

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Técnicas de Realimentação Aplicadas na
Planta Didática SMAR PD3 Foundation
Fieldbus

Talysson Manoel de Oliveira Santos

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
JOÃO MONLEVADE, MG
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Técnicas de Realimentação Aplicadas na Planta
Didática SMAR PD3 Foundation Fieldbus

Talysson Manoel de Oliveira Santos

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Edgard Gregory Torres Saravia

Coorientador: Prof. Márcio Feliciano Braga

João Monlevade, MG

2016



ATA DE DEFESA

Aos 9 dias do mês de agosto de 2016, às 16:20 horas, foi realizada a apresentação oral de TCC pelo (a) aluno (a) Talysson Mansel de Oliveira Santos, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Edgard Gregory Torres Saravia, Francisco Baracho, Victor Campos e Márcio Feliciano Braga.
O (a) candidato (a) Talysson Mansel de Oliveira Santos apresentou o trabalho intitulado: Técnicas de Realimentação Aplicadas na Planta Didática SMART PD3 Foundation Fieldbus. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela Aprovação do(a) candidato(a), com a nota média 10, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando(a).

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
<u>Edgard Gregory Torres Saravia</u>	<u>10</u>
<u>Victor Costa da Silva Campos</u>	<u>10</u>
<u>Márcio Feliciano Braga</u>	<u>10</u>
<u>Francisco Ricardo A.C. Baracho</u>	<u>10</u>
Média	10

João Monlevade, 9 de agosto de 2016.

[Assinatura]
Professor(a) Orientador(a)

Márcio Feliciano Braga
Professor(a) Co-orientador (a)

Victor Costa da Silva Campos
Professor(a) Convidado(a)

Francisco Ricardo A.C. Baracho
Professor(a) Convidado(a)

Talysson Santos
Aluno(a)

S237t Santos, Talysson Manoel de Oliveira.
Técnicas de realimentação aplicadas na planta didática SMAR PD3
Foundation Fieldbus [manuscrito] / Talysson Manoel de Oliveira Santos. -
2016.

119f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Me. Edgard Gregory Torres Saravia.
Coorientador: Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga.

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

1. Instrumentação. 2. Sensores e Transdutores. 3. Controladores PID. 4.
Sintonia de controlador PID. 5. Controle de Processos. I. Saraiva, Edgard
Gregory Torres. II. Braga, Márcio Feliciano. III. Universidade Federal de
Ouro Preto. IV. Título.



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "Técnicas de Realimentação Aplicadas na Planta Hidráulica SMAR PDS Foundation" Fieldler 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, 22 de Agosto de 2016.

Polynon Manoel de Oliveira Santos
Nome completo do(a) aluno(a)

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais e aos meus irmãos por todo apoio, dedicação e motivação. Aos amigos, companheiros de estudos e a todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante a graduação. Agradeço à família BlackJack pelas amizades e bons momentos, foi um prazer conviver com vocês. Aos meus professores do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto pelo grande aprendizado. Ao coordenador Dr. Márcio Feliciano Braga pela ajuda, ensinamentos e orientação. Ao orientador Msc. Edgard Gregory Torres Saravia pela amizade, incentivo, ajuda, ensinamentos e orientação. E, finalmente, agradeço à Deus por me iluminar.

*Na adversidade, uns desistem, enquanto
outros batem recordes*

Ayrton Senna

Resumo

Este trabalho visa aplicar parte da teoria de controle, vista durante o curso, em instrumentos e processos amplamente utilizados na indústria. Na primeira etapa do trabalho, foi realizado um estudo detalhado dos conceitos de instrumentação, dos sensores, transdutores e da estrutura física da planta SMAR PD3 Foundation Fieldbus. Na segunda etapa, um estudo detalhado das técnicas de controle de realimentação foi realizado. A partir das informações obtidas nas duas primeiras etapas, foram implementadas malhas de controle utilizando o controlador PID, que é um controlador muito utilizado em diversas plantas industriais. Para sintonizar os controladores, foram utilizados os métodos de Ziegler e Nichols do ponto crítico, Ziegler e Nichols de malha aberta, IMC e Skogestad. Além destes métodos, o programa Sisotool também foi utilizado para obter a sintonia dos controladores. Foi implementado um controlador PID para controlar a vazão, um controlador PID para controlar o nível e um controle em cascata para controlar temperatura no tanque de aquecimento da planta de instrumentação SMAR PD3 Foundation Fieldbus. A planta utilizada para realização deste trabalho está presente no laboratório de controle e automação do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, da Universidade Federal de Ouro Preto. Foram realizados testes distintos para validar e comprovar a sintonia dos controladores e o funcionamento correto das malhas desenvolvidas.

Palavras chave: Instrumentação, Sensores e Transdutores, Controlador PID, Sintonia de controlador PID, Controle de Vazão, Controle de Nível, Controle de Temperatura.

Abstract

This work aims to apply part of control theory, seen during the course, in instruments and procedures widely used in the industry. In the first stage of the work, a detailed study of instrumentation concepts, sensors, transducers and the physical structure of the PD3 SMAR Foundation Fieldbus plant was carried out. In the second stage, a detailed study of feedback control techniques was conducted. Control loops using the PID controller, which is a widely used controller in many industrial plants, were implemented once the two first stages of the study were completed. Ziegler and Nichols Critical Point, Ziegler and Nichols Open Loop, IMC and Skogestad were the methods used to tune the PID controllers. In addition to these, the Sisotool program was also used for tuning the controllers. A PID controller to control the flow, a PID controller for controlling the level and a cascade control to control temperature in the heating tank of the SMAR PD3 Foundation Fieldbus instrumentation plant were implemented. The plant used to carry out this work belongs to the Control and Automation Laboratory of the Institute of Physical and Applied Sciences of Federal University of Ouro Preto. Different tests to validate and check the controllers tuning and the correct functioning of the developed control loops were performed.

Keywords: Instrumentation, Sensors and Transducers, PID controller, PID controller tuning, Flow Control, level control, temperature control.

Lista de abreviaturas e siglas

ITS-90	<i>International Temperature Scale of 1990</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
FT	Função de transferência
FF	<i>Foundation Fieldbus</i>
ISA	<i>The International Society of Automation</i>
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
FEM	Força Eletromotriz
ATM	Atmosfera (unidade de pressão)
SP	<i>SetPoint</i>
ZN	Ziegler e Nichols
IMC	Método do Modelo Interno

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exatidão × Precisão	3
Figura 2 – Histerese	5
Figura 3 – Zona morta	6
Figura 4 – Linearidade estática	7
Figura 5 – Resposta instrumento de primeira ordem para entrada do tipo degrau .	10
Figura 6 – Resposta de instrumento de segunda ordem para entrada do tipo degrau	11
Figura 7 – Formas de energia de um sensor	13
Figura 8 – Ponte de Wheatstone	14
Figura 9 – Ponte de Wheatstone com potenciômetros de ajuste	16
Figura 10 – Sensor a três fios conectado à ponte de Wheatstone	17
Figura 11 – Esquema geral de acoplamento	19
Figura 12 – Circuito utilizado por Seebeck	25
Figura 13 – Sensor do tipo Capacitivo	32
Figura 14 – Modelo identificado do processo	44
Figura 15 – Lógica Ladder para acionar bomba e resistência de aquecimento	45
Figura 16 – Malha de controle de vazão	46
Figura 17 – Malha de controle de nível	49
Figura 18 – Malha de controle de temperatura	52
Figura 19 – Sintonia: Ganho = 0,5	55
Figura 20 – Sintonia: Ganho = 0,8	56
Figura 21 – Sintonia: Ganho = 1,2	57
Figura 22 – Sintonia: Entrada degrau de 25%	58
Figura 23 – Sintonia: Entrada degrau de 50%	59
Figura 24 – Sintonia: Entrada degrau de 75%	60
Figura 25 – Sintonia: Entrada degrau de 100%	61
Figura 26 – Resultado teste 1 para SP=300 L/h	63
Figura 27 – Resultado teste 1 para SP=500 L/h	64
Figura 28 – Resultado teste 1 para SP=800 L/h	65
Figura 29 – Resultado teste 1 para SP=1200 L/h	66
Figura 30 – Resultado teste 1 para SP=1500 L/h	67
Figura 31 – Resultado teste 2 para SP=300 L/h	69
Figura 32 – Resultado teste 2 para SP=500 L/h	70
Figura 33 – Resultado teste 2 para SP=800 L/h	71
Figura 34 – Resultado teste 2 para SP=1200 L/h	72
Figura 35 – Resultado teste 2 para SP=1500 L/h	73
Figura 36 – Sintonia: Ganho = 10	75

Figura 37 – Sintonia: Ganho = 20	76
Figura 38 – Sintonia: Ganho = 30	77
Figura 39 – Sintonia: Ganho = 38	78
Figura 40 – Sintonia: Entrada degrau de 75%	79
Figura 41 – Resultado teste 1 para SP=25 %	81
Figura 42 – Resultado teste 1 para SP=50 %	82
Figura 43 – Resultado teste 1 para SP=75 %	83
Figura 44 – Resultado teste 1 para SP=100 %	84
Figura 45 – Resposta ao degrau: 100% resistência de aquecimento e 25% de abertura da válvula	85
Figura 46 – Resultado teste de validação para SP=35°C	87
Figura 47 – Resultado teste de validação para SP=40°C	88
Figura 48 – Resultado teste de validação para SP=45°C	89
Figura 49 – Resultado teste de validação para SP=50°C	90
Figura 50 – Fluxograma geral	96
Figura 51 – Estrutura física planta SMAR PD3 <i>Foundation Fieldbus</i>	96
Figura 52 – Rotâmetro	97
Figura 53 – Eletrodo de nível	98
Figura 54 – Conversor estático FI302	99
Figura 55 – TT302	101
Figura 56 – Sensor PT100 com ligação a 3 fios	101
Figura 57 – Termopar J	102
Figura 58 – LD302	102
Figura 59 – FY302	104
Figura 60 – Bomba hidráulica monofásica	106
Figura 61 – Especificações bomba hidráulica monofásica	106
Figura 62 – Bomba hidráulica trifásica	107
Figura 63 – Especificações da bomba hidráulica trifásica	107
Figura 64 – Válvula de controle	108
Figura 65 – Regulador de temperatura e duas resistências de imersão	108

Lista de tabelas

Tabela 1 – Temperatura de referências definidas na ITS-90	22
Tabela 2 – Aplicações típicas dos controladores P, PI e PID	38
Tabela 3 – Sintonia pelo método de Ziegler e Nichols	40
Tabela 4 – Sintonia pelo método de Ziegler e Nichols	41
Tabela 5 – Sintonia PID para processos com tempo morto	42
Tabela 6 – Sintonia pelo método de Skogestad	43
Tabela 7 – Especificações do rotâmetro	97
Tabela 8 – Especificação funcional FI302	100
Tabela 9 – Especificação de desempenho FI302	100
Tabela 10 – Especificação técnica LD302	103
Tabela 11 – Especificação de performance FY302	104
Tabela 12 – Especificação funcional FY302	105
Tabela 13 – Parâmetros do regulador de temperatura	109

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Estrutura do trabalho	2
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Conceitos de instrumentação	3
2.1.1	Efeitos sistemáticos e aleatórios	3
2.1.2	Características estáticas de instrumentos	4
2.1.3	Características dinâmicas de instrumentos	7
2.1.3.1	Representação de Sistemas Lineares	7
2.1.3.2	Modelos de baixa ordem	8
2.2	Sensores e transdutores	12
2.2.1	Diferenças entre sensores e transdutores	12
2.2.2	Circuitos e princípios físicos de medição	14
2.2.3	Medição de temperatura	21
2.2.4	Medição de pressão	30
2.2.5	Medição de vazão	32
2.2.6	Medição de nível	34
2.3	Técnicas de Controle	36
2.3.1	Controlador PID	36
2.3.1.1	Estrutura	36
2.3.1.2	Ação proporcional	37
2.3.1.3	Ação integral	37
2.3.1.4	Ação derivativa	38
2.3.2	Sintonia de controladores PID	39
2.3.2.1	Método do ponto crítico de Ziegler e Nichols	39
2.3.2.2	Método de Ziegler e Nichols em malha aberta	40
2.3.2.3	Método do modelo interno (IMC)	41
2.3.2.4	Método de Skogestad	42
2.3.2.5	Obter FT e utilizar a ferramenta <i>Sisotool</i>	43
3	Ensaio	45
3.1	Controle de vazão	46
3.1.1	Sintonia do Controlador	47
3.1.1.1	Método do ponto crítico de Ziegler e Nichols	47
3.1.1.2	Método de Skogestad	47
3.1.1.3	Obter FT e utilizar a ferramenta <i>Sisotool</i>	48
3.1.2	Testes de Validação	48

3.1.2.1	Teste 1	48
3.1.2.2	Teste 2	48
3.2	Controle de Nível	49
3.2.1	Sintonia do controlador	49
3.2.1.1	Método do ponto crítico de Ziegler e Nichols	49
3.2.1.2	Método de Skogestad	50
3.2.1.3	Obter FT e utilizar a ferramenta <i>Sisotool</i>	50
3.2.2	Teste de Validação	51
3.3	Controle de Temperatura	51
3.3.1	Sintonia do Controlador	52
3.3.2	Teste de Validação	53
4	Resultados	55
4.1	Controle de Vazão	55
4.1.1	Sintonia de Ziegler e Nichols	55
4.1.2	Sintonia de Skogestad	58
4.1.3	Obter FT e utilizar a ferramenta <i>Sisotool</i>	62
4.1.4	Resultados do Teste 1	63
4.1.5	Resultados do Teste 2	68
4.2	Controle de Nível	75
4.2.1	Sintonia de Ziegler e Nichols	75
4.2.2	Sintonia de Skogestad	79
4.2.3	Obter FT e utilizar a ferramenta <i>Sisotool</i>	80
4.2.4	Resultados do Teste de Validação	81
4.3	Controle de Temperatura	85
4.3.1	Sintonia do Controlador	85
4.3.2	Resultados do Teste de Validação	87
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	91
	Referências	93
6	Anexo	95

1 Introdução

O constante avanço tecnológico nas variadas áreas do conhecimento humano tem proporcionado também o desenvolvimento de novas técnicas que podem ser aplicadas na automação. A automação vem sendo cada vez mais utilizada nas indústrias, causando um aumento na qualidade e quantidade da produção, o que permitiu a redução dos custos. Ao mesmo tempo, para atender às expectativas de diversidade do mercado consumidor, procura-se tornar mais flexível a utilização dos sistemas produtivos (MAITELLI, 2003).

Desse modo, a Automação busca métodos de implementar e realizar ações para automatizar um sistema ou processo que visam melhorar a produtividade. Já o Controle, é a área do conhecimento que analisa formas sistemáticas de descrever modelos e de encontrar ações para que estes sistemas funcionem de maneira previamente determinada (AGUIRRE, 2007).

Uma ferramenta importante, que visa corresponder a automação industrial, é a utilização de controladores de processos contínuos. Controladores são equipamentos que têm como função manter variáveis de um processo em valores pré-estabelecidos, conhecidos como *setpoints*, a partir de um algoritmo geralmente proporcional a uma ou mais grandezas que são mensuradas em tempo real pelo equipamento de controle. Dentro das técnicas de controle tem-se o controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), que é o algoritmo de controle mais tradicional na indústria. De acordo com (ASTROM; T.HAGGLUND, 1995), em mais de 11.000 malhas de controle estudadas em diversas plantas industriais, por volta de 97% eram controladas com o PID, que são utilizados principalmente devido à simplicidade no ajuste dos seus parâmetros e devido a este algoritmo estar presente em grande parte dos equipamentos de controle na indústria. A implementação prática deste algoritmo depende do fabricante, isto é, podem existir algumas variações na sua construção, mas, a essência do controlador PID é sempre a mesma (ISERMANN, 1989; LUYBEN, 1990; SHINSKEY, 1996).

Usualmente, os processos que mais utilizam a instrumentação são as indústrias que atuam nas áreas de petróleo, química, petroquímica, alimentos, cerâmicas, siderurgia, celulose e papel, têxtil e geração de energia elétrica. Em todos esses processos é determinante controlar variáveis como pressão, nível, vazão, temperatura, pH, condutividade, velocidade, umidade e concentração. Os instrumentos de medição e controle possibilitam manter e controlar as variáveis dos processos em condições melhores do que se elas fossem controladas de forma manual pelo operador (FAVARO, 2012).

Devido ao fato do controlador PID ser muito aplicado em processos industriais, múltiplas técnicas são propostas para ajustar os parâmetros proporcional, integral e derivativo. Este ajuste dos parâmetros é conhecido como o problema da sintonia. As primeiras regras de sintonia para controladores PID foram propostas por Ziegler e Nichols (1942).

Neste trabalho são utilizadas técnicas de sintonia descritas em (ZIEGLER; NICHOLS, 1942; RIVERA; MORARI; SKOGESTAD, 1986; SKOGESTAD, 2004).

Na Universidade Federal de Ouro Preto existe uma planta didática PD3 da SMAR *Foundation Fieldbus*, que permite realizar o estudo e a aplicação de processos industriais, por meio da implementação de estratégias de controle utilizando instrumentos, equipamentos, ferramentas de configuração e software típicos.

1.1 Objetivos

A presente investigação visa:

- Revisar conceitos de instrumentação, técnicas de medição e controle realimentados;
- Descrever a planta didática de instrumentação SMAR PD3 *Foundation Fieldbus*;
- Implementar, na planta SMAR PD3, malhas para controlar vazão, nível e temperatura, nas quais foram aplicadas técnicas de controle com realimentação;
- Desenvolver uma interface uma gráfica que permita coletar dados que serão analisados e interpretados a partir da malha de controle.

1.2 Estrutura do trabalho

O Capítulo 1 descreve o problema e apresenta a proposta do trabalho, citando os pontos relevantes da investigação.

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão dos conceitos básicos de instrumentação, caracterização dos tipos de sensores mais utilizados e suas respectivas técnicas de medição que permitem operar a planta didática SMAR PD3. São analisadas também as particularidades do controlador PID e as seguintes técnicas de sintonia: método do ponto crítico de Ziegler e Nichols, método da malha aberta de Ziegler e Nichols, método IMC, método Skogestad; além da utilização do *Sisotool*, que é uma extensão do programa Matlab.

No capítulo 3, há uma descrição dos ensaios realizados no controle de vazão, de nível e de temperatura.

No capítulo 4, os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

No capítulo 5, tem-se a conclusão desta investigação e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Conceitos de instrumentação

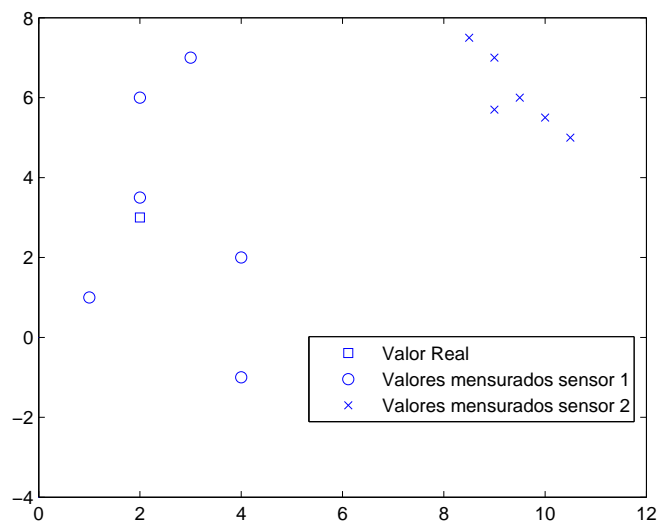
2.1.1 Efeitos sistemáticos e aleatórios

Para saber interpretar os instrumentos de medição, é necessário conhecer características de funcionamento que podem ser encontrados na folha de dados do fabricante. Estes conceitos são descritos a seguir:

1. Exatidão - É a aptidão que um determinado instrumento de medição tem para fornecer respostas próximas ao valor real (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).
2. Precisão - Está relacionada com o quão repetitivo é o valor medido por um transdutor. É o erro relativo máximo que o instrumento pode apresentar (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Normalmente os conceitos de exatidão e precisão são confundidos. Para esclarecer melhor estes dois conceitos, basta analisar os valores fornecidos por dois sensores distintos conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Exatidão × Precisão



Analisando a Fig. 1, o sensor 1 é mais exato que o sensor 2 porque sua medição se aproxima mais do valor real. Porém, é possível observar também que o sensor 2 é mais preciso que o sensor 1, porque suas medidas são mais próximas e repetitivas entre si. Outros parâmetros que aparecem na folha de dados são as características estáticas e dinâmicas dos instrumentos, que serão abordadas de forma detalhada nos próximos tópicos.

2.1.2 Características estáticas de instrumentos

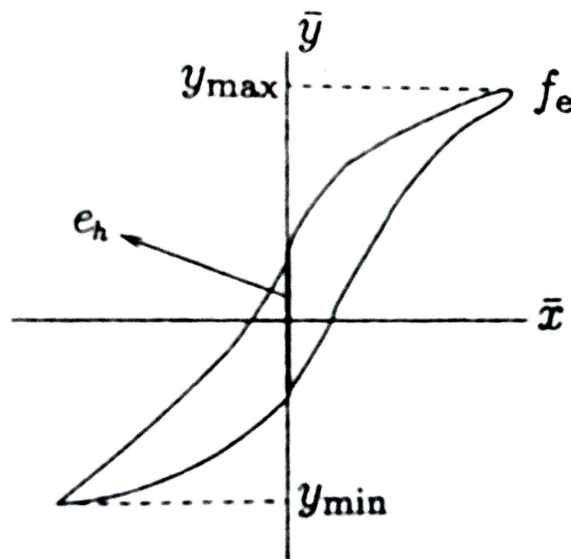
Para identificar se um instrumento satisfaz as especificações para determinada aplicação, é necessário conhecer suas características estáticas e o que representa cada uma delas. O grupo das características estáticas é composto pelos seguintes parâmetros:

1. Sensibilidade - Está relacionada com a variação medida na saída causada por uma pequena alteração da grandeza de entrada, tanto a saída como a entrada devem ser analisadas no estado estacionário. É possível estimar a sensibilidade a partir da relação da variação da saída sobre a variação da entrada, ou seja, a sensibilidade de um transdutor é dada em unidade da variável física de saída por unidade da variável de entrada. Portanto, um sensor muito sensível fornece uma variação na saída para uma pequena alteração da grandeza medida (AGUIRRE, 2013; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).
2. Resolução - A menor variação da entrada que um instrumento é capaz de detectar é conhecida como a resolução do mesmo, isto quando o valor inicial da entrada for diferente de zero. Se uma entrada for acrescida de forma lenta, será possível observar que um incremento infinitesimal não será detectado pelo instrumento, porém, se continuarmos a aumentar gradativamente, a variável de entrada vai chegar a um ponto crítico e o instrumento vai indicar uma saída levemente diferente. Então, a menor variação de entrada detectável é a resolução do instrumento (AGUIRRE, 2013; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

É comum confundir sensibilidade com resolução. Para esclarecer melhor a diferença entre esses dois conceitos, é possível aplicar um exemplo prático. Considere um multímetro hipotético. Se utilizarmos o multímetro como amperímetro na escala de 20A, e tentarmos mensurar uma entrada de 1mA, não acusará leitura na saída em razão da baixa sensibilidade. Se alterarmos a escala para 2mA vamos conseguir fazer a leitura, pois, nesta nova escala, o instrumento se torna mais sensível. Se mantivermos a escala em 2mA e variarmos a entrada para 1,0001mA e essa mudança não causar nenhuma mudança no valor medido, significa que esta variação de 0,0001mA é menor que a resolução do amperímetro, mesmo estando na escala correta de sensibilidade (AGUIRRE, 2013; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

3. Limiar - Para definir de forma correta o limiar de um instrumento é necessário considerar que inicialmente ele esteja em zero. Portanto, se a entrada está em zero, a saída também está em zero. Aumentando de forma lenta e gradativa o valor da entrada, pode-se observar que após ultrapassar o valor crítico na entrada, o instrumento passa a indicar uma saída não nula conhecida como limiar do instrumento, ou seja, limiar é a menor alteração detectável na saída (AGUIRRE, 2013; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).
4. Histerese - Vários materiais, ao serem deflexionados, primeiramente em uma direção e logo após na direção oposta, apresentam comportamentos diferentes. Fenômeno parecido ocorre em materiais magnéticos, quando magnetizados em um momento com uma polaridade e em um segundo momento com a polaridade oposta. Esse fenômeno é denominado histerese. É possível quantificar a histerese de instrumentos em termos da histerese máxima de saída que é o máximo erro devido à histerese (AGUIRRE, 2013; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

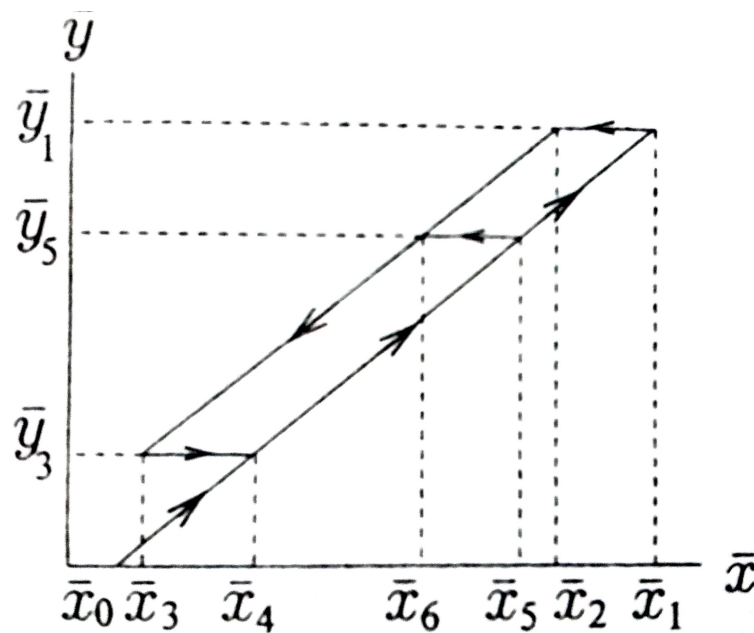
Figura 2 – Histerese



Fonte: (AGUIRRE, 2007)

5. Zona Morta - A faixa de valores de entrada que correspondem a um mesmo valor de saída é conhecida como zona morta de um sistema. Se o sinal que entra em um instrumento variar entre os limites da zona morta, pode não ocorrer alteração correspondente no sinal de saída, isso vai depender do sentido de variação. Não há uma faixa de valores definida que represente a zona morta. Nota-se a zona morta quando mudamos a direção da variável de entrada e observamos o que acontece com a saída do instrumento. Se mudar a direção da variável de entrada e a saída não mudar a direção, temos uma zona morta neste intervalo (AGUIRRE, 2013; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

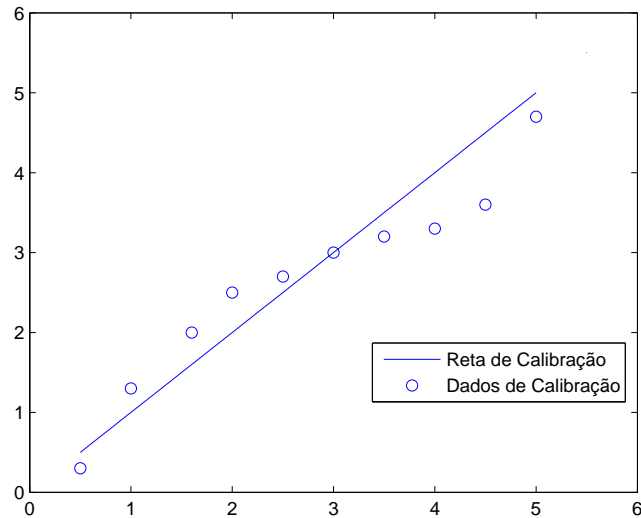
Figura 3 – Zona morta



Fonte: (AGUIRRE, 2007)

6. Faixa e Alcance - A faixa estática ou *range* de um instrumento é o intervalo de valores estáticos que o dispositivo pode mensurar. O alcance, também conhecido como faixa dinâmica ou *span*, é a diferença algébrica entre os valores limites da faixa do instrumento. Podemos citar como exemplo a termorresistência PT100, que segundo a ITS-90, tem faixa de $-259,3467^{\circ}\text{C}$ a $961,78^{\circ}\text{C}$, resultando em um alcance de $1221,1267^{\circ}\text{C}$ (AGUIRRE, 2013; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).
7. Linearidade estática - Utilizando os dados de calibração de um instrumento e a respectiva reta de calibração, é possível determinar a linearidade estática de um instrumento, que é definida como a diferença máxima entre os dados de calibração e a reta de calibração. Logo, esse parâmetro quantifica quão distante estão os dados de calibração de uma reta (AGUIRRE, 2013; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Figura 4 – Linearidade estática



Fonte: Adaptado de (AGUIRRE, 2013)

8. Desvio de zero e de sensibilidade - Os parâmetros desvio de zero e desvio de sensibilidade descrevem como a temperatura ou outra entrada modificante influencia o erro sistemático e a sensibilidade de um instrumento. Analisando a reta de calibração do instrumento, o desvio de zero é definido como o deslocamento vertical da curva de calibração, provocado por erros sistemáticos. De modo similar, o desvio de sensibilidade, conhecido como desvio de fator de escala, é definido como a mudança ocorrida na inclinação da reta de calibração, em razão da variação da entrada modificante (AGUIRRE, 2013; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

2.1.3 Características dinâmicas de instrumentos

Assim como os demais sistemas físicos, sensores e instrumentos são sistemas dinâmicos. A seguir, serão abordados parâmetros oriundos da análise dinâmica dos instrumentos.

2.1.3.1 Representação de Sistemas Lineares

Instrumentos dinâmicos possuem como característica o fato das suas saídas não responderem de forma instantânea a uma variação nas suas respectivas entradas. Em outras palavras, são aqueles em que a saída demora um tempo finito para responder a alterações ocorridas na entrada. Este tempo que o instrumento gasta para atingir seu valor em regime permanente é conhecido como tempo de acomodação (AGUIRRE, 2013).

Existem outras características que diferem o sistema dinâmico do sistema estático. Assim como descrito anteriormente, instrumentos dinâmicos não respondem de maneira instantânea como os instrumentos estáticos e, além disso, os sistemas dinâmicos possuem

memória enquanto os estáticos não possuem. Como os dois tipos de sistema possuem diferenças, a forma de representá-los também se difere. Normalmente representam-se sistemas estáticos por equações algébricas. Já os sistemas dinâmicos são representados por equações diferenciais, em tempo contínuo, e no tempo discreto por equações a diferenças (AGUIRRE, 2013).

A partir da equação diferencial utilizada para descrever um sistema dinâmico, é possível obter a função de transferência utilizando a transformada de *Laplace* e realizando manipulações matemáticas (AGUIRRE, 2013).

2.1.3.2 Modelos de baixa ordem

Sistemas de baixa ordem são os sistemas de ordem zero, um ou dois. As características de cada um dos instrumentos de baixa ordem são:

1. Instrumentos de ordem zero - Existem instrumentos que são tão rápidos se comparados com o sinal de entrada que podemos considerar que sua resposta ocorre de forma instantânea às variações verificadas no mesurando. Para representar esse comportamento, apenas equações algébricas são suficientes, visto que não há nenhuma dinâmica significativa a ser modelada. Uma equação algébrica corresponde a uma equação diferencial de ordem zero (AGUIRRE, 2013).

Modelar um instrumento como um sistema de ordem zero é apenas uma aproximação. O instrumento é dinâmico, sua banda de passagem é larga o bastante para conter todas as componentes de frequência que compõem o sinal de entrada. Apesar dessa ser um situação ideal, não é incomum no contexto de instrumentação. Um bom exemplo ocorre quando um instrumento é caracterizado baseando-se na sua curva de calibração, sua dinâmica é desprezada. Contudo, é importante saber que nem sempre tal aproximação é adequada (AGUIRRE, 2013). Um sistema linear de ordem zero pode ser caracterizado pela equação 2.1:

$$a_0 \cdot y(t) = b_0 \cdot x(t) \quad (2.1)$$

Portanto, é possível relacionar a entrada e saída de instrumentos de ordem zero por uma expressão algébrica, que se reduz a uma constante no caso de sistemas lineares invariantes no tempo, como mostra a equação 2.2:

$$\frac{y(t)}{x(t)} = \frac{b_0}{a_0} = K \quad (2.2)$$

A constante K representa o ganho do sistema de ordem zero e, no caso de instrumentos, é a sensibilidade estática que pode ser mensurada diretamente da curva de calibração. Se a curva de calibração for descrita por uma reta, então a sensibilidade do instrumento será a mesma em qualquer ponto de operação. Procedimentos de calibração estática são utilizados para estimar a sensibilidade K na prática (AGUIRRE, 2013).

Um exemplo clássico de um sensor de ordem zero é o potenciômetro. A relação entre o mesurando (posição do cursor) e a indicação do potenciômetro (resistência ou tensão entre uma das extremidades e o cursor) é dada pela Lei de *Ohm*, que relaciona algébricamente a tensão e a corrente em um elemento resistivo. Como dito anteriormente, um sistema pode ser modelado como de ordem zero apenas de forma aproximada. O motivo do potenciômetro não ser na realidade um sistema de ordem zero é simples. Ao se mover o cursor do potenciômetro de forma muito rápida, a tensão nos terminais do potenciômetro será de alta frequência e, conseqüentemente, capacitâncias e indutâncias parasitas podem se tornar significativas. Se esses efeitos forem considerados no modelo, vai resultar em um equação diferencial de ordem mais alta. O mesmo aconteceria se o potenciômetro fosse alimentado por uma fonte de corrente alternada de alta frequência.

2. Instrumentos de primeira ordem - Instrumentos de primeira ordem possuem dinâmica que pode ser representada pela Eq. 2.3.

