

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

DOUGLAS ANTONIO LAVANHOLI

Controle de temperatura com compensador de tempo morto

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

DOUGLAS ANTONIO LAVANHOLI

Controle de temperatura com compensador de tempo morto

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina TCC, do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Marcos Agulhari

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia de Controle e Automação

FOLHA DE APROVAÇÃO

Douglas Antonio Lavanholi

Controle de temperatura com compensador de tempo morto

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:00hs do dia 04/06/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação no programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Kleber Romero Felizardo - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Emerson Ravazzi Pires da Silva - (Membro)

RESUMO

LAVANHOLI, Douglas Antonio. **Controle de Processos com compensador de tempo morto**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Este trabalho consiste no projeto e implementação de controladores, considerando o efeito de tempo morto. Os controles foram implementado na malha de temperatura da planta industrial didática FESTO. O compensador a ser utilizado será baseado no preditor de Smith, acoplado a um controle PI. O sistema utilizado para realizar o controle foi modelado em três configurações, tendo em cada configuração uma quantidade de água diferente no recipiente do sistema. Foi aplicado o preditor de Smith em cada configuração do sistema, os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos na implementação do controle PI que considera o tempo morto em sua sintonia.

Palavras-chave: Controle de Processos. Tempo morto. Preditor de Smith.

ABSTRACT

LAVANHOLI, Douglas Antonio. **Process control with dead time compensator.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

This work consists of the design and implementation of controllers, considering the dead time effect. The controls were implemented in the temperature mesh of the FESTO didactic industrial plant. The compensator to be used will be based on the Smith reporter, coupled to a PI control. The system used to perform the control was modeled in three configurations, having in each configuration a different amount of water in the system container. The Smith predictor was applied to each set up of the system, the results obtained were compared with the results obtained in the implementation of the PI control that considers the dead time in its tuning.

Keywords: Process control. Dead time. Smith Predictor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de controle com preditor de Smith.....	11
Figura 2 – Preditor de Smith em sua forma ideal.....	13
Figura 3 – Resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem.....	17
Figura 4 – Planta FESTO.....	19
Figura 5 – Representação do sistema de controle.....	20
Figura 6 – Resposta do sistema ao degrau.....	24
Figura 7 – Resposta do sistema ao degrau deslocado no eixo Y.....	25
Figura 8 – Resposta do sistema real com sistema modelado.....	28
Figura 9 – Simulação do controle PI com ganho $Tc = L$	32
Figura 10 – Simulação do controle PI com ganho $Tc = 2L$	33
Figura 11 – Simulação do controle baseado no preditor de Smith com polo (0,01).....	36
Figura 12 – Simulação do controle baseado no preditor de Smith com polo (0,001).....	37
Figura 13 – Bloco PID VI.....	38
Figura 14 – Controle PI	40
Figura 15 – Bloco Math Script.....	41
Figura 16 – Bloco Integer delay.....	42
Figura 17– Controle baseado no preditor de Smith.....	43
Figura 18 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $Tc = L$, configuração 1.....	44
Figura 19 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $Tc = 2L$, configuração 1.....	45
Figura 20 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $Tc = L$, configuração 2.....	46
Figura 21 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $Tc = 2L$, configuração 2.....	47
Figura 22 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $Tc = L$, configuração 3.....	48
Figura 23 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $Tc = L$, configuração 3.....	49
Figura 24 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $kc = 0, 305$, para a configuração 1.	50
Figura 25 – Erro $ep(t)$, realimentação do sistema $yp(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de	

realimentação $yp(t)$ com $kc = 0, 305$ para a configuração 1.....	51
Figura 26 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $kc = 3, 05$, para a configuração 1...	52
Figura 27 – Erro $ep(t)$, realimentação do sistema $yp(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de realimentação $yp(t)$ com $kc = 3, 05$ para a configuração 1.....	53
Figura 28 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $kc = 0, 4967$ para a configuração 2.....	54
Figura 29 – Erro $ep(t)$, realimentação do sistema $yp(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de realimentação $yp(t)$ com $kc = 0, 4967$ para a configuração 2.....	55
Figura 30 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $kc = 4, 967$ para a configuração 2..	56
Figura 31 – Erro $ep(t)$, realimentação do sistema $yp(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de realimentação $yp(t)$ com $kc = 4, 967$ para a configuração 2.....	57
Figura 32 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $kc = 0, 755$ para a configuração 3..	58
Figura 33 – Erro $ep(t)$, realimentação do sistema $yp(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de realimentação $yp(t)$ com $kc = 0, 755$ para a configuração 3.....	59
Figura 34 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $kc = 7, 55$ para a configuração 3....	60
Figura 35 – Erro $ep(t)$, realimentação do sistema $yp(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de realimentação $yp(t)$ com $kc = 7, 55$ para a configuração 3.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ações dos controladores proporcional, integrativo e derivativo.....	15
Tabela 2 – Valores de Tempo morto, valor deslocado do sistema e valor de regime do sistema deslocado.....	26
Tabela 3 – Função de transferência para as configurações 1,2 e 3.....	29
Tabela 4 – Parâmetros do controlador PI.	32
Tabela 5 – Parâmetros do controlador PI para o preditor de Smith.....	35
Tabela 6 – Resultados dos controles PID aplicados para cada configuração do sistema.....	63
Tabela 7 – Resultados dos controles baseado no preditor de Smith aplicados para cada configuração do sistema.....	64
Tabela 8 – Comparação entre os controle aplicados na configuração 1.....	65
Tabela 9 – Comparação entre os controle aplicados na configuração 2.....	66
Tabela 10 – Comparação entre os controle aplicados na configuração 3.....	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Problema	8
1.2 Justificativa	8
1.3 Objetivos	9
1.3.1 Objetivo geral.....	9
1.3.2 Objetivos específicos	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	10
2.1 Preditor de Smith	10
2.1.1 Preditor de Smith clássico	10
2.2 Controlador PID	13
2.3 Sintonia de controladores	15
2.3.1 sintonia do controle PI	15
2.3.2 Sintonia do controle baseado no Preditor de Smith	16
2.4 Sistema de primeira ordem	16
3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	19
3.1 Planta industrial didática	19
3.2 LabVIEW	21
3.3 CompactRIO	22
4 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA	23
5 SINTONIA DOS CONTROLADORES	30
5.1 Sintonia do controlador PID	30
5.2 Sintonia do controlador do preditor de Smith	34
6 IMPLEMENTAÇÃO DOS CONTROLADORES	38
6.1 Implementação do controle PI	38
6.2 Implementação do controle baseado no preditor de Smith	41
7 RESULTADOS	44
7.1 Resultados obtidos com o controle PID	44
7.2 Resultados obtidos com o controle baseado no preditor de Smith	49
8 ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
8.1 Análise dos resultados obtidos com o controle PID	62
8.2 Análise dos Resultados obtidos com o controle baseado no preditor de Smith	63
8.3 Comparação entre os controles para cada configuração	65

