



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Estudo de Técnicas de Controle de Vazão Aplicadas ao Controle de Nível de Tanques Industriais

Vanessa Cecília da Silva

João Monlevade, MG

2018

Vanessa Cecília da Silva

**Estudo de Técnicas de Controle de Vazão
Aplicadas ao Controle de Nível de Tanques
Industriais**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago

Coorientador: Prof. Dr. Victor Costa da Silva Campos

Universidade Federal de Ouro Preto

João Monlevade

2018

S586e

Silva, Vanessa Cecília da.

Estudo de técnicas de controle de vazão aplicadas ao controle de nível de tanques industriais [manuscrito] / Vanessa Cecília da Silva. - 2018.

66f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.

Coorientador: Prof. Dr. Victor Costa da Silva Campos.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia elétrica. 2. Sistemas dinâmicos diferenciais. 3. Hidrometria. I. Tiago, Marcelo Moreira. II. Campos, Victor Costa da Silva. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 621.313

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 23 dias do mês de maio de 2018, às 11 horas, no bloco B deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pela formanda Vanessa Cecília da Silva, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Gabriel Azevedo Fogli, Marcelo Moreira Tiago, Renan Fernandes Bastos e Víctor Costa da Silva Campos.

A candidata apresentou a monografia intitulada: Estudo de técnicas de controle de vazão aplicadas ao controle de nível de tanques industriais. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação da candidata, com a nota média 8,9, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pela formanda.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Gabriel Azevedo Fogli	9,0
Marcelo Moreira Tiago	8,7
Renan Fernandes Bastos	8,7
Víctor Costa da Silva Campos	9,0
Média	8,9

João Monlevade, 23 de maio de 2018.

Marcelo Moreira Tiago
Professor Orientador

Vanessa Cecília da Silva
Aluna

Víctor Costa da Silva Campos
Professor Coorientador

Gabriel Azevedo Fogli
Professor Convitado

Renan Fernandes Bastos
Professor Convitado



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



ANEXO II - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado **“Estudo de Técnicas de Controle de Vazão Aplicadas ao Controle de Nível de Tanques Industriais”** é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 11 de junho de 2018

Vanessa Cecília da Silva
Vanessa Cecília da Silva

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar à minha família por todo o apoio e incentivo durante a jornada. Ao meu namorado, Michele, por toda a paciência, carinho e motivação. Ao BDE pelas risadas, companheirismo e momentos agradáveis na escadinha, e aos demais amigos por entender minha ausência durante a graduação.

Aos técnicos dos laboratório, em especial ao Paulo e Thiago, que se disponibilizaram em me ajudar com conhecimento e tempo.

Agradeço também aos professores por todo ensinamento e experiência compartilhados, em especial ao Marcelo e ao Victor, que me orientaram nesta etapa, sendo sempre tão solícitos e disponíveis.

"Veni, vidi, vici."
– *Gaius Julius Caesar*

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle de vazão, que é usado para ajustar o nível de líquido em um tanque de uma planta didática. Em um primeiro momento faz-se uma revisão de conceitos de instrumentação e de controle que são essenciais para o desenvolvimento do projeto. Em seguida a planta é apresentada, com destaque para os instrumentos e recursos utilizados. São realizados ensaios estáticos e dinâmicos para obtenção de um modelo, que é utilizado para projetar as estratégias de controle. O Matlab foi utilizado para sintonizar e implementar o controlador, através das ferramentas *sisotool* e *opctool*, respectivamente. Foram usadas duas estratégias de controle, o controlador de dois graus de liberdade associado com cascata e o controlador inferencial. Obteve-se bons resultados nos dois controladores, embora o primeiro tenha tido menor constante de tempo e menor erro em regime permanente.

Palavras-chave: Sistemas Dinâmicos, Controle de Vazão, Líquidos, Controle Feedback, Controle Feedforward, Controle Cascata, Controle Inferencial.

Abstract

This work presents the development of a flow control system, that is used to adjust the liquid level in a tank of a didactic plant. In the first stage a study of instrumentation and control concepts is essential for the project development. Afterwards the didactic plant where this work is developed is presented, highlighting the instruments and resources used. Then static and dynamic tests were made to provide the process model necessary to develop the controls strategy. The software Malab was used for the controller tuning and implementation, using the *sisotool* and *opctool* tools respectively. Two control strategies were used: a controller with two degrees of freedom associated with a cascade control and an inferential control. Both had good performance, though the first one had a smaller time constant and lower steady state error.

Keywords: Dynamic Systems, Liquid Flow, Level Control, Feedback Control, Feedforward Control, Cascade Control, Inferential Control.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Distribuição gaussiana.	5
Figura 2 – Precisão e exatidão de um instrumento.	5
Figura 3 – Célula capacitiva do sensor de pressão.	8
Figura 4 – Bomba centrífuga.	11
Figura 5 – Sistema de bombeamento de fluidos.	11
Figura 6 – Gráfico da relação entre tensão e frequência.	12
Figura 7 – Relação entre torque e frequência.	12
Figura 8 – Representação em diagrama de blocos de um sistema de controle <i>feedback</i>	17
Figura 9 – Representação em diagrama de blocos de um sistema de controle <i>feed-forward</i>	19
Figura 10 – Representação em diagrama de blocos de um sistema de controle cascata.	20
Figura 11 – Representação em diagrama de blocos de um sistema de controle Inferencial.	21
Figura 12 – Planta SMAR PD3-F.	22
Figura 13 – Representação esquemática demonstrando a relação entre o modelo Open System Interconnect (OSI) e o Fieldbus.	25
Figura 14 – Representação topológica das arquiteturas Foundation TM Fieldbus (FF) <i>High Speed Ethernet</i> (HSE) e H1.	26
Figura 15 – Transmissor de pressão montado na planta SMAR PD3.	28
Figura 16 – Conversor Fieldbus para corrente com três canais montado na planta SMAR PD3.	29
Figura 17 – Imagem do rack com destaque para os módulos DF63 e DF75.	30
Figura 18 – Planta SMAR PD3-F.	31
Figura 19 – Adaptação feita para acoplar o sensor de vazão YF-S201 à planta SMAR PD3-F.	32
Figura 20 – Curva de calibração do sensor de vazão YF-S201.	33
Figura 21 – Comparação entre a curva de calibração levantada e a fornecida para o sensor YF-S201.	34
Figura 22 – Diagrama representando o fluxo do processo.	35
Figura 23 – Curva I/f do Inversor de Frequência da Planta SMAR PD3.	36
Figura 24 – Leituras de vazão obtidas aplicando degraus sucessivos de 1mA no inversor de frequência.	36
Figura 25 – Leituras de vazão obtidas aplicando degraus sucessivos de -1mA no inversor de frequência.	37
Figura 26 – Curva de reação da vazão de entrada pelo valor de corrente.	37

Figura 27 – Curvas medidas e aproximada da variação de vazão pela variação de corrente.	38
Figura 28 – Representação em diagrama de blocos do controle de nível <i>Feedback-Feedforward</i> implementado.	39
Figura 29 – Representação em diagrama de blocos da malha interna do sistema de controle cascata de nível.	41
Figura 30 – Representação em diagrama de blocos do sistema de controle de nível usando estratégias de controle <i>feedback-feedforward</i> e cascata.	42
Figura 31 – Dinâmica do sistema de nível utilizando controle <i>feedback-feedforward</i> cascata.	43
Figura 32 – Dinâmica do sistema de nível utilizando controle <i>feedback-feedforward</i> para <i>setpoint</i> igual a 20%.	45
Figura 33 – Representação em diagrama de blocos do sistema de controle inferencial de nível.	45
Figura 34 – Curva da vazão de saída pelo nível do tanque.	46
Figura 35 – Valores medidos e curvas aproximada da vazão de saída pelo nível do tanque.	46
Figura 36 – Resposta da vazão de saída à uma entrada degrau.	47
Figura 37 – Dinâmica do sistema de nível utilizado controle inferencial.	48
Figura 38 – Resposta da vazão de saída, vazão de entrada e do nível no processo controlado.	50

Lista de tabelas

Tabela 1	– Dados de calibração do sensor de vazão YF-S201.	33
Tabela 2	– Parâmetros da curva de calibração do sensor de vazão YF-S201.	34
Tabela 3	– Parâmetros da curva para variação de vazão a partir da velocidade.	38
Tabela 4	– Ganhos do controlador <i>feedback-feedforward</i>	40
Tabela 5	– Valores de nível em regime permanente e erro para cada <i>setpoint</i> obtidos com atuação do controle <i>feedback-feedforward</i> cascata.	43
Tabela 6	– Máximo sobressinal para cada <i>setpoint</i> quando ha atuação do controle <i>feedback-feedforward</i> cascata.	44
Tabela 7	– Tempos de assentamento dos resultados obtidos a partir da implementação do controle <i>feedback-feedforward</i> cascata.	44
Tabela 8	– Parâmetros das retas que relacionam a vazão de saída com o nível.	46
Tabela 9	– Ganhos do controlador Inferencial.	48
Tabela 10	– Valores de nível em regime permanente e erro para cada <i>setpoint</i> obtidos com atuação do controle inferencial.	49
Tabela 11	– Máximo sobressinal para cada valor de <i>setpoint</i> quando ha atuação do controle inferencial.	49
Tabela 12	– Tempos de assentamento dos resultados obtidos a partir da implementação do controle inferencial.	50

Lista de abreviaturas e siglas

2DOF	Dois Graus de Liberdade, ou Two Degree of Freedom
CLP	Controlador Lógico Programável
FB	Bloco Funcional
FDP	Função Densidade de Probabilidade
FF	Foundation TM Fieldbus
FFB	Bloco Funcional Flexível
HSE	<i>High Speed Ethernet</i>
ISO	International Standards Organization
kV	Quilovolts
SI	Sistema Internacional de Unidades
OPC	OLE for Process Control
OSI	Open System Interconnect
SISO	<i>Single Input Single Output</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Motivação e Justificativas	2
1.3	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Análise estática de instrumentos	4
2.2	Sensores	6
2.2.1	Sensores de Vazão	6
2.2.1.1	Sensores Turbina	7
2.2.2	Sensores de Nível	7
2.2.3	Sensores de Pressão Diferencial	8
2.2.3.1	Sensores de Vazão por Pressão Diferencial	8
2.2.3.2	Sensor de Nível por Pressão Diferencial	9
2.3	Atuadores	9
2.3.1	Bombas Hidráulicas Centrifugas	10
2.3.2	Inversores de Frequência	10
2.3.3	Válvulas	13
2.4	Instrumentos Inteligentes	13
2.5	Controle de Processos	14
2.5.1	Modelagem Matemática de Sistemas Dinâmicos	15
2.5.1.1	Modelagem Empírica de Sistemas	16
2.5.2	Estratégias de Controle de Sistemas Dinâmicos	17
2.5.2.1	Controle <i>Feedback</i>	17
2.5.2.2	Controle <i>Feedforward</i>	18
2.5.2.3	Controle Cascata	19
2.5.2.4	Controle Inferencial	21
3	PLANTA DIDÁTICA SMAR PD3-F	22
3.1	Rede Foundation™Fieldbus (FF)	23
3.1.1	Ciclos de Dados	27
3.1.2	Protocolo OPC	27
3.2	Elementos de Controle da Planta SMAR PD3	28
3.2.1	Transmissor de Pressão LD302	28
3.2.2	Conversor fieldbus para corrente FI302	29
3.2.3	Controlador DF63	29

3.2.4	Controlador DF75	30
4	ENSAIOS E RESULTADOS	31
4.1	Calibração do Sensor Turbina	32
4.2	Curva de Reação Vazão de Entrada x Corrente	35
4.3	Controle de Nível	38
4.3.1	Controle Feedback-Feedforward com Cascata	39
4.3.1.1	Controle Feedback-Feedforward sem Cascata	43
4.3.2	Controle Inferencial	44
4.4	Discussão dos Resultados	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A – CÓDIGO DO ARDUINO PARA LEITURA DE VA- ZÃO	56
	APÊNDICE B – CÓDIGO IMPLEMENTADO PARA O CONTROLE FEEDFORWARD CASCATA	57
	APÊNDICE C – CÓDIGO IMPLEMENTADO PARA O CONTROLE INFERENCIAL	61
	ANEXO A – DATASHEET YF-S201	65
	ANEXO B – TABELA DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT	66

1 Introdução

O controle e automação de processos são áreas da engenharia que aplicam técnicas variadas para estabilização de variáveis a níveis operacionais (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011). Essas técnicas, quando bem aplicadas, oferecem várias vantagens como a melhora na qualidade dos produtos, redução de perdas por defeitos durante o processo, prolongamento da vida útil de equipamentos, menor risco de acidentes ocupacionais e atenuação da carga de trabalho do operador (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010).

As tecnologias disponíveis para a implementação do controle automático se tornam cada vez mais modernas e seguras. Um exemplo são as vias de comunicação, em que as informações inicialmente eram transmitidas de forma analógica através de correntes numa faixa de 4 a 20mA, e aos poucos vêm sendo substituídas por tecnologias digitais, como o *profibus* e o *fieldbus*, que são mais seguras, a prova de falhas e permitem transmissão de maior número de dados. Outro componente essencial em um processo industrial são os controladores, que recebem os dados de área, os processam e decidem quais elementos e o quanto devem atuar para que seja atingido o objetivo (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010).

Neste contexto, a identificação e modelagem de sistemas é muito importante, pois permitem a implementação de controladores mais robustos e eficientes. Sem um modelo, o projeto de um controlador se dá por tentativa e erro, que torna o processo mais complexo e demorado, visto que a sintonia de um controlador sem informações da dinâmica torna a tarefa muito mais difícil (AGUIRRE, 2007, cap. 1).

Um controle amplamente utilizado nos sistemas modernos é o controle de vazão de fluidos, que possui vasta aplicabilidade. Na indústria naval, o controle de vazão é utilizado para manter a temperatura de máquinas e equipamentos constante e para controlar a pressão interna do *boiler* de um navio a vapor, por exemplo (SU et al., 2016). Na indústria petrolífera, este controle é importante para o transporte de petróleo e de água de resfriamento de equipamentos (IRVINE; GIBSON, 2000). Outro motivo para o qual é interessante controlar a vazão de um fluido é para manter o seu fluxo laminar, visto que um fluxo turbulento dissipa mais energia, além de influenciar a dinâmica do sistema por meio da aceleração do processo de mistura ou da transferência de calor, por exemplo (MARUSIC; MATHIS; HUTCHINS, 2010).

Outra importante variável para a indústria é o nível, cujo controle é feito por meio do balanceamento da massa dos fluidos que entram e saem de um tanque, recipiente ou reator.

A regulação de vazão pode também ser usada para controlar uma outra importante variável: o nível. O controle do nível por meio da vazão é feito por meio do balanceamento

da massa dos fluidos que entram e saem de um recipiente, e possui diversas aplicações industriais e na engenharia, como processos em que há o emprego de geradores a vapor, tanques de armazenamento de petróleo ou gás e reatores de plantas químicas (CARTES; WU, 2005).

Um dos controladores mais aplicado é o controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), por sua simplicidade de operação e implementação e pela sua boa performance em uma ampla faixa de operação (DORF; BISHOP, 2001, cap. 7). Estes controladores podem ser associados a outros tipos de controladores, como o inferencial e o controle cascata, de acordo com os recursos disponíveis e as necessidades do processo.

A Universidade Federal de Ouro Preto, *campus* João Monlevade disponibiliza a planta didática SMAR PD3-F, onde é possível estudar e aplicar técnicas de modelagens e ações de controle variados em um ambiente semelhante ao industrial. Com isso, optou-se por implementar este trabalho na planta didática, devido sua versatilidade e diversidade de equipamentos e processos.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos:

- Rever conceitos de instrumentação e controle de sistemas por meio da revisão bibliográfica usando artigos científicos e livros da área, fornecendo a teoria necessária para a compreensão deste trabalho;
- Apresentar a planta didática SMAR PD3, onde será implementado todo o trabalho, portanto é fundamental o conhecimento de seu funcionamento e seus dispositivos;
- Encontrar um modelo de uma das malhas de vazão da planta didática através de ensaios apropriados. A modelagem de um sistema físico real é importante para a compreensão da dinâmica do sistema e constitui uma relevante etapa para o projeto de controladores eficientes.
- Utilizar as informações anteriores para implementar dois tipos de controle de nível em um dos tanques da planta didática, permitindo a análise e comparação dos resultados para cada tipo de controle.

1.2 Motivação e Justificativas

A planta SMAR DP3-F é dotada de vários sensores para diferentes grandezas, atuadores e malhas de controle, abrindo um leque de aplicações àqueles que decidem fazer o seu uso (SMAR, 2012).

É fundamental que o engenheiro saiba relacionar as diferentes variáveis de um processo e implementar controladores que permitam um funcionamento adequado de um sistema. Além disso, uma boa modelagem fornece valiosas informações sobre a dinâmica de um sistema e é de suma importância no projeto e implementação de controladores mais eficientes.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente capítulo descreve o problema e apresenta a proposta deste trabalho, citando pontos relevantes, justificativas e motivações do tema.

O Capítulo 2 é dedicado a apresentar uma revisão bibliográfica de conceitos e temas indispensáveis para o compreensão deste trabalho. É dividido em duas seções, uma dedicada a abordar tópicos de instrumentação, como análise estática de instrumentos e dispositivos de instrumentação. A outra seção aborda tópicos de modelagem e controle de sistemas dinâmicos, que é o escopo deste trabalho.

No Capítulo 3, é descrita a planta SMAR, com ênfase na comunicação *fieldbus*, que é o protocolo de transferência de dados usado para controle e configuração dos instrumentos, e apresentação dos dispositivos utilizados neste trabalho.

O Capítulo 4 contém a descrição dos ensaios realizados na planta didática, apresentação e discussão dos resultados obtidos. Nesta parte também são apresentados todos os dados necessários para a implementação dos controladores, como levantamento de modelos e calibrações.

Por fim, no Capítulo 5, apresentam-se as considerações finais no que diz respeito à investigação e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Os instrumentos são equipamentos implementados em processos contínuos e discretos com o objetivo de ler e controlar as variáveis do processo industrial do qual participam, de modo a mantê-lo estável e dentro dos padrões de especificação e qualidade (BEGA et al., 2011, cap. 1).

A instrumentação interfaceia o processo físico com a automação por meio de sensores e atuadores, conceitos que serão melhores explorados ao longo das próximas seções (BEGA et al., 2011, cap. 1).

2.1 Análise estática de instrumentos

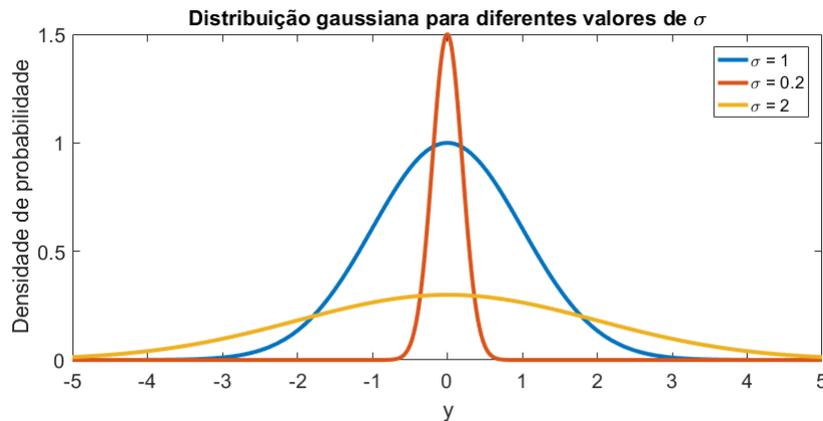
Os instrumentos, em especial os sensores, operam estabelecendo relações entre um sinal de entrada (como uma variável física) e um sinal de saída (por exemplo, um sinal elétrico). Porém, por se tratar de um sistema real, o resultado de uma medição não é livre de erros e incertezas, que precisam ser considerados na análise dos dados do processo (AGUIRRE, 2013, cap. 3).

Instrumentos podem apresentar erros sistemáticos e erros aleatórios, que são categorizados de acordo com a Função Densidade de Probabilidade (FDP). A FDP descreve a probabilidade de uma variável assumir um determinado valor, e sua representante mais significativa é a função gaussiana, cujos parâmetros são a média (μ) e o desvio-padrão (σ). A média indica o valor em que os dados tendem a se concentrar e está associada aos erros sistemáticos, enquanto o desvio-padrão indica a dispersão destes dados em torno da média e está associado aos erros aleatórios. A Figura 1 apresenta um gráfico com três gaussianas de média nula e desvio-padrão diversos (AGUIRRE, 2013, cap. 3).