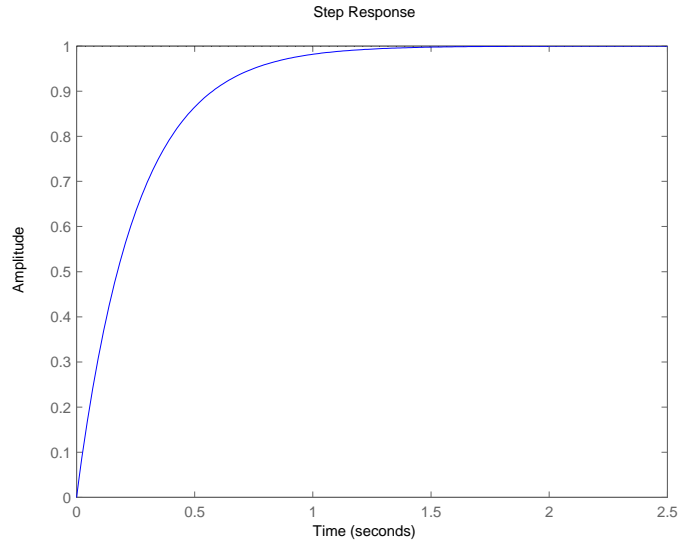
$$a_1 \cdot y'(t) + a_0 \cdot y(t) = b_0 \cdot x(t) \quad (2.3)$$

Aplicando a transformada de Laplace e adotando condições iniciais nulas, obtém-se a função de transferência que modela os instrumentos de primeira ordem. A FT pode ser vista na Eq. 2.4:

$$H(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \quad (2.4)$$

Observando a Eq.2.4 temos que $K = \frac{b_0}{a_0}$ é o ganho do sistema e $\tau = \frac{a_1}{a_0}$ é a constante de tempo. A partir desses dois parâmetros, é possível caracterizar o comportamento dinâmico de um instrumento de primeira ordem. A resposta de um dispositivo de primeira ordem para entrada do tipo degrau pode ser vista na Fig. 5:

Figura 5 – Resposta instrumento de primeira ordem para entrada do tipo degrau



Fonte: Adaptado de (NISE, 2012)

O ganho do instrumento nada mais é do que sua sensibilidade estática, que é a inclinação da curva de calibração. Se a curva de calibração for retilínea, o ganho do instrumento será constante em qualquer ponto da sua faixa de operação. Se for curva, o ganho do instrumento não será constante, vai depender do ponto de operação, que pode ser determinado com base no intervalo de valores do mesurando (AGUIRRE, 2013).

A constante de tempo, é o tempo necessário para a saída de um sistema de primeira ordem atingir 63,2% do seu valor final para uma variação em degrau da entrada (NISE, 2012).

3. Instrumentos de segunda ordem - Instrumentos de segunda ordem, que são lineares, possuem a dinâmica descrita por FT do tipo da Eq.2.5 ou da Eq.2.6.

$$H(s) = \frac{K}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)} \quad (2.5)$$

$$H(s) = \frac{K}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.6)$$

As constantes que aparecem na função de transferência de um instrumento de segunda ordem são τ_1 e τ_2 que são constantes de tempo fixas, ζ é o coeficiente de amortecimento e ω_n é a frequência natural do sistema (AGUIRRE, 2013; NISE, 2012; OGATA, 2011) .

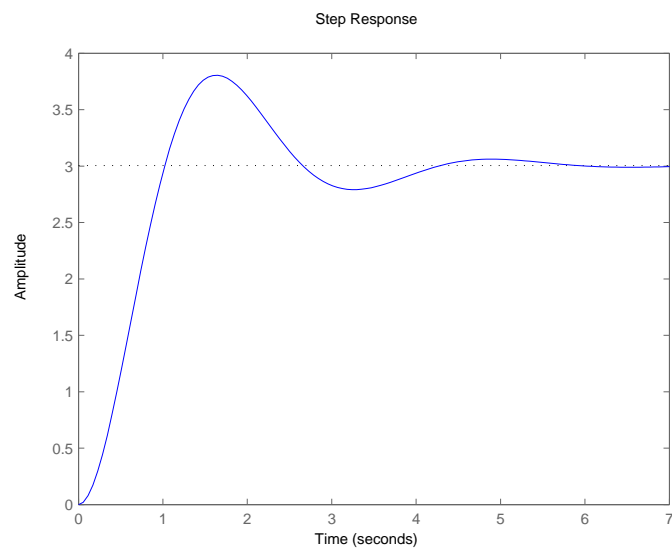
A função de transferência de um sistema de segunda ordem possui dois polos e nenhum zero. Os polos do sistema podem ser definidos a partir da Eq.2.7:

$$P_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.7)$$

Considerando uma entrada do tipo degrau, se $0 < \zeta < 1$, o sistema possuirá duas raízes complexas conjugadas e será subamortecido. Se $\zeta = 1$, então o sistema vai possuir duas raízes reais iguais e será criticamente amortecido. Se $\zeta > 1$, o sistema possuirá duas raízes reais distintas e será sobreamortecido. Se $\zeta = 0$, o sistema possuirá duas raízes complexas conjugadas e será um sistema sem amortecimento (NISE, 2012).

Se não houvesse qualquer amortecimento, o sistema oscilaria na frequência natural não amortecida. Mas, todo sistema real possui algum amortecimento, portanto, o que se vê são oscilações amortecidas. O coeficiente de amortecimento representa o grau de amortecimento presente nas oscilações do sistema. Para se obter uma resposta transitória aceitável de um sistema de segunda ordem, o coeficiente de amortecimento deve estar entre 0,4 e 0,8 (NISE, 2012). A resposta de um instrumento de segunda ordem para entrada do tipo degrau pode ser vista na Fig. 6.

Figura 6 – Resposta de instrumento de segunda ordem para entrada do tipo degrau



Fonte: Adaptado de (NISE, 2012)

4. Instrumentos com atraso puro de tempo - O atraso puro de tempo, ou tempo morto, é um período de tempo durante o qual a saída do instrumento não responde a nenhuma variação no seu sinal de entrada, mesmo quando a variação for maior que o limiar e a resolução do sistema. Após esse intervalo de tempo, o sinal de entrada aparece na saída sem nenhuma modificação. O atraso puro de tempo somente desloca, no tempo, o sinal de entrada, e por isso é denominado atraso de transporte. A função de transferência de um tempo morto de τ_d unidades de tempo é dado pela Eq. 2.8 (AGUIRRE, 2013).

$$H(s) = e^{-\tau_d s} \quad (2.8)$$

Alguns sensores possuem o atraso puro de tempo. No entanto, o tempo morto também pode ser útil quando se deseja aproximar sistemas de ordem elevada. É possível modelar sistema de ordem elevada como sistemas de ordem baixa com um atraso puro de tempo.

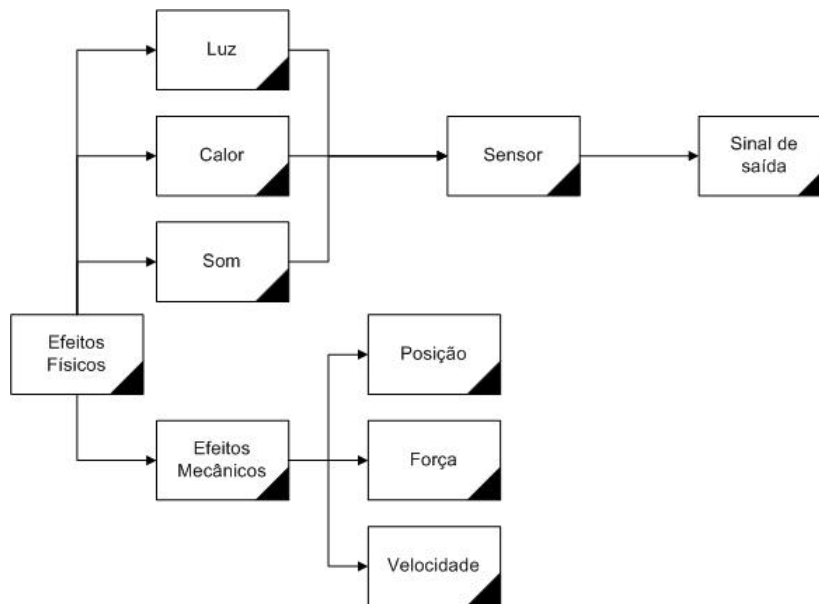
2.2 Sensores e transdutores

2.2.1 Diferenças entre sensores e transdutores

É comum não saber diferenciar um sensor de um transdutor. A seguir será abordado as particularidades dos dois tipos de instrumentos e posteriormente será salientado qual a diferença entre eles.

1. Sensores - São dispositivos sensíveis a algum tipo de energia do ambiente que pode ser térmica, luminosa, cinética, interligando informações sobre uma grandeza que precisa ser mensurada, como por exemplo: temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição, entre outras. A Fig. 7 retrata este conceito sobre sensores em forma de diagrama (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005)

Figura 7 – Formas de energia de um sensor



O sensor tem como característica o fato de nem sempre possuir recursos elétricos para ser aplicado em um sistema de controle. Geralmente, o sinal de saída de um sensor deve ser tratado antes da sua leitura no sistema de controle. Normalmente é utilizado um circuito de interface para conversão do sinal de saída do sensor em um sinal que pode ser lido pelo controlador (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Um exemplo comum é que um sensor, ao receber uma energia externa, gera uma saída com um nível de tensão muito baixo, sendo necessário amplificar este sinal. Então a interface necessária neste caso, seria uma interface capaz de elevar o nível do sinal para que ele possa ser utilizado posteriormente. Os sensores se dividem em dois grandes grupos, os sensores digitais e os sensores analógicos.

Sensores analógicos - Este grupo de sensores pode assumir qualquer valor no seu sinal de saída, desde que esse valor esteja nos seus limites de operação. São utilizados para medir grandezas que podem assumir qualquer valor ao longo do tempo, como por exemplo: pressão, temperatura, umidade, vazão e outras (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Sensores digitais ou discretos - Este grupo de sensores pode assumir apenas dois valores no seu sinal de saída, zero (nível baixo) ou um (nível alto). Não existem grandezas físicas que assumem apenas zero ou um, mas o sinal é convertido pelo circuito eletrônico de conversão e são enviados para o sistema de controle como um sinal digital. É muito utilizado, por exemplo, em sensores de presença (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

2. Transdutores - É um dispositivo completo, que contém o sensor, utilizado para converter uma grandeza qualquer em outra que poderá ser utilizada nos dispositivos de

controle. O transdutor pode ser considerado uma interface entre os tipos de energia que existem no ambiente e o circuito de controle ou interface entre controlador e atuador (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Então, os transdutores são dispositivos que possuem a capacidade de transformar uma grandeza física em um sinal de tensão ou corrente que poderá ser facilmente lido e interpretado por um sistema de controle.

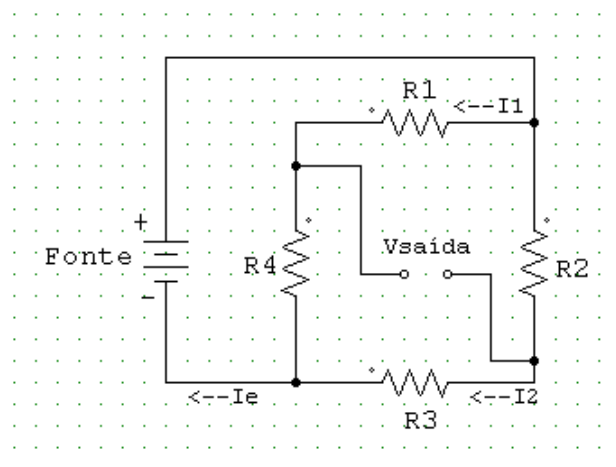
Portanto, tomando como base os conceitos apresentados, o transdutor se difere do sensor por ser um dispositivo completo, que engloba não só o sensor, mas todos os circuitos de interface que permitem que os transdutores sejam aplicados em uma aplicação industrial.

2.2.2 Circuitos e princípios físicos de medição

Os circuitos aplicados em sistemas de instrumentação geralmente são utilizados para que o sinal elétrico que contém as informações de medida seja transmitido sem haver perdas de informação ou distorção das mesmas. Os principais circuitos são:

1. Ponte de Wheatstone - As pontes são aplicadas quando se deseja realizar medições precisas de valores de componentes de circuitos elétricos. O circuito em ponte é empregado em vários métodos de medição e de interface para transdutores. É uma malha fechada composta por quatro impedâncias reais ou complexas, alimentadas por uma fonte entre dois vértices opostos. A tensão entre os outros dois vértices é a saída da ponte (HELFRICK; COOPER, 1994). A ponte de Wheatstone pode ser vista na Figura 8:

Figura 8 – Ponte de Wheatstone



Fonte: Adaptado de (HELFRICK; COOPER, 1994)

Se a soma das correntes ilustradas no circuito da Figura 8 for igual a zero, aplicando uma análise simples do circuito, é possível determinar a corrente I_1 a partir da Eq.2.9

e a corrente I_2 é dada pela Eq.2.10.

$$I_1 = \frac{E_{Fonte}}{R_1 + R_4} \quad (2.9)$$

$$I_2 = \frac{E_{Fonte}}{R_2 + R_3} \quad (2.10)$$

Utilizando a lei de Kirchhoff de tensões na malha formada por R_1 e R_2 temos:

$$V_{Saida} = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2 \quad (2.11)$$

Substituindo as Eqs.2.9 e 2.10 na Eq.2.11, encontramos a Eq.2.12:

$$V_{Saida} = \frac{E_{Fonte} \cdot R_1}{R_1 + R_4} - \frac{E_{Fonte} \cdot R_2}{R_2 + R_3} \quad (2.12)$$

De acordo com a Eq.2.12, é possível concluir que a tensão de saída da ponte depende de forma linear da tensão da fonte. Considerando a saída da ponte igual a zero, chamada de ponte equilibrada, temos:

$$R_2 \cdot R_4 = R_1 \cdot R_3 \quad (2.13)$$

A Eq.2.13 mostra que o equilíbrio da ponte depende somente dos valores de resistência elétrica (ou impedância) dos ramos da ponte. Como a saída da ponte de Wheatstone depende da fonte de alimentação, qualquer flutuação na tensão da fonte vai influenciar a saída da ponte caso ela não esteja em equilíbrio, visto que, mesmo não ocorrendo variação na resistência elétrica dos ramos da ponte, vai causar mudanças no valor mensurado. As fontes de alimentação de pontes de Wheatstone requerem atenção especial quando a aplicação é em circuitos de instrumentação. As fontes devem ser estáveis e com boa regulagem, para não variar a tensão de saída devido a influência de outros fatores, como a temperatura (AGUIRRE, 2013; HELFRICK; COOPER, 1994).

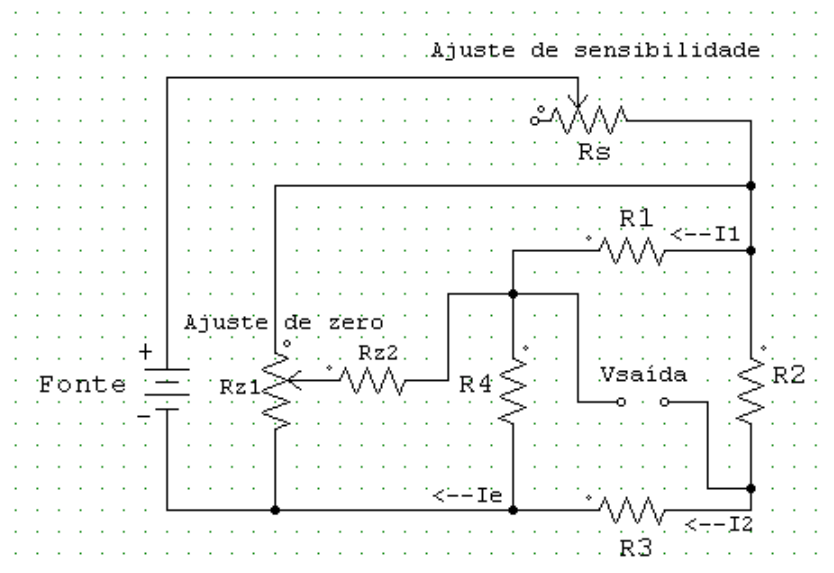
Sensibilidade da ponte de Wheatstone - Outro fator importante é a sensibilidade da ponte de Wheatstone, que está diretamente relacionada com o valor da fonte de alimentação. Se aumenta o nível de tensão da fonte, a sensibilidade aumenta. Contudo é muito importante salientar que o aumento do nível de tensão da fonte aumentará a corrente que circula na ponte e, conseqüentemente, vai elevar a potência elétrica dissipada pelo efeito Joule nos ramos da ponte. Essa potência dissipada vai aquecer os sensores, podendo causar alteração na resistência elétrica. Esse efeito é denominado como auto aquecimento da ponte de Wheatstone e deve-se evitar ou manter no menor nível possível (AGUIRRE, 2013; HELFRICK; COOPER, 1994).

A sensibilidade de componentes conectados utilizando a configuração da ponte de Wheatstone normalmente é expressa em forma normalizada por unidade de tensão

de alimentação, como por exemplo, $mV/V/^{\circ}C$, que indica que a saída da ponte é dada em mV, por volt de tensão de alimentação, por graus Celsius que é a unidade da grandeza mensurada (AGUIRRE, 2013; HELFRICK; COOPER, 1994).

Circuitos relacionados a ponte de Wheatstone - Como descrito anteriormente, a sensibilidade da ponte depende da fonte de alimentação. Quando não é possível ajustar o valor da fonte de alimentação, é possível realizar pequenos ajustes de sensibilidade conectando um potenciômetro entre a fonte de alimentação e a ponte. Além disso, na prática é comum incluir um circuito para ajuste de zero, visto que é difícil obter a condição de equilíbrio (AGUIRRE, 2013; HELFRICK; COOPER, 1994). Estes circuitos podem ser vistos na Figura 9.

Figura 9 – Ponte de Wheatstone com potenciômetros de ajuste

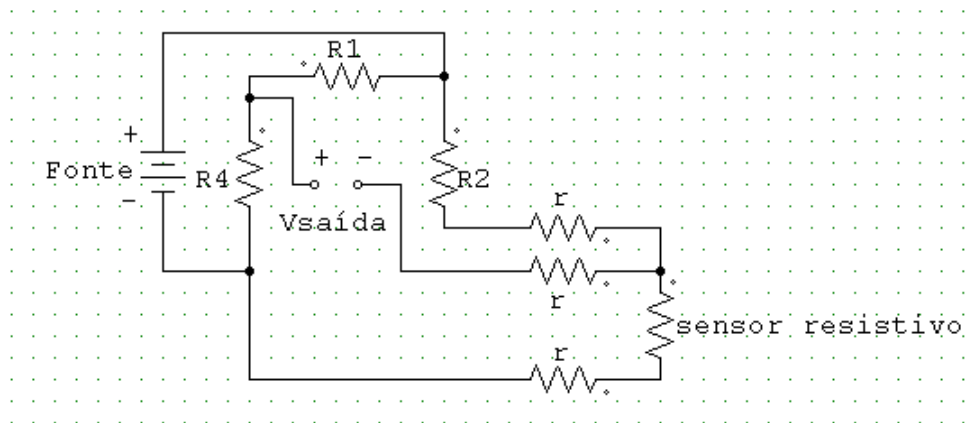


Fonte: Adaptado de (HELFRICK; COOPER, 1994)

Em problemas de instrumentação, apenas um ou mais resistores da ponte são sensores resistivos e a saída da ponte é uma tensão elétrica que está relacionada com o valor mensurado. Quando apenas um braço da ponte é ativo, isto é, apenas um ramo é composto por um sensor, é muito útil adotar a configuração conhecida como conexão a três fios para uso da ponte de Wheatstone (AGUIRRE, 2013).

A partir da Figura 9, vamos adotar R_3 como um sensor resistivo instalado a vários metros do restante da ponte. Se a resistência dos condutores que ligam R_3 à ponte for r , então a resistência do sensor que é vista pela ponte será R_3+2r . Qualquer mudança de resistência dos condutores, devida a alterações de temperatura de operação, por exemplo, vai resultar em uma indicação incorreta da ponte. Para minimizar esse problema, é utilizado a conexão a três fios que está ilustrada na Figura 10.

Figura 10 – Sensor a três fios conectado à ponte de Wheatstone



Fonte: Adaptado de (HELFRICK; COOPER, 1994)

Analisando a Figura 10 é possível observar que a resistência dos condutores não fazem parte do mesmo ramo. Um condutor está em série com o resistor R_2 , o outro condutor está em série com o sensor R_S e R_4 , e R_2 e R_4 estão em ramos opostos da ponte, compensando as possíveis variações em r . Outra observação importante está relacionada ao terceiro condutor, se conectarmos um dispositivo de alta impedância de entrada para medir a tensão de saída da ponte, a corrente que vai circular pelo terceiro condutor será desprezível, bem como qualquer mudança de queda de tensão causada pela variação de r (AGUIRRE, 2013).

2. Laços de corrente - Um dos padrões mais utilizados na indústria para enviar a saída de um sensor até o sistema de aquisição de dados ou até o dispositivo indicador é o laço de corrente de 4 a 20 mA. Uma grande vantagem dessa configuração é a maior proteção contra ruído induzido na forma de tensão, já que a informação está relacionada com a corrente. Alguns sensores possuem circuitos que produzem sua saída em corrente, na escala de 4mA a 20mA. Tais dispositivos geralmente são chamados transmissores (AGUIRRE, 2013).

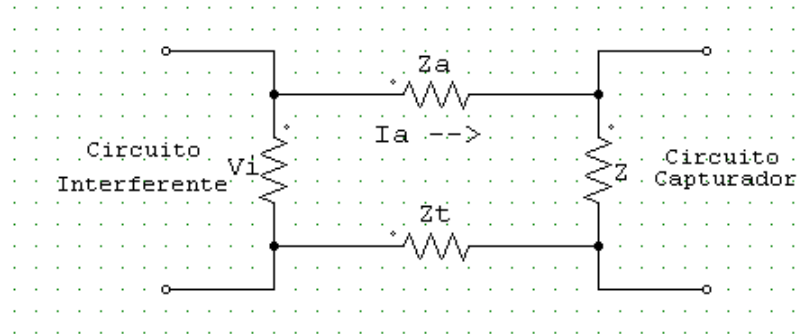
Para converter o sinal de 4mA a 20mA em um sinal de tensão de 1 a 5 V, basta colocar um resistor de precisão de 250Ω . Existem circuitos integrados que fazem essa função de conversão sem que haja necessidade de se ter um resistor de precisão. São circuitos específicos para este tipo de conversão. Outro recurso que é muito empregado juntamente com o laço de corrente é a utilização do amplificador operacional para converter o sinal de tensão em um sinal de corrente (AGUIRRE, 2013).

3. Aterramento e blindagem - Quando se utiliza ganhos muito elevados, até mesmo a indução de tensões da ordem de dezenas de micro-volts pode causar o mau funcionamento do sistema. O estudo de aterramento e blindagem é de suma importância porque permite prever as formas que essas tensões podem ser induzidas em um circuito de instrumentação e procedimentos que podem ser adotados para reduzir os efeitos indesejados (AGUIRRE, 2013).

Acoplamento resistivo, capacitivo e indutivo - No circuito da figura 11 a impedância Z é um componente do circuito capturador, onde idealmente só deveria circular correntes relacionadas ao sinal do sensor. A tensão de interferência, V_i , tem origem de outro circuito elétrico ou provém da indução eletromagnética em algum circuito que causa interferência. Devido a impedância de acoplamento Z_a e a impedância de terra Z_t , a fonte de tensão que causa interferência induz tensões e correntes no circuito capturador. Se o sistema possuir um bom aterramento, a impedância de terra será aproximadamente nula. Dessa forma, se houver uma fonte de tensão externa ao circuito capturador, uma impedância de acoplamento e uma

impedância no circuito captador, é o suficiente para que haja interferência. Na prática, Z_a e Z_t geralmente são impedâncias parasitas (AGUIRRE, 2013).

Figura 11 – Esquema geral de acoplamento



Fonte: (AGUIRRE, 2013)

Em relação às malhas de terra, em baixa frequência, a impedância de terra tem como característica dominante a resistência elétrica, então é um acoplamento resistivo (AGUIRRE, 2013).

O acoplamento capacitivo acontece por meio de capacitâncias parasitas que se encontram entre um circuito de interferência e o circuito captador. No acoplamento capacitivo o circuito se comporta como um filtro passa-altas, ou seja, este tipo de acoplamento é perceptível em altas frequências e em casos em que a impedância de entrada é elevada (AGUIRRE, 2013).

Na prática, o acoplamento indutivo é muito corriqueiro e acontece toda vez que os enlaces de fluxo gerados por um circuito estiverem acoplados a um segundo circuito, isto é, o campo magnético criado pelo circuito que causa interferência enlaça o circuito captador. Geralmente este tipo de interferência acontece quando o cabeamento é longo e os cabos de alimentação são lançados lado a lado com os cabos de sinal. Outros casos englobam o enlace de fluxo criado por circuitos interferentes como transformadores, motores e semelhantes (AGUIRRE, 2013).

Redução de acoplamento elétrico - Observando a Fig.11, é possível concluir que os dois circuitos possuem o condutor de terra em comum e ambas as malhas estão referenciadas ao mesmo terra. Se a impedância de terra não for nula, então consequentemente a corrente em uma malha vai induzir uma tensão na outra. Se o condutor de terra estivesse no mesmo potencial elétrico ao longo de toda a sua extensão não haveria problema. Entretanto, a resistência finita do condutor causa a indução de tensões em um circuito quando a corrente circular no outro (AGUIRRE, 2013).

Se o condutor estiver aterrado em dois pontos distintos, que é uma situação bastante comum, a menos que os dois pontos em que o condutor está aterrado estejam

rigorosamente no mesmo potencial elétrico, uma corrente vai circular pela malha de terra e, devido à impedância do condutor de terra não ser nula, vai haver indução de tensão na malha do sinal que vai causar interferência (AGUIRRE, 2013).

Para solucionar o problema do aterramento em dois pontos é simples, basta aterrar o sistema em apenas um ponto. Porque se um circuito captador for aterrado em dois pontos, conseqüentemente vai haver uma malha de terra em que vai circular corrente. Portanto, quando existe apenas um ponto de aterramento, o terra da fonte, a malha de terra e o terra do circuito de sinal são conectados no mesmo ponto, eliminando o acoplamento resistivo (AGUIRRE, 2013).

Quando o transdutor e o amplificador precisam ser aterrados, é possível utilizar desacopladores para abrir a malha de terra. Uma opção é o amplificador de isolamento, que possui uma descontinuidade galvânica entre a entrada e a saída e a parte de alimentação é obtida internamente com fotoacopladores ou transformadores. O grande problema destes amplificadores é o fato de serem relativamente caros e possuírem faixa de passagem limitada. Uma alternativa é a utilização de cabo de guarda. A resistência destes cabos são menores que a dos condutores que interligam o sensor ao estágio amplificador. Então, o cabo guarda oferece um caminho com menor resistência para a corrente de terra, desviando a maior parte dela do circuito captador (AGUIRRE, 2013).

Uma medida para solucionar o acoplamento capacitivo é blindar o circuito captador com blindagens de resistência baixa e de baixa indutância. Após inserir a blindagem, a capacitância total entre o circuito que causa interferência e o captador é a associação em série da capacitância entre o circuito interferente e a blindagem com a capacitância de acoplamento, que será menor que a capacitância de acoplamento antes do uso da blindagem. Como consequência, a corrente induzida por acoplamento capacitivo é desviada para o terra devido ao fato da blindagem ser aterrada (AGUIRRE, 2013).

Para reduzir o acoplamento indutivo, primeiro é utilizado o par trançado para transmitir os sinais, o que reduz a área de acoplamento, visto que a magnitude dos sinais induzidos dependerá da área do laço. Trançar os condutores diminui a indutância mútua, devido ao fato que os campos magnéticos formados pela corrente do laço, em cada cabo, tendem a se anular. Portanto, dentro das limitações do projeto, os circuitos devem ser compactos e os condutores de sinal e retorno devem ser posicionados o mais próximos possível. A utilização de par trançado diminui a faixa de passagem da fiação, o que pode ser indesejável em altas frequências. No caso de altas frequências, a alternativa é utilizar o cabo coaxial. Outra forma empregada quando for necessário passar a fiação de circuitos distintos, principalmente os de alimentação, pelos cabos de sinal, é dispor os cabos de forma ortogonal (AGUIRRE,

2013).

2.2.3 Medição de temperatura

Atualmente, grande parte dos processos industriais necessitam de um controle preciso de temperatura. Os aspectos físicos e as reações químicas são influenciados pela temperatura, o que torna o controle de temperatura indispensável. De forma semelhante, o controle de temperatura é empregado para se obter conforto térmico (DUNN, 2013).

Antes de descrever os sensores e transdutores responsáveis por mensurar a temperatura, é necessário frisar alguns conceitos básicos que são importantes para o entendimento do processo:

1. Temperatura - É a grandeza da energia cinética das partículas em um determinado corpo, ou ainda, é a medida da energia térmica deste corpo. Geralmente, é medida em graus e utiliza uma das seguintes escalas: Fahrenheit (F), Celsius (C), Rankine (R) ou Kelvin (K) (DUNN, 2013; FIALHO, 2010).
2. Escala Fahrenheit - Proposta em 1714 pelo holandês Fahrenheit, foi a primeira escala de temperatura a ser aceita. Os dois pontos referenciais escolhidos para 0° e 100° são o ponto de congelamento de uma solução salina concentrada (ao nível do mar) e a temperatura interna dos bois, respectivamente. Estes dois referenciais levaram à aceitação de 32° e 212° como os pontos de fusão e ebulição da água pura a 1 atm para a escala Fahrenheit. A pressão altera os valores de fusão e ebulição da água (DUNN, 2013; FIALHO, 2010).
3. Escala Celsius - Foi proposta em meados de 1700 pelo físico e astrônomo sueco Anders Celsius. Tomou-se arbitrariamente como valores referenciais o 0° para o ponto de fusão e 100° para o ponto de ebulição da água pura, ambos para pressão de 1 atm (DUNN, 2013; FIALHO, 2010).
4. Escala Rankine - Foi proposta por volta do ano de 1800 por Rankine. É uma escala de temperatura que referencia o zero absoluto que foi baseada na escala Fahrenheit. Isto é, 1°F corresponde a 1°R . Para a água pura a 1 atm, os pontos de fusão e ebulição são $491,6^{\circ}\text{R}$ e $671,6^{\circ}\text{R}$, respectivamente (DUNN, 2013; FIALHO, 2010).
5. Escala Kelvin - É uma escala proposta no final do século XIX pelo físico escocês Willian Thomson, conhecido como barão Kelvin Oflargs. Também faz referência ao zero absoluto, porém se baseia na escala de Celsius. Uma mudança de 1° na escala Celsius corresponde a uma mudança de 1 K na escala Kelvin. O valor da temperatura em Kelvin é igual ao valor da temperatura em Celsius mais 273,16 (DUNN, 2013; FIALHO, 2010).

6. Escala Internacional de Temperatura (ITS - 90) - A definição de temperatura na atualidade é dada em norma, norma esta conhecida como Escala Internacional de Temperatura, que foi definida a partir de fenômenos determinísticos de temperatura. Nesta norma são estipuladas algumas temperaturas de referência e possui indicação de técnicas para a interpolação entre os pontos, como mostra a Tabela 1: (FIALHO, 2010; AGUIRRE, 2013).

Tabela 1 – Temperatura de referências definidas na ITS-90

Ponto de operação	K	C
Ponto triplo do hidrogênio	13,8033	-259,3467
Equilíbrio líquido-vapor para o hidrogênio a 25/76 atm	17	-256,15
Equilíbrio líquido-vapor para o hidrogênio a 1 atm	20,3	-252,87
Ponto triplo do neônio	24,5561	-248,5939
Ponto triplo do oxigênio	54,3584	-218,7916
Ponto triplo do argônio	83,8058	-189,3442
Ponto triplo da água	273,16	0,01
Equilíbrio sólido-líquido para o gálio a 1 atm	302,9246	29,7646
Equilíbrio sólido-líquido para o estanho a 1 atm	505,078	231,928
Equilíbrio sólido-líquido para o zinco a 1 atm	692,677	419,527
Equilíbrio sólido-líquido para a prata a 1 atm	1234,93	961,78
Equilíbrio sólido-líquido para o ouro a 1 atm	1337,33	1064,18
Equilíbrio sólido-líquido para o cobre a 1 atm	1357,77	1084,62

Existem vários tipos de dispositivos de medição de temperatura. A seguir serão citados os tipos de sensores existentes e o detalhamento do funcionamento das termorresistências e dos termopares, por serem os dois tipos de sensores de temperatura que estão presentes na planta didática SMAR PD3 *Foundation Fieldbus*.

1. Termorresistência - As termorresistências são sensores que possuem ótima precisão, ampla faixa de trabalho e podem ser aplicados em situações que as ligações são distantes. Devido a estas características, são muito utilizados na indústria. O princípio de medição dos sensores do tipo termorresistência consiste na variação da resistência elétrica de um condutor metálico em função da temperatura. Geralmente utiliza-se, como condutor metálico, a platina ou o níquel. As termorresistências que possuem maior utilização são Pt-100, Pt-1000, Ni-100 e a Ni-1000 (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Termômetro de resistência de platina - A platina é muito utilizada na construção de termorresistências que são utilizadas para medir temperaturas na faixa de -248° C a 962° C. É o metal mais utilizado para construir termômetros de resistência, devido ao fato de apresentar boa resistência contra a oxidação, boa linearidade e por ter ampla aplicação. As termorresistências constituídas de platina são as mais

utilizadas na indústria, pois, possuem grande estabilidade e precisão. Apresentam basicamente duas configurações, as de platina padrão e as de platina industrial, como pode ser visto a seguir (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Termômetro de resistência de platina padrão - Este tipo de termorresistência é utilizado como referência de interpolação na Escala Internacional de temperatura de 1990, a ITS-90, no intervalo de temperatura de -248°C até 962°C (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

É construído com um sensor de platina com pureza maior que 99,999% e montado de maneira que a platina não se submeta a tensões mecânicas. Materiais de alta pureza e inércia química são utilizados para a fabricação do tubo e para construção do suporte do sensor de platina (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

É utilizado como padrão de interpolação da ITS-90 pelo fato de apresentar grande estabilidade e capacidade de medições para valores de $\pm 0,0006^{\circ}\text{C}$ a $0,01^{\circ}\text{C}$ e $\pm 0,002^{\circ}\text{C}$ a 420°C (AGUIRRE, 2013).

Termômetro de resistência de platina industrial - Na indústria, existem diversas condições de operação que são impostas aos sensores. Para adequar a termorresistência de platina industrial a cada utilização, existem diversas formas de montagens (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

O termômetro de resistência de platina industrial possui teor de pureza de platina na ordem de 99,99% , ou seja, possui pureza de platina menor do que o termômetro de resistência de platina padrão. O menor grau de pureza é utilizado porque inserindo esta contaminação prévia, vai reduzir as contaminações posteriores durante sua utilização. Sua faixa de utilização é menor, possuindo limite superior de 850°C (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

A principal qualidade da termorresistência de platina industrial é sua ótima precisão, disponibilizando modelos com precisão de 0,1% a 0,5% na sua faixa de utilização. Pode chegar a $\pm 0,015^{\circ}\text{C}$, se for calibrado e utilizado com instrumentos e meios termostáticos adequados, e por este motivo é um padrão secundário de temperatura (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Termorresistências Pt-100 - As termorresistências Pt-100 são as mais utilizadas na indústria, pois possuem alta estabilidade, ampla faixa de utilização e grande precisão. Tem como característica uma resistência de $100\ \Omega$ a 0°C e possui faixa de trabalho que vai de -200 a 650°C , mas a ITS-90 padronizou seu uso até aproximadamente 962°C (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005). A planta utilizada para desenvolvimento deste trabalho possui uma termorresistência Pt-100 para realizar a medida da temperatura no tanque de aquecimento.