9 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

No ambiente industrial é comum haver processos que utilizam alguma forma de automação em atuadores (válvulas, motores elétricos, bombas de água) para poder cumprir com objetivos requeridos. Para Castrucci (2011) o significado de controlar uma variável de um sistema de controle está relacionado com a alteração do valor da mesma para poder cumprir com alguma intenção proposta.

Para realizar o controle de processos é preferível modelar o comportamento do sistema a partir de hipóteses sobre sua dinâmica. De maneira geral, os sistemas podem ser classificados como lineares ou não-lineares. Uma definição para sistemas lineares é dada por Ogata (2003), que afirma que um sistema será dito linear se o mesmo respeitar o princípio da superposição, ou seja, a resposta desse sistema a uma combinação linear de entradas pode ser encontrada realizando a mesma combinação linear de cada resposta obtida para cada entrada.

Sistemas não lineares podem ser representados por equações diferenciais não lineares. Quando analisamos sistemas físicos, podemos dizer que estes possuem ao menos uma não linearidade em um determinado ponto. Quando nos deparamos com sistemas de controle que possuem uma não linearidade consideravelmente reduzida, ou seja, as não linearidades do sistema são suaves, é possível realizar uma linearização no sistema. Tal processo consiste em uma aproximação do sistema, tendo assim sua dinâmica representada por equações diferenciais lineares (SLOTINE; WEIPING, 1991).

Em sistemas de controle industriais, é muito comum encontrarmos processos que possuem efeitos de tempo morto em seu sistema. O tempo morto é o tempo que o sistema propaga a variação de sua saída para uma determinada entrada realimentada. Quando o controlador envia um sinal para o atuador, os resultados desta ação aparecem somente após um determinado tempo, ou seja, haverá um atraso para obter os resultados da ação do atuador. Possíveis causas de efeito de tempo morto em um sistema são atrasos no tempo de transporte de massa, energia ou até mesmo informação (NORMEY-RICO; CAMACHO, 2007).

O tempo morto em um sistema pode dificultar o controle e análise de seu comportamento. Como exemplos de sistemas que possuem atraso de transporte, podem-se citar processos que realizam controle de temperatura, tendo como atuador uma resistência. Quando se deseja aquecer o líquido no recipiente é

necessário aplicar uma tensão na resistência, porém é necessário esperar algum tempo para que o líquido aqueça. Esse tempo necessário para o líquido absorver o calor transmitido pela resistência é o tempo morto do sistema. Este tempo morto, caso não considerado no momento do projeto do controlador pode, no pior caso, levar o sistema à instabilidade.

O presente trabalho pretende realizar o controle de temperatura que possui tempo morto em uma planta didática industrial da FESTO, utilizando o *software* de programação gráfica LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Enginnering Workbench*) e pelo PAC (*Programable Automation Controller*) CompactRIO (RIO – *Reconfigurable Inputs and Outputs*). A ferramenta utilizada para compensar os efeitos do tempo morto será o preditor de Smith.

1.1 Problema

O tempo morto presente no sistema de controle de temperatura dificulta a estabilização do sistema quando o mesmo segue uma determinada referência. O trabalho realizado por Lucas (2016) foi feito baseado no controle robusto no sistema multivariável (malha de mistura) e serviu como motivação para a realização deste trabalho. A malha de mistura utilizado em Lucas (2016) é um sistema que possui o controle de temperatura afetado pelo tempo morto. Neste trabalho o tempo morto afetou na estabilização do sistema quando o mesmo seguia uma determinada referência, causando uma oscilação no sistema.

Os mesmos problemas encontrado no trabalho do Lucas (2016), são presentes também na malha de controle de temperatura a ser utilizado neste trabalho.

1.2 Justificativa

Considerar o tempo morto presente em um sistema de controle pode melhorar seu desempenho em malha fechada. O preditor de Smith é uma das técnicas de compensação de tempo morto mais populares nessa área e foi desenvolvido no ano de 1957 (NORMEY-RICO; CAMACHO, 2007).