A precisão de um instrumento está relacionada com o desvio-padrão, ou seja, quanto maior a dispersão dos dados em torno de um valor de referência, menos preciso é um instrumento. Por outro lado, a exatidão está associada à tendência dos valores obtidos durante a leitura do sensor, e quanto mais concentrados em torno do valor de referência mais exato é o instrumento. A Figura 2 apresenta a distribuição dos valores obtidos por um instrumento preciso e um instrumento exato, em que o valor médio de referência é zero (AGUIRRE, 2013, cap. 3).

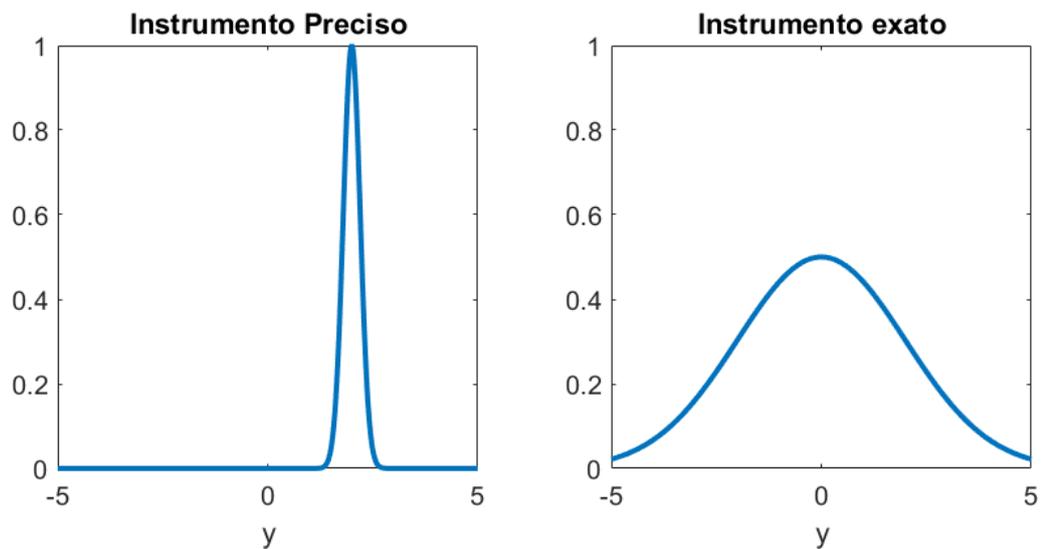
Cada instrumento possui um conjunto de características estáticas, ou seja, em regime permanente, que descreve suas propriedades fundamentais (AGUIRRE, 2013, cap. 3):

Figura 1 – Distribuição gaussiana.



Fonte: Adaptado de Aguirre (2013).

Figura 2 – Precisão e exatidão de um instrumento.



Fonte: Adaptado de Aguirre (2013).

- **Sensibilidade:** É a variação do sinal de saída causada por uma variação do sinal de entrada, ambas em estado estacionário. Pode ser estimada matematicamente por meio da relação valor de saída/valor de entrada, ou seja, $\hat{K} = \Delta\tilde{y}/\Delta\tilde{x}$.
- **Resolução:** Menor variação do sinal de entrada que o instrumento é capaz de detectar, quando o valor inicial da variável de entrada é diferente de zero.
- **Limiar:** Menor valor do sinal de entrada que irá causar uma variação no sinal de saída, pressupondo que o instrumento esteja inicialmente em zero.
- **Range:** Faixa de valores que um instrumento é capaz de medir. Também chamado de faixa estática.

- **Histerese:** É a propriedade que alguns materiais possuem de apresentar comportamentos diferentes quando excitados em sentidos opostos. É quantificado em porcentagem de leitura ou do range.
- **Zona morta:** Faixa de valores de entrada em que não há variação no sinal de saída, mantendo-o em um mesmo valor.
- **Span:** Conhecido também como alcance, é a diferença entre o valor máximo e mínimo da faixa de valores do instrumento.

Para exemplificar, toma-se um voltímetro digital ajustado na escala de Quilovolts (kV), ou seja, com baixa sensibilidade às leituras muito pequenas de tensão, e com resolução de 1V, significando que só será notada mudança no valor visto no *display* se a variação de tensão for maior que 1V. O voltímetro não lê valores menores que -99kV e maiores que 99kV, definindo assim o seu *range*, com *span* de 198kV.

2.2 Sensores

Kandray (2010, cap. 8) define sensores como dispositivos físicos que tem como finalidade supervisionar uma determinada variável do processo e informar seu estado ao controlador. Os sensores podem ser classificados em duas categorias principais: *switches* e transdutores.

Sensores do tipo *switch* informam apenas dois estados ao controlador, que são os estados contato aberto e contato fechado. Como exemplos de sensores do tipo *switch* podem ser destacados a chave retentora e o *pushbutton* (KANDRAY, 2010, cap. 8).

Os transdutores são dispositivos que monitoram variáveis físicas contínuas do processo e convertem em uma grandeza que pode ser lida pelo controlador, geralmente de natureza elétrica. Os transdutores podem ser categorizados pela aplicação e tipo de variável física lida, como, por exemplo, sensores de vazão, de temperatura, de nível e de velocidade (KANDRAY, 2010, cap. 8).

2.2.1 Sensores de Vazão

A vazão é definida como a quantidade de um fluido que atravessa a seção reta de uma tubulação em uma unidade de tempo. Pode ser aferida em função da massa (vazão mássica) ou do volume (vazão volumétrica). É uma das variáveis mais monitoradas na indústria e aplica diversas tecnologias para a sua medição e transmissão, algumas das quais serão abordadas nos próximos tópicos.

Um dos tipos de sensores utilizados são os sensores ultrassônicos, que são compostos por um par de cristais ou cerâmicas piezoelétricos que emitem sinais ultrassônicos de

maneira alternada. As duas técnicas de medição mais utilizadas são o efeito Doppler e o tempo de trânsito (BEGA et al., 2011, cap. 3). Outro sensor amplamente utilizado de medição de vazão é o sensor de pressão diferencial, que será explicado na seção 2.2.3.

2.2.1.1 Sensores Turbina

O sensor de turbina é um tipo de sensor de vazão dotado de um rotor acoplado a um conjunto de pás inclinadas, que giram quando um líquido flui por eles. A velocidade angular ideal da turbina é dada pela equação abaixo:

$$\omega = \frac{v \cdot \tan \alpha}{R} \quad (2.1)$$

em que v é a velocidade do fluido, α é o ângulo de inclinação das pás da turbina e R é o raio de giro das pás. Em um sensor real, a velocidade angular é impactada por forças de atrito mecânicos e aerodinâmicos (AGUIRRE, 2013, cap. 9).

A detecção da velocidade é feita por sistema magnético ou ótico. O sistema magnético aplica princípios do efeito Hall: um sensor, constituído por um ímã permanente e uma bobina, detecta variações do fluxo magnético toda vez que uma das pás da turbina passa pelo campo magnético, alterando a distribuição do fluxo. Desta forma, a bobina gera uma sequência de pulsos com frequência proporcional à rotação da turbina e à vazão do fluido (BEGA et al., 2011, cap. 3).

2.2.2 Sensores de Nível

Os sensores de nível determinam a posição da superfície de um material, podendo ser líquido ou sólido. O nível pode ser determinado de forma direta, em que é feita a medição da distância entre um referencial e o produto cujo nível se deseja conhecer, ou de forma inferencial, em que a posição da superfície do produto cujo nível se deseja medir é obtida por meio de outra grandeza física que esteja relacionada (BEGA et al., 2011, cap. 4).

Um dos sensores de nível mais comumente utilizados são os visores de nível, que consistem, geralmente, em vidro tubular transparente reto fixado entre duas válvulas de bloqueio. Este sensor permite apenas o monitoramento local do nível do fluido. Devido a sua construção física, é de fácil manutenção, porém, não suportam altas temperaturas, altas pressões e impacto externo forte (BEGA et al., 2011, cap. 4).

Outro sensor amplamente usado é a chave de nível, que atua em pontos fixos. Uma vez que o sensor detecta o nível fixado, uma ação é executada visando a segurança ou a operação adequada do sistema. As chaves de nível fornecem somente duas saídas, que é a passagem ou o bloqueio do fluido. O tipo mais encontrado é a chave tipo flutuador, ou boia (BEGA et al., 2011, cap. 4).

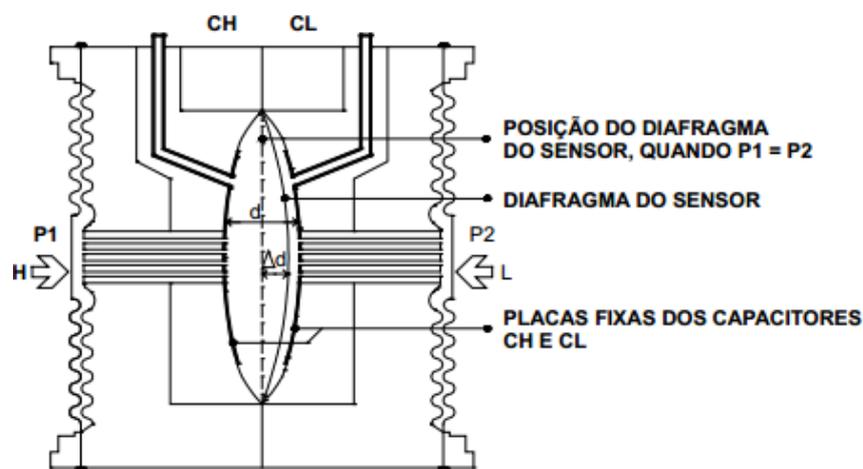
2.2.3 Sensores de Pressão Diferencial

A pressão é uma grandeza física definida pela razão entre uma força aplicada a uma determinada área, conforme Equação (2.2). A unidade de pressão padronizada pelo Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Pascal ($Pa = N/m^2$), porém as unidades psig (lb_f/in^2) e bar também são amplamente utilizadas em ambientes industriais (BEGA et al., 2011, cap. 2).

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

Sensores de pressão diferencial aferem a diferença entre duas pressões obtidas em pontos diferentes de um duto de circulação de fluido ou de um tanque, e são frequentemente construídos usando células capacitivas. Conforme visto na Figura 3, as células são compostas por placas de metal ou material semicondutor fixadas nas paredes da cavidade central e um diafragma de metal, sem contato com as paredes, no centro. A elevação da pressão em um dos lados desloca o diafragma e levará a redução da capacitância em um lado e o aumento em outro. O espaço entre as placas e o diafragma é preenchido por óleo ou gel, que atuam como barreira contra fluidos que possam danificar o sensor, além de absorver variações de alta frequência (AGUIRRE, 2007, cap. 9).

Figura 3 – Célula capacitiva do sensor de pressão.



Fonte: SMAR (2016a).

Os sensores de pressão diferenciais podem ser ajustados para aferir a vazão ou o nível de um fluido.

2.2.3.1 Sensores de Vazão por Pressão Diferencial

Estes sensores de vazão medem a pressão de um fluido antes e depois de passar por um estreitamento e um tubo, projetado justamente para causar uma perturbação na pressão. Como a vazão é constante e há a conservação de massa e energia, o estreitamento

irá provocar aumento da velocidade de escoamento do fluido, que é acompanhado da redução de pressão, ou seja, $p_r < p$, em que p_r é a pressão do líquido após o estreitamento e p é a pressão antes. A vazão q então será proporcional à raiz quadrada da diferença de pressão, ou seja:

$$q \propto \sqrt{p - p_r} \quad (2.3)$$

2.2.3.2 Sensor de Nível por Pressão Diferencial

Os sensores de nível do tipo pressão diferencial aferem a pressão hidrostática de uma coluna de um líquido retido em um recipiente em relação a uma segunda pressão, de referência. O valor da pressão P medido pelo sensor é dado por:

$$P \propto \rho \cdot h \quad (2.4)$$

em que ρ é a densidade do líquido e h é a altura da coluna líquida. Se a densidade do líquido for constante, a indicação do sensor pode ser calibrada de forma a fornecer o valor do nível (BEGA et al., 2011, cap. 4). Rearranjando (2.4):

$$h = \frac{P}{\rho} \quad (2.5)$$

Deve-se ressaltar que quando o fluido é confinado em um recipiente fechado, a pressão no interior do reservatório pode ser influenciada por diversos fatores, como a temperatura e agitação dos fluidos (AGUIRRE, 2013, cap. 9).

2.3 Atuadores

Os atuadores são definidos por Kandray (2010, cap. 8) como dispositivos que realizam trabalho com o objetivo de alterar uma variável de processo, transformando um sinal de controle em mudança de um parâmetro. Os três principais tipos de atuadores utilizados na indústria são os atuadores pneumáticos, hidráulicos e elétricos.

Atuadores pneumáticos utilizam ar comprimido para o controle de um sinal. São caracterizados por baixa pressão fluídica e alta velocidade de fluxo (JANOCHA, 2004, cap. 4). Para que um controlador consiga atuar em um dispositivo pneumático é necessário o uso de uma válvula de controle, que irá transformar um sinal elétrico em um sinal pneumático que será usado pelo atuador. Além da válvula de controle e atuador, a grande maioria dos sistemas pneumáticos precisam também de um sistema de suprimento e filtragem de ar. Atuadores pneumáticos tem a vantagem de serem de fácil implementação, baixo custo e baixo impacto ambiental, uma vez que o vazamento de ar comprimido não compromete o meio ambiente (KANDRAY, 2010, cap. 8).

Os atuadores hidráulicos trabalham de maneira semelhante aos atuadores pneumáticos, porém utiliza-se o óleo ou óleo sobre água como fluido ao invés do ar. São

caracterizados pela alta pressão de trabalho do fluido (em torno de 30 a 40 vezes maior que atuadores pneumáticos) e pela velocidade relativamente baixa de deslocamento do atuador. A desvantagem de sistemas hidráulicos é a maior demanda de tubulação visto que o fluido precisa percorrer um circuito fechado, a propensão a vazamentos e o risco a vida do trabalhador devido à grande carga de trabalho de destes sistemas (KANDRAY, 2010, cap. 8).

Por fim, citam-se os atuadores elétricos, que fazem uso de energia elétrica para modificar uma variável do processo. O relé elétrico é um atuador amplamente utilizado em indústrias, consistindo de uma chave *on-off* acionada pela passagem de um determinado nível de corrente. São muito importantes em sistemas de controle pois permitem o controle de um nível de corrente muitas vezes maior que o nível de corrente do sinal de controle. Os relés são usados no acionamento de outro atuador elétrico fundamental para indústria: os motores elétricos (KANDRAY, 2010, cap. 8).

Os próximos tópicos abordam alguns tipos de atuadores que são utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

2.3.1 Bombas Hidráulicas Centrifugas

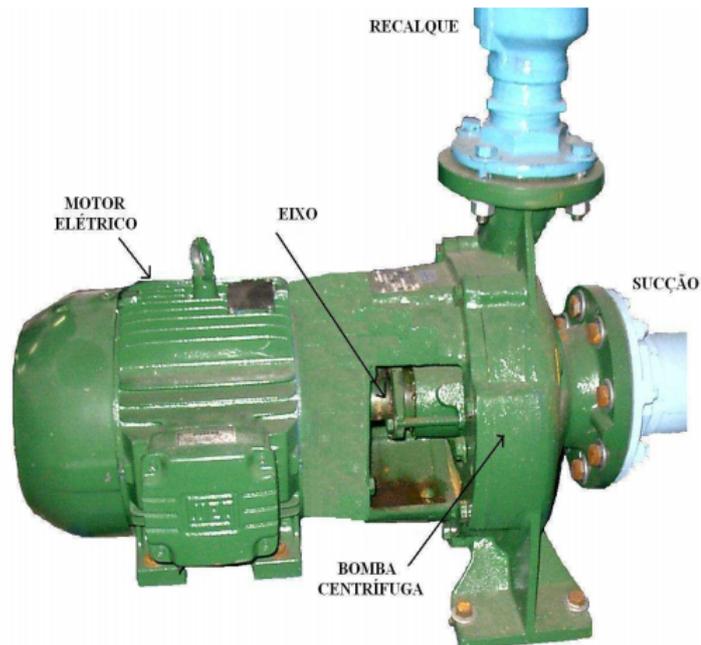
As bombas centrifugas são motores de indução mono ou polifásicos acoplados a uma estrutura que, quando acionados fornecem energia a um fluido para deslocá-lo de um ponto a outro. São compostas por pás localizadas em um coletor e acopladas a um rotor, que irão movimentar o fluido, acelerando-o de acordo com a velocidade do motor (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010, cap. 7). A Figura 4 apresenta uma bomba centrifuga com indicação de detalhes físicos.

As características do sistema bomba-tanques impacta significativamente na operação das bombas hidráulicas: considerando o sistema da Figura 5, a bomba deverá fornecer energia suficiente para vencer a altura h referente ao nível de água dos dois tanques e para compensar a perda de potência (Δh) ao longo da tubulação (AGUIRRE, 2013, cap. 11).

2.3.2 Inversores de Frequência

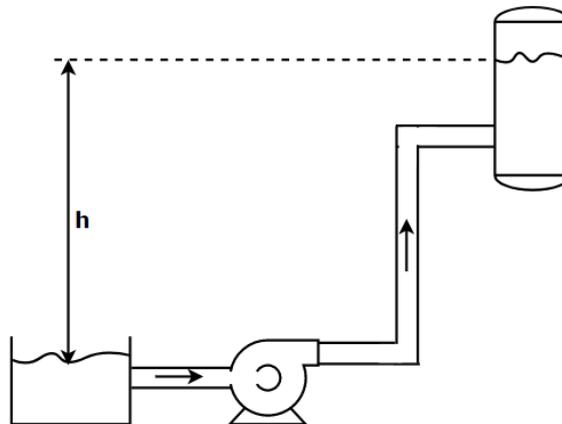
Um inversor é um circuito eletrônico de potência constituído por chaves controladas que comutam de forma a transformar uma alimentação em energia contínua em corrente alternada. O inversor trifásico industrial é composto por um circuito retificador trifásico que irá retificar a tensão senoidal da rede de abastecimento, seguido de um filtro passa baixas para converter em tensão DC. Por fim, o conversor eletrônico transforma a tensão em tensão senoidal com frequência e amplitude definida de modo atender à demanda da carga (AGUIRRE, 2013, cap. 11). Dois tipos de controle, o escalar e o vetorial, são comumente aplicados nos inversores de frequência.

Figura 4 – Bomba centrífuga.



Fonte: Barbosa (2010).

Figura 5 – Sistema de bombeamento de fluidos.



Fonte: Autor.

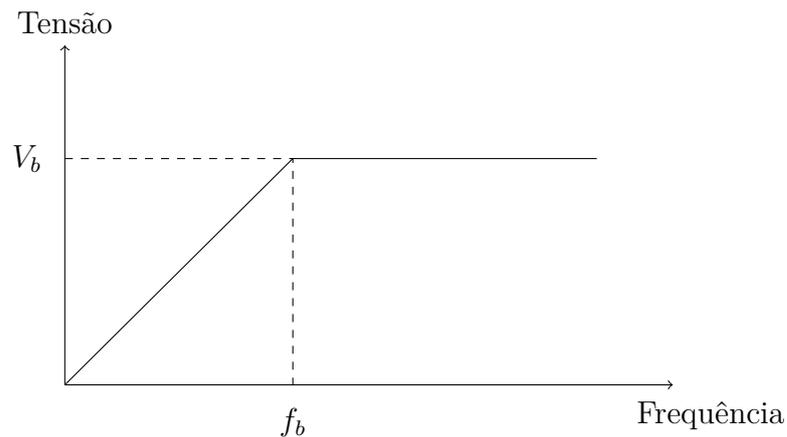
O controle escalar atua mantendo a relação entre tensão e frequência constante. Visto que o torque de um motor é proporcional ao fluxo magnetizante (2.6) e que a relação V/f , apresentada na Figura 6, não varia (2.7), o motor trabalha com torque constante até que se atinja a frequência nominal, como pode ser visto na Figura 7.

$$T = K_1 \Phi_m I_2 \cos \Phi \quad (2.6)$$

$$\Phi_m = K_2 \frac{V}{f} \quad (2.7)$$

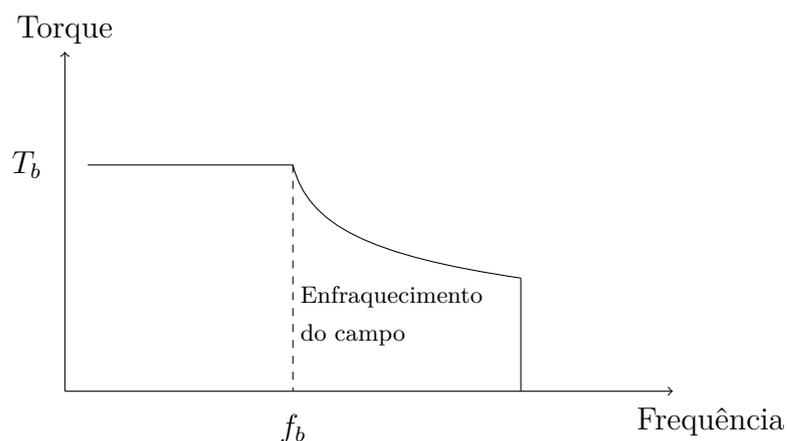
Este controle é executado em malha aberta e é recomendado quando não há necessidade torque e velocidade precisos, visto que a precisão da velocidade varia com o escorregamento, que por sua vez está relacionado à carga do motor de indução. Por outro lado este controle é mais simples e sua implementação é mais barata que o controle vetorial. O controle escalar não é recomendado quando se trabalha a baixas frequências devido à alta queda de tensão (WEG, 2016).