O fato das termorresistências possuírem grande estabilidade significa que este tipo de sensor possui ampla capacidade de manter e repetir suas características dentro dos limites de operação, isto é, a relação entre a resistência e a temperatura é estável e representa grande importância em instrumentação. Realizando medidas consecutivas, é possível verificar que os sensores Pt-100 são precisos, ou seja, possuem grande capacidade de serem repetitivos e conseqüentemente são confiáveis (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

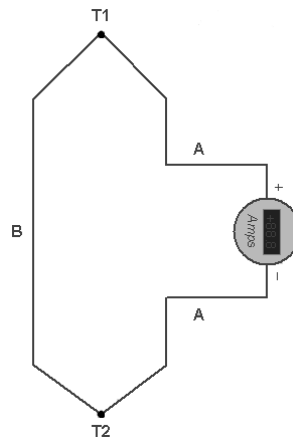
O instrumento de leitura gera uma corrente que ao circular provoca um auto aquecimento na resistência. Este aquecimento pode ocasionar erros que comprometem a medição. Para evitar este tipo de erro, é necessário limitar a corrente de excitação do sensor a valores entre 1mA e 2mA. Limitando a corrente, conseqüentemente limita a elevação de temperatura provocada pela dissipação na termorresistência, visto que esta elevação não deve ser maior que 0,3°C (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

O Pt-100 presente na planta utilizada para desenvolver este trabalho possui a ligação da ponte de Wheatstone a 3 fios, que é um recurso muito utilizado em termorresistências nas indústrias com a finalidade de não haver perdas de informações do sinal elétrico de medida. A descrição detalhada da ponte de Wheatstone a 3 fios pode ser vista neste trabalho na seção 2.2.2.

2. Termoelementos ou termopares - Os termopares são sensores bimetálicos. Seu funcionamento pode ser descrito a partir de três efeitos que ocorrem quando dois metais distintos estão em contato. Os efeitos são: o Efeito Seebeck, efeito Peltier e efeito Thomson.

Efeito Seebeck - Segundo (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005), no ano de 1821, Seebeck descobriu que, em um circuito fechado, constituído por dois condutores de metais heterogêneos, uma corrente elétrica fluirá se a temperatura de uma extremidade T_1 for superior a temperatura da outra extremidade T_2 , como mostra a Fig. 12, a seguir:

Figura 12 – Circuito utilizado por Seebeck



Fonte: Adaptado de (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005)

Analisando a Fig. 12, é possível observar que interligam-se dois condutores em um dos extremos, T_1 , que será nosso ponto de medição, levam-se as duas outras extremidades a um ponto de referência, T_2 , e se fecha o circuito utilizando um amperímetro. A corrente que é medida está relacionada com a diferença de temperatura que há entre o ponto de medição e o ponto de referência (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Na Fig. 12, o condutor mostrado se encontra sujeito a um gradiente de temperatura, isto é, a extremidade T_2 está a uma temperatura T_0 mais baixa que a temperatura $T+\Delta T$ da extremidade T_1 . Devido a esta diferença de temperatura entre as duas extremidades, haverá fluxo de energia pelo condutor na forma de calor e a intensidade do fluxo de calor vai depender de vários fatores, até mesmo da condutividade do material. Outra consequência do diferencial de temperatura é que surge um campo elétrico no interior do condutor. Este campo faz surgir uma força eletromotriz (tensão) de origem térmica (AGUIRRE, 2013).

Considerando que o material do condutor A e B sejam homogêneos, seus respectivos coeficientes de Seebeck s_A e s_B não dependem da posição e, portanto, a variação da tensão elétrica pode ser equacionada em função da variação de temperatura de acordo a Eq. 2.14: (AGUIRRE, 2013)

$$dV_{AB} = (s_A - s_B)dT(V) \quad (2.14)$$

Logo, a força eletromotriz dV_{AB} depende somente da diferença de temperatura entre as junções e do tipo de material utilizado.

Efeito Peltier - Jean Peltier descobriu por volta de 1834 que forçando a passagem de uma corrente por uma junta de metais distintos, essa junta pode aquecer ou pode esfriar, dependendo do sentido da corrente. Este é o fenômeno conhecido como efeito

Peltier. O efeito Peltier é influenciado pelos materiais que compõe a junta e pela temperatura em que ela se encontra. Não possui nenhuma influência em relação ao formato geométrico da junta. O calor produzido na junção entre A e B para cada unidade de corrente que circula de B para A é dado pela Eq. 2.15: (AGUIRRE, 2013)

$$dQ_P = \pm p_{AB} i dt (J) \quad (2.15)$$

Na Eq. 2.15, Q_P é o valor produzido pelo efeito Peltier, i é a corrente em amperes, t é o tempo em segundos e p_{AB} é o coeficiente de Peltier da junta composta pelos materiais A e B.

O calor produzido pelo efeito Peltier varia linearmente com a temperatura e é reversível, ao contrário do efeito Joule, que é proporcional ao quadrado da corrente e é irreversível. No efeito Joule, mesmo que se mude o sentido da corrente, o quadrado da corrente será positivo e a potência sempre vai ser dissipada e nunca absorvida (AGUIRRE, 2013).

Efeito Thomson - Assim como o efeito de Peltier, o efeito Thomson também está relacionado à absorção e liberação de calor com a passagem de corrente elétrica. A diferença é que o efeito Thomson considera o efeito em um único metal e o efeito Peltier analisa uma junta bimetálica (AGUIRRE, 2013).

Essa absorção ou liberação de calor é analisada em condutores submetidos a um diferencial de temperatura quando são percorridos por corrente. O calor é absorvido quando as cargas vão de um ponto mais frio para um mais quente, dentro do condutor. O calor é liberado quando as cargas se movimentam de um ponto mais quente para um ponto mais frio (AGUIRRE, 2013).

O fluxo de calor por unidade de volume, Q_T é dado pela Eq. 2.16:

$$Q_T = \rho i_d^2 - i_d \sigma \frac{dT}{dx} (W), \quad (2.16)$$

em que ρ é a resistividade do condutor, i_d é a densidade de corrente, σ é o coeficiente de Thomson e $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura que o condutor está submetido.

Associando as Eqs. 2.14, 2.15 e 2.16, encontra-se a Eq. 2.17, que representa o teorema básico da termoeletricidade e como os efeitos Seebeck, Peltier e Thomson estão relacionados:

$$\frac{dV_{AB}}{dT} = \frac{d\rho_{AB}}{dT} + (\sigma_A - \sigma_B) \quad (2.17)$$

Existem diferentes tipos e características dos termopares que estão relacionados a sua utilização e ao material do qual o termopar foi construído. Os tipos e as características são:

Termopares do tipo básico:

- Termopar T (Cobre - Constantan) - Tem boa precisão graças ao fato que o cobre pode ser processado com alta homogeneidade. Quando é utilizado em temperaturas acima de 300°C, o cobre sofre oxidação muito grande, provocando a redução da vida útil e também alterações na sua curva de resposta original. Possui aplicações em atmosferas oxidantes, inertes e também em atmosferas redutoras. (FIALHO, 2010).

Termoelemento positivo: Cu100%

Termoelemento negativo: Cu55%Ni45% Constantan

Faixa de utilização: -270°C a +400°C

FEM produzida: -6,258 mV a +20,872 mV

- Termopar J (Ferro - Constantan) - Aplicações em atmosferas com umidade elevada e em baixas temperaturas não são recomendadas, pois, pode tornar o instrumento quebradiço. Em temperaturas superiores a 540°C o ferro oxida-se em um menor intervalo de tempo. Não é indicado para aplicações em atmosferas sulfurosas com temperaturas superiores a 500°C. Pode ser utilizado em atmosferas oxidantes, neutras e também em atmosferas redutoras (FIALHO, 2010). Na planta SMAR PD3 *Foundation Fieldbus*, utilizada para desenvolver este trabalho, possui um termopar J para aferir a temperatura no tanque de mistura.

Termoelemento positivo: Fe99,5%

Termoelemento negativo: Cu55%Ni45% Constantan

Faixa de utilização: -210°C a +760°C

FEM produzida: -8,096 mV a +42,919 mV

- Termopar E (Cromel - Constantan) - Apresenta elevada potência termoelétrica e, em razão desta característica, é muito utilizado quando se deseja detectar pequenas variações de temperatura. Não deve ser empregado em atmosferas alternadamente oxidantes e redutoras. Suas aplicações englobam atmosferas inertes, oxidantes ou vácuo.

Termoelemento positivo: Ni90%Cr10% (Cromel)

Termoelemento negativo: Cu55%Ni45% (Constantan)

Faixa de utilização: -270°C a +1000°C

FEM produzida: -9,835 mV a +76,373 mV

- Termopar K (Cromel - Alumel/NiCrNi) - Possui grande resistência á oxidação e devido a este fato, é utilizado em temperaturas acima de 600°C e possivelmente em temperaturas inferiores a 0°C. Em temperaturas elevadas e em atmosferas com baixa concentração de oxigênio ocorre uma difusão do cromo, causando desvios da curva de resposta do termopar. Suas características permitem aplicações em atmosferas oxidantes e inertes. Não deve ser utilizado em atmosferas sulfurosas e redutoras.

Termoelemento positivo: Ni90%Cr10%

Termoelemento negativo: Ni95%Mn2%Si1%A12%

Faixa de utilização: -270°C a +1200°C

FEM produzida: -6,458 mV a +48,838 mV

- Termopar N (Nicrosil - Nisil) - É considerado um substituto do termopar K por ser mais resistente á oxidação e pode ser utilizado no lugar dos termopares de platina, pois possui temperatura máxima de utilização compatível. Não deve ser utilizado em atmosferas sulfurosas. Uso recomendado em atmosferas oxidantes, pobres em oxigênio ou inertes.

Termoelemento positivo: Ni84,4%Cr14,2%Si1,4%

Termoelemento negativo: Ni95,45%Si4,40%Mg0,15%

Faixa de utilização: -270°C a +1300°C

FEM produzida: -4,345 mV a +47,513 mV

Termopares do tipo nobre:

- Termopar S (Platina - Rhodio/PtRh 10%) - Pode ser empregado em atmosferas oxidantes e inertes. Em altas temperaturas, ao longo do tempo, apresenta uma estabilidade muito maior em relação aos termopares não constituídos de platina. Não devem ser usados em atmosferas redutoras ou com vapores metálicos. Necessita ser colocados em um tubo de proteção cerâmico e posteriormente em um tubo de proteção metálica.

Termoelemento positivo: Pt90%Rh10%

Termoelemento negativo: Pt100%

Faixa de utilização: -50°C a +1768°C

FEM produzida: -0,236 mV a +18,693 mV

- Termopar R (Platina - Platina - Rhodio/PtPtRh 13%) - Possui características semelhantes ao Termopar S. A grande diferença é que o Termopar R tem maior potência termoeétrica.

Termoelemento positivo: Pt87%Rh13%

Termoelemento negativo: Pt100%

Faixa de utilização: -50°C a +1768°C

FEM produzida: -0,226 mV a +21,101 mV

- Termopar B (Platina - Rhodio/PtRh 6% e PtRh 30%) - Normalmente é utilizado em temperaturas superiores a 1400°C. Em temperaturas inferiores a 50°C a força eletromotriz termoeétrica criada é muito pequena.

Termoelemento positivo: Pt70,4%Rh29,6%

Termoelemento negativo: Pt93,9%Rh6,1%

Faixa de utilização: 0°C a +1820°C

FEM produzida: 0,000 mV a +13,820 mV

Termopares especiais:

- Termopar com liga (Tungstênio - Rhênio) - Sua aplicação pode ocorrer de forma constante para temperaturas de até 2300°C e por um curto prazo de tempo para temperaturas de até 2750°C (FIALHO, 2010).
- Termopar com liga (Iridio 40% - Rhodio/Iridio) - Utilizado para mensurar temperaturas de até 2000°C por tempo limitado (FIALHO, 2010).
- Termopar com liga (Platina - 40% Rhodio/Platina - 20% Rhodio) - Suas características permitem que ele seja escolhido para substituir o termopar B, ou seja, aplicados para medir temperaturas elevadas. Podem ser utilizados constantemente para medir temperaturas de até 1600°C e por tempo limitado até 1850°C (FIALHO, 2010).
- Termopar com liga (Ouro-Ferro/Chromel) - Projetados para trabalhar em temperaturas criogênicas (FIALHO, 2010).

Após descrever os diversos tipos de sensores que são utilizados para medição de temperatura, pode-se destacar as vantagens e as desvantagens do Pt-100 em relação aos termopares. Segundo (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005), são dois tipos de sensores, que são amplamente utilizados na indústria e fazem parte da Planta Didática SMAR PD3 *Foundation Fieldbus*.

Vantagens:

- É mais preciso que os outros sensores dentro da sua faixa de utilização.
- Além de ser mais preciso, possui maior estabilidade do que os termopares.
- Pode ser aplicado em operações a grandes distâncias, desde que utilize ligação adequada.
- Não necessita de utilização de cabos de compensação.
- Desde que seja protegido de forma adequada, seu uso pode ocorrer em qualquer tipo de ambiente.
- Ruídos elétricos não causam muita interferência.
- Curva resistência x temperatura é mais linear.

Desvantagens:

- É mais caro do que outros sensores utilizados na mesma faixa de medição.
- Range de temperatura menor do que os termopares.
- Se ultrapassar a faixa de medição, deteriora-se mais rapidamente.
- Possui tempo de resposta maior em relação aos termopares.
- Menor resistência mecânica
- Se auto-aquece, exigindo instrumentação mais complexa.

É possível citar, segundo (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005), que existem outros tipos de sensores que são amplamente utilizados para medição de temperatura, como:

- Termômetros (Termômetros á dilatação de líquidos, termômetros á pressão de gás e termômetros á pressão de vapor).
- Termistores.
- Pirômetros de radiação e ópticos (Termopilhas)

2.2.4 Medição de pressão

Antes de descrever os sensores de pressão mais utilizados em aplicações industriais, é necessário apresentar alguns conceitos básicos relacionados á medição de pressão, que são abordados em (FIALHO, 2010):

1. Pressão - É conceituado como uma força perpendicular aplicada de maneira uniforme sobre uma superfície plana de área unitária. No sistema internacional de medidas (SI), a pressão é definida pela unidade newton por metro quadrado, também denominada pascal. Pressão pode ser obtida a partir da Eq. 2.18:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.18)$$

onde:

- F: força em [N]
 - A: área em [m²]
 - P: pressão [$\frac{N}{m^2} = Pa$]
2. Pressão Absoluta - É a diferença entre a pressão em um ponto de um fluido e a pressão de vácuo absoluto. Um instrumento conhecido e que usa o princípio da pressão absoluta é o barômetro.

3. Pressão Manométrica - É a diferença da pressão em um ponto em relação à pressão atmosférica existente no local, podendo ser positiva ou negativa. Uma pressão negativa, em relação à pressão atmosférica, é chamada pressão de vácuo.
4. Pressão Diferencial - É a diferença entre duas pressões conhecidas, mas nenhuma das duas é a pressão atmosférica.
5. Pressão Relativa - A pressão relativa de um espaço é a diferença entre a sua pressão absoluta e a pressão da atmosfera.

É mais comum nas indústrias os instrumentos medirem pressão relativa (FIALHO, 2010). Porém, na planta SMAR PD3, o sensor de pressão disponível mede diferencial de pressão.

Segundo (FIALHO, 2010), a medição de pressão pode ser feita de forma direta ou indireta. Os três métodos principais de medição de pressão são:

- Medição por coluna de líquido (medição direta)
- Medição de pressão de peso morto
- Medição de pressão por deformação, por tensão resultante ou por elemento elástico (de área conhecida)

Os sensores mais utilizados em aplicações industriais são (FIALHO, 2010):

- Células de carga
- Cristal piezométrico
- Tubos de Bourdon
- Sensores eletrônicos integrados
- Sensores capacitivos

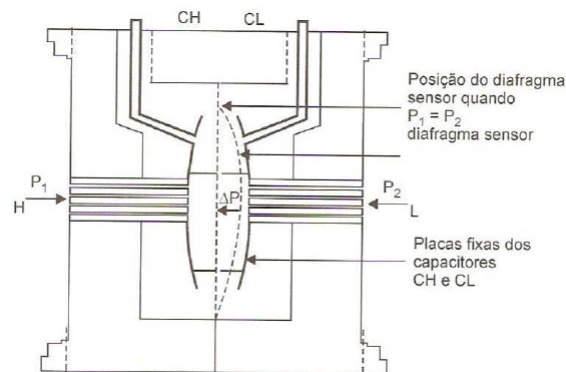
Como a planta SMAR PD3 *Foundation Fieldbus* utilizada para realizar este trabalho tem apenas o sensor capacitivo para aferir a pressão, somente o sensor capacitivo será detalhado.

1. Sensor Capacitivo - É constituído por uma base e um diafragma. Quando o sensor é submetido a uma certa pressão, o diafragma se contrai e fica mais próximo da base, alterando a distância entre ambos e, conseqüentemente, alterando a capacitância. Então, a base e o diafragma funcionam como se fossem a armadura de um capacitor variável. Após determinar um referencial, é possível medir a pressão submetida, a partir desta variação da capacitância (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Sensor capacitivo é bastante utilizado por não apresentar oscilação mecânica e por não sofrer interferência de campo magnético.

A Fig. 13 ilustra o princípio de funcionamento de um sensor capacitivo do tipo capacitivo:

Figura 13 – Sensor do tipo Capacitivo



Fonte: (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005)

Onde:

- P_1 e P_2 são pressões aplicadas
- CH é a capacitância medida entre a placa fixa do lado da P_1 e o diafragma do sensor
- CL é a capacitância medida entre a placa fixa do lado da P_2 e o diafragma do sensor
- d é a distância entre as placas CH e CL
- Δd é a deformação sofrida pelo diafragma do sensor devido à aplicação da pressão diferencial P_1-P_2

Os sensores do tipo capacitivo que medem diferencial de pressão, encontrados na planta utilizada para desenvolver este trabalho, são responsáveis por medir nível e vazão no tanque de aquecimento e para medir vazão no tanque de mistura. Os sensores devem ser parametrizados de acordo com a aplicação desejada.

2.2.5 Medição de vazão

O controle constante da vazão dos fluídos envolvidos em processos industriais é de suma importância. O controle da vazão é muito utilizado em processos da indústria petrolífera, indústria química, produção de tintas, refrigerante, leite e outros (FIALHO, 2010).

A vazão pode ser mensurada de forma direta ou indireta. Na planta SMAR PD3, tem-se as duas formas de medição. A medição direta ocorre a partir da determinação

do volume ou massa de fluido que passa por uma seção em um dado intervalo de tempo. Os métodos de medição indireta de vazão ocorrem a partir da determinação da carga, diferença de pressão ou velocidade em vários pontos de uma seção transversal. No caso da planta de instrumentação utilizada neste trabalho, o método indireto para medir vazão utiliza a determinação do diferencial de pressão (FIALHO, 2010).

Segundo (FIALHO, 2010), vazão ou fluxo de um fluido é o volume de fluido por unidade de tempo que passa através de um orifício ou tubo de seção transversal igual a A , a uma velocidade média v . A unidade de vazão no SI é m^3/s e pode ser expressa a partir da Eq. 2.19:

$$Vazao = A \cdot v \quad (2.19)$$

Após descrever os conceitos básicos de vazão, são descritos a seguir os sensores e transdutores de vazão presentes na planta.

1. Rotâmetro - São constituídos por um tubo cônico colocado verticalmente na tubulação, sendo que a extremidade maior é voltada para cima, e de um flutuador, que se move verticalmente no tubo cônico. O tubo pode ser de vidro, metal ou plástico, variando de acordo com a aplicação. O diâmetro do flutuador é um pouco menor que o diâmetro mínimo do tubo (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Como o peso do flutuador é constante e o fluido passa através do tubo da base para o topo, quando não há vazão o flutuador permanece na base e seu diâmetro maior praticamente fecha toda a extremidade menor do tubo (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Quando começa a ter vazão, o empuxo deixa o flutuador mais leve. No momento em que a pressão diferencial somada ao efeito de empuxo do líquido contrabalançar a pressão causada pelo peso do flutuador, então a posição que o flutuador se encontrará é conhecida como equilíbrio do flutuador e indica a vazão (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Qualquer aumento de vazão desloca o flutuador em direção a parte superior do tubo, assim como uma redução desloca no sentido da parte inferior. Basta colocar uma escala calibrada na parte externa do tubo que será possível determinar a vazão pela observação direta da posição do flutuador (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

É um medidor direto amplamente utilizado em processos industriais, onde se tem à necessidade de observar a vazão de forma instantânea (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

2. Pressão diferencial por sensor capacitivo - Mede vazão de forma indireta. É um medidor de vazão por pressão diferencial. Os medidores de vazão por pressão dife-

renciais são os sensores mais utilizados, por serem simples, de baixo custo e de fácil manutenção (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

O funcionamento deste sensor capacitivo é o mesmo que foi descrito na seção anterior. Basta parametrizar o instrumento de acordo com a aplicação. A vazão é dada pelo diferencial de pressão a partir da Eq. 2.20:

$$Vazao = k \times \sqrt{\Delta P} \quad (2.20)$$

Onde:

- k é uma constante que depende do instrumento utilizado e das dimensões da tubulação.
- ΔP é a variação causada pelo instrumento de medição.

Além dos sensores presentes na planta, é possível citar outros sensores utilizados para medir vazão e que são amplamente aplicados em processos industriais (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005):

- Diferencial de pressão - Tubo Venturi, Bocal, tubo de Pitot
- Turbina
- Sensor óptico
- Magnético - Sensor de vazão magnético indutivo, rotor de vazão magnético-eletrônico
- Ultra-sônicos
- Medidor de vazão Vortex

2.2.6 Medição de nível

A medição da grandeza nível é bastante comum em processos industriais. Os sensores responsáveis por medir nível, tem como função quantificar referenciais por meio de monitoramento direto ou indireto, com o intuito de controlar volumes de estocagens em tanques ou recipientes de armazenamento (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Medida de nível de forma direta ocorre quando o valor mensurado resulta da leitura a partir do uso de instrumentos de medida como réguas graduadas em unidade específica, indicadores de limite máximo e mínimo ou amperímetros, fornecendo relação direta ao nível que se deseja medir. A forma indireta resulta da aplicação de uma relação matemática que relaciona o nível á outra grandeza medida pelo instrumento (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Segundo (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005), existem diversos tipos de sensores aplicados nas indústrias para medir nível. Somente os que estão presentes na planta utilizada para desenvolver este trabalho são aqui descritos.

1. Diferencial de pressão por sensor capacitivo - O funcionamento está descrito na seção 2.2.3, que descreve os sensores de pressão. Na planta SMAR PD3 *Foundation Fieldbus*, o sensor que mede diferencial de pressão é parametrizado para medir nível no tanque de aquecimento.
2. Chave de nível boia - Este tipo de dispositivo possui tamanho pequeno, confiabilidade e alta capacidade de comutação a partir da utilização de uma micro-chave. Seu funcionamento é baseado na mudança de altura de um flutuador colocado na superfície do líquido. Possibilita controlar limites máximos e mínimos por meios mecânicos ou elétricos, servindo como chave de nível para impedir que o líquido ultrapasse o limite máximo e que libere o enchimento do reservatório quando atingir nível mínimo (FIALHO, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005). No caso da planta SMAR PD3 *Foundation Fieldbus*, a boia é utilizada para impedir que o tanque principal transborde.
3. Chave de nível por contatos de eletrodos - Este tipo de processo é aplicável quando a medição de nível for de fluídos condutivos, não corrosivos e sem partículas em suspensão.

A sonda de medição é composta por dois eletrodos que são posicionados dentro do reservatório até a profundidade onde se deseja medir. A medida que o nível sobe, o líquido atinge os dois eletrodos e, por se tratar de um líquido condutor, os eletrodos fecham contato por meio do líquido permitindo a circulação de corrente elétrica entre os eletrodos.

Na planta utilizada para realização deste trabalho, os eletrodos são posicionados dentro do tanque de aquecimento e são utilizados para inibir o funcionamento da resistência de aquecimento quando o nível estiver baixo e para ativar o funcionamento das mesmas quando o nível estiver alto o suficiente para que as resistências estejam completamente submersas e não se queimem.

Outros tipos de sensores utilizados para medir nível:

- Flutuadores - Flutuador por acionamento de mercúrio, flutuador com acionamento magnético, flutuador com acionamento por potenciômetro
- Medição por meio da pressão estática no fundo do tanque - Medição de nível hidrostática, medição de empuxo
- Detecção de nível por vibração (sensor piezoelétrico)

- Medição de nível laser
- *Strain-gages*
- Sensores ultrassônicos
- Sensores fotoelétricos
- Chaves de nível diafragma
- Medidor de nível por borbulhamento

2.3 Técnicas de Controle

Este trabalho tem como objetivo principal implementar técnicas de controle na planta de instrumentação. Para controlar vazão, foi utilizado um PID simples. Para controle de nível, utilizou-se um PID simples. E, por último, foi utilizado o controle em cascata para controlar temperatura. Diferentes técnicas de sintonia foram aplicadas para sintonizar os controladores. As características e as formas de implementar um controlador PID podem ser vistas a seguir.

2.3.1 Controlador PID

Um controlador PID inicialmente calcula o erro entre a grandeza a ser controlada e o seu valor desejado (*setpoint*), e gera um sinal de controle em função desse erro, com o intuito de eliminar esse desvio. A estrutura do controlador PID é composta por três ações básicas de controle, que permitem que ele use o erro em três módulos diferentes para produzir a sua saída manipulada, chamadas de ação proporcional, ação integral e ação derivativa. É um controlador muito utilizado nos processos industriais, por possuir uma estrutura simples e por existirem recursos práticos para ajuste de seus parâmetros (AGUIRRE, 2007; CAMPOS, 2010)

Mesmo tendo uma estrutura simples, os controladores PID são eficientes para controlar uma grande variedade de processos. Apesar da existência de outras técnicas de controle mais modernas, o controlador PID ainda é o mais utilizado na indústria. São encontrados nas indústrias em equipamentos utilizados especificamente para executar um algoritmo PID em uma malha de controle, em funções de controladores lógicos programáveis (CLPs) ou blocos funcionais de sistemas digitais de controle distribuídos (SDCDs) e em barramentos industriais (AGUIRRE, 2007).

2.3.1.1 Estrutura

O controlador PID é capaz de reduzir erros de regime permanente, por meio da ação integral, assim como é capaz de antecipar o comportamento do processo, devido à ação

derivativa. A ação proporcional faz com que o sistema responda ao erro presente, proporcionando ao sistema uma reação imediata e, portanto, rápida à ação de perturbações ou alterações significativas no SP (AGUIRRE, 2007).

O sinal de controle gerado pelo controlador PID pode ser expresso a partir da Eq. 2.21:

$$U(t) = K \times \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \times \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \times \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.21)$$

Portanto, têm-se três parâmetros de sintonia no controlador. O ganho proporcional K (ação proporcional), o tempo integral T_i (ação integral) e o tempo derivativo T_d (ação derivativa). A partir destes três parâmetros é que se configuram os principais controladores encontrados na prática:

- Controlador Proporcional (P) - Somente ação proporcional. Ação integral e derivativa são nulas.
- Controlador Proporcional e Integral (PI) - Ação proporcional e ação integral. Ação derivativa é nula.
- Controlador Proporcional e Derivativo (PD) - Ação proporcional e ação derivativa. Ação integral é nula.
- Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID) - Ação proporcional, ação integral e ação derivativa.

2.3.1.2 Ação proporcional

Neste tipo de ação o sinal do controle aplicado a cada momento à planta é proporcional à amplitude do valor do sinal de erro (AGUIRRE, 2007).

A ação proporcional representa a noção intuitiva de que um sinal de controle maior deve ser aplicado ao processo quando este se encontra distante do valor desejado, resultando no fato de que este mude mais rapidamente em direção ao valor desejado, e pequeno quando está próximo (AGUIRRE, 2007).

Quando maior o ganho K , menor será o erro em regime permanente, ou seja, o aumento da ação proporcional melhora a precisão do sistema em malha fechada. Porém, o erro nunca será completamente zero e, além disso, quanto maior o ganho, mais oscilatório o sistema tende a ficar, causando instabilidade em caso de aumento excessivo do ganho proporcional (AGUIRRE, 2007).

2.3.1.3 Ação integral

Neste tipo de ação o sinal de controle aplicado a cada momento à planta é proporcional à integral do sinal de erro (AGUIRRE, 2007).

A ação integral aumenta a ordem do sistema, isto é, a função de transferência vai possuir um polo adicional na origem, que permite obter erro nulo em regime permanente para determinadas valores desejados. Como resultado, a ação integral possibilitará a rejeição assintótica de algumas perturbações na saída do processo (AGUIRRE, 2007).

Logo, a ação integral causa melhoria da precisão do sistema em regime permanente. Entretanto, o acréscimo de um polo na origem torna a resposta do sistema mais lenta e a torna instável. Em geral esta ação de controle não é aplicada de maneira isolada devido ao fato de provocar instabilidade (AGUIRRE, 2007).

2.3.1.4 Ação derivativa

Neste tipo de ação o sinal de controle aplicado a cada momento à planta é proporcional à derivada do sinal de erro (AGUIRRE, 2007).

A derivada de uma função está relacionada com a tendência de variação desta função em um determinado instante. Então, aplicar uma ação de controle proporcional à derivada do sinal de erro é o mesmo que aplicar uma ação baseada na tendência da evolução do erro. A ação derivativa é denominada antecipatória e tende a fazer com que o sistema reaja de forma mais rápida. Portanto, a ação derivativa serve para acelerar as respostas transitórias, melhorando o comportamento dinâmico do sistema em malha fechada. A ação derivativa é nula durante o regime permanente se o erro for constante, não tendo efeito no regime permanente (AGUIRRE, 2007).

Aplicações típicas dos controladores P, PI e PID são descritas em (CAMPOS, 2010) e podem ser vistas na Tabela 2:

Tabela 2 – Aplicações típicas dos controladores P, PI e PID

Controlador	Características	Aplicação Típica
P	Tem desvio do SP em regime permanente	Controle de nível
PI	Não tem desvio do SP em regime permanente. Sistema mais "nervoso"	Controles de vazão, nível e pressão.
PID	A resposta é mais estável em malhas lentas e sem ruídos, e com tempos mortos razoáveis, mas não muito elevados	Controles de composição e temperatura

Depois de explicar os parâmetros que caracterizam o controlador e apresentar aplicações típicas, aborda-se na próxima seção técnicas para sintonizar o controlador de acordo com a aplicação desejada. Segundo a Tabela 2, o controlador adequado para o controle de vazão é o controlador PI, no controle de nível se pode utilizar o controlador PI e para controle de temperatura o ideal é um controlador PID.

2.3.2 Sintonia de controladores PID

Uma das características positivas do controlador PID é a possibilidade de se alcançar um desempenho satisfatório a partir de um nível modesto de informações relacionadas ao comportamento do processo, cujo custo de obtenção é baixo.

Na presente investigação, o intuito é testar diferentes métodos e comparar os resultados obtidos. Por esta razão, não são realizados ajustes em nenhum dos parâmetros retornados pelos métodos de sintonia. Os métodos para sintonia de controladores PID são descritos a seguir.

2.3.2.1 Método do ponto crítico de Ziegler e Nichols

O método do ponto crítico de Ziegler e Nichols consiste em utilizar o sistema em malha fechada com controlador puramente proporcional. Desse modo, aumenta-se o ganho proporcional gradativamente até se obter uma resposta oscilatória com amplitude e período constantes. Neste ponto, determina-se o ganho último (K_U) e o período de oscilação (P_U), que são conhecidos como ganho crítico e período crítico, respectivamente. Então, ganho crítico é o ganho do controlador proporcional que leva o sistema a operar no limite da estabilidade (CAMPOS, 2010; AGUIRRE, 2007).

Após obter os valores " K_U " e " P_U ", que representam a dinâmica do processo, basta substituir ambos nas equações que estão na Tabela 3 para obter os parâmetros do controlador.

Tabela 3 – Sintonia pelo método de Ziegler e Nichols

Controlador	K_P	T_I	T_D
P	$0,5K_U$	-	-
PI	$0,45K_U$	$\frac{P_U}{1,2}$	-
PID	$0,6K_U$	$\frac{P_U}{2}$	$\frac{P_U}{8}$

Nos casos em que a estabilidade da variável controlada é fundamental, é necessário ajustar a ação proporcional do controlador. Controladores com ação proporcional elevada provocam oscilações contínuas na resposta do sistema. Em certas aplicações, as oscilações podem apresentar pequena magnitude que não causam grandes efeitos em outras partes do processo. Assim, o controlador obtido fica inteiramente aceitável (ZIEGLER; NICHOLS, 1942).

2.3.2.2 Método de Ziegler e Nichols em malha aberta

O método de Ziegler e Nichols em malha aberta, consiste em aplicar uma entrada do tipo degrau na variável manipulada, com controlador em manual e malha aberta, e obter o comportamento do sistema. Segundo (CAMPOS, 2010), os parâmetros que representam a dinâmica do processo são calculados a partir da curva de reação da planta, assim como está descrito a seguir:

- Ganho do processo (K) - É calculado dividindo-se a variação da variável controlada em regime permanente pela variação da variável manipulada. O ganho do processo é calculado a partir da Eq. 2.22.

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{Y_1 - Y_2}{U_2 - U_1} \quad (2.22)$$

- Constante de tempo (τ) - É o tempo necessário, a partir do início do degrau na variável manipulada, para a variável controlada atingir 63% do seu valor em regime permanente. A constante de tempo é o tempo gasto para atingir o valor obtido a partir da Eq. 2.23.

$$\tau = 0.63 \cdot \Delta Y \quad (2.23)$$

Se o sistema apresentar tempo morto, deve-se descontar o tempo morto para obter o valor correto da constante de tempo.

- Tempo morto (θ) - É o tempo a partir do degrau na variável manipulada em que a variável controlada começa a responder. Este tempo também é conhecido como atraso de transporte.