A implementação do controle de temperatura levando em consideração o tempo morto é proposto neste trabalho pelo fato de não ter sido realizado nenhum

estudo referente a isso na planta didática FESTO, e pelo fato do controle de temperatura ser muito importante em muitos processos como na malha de mistura e em processos de aquecimento de caldeiras.

A planta didática industrial da FESTO pode ser utilizada para representar sistemas que estão presentes nas indústrias, como por exemplo: controle de nível, de temperatura ou de pressão. Tal planta pode também representar sistemas mais complexos como sistemas multivariáveis (MIMO). A escolha desta planta está relacionada com o fato de se poder implementar sistemas de controle para obter resultados que seriam próximos aos que são aplicados na indústria.

O controle da planta é feito utilizando o controlador CompactRIO, que utilizado para realizar o controle dos atuadores da planta e para realizar a aquisição de dados. Possui módulos de entradas e saídas digitais e analógicas, assim como módulos termopares. A programação do controlador CompactRIO é feita através do *software* LabVIEW, que utiliza uma linguagem gráfica intuitiva.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Realizar o controle da malha de temperatura da planta FESTO, considerando o tempo morto existente no processo.

1.3.2 Objetivos específicos

A seguir estão listados os objetivos específicos:

- Realizar a modelagem da malha de temperatura da planta FESTO;
- Identificar o tempo morto presente na malha de temperatura para 3 volumes de água no recipiente do sistema;
- Realizar a implementação do controle de temperatura utilizando o preditor de Smith
- Analisar o comportamento do preditor de Smith para o controle de temperatura com tempo morto comparando-o com o controle utilizando o PID com tempo morto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

Neste capítulo serão apresentados os principais tópicos teóricos que serão utilizados para a elaboração do trabalho. Serão apresentados os conceitos básicos relacionados ao funcionamento do preditor de Smith, sistemas de primeira ordem, os controlador a ser utilizado e a sintonia destes controladores.

2.1 Preditor de Smith

O preditor de Smith é um tipo de controle preditivo. De acordo com Castrucci (2011), o preditor de Smith foi proposto em 1957, por J.M.Smith, e seu funcionamento visa estabilizar sistemas que possuem atraso de transporte.

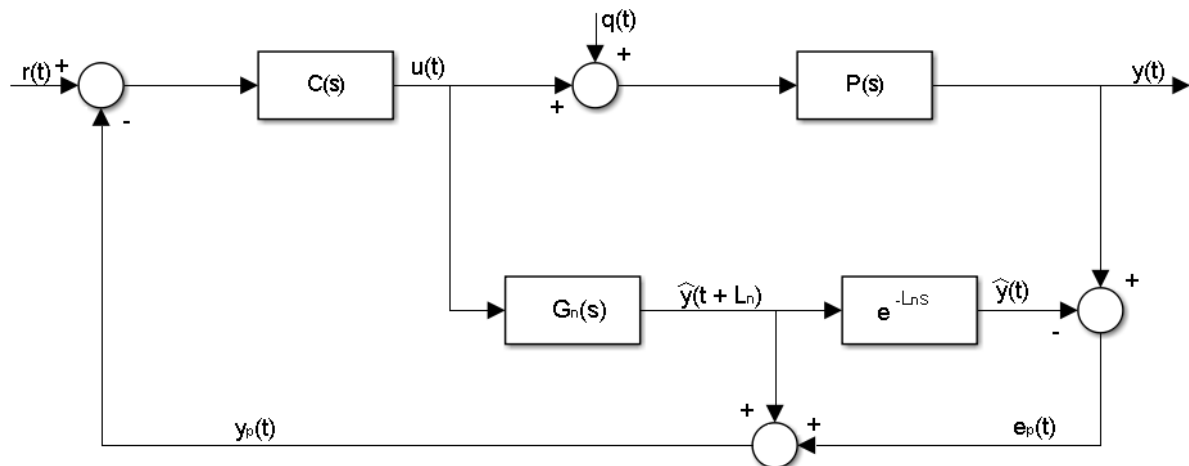
O preditor de Smith pode ser encontrado em sua forma clássica, conhecido com preditor de Smith clássico, também podemos encontrar o preditor trabalhando com filtros, conhecido como preditor de Smith filtrado. O preditor de Smith clássico e filtrado são as estruturas mais comuns a serem utilizadas, porém existem outras estruturas como preditor de Smith robusto. Para este trabalho será utilizado o preditor de Smith clássico.

2.1.1 Preditor de Smith clássico

O preditor de Smith clássico é utilizado em sistema que possuam tempo morto. Sua estrutura de funcionamento é mostrada na Figura 1.

A estrutura do sistema de controle com preditor de Smith é composta por um controlador primário $C(s)$, a planta do sistema de controle sem o tempo morto $G_n(s)$, a representação do operador do tempo morto e^{-Lns} , o processo real do sistema a ser controlado que possui o tempo morto representado por $P(s)$, e $q(t)$ uma possível perturbação.

Figura 1 – Sistema de controle com preditor de Smith



Fonte: (NORMEY-RICO; CAMACHO, 2007).

A perturbação mostrada na Figura 1 é utilizada para sistemas que podem sofrer algum tipo de perturbação, como não são todos os sistemas que consideram a existência de um possível sinal que possa ocasionar uma perturbação no sistema este será considerado como tendo um valor 0.

O controlador principal do preditor de Smith tipicamente é utilizado um PID, porém podem ser utilizados outros controladores. O sinal $u(t)$ do controlador é enviado para a planta que representa o sistema real $P(s)$ e para a representação do sistema sem o tempo morto $G_n(s)$. O modelo $G_n(s)$ é uma representação matemática do sistema real, desta forma, deve ser realizada uma modelagem matemática do sistema que melhor represente o sistema real.