Figura 6 – Gráfico da relação entre tensão e frequência.



Fonte: WEG (2016).

Figura 7 – Relação entre torque e frequência.



Fonte: WEG (2016).

O controle vetorial atua regulando o torque e o fluxo magnetizante separadamente através da decomposição da corrente do motor em duas componentes: uma que produz o fluxo e outra que produz o torque. Tem como vantagem o alto grau de precisão e agilidade de controle do motor e a possibilidade de operar com baixas frequências. Pode operar em

malha aberta ou em malha fechada (com instalação de um sensor de velocidade) (WEG, 2016).

2.3.3 Válvulas

As válvulas são componentes de controle que tem a finalidade de regular o fluxo de fluidos tanto em estado líquido quanto gasoso. As válvulas podem atuar em um processo agindo como uma chave (apenas os estados aberto e fechado), ou como um elemento que permite a variação da vazão do fluido por meio do posicionamento do obturador em posições intermediárias (AGUIRRE, 2013, cap. 11).

O dispositivo mais utilizado na indústria são as válvulas pneumáticas devido ao seu baixo custo, facilidade de implementação e segurança operacional. Essas válvulas são geralmente dotadas de um conversor corrente/pressão que converte o sinal de entrada, corrente na faixa de 4 a 20mA, em um sinal de saída de pressão de ar, na faixa de 3 a 5 PSI. O sinal de pressão se relaciona com a abertura da válvula, que varia entre 0% (totalmente fechada) e 100% (totalmente aberta) (AGUIRRE, 2013, cap. 11).

O conjunto válvula e atuador pneumático são, geralmente, lentos e com tempo de acomodação elevado, efeito nem sempre desejável em um sistema. Essa característica pode ser contornada através do uso de um posicionador, que é um dispositivo que irá comparar o posicionamento da válvula de acordo com o valor de referência enviado pelo controlador (AGUIRRE, 2013, cap. 11).

As características físicas do obturador e sede das válvulas definem as particularidades do escoamento do fluido e queda de pressão sobre a válvula. Os três tipos mais comumente utilizados na indústria são (BEGA et al., 2011):

- **Válvula globo:** Aplicados em tubulações que transportam fluidos limpos uma vez que resíduos sólidos podem danificar a estrutura da válvula e comprometer seu o fechamento.
- **Válvula esfera:** Essa válvula é indicada quando o fluido que circula pela tubulação contem resíduos e sólidos em suspensão devido a sua boa vedação.
- **Válvula borboleta:** As válvulas borboleta são dispositivos de baixo custo de implementação e manutenção e capacidade elevada, consistindo em um disco basculante que restringe o fluxo de acordo com sua inclinação.

2.4 Instrumentos Inteligentes

Sensores e atuadores são denominados inteligentes quando são dotados de microeletrônica embarcada que proporciona a habilidade de modificar o modo como operam

para otimizar suas funções, concedendo um certo nível de inteligência e autonomia ao instrumento (TIAN; ZHAO; BAINES, 2000). Possuem microcontroladores e processadores que realizam as funções antes executadas por conversores A/D e eletrônica analógica, levando ao aumento da confiabilidade e acurácia do dispositivo (MEIJER, 1994).

Instrumentos inteligentes são amplamente utilizados em combinação com a tecnologia *fieldbus* de comunicação industrial, que é abordada no Capítulo 3, para fornecer dados de alta qualidade e o status em tempo real da performance do dispositivo, com as vantagens de possuir custo de instalação relativamente baixo e ser de fácil manutenção (TIAN; ZHAO; BAINES, 2000).

As características destes instrumentos permitem que possuam uma série de funções além da leitura de variáveis do processo e atuação em campo (TIAN; ZHAO; BAINES, 2000):

- **Auto-calibração:** A calibração se refere a ajustes feitos em um dispositivo de modo a ajustar a relação entre sinais de entrada e saída. Um instrumento inteligente tem a capacidade de armazenar informações e registros de leitura ou atuação, deixando-os disponíveis para que o próprio equipamento os compare com dados atuais e defina se é necessário uma nova calibração ou não.
- **Auto-compensação:** A compensação é a correção de desvios de leitura ou atuação devido a características inerentes ao equipamento ou ao seu uso, prever e detectar possíveis falhas e manter a acurácia e precisão a longo prazo. Em um sensor inteligente, essa compensação é feita por meio de algoritmos que utilizam modelos complexos, como redes neurais.
- **Auto-diagnóstico:** Utilização de modelagens matemáticas para detectar, identificar e descrever falhas no instrumento. Com isso, há redução do risco de acidentes, maior qualidade do produto e aumento da disponibilidade e eficiência da planta.

2.5 Controle de Processos

O controle de processos é um campo da engenharia destinado a estudar e implementar estratégias e projetos de controle de sistemas, visando aprimorar um processo de manufatura, eficiência do uso de energia, redução e automatização da mão de obra, entre outros objetivos (DORF; BISHOP, 2001, cap. 1).

Dorf e Bishop (2001, cap. 1) definem os sistemas de controle como "uma interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzirá uma resposta desejada ao sistema". Para entender um sistema e planejar estratégias de controle, alguns conceitos essenciais precisam ser considerados:

Sistemas Lineares

Um sistema é classificado como linear quando atende aos princípios da superposição e homogeneidade. Isso significa que respostas a excitações diferentes obtidas separadamente podem ser combinadas linearmente por meio de uma operação de soma (superposição) e que a multiplicação de um sinal de entrada por um escalar resulta na multiplicação do sinal de saída por este mesmo escalar (homogeneidade). Em termos matemáticos, se $u_1(t)$ for uma entrada que produz a saída $y_1(t)$ e $u_2(t)$ for uma outra entrada que produz a saída $y_2(t)$, e a e b escalares quaisquer:

$$au_1(t) + bu_2(t) \Rightarrow ay_1(t) + by_2(t) \quad (2.8)$$

Quando esta relação não é atendida, tem-se um sistema não linear, que são de análise muito mais complexa que os lineares. Quando um sistema tem características não lineares muitas vezes utiliza-se o recurso da linearização em torno de um ponto de equilíbrio, de modo a fornecer uma solução que atenda essa região. Alguns fenômenos físicos causam não linearidade, como a saturação, zona morta e histerese (NISE, 2011, cap. 2).

Sistema Invariante no Tempo

Um sistema é definido como invariante no tempo quando sua dinâmica não é alterada no período de tempo e deslocamento no tempo no sinal de entrada deve causar o mesmo deslocamento no tempo no sinal de saída. Em outras palavras, dado um sinal de entrada $u(t)$ que produz uma saída $y(t)$, se as relações em (2.9) e (2.10) forem verdadeiras o sistema é invariante no tempo.

$$u(t) \Rightarrow y(t) \quad (2.9)$$

$$u(t - t_0) \Rightarrow y(t - t_0) \quad (2.10)$$

Atraso de Transporte

O atraso de transporte, ou atraso puro de tempo, ou tempo morto é um fenômeno que ocorre em sistemas reais caracterizado pelo retardo que ocorre na ação do controlador ou atuador devido ao tempo necessário para o deslocamento de um material ou energia, tendo efeito instabilizante no sistema (SEBORG; MELLICHAMP; EDGAR, 2008, cap. 7).

O atraso puro de tempo pode ser aproximado em uma função no domínio de Laplace, conforme Equação (2.11).

$$G(s) = e^{-\theta s} \quad (2.11)$$

2.5.1 Modelagem Matemática de Sistemas Dinâmicos

Modelos matemáticos de sistemas dinâmicos podem ser definidos através de uma equação ou conjunto de equações que permitem relacionar as variáveis de entrada e saída

de um sistema físico (DORF; BISHOP, 2001, pag. 26). Estas equações podem ser obtidas por meio de técnicas de modelagem, que podem ser encaixadas em três categorias: a modelagem caixa branca, modelagem caixa preta e modelagem caixa cinza (AGUIRRE, 2007, pag. 36).

Para desenvolver a modelagem caixa branca é preciso compreender a dinâmica do sistema e a física que o descreve. Também chamada de modelagem conceitual, muitas vezes torna-se inviável devido ao conhecimento e tempo empreendido na obtenção do modelo a partir do equacionamento dos fenômenos (AGUIRRE, 2007, pag. 36). De acordo com Corrêa e Aguirre (2004), a principal vantagem da identificação caixa branca dá-se ao fato do modelo ter um significado físico, enquanto que a principal desvantagem é a dificuldade de levantamento do modelo.

Muitas vezes deseja-se levantar o modelo matemático de um sistema real cujas equações envolvidas não são conhecidas ou cuja obtenção demanda tempo e recursos. Nestes casos, o mais adequado é o emprego da modelagem caixa preta, ou empírica, como alternativa, em que o modelo é obtido usando apenas os dados de entrada e saída do sistema (AGUIRRE, 2007, pag. 36). Ao contrário do observado na identificação caixa branca, a caixa preta não possui interpretação física, porém tem como vantagens a possibilidade de seleção de modelos com estruturas adequadas para o projeto de controle (POTTMANN; PEARSON, 1998).

Por último, tem-se a modelagem caixa cinza, que é uma combinação das modelagens caixa branca e caixa preta. Esta técnica utiliza tanto os dados do sistema quanto o conhecimento prévio do processo para a identificação do modelo. Existem na literatura vários métodos de modelagem caixa cinza, que podem ser mais claros (utilizam maior volume de informações auxiliares) ou mais escuros (utilizam mais dados do sistema) (AGUIRRE, 2007, pag. 36).

A escolha da técnica mais adequada deve ser sempre coerente com os recursos disponíveis e de forma a minimizar os custos e complexidade do procedimento de identificação do sistema.

2.5.1.1 Modelagem Empírica de Sistemas

A modelagem empírica, ou modelagem caixa preta, se dedica a encontrar um modelo que descreva um sistema a partir da análise dos dados de entrada e saída obtidos a partir da excitação deste. Aguirre (2007, cap. 1) resume o processo de identificação de sistemas em cinco etapas:

- **Execução experimental e coleta de dados:** Obtenção dos dados de entrada e saída do sistema a ser modelado;

- **Seleção da representação do modelo que será adotado:** Deve-se determinar se o modelo será linear ou não e escolher uma estrutura apropriada: função de transferência, modelo em estado de espaços, auto-regressivo, etc.;
- **Escolha da estrutura do modelo:** Determinação dos polos e zeros e atraso puro de tempo;
- **Estimação dos parâmetros do modelo:** Seleção do algoritmo de obtenção dos parâmetros, que deve ser feito de acordo com as propriedades da representação matemática;
- **Validação do modelo:** Comparação entre o modelo obtido e sistema real usando uma base de dados própria para validação dos resultados.

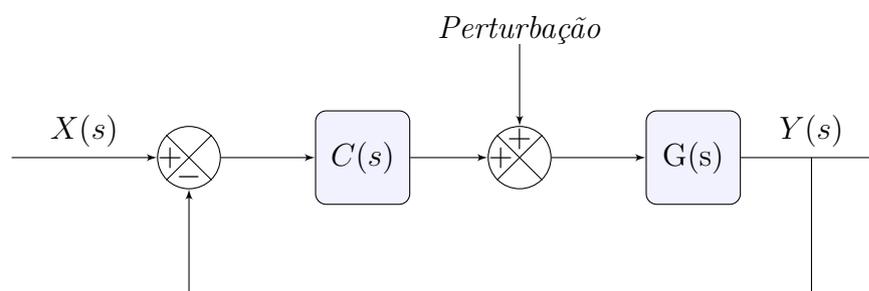
2.5.2 Estratégias de Controle de Sistemas Dinâmicos

2.5.2.1 Controle *Feedback*

O controle *feedback*, ou em malha fechada, é o controle mais usado e conhecido, tendo como característica a formação de uma malha fechada a partir da conexão entre a saída do sistema e a entrada do controlador. Com isso, o controlador compara a saída com o valor de *setpoint* e aplica as ações necessárias para o funcionamento adequado do processo (STEFANI et al., 2001, cap. 1).

A Figura 8 apresenta o diagrama de blocos para um sistema de controle com *feedback*, em que $C(s)$ representa o controlador e $G(s)$ é o modelo da planta, $X(s)$ é a entrada e $Y(s)$ é a saída.

Figura 8 – Representação em diagrama de blocos de um sistema de controle *feedback*.



Fonte: Adaptado de Marlin (1995).

A implementação do controle em malha fechada reduz ou elimina a variação da variável controlada ao custo de uma maior variação da variável manipulada. Deve-se ter o cuidado para que essa maior variação da variável manipulada não prejudique a estabilidade da planta ou a vida útil dos instrumentos de controle (MARLIN, 1995, cap. 7).

É ideal que a resposta dinâmica entre a variável controlada e manipulada seja monotônica, direta, rápida e com pouco atraso de tempo. Recomenda-se o registro e monitoramento de ambas as variáveis para avaliar a performance do sistema de controle (STEFANI et al., 2001, cap. 1).

O uso de controle *feedback* trás algumas vantagens em relação a um sistema em malha aberta (STEFANI et al., 2001, cap. 1):

- O sistema de controle é projetado para reduzir o erro em regime permanente, resultando em maior precisão e acurácia no processo;
- O sistema é menos sensível à perturbações, e a ação corretiva ocorrerá independentemente da origem da perturbação;
- Através do ajuste dos ganhos do controlador é possível ajustar a velocidade de resposta e a banda da dinâmica para atender as necessidades do processo.

Por outro lado, a ação corretiva só ocorre depois que a perturbação atuou no sistema, logo se essa perturbação for suficientemente grande, o controlador pode ser ineficiente no controle do sistema (SEBORG; MELLICHAMP; EDGAR, 2008, cap. 1).

2.5.2.2 Controle *Feedforward*

O controle *feedforward* tem, como característica, a leitura da perturbação do sistema e utilização dessa variável para aplicar medidas corretivas antes que a variável controlada desvie do *setpoint* especificado. O controle *feedforward* visa cancelar os efeitos da perturbação, e embora o cancelamento ideal geralmente não seja possível, este controle diminui significativamente os efeitos indesejados (SEBORG; MELLICHAMP; EDGAR, 2008, cap. 1).

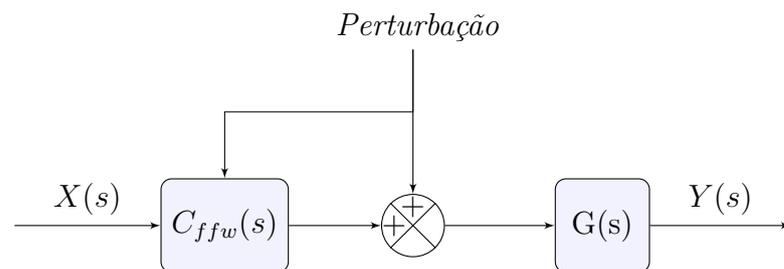
A sua implementação melhora a estabilidade do sistema, principalmente quando a constante de tempo ou atraso de tempo são grandes, porém apresenta algumas desvantagens (SEBORG; MELLICHAMP; EDGAR, 2008, cap. 15):

- A perturbação precisa ser medida em tempo real. Muitas vezes isso requer a instalação de um novo instrumento de medição, elevando o custo de implementação do controle. Em muitos sistemas esta adaptação não é possível, inviabilizando a utilização do controle.
- O controle só é efetivamente implementado quando se tem um modelo aproximado do processo, pois é necessário saber como a variável controlada responde à alterações tanto na variável manipulada quando na perturbação. A qualidade do controle está relacionada à precisão do modelo do processo.

- O controle *feedforward* ideal pode não ser fisicamente realizável, embora aproximações práticas de controles ideais possam fornecer um controle efetivo.

O controle *feedforward* procura, constantemente, balancear a energia ou matéria de um sistema de acordo com a demanda imposta pela perturbação. A Figura 9 apresenta um modelo em diagrama de blocos simplificado de um sistema com controle *feedforward*, em que $C_{ffw}(s)$ representa o modelo do controlador e $G(s)$ é o modelo do processo.

Figura 9 – Representação em diagrama de blocos de um sistema de controle *feedforward*



Fonte: Adaptado de [Seborg, Mellichamp e Edgar \(2008\)](#).

É comum o uso do controle *feedforward* associado com o *feedback*, em que o *feedforward* é aplicado para reduzir os efeitos das perturbações, enquanto o *feedback* compensa os erros de leitura, imprecisões no modelo do processo e perturbações não aferidas ([SEBORG; MELLICHAMP; EDGAR, 2008](#), cap. 15).

O controle *feedback-feedforward*, também chamado de controle com Dois Graus de Liberdade (2DOF), pode ser associado de diversas maneiras. Na configuração mais comum, os controles *feedback* e *feedforward* são somados, e a soma é enviada para um elemento final de controle. Deve-se ressaltar que, quando associados dessa forma, a estabilidade de um controlador não interfere na estabilidade do outro. Outro modo de combinação consiste em usar a saída do *feedback* como *setpoint* para o *feedforward*, sendo adequado para situações onde a lei de controle do *feedforward* é projetada considerando os valores em regime permanente do balanço de massas/energético. Neste caso, a estabilidade do *feedforward* pode impactar na estabilidade do *feedback* pelo fato daquele se tornar parte da malha ([SEBORG; MELLICHAMP; EDGAR, 2008](#), cap. 15).

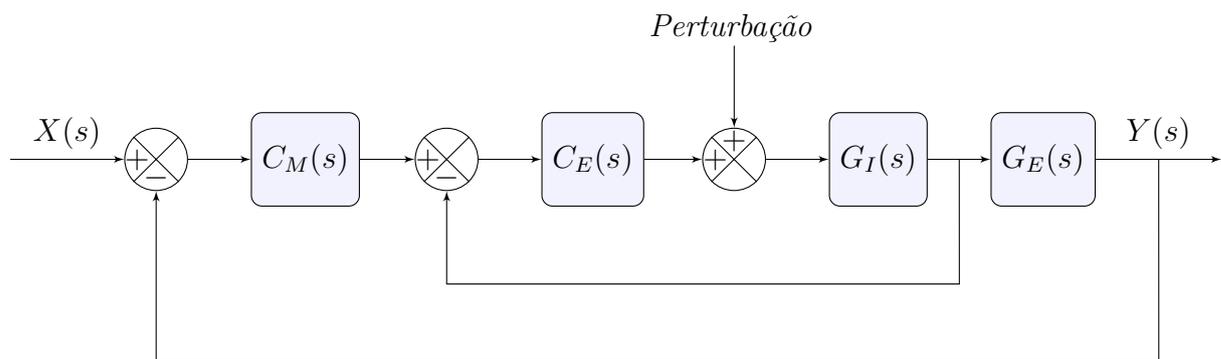
2.5.2.3 Controle Cascata

O controle cascata é uma outra estratégia de controle que objetiva melhorar a resposta do sistema na presença de perturbações através da adição de um novo controle (escravo) que irá atuar de acordo com uma segunda medição, que realiza a leitura de uma segunda variável que seja mais sensível à perturbação no sistema antes da variável manipulada, sem que seja necessário fazer a aferição da perturbação. Sua utilização é

recomendada em casos onde as perturbações estão associadas à variável manipulada, quando o elemento final de controle tem comportamento não linear ou quando o controle não tem performance adequada para o processo (SEBORG; MELLICHAMP; EDGAR, 2008, cap. 16).

A Figura 10 apresenta o diagrama de blocos de um sistema de controle em cascata, em que $C_M(s)$ representa o controle primário (mestre), $C_E(s)$ o controle escravo, e $G_I(s)$ e $G_E(s)$ são os modelos do processo para a variável auxiliar e manipulada, respectivamente.

Figura 10 – Representação em diagrama de blocos de um sistema de controle cascata.



Fonte: Adaptado de Seborg, Mellichamp e Edgar (2008).

Observa-se que o controlador mestre fornece o valor de *setpoint* para o controlador escravo, e por isso a malha interna é, de certo modo, a variável manipulada da malha externa. O controle cascata é menos sensível a erros de modelagem, quando comparado a outras estratégias de controle (MARLIN, 1995, cap. 14).