Os passos descritos anteriormente devem ser realizados com diferentes valores na variável manipulada. O objetivo de aplicar diferentes entradas é verificar se existe alguma alteração na dinâmica do processo quando se utiliza diferentes perturbações (CAMPOS, 2010).

Em função dos resultados encontrados na curva de reação, (ZIEGLER; NICHOLS, 1942) propõe a sintonia para o PID conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Sintonia pelo método de Ziegler e Nichols

Controlador	K_P	T_I	T_D
P	$\frac{\tau}{K \cdot \theta}$	-	-
PI	$\frac{0,9 \cdot \tau}{K \cdot \theta}$	$3,33 \cdot \theta$	-
PID	$\frac{1,2 \cdot \tau}{K \cdot \theta}$	$2 \cdot \theta$	$0,5 \cdot \theta$

2.3.2.3 Método do modelo interno (IMC)

A estrutura IMC tem como objetivo, a partir do modelo do processo e de uma especificação de desempenho, obter o controlador adequado. O modelo do processo pode ser encontrado a partir da curva de reação do sistema após um degrau na variável manipulada ser aplicado.

Com o modelo do processo encontrado utilizando a curva de reação, o próximo passo descrito por (RIVERA; MORARI; SKOGESTAD, 1986) é obter a função de transferência em malha fechada do sistema.

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{G_p(s) \cdot C(s)}{1 + G_p(s) \cdot C(s)} \quad (2.24)$$

Em que o controlador é: $C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D \cdot s \right)$

O método IMC tem como finalidade obter a sintonia do controlador de maneira que a resposta do sistema a um degrau na entrada tenha uma dinâmica conhecida e fornecida como critério de ajuste.

Por exemplo, pode-se escolher que a função de transferência do sistema em malha fechada seja uma função de primeira ordem com constante de tempo igual a λ , assim como está representado na Eq. 2.25.

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{1}{\lambda \cdot s + 1} \quad (2.25)$$

Este parâmetro λ é o critério de desempenho do método IMC e define o quão rápido a saída do processo deve acompanhar o valor desejado. Este parâmetro deve ser escolhido de acordo com a dinâmica do processo. O valor de λ deve ser maior que o tempo morto do processo. Se for menor, leva a uma sintonia agressiva.

A premissa de propor um desempenho em malha fechada para o sistema e a partir daí obter um controlador que consiga realizar este objetivo foi proposta inicialmente em (DAHLIN, 1968). Uma vantagem do método IMC é que o desempenho do controlador está relacionado com a razão da constante de tempo em malha fechada com a de malha aberta.

Quando a dinâmica do processo for adequadamente representada por um modelo de primeira ordem, em série com o tempo morto, o trabalho de (RIVERA; MORARI; SKOGESTAD, 1986) apresenta a sintonia de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Sintonia PID para processos com tempo morto

Controlador	K_P	T_I	T_D
PI	$\frac{2 \cdot \tau + \theta}{K \cdot 2 \cdot \lambda}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	-
PID	$\frac{2 \cdot \tau + \theta}{K \cdot (2 \cdot \lambda + \theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau \cdot \theta}{2 \cdot \tau + \theta}$

O parâmetro λ pode ser escolhido de forma arbitrária, desde que satisfaça a Eq. 2.26.

$$\frac{\lambda}{\theta} > 0,8 \quad (2.26)$$

Quanto mais não linearidades um sistema apresentar, ou quanto maiores forem os erros de modelagem do processo, maior deve ser o valor de λ para obter uma sintonia mais conservadora, de forma que mantenha a robustez e a estabilidade do sistema.

2.3.2.4 Método de Skogestad

O método de Skogestad para ajustar controladores PID é um método simples e que resulta em um bom comportamento em malha fechada. O trabalho desenvolvido por (SKOGESTAD, 2004) é uma extensão do método do modelo interno (IMC) e desenvolve um conjunto de regras para sintonia do PID.

O método de Skogestad, assim como o método de Ziegler e Nichols de malha aberta e o método do modelo interno (IMC), requer obter os parâmetros do processo a partir da curva de reação.

Em função do modelo do processo e do parâmetro τ_c , (SKOGESTAD, 2004) propõe a sintonia para o PID conforme a Tabela 6. O valor de τ_c pode ser escolhido de forma

arbitrária, mas, deve estar de acordo com a Eq. 2.27.

$$-\theta < \tau_c < \infty \quad (2.27)$$

Tabela 6 – Sintonia pelo método de Skogestad

Processo	$g(s)$	K_c	T_I	T_D
1º ordem	$\frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{\tau \cdot s + 1}$	$\frac{\tau}{K \cdot (\tau_c + \theta)}$	$Min[\tau, 4 \cdot (\tau_c + \theta)]$	-
2º ordem	$\frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)}$	$\frac{\tau}{K \cdot (\tau_c + \theta)}$	$Min[\tau, 4 \cdot (\tau_c + \theta)]$	τ_2
Atraso puro de tempo	$K \cdot e^{-\theta \cdot s}$	0	-	-

O método de Skogestad foi utilizado por (CAMPOS; CAMPOS, 2014) para sintonizar controladores de processos didáticos sem atraso de transporte. Para o desenvolvimento daquele trabalho, adotou-se $\tau_c = 0,7 \cdot \tau$, em que τ é a constante de tempo do sistema em malha aberta, e se obteve resultados satisfatórios. Neste trabalho também será adotado a mesma relação para obtenção de τ_c .

2.3.2.5 Obter FT e utilizar a ferramenta *Sisotool*

Para encontrar a função de transferência de um sistema, é necessário obter os parâmetros que representam sua dinâmica. A seção 2.3.2.2 descreve como obter estes parâmetros a partir da curva de reação.

Em muitos trabalhos na prática, tenta-se modelar a dinâmica do processo como sendo um tempo morto mais um modelo de primeira ordem.

Seja um processo qualquer, com variável de saída "y" e de entrada "u", que possa ser representado pela Eq. 2.28:

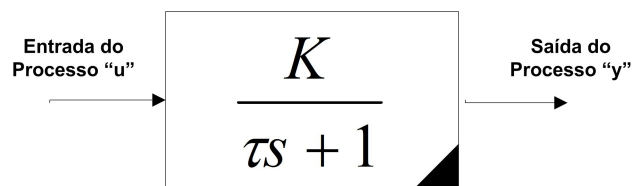
$$\tau \cdot \frac{dy(t)}{dt} = K \cdot u(t) \quad (2.28)$$

Aplicando a transformada de Laplace na Eq. 2.28, tem-se a dinâmica do processo representada por uma função de transferência de primeira ordem igual a Eq. 2.29.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \quad (2.29)$$

Na maioria das vezes, um modelo de primeira ordem é uma aproximação da realidade, pois um processo real raramente é de primeira ordem e linear. Entretanto, esta aproximação da dinâmica da planta industrial é satisfatória para se ajustar e definir controles na prática (CAMPOS, 2010). A Fig. 14 ilustra o modelo de primeira ordem identificado a partir da dinâmica do processo.

Figura 14 – Modelo identificado do processo



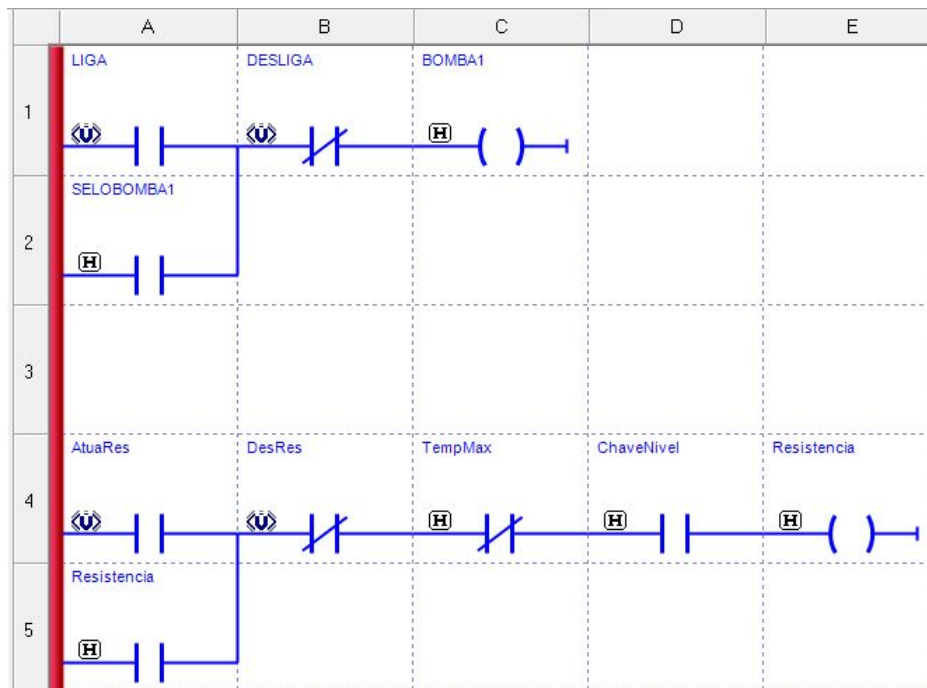
Encontrando a função de transferência do sistema, é possível calcular os parâmetros do controlador PID utilizando o *Sisotool*, que é uma extensão do Matlab que permite encontrar os dados dos controladores de sistemas realimentados (MATHWORKS, 2016).

3 Ensaaios

Os ensaios que serão descritos a seguir foram realizados na planta didática SMAR PD3 *Foundation Fieldbus*, cuja simbologia e terminologia estão de acordo com a norma ISA 5.1. Detalhes da estrutura física da planta se encontram em anexo.

Para controlar vazão, nível e temperatura, é necessário acionar a bomba. No controle de temperatura, além de acionar a bomba, é necessário ligar a resistência de aquecimento. Então, foi desenvolvido, em linguagem Ladder, um programa que possibilita ligar e desligar a bomba, ligar e desligar a resistência de aquecimento. A Fig. 15 ilustra a lógica Ladder que foi desenvolvida.

Figura 15 – Lógica Ladder para acionar bomba e resistência de aquecimento



A partir da Fig.15, é possível ver que utilizou-se a lógica selo para acionamento da bomba. Ou seja, o botão de acionar a bomba consegue ligá-la e não consegue desligá-la. Se o botão de ligar estiver em nível alto e depois for alterado para nível baixo, a bomba vai permanecer ligada enquanto o botão de desligar não receber nível lógico 1. Portanto, somente o contato LIGA é capaz de acionar a bomba e apenas o contato DESLIGA consegue desligar a bomba. Uma outra observação importante é que o SELOBOMBA1 recebe o estado real da bomba. Se o botão de ligar for acionado e a bomba não ligar devido a um defeito ou por falha de comunicação, o selo vai permanecer em zero.

A lógica Ladder para acionar a resistência de aquecimento possui um contato para ligar e um contato para desligar. Os contatos TempMax e ChaveNivel são sensores de proteção. Só é possível acionar a resistência se não estiver acima do limite máximo de

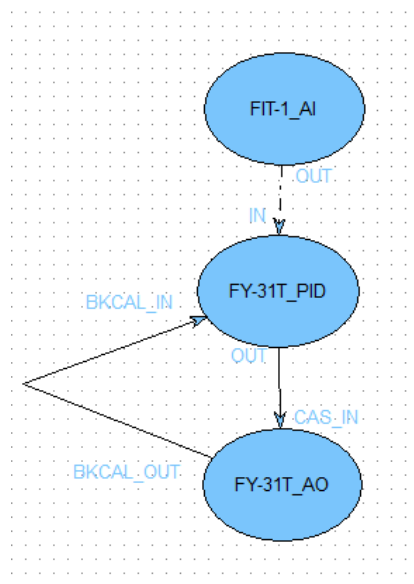
temperatura (TempMax) e se o nível de água no tanque for suficiente para submergir a resistência e, conseqüentemente, ativar a chave de nível (ChaveNivel).

Além da lógica Ladder que foi implementada, um banco de dados foi desenvolvido para que fosse possível gravar os resultados em arquivos e, posteriormente, representar em forma de gráficos utilizando o Matlab.

3.1 Controle de vazão

Após implementar a malha de controle envolvendo os instrumentos necessários para controlar a vazão do tanque de aquecimento, ensaios para sintonizar o controlador e para verificar o funcionamento da malha em diferentes condições são realizados. A estratégia de controle desenvolvida na planta pode ser vista na Fig. 16.

Figura 16 – Malha de controle de vazão



A tecnologia FF permite criar estratégias utilizando blocos funcionais, distribuindo funções de controle para cada equipamento que esteja associado à malha. Na Fig. 16, é possível observar esta característica marcante da tecnologia FF, onde a estratégia de controle é composta por três blocos. Todo bloco funcional possui um conjunto de parâmetros e um algoritmo associado. O bloco que possui a tag FIT-1AI está relacionado a um transmissor e indicador de vazão (*Flow Transmitter Indicator*), responsável por mensurar a vazão do tanque de aquecimento em L/h. O bloco com a tag FY se trata de um posicionador de válvula. Devido ao uso da rede FF, o algoritmo de controle PID é implementado no posicionador da válvula FY-31T-PID.

Os ensaios desenvolvidos são descritos a seguir:

3.1.1 Sintonia do Controlador

3.1.1.1 Método do ponto crítico de Ziegler e Nichols

O primeiro teste aplicado para sintonizar o controlador foi o método do ponto crítico de Ziegler Nichols, descrito na seção 2.3.2.1, cujos passos foram os seguintes:

- A princípio, foi escolhido um valor pequeno para a ação proporcional e eliminou-se as ações integrativa e derivativa. O ganho inicial foi de 0.5;
- Em seguida, um *setpoint* $SP=800$ L/h foi escolhido e a bomba foi acionada;
- O ganho proporcional foi aumentado gradativamente até se obter uma resposta oscilatória com amplitude constante, que é a operação no ponto crítico;
- O ganho proporcional que causou a oscilação, assim como o tempo entre os valores de pico desta resposta oscilatória, são encontrados neste passo;
- A partir do ganho crítico e do período crítico encontrados no item anterior, basta aplicar as equações da Tabela 3 para determinar as ações do controlador.

3.1.1.2 Método de Skogestad

O segundo teste aplicado para sintonizar o controlador de vazão foi o método de Skogestad, descrito na seção 2.3.2.4, como se segue:

- É necessário obter o comportamento do sistema para diferentes entradas. A variável manipulada é a abertura da válvula e a variável controlada é a vazão. Foram escolhidas quatro entradas distintas do tipo degrau: 25%, 50%, 75% e 100% de abertura da válvula;
- As entradas devem ser aplicadas no sistema em malha aberta;
- Os parâmetros do modelo devem ser obtidos para cada uma das quatro entradas aplicadas;
- Se o sistema apresentar mesma dinâmica para todas as entradas, então basta fazer a média dos parâmetros encontrados por cada entrada e aplicar nas equações da Tabela 6 para encontrar os parâmetros do controlador;
- Se o sistema possui não linearidades, sua dinâmica não vai ser a mesma para entradas diferentes. Então, é necessário escolher uma das entradas e utilizar os parâmetros encontrados para sintonizar o controlador de acordo com este ponto de operação escolhido. Desta maneira, garante-se que o controlador vai ser efetivo neste ponto e pode ser que se encontre bons resultados para outros pontos de operação.

3.1.1.3 Obter FT e utilizar a ferramenta *Sisotool*

O terceiro método aplicado para sintonizar o controlador de vazão consiste em adotar o sistema como de primeira ordem, obter a função de transferência do processo e utilizar o *Sisotool* para encontrar os parâmetros do controlador, assim como está descrito na seção 2.3.2.5:

- Os parâmetros do modelo foram encontrados anteriormente para sintonizar o controlador utilizando o método de Skogestad. Deve-se substituir estes parâmetros na Eq.2.29 para encontrar a FT de malha aberta do processo;
- Com a aproximação e obtenção da FT de primeira ordem do sistema, utiliza-se o programa *Sisotool* para determinar os parâmetros do controlador. A topologia do PID utilizada no programa é a paralela, ou seja, é dada no mesmo formato da Eq.3.1;

$$C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \right) \quad (3.1)$$

- O programa vai retornar a FT do controlador. Basta comparar com a Eq.3.1 para encontrar suas relações.

3.1.2 Testes de Validação

3.1.2.1 Teste 1

Tem como objetivo analisar o funcionamento do controlador e validar o trabalho desenvolvido. O teste 1 foi realizado com as seguintes condições:

- O teste foi realizado para cinco valores distintos de SP e cada valor de SP foi analisado quatro vezes;
- Os valores de SP que foram utilizados são: 300, 500, 800, 1200 e 1500 L/h de vazão;
- Primeiramente, escolhe o valor do SP=0 L/h e liga a bomba;
- Por fim, entra-se com o valor de SP desejado;
- Assim como descrito no primeiro passo, cada valor de SP foi analisado quatro vezes. Deve-se realizar a média entre os quatro resultados obtidos com o intuito de reduzir o efeito de ruídos.

3.1.2.2 Teste 2

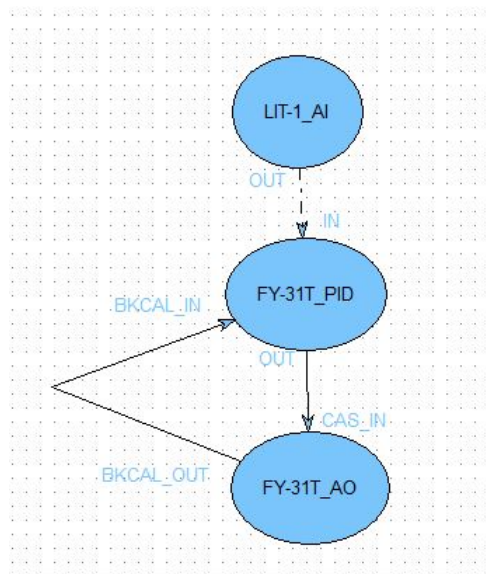
Foi aplicado para testar, em condições diferentes às determinadas para o teste 1, o funcionamento do controlador e validar o trabalho desenvolvido. O teste 2 foi realizado com as seguintes condições:

- Assim como no teste 1, o teste 2 foi realizado para cinco valores distintos de SP e cada valor de SP foi analisado quatro vezes. Os valores de SP que foram utilizados são: 300, 500, 800, 1200 e 1500 L/h de vazão;
- Inicialmente a bomba está desligada e o valor de SP desejado é informado;
- Posteriormente, a bomba é ligada para que haja vazão e a mesma seja controlada pela malha de controle;
- Assim como descrito no primeiro passo, cada valor de SP foi analisado quatro vezes. Deve-se realizar a média entre os quatro resultados obtidos com o intuito de reduzir o efeito de ruídos.

3.2 Controle de Nível

A estratégia de controle desenvolvida na planta para controlar nível pode ser vista na Fig. 17.

Figura 17 – Malha de controle de nível



Deve-se destacar que no controle de nível há uma vazão fixa de saída no tanque, provocada por abertura parcial da válvula manual.

3.2.1 Sintonia do controlador

3.2.1.1 Método do ponto crítico de Ziegler e Nichols

O primeiro teste aplicado para sintonizar o controlador de nível foi o método do ponto crítico de Ziegler Nichols, descrito na seção 2.3.2.1.

- A princípio, foi escolhido um valor pequeno para a ação proporcional e eliminou-se as ações integrativa e derivativa. O ganho inicial foi de 10;
- Em seguida, um *setpoint* $SP=50\%$ foi escolhido e a bomba foi acionada;
- O ganho proporcional foi aumentado gradativamente até se obter uma resposta oscilatória com amplitude constante, que é a operação no ponto crítico;
- O ganho proporcional que causou a oscilação, assim como o tempo entre os valores de pico desta resposta oscilatória, são encontrados neste passo;
- A partir do ganho crítico e do período crítico encontrados no item anterior, basta aplicar as equações da Tabela 3 para determinar as ações do controlador.

3.2.1.2 Método de Skogestad

O segundo teste aplicado para sintonizar o controlador de nível foi o método de Skogestad, descrito na seção 2.3.2.4, como descrito a seguir:

- Deve-se obter o comportamento do sistema para diferentes entradas. A variável manipulada é a abertura da válvula, e a variável controlada é o nível. Foram escolhidas quatro entradas distintas do tipo degrau: 25%, 50%, 75% e 100% de abertura da válvula;
- As entradas devem ser aplicadas no sistema em malha aberta;
- Os parâmetros do modelo devem ser obtidos para cada uma das quatro entradas aplicadas. Após obter o comportamento do sistema para cada entrada, basta analisar se o comportamento apresentou mesma dinâmica e fazer a média dos valores obtidos. Após realizar a média dos valores encontrados para cada entrada, deve-se aplicar nas equações da Tabela 6 para encontrar os parâmetros do controlador;
- Se o sistema apresentar não linearidades, deve-se sintonizar o controlador com os parâmetros obtidos a partir do ponto de operação desejado. Dessa maneira, garante-se que o controle seja efetivo para este ponto de operação e pode ser que se encontre bons resultados para os demais pontos de operação.

3.2.1.3 Obter FT e utilizar a ferramenta *Sisotool*

O terceiro método aplicado para sintonizar o controlador de nível consiste em adotar o sistema como de primeira ordem, obter a função de transferência do processo e utilizar o *Sisotool* para encontrar os parâmetros do controlador, assim como está descrito na seção 2.3.2.5:

- Os parâmetros do modelo foram encontrados anteriormente para sintonizar o controlador utilizando o método de Skogestad. Deve-se substituir estes parâmetros na Eq.2.29 para encontrar a FT de malha aberta do processo;
- Com a aproximação e obtenção da FT de primeira ordem do sistema, utiliza-se o programa *Sisotool* para determinar os parâmetros do controlador. Assim como foi descrito anteriormente para sintonizar o controlador de vazão, a topologia do PID utilizada no programa é a paralela, dada no mesmo formato da Eq.3.1;
- O programa vai retornar a FT do controlador. Basta comparar com a Eq.3.1 para encontrar a sintonia.

3.2.2 Teste de Validação

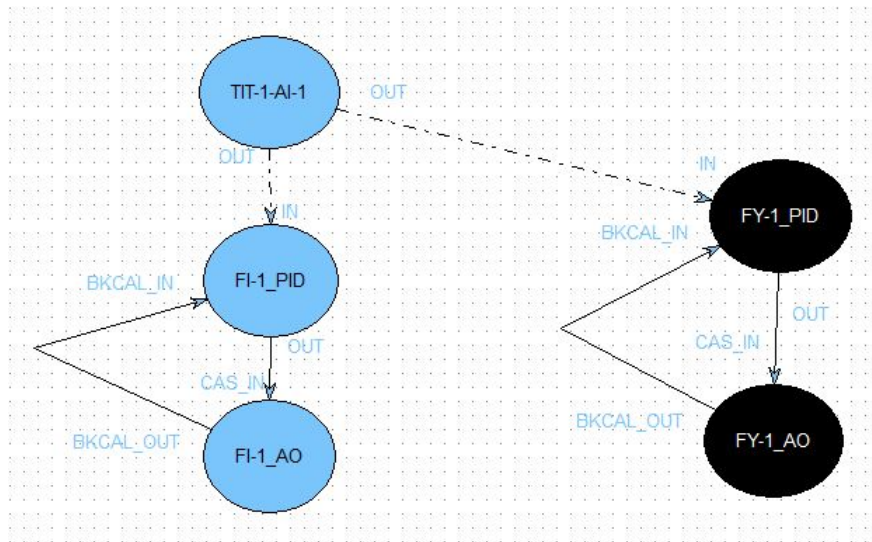
O teste foi realizado com as seguintes condições:

- O teste foi realizado para quatro valores distintos de SP e cada valor de SP foi analisado quatro vezes;
- Os valores de SP que foram utilizados são: 25, 50, 75 e 100 % de nível;
- Como o nível é uma malha de controle que leva muito tempo para alcançar o regime permanente, pode-se primeiramente escolher o valor do SP=0 %, depois ligar a bomba e por último entrar com o valor de SP desejado. Ou escolher direto o SP desejado e depois ligar a bomba;
- Assim como descrito no primeiro passo, cada valor de SP foi analisado quatro vezes. Deve-se realizar a média entre os quatro resultados obtidos com o intuito de reduzir o efeito de ruídos.

3.3 Controle de Temperatura

Para controlar temperatura foi utilizado um controle em cascata. O controle em cascata, desenvolvido na planta, pode ser visto na Fig. 18.

Figura 18 – Malha de controle de temperatura



O bloco que possui a *tag* TIT-1 está relacionado a um transmissor e indicador de temperatura (*Temperature Transmitter Indicator*), responsável por mensurar a temperatura do tanque de aquecimento em °C. A *tag* FI-1 representa um conversor estático. Sua função é produzir uma saída de 4 a 20 mA para controlar a ação da resistência de aquecimento. A *tag* FY-1 representa um posicionador de válvula. Sua função é atuar na abertura da válvula para controlar a vazão de água fria que entra no tanque.

O controle em cascata são dois controladores PID funcionando de forma independente. Na Fig. 18 é possível ver duas malhas independentes, uma atuando na resistência de aquecimento em função da temperatura e outra atuando na abertura da válvula em função da temperatura. Se o valor da temperatura estiver menor que o valor desejado, a resistência de aquecimento deve receber um sinal de corrente maior para aumentar o aquecimento e a válvula deve diminuir a abertura para reduzir a entrada de água fria no tanque. Se o valor de temperatura estiver maior que o valor desejado, a resistência de aquecimento deve reduzir sua atuação e a válvula deve aumentar a abertura para que haja maior vazão de água fria no tanque e diminua a temperatura mais rápido.

3.3.1 Sintonia do Controlador

Os dois métodos utilizados para sintonizar o controlador de temperatura, método Ziegler e Nichols de malha aberta e método IMC, dependem da curva de reação do processo.

O controle de temperatura implementado utiliza a técnica do controle em cascata, onde duas malhas distintas funcionam de forma independente e em função da temperatura. Para encontrar a sintonia, é necessário sintonizar primeiro o controlador PID da malha mais rápida e depois encontrar os parâmetros do controlador PID da outra malha. Para isto, é necessário obter a curva de reação da malha que tem como atuador a resistência

(malha mais rápida), sintonizar o controlador de acordo com os parâmetros encontrados na curva de reação, colocar a malha mais rápida no modo automático já com os parâmetros do controlador sintonizado e coletar a curva de reação da malha mais lenta (controle da vazão em função da temperatura).

Os passos para encontrar os parâmetros que permitem sintonizar os dois controladores do sistema de controle de temperatura são descritos a seguir:

- Primeiro deve-se encontrar a curva de reação. Para isso, é necessário colocar as duas malhas no modo manual (malha aberta), aplicar degrau de 100% na resistência e degrau de 25% de abertura da válvula. A abertura da válvula é necessária porque se o tanque ficar com água parada e sem entrar água fria, a temperatura vai aumentar continuamente até atingir o limite máximo de temperatura da planta, ou seja, não vai se estabilizar, vai apresentar o comportamento de um sistema do tipo integrador puro;
- Com os parâmetros obtidos a partir da curva de reação, é possível encontrar a sintonia do controlador da malha da resistência de aquecimento. É possível sintonizar pelo método de Ziegler e Nichols de malha aberta, substituindo os parâmetros encontrados na Tabela 4, ou encontrar a sintonia pelo método do IMC, substituindo os parâmetros da curva de reação na Tabela 5;
- Passar os parâmetros encontrados no item anterior para o controlador da malha que atua na resistência, fechar a malha e colocar no modo automático com $SP = 50$ °C. Deve-se deixar a malha que atua na válvula no modo manual (malha aberta) e aplicar um degrau de 25% de abertura da válvula para obter nova curva de reação;
- Com os parâmetros obtidos a partir da nova curva de reação, é possível encontrar a sintonia do controlador da malha responsável por controlar a vazão de água fria. Pode-se sintonizar pelo método de Ziegler e Nichols de malha aberta, substituindo os parâmetros encontrados na Tabela 4, ou encontrar a sintonia pelo método do IMC, substituindo os parâmetros da curva de reação na Tabela 5.

3.3.2 Teste de Validação

O teste foi realizado com as seguintes condições:

- O teste foi realizado para quatro valores distintos de SP e cada valor de SP foi analisado duas vezes;
- Antes de iniciar o controle da temperatura, é necessário encher o tanque para que seja possível ativar a resistência de aquecimento;

- Deve-se entrar com o mesmo SP nas duas malhas de controle, acionar a bomba hidráulica e ligar a resistência de aquecimento;
- Um detalhe importante é que a válvula vai estar controlando a entrada de água fria por baixo do tanque e o tanque inicia o ensaio completamente cheio. Como o tanque está cheio, a medida que a válvula permite a entrada de água fria, o tanque transborda e esta água não pode retornar para o reservatório da planta, ela deve ser descartada diretamente. É necessário funcionar desta maneira porque se a água retornasse para o reservatório, iria ocorrer aquecimento da água do reservatório e mudaria a dinâmica do processo. Mudaria a dinâmica do processo porque ao invés de entrar água fria à temperatura ambiente, entraria no tanque água com temperatura mais elevada, até chegar ao ponto da temperatura no tanque se tornar igual à temperatura do reservatório;
- Assim como descrito no primeiro passo, cada valor de SP foi analisado duas vezes. Deve-se realizar a média entre os dois resultados obtidos com o intuito de se reduzir o efeito de ruídos.

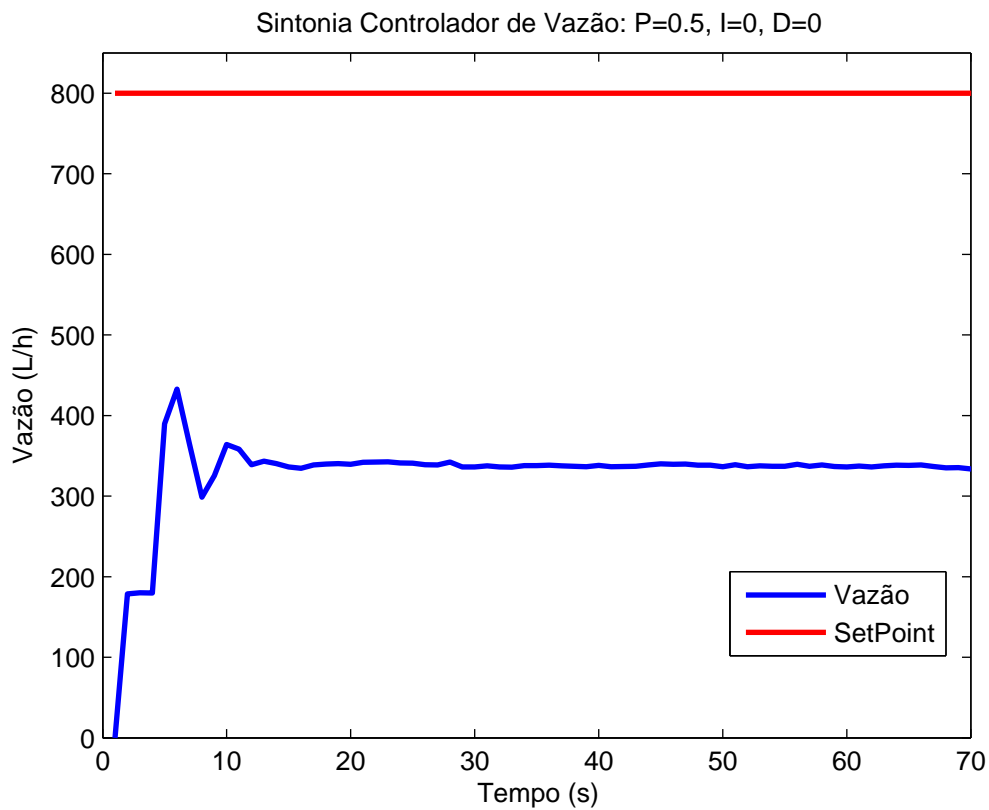
4 Resultados

4.1 Controle de Vazão

4.1.1 Sintonia de Ziegler e Nichols

Assim como foi descrito na seção 3.1.1.1, a ação integrativa e a derivativa foram anuladas e o *setpoint* escolhido foi 800 L/h. O resultado obtido para um ganho de 0,5 pode ser visto na Fig. 19.

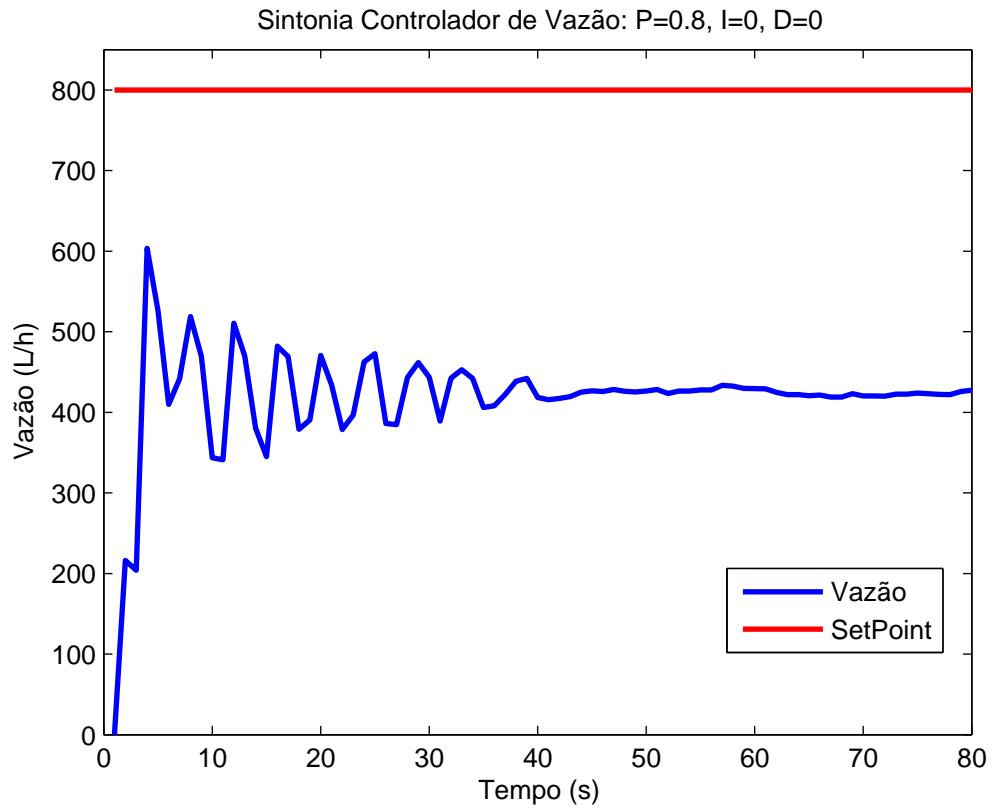
Figura 19 – Sintonia: Ganho = 0,5



Analisando a Fig.19, é possível concluir que o ganho de 0.5 não foi suficiente para levar o sistema a operar no ponto crítico, pois, não se obteve uma resposta oscilatória com amplitude constante.