Quando $P(s)$ recebe o sinal do controlador, produz uma saída $y(t)$. Tal saída, devido a $P(s)$ ser uma representação do sistema real, é afetada pelo tempo morto. Por outro lado, a saída produzida por $G_n(s)$ é diferente da saída produzida por $P(s)$ pelo fato da estrutura de $G_n(s)$ não possuir o tempo morto, então a saída produzida será $\hat{y}(t + L_n)$, ou seja, a saída produzida por $G_n(s)$ é adiantada em L_n que representa o tempo morto existente no sistema modelado. Pode-se dizer, que a saída produzida por $G_n(s)$ é uma predição da saída do sistema.

A saída do bloco $G_n(s)$ é enviada para o bloco $e^{-L_n s}$ que representa o tempo morto do sistema, desta forma, a saída do bloco $G_n(s)$ que era $\hat{y}(t + L_n)$ torna-se $\hat{y}(t)$. É calculado um sinal de erro entre a saída do sistema real e a saída do sistema modelado, $y(t)$ e $\hat{y}(t)$. É calculado este sinal de erro pelo fato de existir a

possibilidade do sistema modelado não ser fiel ao modelo real, desta forma, se houver algum erro, o mesmo será enviado para o sinal de realimentação do sistema. O sinal $y_p(t)$ é a soma da saída $\hat{y}(t + L_n)$ com $e_p(t)$, e é utilizado como realimentação do sistema.

Se a modelagem do sistema $G_n(s)$ não houver erros de modelagem, e o tempo morto $e^{-L_n s}$ for modelado de forma correta, a diferença entre a saída do sistema real $y(t)$ e a saída do sistema modelado $\hat{y}(t)$ serão nulas. Desta forma o sinal $y_p(t)$ será composto apenas por $\hat{y}(t + L_n)$. A realimentação do sistema não terá a presença do tempo morto pois eles se anulam, pelo fato do sinal $e_p(t)$ ser zero. Por este motivo, o controlador $C(s)$ pode ser modelado, baseado no sistema da planta sem o tempo morto $G_n(s)$ (NORMEY-RICO; CAMACHO, 2007).

A função de transferência que representa o sistema é dada por:

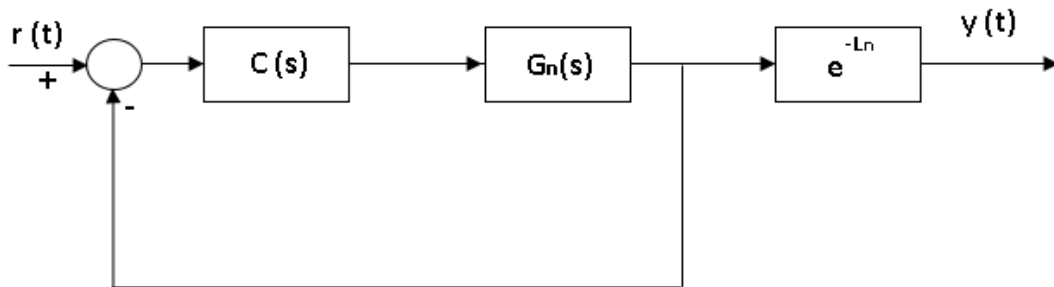
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)[P(s)-G_n(s)e^{-L_n s}+G_n(s)]} \quad (1)$$

Considerando o sistema modelado igual ao modelo real, ou seja, $P(s) = G_n(s)e^{-L_n s}$, então o sinal de erro $e_p(t)$ será zero. Como consequência, a equação que representa o sistema será:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)G_n(s)} \quad (2)$$

Quando o preditor de Smith possui sua estrutura igual à da equação (2), seu funcionamento é considerado como sendo o controle de tempo morto ideal, Figura 2.

Figura 2– Preditor de Smith em sua forma ideal.



Fonte: (NORMEY-RICO; CAMACHO, 2007).

2.2 Controlador PID

A estrutura do algoritmo clássico PID tem demonstrado praticidade e eficiência no controle de processos industriais. O controlador PID é composto por três ações: Proporcional, Integrativo e Derivativo, composto por parâmetros que podem ser de fácil ajuste (CASTRUCCI, 2011).

O modelo matemático que representa o controlador PID é dado por

$$u(t) = K_P \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

Onde:

$u(t)$: sinal de saída do controlador

$e(t)$: sinal de entrada do controlador

K_P : parâmetros de ajuste do controlador Proporcional

T_I : tempo integrativo

T_D : tempo derivativo

Aplicando Laplace temos

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (4)$$

A ação proporcional é representada pela equação (5)

$$u(t) = K_p e(t) \quad (5)$$

A ação proporcional aumenta a aceleração da resposta do sistema. Se analisarmos o erro estacionário para pequenos valores de K_p o erro estacionário é grande, para valores de K_p grandes o erro estacionário é pequeno (CASTRUCCI, 2011).

A ação integrativa é representada pela equação (6)

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (6)$$

Onde $K_i = \frac{K_p}{T_i}$.

A principal característica do controlador integrativo é que pode reduzir ou eliminar o erro estacionário, possibilita ainda a rejeição de possíveis perturbações na saída do sistema (AGUIRRE, 2007).

O atraso de fase gerado pelo integrador pode piorar a estabilidade do sistema (CASTRUCCI, 2011).