A seleção da variável secundária deve ser feita de acordo com três importantes critérios (MARLIN, 1995, cap. 14):

- A variável deve indicar ou se relacionar à alguma perturbação que impacta o sistema;
- A variável manipulada deve influenciar a variável auxiliar para que a malha de controle escrava funcione adequadamente;
- A dinâmica da variável secundária deve ser pelo menos três vezes mais rápida que a dinâmica da variável manipulada, ou seja, a dinâmica interna deve atingir o estado estacionário três vezes mais rápido que a dinâmica externa.

Embora seja eficiente, o uso do controle cascata implica na utilização de um sensor e um controlador a mais, equivalente à malha secundária, o que resulta no aumento dos custos de implementação do controle e na redução, ainda que pequena, da confiabilidade do sistema (MARLIN, 1995, cap. 14).

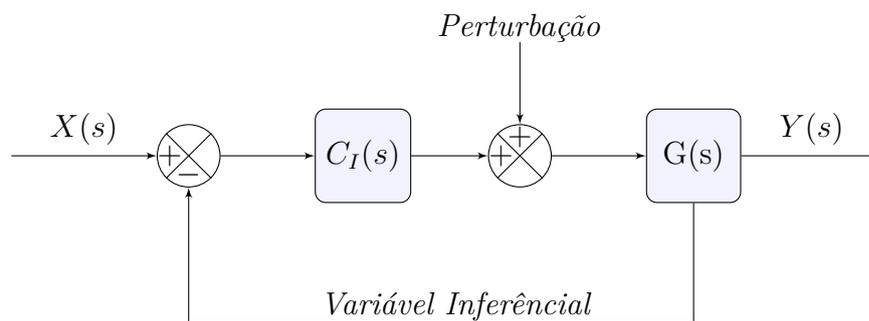
2.5.2.4 Controle Inferencial

O controle inferencial é uma abordagem que pode ser usada quando não é possível mensurar a variável controlada ou a medida é amostrada com grande atraso de tempo. O controle do sistema é, então, realizado a partir da leitura de uma variável secundária, cuja obtenção seja mais confiável, barata ou rápida, que permitirá estimar a variável controlada (JOSEPH, 1999).

Este tipo de controle depende da seleção de uma variável auxiliar adequada. A variável inferencial deve ser relacionada com a variável controlada, e essa relação deve ser insensível às variações nas condições de operação na faixa de operação do sistema. Além disso, a variável deve ter uma dinâmica favorável para o uso de controle *feedback*. Este controle pode reduzir consideravelmente, mas não eliminar, o erro em regime permanente causado por perturbações (MARLIN, 1995, cap. 17).

A Figura 11 apresenta um modelo simplificado de um sistema com controle inferencial, em que $C_I(s)$ representa o controle inferencial e $G(s)$ é o modelo do processo.

Figura 11 – Representação em diagrama de blocos de um sistema de controle Inferencial.



Fonte: Adaptado de Seborg, Mellichamp e Edgar (2008).

Um controle inferencial possui o mesmo princípio que qualquer outro controle *Single Input Single Output* (SISO) ou cascata. Para o projeto do controle pode-se escolher entre dois tipos de abordagem: a abordagem empírica, em que a variável inferencial é selecionada de acordo com dados experimentais ou simulados do processo; e a abordagem analítica, que se baseia no levantamento e análise de modelos levantados (MARLIN, 1995, cap. 17).

3 Planta Didática SMAR PD3-F

A planta didática SMAR PD3-F foi desenvolvida com o objetivo de emular um ambiente industrial. Vem acompanhada de sensores e atuadores inteligentes, além de bombas d'água, controladores e malhas de controle de realimentação negativa, controle antecipativo e controle em cascata, disponibilizando ainda a opção de criar novas malhas de acordo com a necessidade do usuário. Uma imagem da planta é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Planta SMAR PD3-F.



Fonte: Manual de Instruções [SMAR \(2012\)](#).

A planta é dotada dos seguintes dispositivos:

- Um controlador DF63;

- Um controlador DF75;
- Dois sensores de vazão;
- Um sensor de nível;
- Um sensor de temperatura;
- Um conversor *fieldbus* para corrente;
- Um tanque de armazenamento;
- Um tanque de aquecimento;
- Um tanque de mistura;
- Duas válvulas pneumáticas;
- Uma bomba monofásica;
- Uma bomba trifásica;
- Um inversor de frequência trifásico;
- Três resistências de aquecimento;
- Um conversor de potência;
- Botões para acionamento das bombas e da resistência;
- LEDs indicativos.

Os procedimentos de configuração e operação da planta são realizados através do Sistema de Controle de Processos SYSTEM302, que centraliza o gerenciamento, conexão e monitoramento da planta. A comunicação dos instrumentos com os controladores é feita por meio de FoundationTMFieldbus (FF). Já a comunicação entre os controladores e o computador de configuração e aquisição de dados é feita por OLE for Process Control (OPC), que será abordado na seção 3.1.2.

3.1 Rede FoundationTMFieldbus (FF)

A comunicação *Fieldbus* é definida por Thomesse (2005) como um protocolo de comunicação projetado para interconectar dispositivos em redes industriais, como Controladores Lógico Programáveis (CLPs), sensores, atuadores e *drives* com o objetivo final de controlar um processo. A comunicação fieldbus é digital e bidirecional, e foi originalmente proposta como substituta para a comunicação analógica 4-20 mA.

A tecnologia **FF** é um dos diversos tipos de comunicação fieldbus com arquitetura *open source*, e dentre os protocolos *fieldbus* é um dos mais usados em instrumentação de processos e em aplicações de sistemas de controle. O **FF** se diferencia de outros protocolos devido a existência de um controle local, em cada dispositivo, que apesar de elevar o custo de aquisição dos elementos de automação, minimiza a necessidade e dependência de uma arquitetura centralizada de controle (Fieldbus Inc, 2001).

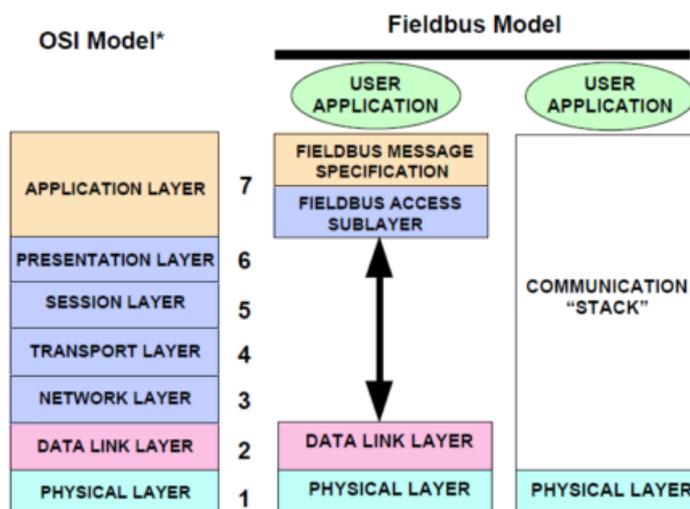
O **FF** adere ao modelo **OSI** da International Standards Organization (**ISO**), que estabelece diretrizes e referências para arquitetura e protocolos de rede de modo a permitir a comunicação entre dispositivos heterogêneos. O modelo **OSI** subdivide os procedimentos de comunicação digital em sete camadas (International Organization for Standardization, 1996):

1. **Camada Física:** Camada que fornece todos os meios e procedimentos elétricos, mecânicos e funcionais necessários para a transmissão de dados;
2. **Camada de Enlace:** Esta camada é responsável pela conexão entre dois dispositivos diretamente conectados, detectando erros e controlando o fluxo de dados entre eles;
3. **Camada de Rede:** A camada de rede gerencia e estrutura endereçamento, roteamento e controle de tráfego entre dois dispositivos conectados em redes diferentes;
4. **Camada de Transporte:** Esta camada provê a transferência de dados de maneira confiável, eficiente e em acordo com a qualidade de serviço necessária para a comunicação;
5. **Camada de Sessão:** A camada de sessão organiza e sincroniza as sessões de comunicação entre duas aplicações, gerencia o tráfego de dados entre essas aplicações elas e é responsável por encerrar as conexões quando não são mais necessárias;
6. **Camada de Apresentação:** Esta camada é a responsável por prover uma representação comum dos dados transferidos entre aplicações e por garantir que o conteúdo enviado pela camada de aplicação seja preservado durante a troca de dados;
7. **Camada de Aplicação:** Camada mais elevada, que oferece meios para que um processo de aplicação acesse a rede. Agrega todas as funções que permitem a comunicação entre dois sistemas que não podem ser conectados através das camadas anteriores. Estas funções podem ser executadas por programas ou pelo usuário.

Existe uma oitava camada não descrita pelo modelo **OSI** chamada Camada Usuário, que estabelece a conexão entre o usuário final e a rede de comunicação (LU; MOTANI; WONG, 2010).

O protocolo FF, no entanto, compacta suas funcionalidades em apenas três camadas: camada física, a pilha de comunicação e Aplicação *Function Block* (Fieldbus Inc, 2001). A Figura 13 apresenta um esquema da relação entre o modelo OSI e o protocolo *fieldbus*.

Figura 13 – Representação esquemática demonstrando a relação entre o modelo OSI e o Fieldbus.



Fonte: Foundation Fieldbus (2014).

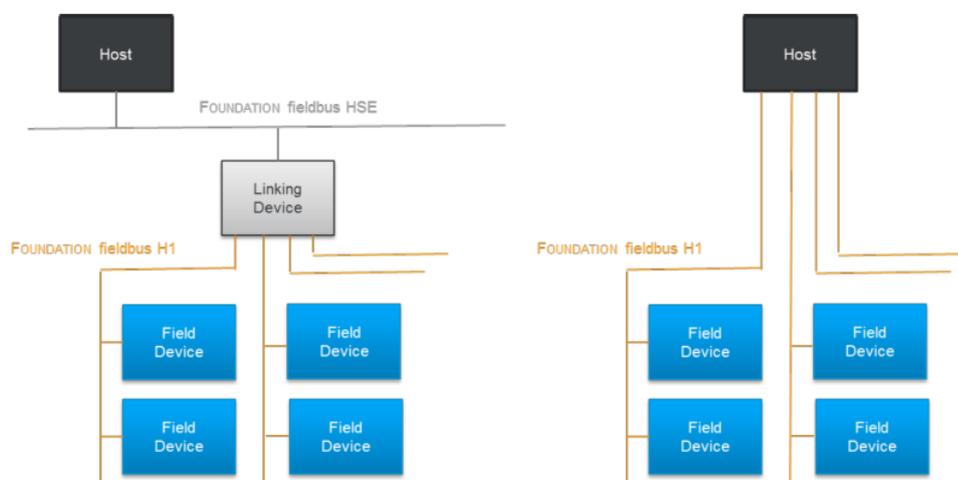
A camada física, assim como no modelo OSI, define requisitos elétricos e mecânicos necessários para a transmissão do sinal de dados entre dispositivos fieldbus. A planta SMAR PD3 utiliza dois perfis diferentes de comunicação:

- **Tecnologia H1:** Rede com taxa de dados de 31,25 kbit/s e que admite vários tipos de topologias de rede: ponto a ponto, barramento com *spur* (paralelo) ou *daisy chain* (em série). Sua baixa frequência, altos níveis de sinais e baixa impedância torna possível o uso de par trançado para distribuição de potência e comunicação confiável, reduzindo custo com cabeamento (Fieldbus Inc, 2001).
- **Tecnologia HSE:** Camada física baseada na comunicação via cabeamento *ethernet* padrão, com taxa de transmissão de dados de 100 Mbits/s. Fornece maior velocidade e permite integração com sistemas de gerenciamento de informações. O HSE integra o fieldbus H1 a um *host* (por exemplo, um Sistema de Controle Distribuído) (Fieldbus Inc, 2001; Foundation Fieldbus, 2014).

A Figura 14 apresenta as topologias de rede possíveis usando o FF.

A pilha de comunicação une as especificações das camadas 2 (enlace) e 7 (aplicação) do modelo OSI, dispensando a necessidade das camadas 3 a 6 pelo fato do fieldbus ser uma rede local. Esta camada possui um dispositivo *host* cuja função é configuração e *set up* da rede. Existem vários tipos de elementos de campo, sendo os principais:

Figura 14 – Representação topológica das arquiteturas FoundationTMFieldbus (FF) HSE e H1.



Fonte: Foundation Fieldbus (2014).

- **Link Master:** Responsável por controlar toda a comunicação da rede FF.
- **Básico:** Realiza toda a comunicação básica necessária de um dispositivo de campo.
- **Linking Device:** Elemento que conecta um segmento de rede H1 a um segmento HSE, transmitindo dados entre a rede fieldbus e rede *ethernet* e agindo como o roteador de informações entre os vários segmentos e dispositivos.
- **Gateway:** Conecta uma rede *fieldbus* a outros protocolos de transmissão de dados, por exemplo o Modbus.

A transmissão de dados pela rede fieldbus se faz de maneira sincronizada para transmissão periódica e precisa de dados usados em controle, e de maneira não sincronizada para transmissão de outras informações, como alarmes. As mensagens podem ser transmitidas entre os próprios dispositivos, e a confirmação de recebimento dos dados é exigida quando apropriado (Fieldbus Inc, 2001).

A camada Aplicação *Function Block* se baseia na camada usuário e é caracterizada por blocos de função que realizam um conjunto de operações em sinais de entrada para gerar sinais de saída com o objetivo de implementar estratégias de controle. Estes blocos são executados periodicamente sob comando do dispositivo onde se encontram. Dispositivos de campo devem empregar blocos transdutores que irão interfacear a rede com a tecnologia do dispositivo (Fieldbus Inc, 2001).

3.1.1 Ciclos de Dados

O FF utiliza dois tipos de comunicação: cíclica, onde são executadas as tarefas de controle das variáveis de processo além da execução e monitoramento de funções; e acíclica, que é usada para o tráfego de informações não agendadas, como dados de diagnóstico e manutenção, configuração e parametrização. A soma do tempo despendido com cada uma dessas formas de comunicação é chamada de *macrocycle*, ou macrociclo (SIEMENS, 2012, p. 8).

O *macrocycle* é impactado pela configuração da planta, mas pode ser estimado a partir do número de *object links* (conexão entre blocos de um mesmo dispositivo ou de dispositivos diferentes), elementos de campo e quantidade de blocos (SMAR, 2016b). Na planta SMAR o tempo acíclico é chamado de *background traffic* e é calculado reservando 30 ms para cada Bloco Funcional (FB) de cada dispositivo conectado à rede. Portanto se um canal H1 possui 3 dispositivos de campo com 10 FB cada, o tempo reservado para o *background traffic* é de pelo menos 900ms ($3 * 10 * 30ms$). O tempo cíclico (ou *foreground traffic* na SMAR) é calculado somando 30ms para cada *object link* na rede. Logo se uma rede H1 possui 5 *object links* o tempo reservado para o processamento cíclico dos dados deve ser igual a 150ms ($5 * 30ms$). É recomendado a adição de uma margem de segurança de 20%, então o tempo de *macrocycle* total para essa configuração é de 1260ms ($1050ms + 210ms$).

O *macrocycle* é um parâmetro que deve ser estimado com atenção para que os dispositivos atuem de forma estável sem que haja prejuízo no tempo de resposta durante o monitoramento e supervisão (SMAR, 2016b).

3.1.2 Protocolo OPC

O OLE for Process Control (OPC) é um conjunto de regras adotadas para padronizar a interface de comunicação industrial, de modo a permitir troca de dados entre dispositivos industriais (como CLPs, sensores de campo, atuadores) e aplicações industriais (como supervisórios, MES, PIMS) independente do protocolo de comunicação usado na planta (OPC Foundation, 1999).

A tecnologia OPC trabalha com modelo cliente-servidor. O servidor, geralmente uma estação de trabalho, acessa os dispositivos industriais e disponibiliza estes dados em um formato padrão OPC. O cliente, por sua vez, acessa os dados no servidor OPC e executa a tarefa para qual foi designado (BERGE, 2004, cap. 7).

A interface OPC se baseia no uso de *tags*, ou seja, cada variável tem um nome, que deve ser usado para acessá-la. Com essa medida não é necessário configurar registradores de memória, endereçamento e tipos de dados (BERGE, 2004, cap. 7).

Uma variável pode ter dois modos de acesso: *read*, em que somente sua leitura é

possível, e *read/write*, em que o cliente pode ler e modificar a variável em questão. Ao ler uma variável obtêm-se, como dados, a sua origem (*source*), o seu valor (*value*), seu status de leitura (*quality*) e seu *timestamp*. Para modificá-la, basta que seja enviado o valor desejado (OPC Foundation, 1999).

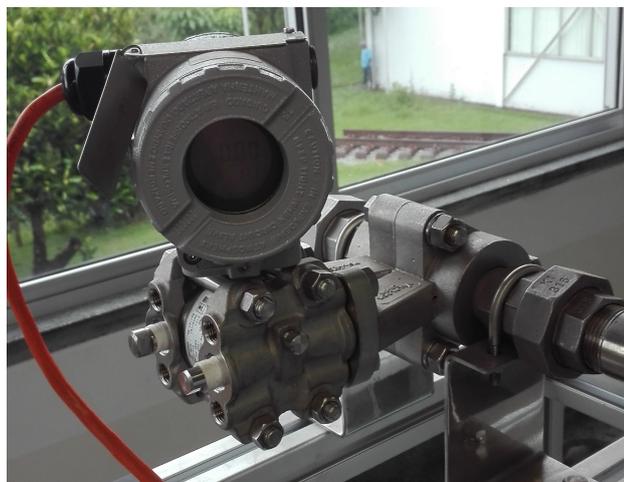
3.2 Elementos de Controle da Planta SMAR PD3

Esta seção aborda os elementos de controle de variáveis existentes na planta que serão utilizados neste trabalho.

3.2.1 Transmissor de Pressão LD302

O sensor LD302 é um transmissor de pressão diferencial, absoluto e manométrico de nível e de vazão. O sensor de pressão é do tipo capacitivo, cujo modo de funcionamento é abordado na seção 2.2.3 (SMAR, 2016a). A Figura 15 apresenta o LD302 montado na planta didática.

Figura 15 – Transmissor de pressão montado na planta SMAR PD3.



Fonte: Autor.

Uma vez energizado este instrumento precisa de aproximadamente 10 segundos para iniciar sua operação. Possui exatidão de $\pm 0,04\%$, a estabilidade de $\pm 0,2\%$ do limite superior de faixa, e rangeabilidade de 120:1. Possui uma função raiz quadrada, que é usada na obtenção da medida de vazão através do valor de pressão diferencial medido (SMAR, 2016a; SMAR, 2014a).

3.2.2 Conversor fieldbus para corrente FI302

O conversor FI302 é um dispositivo projetado para conectar os atuadores da planta ao Sistema FF, produzindo uma corrente de saída proporcional à entrada fornecida pela rede (SMAR, 2014b).

A variável de entrada é um sinal digital, transferido via protocolo fieldbus, e produz, três saídas de corrente 4 a 20mA. Ao ser inicializado o FI302 leva cerca de 10 segundos para iniciar sua operação, e o tempo de atualização é em torno de 200ms. A precisão relatada pelo fabricante é de 0,1% (SMAR, 2014b). O conversor de corrente da planta didática pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Conversor Fieldbus para corrente com três canais montado na planta SMAR PD3.



Fonte: Autor.

3.2.3 Controlador DF63

O DF63 é um dispositivo constituído de 4 canais H1 (FF) e duas portas 10/100Mbps *ethernet*, podendo operar como um *linking device*, uma *bridge* H1-H1 ou *gateway* Modbus. Sua versatilidade confere grande flexibilidade na implementação de estratégias de controle e comunicabilidade entre aparelhos (SMAR, 2016b).

Quando atua como *bridge* entre o HSE e H1 assume quatro funções: encaminha relatórios, publica dados, encaminha mensagens entre dispositivos e distribui o tempo entre as aplicações. Pode ser associado à módulos de E/S, o que permite a realização de

controle discreto por meio de lógica Ladder (SMAR, 2016b). Na Figura 17 é possível ver o módulo DF63 em destaque, juntamente com outros módulos dispostos no rack.

Figura 17 – Imagem do rack com destaque para os módulos DF63 e DF75.



Fonte: Autor.

3.2.4 Controlador DF75

O DF75 é um dispositivo HSE com duas portas *ethernet* cuja finalidade é integrar o controle discreto e contínuo através de blocos funcionais FF. A sua associação com módulos de E/S garante a execução de controle discreto por meio de lógica ladder. Este módulo permite a criação e execução de Bloco Funcional Flexível (FFB), que conecta o diagrama ladder às estratégias de controle FF (SMAR, 2016b). A Figura 17 mostra em destaque o módulo DF75 juntamente com os módulos de E/S digital disponíveis.