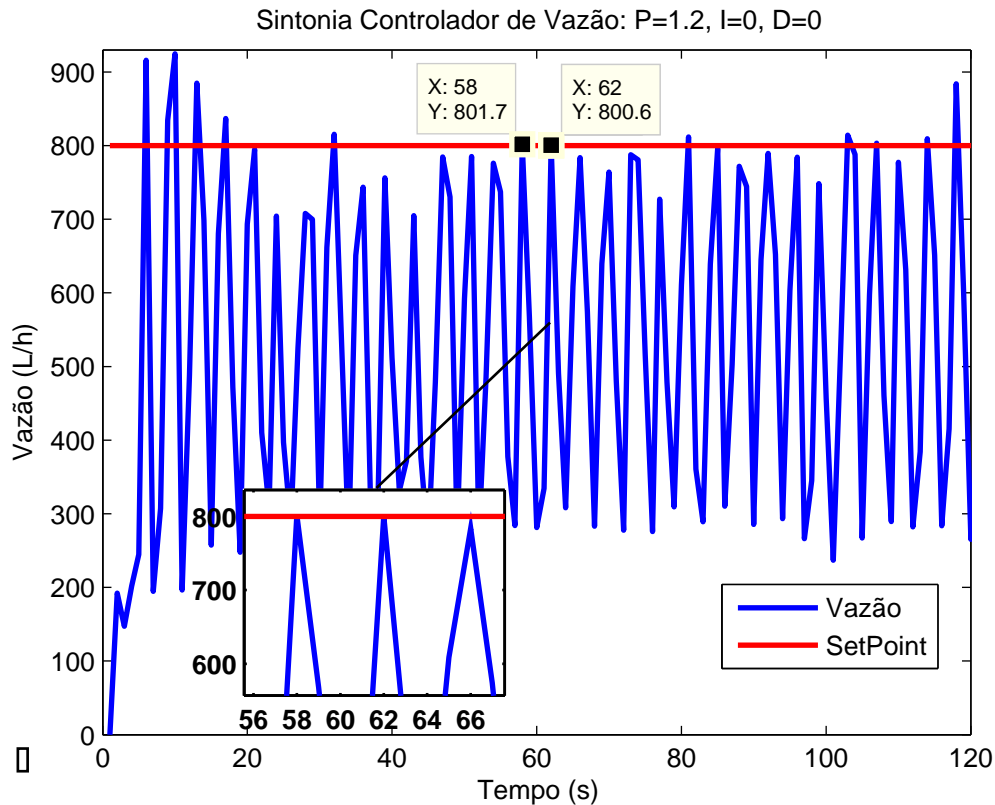
O ganho foi modificado para 0,8. A Fig. 20 ilustra o resultado obtido.

Figura 20 – Sintonia: Ganho = 0,8



Para o ganho de 0,8, houve uma oscilação no período transitório. Contudo, a resposta se estabilizou, isto é, o ganho de 0,8 não fez o sistema operar no ponto crítico. Aumentando o ganho para 1,2, obteve-se a resposta mostrada na Fig. 21.

Figura 21 – Sintonia: Ganho = 1,2



Para um ganho igual a 1,2, é obtido uma resposta oscilatória com amplitude constante, ou seja, o sistema opera no ponto crítico. Então, o ganho crítico (K_u) é igual a 1,2. A partir da Fig.21, é possível se determinar o intervalo de tempo entre os picos da resposta oscilatória. Este intervalo de tempo é conhecido como período crítico (P_u) e é igual a 4 segundos.

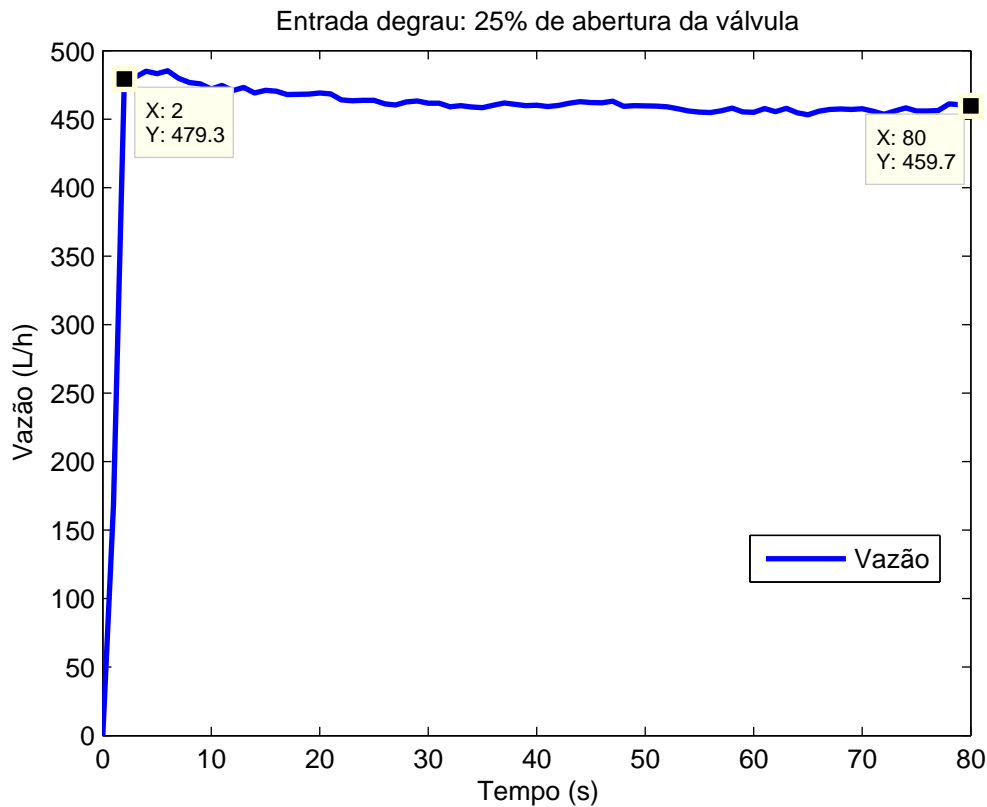
Aplicando os valores de ganho crítico e de período crítico de acordo com as Tabelas 2 e 3, os parâmetros do controlador foram determinados:

- Ação proporcional - $K = 0,45 \times K_u$, então $K = 0,54$
- Ação integral - $T_I = \frac{P_u}{1,2}$, então $T_I = 3,333$
- Ação derivativa - Segundo (CAMPOS, 2010), para controle de vazão, a ação derivativa deve ser nula.

4.1.2 Sintonia de Skogestad

Assim como foi descrito na seção 3.1.1.2, foram aplicados entradas do tipo degrau de abertura das válvulas. O resultado encontrado para um degrau de 25% de abertura da válvula pode ser visto na Fig. 22.

Figura 22 – Sintonia: Entrada degrau de 25%

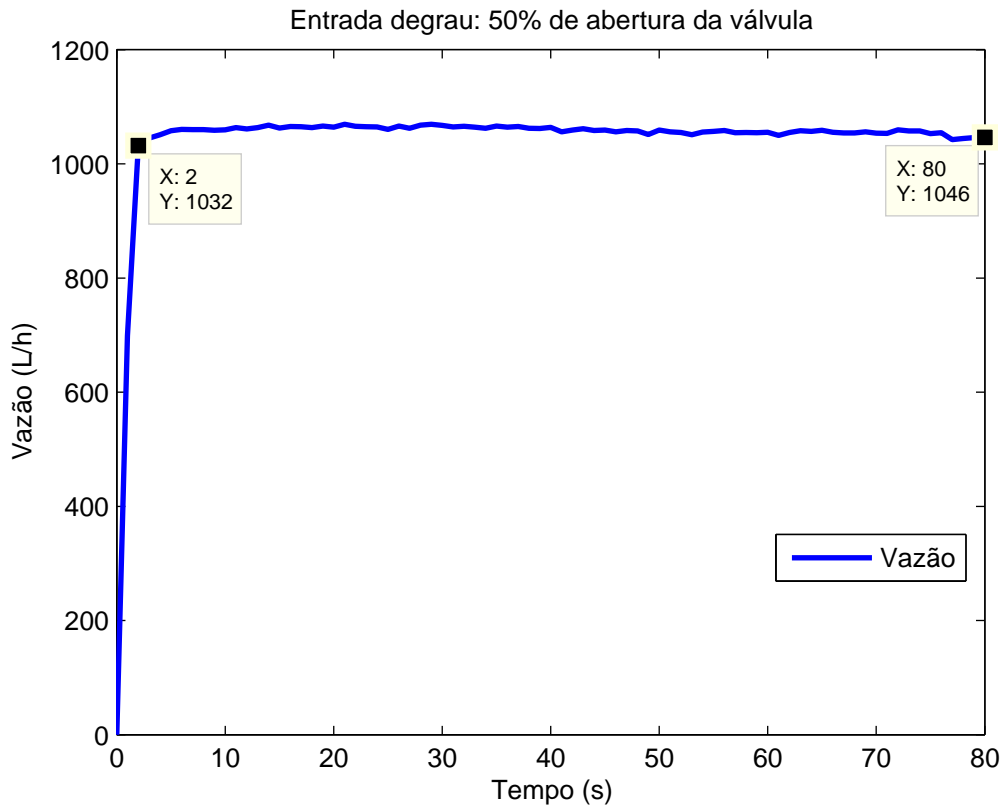


A partir da Fig. 22, e aplicando os conceitos descritos na seção 2.3.3.2, é possível determinar os parâmetros do modelo do processo para a entrada de 25% de abertura da válvula.

- Ganho do processo - $K = \frac{459,7-0}{25-0} \rightarrow K = 18,4$
- Constante de tempo - A partir do gráfico é possível estimar a constante de tempo do sistema. O valor da vazão inicialmente é 0 L/h e em regime permanente é 459,7 L/h. A constante de tempo, de acordo com a Eq.2.23, é o tempo para o sistema atingir 289,611 L/h de vazão. Para estimar a constante de tempo, pode-se aplicar a equação da reta: $(y-y_0)=m(x-x_0) \rightarrow m=229,85 \rightarrow \tau \cdot m=289,611$. Então, $\tau=1,26$ segundos.
- Tempo morto - O sistema não apresentou atraso de tempo. Então, $\theta=0$.

O resultado obtido para um degrau de 50% de abertura da válvula pode ser visto na Fig. 23.

Figura 23 – Sintonia: Entrada degrau de 50%

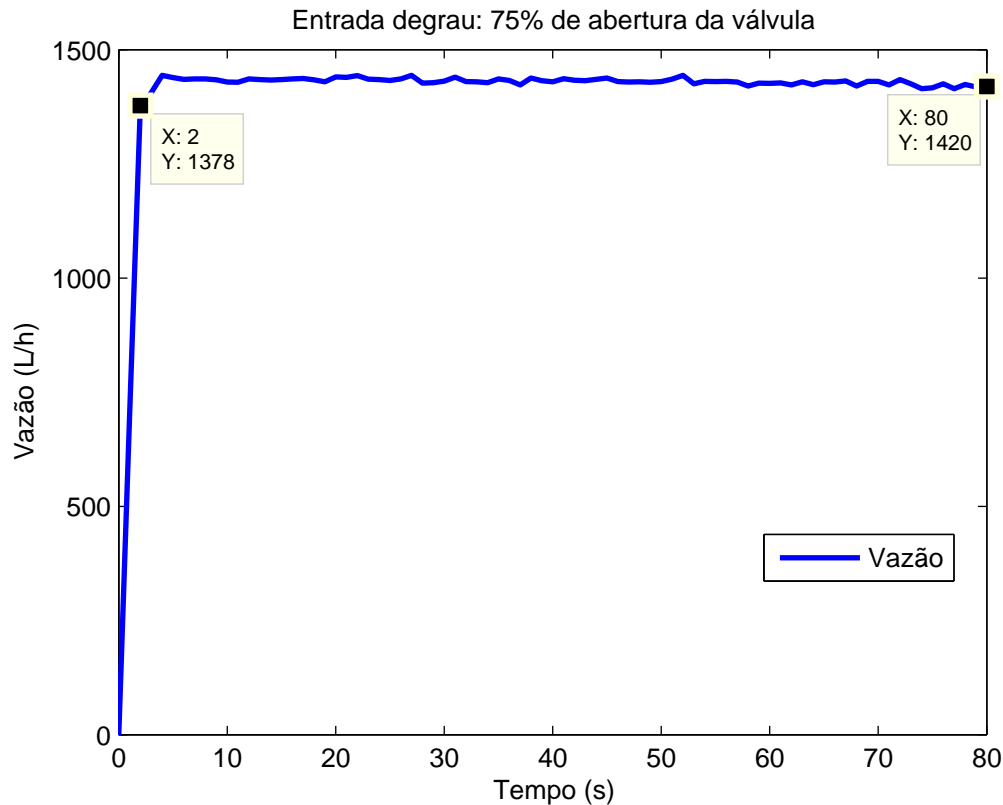


Analisando a Fig. 23, e aplicando os conceitos descritos na seção 2.3.3.2, os parâmetros do modelo do processo para a entrada de 50% de abertura da válvula foram encontrados

- Ganho do processo - $K = \frac{1046-0}{50-0} \rightarrow K = 20,92$
- Constante de tempo - A partir do gráfico é possível estimar a constante de tempo do sistema. O valor da vazão inicialmente é 0 L/h e em regime permanente é 1046 L/h. A constante de tempo, de acordo com a Eq.2.23, é o tempo para o sistema atingir 658,98 L/h de vazão. Para estimar a constante de tempo, pode-se aplicar a equação da reta: $(y-y_0)=m(x-x_0) \rightarrow m=516 \rightarrow \tau \cdot m=658,16$. Então, $\tau=1,27$ segundos.
- Tempo morto - O sistema não apresentou atraso de tempo. Então, $\theta=0$.

A dinâmica do sistema para uma entrada degrau de 75% de abertura da válvula pode ser visto na Fig. 24.

Figura 24 – Sintonia: Entrada degrau de 75%

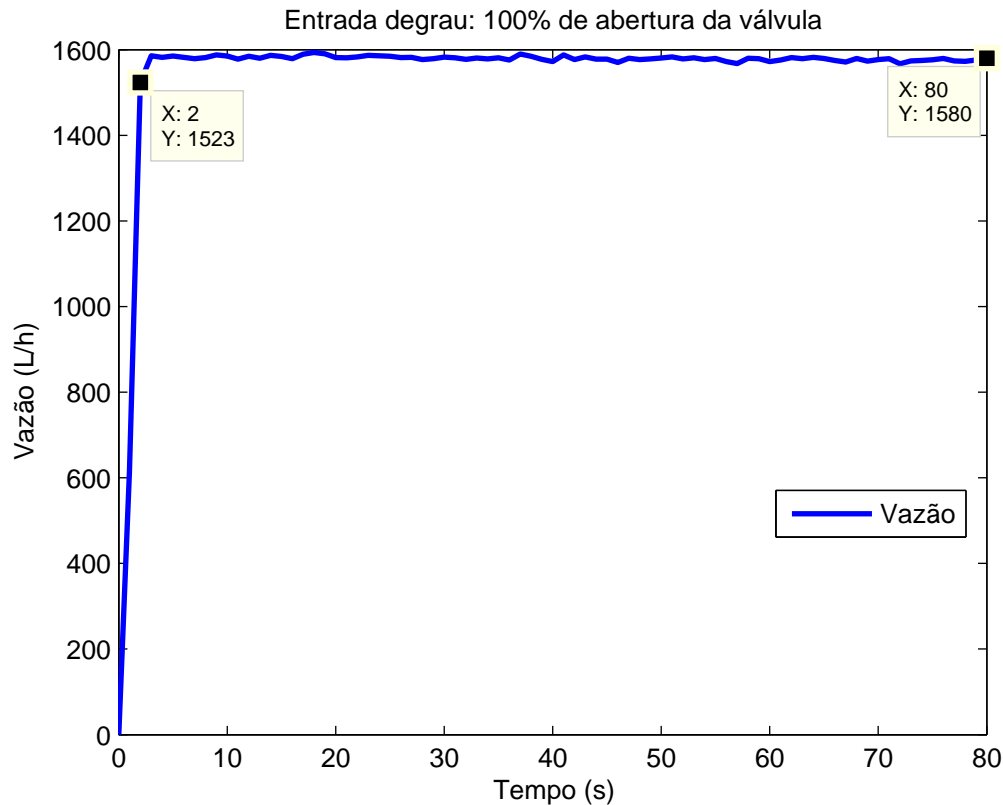


A partir da Fig. 24, os parâmetros do modelo do processo para a entrada de 75% de abertura da válvula foram calculados.

- Ganho do processo - $K = \frac{1420-0}{75-0} \rightarrow K = 18,93$
- Constante de tempo - A partir do gráfico é possível estimar a constante de tempo do sistema. O valor da vazão inicialmente é 0 L/h e em regime permanente é 1420 L/h. A constante de tempo, de acordo com a Eq.2.23, é o tempo para o sistema atingir 894,6 L/h de vazão. Para estimar a constante de tempo, pode-se aplicar a equação da reta: $(y-y_0)=m(x-x_0) \rightarrow m=689 \rightarrow \tau \cdot m=894,6$. Então, $\tau=1,30$ segundos.
- Tempo morto - O sistema não apresentou atraso de tempo. Então, $\theta=0$.

O comportamento do sistema para uma entrada degrau de 100% de abertura da válvula pode ser visto na Fig. 25.

Figura 25 – Sintonia: Entrada degrau de 100%



Aplicando os conceitos descritos na seção 2.3.3.2, os parâmetros do modelo do processo para a entrada de 100% de abertura da válvula foram determinados.

- Ganho do processo - $K = \frac{1580-0}{100-0} \rightarrow K = 15,8$
- Constante de tempo - A partir do gráfico é possível estimar a constante de tempo do sistema. O valor da vazão inicialmente é 0 L/h e em regime permanente é 1580 L/h. A constante de tempo, de acordo com a Eq.2.23, é o tempo para o sistema atingir 995,4 L/h de vazão. Para estimar a constante de tempo, pode-se aplicar a equação da reta: $(y-y_0)=m(x-x_0) \rightarrow m=761,5 \rightarrow \tau \cdot m=995,4$. Então, $\tau=1,30$ segundos.
- Tempo morto - O sistema não apresentou atraso de tempo. Então, $\theta=0$.

Analisando as Fig. 22, 23, 24 e 25, é possível observar que o sistema apresentou a mesma dinâmica para todas as entradas. O comportamento em todos os casos foram semelhantes ao de um sistema de 1º ordem sem atraso de tempo e além disso, o ganho e a constante de tempo também foram praticamente iguais. Então, os parâmetros do modelo do processo podem ser calculados a partir da média dos resultados obtidos para cada entrada.

- $K=18,51$
- $\tau=1,28$

- $\theta=0$

Substituindo os valores calculados nas equações da Tabela 6, encontra-se os parâmetros do controlador.

- $K_p=0,0772$
- $T_I=1,28$
- $T_D=0$

4.1.3 Obter FT e utilizar a ferramenta *Sisotool*

Os parâmetros do modelo do processo foram obtidos no ensaio para sintonizar o controlador pelo método de Skogestad.

- $K=18,51$
- $\tau=1,28$
- $\theta=0$

Substituindo os parâmetros do sistema na Eq. 2.29, encontra-se o modelo de primeira ordem.

$$G(s) = \frac{18,51}{1,28 \cdot s + 1} \quad (4.1)$$

A partir da Eq.4.1, os parâmetros do controlador foram determinados utilizando o *Sisotool*.

- $K_p=0,49043$
- $T_I=4,3478$
- $T_D=0$

4.1.4 Resultados do Teste 1

O teste 1 foi realizado de acordo com os procedimentos detalhados na seção 3.1.2.1. Os resultados obtidos para os SP de 300, 500, 800, 1200 e 1500 L/h, podem ser vistos nas Fig. 26, 27, 28, 29 e 30 respectivamente.

Figura 26 – Resultado teste 1 para SP=300 L/h

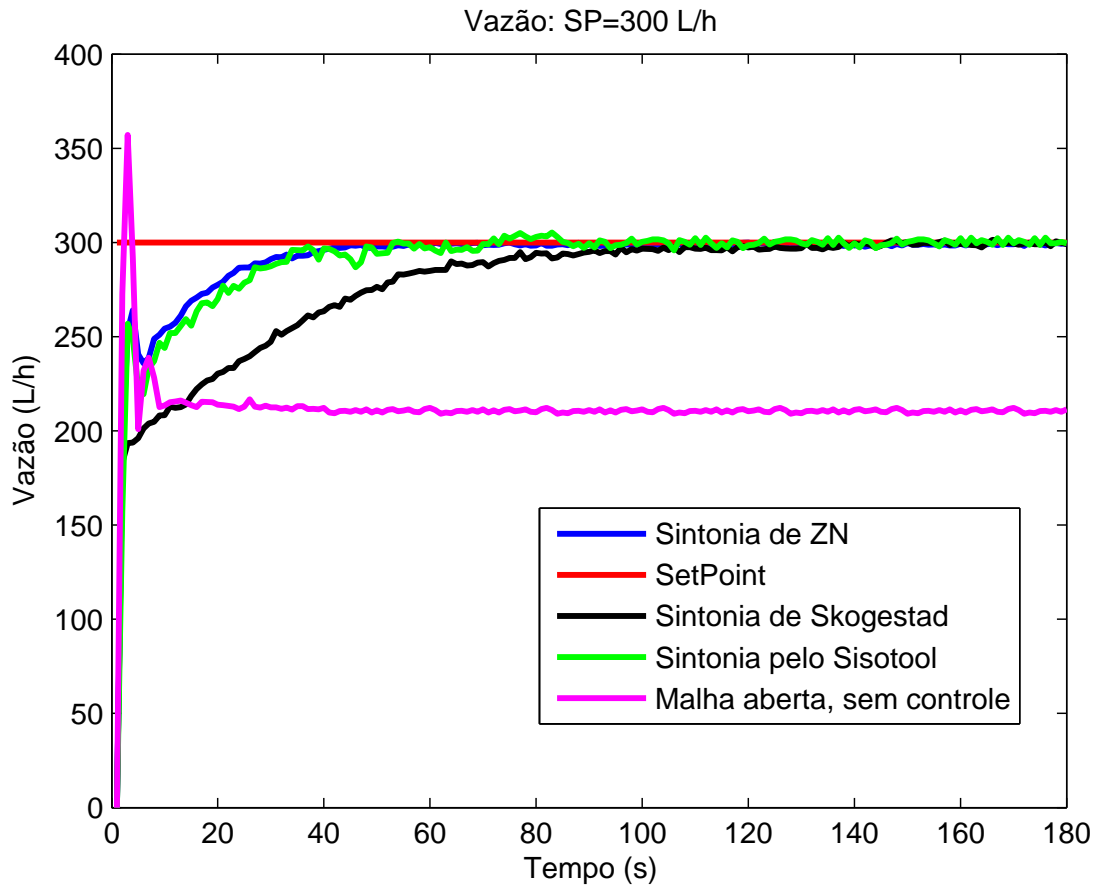


Figura 27 – Resultado teste 1 para SP=500 L/h

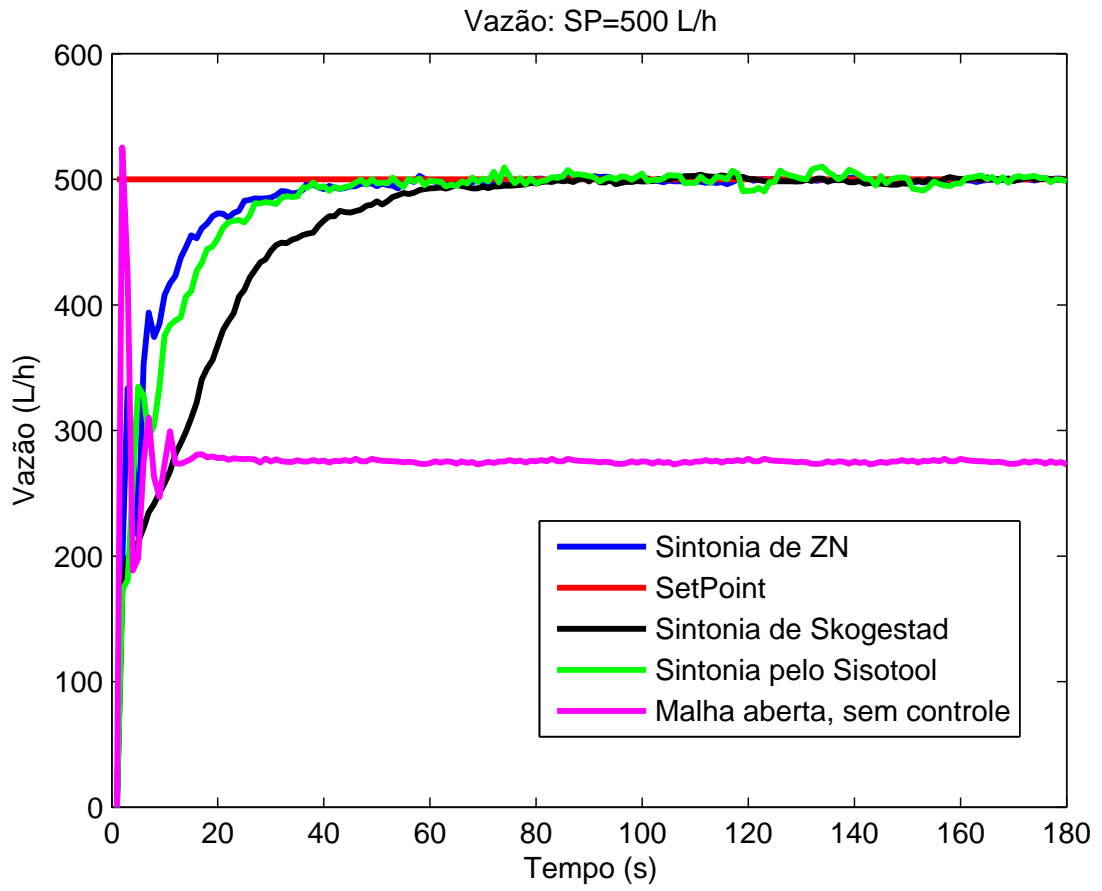


Figura 28 – Resultado teste 1 para SP=800 L/h

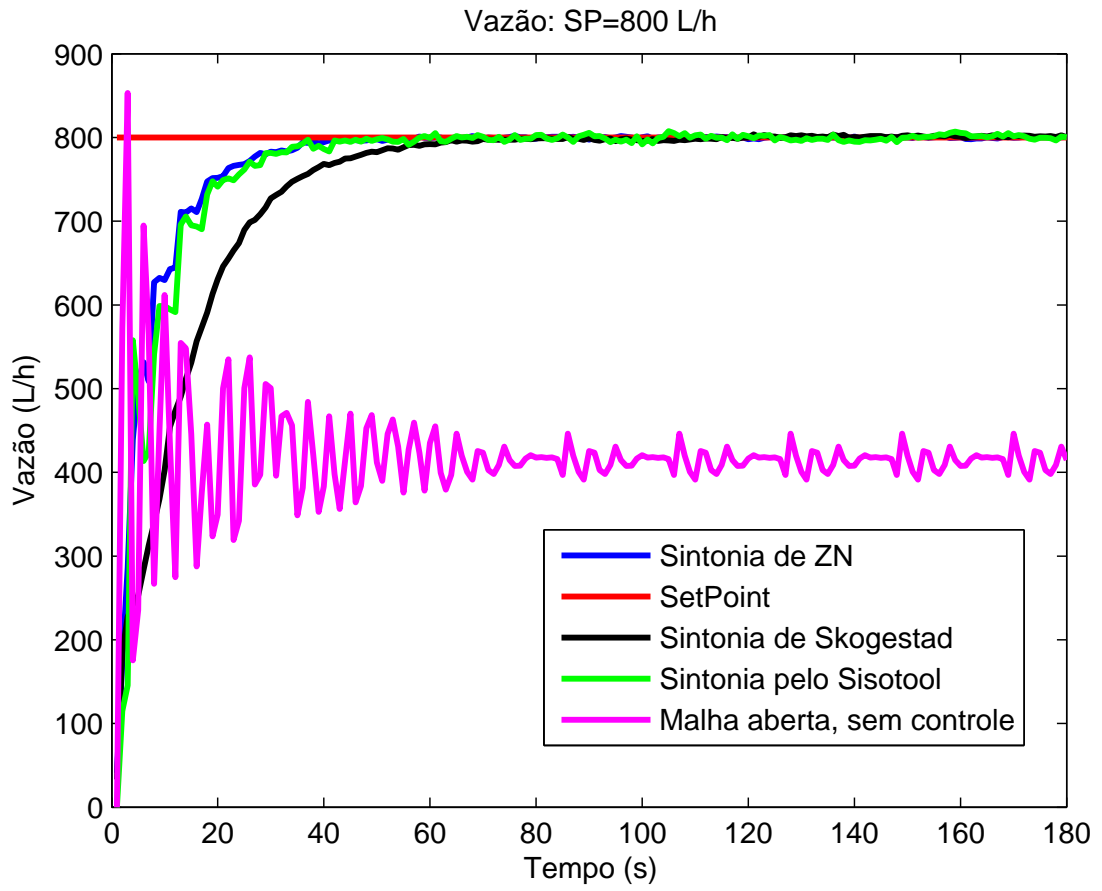


Figura 29 – Resultado teste 1 para SP=1200 L/h

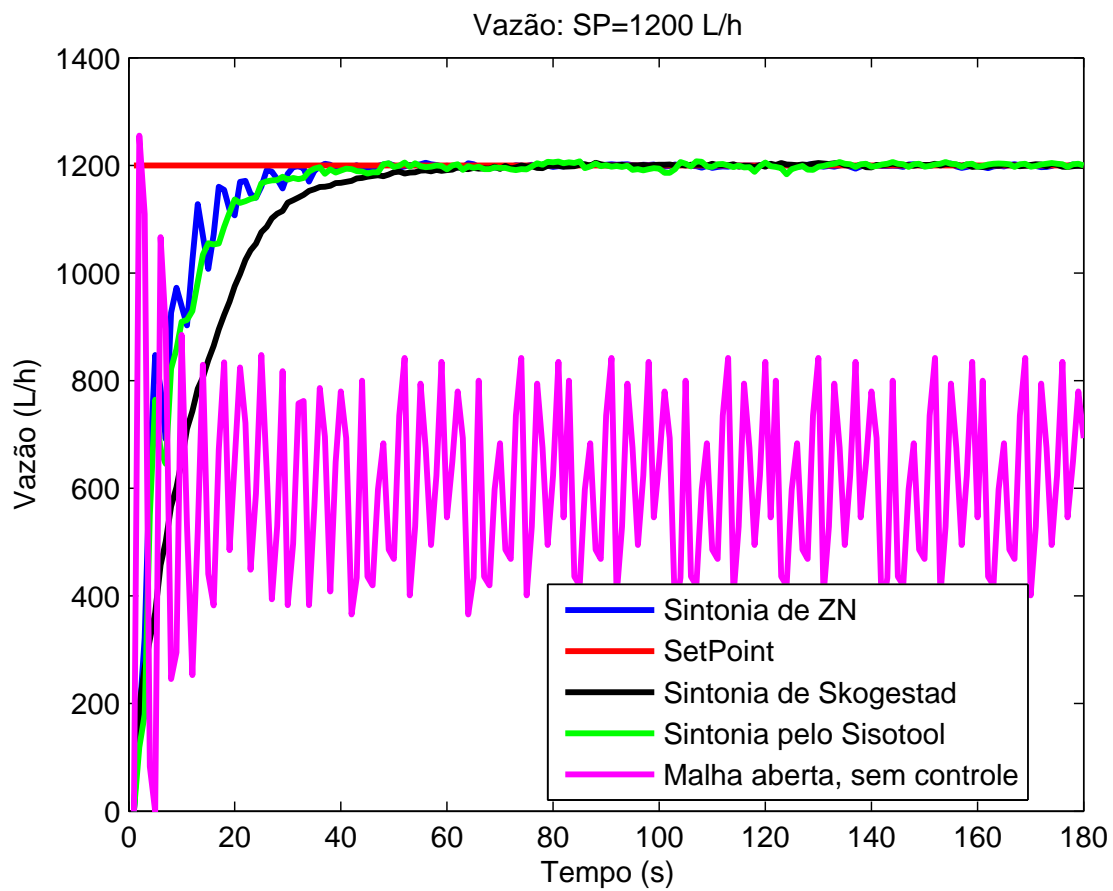
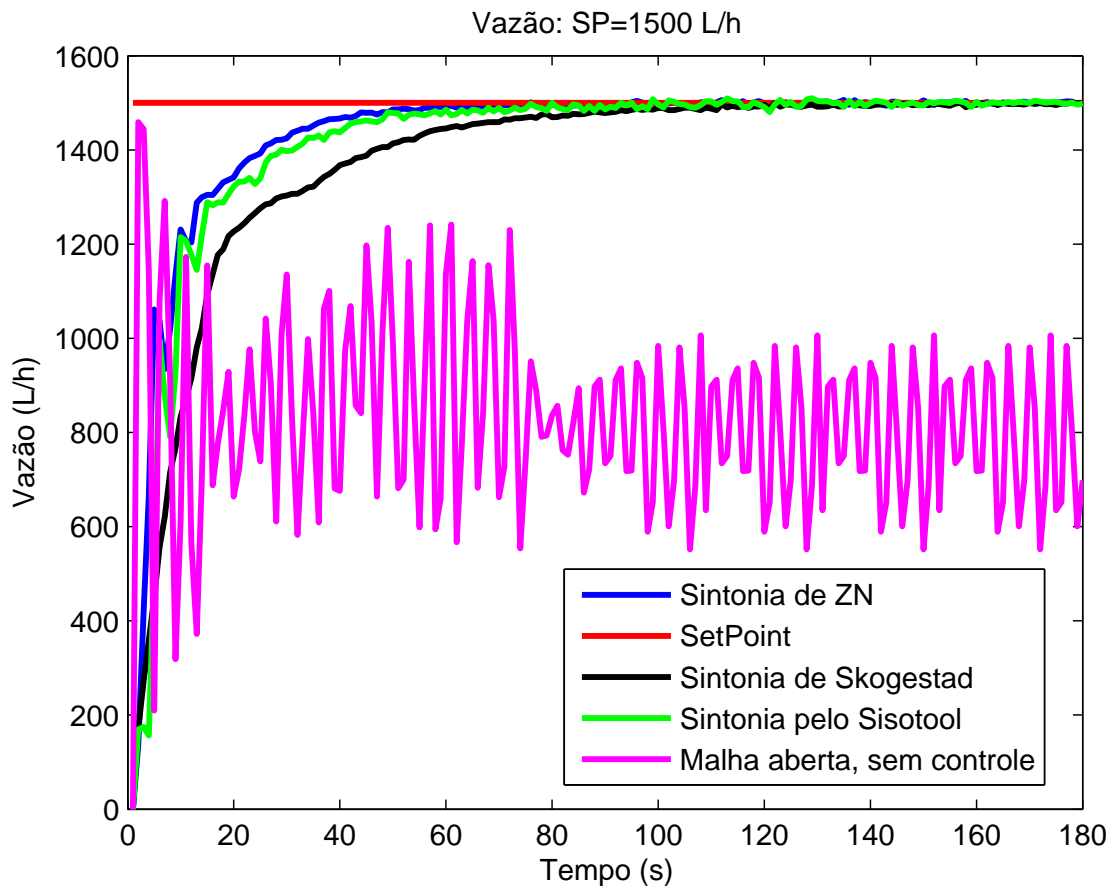


Figura 30 – Resultado teste 1 para SP=1500 L/h



Analisando os resultados obtidos para o teste 1, observa-se que o sistema em malha aberta e sem controle não retorna resultados satisfatórios. O valor da variável controlada (vazão) não atinge e não se estabiliza em valores próximos ou iguais ao valor desejado (*SetPoint*). Segundo (OGATA, 2011), a saída dos sistemas de controle a malha aberta não afeta a ação de controle, isto é, o sinal de saída não é comparado com o sinal de referência na entrada. Assim, para cada sinal de referência na entrada, há uma condição de operação fixa. Essa característica torna o sistema sensível à perturbações e, como resultado, os sistemas de controle a malha aberta não desempenham a tarefa desejada.