A ação derivativa é representada pela equação (7).

$$u(t) = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

A ação derivativa é utilizada para melhorar o comportamento dinâmico do sistema em malha fechada. Se o sinal do erro em regime permanente for constante, a ação derivativa não atuará nesse erro (AGUIRRE, 2007).

O avanço de fase gerado pelo termo derivativo melhora a estabilidade do sistema (CASTRUCCI, 2011).

Chamamos de controlador PID quando temos as três ações atuando juntas, porém podemos encontrar outros tipos de estruturas, como por exemplo, o controlador proporcional (P), controlador proporcional integrativo (PI), e o controlador proporcional integrativo derivativo (PID).

Os efeitos independentes dos controladores proporcional, integrativo e derivativo sobre a saída do sistema, podem ser analisados na Tabela 1.

Tabela 1 – Ações dos controladores proporcional, integrativo e derivativo.

Controlador	Tempo de subida	Sobressinal	Tempo de assentamento	Erro em regime	Estabilidade
Proporcional	Decresce	Aumenta	Aumenta pouco	Decresce	Degrada
Integrativo	Decresce pouco	Aumenta	Aumenta	Decresce muito	Degrada
Derivativo	Decresce pouco	Decresce	Decresce	Influi pouco	Melhora

Fonte: LI; CHONG (2006).

2.3 Sintonia de controladores

Nesta seção serão apresentados os métodos escolhidos para realizar a sintonia dos controladores. Serão utilizados 2 controladores, o primeiro será um controle PI e o segundo um controle baseado no preditor de Smith.

2.3.1 sintonia do controle PI

O controle PI será sintonizado pelo método de SIMC (*Skogestad Internal Model Control*). Desenvolvido por Skogestad e é utilizado para o ajuste de controladores PI e PID (CASTRUCCI, 2011).

Considerando um sistema de primeira ordem dado por

$$P(s) = \frac{Ae^{-Ls}}{Ts+1} \quad (8)$$

Sendo o controle PI dado por

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (9)$$

Onde

$$K_p = \frac{T}{A(T_c+L)} \quad (10)$$

e

$$T_i = \min\{T, 4(T_c + L)\}. \quad (11)$$

Podemos considerar T_c uma constante do sistema onde seu valor pode ser escolhido entre $T_c = L$ ou $T_c = 2L$.

2.3.2 Sintonia do controle baseado no Preditor de Smith

O Controle baseado no preditor de Smith utiliza um controlador principal $C(s)$ como mostrado na Figura 1. Neste trabalho será utilizado como controlador principal para o preditor de Smith um PI. A ordem do controlador depende da ordem de $G_n(s)$. Neste trabalho o sistema $P(s)$ é de primeira ordem, por este motivo será utilizado um controlador principal um PI.

$$P(s) = \frac{Ae^{-Ls}}{Ts+1} \quad G_n = \frac{A}{Ts+1}$$

$$C(s) = \frac{K_p(1+T_i s)}{T_i s}$$

Considerando o sistema em malha aberta, podemos cancelar um dos polos fazendo $T_i = T$, desta forma a equação característica do sistema será

$$1 + C(s)G_n(s) = 1 + \frac{A}{Ts+1} \frac{K_p(1+T_i s)}{T_i s} = 1 + \frac{K_p A}{T_s} \quad (12)$$

Podemos definir a função de transferência do sistema em malha fechada, para facilitar a representação, podemos considerar

$$T_0 = \frac{T}{K_p A} \quad (13)$$

Desta forma,

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G_n(s)}{1+C(s)G_n(s)} e^{-Ls} \quad (14)$$

Definindo assim

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{1+T_0 s} e^{-Ls} \quad (15)$$

Podendo assim definir o parâmetro T_0 de acordo com a performance desejado do sistema em malha fechada (NORMEY-RICO; CAMACHO, 2007).

2.4 Sistema de primeira ordem

A função de transferência do sistema de primeira ordem é representado pela equação (16).

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{A}{Ts+1} \quad (16)$$

Onde T é a constante de tempo do sistema.

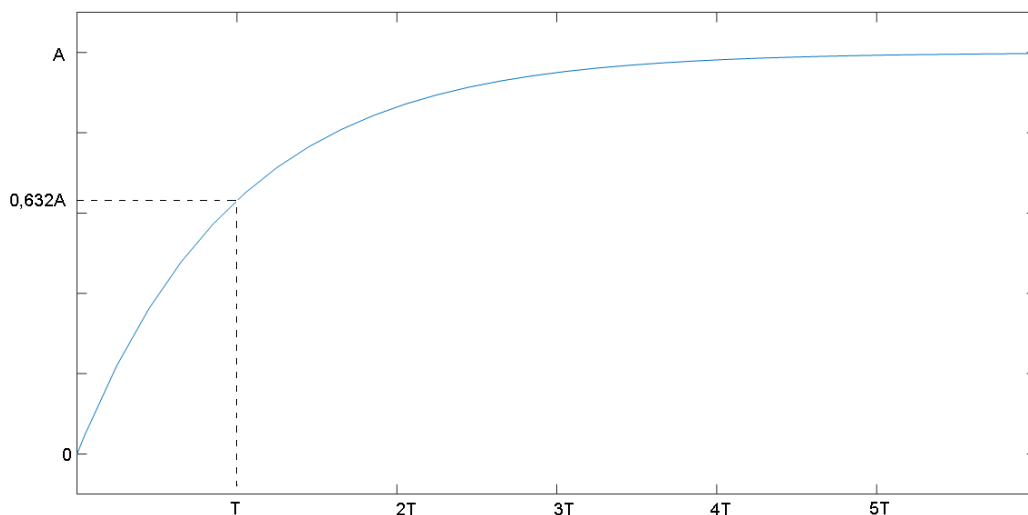
O sistema pode ser determinado utilizando um método conhecido como resposta ao degrau. Considerando como entrada do sistema um degrau unitário $u = 1/s$, a resposta do sistema de primeira ordem para o degrau unitário é,

$$Y(s) = \frac{A}{s(Ts+1)} = \frac{\frac{A}{T}}{s\left(s+\frac{1}{T}\right)} = \frac{A}{s} - \frac{A}{s+\frac{1}{T}} \quad (17)$$

Sendo A o valor de regime do sistema.