4 Ensaios e Resultados

Para a execução deste trabalho, foram realizados quatro ensaios: a calibração do sensor turbina, o levantamento da curva de reação da vazão de entrada pela corrente do inversor e implementação de dois tipos de controle de nível. Os ensaios, com exceção do primeiro, foram realizados na planta didática SMAR PD3-F, indicada pela Figura 18, direcionando a água do tanque de armazenamento (marcador (7)) para o tanque de aquecimento (marcador (1)).

Figura 18 – Planta SMAR PD3-F.



Fonte: Adaptado de SMAR (2012).

Foi necessário instalar um sensor de vazão na saída do tanque de aquecimento utilizando conexões de tubo PVC, conforme visto na Figura 19. O diagrama final de fluxo do processo, com a instalação do sensor de vazão de saída, é apresentado na Figura 22.

Figura 19 – Adaptação feita para acoplar o sensor de vazão YF-S201 à planta SMAR PD3-F.



Fonte: Autor.

4.1 Calibração do Sensor Turbina

O sensor utilizado para a medida da vazão de saída do tanque foi o YF-S201, cujo *datasheet* se encontra no Anexo A. Se trata de um sensor turbina com medição por efeito *hall*, alimentado por corrente contínua entre 5 e 24V. A saída é dada em forma de pulsos, cuja frequência é proporcional à vazão do fluido.

Observou-se algumas inconsistências nos dados fornecidos pelo *datasheet*, e por isso optou-se por fazer a recalibração do instrumento, com o objetivo de assegurar que os valores obtidos correspondem ao que o instrumento fornece.

A calibração foi realizada conectando a saída do sensor à um microcontrolador Arduíno Uno, que realizou a contagem dos pulsos desde o início de operação do instrumento. Foi ligado também um botão retentivo, que quando pressionado indica o início ou fim da medição. Estes dados foram fornecidos ao Matlab, por meio de comunicação serial, que calculou o tempo entre o pulso inicial e o pulso final medidos.

O sensor foi então conectado a uma mangueira de água, e todo o fluxo foi direcionado a um recipiente graduado com capacidade para 3 litros. Para realizar o teste, a mangueira foi ligada a uma vazão constante e deixou-se que a água fluísse por um determinado tempo, após o qual o fluxo foi direcionado ao recipiente graduado ao mesmo tempo em que se pressionava o botão. O botão foi novamente pressionado quando o volume de água estava próximo de 2,5 litros, ao mesmo tempo que o fluxo de água era direcionado para fora da jarra. O teste foi realizado para 6 vazões diferentes, com quatro repetições para cada valor.

Fez-se, então, a média dos valores encontrados, cujos resultados encontram-se dispostos na Tabela 1.

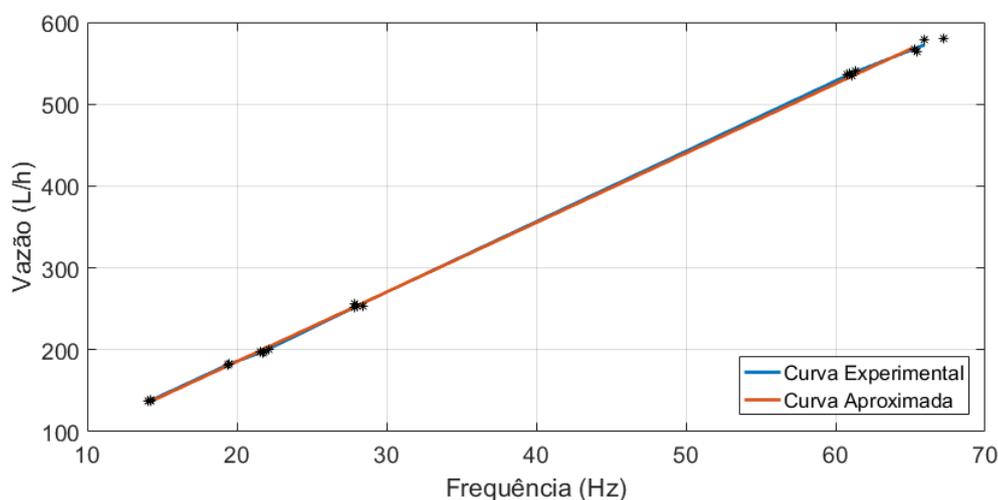
Tabela 1 – Dados de calibração do sensor de vazão YF-S201.

	N. de Pulsos	Tempo (s)	Volume (L)
Vazão 1	931,5	65,83	2,51
Vazão 2	986,8	51,09	2,57
Vazão 3	984,5	45,54	2,49
Vazão 4	1012,0	35,71	2,54
Vazão 5	1019,8	16,78	2,49
Vazão 6	1040,0	16,13	2,51

Um gráfico com os dados levantados é apresentado na Figura 20. A partir deste é possível observar que a relação entre a vazão e frequência dos pulsos, em hertz, é praticamente linear. Usou-se, então, a função *polyfit* para encontrar parâmetros de uma reta que aproxime a vazão em função da frequência. O ajuste de curva foi feito considerando aproximação por função afim, conforme Equação (4.1).

$$y = ax + b \quad (4.1)$$

Figura 20 – Curva de calibração do sensor de vazão YF-S201.



Fonte: Autor.

Os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 2. Observa-se que a inclinação da reta, dada pelo parâmetro a , é igual a 8,48, diferindo do recomendado pelo *datasheet*, que é 7.

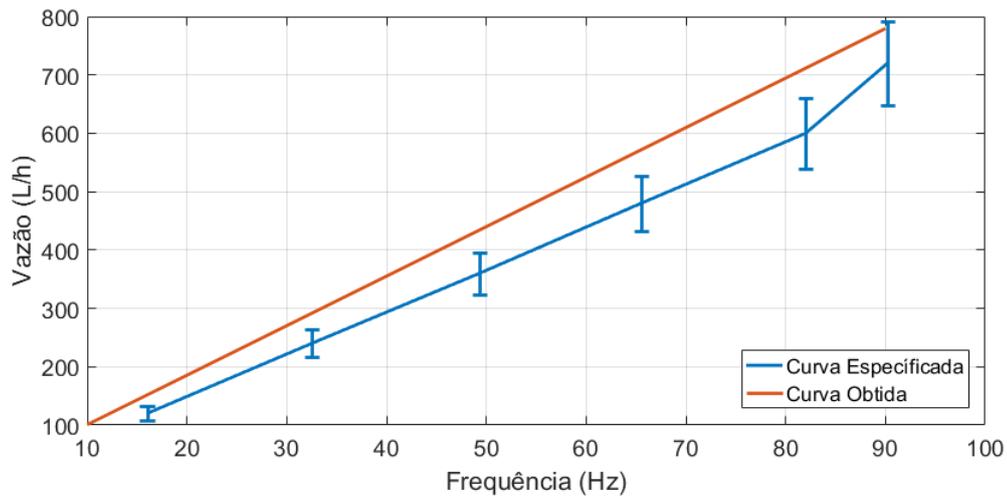
A Figura 21 compara a curva levantada com a curva fornecida pelo *datasheet*, com destaque para o erro de $\pm 10\%$, especificado pelo fabricante. Observa-se grande divergência entre os dois dados. Atribui-se como causa dessa diferença o uso prévio do sensor ou à não

Tabela 2 – Parâmetros da curva de calibração do sensor de vazão YF-S201.

	Parâmetro
a	8,48
b	16,02

veracidade dos dados fornecidos pelo documento. Este trabalho irá considerar apenas os dados levantados pela autora.

Figura 21 – Comparação entre a curva de calibração levantada e a fornecida para o sensor YF-S201.



Fonte: Autor.

Com os dados obtidos, calculou-se a incerteza padrão tipo A do instrumento, causada pela dispersão das leituras para um intervalo de confiança de 95%. Para o cálculo, foram tomadas as últimas medições, referentes à maior frequência, e estas foram aplicadas na Equação (4.2), em que N é o número de pontos, $s^2(y)$ é a variância dos pontos selecionados, e v o número de grau de liberdade. O número de graus de liberdade é dado por $v = N - M - 1$, sendo M o grau do polinômio usado para aproximação. O valor de $t_{v,P}$ é encontrado nas tabelas bicaudal da distribuição t de Student, que pode ser consultado no Anexo B.

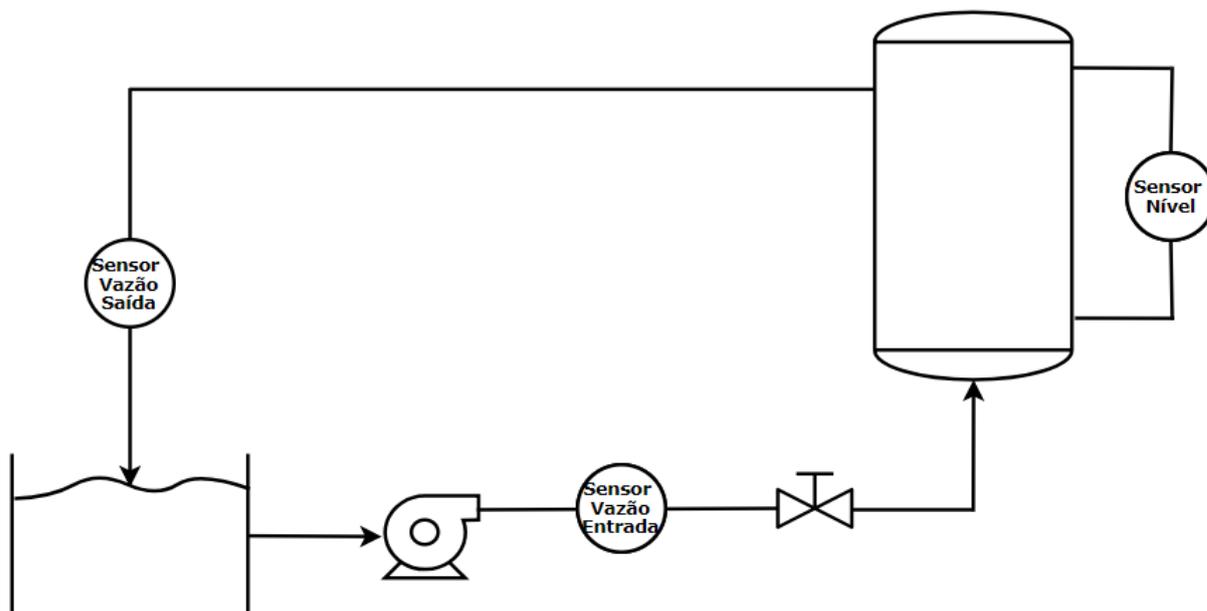
$$u_c(y) = t_{v,P} \sqrt{\frac{s^2(y)}{N}} \quad (4.2)$$

Para dois graus de liberdade, obtém-se, então, incerteza $u_c = 16,875L/h$, ou seja, para cada valor de vazão lido, há uma probabilidade de 95% de que o valor verdadeiro do mensurado se encontre em uma faixa de valores dada por $\pm 16,875L/h$.

4.2 Curva de Reação Vazão de Entrada x Corrente

Os ensaios para obtenção da curva de reação da vazão de entrada pela corrente foram realizados variando a frequência da bomba trifásica (marcador (6) da Figura 18) da planta didática, que leva à variação da velocidade da água. Um diagrama simplificado do fluxo do processo é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Diagrama representando o fluxo do processo.



Fonte: Autor.

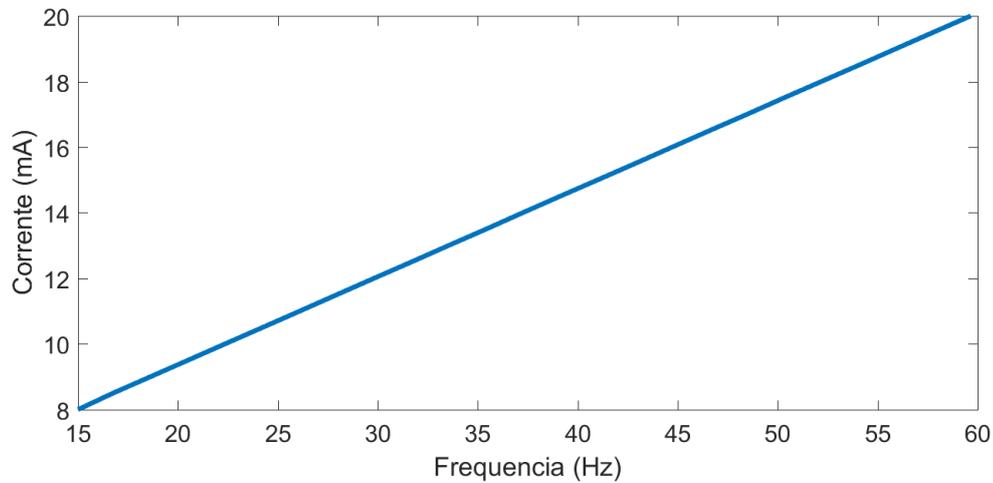
A alteração da velocidade da bomba trifásica é feita mudando a corrente de entrada do inversor de frequência, que varia de 4 a 20mA. Como cada valor de corrente resulta em um valor de frequência, levantou-se a curva I/f do inversor, que é apresentada na Figura 23. Para obtenção da curva foram lidos os valores de frequência para cada valor de corrente aplicado, fazendo três repetições de 8 a 20mA e outras três repetições de 20 a 8 mA.

Observa-se pela Figura 23 que a relação entre a frequência e a corrente de entrada é linear, assim como observado na curva V/f característica de inversores (Figura 6).

A passagem de água para o tanque de aquecimento pode ser feita pela tubulação contendo a válvula manual (marcador (3)) ou pela tubulação contendo a válvula pneumática, porém estes testes foram feitos utilizando somente a passagem de água pela válvula manual.

Os ensaios foram realizados aplicando degraus de 1mA, partindo de 8mA (corrente mínima onde se obtêm alguma leitura de vazão) até alcançar 20mA. Em seguida foram aplicados degraus de -1mA até voltar ao valor de 8mA. Os dados dos degraus de subida

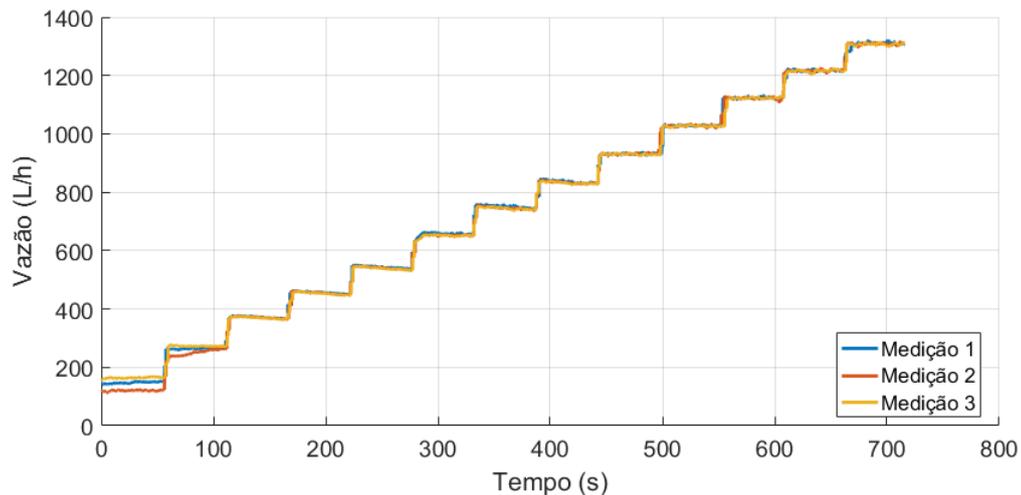
Figura 23 – Curva I/f do Inversor de Frequência da Planta SMAR PD3.



Fonte: Autor.

e descida foram obtidos e salvos separadamente por meio do *software* Matlab. O tempo mínimo de aquisição de cada degrau foi de 40 segundos, com amostragem a cada 100 milissegundos. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 24 e 25.

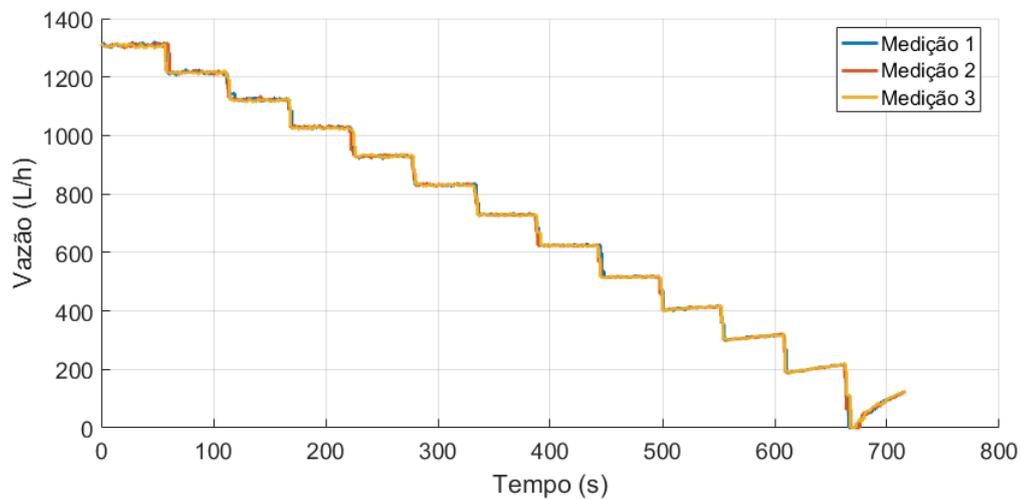
Figura 24 – Leituras de vazão obtidas aplicando degraus sucessivos de 1mA no inversor de frequência.



Fonte: Autor.

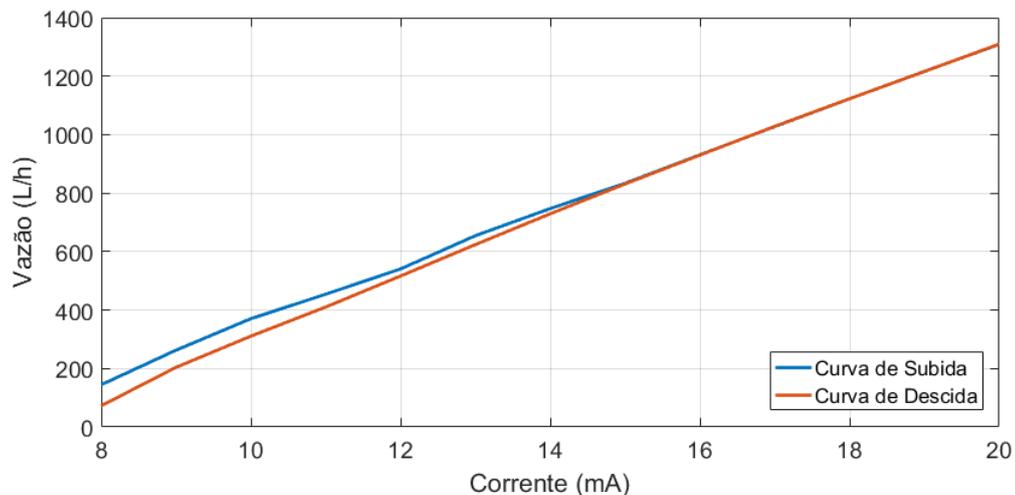
Para cada repetição extraiu-se a média de vazão em regime permanente para cada degrau, e essa média foi utilizada para obter uma média geral dos valores de vazão para cada nível de corrente aplicado no inversor. A média obtida a partir dos degraus negativos foi calculada separadamente da média dos degraus positivos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 26.

Figura 25 – Leituras de vazão obtidas aplicando degraus sucessivos de -1mA no inversor de frequência.



Fonte: Autor.

Figura 26 – Curva de reação da vazão de entrada pelo valor de corrente.

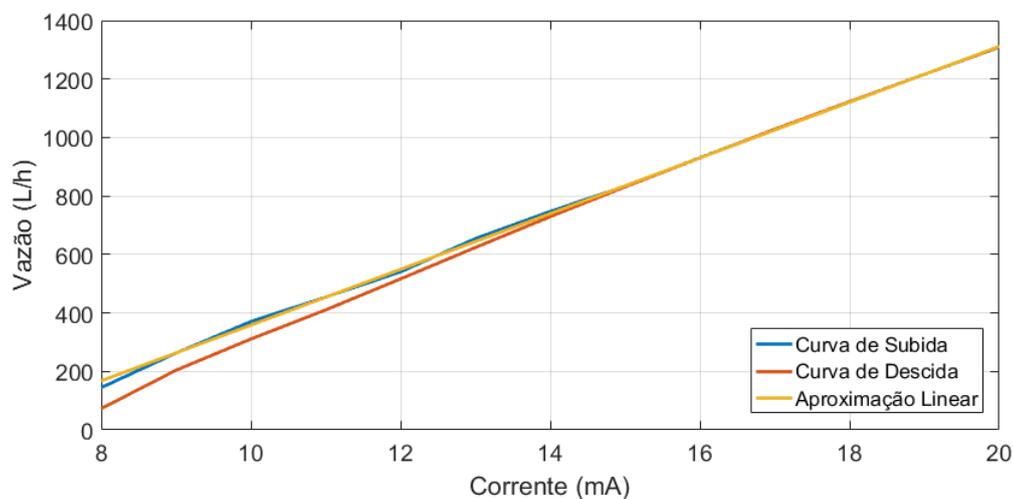


Fonte: Autor.