A malha de controle fechada, com controlador sintonizado pelo método de Ziegler e Nichols, pelo método de Skogestad ou pelo *Sisotool*, apresentou resultados satisfatórios. Durante o regime transitório não houve sobressinal e em regime permanente a vazão foi controlada com diferença praticamente nula em relação ao valor desejado. O controlador em malha fechada obteve bons resultados porque, assim como está descrito em (OGATA, 2011), tem-se um sinal de erro que é responsável por impulsionar o controlador de modo a reduzir o erro e levar o valor do sinal de saída para o valor desejado. O erro é dado pela diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação.

Outro aspecto importante é que o tempo de acomodação quando utilizou-se os parâ-

metros do controlador obtidos pelo método de Skogestad é maior em relação ao tempo de acomodação quando utilizou-se os parâmetros obtidos por Ziegler e Nichols e quando se sintonizou pelos parâmetros do *Sisotool*. Esta diferença de tempo de acomodação ocorre devido ao fato da sintonia por Ziegler e Nichols resultar em uma ação proporcional cerca de 7 vezes maior que a ação proporcional encontrada pelo método de Skogestad. Como a ação proporcional é maior, a ação de controle faz com que a válvula se abra de forma mais rápida e a variável controlada entre em regime permanente com menor intervalo de tempo. O controlador proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável. Os parâmetros do controlador encontrados a partir do *Sisotool* são próximos aos valores obtidos pelo método do ponto crítico de ZN e isto se reflete na dinâmica do processo. Ambos tiveram comportamentos semelhantes. Portanto, utilizando a técnica do ponto crítico, o sistema vai ser mais rápido e o mais lento vai ser utilizando a sintonia de Skogestad. Por outro lado, durante o regime permanente o método de Skogestad apresenta resposta mais uniforme e com erro menor. Quando se utiliza o método de ZN ou o *Sisotool*, o sistema apresenta oscilações em regime permanente que são semelhantes a ruídos.

4.1.5 Resultados do Teste 2

O teste 2 foi realizado de acordo com os procedimentos detalhados na seção 3.1.2.1. Os resultados obtidos para os SP de 300, 500, 800, 1200, 1500 L/h, podem ser vistos nas Fig. 31, 32 e 33, 34 e 35 respectivamente.

Figura 31 – Resultado teste 2 para SP=300 L/h

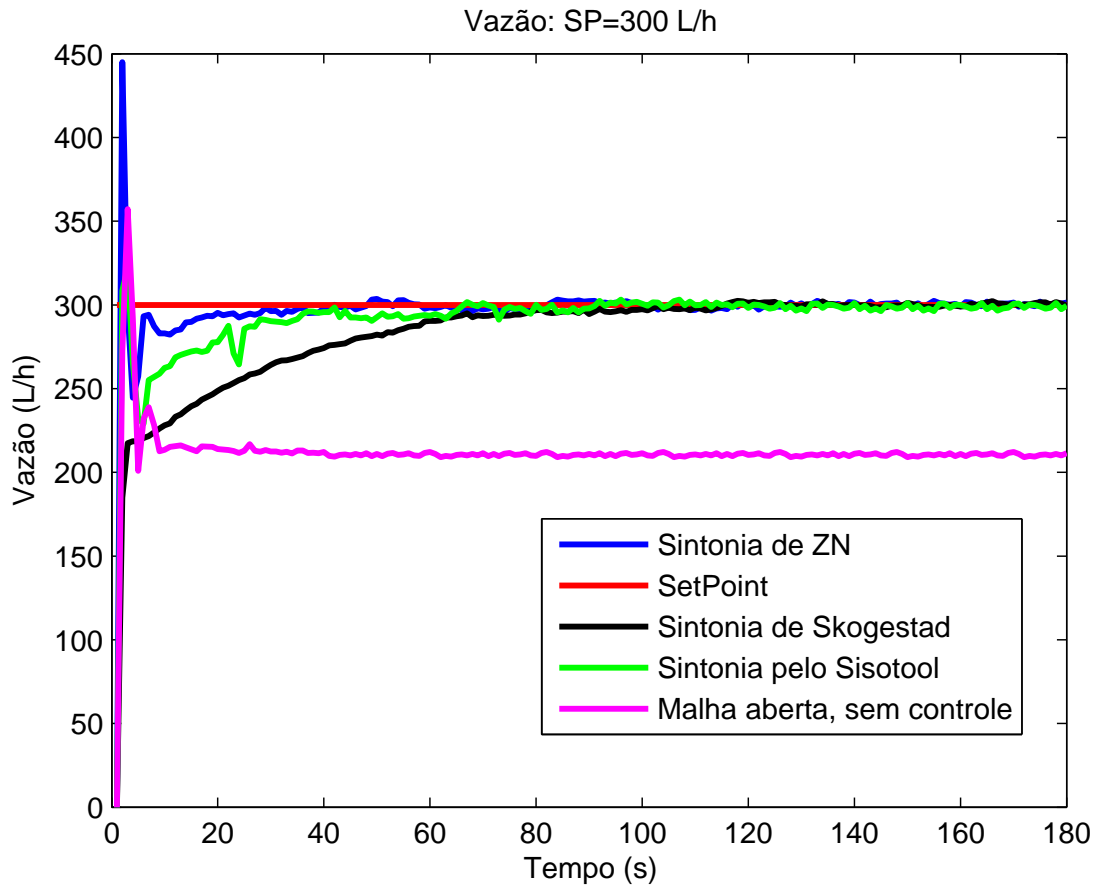


Figura 32 – Resultado teste 2 para SP=500 L/h

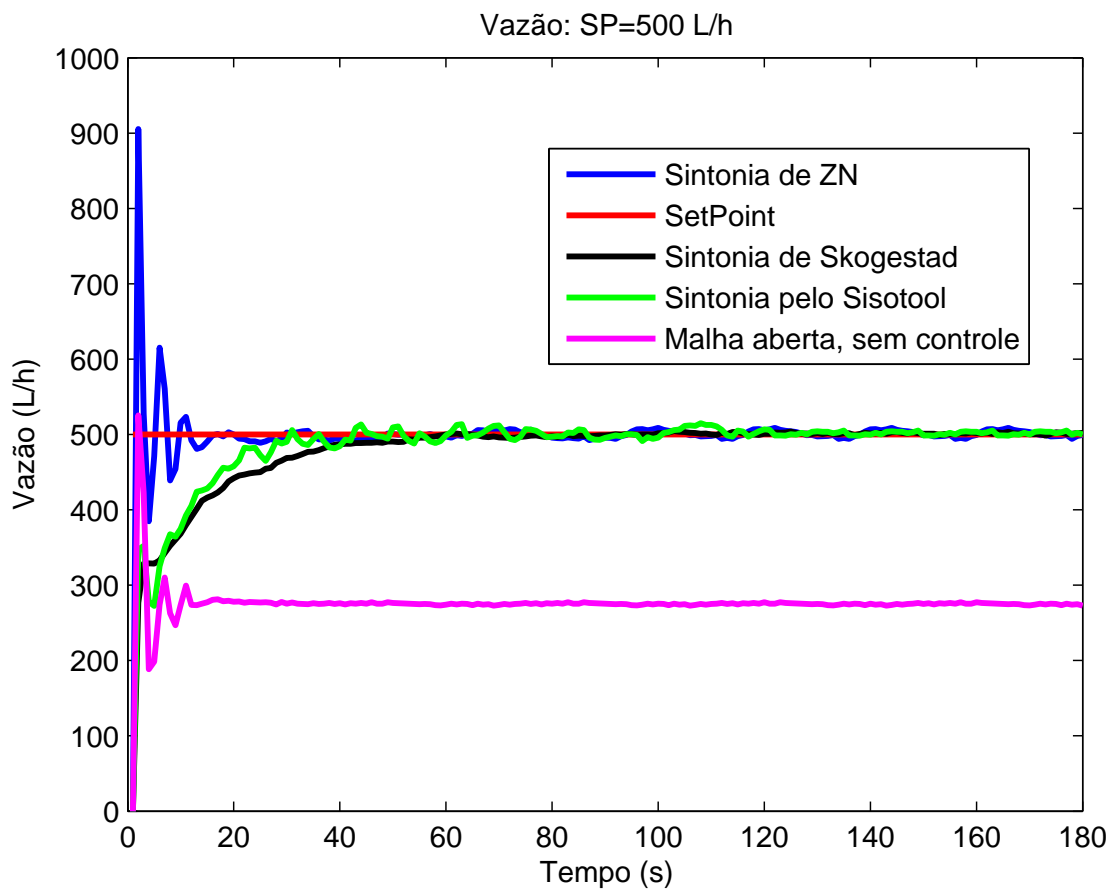


Figura 33 – Resultado teste 2 para SP=800 L/h

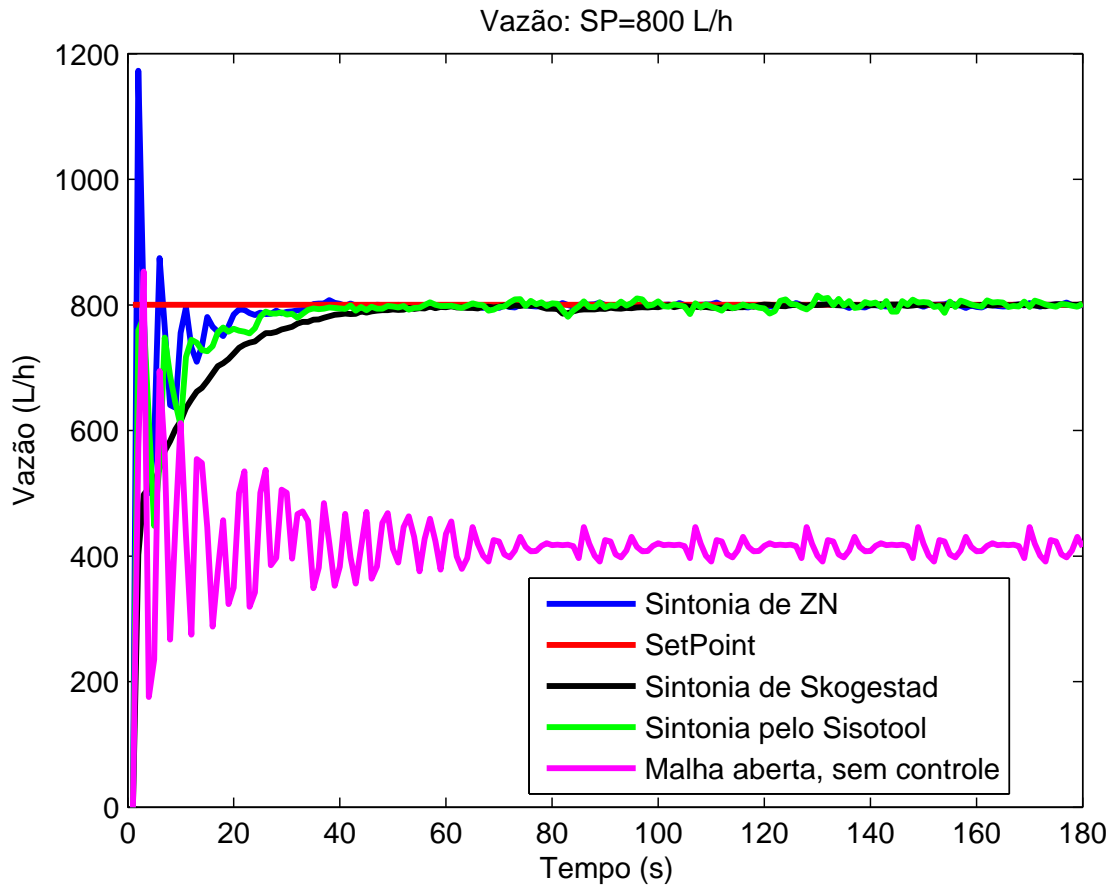


Figura 34 – Resultado teste 2 para SP=1200 L/h

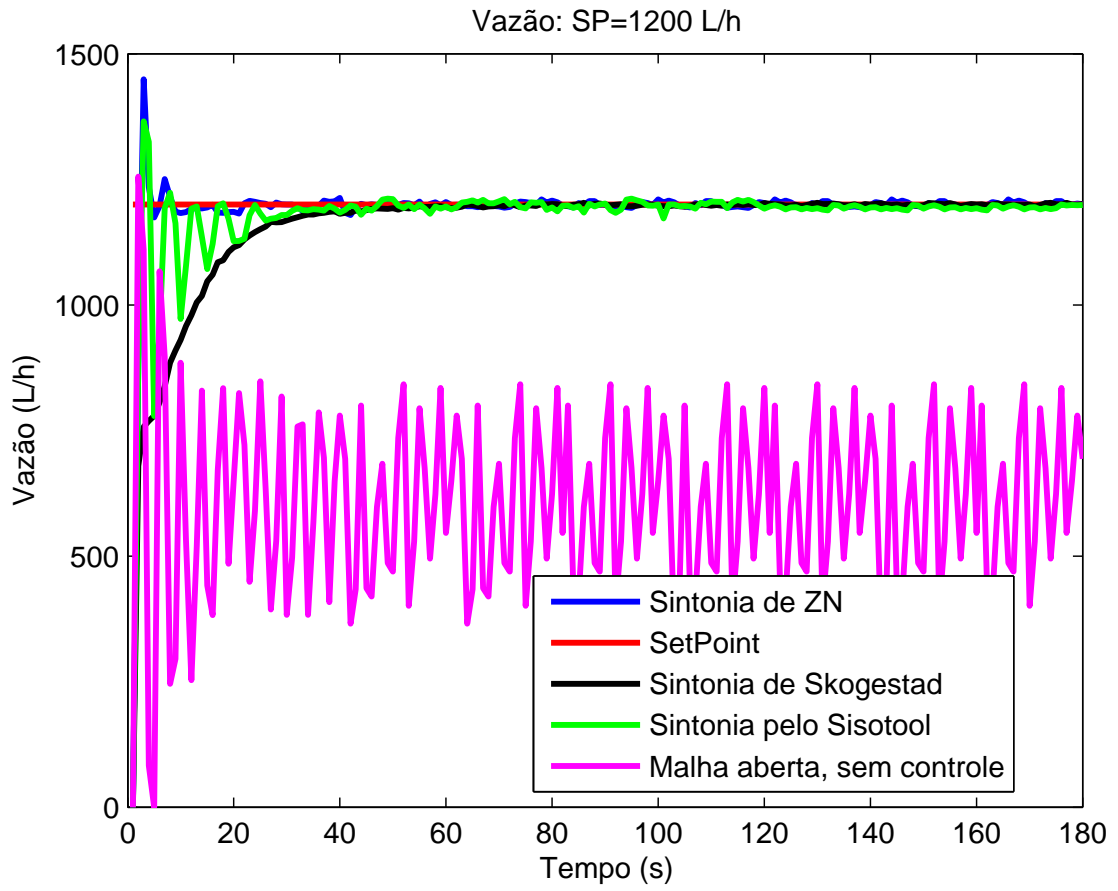
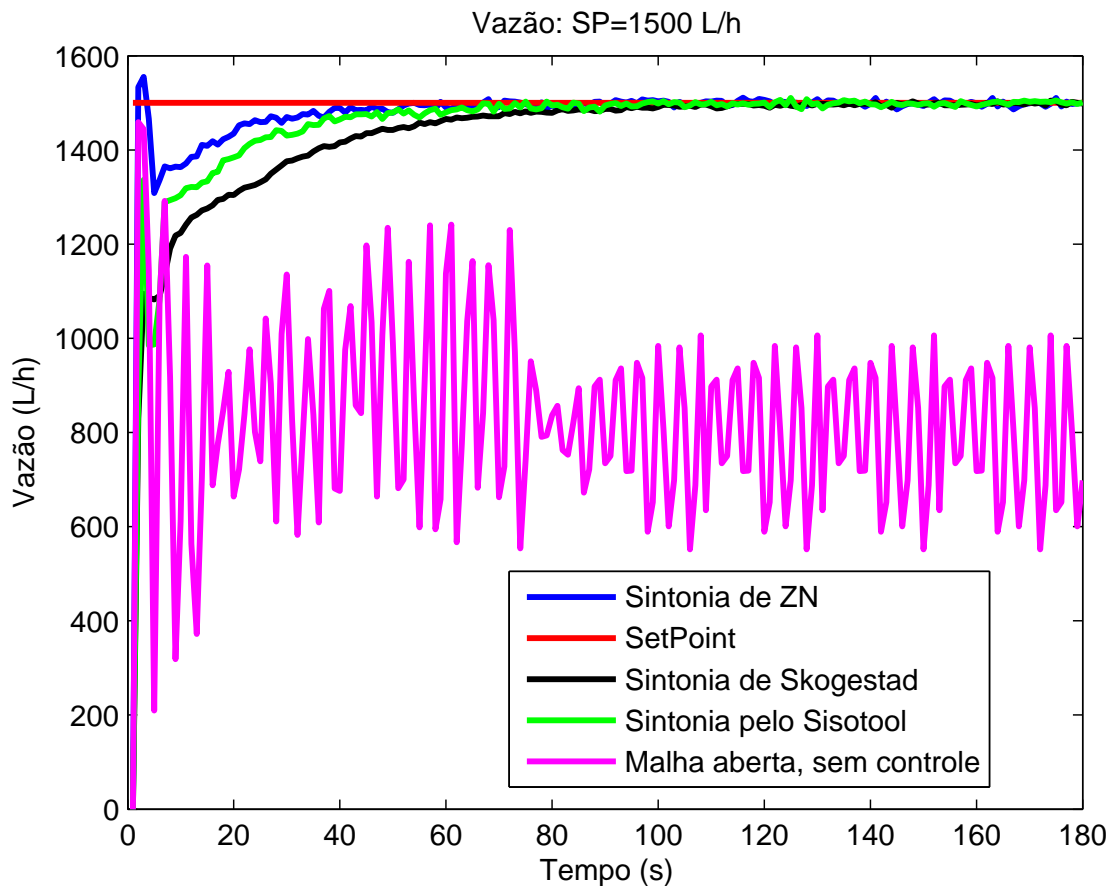


Figura 35 – Resultado teste 2 para SP=1500 L/h



Assim como os resultados obtidos para o teste 1, observa-se que o sistema em malha aberta e sem controle não retorna resultados satisfatórios, ou seja, o valor da variável controlada (vazão) não atinge e não estabiliza em valores condizentes ao valor desejado (*SetPoint*).

O controlador sintonizado por Ziegler e Nichols para as condições do teste 2 apresentou resultados com sobressinais elevados durante o regime transitório. Enquanto que no regime permanente, o erro foi quase nulo e a vazão foi controlada. Contudo, os sobressinais chegaram a ultrapassar 100%, deixando claro que não foi obtido o comportamento esperado.

Os sobressinais elevados que foram obtidos nos resultados do teste 2, foram provocados por uma desvantagem oriunda da utilização da técnica de Ziegler e Nichols do ponto crítico para sintonizar o controlador. Quando se aplica o método do ponto crítico de ZN, obtém-se controladores com ação proporcional elevada, o que causa sobressinais elevados. Como o teste 2 consiste em escolher um SP e só depois ligar a bomba, inicialmente não há vazão, o erro é muito grande e, conseqüentemente, a ação proporcional ao erro se torna grande quando o ganho proporcional é alto. Então, no momento em que o valor do SP é informado, o controlador manda abrir a válvula imediatamente. No momento da partida

da bomba, a válvula tem grande abertura e causa o sobressinal de vazão.

A hipótese de que o comportamento inesperado foi causado devido ao *Reset Windup*, que é um comportamento proveniente ação de controle integral, foi avaliado e descartado. Chegou a se pensar no *Reset Windup* porque quando ocorre um erro grande, isto é, quando a variável a ser controlada está muito distante do SP, o termo integral torna-se muito grande e a saída do controlador, eventualmente, satura (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 1989).

Utilizando os parâmetros do controlador obtidos pelo *Sisotool*, o sistema apresentou sobre-sinais aceitáveis. Os sobre-sinais que ocorreram não ultrapassaram 20%. Em regime permanente, o erro foi praticamente nulo e a vazão foi controlada, mostrando o bom funcionamento do controlador.

Já em relação aos parâmetros do controlador obtidos pelo método de Skogestad, não houve sobressinal durante o regime transitório e em regime permanente o erro foi praticamente nulo. Por outro lado, utilizando Skogestad o sistema apresentou tempo de acomodação maior do que quando o controlador foi sintonizado por qualquer um dos outros dois métodos.

Portanto, o método de Skogestad mostrou ser um método mais robusto do que o método de Ziegler e Nichols, apresentando resultados satisfatórios para ambos os testes realizados. Em contrapartida, o método de Ziegler e Nichols faz com que o sistema entre em regime permanente de forma mais rápida, isto é, com menor tempo de acomodação em relação ao controlador sintonizado pelo método de Skogestad. Utilizando o *Sisotool*, foram encontrados bons resultados para os dois testes. O sistema fica mais rápido do que o sistema quando utiliza Skogestad e não apresenta sobre-sinais tão elevados quanto o método de Ziegler e Nichols.

Quanto maior o parâmetro ganho proporcional do controlador, mais rapidamente o controlador vai atuar, menor será o tempo de acomodação e maior será o sobressinal. A ação integral reduz o erro residual em regime estacionário e, por esta razão, o controlador apresenta bons resultados para os três métodos em regime permanente.

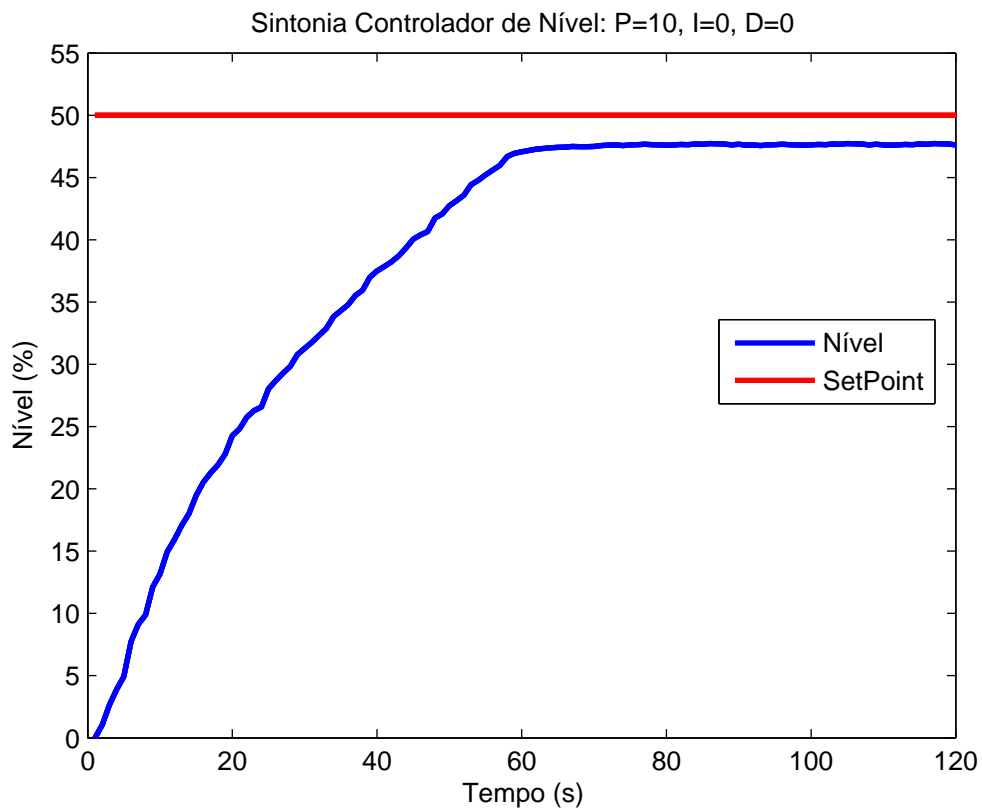
4.2 Controle de Nível

4.2.1 Sintonia de Ziegler e Nichols

Assim como foi descrito na seção 3.2.1.1, a ação integrativa e a derivativa foram anuladas e o *setpoint* escolhido foi 50%.

O resultado obtido para um ganho de 10 pode ser visto na Fig. 36.

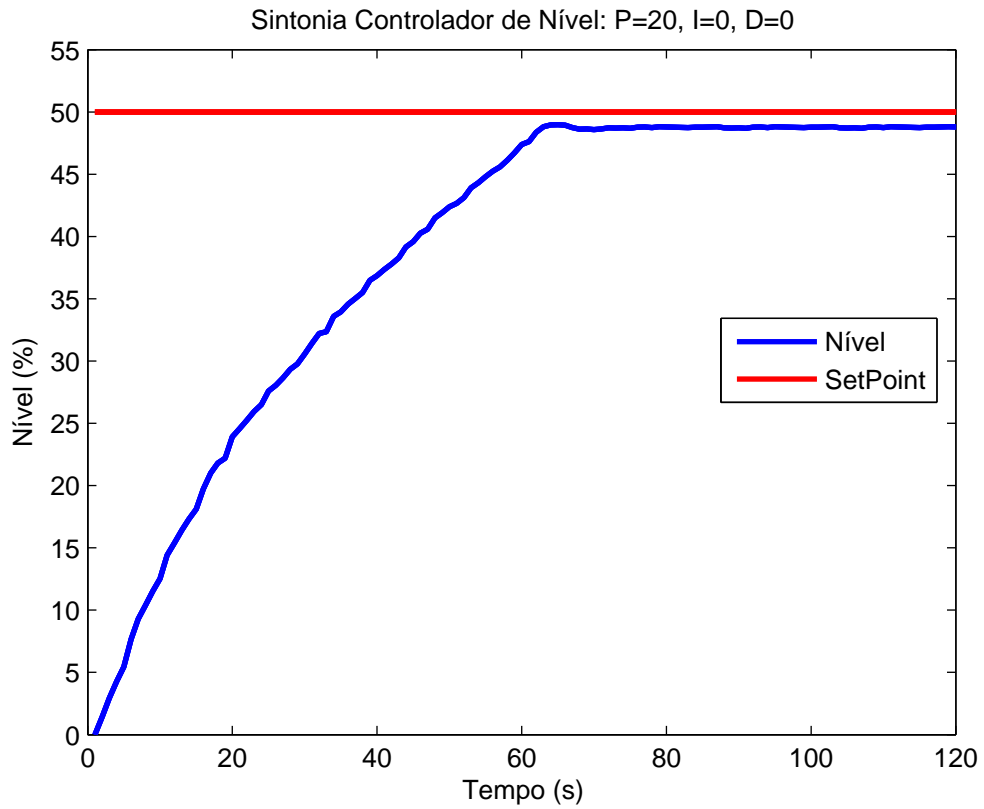
Figura 36 – Sintonia: Ganho = 10



Analisando a Fig.36, é possível concluir que o ganho igual a 10 não foi suficiente para levar o sistema a operar no ponto crítico, pois, não se obteve uma resposta oscilatória com amplitude constante.

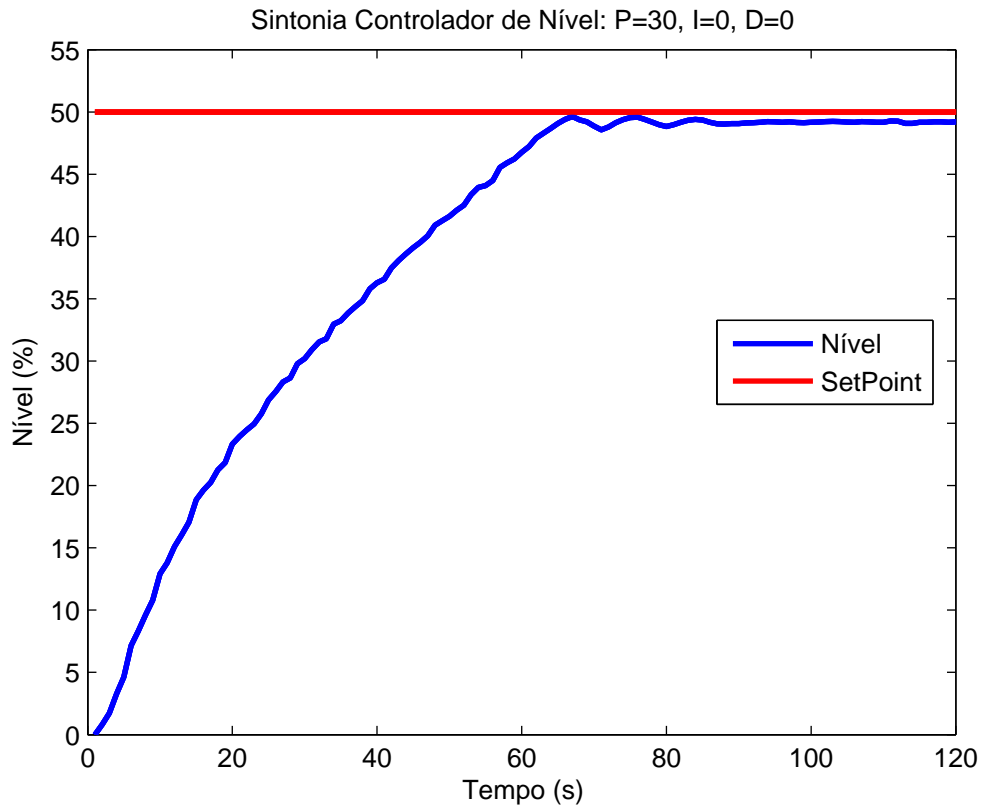
O ganho foi modificado para 20. A Fig.37 ilustra o resultado obtido.

Figura 37 – Sintonia: Ganho = 20



O ganho igual a 20 não foi suficiente para levar o sistema a operar no ponto crítico. A Fig.38 mostra o resultado obtido para ganho igual a 30.

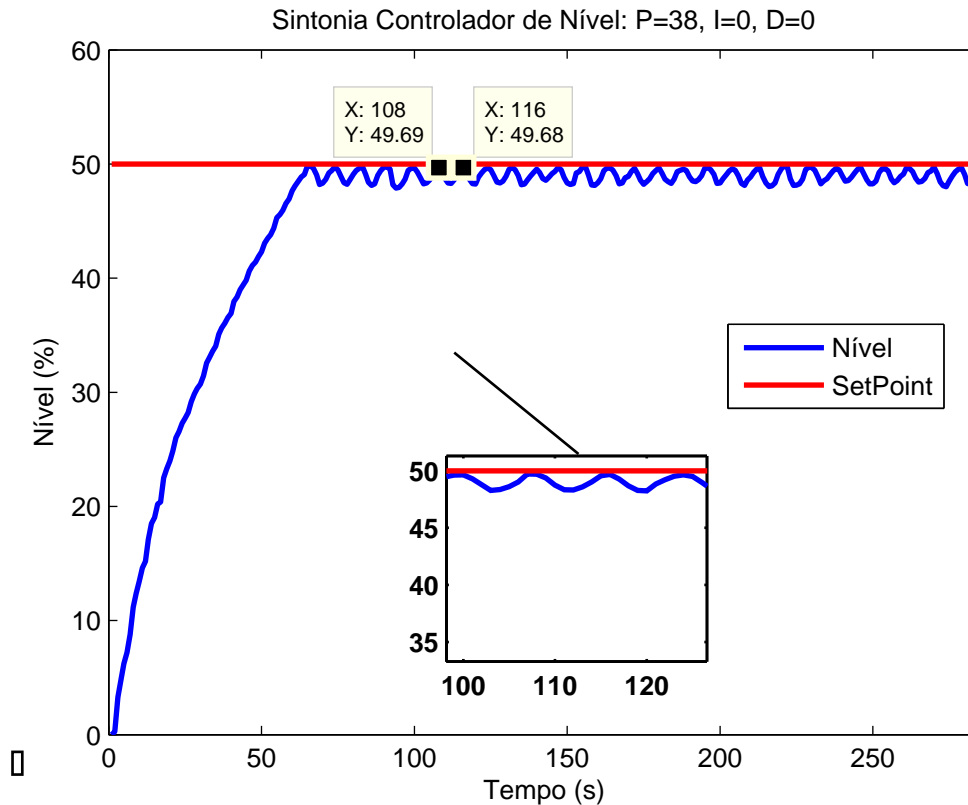
Figura 38 – Sintonia: Ganho = 30



Para o ganho igual a 30, houve uma pequena oscilação no período transitório. Contudo, a resposta se estabilizou e ficou constante, isto é, o ganho igual a 30 não fez o sistema operar no ponto crítico.

Aumentando o ganho para 38, obteve-se a resposta mostrada na Fig.39.

Figura 39 – Sintonia: Ganho = 38



Para um ganho igual a 38, é obtido uma resposta oscilatória com amplitude constante, ou seja, o sistema opera no ponto crítico. Então, o ganho crítico (K_u) é igual a 38. A partir da Fig.39, é possível obter o intervalo de tempo entre os picos da resposta oscilatória. Este intervalo de tempo é conhecido como período crítico (P_u) e é igual a 8 segundos.