Na resposta ao degrau, a constante de tempo T é encontrada quando o sistema possui 63,2% de seu valor e regime, ou seja, $y(T) = 0,632A$.

Figura 3 – resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem.



Fonte: (CASTRUCCI, 2011).

A constante de tempo é o instante em que a principal parte da energia do sistema já ocorreu. Quanto menor for a constante de tempo, mais rápida será a resposta do sistema (CASTRUCCI, 2011).

Quando o sistema se encontra no instante $2T$ possui 86,47% do valor final, no instante $3T$ equivale a 95,02% do valor final, no instante $4T$ é equivalente a 98,17% do valor final e em $5T$ equivale a 99,33% do valor final.

Em sistemas de primeira ordem podemos ainda identificar o tempo de subida do sistema e o tempo de acomodação. O tempo de subida é o tempo necessário para o sistema ir de 10% até 90% do valor final. O tempo de

acomodação é o tempo para que a resposta fique entre uma faixa de 2% do valor final, aproximadamente no instante $4T$.

Utilizando a equação (16), podemos representar um sistema de primeira ordem com tempo morto pela equação (18).

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = e^{-Ls} \frac{A}{(Ts+1)} \quad (18)$$

A equação (17) representa a resposta do sistema de primeira ordem para um degrau unitário.

Para um degrau de amplitude 2 a equação (17) se torna,

$$Y(s) = \frac{2A}{s(Ts+1)} = \frac{2A}{s} - \frac{2A}{(s+\frac{1}{T})} \quad (19)$$

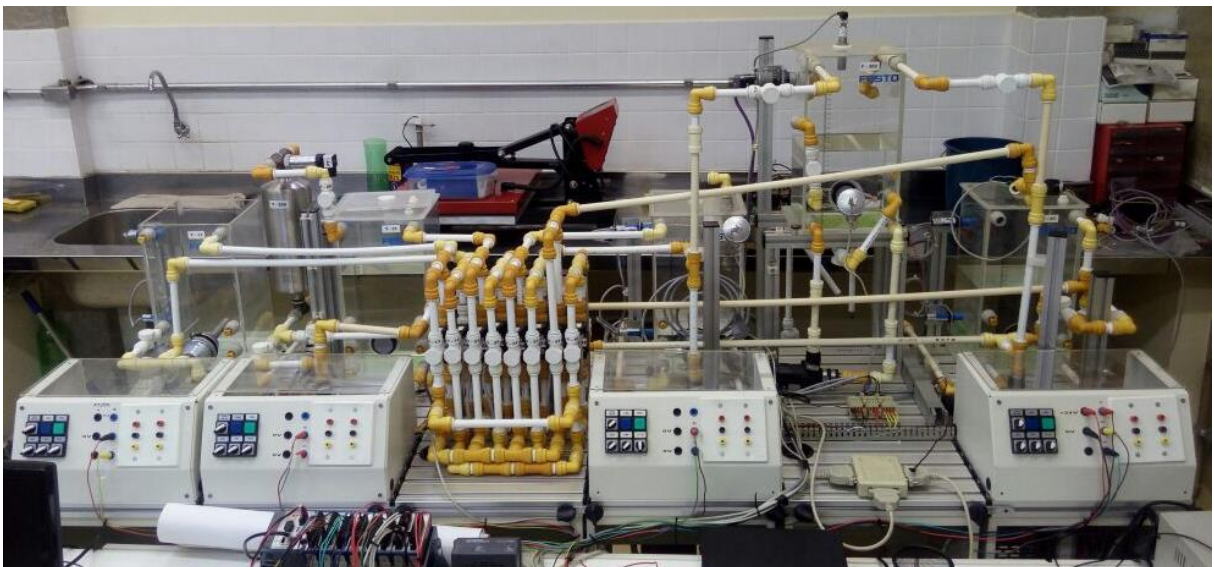
3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Neste capítulo será apresentada a planta industrial didática que será utilizada para implementação do trabalho, o *software* utilizado para programação, e o controlador utilizado para controlar a planta.

3.1 Planta industrial didática

A Figura 4 mostra a estrutura atual da planta didática Festo.