Observa-se que, para correntes menores, a vazão nos degraus de subida e de descida são levemente divergentes. Este efeito pode ser observado devido ao impacto que o nível de líquido do tanque de armazenamento, indicado pelo marcador (7) na Figura 18, tem na vazão de entrada. Ao iniciar o degrau de subida, toda a massa de líquido se encontra no tanque de armazenamento, e a medida que o teste é realizado, parte da massa é transferida para o tanque de aquecimento. No degrau de descida, quando se chega às correntes menores, ainda há líquido dentro do tanque de aquecimento, e por isso o nível do tanque de armazenamento é diferente, implicando em vazão de entrada diferente.

Para os degraus entre 15 e 20mA, as curvas estão sobrepostas, portanto as vazões de entrada para essa faixa são semelhantes, tanto para degrau de subida quanto para degrau de descida. Por este motivo optou-se por usar estes dados para levantar a curva de reação desejada. Usou-se então a função *polyfit* do Matlab para obter os parâmetros de uma reta que pode ser usada para aproximar o valor de vazão em função da corrente no inversor. O ajuste de curva foi realizado considerando aproximação por função afim, conforme Equação (4.1). A curva obtida é apresentada na Figura 27. Os valores dos parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Figura 27 – Curvas medidas e aproximada da variação de vazão pela variação de corrente.



Fonte: Autor.

Tabela 3 – Parâmetros da curva para variação de vazão a partir da velocidade.

	Parâmetro
a	95,3
b	-594,4

4.3 Controle de Nível

Os ensaios foram realizados na planta didática SMAR PD3-F, porém os controles foram implementados por meio do software Matlab, fazendo uso do protocolo OPC para estabelecer a comunicação entre a planta e a estação de trabalho utilizada.

Os testes foram realizados acionando a bomba trifásica (marcador (6) da Figura 18) para direcionar o fluxo de água para o tanque de aquecimento (marcador (1)). A água transitou pela tubulação contendo a válvula manual (marcador (2)), cujo fluxo foi medido pelo sensor de vazão com marcação (6). O sensor de nível (marcação (5)) realiza a leitura do nível do tanque.

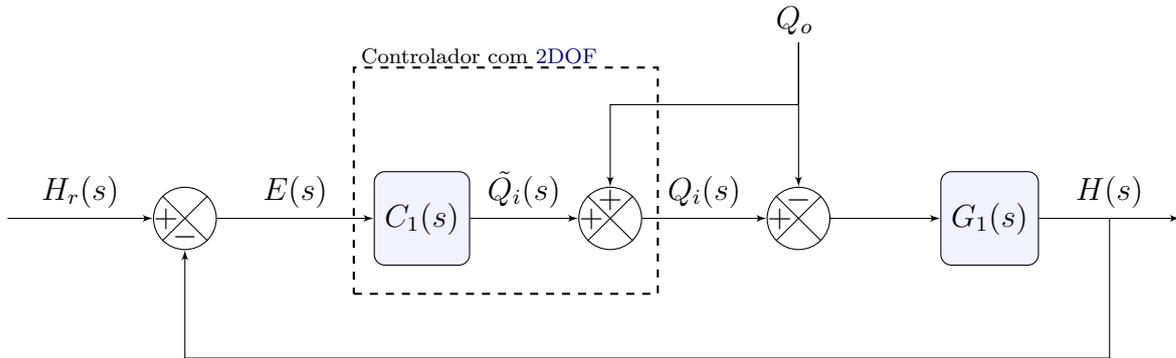
O sensor de vazão de saída foi acoplado na tubulação de saída do tanque de aquecimento e foi alimentado por um microcontrolador arduino, que também tinha a função de realizar a leitura dos dados de saída do sensor, processar os dados obtidos e enviar a vazão de saída para o Matlab por meio da comunicação *serial*. O código utilizado pode ser conferido no Apêndice A.

4.3.1 Controle Feedback-Feedforward com Cascata

A planta didática é caracterizada por um elevado atraso de tempo e pela presença significativa de perturbações, por isso julgou-se adequado combinar estes controles para implementar um controle eficiente.

Para o projeto do controle *feedback-feedforward*, foi considerado o sistema de controle em forma de diagrama de blocos apresentado na Figura 28. em que $H_r(s)$ é o nível de

Figura 28 – Representação em diagrama de blocos do controle de nível *Feedback-Feedforward* implementado.



Fonte: Autor.

referência, $C_1(s)$ é o modelo do controlador, $Q_i(s)$ é a vazão de saída, $G_1(s)$ é o modelo da planta, $Q_o(s)$ é a vazão de saída e $H(s)$ é o nível do sistema.

Observa-se que a perturbação Q_o é somada dentro do controlador, cancelando o seu efeito. Deste modo, o sistema pode ser modelado desconsiderando a perturbação:

$$\frac{dV}{dt} = C \frac{dh}{dt} = q_i - q_o \quad (4.3)$$

$$sH(s) = \frac{1}{C} (Q_i(s) - Q_o(s)) \quad (4.4)$$

$$H(s) = \frac{1}{sC} (Q_i(s) - Q_o(s)) \quad (4.5)$$

em que C é a área da seção do tanque de armazenamento, q_i é a vazão de entrada e q_o a vazão de saída. Sabendo que:

$$Q_i(s) = \tilde{Q}_i(s) + Q_o(s) \quad (4.6)$$

E substituindo (4.6) na Equação (4.5), observa-se que a planta pode ser modelada apenas por:

$$G_1(s) = \frac{1}{sC} \quad (4.7)$$

Como o tanque é fechado e vedado, e sua espessura desconhecida, foi feita uma estimativa da sua área interna: Mediu-se o perímetro do tanque para a obtenção do raio externo, do qual foi subtraído a espessura da tampa do tanque, permitindo obter o raio interno. A área obtida foi $287,12 \text{ cm}^2$. Substituindo em (4.7):

$$G_1(s) = \frac{1}{s287,12} \quad (4.8)$$

Para o controlador, optou-se por implementar um controlador PID com topologia paralela, dada pela Equação (4.9), em que K_p é o ganho da ação proporcional, K_i é o ganho da ação integral e K_d é o ganho da ação derivativa.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.9)$$

Usando a Equação (4.8) é possível sintonizar os ganhos do controlador PID através da ferramenta *sisotool*, do Matlab. A partir de uma alocação desejada inicial dos polos do sistema, os ganhos foram levemente ajustados, de forma empírica, e foram obtidos os valores apresentados na Tabela 4. O controle diferencial foi igual a zero por não haver necessidade de se fazer ajustes no transitório da dinâmica.

Tabela 4 – Ganhos do controlador *feedback-feedforward*.

	Ganho
K_p	36
K_i	1
K_d	0

A vazão de entrada é usada como entrada da malha interna do controle cascata, cujo diagrama de blocos isolado é apresentado na Figura 29, em que $q_{id}(t)$ é a vazão de entrada desejada, $f(t)$ é o modelo que permite transformar a corrente no inversor em vazão de entrada, $i(t)$ é a corrente enviada ao inversor de frequência, $C_2(t)$ é o controle cascata, e $q_i(t)$ é vazão de entrada. Com isso, é possível extrair que:

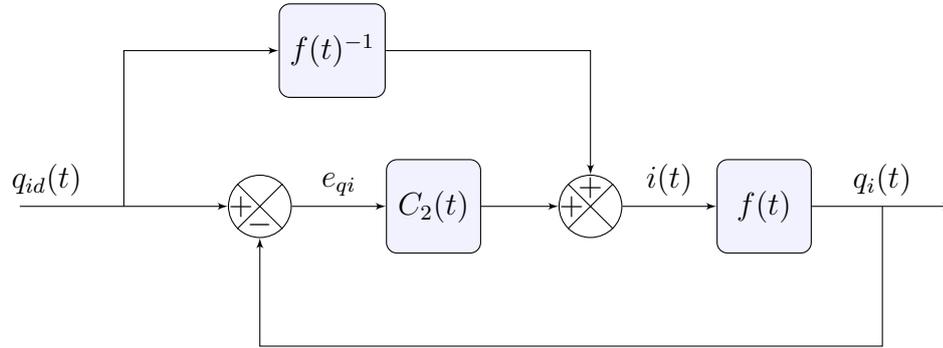
$$q_i(t) = \bar{K} \cdot i(t) \quad (4.10)$$

em que \bar{K} é o modelo que descreve a relação corrente x vazão de entrada.

O controle cascata foi implementado para corrigir eventuais erros no regime permanente causados por perturbações, e por este motivo a implementação de um controle integral é suficiente. Então tem-se que:

$$i(t) = \frac{1}{\bar{K}} q_{id} + K_{qi} \int e_{qi} dt \quad (4.11)$$

Figura 29 – Representação em diagrama de blocos da malha interna do sistema de controle cascata de nível.



Fonte: Autor.

em que \tilde{K} é a inclinação da reta que descreve a relação vazão de entrada x corrente e K_{qi} é o ganho do controlador $C_2(t)$. Substituindo (4.11) em (4.10):

$$q_i(t) = \bar{K} \left(\frac{1}{\tilde{K}} q_{id} \right) + \bar{K} K_{qi} \int e_{qi} dt \quad (4.12)$$

Sabendo que \bar{K} é igual a \tilde{K} e que e_{qi} deve ser igual a zero, tem se que:

$$q_i = q_{id} \quad (4.13)$$

O processo pode, então, ser modelado como um ganho K , obtido a partir da curva de reação da vazão de entrada x corrente, e um atraso de tempo θ . Realizando a aproximação de Padé de primeira ordem no termo exponencial correspondente ao atraso, tem-se que, em malha aberta, o sistema é modelado por:

$$GC(s) = \frac{K(1-s\theta/2)}{1+s\theta/2} \cdot \frac{K_{qi}}{s} \quad (4.14)$$

Ao fechar a malha:

$$\frac{GC}{1+GC} = \frac{\frac{K.K_{qi}(1-s\theta/2)}{(1+s\theta/2)s}}{\frac{(1+s\theta/2)s + K.K_{qi}(1-s\theta/2)}{(1+s\theta/2)s}} \quad (4.15)$$

$$\frac{GC}{1+GC} = \frac{K.K_{qi}(1-s\theta/2)}{s^2\theta/2 + s(1-K.K_{qi}\theta/2) + K.K_{qi}} \quad (4.16)$$

De acordo com o critério de Routh, para que o sistema seja estável é necessário que não haja troca de sinais no denominador, ou seja:

$$1 - K.K_{qi}\theta/2 > 0 \quad (4.17)$$

$$K_{qi} < \frac{2}{K\theta} \quad (4.18)$$

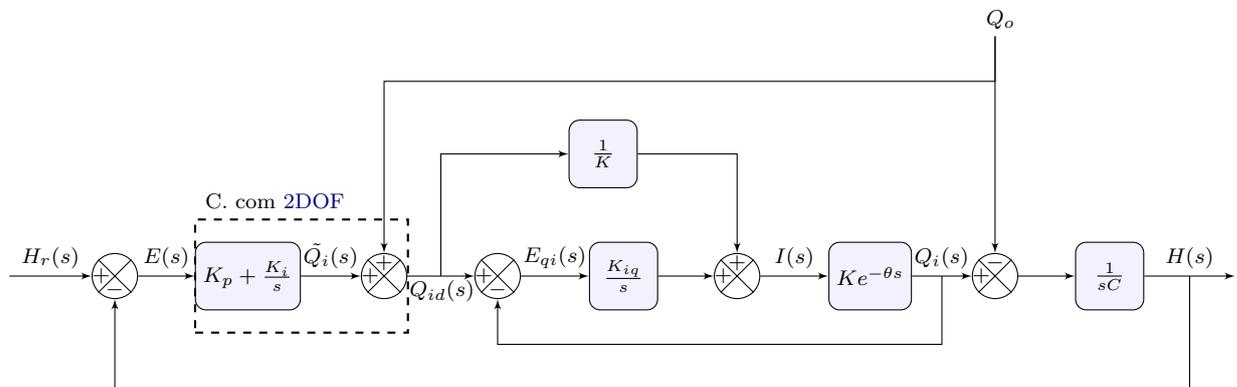
Portanto, o ganho do controlador cascata deve obedecer à relação na equação. O tempo de atraso da planta é, em média, 15 segundos, e o ganho K é o parâmetro a na Tabela 3. Substituindo na Equação (4.18):

$$K_{qi} < 0,0014 \quad (4.19)$$

Selecionou-se, então, o valor de ganho $K_{qi} = 0.0007$.

Por fim as estratégias de controle foram unificadas e implementadas em Matlab. O diagrama de blocos final é apresentado na Figura 30, e o código pode ser consultado no Apêndice B. Foi necessário a implementação de um algoritmo anti *wind-up* para evitar aumento excessivo do ganho integral.

Figura 30 – Representação em diagrama de blocos do sistema de controle de nível usando estratégias de controle *feedback-feedforward* e cascata.



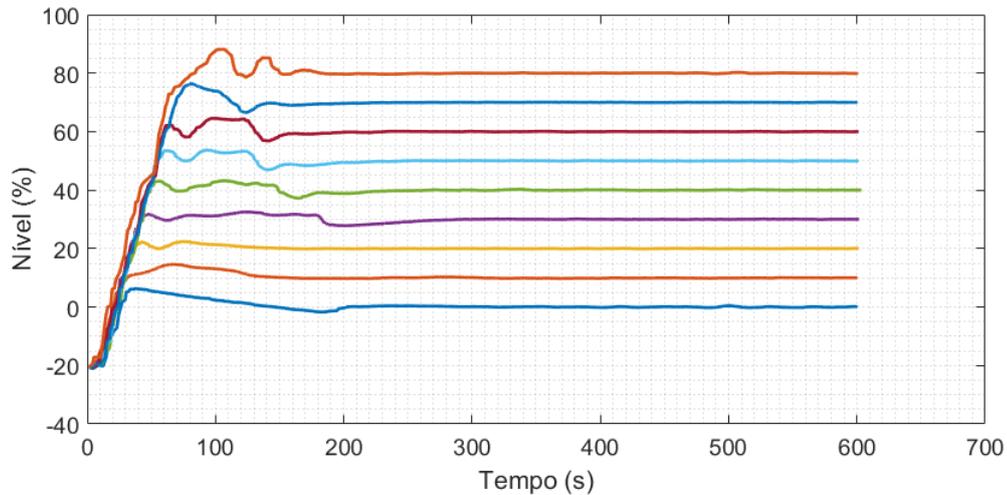
Fonte: Autor.

O ensaio foi realizado para 9 valores distintos de *setpoint* de nível, iniciando em 0% e variando em múltiplos de 10 até alcançar os 80%. Valores superiores não foram testados para evitar que o tanque transborde. Cada teste foi executado por 600 segundos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 31.

Observa-se que o máximo sobressinal e tempo de assentamento variam de acordo com o *setpoint*. Este fato ocorre devido a vários fatores, como característica não linear do nível, a relação não linear entre a vazão de entrada e o nível e ao alto atraso de transporte do sistema.

As médias do nível em regime permanente são apresentados na Tabela 5, bem como o módulo da média do desvio em relação ao *setpoint*. É possível perceber que o desvio é maior para valores de *setpoint* menores que 40%, com exceção para o nível igual a 20% do tanque.

Observa-se que para todos os valores *testados* obteve-se erro em regime permanente baixo, sendo possível considerar que as leis de controle implementadas obtiveram sucesso em controlar o processo.

Figura 31 – Dinâmica do sistema de nível utilizando controle *feedback-feedforward* cascata.

Fonte: Autor.

Tabela 5 – Valores de nível em regime permanente e erro para cada *setpoint* obtidos com atuação do controle *feedback-feedforward* cascata.

<i>Setpoint</i>	Nível	Erro
0%	0,0256	0,0256
10%	9,9226	0,0774
20%	20,0001	0,0001
30%	30,0173	0,0173
40%	40,0034	0,0034
50%	50,0027	0,0027
60%	59,9962	0,0038
70%	70,0051	0,0051
80%	79,9973	0,0027

O máximo sobressinal, em módulo e em porcentagem, para cada valor de *setpoint* é apresentado na Tabela 6. Observa-se que há grande variação para valores de nível abaixo de 20%.

Outro ponto que deve ser destacado a partir da observação dos resultados da Figura 31 são os diferentes tempos de assentamento T_s , considerando que T_s seja o tempo necessário para que a dinâmica atinja a faixa de 2% do valor estacionário. Os tempos de assentamento para cada valor de *setpoint* foi obtido através de análise gráfica e apresentados na Tabela 7.

4.3.1.1 Controle Feedback-Feedforward sem Cascata

Conforme mencionado na seção anterior, a planta tem, como característica, a presença de ruídos e perturbações que poderiam impactar no controle implementado. Para

Tabela 6 – Máximo sobressinal para cada *setpoint* quando ha atuação do controle *feedback-feedforward* cascata.

<i>Setpoint</i>	Módulo	Porcentagem(%)
0%	6,3388	Indeterminado
10%	14,5921	45,9
20%	22,3868	11,93
30%	32,5137	8,38
40%	43,1957	7,99
50%	53,6649	7,33
60%	64,5301	7,55
70%	76,3415	9,06
80%	88,1251	10,16

Tabela 7 – Tempos de assentamento dos resultados obtidos a partir da implementação do controle *feedback-feedforward* cascata.

	Tempo de assentamento (s)
0%	Indeterminado
10%	151,7
20%	130,8
30%	259,2
40%	214,5
50%	189,1
60%	153,0
70%	132,8
80%	146,8

verificar a veracidade deste fato, implementou-se um controle **2DOF** sem cascata, cuja representação em diagrama de blocos já foi apresentada na Figura 28. O modelo da planta $G_1(s)$ é o mesmo do controle **2DOF** com cascata, e a topologia do controlador $C_1(s)$ foi indicado em (4.9).

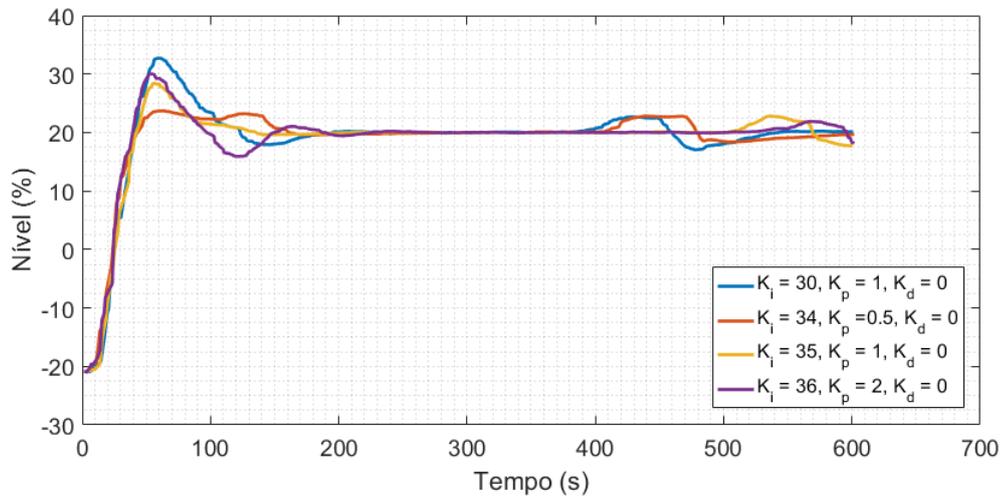
Foram sintonizados vários ganhos para o controlador PID por meio de uma alocação de desejada inicial dos polos, com leve ajuste empírico. Os ganhos foram sintonizados para um mesmo valor de *setpoint*, 20%, e testados por 600 segundos, com tempo de aquisição de 1 segundo. Os resultados são apresentados na Figura 32.

Observa-se que, independente do ganho ajustado, a implementação de um controle sem cascata resulta em um desvio do nível quando o sistema já encontra em regime permanente, possivelmente causado pelas perturbações inerentes ao processo.