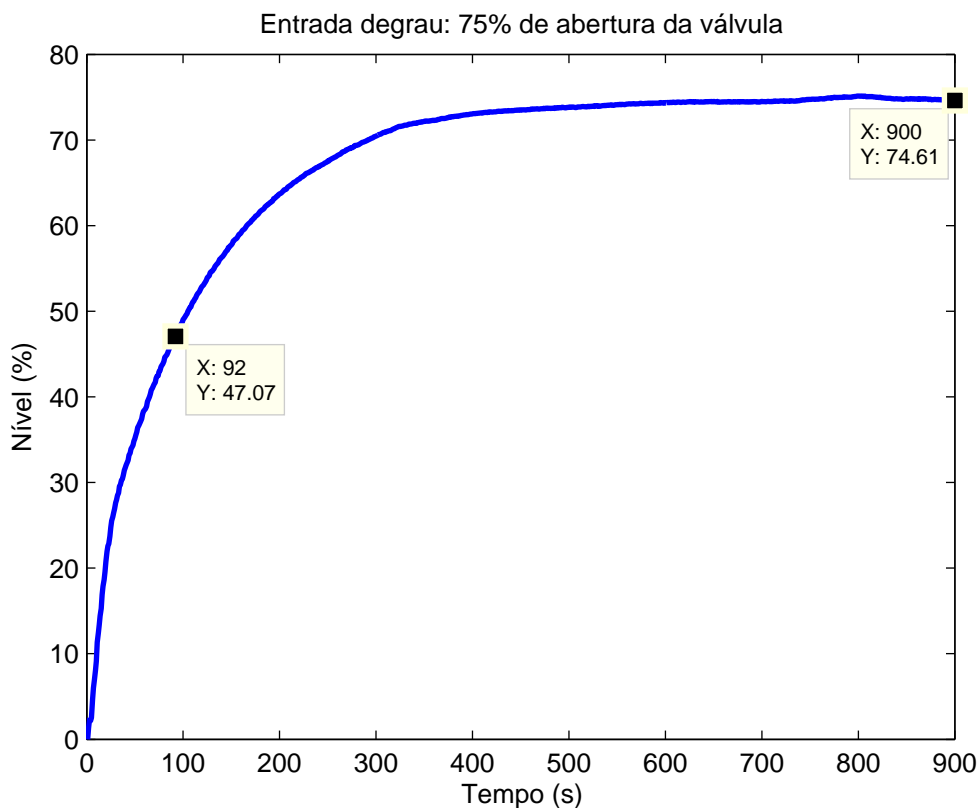
Aplicando os valores de ganho crítico e de período crítico de acordo com as Tabelas 2 e 3, os parâmetros do controlador foram determinados:

- Ação proporcional - $K = 0,45 \times K_u$, então $K = 17,1$
- Ação integral - $T_I = \frac{P_u}{1,2}$, então $T_I = 6,667$
- Ação derivativa - Segundo (CAMPOS, 2010), para controle de nível, a ação derivativa deve ser nula.

4.2.2 Sintonia de Skogestad

Assim como foi descrito na seção 3.2.1.2, foram aplicadas entradas do tipo degrau de abertura das válvulas. Ao realizar os testes, foi possível identificar não linearidades. Para a abertura de 25%, o nível não ultrapassou 1% da capacidade do tanque. Para valores maiores que 75% de abertura da válvula, o nível do tanque não se estabilizou e aumentou até ultrapassar o limite máximo e transbordar. Para encontrar os parâmetros do controlador, escolheu-se a entrada do tipo degrau com abertura de 75% da válvula. O resultado pode ser visto na Fig.40.

Figura 40 – Sintonia: Entrada degrau de 75%



A partir da Fig. 40, e aplicando os conceitos descritos na seção 2.3.3.2, é possível determinar os parâmetros do modelo do processo para a entrada de 75% de abertura da válvula.

- Ganho do processo - $K = \frac{74,61 - 0}{75 - 0} \rightarrow K = 0,9948$
- Constante de tempo - A partir do gráfico é possível estimar a constante de tempo do sistema. O valor do nível inicialmente é 0% e em regime permanente é 74,61%. A constante de tempo, de acordo com a Eq.2.23, é o tempo para o sistema atingir aproximadamente 47% de nível. $\tau = 92$ segundos.
- Tempo morto - O sistema não apresentou atraso de tempo. Então, $\theta = 0$.

Substituindo os valores calculados nas equações da Tabela 6, encontra-se os parâmetros do controlador.

- $K_p=1,436$
- $T_I=92$
- $T_D=0$

4.2.3 Obter FT e utilizar a ferramenta *Sisotool*

Os parâmetros do modelo do processo foram obtidos no ensaio para sintonizar o controlador pelo método de Skogestad.

- $K=0,9948$
- $\tau=92$
- $\theta=0$

Substituindo os parâmetros do sistema na Eq. 2.29, encontra-se o modelo de primeira ordem.

$$G(s) = \frac{0,9948}{92 \cdot s + 1} \quad (4.2)$$

A partir da Eq.4.2, obtem-se os parâmetros do controlador utilizando o *Sisotool*.

- $K_p=2,041$
- $T_I=41,9097$
- $T_D=0$

4.2.4 Resultados do Teste de Validação

Figura 41 – Resultado teste 1 para SP=25 %

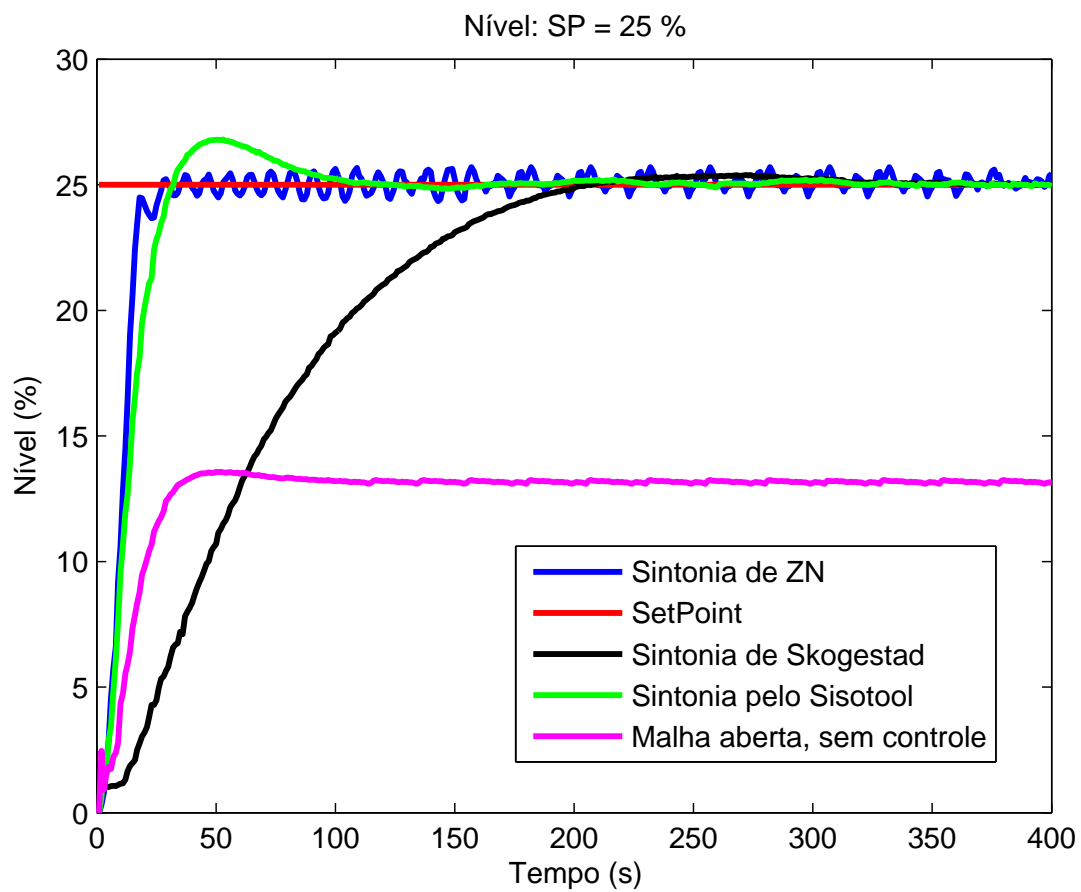


Figura 42 – Resultado teste 1 para SP=50 %

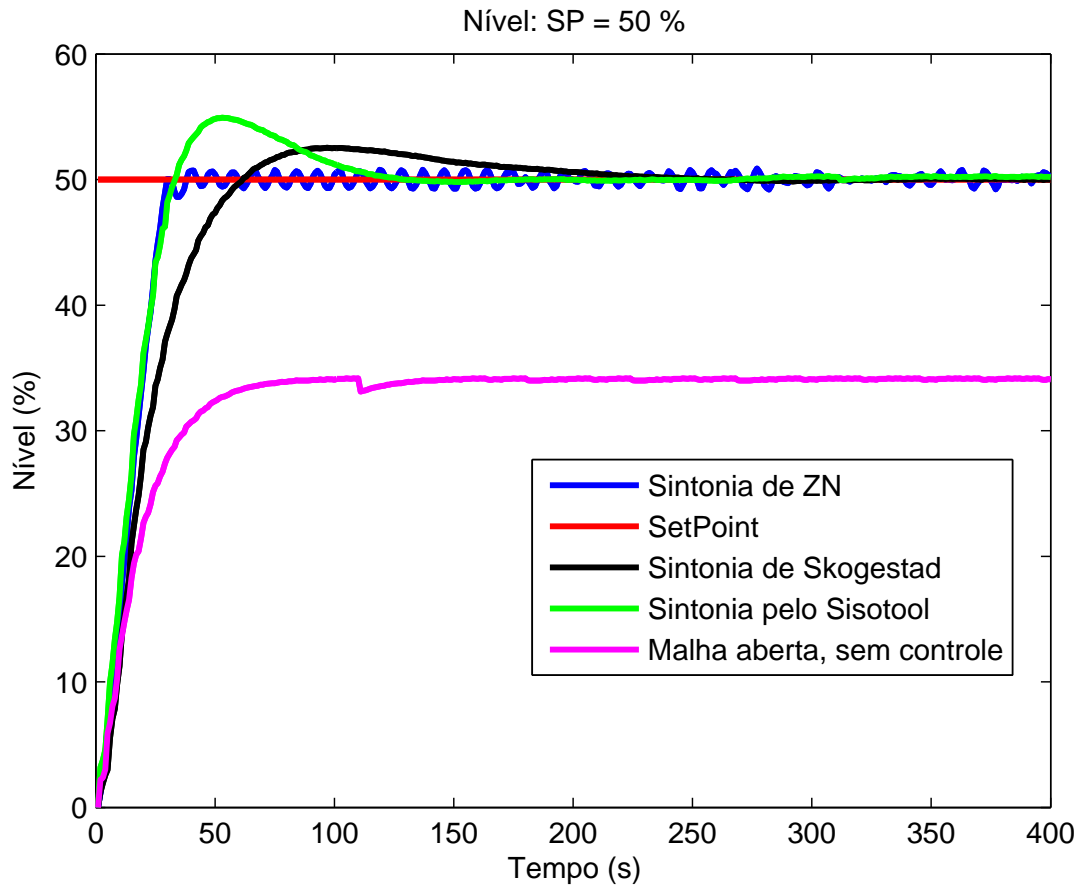


Figura 43 – Resultado teste 1 para SP=75 %

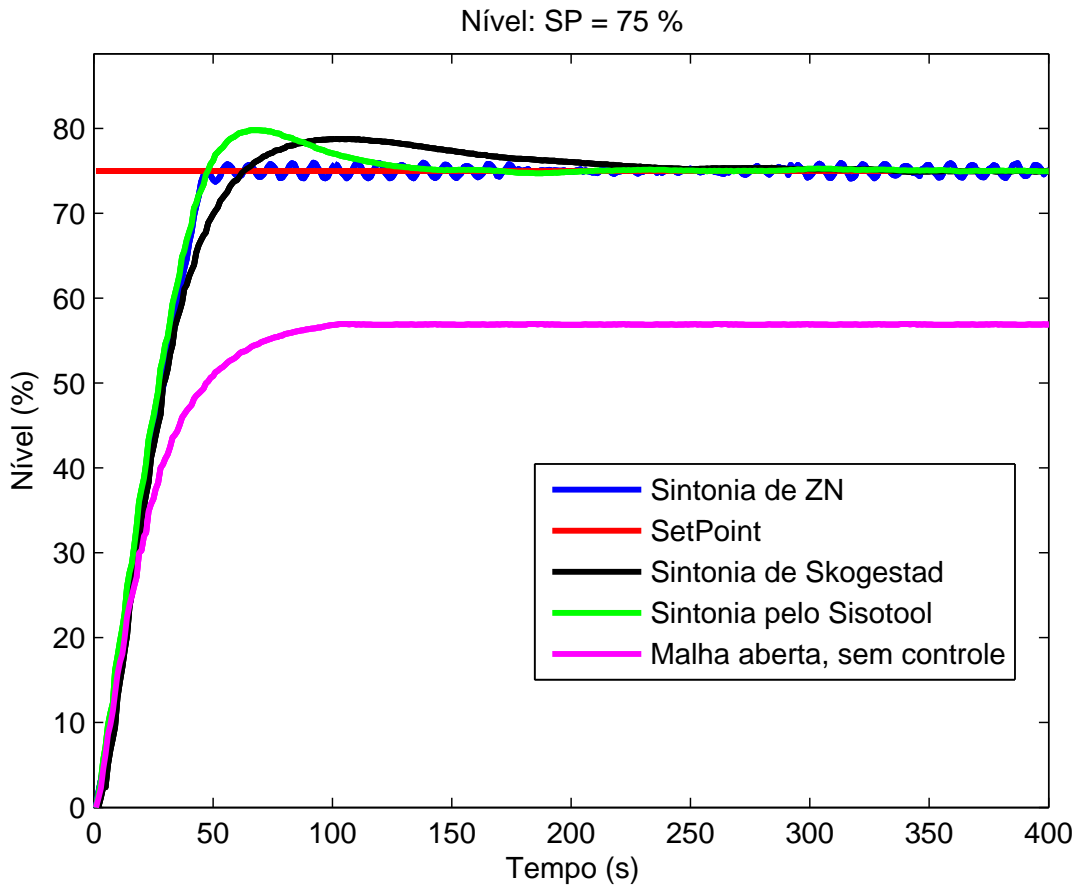
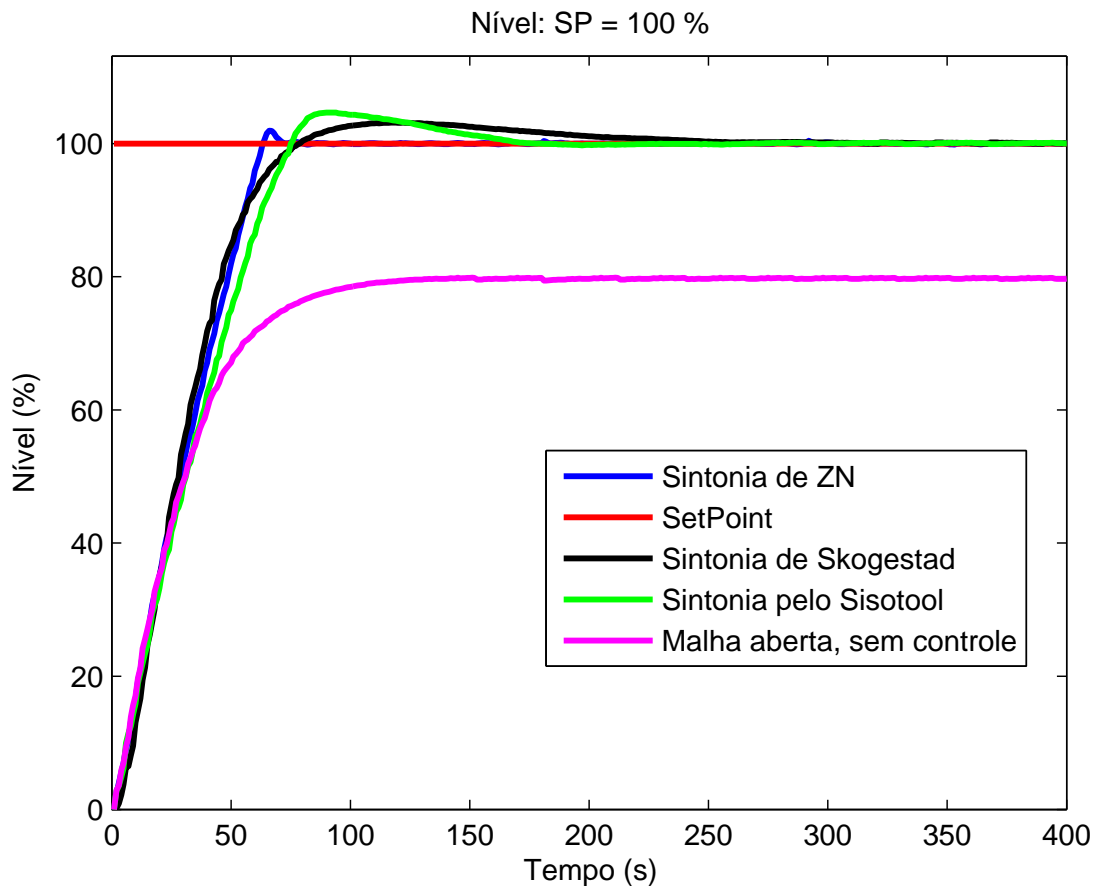


Figura 44 – Resultado teste 1 para SP=100 %



Analisando os resultados obtidos para o teste da malha de nível, observa-se que o sistema em malha aberta e sem controle não retorna resultados satisfatórios. O valor da variável controlada (nível) não atinge e estabiliza em valores próximo ao valor desejado (*SetPoint*). Sem o controlador não é possível obter bons resultados porque para cada sinal de entrada, há uma condição de operação fixa. Sem o ramo de realimentação o sistema se torna sensível a perturbações e, como resultado, os sistemas de controle a malha aberta não desempenham a tarefa desejada.

Para SP=100% todos os métodos de sintonia apresentaram bons resultados. Para os demais valores de SP o método do ponto crítico de Ziegler e Nichols não apresentou bons resultados. A resposta do sistema ficou variando mesmo estando em regime permanente. Essa é uma característica indesejável do método do ponto crítico. Os controladores ficam com ação proporcional elevada e causa oscilações contínuas na resposta do sistema. O sistema fica instável.

A sintonia do controlador pelo método de Skogestad e utilizando a ferramenta *Sisotool*, apresentaram bons resultados. Em regime transitório não houve sobressinal maior que 10% para nenhum dos dois métodos e em regime permanente a resposta do sistema ficou uniforme, não apresentou oscilações. O erro em regime permanente foi prati-

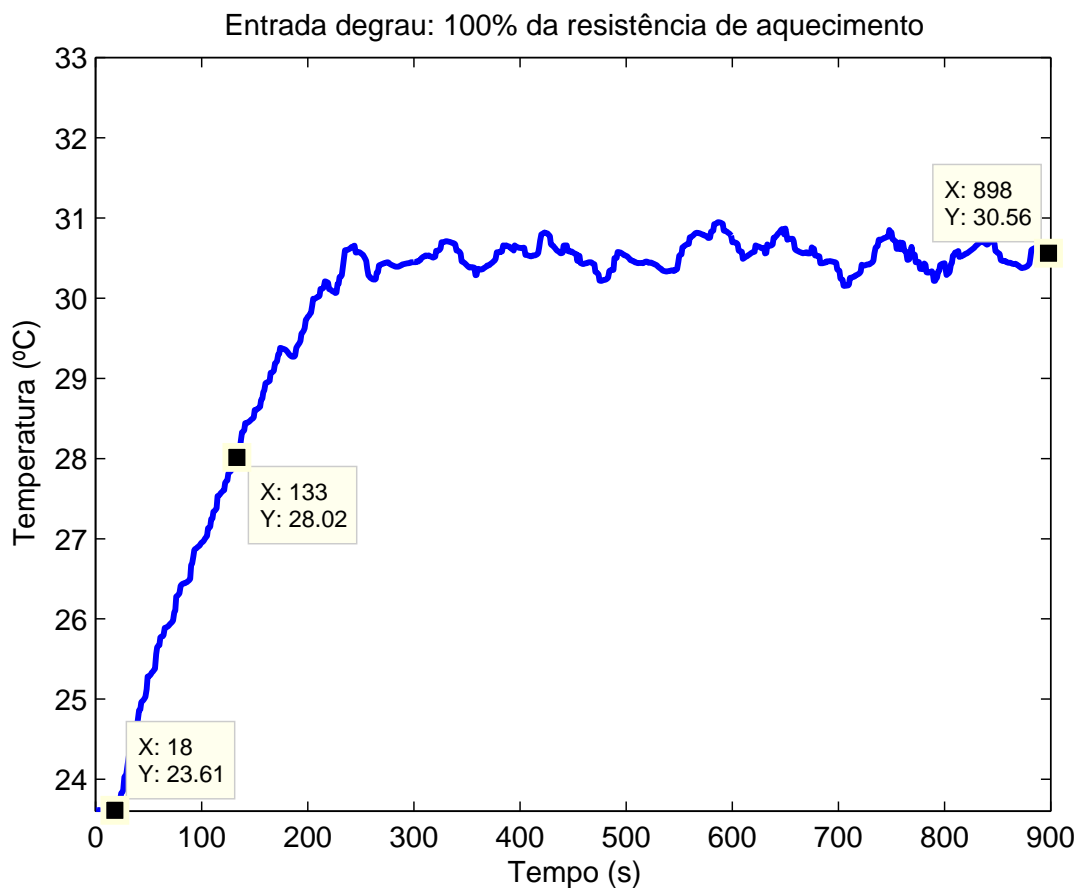
camente nulo. A sintonia do controlador utilizando o método Skogestad fez a resposta do sistema apresentar maior tempo de acomodação. O sistema ficou mais lento. A sintonia pelo *Sisotool* deixou o sistema mais rápido, mas, em contrapartida, apresentou sobre-sinais maiores que o método de Skogestad.

4.3 Controle de Temperatura

4.3.1 Sintonia do Controlador

A curva de reação encontrada quando se aplicou um degrau de 100% na resistência de aquecimento e um degrau de 25% de abertura da válvula pode ser vista na Fig. 45.

Figura 45 – Resposta ao degrau: 100% resistência de aquecimento e 25% de abertura da válvula



Com os pontos destacados na Fig. 45, é possível sintonizar o controlador utilizando o método de Ziegler Nichols de malha aberta e pelo método do IMC.

1. Sintonia pelo método de Ziegler e Nichols de malha aberta

Aplicando os conceitos descritos na seção 2.3.3.2, é possível determinar os parâmetros do modelo do processo.

- Ganho do processo - $K = \frac{30,56-23,61}{100-0} \rightarrow K = 0,0695$
- Constante de tempo - A partir do gráfico é possível estimar a constante de tempo do sistema. O valor da temperatura inicial é 23,61 °C e em regime permanente é 30,56 °C. A constante de tempo, de acordo com a Eq.2.23, é o tempo para o sistema atingir aproximadamente 28 °C de temperatura. Se houver tempo morto, deve-se descontar o tempo morto para obter o valor real da constante de tempo. $\tau = 133-18 \rightarrow \tau = 115$ segundos
- Tempo morto - O sistema possui atraso de tempo. Então, $\theta = 18$ segundos.

Substituindo os parâmetros do processo nas equações da Tabela 4, encontram-se os parâmetros do controlador da malha que atua na resistência.

- $K_p = 110,3$
- $T_I = 36$
- $T_D = 9$

Após sintonizar o controlador da malha mais rápida, deve-se atualizar os parâmetros do controlador e colocar a malha no controle automático com SP=50 °C. Aplicou-se um degrau de 25% de abertura da válvula para levantar nova curva de reação e obter os parâmetros do controlador da outra malha. O comportamento do sistema foi o mesmo de quando aplicou degrau de 100% na resistência e degrau de 25% de abertura da válvula. Isso aconteceu porque como o SP foi igual a 50 °C e havia vazão fixa de água fria no tanque, a temperatura nunca chegaria a 50 °C e o controlador manteve a resistência de aquecimento a 100% o tempo todo.

Então, os parâmetros da curva de reação da malha que controla vazão de água fria em função da temperatura são:

- Ganho do processo - $K = \frac{30,56-23,61}{25-0} \rightarrow K = 0,278$
- Constante de tempo - $\tau = 133-18 \rightarrow \tau = 115$ segundos
- Tempo morto - $\theta = 18$ segundos.

Substituindo os parâmetros do processo nas equações da Tabela 4, encontra-se os parâmetros do controlador da malha que atua na válvula.

- $K_p = 27,58$
- $T_I = 36$
- $T_D = 9$

2. Sintonia pelo método IMC

Para encontrar a sintonia do controlador pelo método do IMC, deve-se realizar os mesmos procedimentos descritos para sintonizar pelo método de Ziegler e Nichols de

malha aberta. Os parâmetros obtidos das curvas de reação, devem ser substituídos nas equações da Tabela 5. Além dos parâmetros da curva de reação, o método IMC depende do λ , que é conhecido como fator de desempenho deste método. Nessa investigação, adotou-se $\lambda = \theta = 18$.

- Parâmetros do controlador da malha da resistência de aquecimento
 - $K_p=66,08$
 - $T_I=124$
 - $T_D=8,35$
- Parâmetros do controlador da malha de controle de vazão de água fria
 - $K_p=16,52$
 - $T_I=124$
 - $T_D=8,35$

4.3.2 Resultados do Teste de Validação

Figura 46 – Resultado teste de validação para SP=35°C

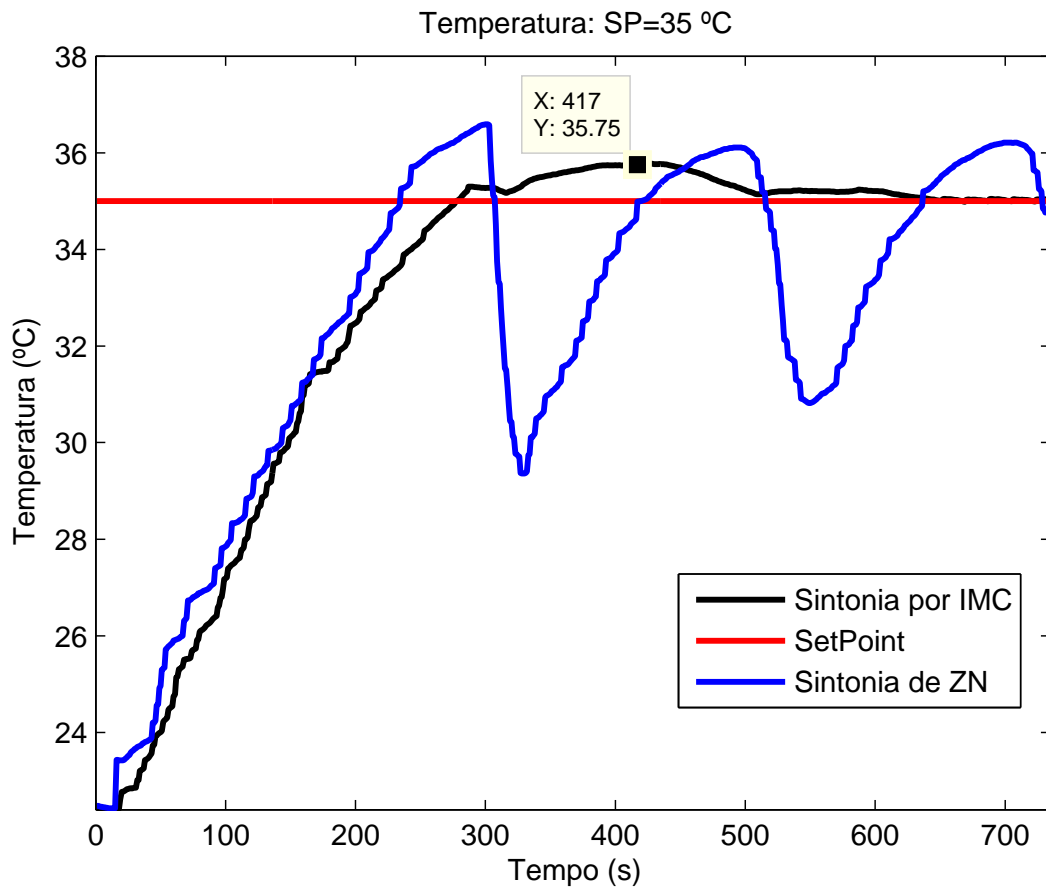


Figura 47 – Resultado teste de validação para SP=40°C

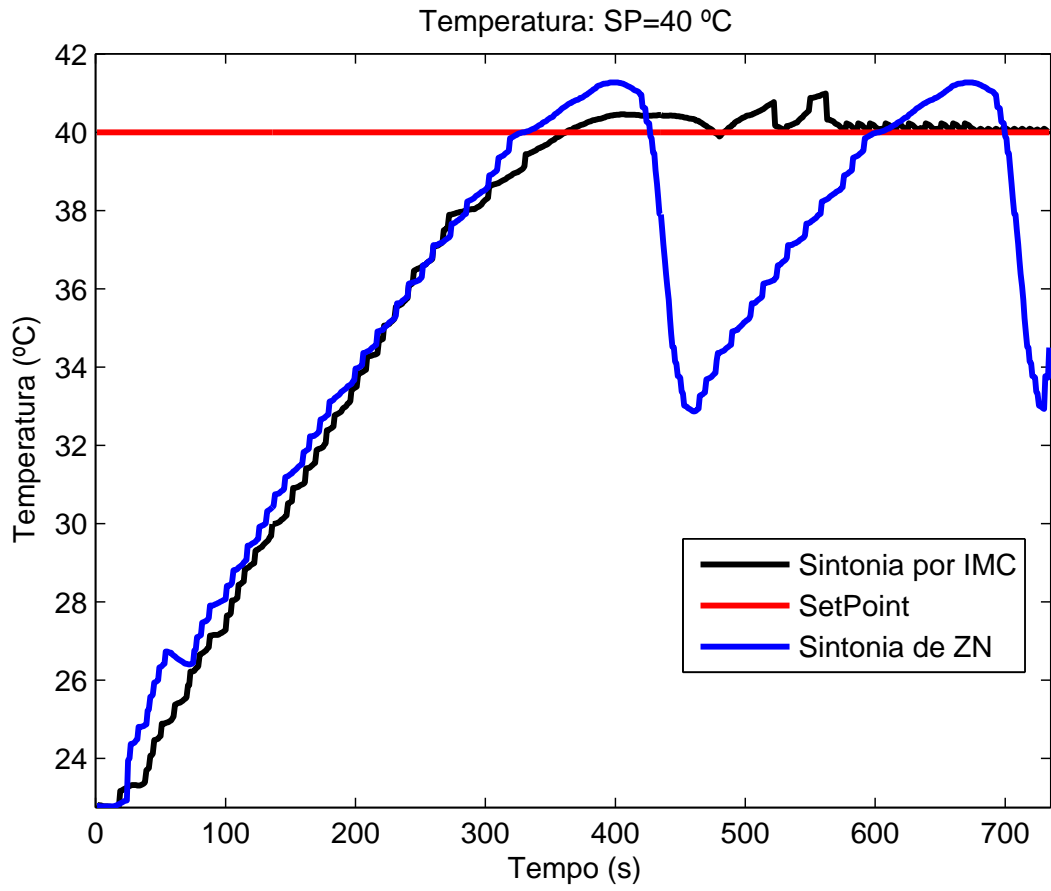


Figura 48 – Resultado teste de validação para SP=45°C

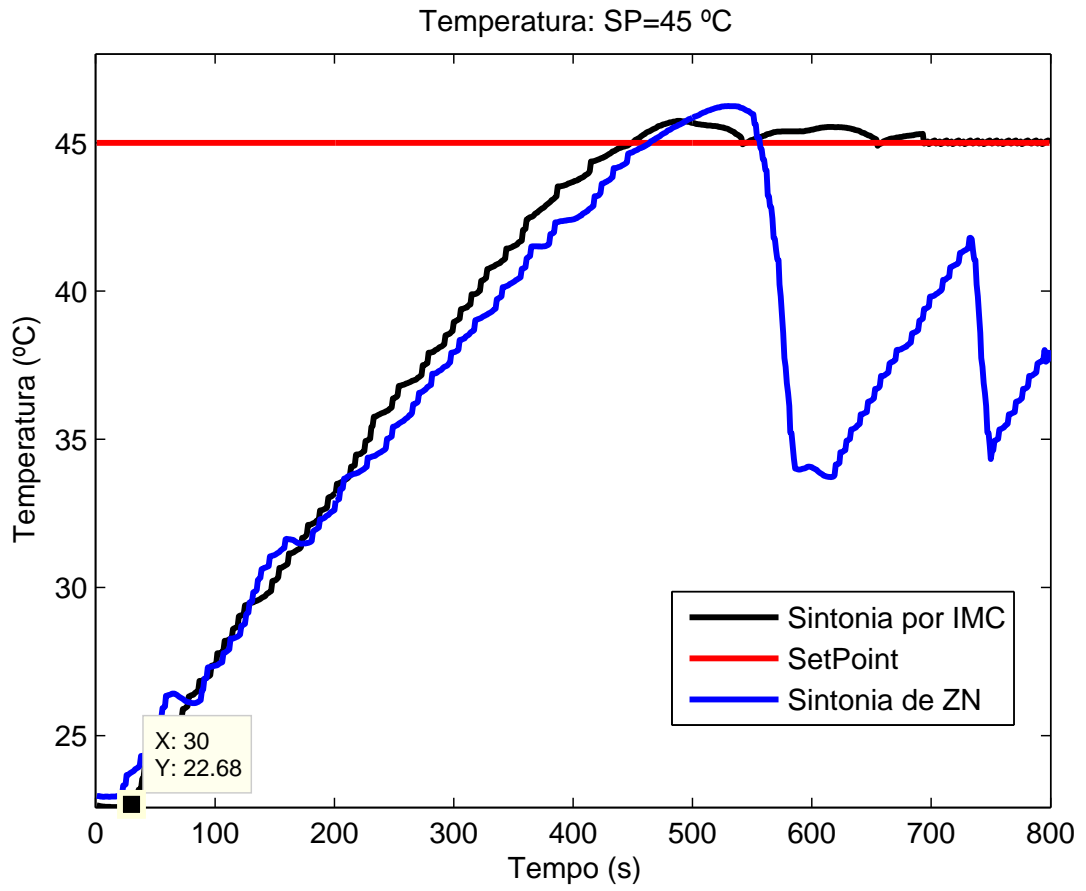
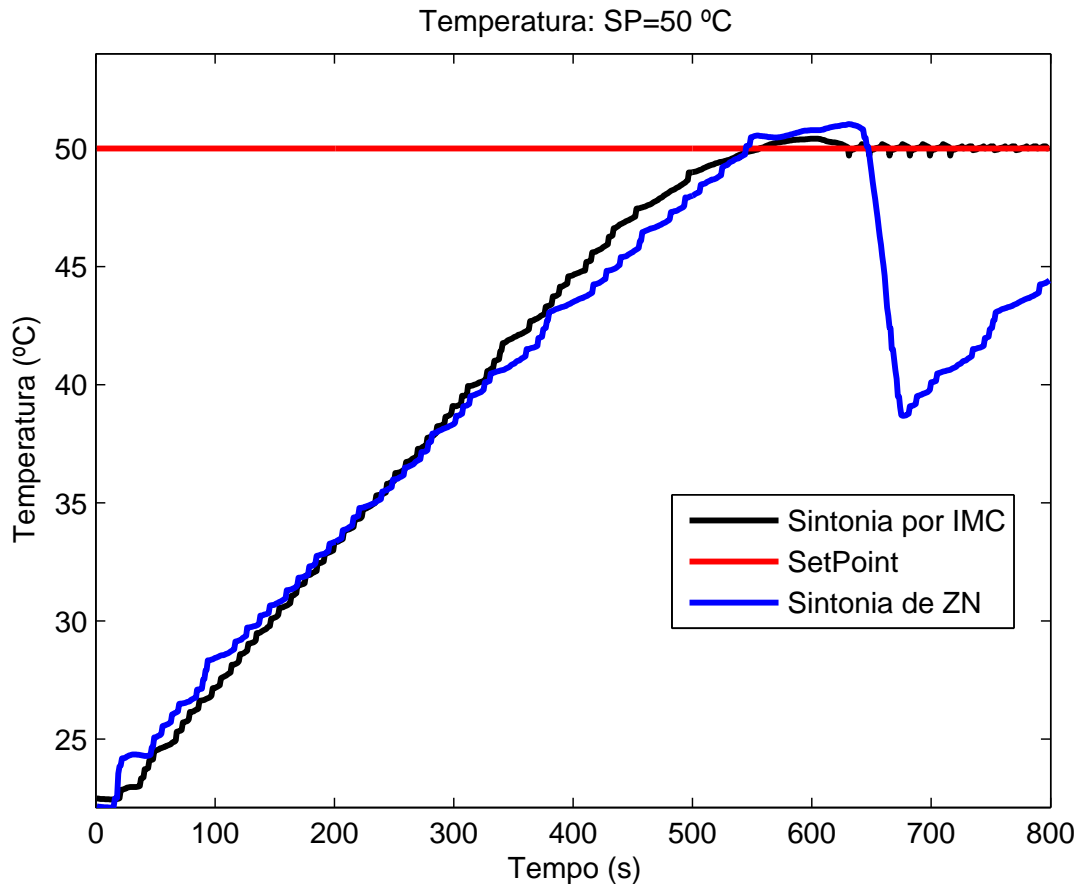


Figura 49 – Resultado teste de validação para SP=50°C



Analisando os resultados obtidos para o teste de validação aplicado na malha de temperatura, observa-se que o sistema com controlador sintonizado pelo método de Ziegler e Nichols não consegue controlar a temperatura, ou seja, não apresenta resultados satisfatórios. A temperatura varia entre valores maiores e menores que o valor de referência. O motivo desse comportamento indesejado é o alto ganho proporcional que o método de ZN de malha aberta retorna como parâmetro do controlador. Inicialmente a temperatura está abaixo do *SetPoint* e o controlador manda a resistência para 100% e a abertura da válvula para 0%. O sistema atinge o valor do SP, ultrapassa esse valor de referência e o controlador faz a válvula ficar com grande abertura para aumentar a vazão de água fria e reduz a ação da resistência. Como consequência a temperatura se reduz de forma rápida e atinge valores menores que o SP.