Figura 4 – Planta FESTO

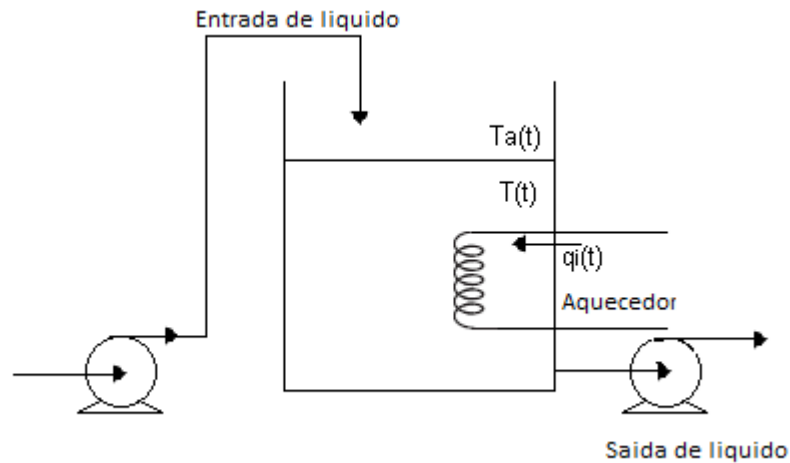


Fonte: Autoria própria

A planta didática FESTO possui uma malha que realiza o controle de temperatura. A malha de controle de temperatura é composta por um reservatório que possui um sensor de temperatura e uma resistência elétrica controlável, uma entrada de água, e uma saída ligada a uma bomba centrífuga que pode deslocar água do recipiente da malha de temperatura para outro recipiente. A quantidade de calor produzida pela resistência, bem como a variação do fluxo de fluido de entrada e saída, são controladas pelo controlador CompactRIO. O transporte de calor para todo o líquido presente no recipiente não é instantâneo, desta forma o sistema possui um atraso no transporte de calor. Este atraso de transporte é o tempo morto presente no sistema. O tempo morto pode variar conforme a posição da resistência elétrica e do sensor de temperatura no recipiente, dificultando ainda mais o controle.

Neste trabalho será utilizada a primeira malha de controle de temperatura descrita. Esta malha é representado na Figura 5.

Figura 5 – Representação do sistema de controle.



Fonte: Autoria própria

Considere um sistema com um fluxo de calor q_i sendo fornecido para um recipiente, sendo T_p a variável da temperatura a ser controlada. A variável de temperatura pode depender do fluxo de energia q_o que pode escapar para o meio externo, podendo depender também da temperatura do ambiente externo T_a , da capacitância térmica C e da resistência térmica R do sistema (OGATA, 1985), e sua dinâmica é dada por

$$C \frac{dT_p(t)}{dt} = q_i(t) - q_o(t). \quad (20)$$

Considerando $q_o = \frac{T_p(t) - T_a(t)}{R}$ temos

$$RC \frac{dT_p(t)}{dt} + T_p(t) = Rq_i(t) + T_a(t). \quad (21)$$

Aplicando a transformada de Laplace resulta em

$$T_p(s) = \frac{R}{RCs+1} q_i(s) + T_a(s), \quad (22)$$

Sendo a resistência térmica representada por:

$$R = \frac{1}{K}$$

Onde K é o coeficiente dado em cal/s °C, este coeficiente possui valores diferentes para variação de calor por condução e por convecção.

A capacitância térmica é dada por:

$$C = Mc_p$$

Onde M representa a massa do volume de água utilizado e c_p o calor específico do líquido.

Podemos então representar a equação (22) como

$$\frac{1}{K} Mc_p \frac{dT_p(t)}{dt} + T_p(t) = \frac{1}{K} q_i(t) + T_a(t). \quad (23)$$

Para termos uma ideia de como o sistema pode se comportar, podemos representá-lo por uma equação matemática, porém usando este método de representação é mais difícil de se obter uma representação próxima ao modelo real pelo fato de muitas variáveis presentes no sistema não podem ser medidas com exatidão. Por outro lado, a representação matemática apresentada permite que se tenha uma ideia geral do comportamento do sistema.

3.2 LabVIEW

O LabVIEW é um software de engenharia que possui uma linguagem de programação gráfica, que pode ser utilizado para a aquisição de dados de instrumentos, realizar processamento de dados (filtrar, transformar) e análise de dados (LARSEN, 2011).

A programação feita no LabVIEW é conhecida como sendo um instrumento virtual (VI- *virtual instrument*). O VI é composto por um conjunto de

instruções que realizam o fluxo de dados. O VI possui também uma interface com o usuário, onde é representado as entradas e saídas do sistema.

Pode-se dividir o VI em diagrama de blocos e painel frontal. O diagrama de blocos é a parte onde é realizada a programação gráfica do seu sistema. O painel frontal é a parte que é responsável pela interface com o usuário, pode conter botões, gráficos, medidores, *Leds*, e outros tipos de indicadores que permite o usuário analisar as entradas e saídas desejadas.

3.3 CompactRIO

O CompactRIO é um controlador programável fabricado pela National Instruments, sendo composto por dois processadores: um referente ao processo embarcado de tempo real e o segundo um FPGA de alto desempenho. O CompactRIO conta ainda com módulos de entrada e saída (E/S), tendo esses módulos uma conexão direta com o FPGA que é conectado ao processador embarcado de tempo real através de um barramento PCI de alta velocidade (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017).

O CompactRIO permite a utilização do modulo NI LabVIEW Real-Time, que permite realizar programas embarcados, tendo ferramentas de programação gráficas intuitivas (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017). Este modulo será utilizado para o presente trabalho.

4 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

O recipiente utilizado para o aquecimento possui uma área da base equivalente a $332,5 \text{ cm}^2$ e 36 cm de altura.

A resistência elétrica utilizada possui uma potência total de aproximadamente 1000 W . O controle da resistência é feito por uma saída do controlador de 0 até 10 V, desta forma quando o controlador envia um sinal de 0 V, a resistência não é ativada, quando o sinal é maior que 0 V a resistência é aquecida proporcionalmente ao sinal enviado. Quando o sinal é de 10 V a resistência está em sua potência máxima, 1000 W .