4.3.2 Controle Inferencial

O controle inferencial foi implementado adotando a vazão de saída como variável inferencial, uma vez que a vazão de saída está relacionada com a raiz quadrada do nível do tanque. O diagrama de blocos do sistema de controle é apresentado na Figura 33, em

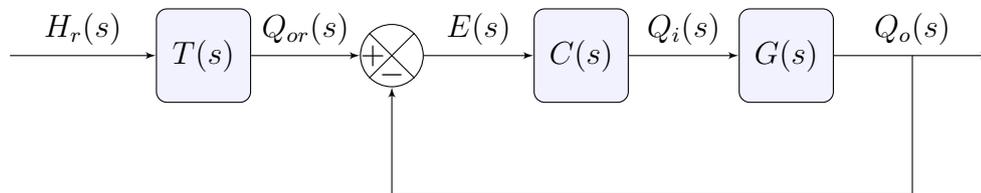
Figura 32 – Dinâmica do sistema de nível utilizando controle *feedback-feedforward* para *setpoint* igual a 20%.



Fonte: Autor.

que $T(s)$ é uma função que relaciona o nível com a vazão de saída

Figura 33 – Representação em diagrama de blocos do sistema de controle inferencial de nível.



Fonte: Autor.

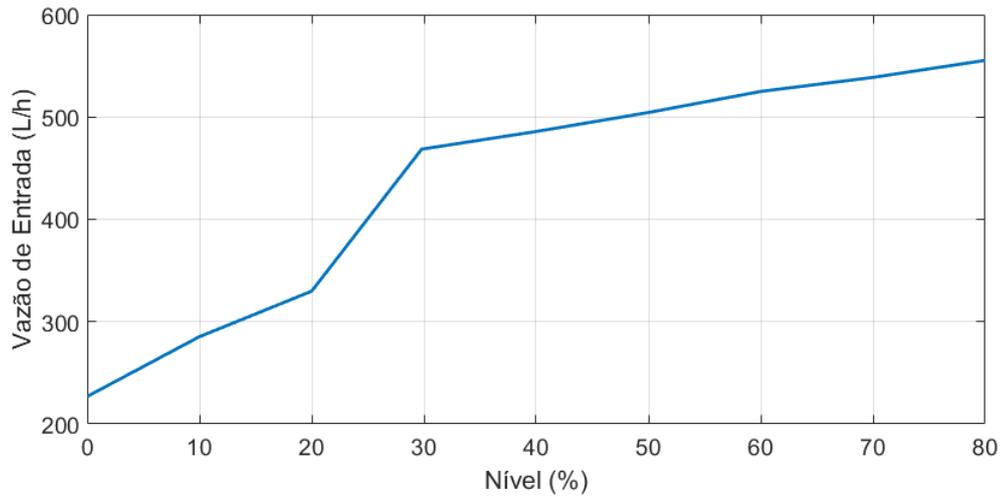
Observa-se que para implementar este controlador, é necessário levantar uma função que relacione o nível com a vazão de saída. Para tal, utilizou-se os resultados obtidos a partir dos testes do controle com **2DOF** cascata.

Para o levantamento da função, fez-se uma média dos valores de vazão de saída, quando o nível se encontrava em regime permanente, para cada faixa de nível. A curva resultante é apresentada na Figura 34.

Pela Figura 34 pode-se observar que o comportamento da vazão pelo nível é não linear, porém, podem ser isoladas faixas de operação lineares. Para obter melhor resposta, são obtidas duas curvas diferentes: uma para a faixa de nível entre 20% e 30% e outra para a faixa compreendida entre 30% e 80%. Valores abaixo de 20% serão desprezados neste ensaio.

Pelas características das faixas selecionadas, optou-se pela aproximação por uma

Figura 34 – Curva da vazão de saída pelo nível do tanque.



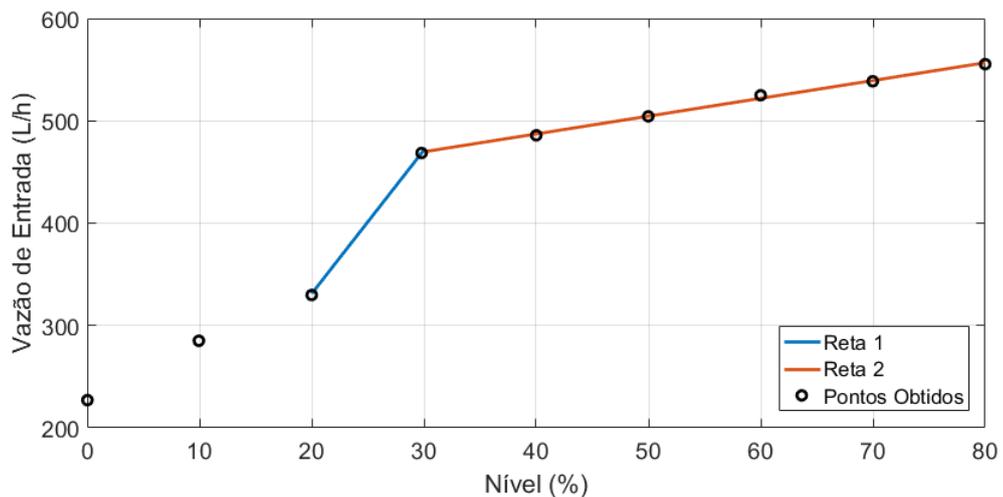
Fonte: Autor.

função afim, cuja equação característica já foi apresentada na Equação (4.1), utilizando a função *polyfit* do Matlab. Os parâmetros obtidos para cada reta são apresentados na Tabela 8, e a Figura 35 dispõe as curvas aproximadas em comparação com os valores obtidos experimentalmente.

Tabela 8 – Parâmetros das retas que relacionam a vazão de saída com o nível.

	Reta 1	Reta 2
a	14,168	1,746
b	46,445	416,96

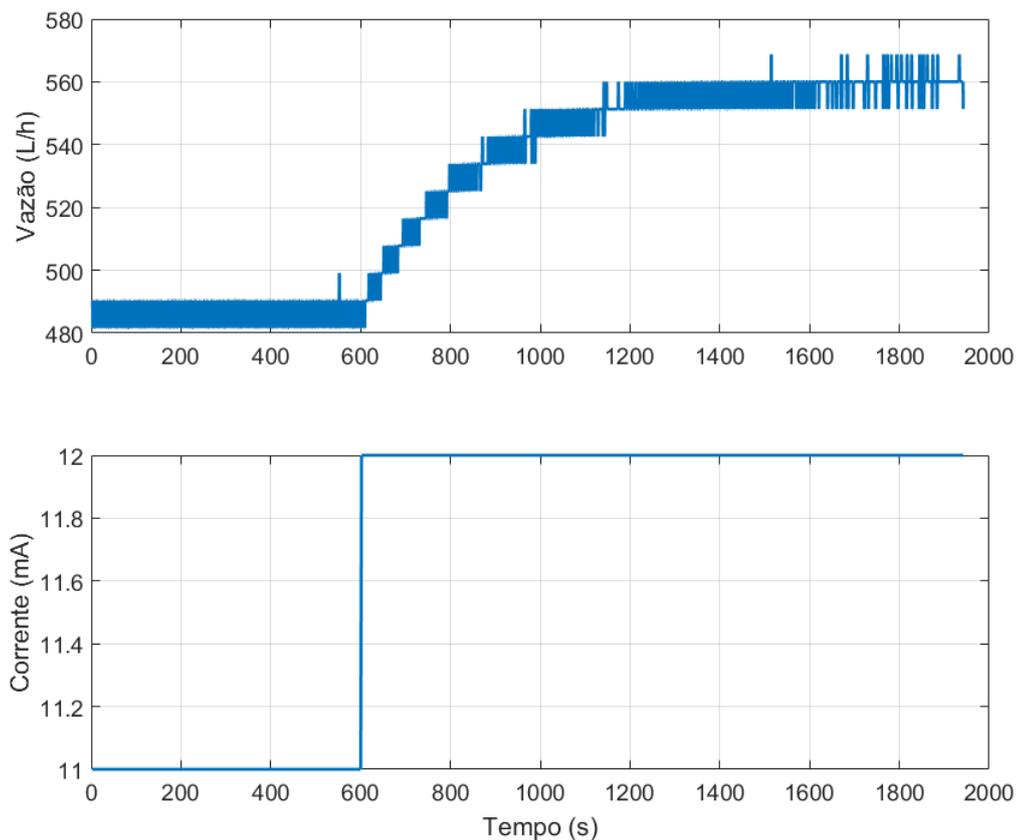
Figura 35 – Valores medidos e curvas aproximada da vazão de saída pelo nível do tanque.



Fonte: Autor.

Para o projeto do controlador PID, foi necessário fazer o levantamento da função de transferência do sistema de nível. Para isso, aplicou-se um pequeno degrau no inversor de frequência, elevando a corrente de 11mA para 12mA, de modo a excitar o sistema o suficiente para obter um degrau, mas sem exacerbar as não-linearidades. A resposta obtida é apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Resposta da vazão de saída à uma entrada degrau.



Fonte: Autor.

Para encontrar uma função de transferência de primeira ordem deve-se estabelecer a constante de tempo τ , o atraso de tempo θ e o ganho do sistema. Para obter a constante de tempo, estima-se o instante em que a dinâmica atinge o regime permanente e aplica este tempo na Equação (4.20), em que t_s é o tempo de assentamento. O ganho é calculado através da variação da vazão, e o atraso de tempo θ é estimado obtendo o instante onde se observa a variação da vazão, uma vez aplicado o degrau. Os parâmetros do modelo do processo foram:

- $K = 1,1443$;
- $\tau = 150$;

- $\theta = 15$.

$$\tau = \frac{t_s}{4} \quad (4.20)$$

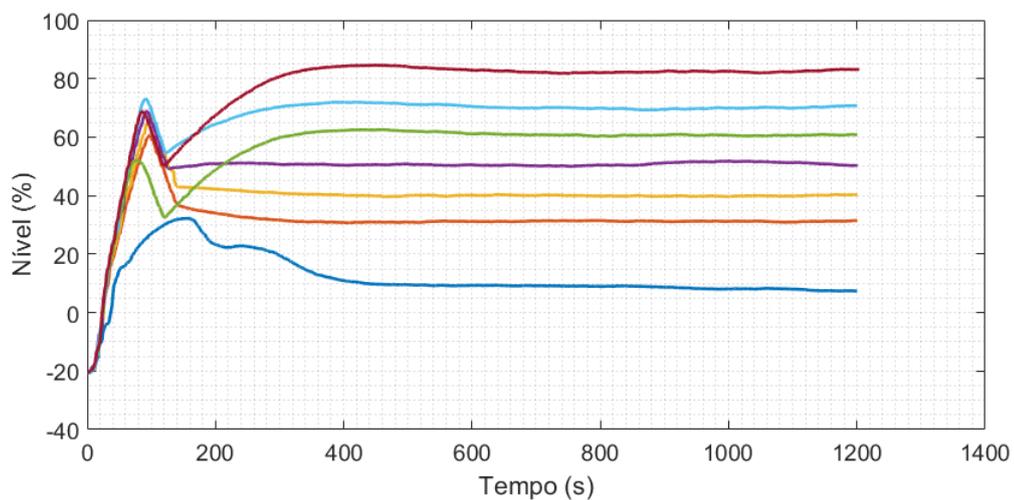
A função de transferência que descreve o processo em malha aberta foi, então, utilizada para obtenção dos parâmetros do controlador PID, cuja equação característica foi descrita na Equação (4.9), por meio da ferramenta *sisotool*. Os ganhos obtidos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Ganhos do controlador Inferencial.

	Ganho
K_p	3,67
K_i	0,0359
K_d	0

A lei de controle foi implementada em Matlab e testada em uma faixa de operação entre 20% e 80%. Valores superiores não foram testados para evitar que o tanque transborde. O código criado pode ser consultado no Apêndice C. Cada teste foi executado por um tempo total de 1200 segundos. Os resultados são apresentados na Figura 37.

Figura 37 – Dinâmica do sistema de nível utilizado controle inferencial.



Fonte: Autor.

As medias do nível em regime permanente são apresentadas na Tabela 10, assim como o módulo da média do erro. É possível perceber que para valores de *setpoint* entre 40% e 80% o erro é menor que para outros valores.

Observa-se que em todos os os valores de *setpoint*, com exceção de $SP = 70\%$, houve erro em regime permanente. Este fato pode se dar devido ao nível de ruído e de

Tabela 10 – Valores de nível em regime permanente e erro para cada *setpoint* obtidos com atuação do controle inferencial.

<i>Setpoint</i>	Nível	Erro
20%	8,4153	11,585
30%	31,250	1,2500
40%	39,951	0,0494
50%	50,924	0,9253
60%	60,648	0,6483
70%	69,950	0,0497
80%	82,360	2,3599

variação observada no sensor de vazão de saída, uma vez que a variação de apenas 1Hz dos pulsos do sensor corresponde a uma variação de 8,71 L/h na leitura da vazão. Para *setpoint* = 20% considera-se que o controle foi extremamente ineficiente, uma vez que o erro chegou a 52%, e por isso os ganhos sintonizados não foram adequados para esta faixa de operação.

O máximo sobressinal, em valor absoluto e em porcentagem, para cada valor de *setpoint* é apresentado na Tabela 11. Observa-se que para valores menores que 60% o *overshoot* sempre se aproxima ao nível de 60%. Este fato pode ser explicado observando a Figura 38, onde é possível observar que o a vazão de saída varia demasiadamente rápido, devido ao aumento do nível e a relação não linear entre os dois. O controlador então diminui a vazão de entrada para evitar que a vazão de saída aumente mais. Este comportamento pode ser derivado da relação não linear entre a vazão de saída e nível ou por alguma característica de funcionamento do sensor YF-S201.

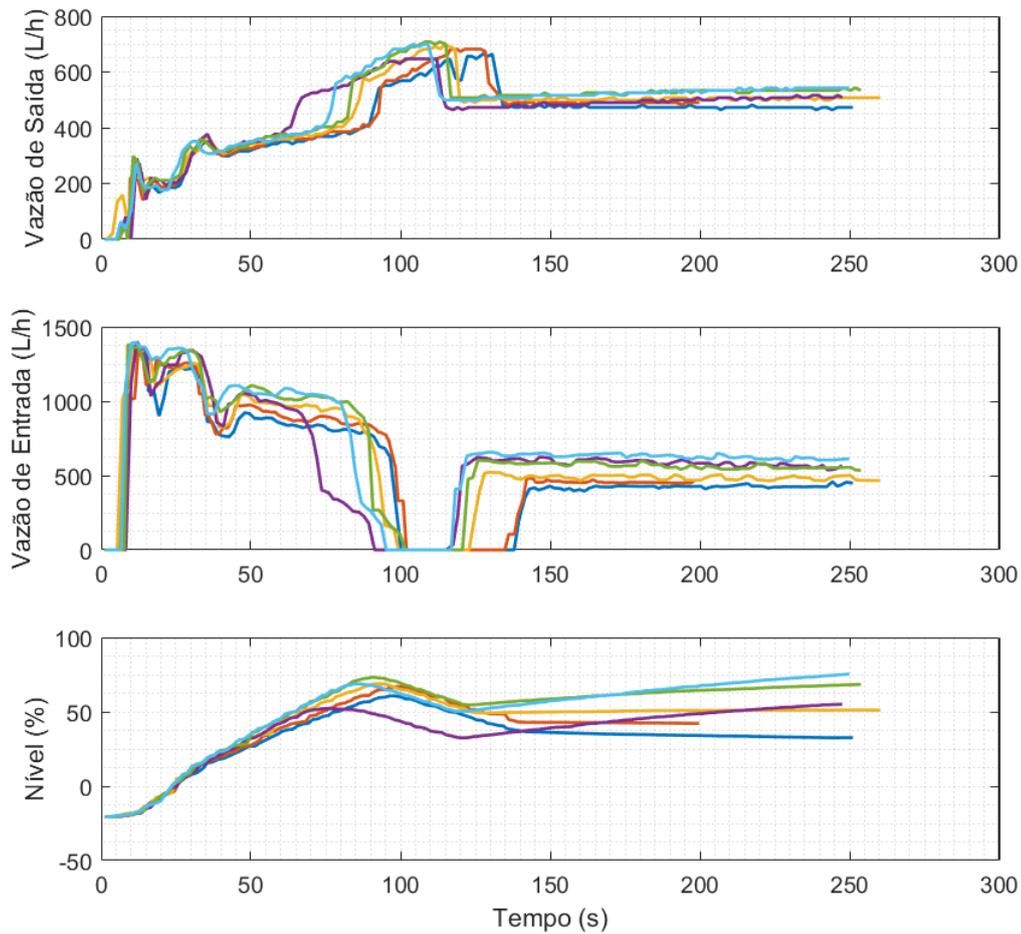
Tabela 11 – Máximo sobressinal para cada valor de *setpoint* quando ha atuação do controle inferencial.

<i>Setpoint</i>	Módulo	Porcentagem (%)
20%	32,187	60,935
30%	60,729	102,431
40%	66,994	67,485
50%	68,897	37,794
60%	62,548	4,247
70%	73,242	4,632
80%	84,599	5,749

Outro ponto que deve ser destacado a partir da observação dos resultados da Figura 37 são os diferentes tempos de assentamento T_s , cujos valores foram obtidos por meio de análise gráfica e apresentados na Tabela 12.

Observa-se grande variação nos valores de tempo de assentamento, e os melhores resultados se encontram em uma faixa de *setpoint* entre 30% e 50%.

Figura 38 – Resposta da vazão de saída, vazão de entrada e do nível no processo controlado.



Fonte: Autor.

Tabela 12 – Tempos de assentamento dos resultados obtidos a partir da implementação do controle inferencial.

	Tempo de assentamento (s)
20%	918,1
30%	291,1
40%	305,8
50%	153,2
60%	552,8
70%	492,5
80%	501,7

4.4 Discussão dos Resultados

Pelos resultados obtidos pode-se constatar que ambos os controles atingiram o objetivo, que era o controle do nível do tanque de aquecimento, mas com algumas

ressalvas. Em primeiro lugar destaca-se o comportamento dinâmico dos dois controles implementados, que nem sempre foram ideais, sendo caracterizado pela existência de sobressinal, principalmente para baixos valores de *setpoint* quando é utilizado o controle inferencial.

O controle inferencial é de fácil implementação, porém apresentou resposta mais lenta e com maior erro em regime permanente que o controlador de 2DOF. Além disso, foi necessário levantar experimentalmente o modelo do processo para projeto do controlador. O controle cascata possui mais etapas de implementação, porém seu modelo pode ser estimado desde que os dados do processo, como área do tanque, estejam disponíveis.

Devido às não linearidades do processo, o controle inferencial só é eficiente para uma faixa de operação, que no presente trabalho consistiu nos valores de *setpoint* entre 30 e 80%. Neste sentido, o controle *feedforward* se mostrou mais versátil, sendo capaz de controlar uma faixa de operação maior.

A análise do tempo de assentamento leva em consideração dados obtidos para o levantamento da função de transferência do sistema de nível, cujo gráfico foi apresentado na Figura 36. O tempo de assentamento em malha aberta obtido foi de 600 segundos. Com a utilização do controle 2DOF, todos os valores de *setpoint* testados ficaram bem abaixo do tempo de assentamento sem controle. Já para o controle inferencial os resultados são diversos, de modo que a dinâmica mais rápida está restrita à faixa de nível entre 30% e 50%.

5 Considerações Finais

A implementação de duas estratégias de controles diferentes na planta didática SMAR PD3-F permite visualizar os efeitos de cada tipo de controle em um sistema de controle. Por um lado há um controle que implementa três estratégias: *feedback*, *feedforward* e cascata, com o objetivo de reduzir a ação das perturbações e ruídos inerentes à planta, mas que para isso exige o uso de mais sensores para monitorar as variáveis essenciais para o controle. Por outro lado existe o controle inferencial, que é mais sensível a perturbações, porém conta com a vantagem de utilizar menos sensores, e por isso ser mais barata e mais indicada quando a variável de interesse não pode ser lida.

Todos os dois controles mostraram bons resultados, mas a opção de qual controle implementar em uma planta deve levar em considerações as exigências do processo para um funcionamento adequado e os recursos disponíveis. Caso seja necessário maior precisão no controle, a estratégia *feedback-feedforward* cascata é mais indicado. Caso a precisão não seja importante, ou o processo esteja restrito a uma pequena faixa de operação, o controle inferencial é o suficiente para atender as necessidades do sistema.

Embora a planta conte com recursos voltados para a implementação de controles diretamente em seus dispositivos, o uso de Matlab oferece a vantagem de possibilitar a adição de novos dispositivos, como foi o caso do sensor de vazão. Além disso, o uso do Matlab confere mais liberdade e recursos para implementar diferentes estratégias de controle na planta didática.