O método do IMC apresentou bons resultados. Em regime transitório, a resposta do sistema não apresentou sobressinais e em regime permanente a temperatura foi controlada de acordo com o valor desejado, apresentando erro quase nulo.

5 Conclusão e Trabalhos Futuros

1. Controle de Vazão

Para realizar o controle de vazão, o método de Skogestad demonstrou ser o mais eficiente e robusto, pelo fato de manter as características da resposta do sistema em diferentes condições de operação e por não apresentar oscilações na variável controlada durante o regime permanente.

O controlador obtido a partir do programa *Sisotool* também apresentou bons resultados. O sistema reagiu de forma mais rápida que o método de Skogestad e apresentou sobre-sinais aceitáveis no teste 2. Em regime permanente apresentou pequenas oscilações na variável controlada, nada que afetasse o bom desempenho do controlador

O método do ponto crítico de Ziegler e Nichols retorna sintonias de controladores com ganhos proporcionais elevados, o que causa grande instabilidade no sistema. Para controle de vazão, apresentou bons resultados para o teste 1 sem sobre-sinais e com baixo tempo de acomodação. Para o teste 2, apresentou sobre-sinais elevados, comprometendo o bom funcionamento da malha e provando que não é um método de sintoniza robusto.

2. Controle de Nível

Para controlar o nível, os resultados encontrados com o controlador sintonizado pelo método de Skogestad e pelo *Sisotool* foram satisfatórios. Durante o regime transitório o sistema apresentou sobre-sinais menores que 10% e em regime permanente o nível foi controlado sem oscilações. Com a utilização do método de Skogestad para sintonizar o controlador, o sistema ficou mais lento do que utilizando os parâmetros do *Sisotool*, demorando um tempo maior para alcançar o regime permanente. Porém, utilizando o método de Skogestad, o sistema apresenta sobre-sinais menores.

Utilizando o método do ponto crítico de Ziegler e Nichols, a resposta do sistema não apresenta sobre-sinais durante o regime transitório e entra em regime permanente com menor tempo que os outros dois métodos de sintonia. Durante o regime permanente, a resposta apresenta oscilações significativas, evidenciando a instabilidade do sistema. O método do ponto crítico retorna ganho proporcional elevado e conseqüentemente leva o sistema a operar em regiões instáveis. Entre os três métodos aplicados para controlar o nível, o do ponto crítico de Ziegler e Nichols obteve o pior resultado.

3. Controle de Temperatura

Os resultados obtidos, quando o controlador foi sintonizado pelo método da malha aberta de Ziegler e Nichols, foram ruins. A temperatura no tanque não foi controlada, a resposta do sistema ultrapassava o sinal de referência e logo em seguida decrescia para valores distantes do valor desejado. A resposta do sistema apresentou *overshoot* seguido de *undershoot* e não se estabilizou. O desempenho ruim do método de Ziegler e Nichols é devido ao alto ganho proporcional gerado pelo método. Enquanto a temperatura estava abaixo do valor de referência, o controlador manteve a resistência em 100% e a válvula quase completamente fechada. O sistema atingia a temperatura desejada, a ultrapassava e o controlador agia bruscamente, abrindo a válvula completamente para entrar maior vazão de água fria, inibindo a ação da resistência. Como consequência, a temperatura se reduzia de forma rápida e atingia valores muito abaixo do *SetPoint*.

O método de IMC apresentou bons resultados. A temperatura foi controlada de acordo com o valor de referência. O sistema ficou estável.

Na presente investigação, foram utilizados 5 métodos distintos para sintonizar os controladores de vazão, nível e temperatura. A continuidade deste trabalho pode ser realizada em 3 frentes principais:

- Aplicar técnicas de identificação de sistemas para obter modelos mais precisos para serem utilizados na etapa de projeto dos controladores;
- Utilizar técnicas de otimização computacional e métodos heurísticos para sintonizar os controladores;
- Desenvolver interface gráfica.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Enciclopédia de Automática Controle e Automação*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007. ISBN 978-85-212-0409-1.
- AGUIRRE, L. A. *Fundamentos de instrumentação*. São Paulo: Pearson, 2013.
- ASTROM; T.HAGGLUND. *PID Controllers: Theory, Design and tuning*. 2. ed. [S.l.: s.n.], 1995. ISBN 1-55617-516-7.
- CAMPOS, M. C. M. M. de. *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. 2. ed. [S.l.]: Blucher, 2010. ISBN 978-85-212-0552-4.
- CAMPOS, P. R. B. de; CAMPOS, C. A. B. de. Sintonia de controladores para processos didáticos sem atraso de transporte. *COBENGE*, p. 1–11, 2014.
- DAHLIN, E. Designing and tuning digital controllers. *Instruments and Control Systems*, v. 41, p. 77–83, 1968.
- DUNN, W. C. *Instrumentação industrial e controle de processos*. 1. ed. New York: bookman, 2013.
- FAVARO, J. Controle preditivo aplicado à planta piloto de neutralização de ph. *Biblioteca digital USP*, p. 1–149, 2012.
- FIALHO, A. B. *Instrumentação industrial*. 7. ed. [S.l.]: Érica, 2010.
- FOUNDATION, F. *Foundation Fieldbus high speed Ethernet*. 2016. Disponível em: <<http://www.fieldbus.org>>.
- HELFRICK, A. D.; COOPER, W. D. *Instrumentação eletrônica moderna e técnicas de medição*. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994.
- ISERMANN, P. D.-I. R. *Digital Control Systems*. 2. ed. [S.l.: s.n.], 1989. ISBN 978-3-642-86422-3.
- LUYBEN, W. L. *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*. 2. ed. New York: [s.n.], 1990.
- MAITELLI, A. L. *Controladores lógicos programáveis*. Natal, 2003.
- MATHWORKS. *Control System Designer*. 2016. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/control/ref/controlsystemdesigner-app.html?requestedDomain=www.mathworks.com>>.
- NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 6. ed. California: LTC, 2012.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5. ed. [S.l.: s.n.], 2011. ISBN 978-8576058106.
- RIVERA, D. E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. Internal model control. 4. pid controller design. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, v. 25, n. 1, p. 252–265, 1986.

- SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. *Process dynamics and control*. NY: Wiley, 1989. ISBN 0-471-86389-0.
- SHINSKEY, F. G. *Process Control Systems*. 4. ed. [S.l.: s.n.], 1996. ISBN 978-3-642-86422-3.
- SKOGESTAD, S. Simple analytic rules for model reduction and pid controller tuning. v. 25, n. 2, p. 85–120, 2004.
- SMAR. *Arquitetura/Componentes planta didática SMAR PD3*. Sertãozinho, 2014.
- SMAR. *FI302 conversor Fieldbus para corrente com 3 canais*. Sertãozinho, 2014.
- SMAR. *FY302 Posicionador de válvula Fieldbus*. Sertãozinho, 2014.
- SMAR. *SYSTEM 302 Equipamento de campo H1 FF*. Sertãozinho, 2014.
- SMAR. *Tecnologia Foundation Fieldbus*. Sertãozinho, 2014.
- SMAR. *TT300 series Transmissores de temperatura*. Sertãozinho, 2014.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. de. *Sensores Industriais - Fundamentos e Aplicações*. 4. ed. Ceará: Éricar, 2005.
- ZIEGLER, J.; NICHOLS, N. Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, v. 64, p. 759–768, 1942.

6 Anexo

Simbologia – Norma ISA 5.1

A Planta Didática SMAR, assim com todas as plantas industriais, possui um fluxograma mecânico que auxilia na instalação, manutenção e utilização dos equipamentos. Esses fluxogramas são construídos baseados na Simbologia e Terminologia de Instrumentação da Norma ISA 5.1, que estabelece os símbolos gráficos para identificação dos instrumentos e dos sistemas de instrumentação usados para medição e controle, apresentando um sistema de designação que inclui código de identificação para cada componente da planta, do mesmo modo que suas conexões.

Cada instrumento será identificado por um conjunto de letras (identificação funcional) e números (identificação da malha de controle), onde:

- Conjunto de letras: A 1ª letra representa a grandeza medida pelo instrumento (variável de controle) e as letras subsequentes são as funções do instrumento

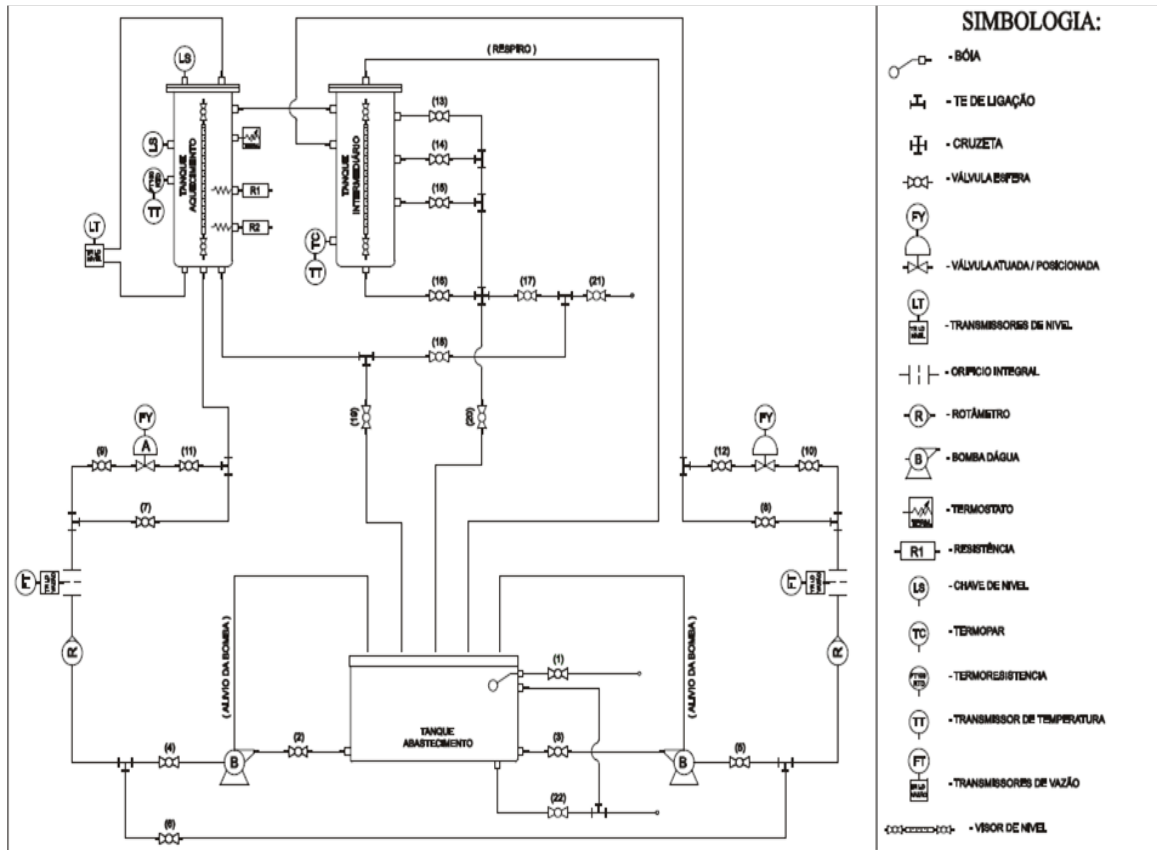
- Número da malha: instrumentos de uma mesma malha devem apresentar o mesmo número

Na planta SMAR PD3 *Foundation Fieldbus* temos por exemplo:

- LIT - Indicador e transmissor de nível
- TIT - Indicador e transmissor de temperatura
- FIT - Indicador e transmissor de vazão

A Fig. 50 apresenta o fluxograma geral da planta:

Figura 50 – Fluxograma geral



Estrutura física da planta

A planta de instrumentação utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, é composta basicamente por uma mesa metálica, sensores, transdutores e atuadores. A mesa metálica é a estrutura responsável pela fixação dos elementos da planta e onde são feitas as montagens mecânicas e elétricas: equipamentos para medição e atuação, tubulação, placa de montagem elétrica, eletrodutos, rodas com amortecedores e tanques.

A Fig. 51 ilustra a estrutura física da planta SMAR PD3:

Figura 51 – Estrutura física planta SMAR PD3 *Foundation Fieldbus*



Segundo (SMAR, 2014a), o material da mesa é de alumínio, o que agrega rigidez para suportar todos os elementos, leveza para ser facilmente transportada e design sofisticado. Os elementos que fazem parte da planta SMAR PD3 serão descritos a seguir.

Folha de dados

1. Rotâmetro de água - A planta SMAR PD3 possui dois rotômetros que têm a função de indicar o valor instantâneo da vazão de água no respectivo circuito. Os rotômetros são basicamente compostos de um tubo de vidro cônico comprimido entre dois terminais de conexão que são unidos por meio de tirantes. A Fig. 52 ilustra o modelo de rotâmetro presente na planta e a Tabela 7 contém as especificações do rotâmetro:

Figura 52 – Rotâmetro

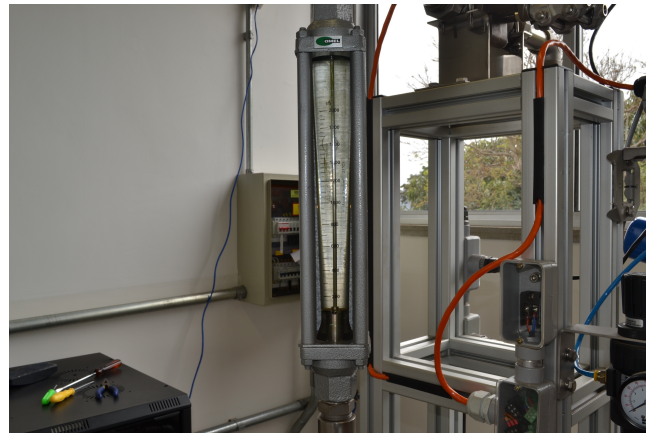


Tabela 7 – Especificações do rotâmetro

Parâmetros	
Fabricante	OMEL
Modelo	4T71205X12 com proteção
Fluido	Água
Densidade	1g/cm ³
Viscosidade	1 CP
Temperatura	21°C
Pressão de operação	2kgf/cm ²
Graduação da escala	0 a 2000 l/h
Posição entrada e saída	vertical

2. Chave de nível - A chave de nível tem como função detectar nível baixo no tanque de aquecimento. Ao acusar nível baixo, a chave de nível enviará um comando para o painel de controle fazendo desativar a ação do conversor estático, para que não haja potência elétrica sendo transferida para as resistências elétricas contidas dentro do tanque. A ação da chave de nível garante que o conversor estático mande energia para as resistências somente se as mesmas estiverem submersas, evitando que a resistência seja ativada estando imersa e queime (SMAR, 2014a).

Os eletrodos são sensores presentes no tanque de aquecimento. São posicionados nas alturas onde se deseja controlar os níveis do líquido, no reservatório. O eletrodo terra é posicionado no fundo do tanque. A medida que o nível de água no reservatório vai subindo, a água atinge o eletrodo de atuação, fechando o circuito entre o eletrodo de atuação e eletrodo terra pela sua própria condutividade, acionando um circuito elétrico que por sua vez comuta o relé de saída. A sensibilidade do detector é ajustada de acordo com a condutividade do líquido a ser controlado (SMAR, 2014a).

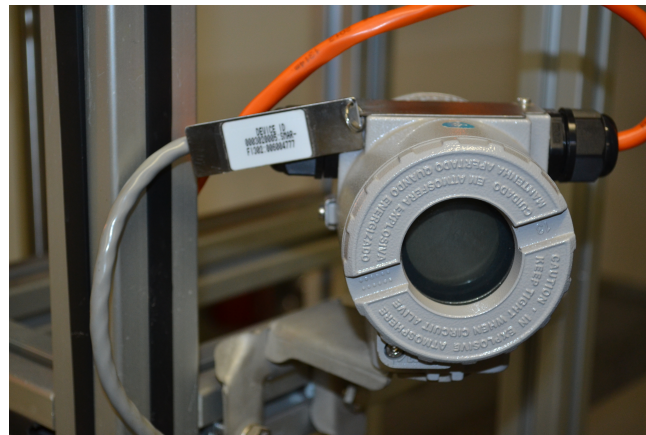
A Fig.53 ilustra a chave de nível utilizada na planta SMAR PD3:

Figura 53 – Eletrodo de nível



3. FI302 - O FI302 é um conversor estático que pertence à primeira geração de equipamentos de campo da SMAR. Ele tem como função conectar Sistemas *Foundation Fieldbus* com atuadores e posicionadores de válvulas de controle 4 - 20 mA. O FI302 produz uma saída de 4 - 20 mA proporcional à entrada recebida pela rede *Foundation Fieldbus*. A tecnologia digital utilizada por ele permite uma interligação fácil entre o campo e a sala de controle, disponibiliza vários tipos de funções de transferência e características interessantes que reduzem os custos de instalação, operação e manutenção (SMAR, 2014b). O FI302 presente na planta SMAR PD3 pode ser visto na Fig. 54:

Figura 54 – Conversor estático FI302



A especificação funcional do FI302, assim como a especificação de desempenho, descritas em (SMAR, 2014b), podem ser vistas na Tabela 8 e na Tabela 9 respectivamente:

Tabela 8 – Especificação funcional FI302

Sinal de saída	Três saídas de corrente 4 a 20 mA, alimentação externa, terra comum
Sinal de entrada	Digital, em <i>Fieldbus</i> , modo tensão 31,25 Kbit/s com alimentação pelo barramento
Limitação da carga de saída	Tensão de alimentação externa 3 a 45 Vdc
Alimentação	9 a 32 Vdc e corrente de consumo quiesscente 12 mA
Indicador	Indicador LCD de 4 $\frac{1}{2}$ dígitos
Certificações em área classificada	A prova de explosão e intrinsecamente seguro (ATEX, FM, CEPEL, CSA e NEPSI). Projetado para atender diretivas Europeias (Diretiva ATEX 94/9/EC e Diretiva LVD 2006/95/EC
Limites de temperatura	Operação: -40 a 85°C Estocagem: -40 a 100°C <i>Display</i> : -20 a 80°C operação e -40 a 85°C sem danos
Limites de umidade	0 a 100% RH
Tempo para iniciar operação	Aproximadamente 10 segundos
Tempo de atualização	Aproximadamente 0,2 segundos

Tabela 9 – Especificação de desempenho FI302

Precisão	0,1%
Efeito de temperatura ambiente	Para uma variação de 10°C: $\pm 0,05\%$
Efeito da fonte de alimentação de saída	$\pm 0,005\%$ V
Efeito de vibração	Atende a SAMA PMC 31.1
Efeito de interferência eletromagnética	Projetado para atender a Diretiva Europeia - Diretiva EMC 2004/108/EC

4. TT302 - É um transmissor inteligente de temperatura que admite qualquer sensor que gere uma resistência ou tensão elétrica em função da temperatura. A escolha do sensor a ser utilizado vai depender da aplicação (SMAR, 2014d) (SMAR, 2014f). O TT302 presente na planta SMAR PD3 está ilustrado na Fig.55.

Figura 55 – TT302



A planta SMAR PD3 possui dois TT302, um para medição de temperatura no tanque de aquecimento e outro para medir temperatura no tanque de mistura. O TT302 responsável por mensurar a temperatura do tanque de aquecimento, utiliza como sensor um PT100 com ligação a 3 fios, que é uma técnica utilizada industrialmente para não haver perdas ou distorções do sinal de medida quando as instalações possuem mais de três metros de comprimento. O PT100 com ligação a 3 fios pode ser visto na Fig. 56.

Figura 56 – Sensor PT100 com ligação a 3 fios



Fonte: Autoria própria

Já o TT302 encarregado por mensurar a temperatura do tanque de mistura, utiliza um termopar tipo J com ligação convencional, sem utilizar nenhuma técnica de compensação. O termopar presente na planta pode ser visto na figura 57.

Figura 57 – Termopar J



5. LD302 - É um transmissor utilizado para medir pressão diferencial, absoluta e manométrica, de nível e de vazão. O transmissor possui um sensor capacitivo que possibilita operar de forma segura com excelente desempenho em campo, já que este possui uma tecnologia muito confiável por não possuir oscilação mecânica e oscilação magnética. A tecnologia digital usada no LD302 possibilita que haja escolha de vários tipos de funções de transferência, um interfaceamento simples entre o campo e a sala de controle e algumas características que diminuem significativamente a instalação, operação e os custos de manutenção (SMAR, 2014d) (SMAR, 2014f). A planta SMAR PD3 possui três LD302, um para medir o nível da água no tanque de aquecimento e os outros dois são responsáveis por medir a vazão. O LD302 utilizado pode ser visto na Fig. 58, assim como suas especificações técnicas podem ser vistas na Tabela 10:

Figura 58 – LD302



Tabela 10 – Especificação técnica LD302

Fluido de Processo	Líquido, gás ou vapor
Corrente de Saída	Somente digital. De acordo com IEC 61158-2:2000 (H1): 31,25 kbit/s, com alimentação pelo barramento
Alimentação	Fonte de alimentação pelo barramento: 9 - 32 Vdc. Corrente quiescente: 12 mA
Tipo	sensor capacitivo com leitura digital
Rangeabilidade	120:1
Exatidão	0,075%
Range	de 0 - 125 Pa a 0 - 40 MPa (de 0 - 1/2" a 0 - 5800 psi)
Certificações	À prova de tempo e explosão; Intrinsecamente Seguro
Ajuste de Zero e Span	Não interativo. Via comunicação digital.
Alarme de Falha (Diagnósticos)	Para falhas no circuito do sensor, eventos são gerados e o status é propagado para saída dos blocos funcionais de acordo com a estratégia. Diagnósticos detalhados estão disponíveis nos parâmetros internos dos blocos funcionais.
Tempo para Iniciar Operação	Opera dentro das especificações em menos de 10 segundos após a energização do transmissor
Configuração	Configuração básica pode ser feita através do uso de ajuste local com chave magnética se o equipamento for provido de <i>display</i> . A configuração completa é possível através do uso de ferramentas de configuração

6. FY302 - A planta SMAR PD3 possui dois FY302, um para controlar a posição de uma válvula que por sua vez vai controlar o fluxo de água no tanque de aquecimento e o outro para controlar a posição da outra válvula que controla o fluxo no tanque de mistura. O FY302 é um posicionador Fieldbus para válvulas de controle linear, ação simples (retorno por mola) ou ação dupla como, por exemplo: globo, gaveta, diafragma. Válvulas rotativas como: esfera, borboleta ou plugado com atuadores pneumáticos como: diafragma, pistão. O FY302 é baseado no bico-palhaeta, bastante popular pelo uso no campo e no sensor de posição por efeito Hall, sem contato físico, que fornece alto desempenho e operação segura. A tecnologia digital aplicada no FY302 permite selecionar vários tipos de característica de vazão, uma interface simples entre o campo e a sala de controle e muitas características inovadoras que

reduzem bastante o custo de instalação, operação e manutenção (SMAR, 2014d) (SMAR, 2014c). A Fig 59 ilustra o FY302 utilizado na planta SMAR PD3, a Tabela 12 apresenta as especificações funcionais e a Tabela 11 as especificações de performance:

Figura 59 – FY302

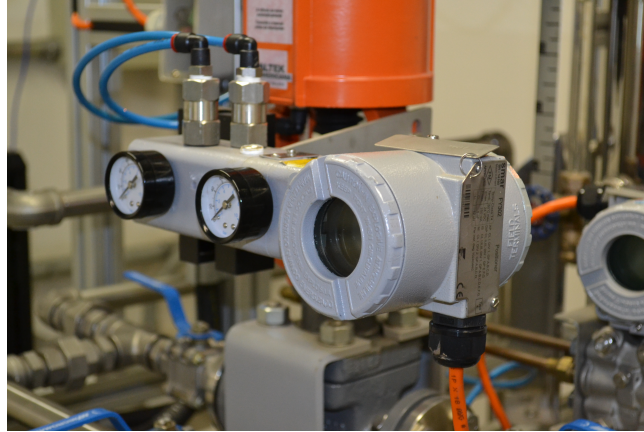


Tabela 11 – Especificação de performance FY302

Resolução	$\leq 0,1\%$ do Fundo de Escala
Repetibilidade	$\leq 0,1\%$ do Fundo de Escala
Histerese	$\leq 0,1\%$ do Fundo de Escala
Capacidade de saída	3,6 Nm ³ /h (8 SCFM) para 5,6 (80 psi) da fonte

Tabela 12 – Especificação funcional FY302

Curso	Movimento Linear: 3 a 100 mm Movimento Rotativo: 30° a 120°
Sinal de entrada	<i>Fieldbus</i> , somente digital, modo de tensão 31,25 Kbits/s com alimentação pelo barramento
Fonte de alimentação	Alimentado pelo Barramento: 9 a 32 Vdc. Impedância de Saída na frequência de 7,8 kHz a 39 kHz: Intrinsecamente seguro: $\geq 400\Omega$ (com barreira de segurança intrínseca na fonte de alimentação); Sem segurança intrínseca: $\geq 3\text{ k}\Omega$
Suprimento de ar	1,4 a 7 bar (20 a 100 psi) livre de óleo, sujeira e água
Indicador digital	<i>Display</i> de Cristal Líquido rotativo, com $4\frac{1}{2}$ dígitos numéricos e 5 caracteres alfanuméricos. Indicação de Função e Status(opcional)
Certificações em Área Classificada	A prova de explosão e intrinsecamente seguro (ATEX (NEMKO e DEKRA EXAM), FM, CEPEL, CSA e NEPSI). Projetado para atender as Diretivas Europeias (Diretiva ATEX 94/9/EC, Diretiva LVD 2006/95/EC, EMC e PED)
Tempo de inicialização	Aproximadamente 10 segundos
Tempo de atualização	Aproximadamente 0,5 segundo
Característica de vazão	Linear, igual porcentagem, abertura rápida ou configuração do usuário através da comunicação Fieldbus (como exemplo: PC ou chaves de ajuste local)
Ganho	Ajustável localmente ou via comunicação
Tempo de curso	Ajustável localmente ou via comunicação
Sensor de posição	Ímã (sem contato), por efeito Hall

Atuadores

1. Bombas Hidráulicas - A planta SMAR PD3 possui duas bombas hidráulicas. Elas são responsáveis por realizar a circulação de água pelas tubulações e nos dois tanques, o tanque de aquecimento e o tanque de mistura. O projeto foi construído para que cada uma delas possa bombear a água para o seu respectivo tanque, porém se houver a parada ou retirada de uma das bombas para manutenção, é possível haver circulação nos dois tanques da planta utilizando apenas uma bomba após manobra

de algumas das válvulas manuais.

A planta possui dois tanques, um em cada malha de controle. O tanque da malha 1 é denominado tanque de aquecimento e o tanque da malha 2 é chamado tanque de mistura. A bomba do tanque de aquecimento é monofásica e trabalha sempre com valor nominal de frequência. A Fig. 60 ilustra a bomba monofásica, responsável por abastecer o tanque de aquecimento. A Fig. 61, mostra as especificações da mesma:

Figura 60 – Bomba hidráulica monofásica



Figura 61 – Especificações bomba hidráulica monofásica



A bomba utilizada no tanque de mistura, é uma bomba trifásica. A planta possui um inversor de frequência que permite realizar regulagens na bomba trifásica. Então, utilizando o inversor, é possível controlar a frequência de trabalho da bomba para variar a quantidade circulação de água. A Fig. 62 ilustra a bomba trifásica, responsável por abastecer o tanque de mistura. A Fig.63 mostra as especificações da mesma:

Figura 62 – Bomba hidráulica trifásica



Figura 63 – Especificações da bomba hidráulica trifásica



2. Válvulas de controle - Na planta didática SMAR PD3 existem duas válvulas de controle do tipo globo que são responsáveis pelo controle do fluxo de água na planta. As válvulas são da fabricante Valtek Sul-americana e suportam 5,5 bar (80psi) de pressão de suprimento de ar. A Fig. 64 ilustra o modelo de válvula utilizada na planta didática SMAR PD3:

Figura 64 – Válvula de controle



3. Resistência de imersão - A planta SMAR PD3 possui duas resistências que ficam imersas no tanque de aquecimento e provocam o aquecimento da água do tanque. Ficam ativas somente quando a chave de nível detecta que o tanque está cheio de água, para evitar o superaquecimento da resistência e consequentemente que a mesma estrague. Também possui um equipamento para regular a temperatura das resistências, possibilitando realizar a regulagem da temperatura de acordo com o valor desejado. Os dados do regulador de temperatura utilizado podem ser vistos na Tabela 13 e a Fig. 65 ilustra o regulador de temperatura juntamente com as duas resistências de imersão utilizadas na planta SMAR PD3:

Figura 65 – Regulador de temperatura e duas resistências de imersão



Tabela 13 – Parâmetros do regulador de temperatura

Parâmetros	
Marca	Ashcroft
Mod. catálogo	T4 61 T5 040 69M XFS
Cap. eletrolítico	15A 125/250 VCA
Faixa	25/95°C
Material	316 ST.ST

Protocolo de comunicação

A planta SMAR PD3 utiliza o protocolo de comunicação *Foundation Fieldbus*, que é um protocolo que foi desenvolvido por várias empresas que constituíram o *FieldbusFoundation*. Os participante do desenvolvimento deste protocolo, foram aqueles participantes dos Comitês Internacionais do IEC que buscavam um único padrão internacional totalmente distribuído. Possui comunicação baseada em produtor/consumidor, cliente/servidor. Na atualidade, possui duas especificações diferentes de barramento, o HSE e o H1 (FOUNDATION, 2016). Segundo (SMAR, 2014e), HSE possui alta velocidade utilizado para automação avançada e H1 possui baixa velocidade para controle do processo.

Uma particularidade é que para o controle ser distribuído, ele teve que ser implementado com estruturas de subprogramas padronizados para que pudessem ser executados em qualquer dispositivo. Essas estruturas são conhecidas como blocos funcionais (FOUNDATION, 2016).

Foundation Fieldbus é um protocolo digital que oferece comunicação digital de via dupla em modo multi-ponto entre os equipamentos de chão-de-fábrica, sistemas de automação e de visualização. É essencialmente uma rede local (LAN) para os equipamentos de campo utilizados em automação industrial (SMAR, 2014e). Devido às características que foram citadas, o protocolo *Foundation Fieldbus* proporciona várias vantagens como a redução da quantidade de cabos utilizados para interligar os equipamentos, redução de hardware, possui barreiras de segurança com repetidor interno com distâncias de até mil metros por segmento, maior flexibilidade, maior integração entre as informações de controle e de instrumento e confiabilidade dos dados (SMAR, 2014e).