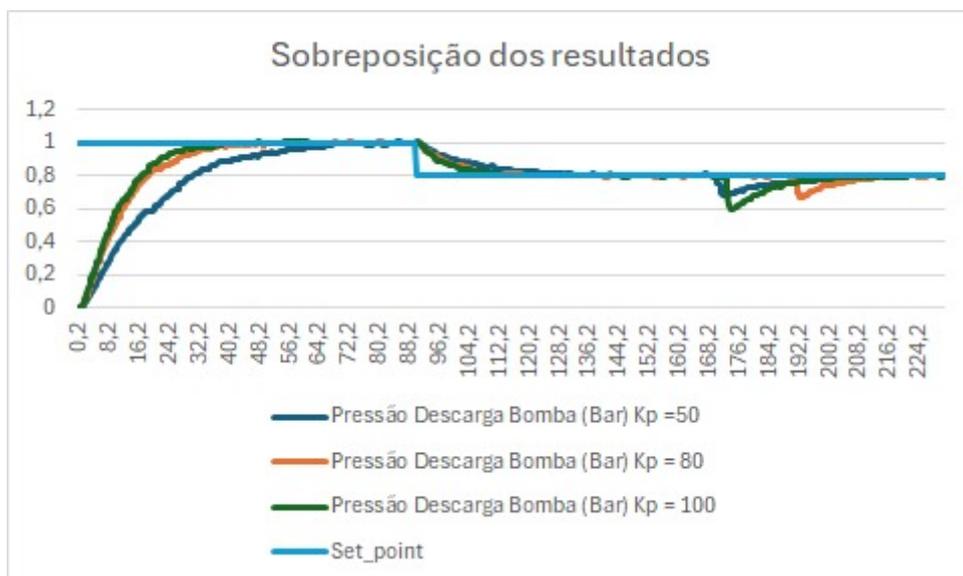


Fonte: laboratório de sistemas fluidotérmicos da PUCRS.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foi analisado que o ganho proporcional de 100 unidades conforme está na figura 21, foi o que estabilizou mais rápido para esse sistema apresentado.

Figura 21 – Gráfico de resposta do sistema x setpoint x tempo. Sobreposição de ganhos estabelecidos.



Fonte: laboratório de sistemas fluidotérmicos da PUCRS.

Conforme a figura 04 de Wescoot, (2000), percebe-se que o estudo referente ao ganho proporcional está coerente com o que está sendo analisado em planta. Portanto, O método do ganho proporcional se apresentou muito confiante para buscar a estabilidade na malha fechada.

5 CONCLUSÃO

Foi visto na etapa 1 o que pode ocorrer na coleta e análise de dados de uma planta conforme foi escolhida para execução deste trabalho. Nem sempre vamos ter uma análise de dados com uma curva referente a características do sistema. Neste caso a dificuldade foi a aferição de dados. Precisaria de uma coleta de dados mais rápida para conseguir analisar a curva do sistema com mais precisão. Com a curva semelhante a uma rampa conforme foi analisado nos gráficos de pressão x tempo como foi visto nas figuras 09 e 08, não foi possível montar a função de transferência do sistema com uma porcentagem de semelhança mais elevada e foi gerado uma resposta com polos e zeros com valores muito elevados. Mostrando que se fechássemos a malha, teria que haver ganhos elevados para conseguir estabilizá-la.

A solução foi fechar a malha e usar de modo empírico um ganho proporcional na etapa 2. Foi visto que o controle foi estabelecido apenas fornecendo um ganho ao sistema onde o maior valor estabelecido, foi o que se estabilizou mais rapidamente, dessa forma, mostrou ser um método de extrema confiança para estabelecer a estabilização da malha do sistema de pressurização de água.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, Luis A. Introdução à identificação de sistemas: Técnicas lineares e não lineares: teoria e aplicação. 4. ed. rev. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015.

Azevedo 2018 https://www.researchgate.net/profile/Angelo-Azevedo-2/publication/349574730_CONTROLE_DO_PONTO_DE_OPERACAO_EM_CONJUNTO_MOTOBOMBA_COM_A_UTILIZACAO_DE_MICROCONTROLADORES/links/6036e42592851c4ed59535c9/CONTROLE-DO-PONTO-DE-OPERACAO-EM-CONJUNTO-MOTOBOMBA-COM-A-UTILIZACAO-DE-MICROCONTROLADORES.pdf

CAMPOS, M.C.M.M., TEIXEIRA, H.C.G., Controles Típicos de Equipamento e Processos Industriais, Editora Edgard Blucher, 1ª Edição, 2006.

COELHO, Antônio A. R., COELHO, Leandro D. S. Identificação de sistemas dinâmicos lineares. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.

CRUZ 2016 <https://lcv.fee.unicamp.br/images/BTSym-16/proceedings/PA14-16-edited.pdf>

devitte 2012 <https://www.univates.br/bduserver/api/core/bitstreams/38f6e043-3bb3-4f85-9a6e-4b5aa7653520/content>

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. Sistemas de Controle Modernos. 8. ed. LTC, 2001.

Ferreira 2012 https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10569/1/2012_dis_maferreira.pdf

KALATEC. Controle de processos industriais: O que é e como implementar. *Kalatec Blog*, 2023. Disponível em: <https://blog.kalatec.com.br>. Acesso 9 nov. 2024.

Loureiro 2009

<https://repositorio.ufes.br/server/api/core/bitstreams/ae25e14e-5d5a-4381-ac3b-8fe9014c709b/content>

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 4. ed. São Paulo: Pearson Education – Br, 2010.

OLIVEIRA, J. P. B. M. Review of Auto-tuning Techniques for Industrial PI Controllers. Dissertação de Mestrado. University of Salford, 1994.

PROCEL 2009

https://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/Bombas.pdf

RODRIGUES, Wlamir et al. Critérios para o uso eficiente de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de água. **Eng. Civil. Campinas-SP**, p. 19-196, 2007.

SANTANA, Rodolfo Siqueira. Implementação de uma malha de controle para um sistema de bombeamento – Um estudo de caso para a modulação de vazão em uma planta piloto. Belo Horizonte. UFMG, 1998

ZANCAM, MARCOS DANIEL, Controladores Programáveis, 3. ed. – Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria : Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.

Wescott, T. (2000). PID without PhD.