Novos trabalhos podem ser desenvolvidos tomando este como referência. O controlador pode ser adaptado para outras malhas existentes na planta, permitindo o controle de processos diferentes. O controle inferencial desenvolvido pode ser usado no tanque de mistura, que não possui sensor de nível, ampliando a gama de possibilidades de trabalhos a serem desenvolvidos utilizando a planta didática. Além disso, pode ser desenvolvido um trabalho visando redução do atraso de transporte devido a comunicação, visto que este foi uma forte característica do processo que impactou negativamente nos resultados obtidos.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 730 p. Citado na(s) página(s): [1](#), [8](#), [16](#)
- AGUIRRE, L. A. *Fundamentos de Instrumentação*. São Paulo: Pearson, 2013. 331 p. Citado na(s) página(s): [4](#), [5](#), [7](#), [9](#), [10](#), [13](#)
- BARBOSA, B. H. G. *Instrumentação, modelagem, controle e supervisão de um sistema de bombeamento de água e módulo turbina-gerador*. Tese (Dissertação de Mestrado) — UFMG, 2010. Citado na(s) página(s): [11](#)
- BEGA, E. A. et al. *Instrumentação Industrial*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 694 p. Citado na(s) página(s): [4](#), [7](#), [8](#), [9](#), [13](#)
- BERGE, J. *Fieldbus for Process Control: Engineering, Operation and Maintenance*. Research Triangle Park: [s.n.], 2004. 460 p. Citado na(s) página(s): [27](#)
- CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. *Controles Tipicos De Equipamentos e Processos Industriais*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010. Citado na(s) página(s): [1](#), [10](#)
- CARTES, D.; WU, L. Experimental evaluation of adaptive three-tank level control. *ISA Transactions*, v. 44, n. 2, p. 283–293, 2005. ISSN 00190578. Citado na(s) página(s): [2](#)
- CASTRUCCI, P. L.; BITTAR, A.; SALES, R. M. *Controle Automático*. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 476 p. Citado na(s) página(s): [1](#)
- CORRÊA, M. V.; AGUIRRE, L. A. Identificação não-linear caixa-cinza: uma revisão e novos resultados. *Revista Controle & Automação*, Sociedade Brasileira de Automática, v. 15, n. 2, p. 109–126, 2004. Citado na(s) página(s): [16](#)
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Moderno*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 659 p. Citado na(s) página(s): [2](#), [14](#), [16](#)
- Fieldbus Inc. *The Foundation Fieldbus Primer*. 2001. 36 p. Citado na(s) página(s): [24](#), [25](#), [26](#)
- Foundation Fieldbus. *Guide to Implementing FoundationTM H1 Field Devices*. 2014. 23 p. Citado na(s) página(s): [25](#), [26](#)
- International Organization for Standardization. *IEC 7498-1: Information Technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model*. 1996. 59 p. Citado na(s) página(s): [24](#)
- IRVINE, G.; GIBSON, I. H. The Use of Variable Frequency Drives as a Final Control Element. In: *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*. Roma: IEEE, 2000. p. 2749–2758. ISBN 0780364015. Citado na(s) página(s): [1](#)

- JANOCHA, H. *Actuators: Basics and Applications*. 1. ed. New York: Springer, 2004. 343 p. Citado na(s) página(s): 9
- JOSEPH, B. A tutorial on inferential control and its applications. In: *Proceedings of the 1999 American Control Conference*. San Diego: IEEE, 1999. v. 5, n. June, p. 3106–3118. ISBN 0-7803-4990-3. ISSN 0743-1619. Citado na(s) página(s): 21
- KANDRAY, D. *Programmable Automation Technology*. 1. ed. New York: Industrial Press Inc, 2010. 507 p. Citado na(s) página(s): 6, 9, 10
- LU, Y.; MOTANI, M.; WONG, W.-C. Intelligent network design: User Layer architecture and its application. In: *2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. [S.l.]: IEEE, 2010. p. 1286–1292. Citado na(s) página(s): 24
- MARLIN, T. E. *Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 954 p. Citado na(s) página(s): 17, 20, 21
- MARUSIC, I.; MATHIS, R.; HUTCHINS, N. Predictive Model for Wall-Bounded Turbulent Flow. *Science*, v. 329, n. July, p. 193–197, 2010. Citado na(s) página(s): 1
- MEIJER, G. C. M. Concepts and focus point for intelligent sensor systems. *Sensors and Actuators: A. Physical*, v. 41, n. 1-3, p. 183–191, 1994. Citado na(s) página(s): 14
- NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 682 p. Citado na(s) página(s): 15
- OPC Foundation. *OPC Data Access Automation Specification*. Minnesota: [s.n.], 1999. 100 p. Citado na(s) página(s): 27, 28
- POTTMANN, M.; PEARSON, R. K. Block-Oriented NARMAX Models with Output Multiplicities. *AIChE Journal*, v. 44, n. 1, p. 131–140, 1998. Citado na(s) página(s): 16
- SEBORG, D. E.; MELLICHAMP, D. A.; EDGAR, T. F. *Process Dynamics & Control*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2008. Citado na(s) página(s): 15, 18, 19, 20, 21
- SIEMENS. *Simatic - Process Control System PCS 7 FOUNDATION Fieldbus - Commissioning Manual*. 2012. 54 p. Citado na(s) página(s): 27
- SMAR. *Manual de Instruções, Operação e Manutenção SMAR PD3-F*. 2012. 54 p. Citado na(s) página(s): 2, 22, 31
- SMAR. *Catálogo LD300 Series - Transmissores de Pressão para Aplicações de Pressão, Nível e Vazão*. 2014. 27 p. Citado na(s) página(s): 28
- SMAR. *Manual de Instrução, Manutenção e Operação do Conversor Fieldbus para Corrente com Três Canais*. 2014. 61 p. Citado na(s) página(s): 29
- SMAR. *Manual de Instrução, Manutenção e Operação do Transmissor de Pressão Fieldbus*. 2016. 90 p. Citado na(s) página(s): 8, 28
- SMAR. *Manual do Usuário: Fieldbus Universal Bridge*. 2016. 646 p. Citado na(s) página(s): 27, 29, 30

- STEFANI, R. T. et al. *Design of Feedback Control Systems*. 4. ed. Oxford: Oxford University Press, 2001. 858 p. Citado na(s) página(s): 17, 18
- SU, C. L. et al. Variable flow controls of closed system pumps for energy savings in maritime power systems. In: *IEEE Industry Application Society, 52nd Annual Meeting: IAS 2016*. Portland: IEEE, 2016. p. 1–8. ISBN 9781467386715. Citado na(s) página(s): 1
- THOMESSE, J.-p. Fieldbus Technology in Industrial Automation. *Proceedings Of The IEEE*, v. 93, n. 6, p. 1073–1101, 2005. Citado na(s) página(s): 23
- TIAN, G. Y.; ZHAO, Z. X.; BAINES, R. W. Fieldbus-based intelligent sensor. *Mechatronics*, v. 10, n. 8, p. 835–849, 2000. Citado na(s) página(s): 14
- WEG. *Guia Técnico - Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM*. 2016. 36 p. Citado na(s) página(s): 12, 13

APÊNDICE B – Código Implementado para o Controle Feedforward Cascata

```

1 clear all; clc; close all;
2
3 %Curva Corrente x Vazao
4 P = [95.288381831041360 -5.943934578209037e+02];
5
6 %Ganhos do controlador
7 Kp = 36;
8 Ki = 1;
9
10 %Nivel de referencia
11 SP = 20;
12
13 %Formatacao dos resultados
14 format short g;
15
16
17 %% Adiciona instrumentos da planta
18
19 %Cria comunicacao OPC com a planta
20 da = opcda('localhost', 'Smar.hseoleserver.0'); %Referencia ao
    controlador HSE
21 connect(da); % Conecta ao controlador
22 grp = addgroup(da); % Adicao de um grupo para os instrumentos da
    rede
23
24 %%%%%%%%% VALVULA PNEUMATICA FY-32 %%%%%%%%%
25 % adicao da tag OUT de FY da malha 31 ao grupo
26 fy31_sp = additem(grp, 'FY-31_AO1.SP.VALUE');
27 % adicao da tag PV de FY da malha 31 ao grupo
28 fy31_pv = additem(grp, 'FY-31_AO1.PV.VALUE');
29 % modo de operacao da valvula 31
30 fy_31_target = additem(grp, 'FY-31_AO1.MODE_BLK.TARGET');
31
32 %%%%%%%%% SENSOR DE VAZAO FIT-31 %%%%%%%%%
33 % adicao da tag OUT do FIT da malha 31 ao grupo (Vazao)

```

```
34 fit31_out = additem(grp, 'FIT-31_AI1.OUT.VALUE');
35
36 %%%%%%%%%% SENSOR DE NIVEL LIT-31 %%%%%%%%%%
37 % adicao da tag OUT do LIT da malha 31 ao grupo (nivel)
38 lit31_out=additem(grp, 'LIT-31_AI1.OUT.VALUE');
39
40 %%%%%%%%%% INVERSOR DE FREQUENCIA SY-31 %%%%%%%%%%
41 % Adicao Tag SP do inversor
42 sy31_sp = additem(grp, 'SY-31_AO1.SP.VALUE');
43 % Adicao Tag value
44 sy31_value = additem(grp, 'SY-31_AO1.PV.VALUE');
45
46 warning off;
47
48 %Cria e abre a comunicacao com arduino;
49 s = serial('COM8', 'BaudRate', 9600);
50 fopen(s);
51
52
53 %% Le dados
54
55 %Declaracao de variaveis
56 vazao = [];
57 dados = [];
58 I = 0;
59 I2 = 0;
60 E = 0;
61 vazaoOut = 0;
62 vazaoIn = 0;
63 corrente = 0;
64 nivel = 0;
65 vazaoDesejada = 0;
66 correnteDesejada = 0;
67 correnteDesejadaP = 0;
68 t = 0;
69 ti = 0;
70 PI = 0;
71
72 %Esvazia buffer dos dados enviados pelo arduino.
73 while (s.BytesAvailable > 0)
74     str2num(fscanf(s)); %Le vazao de saida
75 end
```

```
76
77 %Inicia contagem do tempo
78 n = tic;
79
80 while t < 600
81     %Le dados do arduino, descartando dados que estejam no buffer
82     while (s.BytesAvailable > 0)
83         vazaoOut = str2num(fscanf(s)); %Le vazao
84     end
85
86     %Le dados da planta
87     vazaoInAux = read(fit31_out);           %Vazao Entrada
88     vazaoIn = vazaoInAux.Value;
89     correnteAux = read(sy31_value);       %Corrente Inversor
90     corrente = correnteAux.Value;
91     nivelAux = read(lit31_out);          %Nivel
92     nivel = nivelAux.Value;
93
94     %Calcula erro e variacao do tempo
95     E = SP - nivel;
96     dT = (t - ti);
97
98     %Controle integral
99     if (correnteDesejada >= 20)
100         I = I + 0*E*dT;
101     else
102         I = I + Ki*E*dT;
103     end
104
105     %Controlador PI
106     PI = Kp*E + I;
107     vazaoDesejada = PI + vazaoOut;
108
109     if (vazaoDesejada > 1400)
110         vazaoDesejada = 1400;
111     elseif (vazaoDesejada < 0)
112         vazaoDesejada = 0;
113     end
114
115     %Controle Cascata
116     E2 = vazaoDesejada - vazaoIn;
117
```

```
118     if (correnteDesejada > 20) && (correnteDesejada < 8)
119         I2 = I2;
120     else
121         I2 = I2 + 0.0007*E2*dT;
122     end
123
124     %Converte a vazao desejada em corrente a ser enviada ao inversor.
125     correnteDesejada = I2 + (vazaoDesejada - P(2))./P(1);
126
127     if (correnteDesejada > 20)
128         correnteDesejada = 20;
129     elseif (correnteDesejada < 8)
130         correnteDesejada = 8;
131     end
132
133     %Converte sinal de corrente para porcentagem e manda para o
134     inversor
135     correnteDesejadaP = 6.25*correnteDesejada - 25;
136     write(sy31_sp, correnteDesejada);
137
138     %Salva tempo de amostragem anterior e atualiza o tempo de execucao
139     ti = t;
140     t = toc(n);
141
142     %Salva os dados em uma matriz
143     dadosNew = [vazaoIn vazaoOut vazaoDesejada corrente
144                 correnteDesejada E nivel t PI I];
145     dados = [dados; dadosNew];
146     disp(dadosNew);
147 end
148
149 %Salva dados em um arquivo .mat
150 name = strcat('ControleCascataInversor_Kp(', num2str(Kp), ')_Ki(',
151               num2str(Ki), ')_SP(', num2str(SP), ')');
152 info = '[vazaoIn vazaoOut vazaoDesejada corrente correnteDesejada E
153         nivel t PI I]';
154 save(name, 'dados', 'info');
```

APÊNDICE C – Código Implementado para o Controle Inferencial

```

1 clear all; clc; close all;
2
3 %Curva Corrente x Vazao
4 P = [95.288381831041360 -5.943934578209037e+02];
5
6 %Ganhos do controlador
7 Kp = 3.67;
8 Ki = 0.0359;
9
10 %Nivel de referencia
11 SP = 20;
12
13 %Formatacao dos resultados
14 format short g;
15
16
17 %% Adiciona instrumentos da planta
18
19 %Cria comunicacao OPC com a planta
20 da = opcda('localhost', 'Smar.hseoleserver.0'); %Referencia ao
    controlador HSE
21 connect(da); % Conecta ao controlador
22 grp = addgroup(da); % Adicao de um grupo para os instrumentos da
    rede
23
24 %%%%%%%%% VALVULA PNEUMATICA FY-32 %%%%%%%%%
25 % adicao da tag OUT de FY da malha 31 ao grupo
26 fy31_sp = additem(grp, 'FY-31_AO1.SP.VALUE');
27 % adicao da tag PV de FY da malha 31 ao grupo
28 fy31_pv = additem(grp, 'FY-31_AO1.PV.VALUE');
29 % modo de operacao da valvula 31
30 fy_31_target = additem(grp, 'FY-31_AO1.MODE_BLK.TARGET');
31
32 %%%%%%%%% SENSOR DE VAZAO FIT-31 %%%%%%%%%
33 % adicao da tag OUT do FIT da malha 31 ao grupo (Vazao)

```

```
34 fit31_out = additem(grp, 'FIT-31_AI1.OUT.VALUE');
35
36 %%%%%%%%%% SENSOR DE NIVEL LIT-31 %%%%%%%%%%
37 % adicao da tag OUT do LIT da malha 31 ao grupo (nivel)
38 lit31_out=additem(grp, 'LIT-31_AI1.OUT.VALUE');
39
40 %%%%%%%%%% INVERSOR DE FREQUENCIA SY-31 %%%%%%%%%%
41 % Adicao Tag SP do inversor
42 sy31_sp = additem(grp, 'SY-31_AO1.SP.VALUE');
43 % Adicao Tag value
44 sy31_value = additem(grp, 'SY-31_AO1.PV.VALUE');
45
46 warning off;
47
48 %Cria e abre a comunicacao com arduino;
49 s = serial('COM8', 'BaudRate', 9600);
50 fopen(s);
51
52
53 %% Le dados
54
55 vazao = [];
56 dados = [];
57 I = 0;
58 E = 0;
59 vazaoOut = 0;
60 vazaoIn = 0;
61 corrente = 0;
62 nivel = 0;
63 vazaoDesejada = 0;
64 correnteDesejada = 0;
65 correnteDesejadaP = 0;
66 t = 0;
67 ti = 0;
68 PI = 0;
69
70 %Transforma referencia de nivel em referencia de vazao de saida
71 SPq = 1.7465*SP + 416.96;
72
73 %Esvazia buffer dos dados enviados pelo arduino.
74 while (s.BytesAvailable > 0)
75     str2num(fscanf(s)); %Le vazao
```

```
76 end
77
78 %Inicia contagem do tempo
79 n = tic;
80
81 while t < 1200
82     %Le dados do arduino, descartando dados que estejam no buffer
83     while (s.BytesAvailable > 0)
84         vazaoOut = str2num(fscanf(s));
85     end
86
87     %Le dados da planta
88     vazaoInAux = read(fit31_out);           %Vazao Entrada
89     vazaoIn = vazaoInAux.Value;
90     correnteAux = read(sy31_value);       %Corrente Inversor
91     corrente = correnteAux.Value;
92     nivelAux = read(lit31_out);          %Nivel
93     nivel = nivelAux.Value;
94
95     %Calcula erro e delta t
96     E = SPq - vazaoOut;
97     dT = (t - ti);
98
99     %Controle integral
100    if (correnteDesejada >= 20 || correnteDesejada <= 8)
101        I = I + 0*E*dT;
102    else
103        I = I + Ki*E*dT;
104    end
105
106    %Acao do controle PI
107    PI = Kp*E + I;
108    vazaoDesejada = PI;
109
110    if (vazaoDesejada > 1400)
111        vazaoDesejada = 1400;
112    elseif (vazaoDesejada < 0)
113        vazaoDesejada = 0;
114    end
115
116    %Converte a vazao desejada em corrente a ser enviada ao inversor.
117    correnteDesejada = (vazaoDesejada - P(2))./P(1);
```

```
118
119     if (correnteDesejada > 20)
120         correnteDesejada = 20;
121     elseif (correnteDesejada < 8)
122         correnteDesejada = 8;
123     end
124
125     %Converte sinal de corrente para porcentagem e manda para o
126     inversor
127     correnteDesejadaP = 6.25*correnteDesejada - 25;
128     write(sy31_sp, correnteDesejadaP);
129
130     %Salva tempo de amostragem anterior e atualiza o tempo de execucao
131     ti = t;
132     t = toc(n);
133
134     %Salva os dados em uma matriz
135     dadosNew = [vazaoIn vazaoOut vazaoDesejada corrente
136                correnteDesejada E nivel t PI I];
137     dados = [dados; dadosNew];
138     disp(dadosNew);
139 end
140
141 %Salva dados em um arquivo .mat
142 name = strcat('ControleDiretoInversor_Kp(', num2str(Kp), ')_Ki(',
143              num2str(Ki), ')_SP(', num2str(SP), ')).mat');
144 info = '[vazaoIn vazaoOut vazaoDesejada corrente correnteDesejada E
145         nivel t PI I]';
146 save(name, 'dados', 'info');
```

ANEXO A – Datasheet YF-S201

YIFA the plastics Ltd
Product Introduction

1.Modle:YF-21
 2.Product Name:tot. sensor
 3.Flow Range: 1-30L/MIN
 4.(1)Connection Method

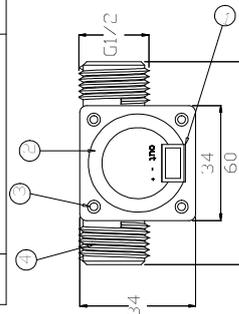
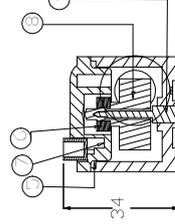


(2)Voltage Range 3.5-24VDC, Pulse Characteristic:F=7Q(L/MIN).
 (3)Extent of error:±5%.
 (4)Flow-Pulse

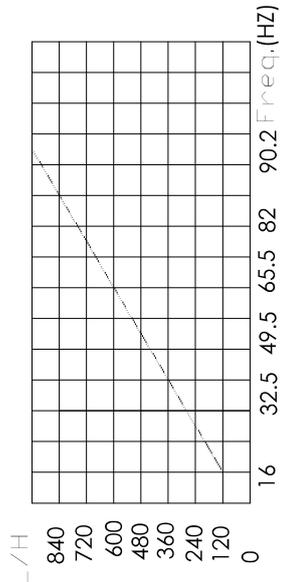
2L/MIN=16HZ 4L/MIN=32.5HZ 6L/MIN=49.3HZ
 8L/MIN=65.5HZ 10L/MIN=82HZ

5.Bom

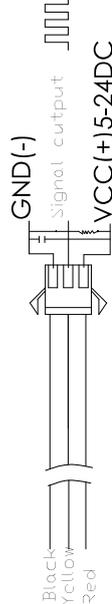
No.	Item	Material	Qty.
1	Conneclion wire		1
2	Bonnet	PA	1
3	Screw		4
4	Valve body	PA	1
5	Leak press valve		1
6	Magnet		1
7	Hall		1
8	Impeller	POM	1
9	rustless steel axis	SJS304	1
10			
11			

Flow-Pulse	Flow-Curve	Connection method
→.Flow Range:100L/H-/1800H-L/H		
Flow (L/H)	Frezq.(HZ)	Erro range
120L/H	16	±10
240L/H	32.5	
360L/H	49.3	
480L/H	65.5	
600L/H	82	
720L/H	90.2	



Connection method:



ANEXO B – Tabela Distribuição t de Student

v	Intervalo de Confiança					
	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.656	318.289
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.328
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.214
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.894
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.611
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307
50	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.261
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232
80	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195
100	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174
∞	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.091