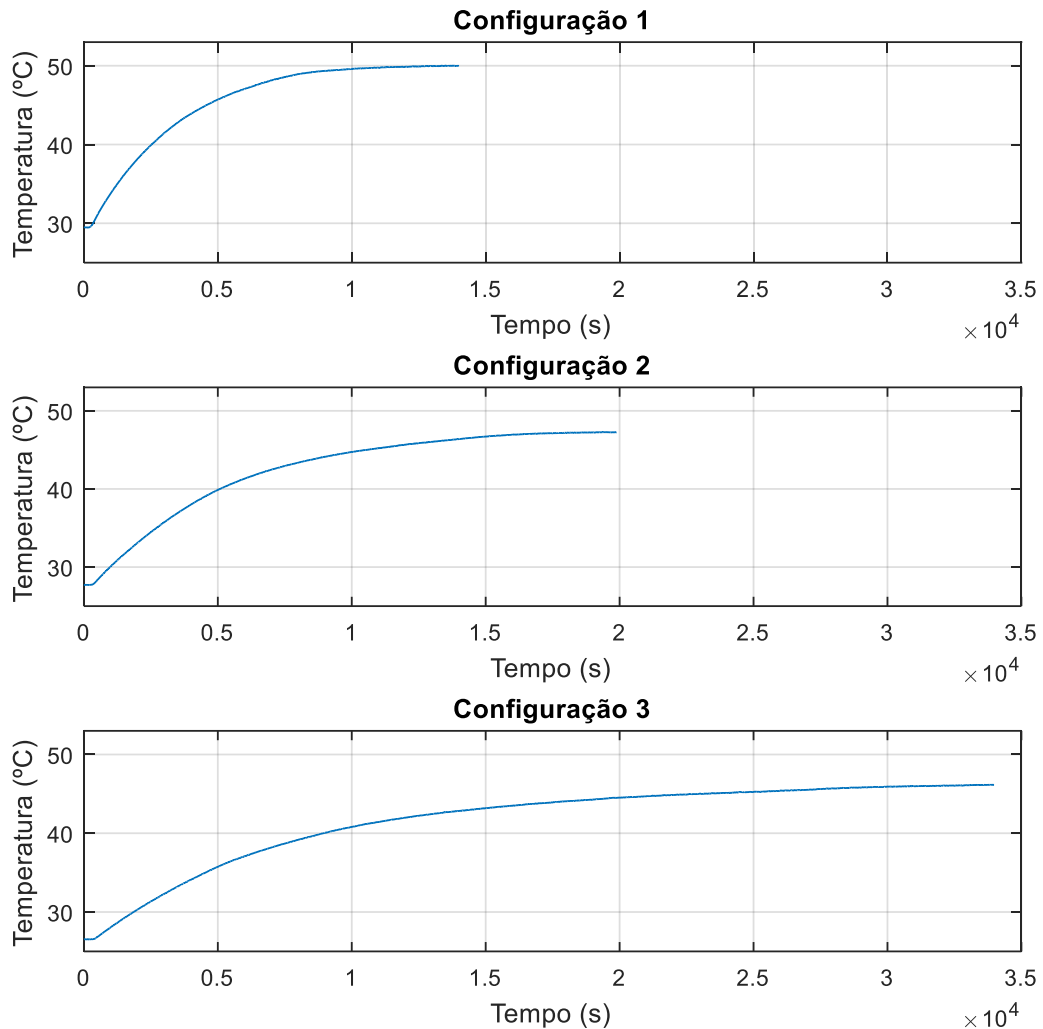
A modelagem do sistema foi feita utilizando o método de resposta ao degrau, e para o processo de identificação foram consideradas 3 configurações para o sistema. Foram feitas 3 configurações do sistema pelo fato da dinâmica da temperatura do sistema possuir um comportamento diferente com a variação do volume do líquido presente no recipiente. Como o foco do trabalho é o estudo do tempo morto, não será analisado o comportamento do sistema com o volume variável.

A configuração 1 foi realizada tendo a tensão na resistência elétrica um degrau de 2 V, e uma coluna de água utilizada no recipiente foi de 125 mm. O valor resultante de regime do sistema para o degrau foi $49,99 \text{ }^\circ\text{C}$. O tempo total em que o sistema ficou exposto ao degrau de 2V foi de 13999 segundos. A temperatura inicial do sistema era $29,51 \text{ }^\circ\text{C}$. O tempo morto do sistema foi de 222 segundos.

A configuração 2 foi realizada tendo a tensão na resistência elétrica um degrau de 2 V, e uma coluna de água utilizada no recipiente foi de 170 mm. O valor resultante de regime do sistema para o degrau foi $47,25 \text{ }^\circ\text{C}$. O tempo total em que o sistema ficou exposto ao degrau de 2V foi de 19884 segundos. A temperatura inicial do sistema era $27,72 \text{ }^\circ\text{C}$. O tempo morto do sistema foi de 269 segundos.

A configuração 3 foi realizada tendo a tensão na resistência elétrica um degrau de 2 V, e uma coluna de água utilizada no recipiente foi de 215 mm. O valor resultante de regime do sistema para o degrau foi $46,16 \text{ }^\circ\text{C}$. O tempo total em que o sistema ficou exposto ao degrau de 2V foi de 33973 segundos. A temperatura inicial do sistema era $26,54 \text{ }^\circ\text{C}$. O tempo morto do sistema foi de 339 segundos. A Figura 6 representa a resposta do sistema ao degrau de 2V.

Figura 6 – Resposta do sistema ao degrau.

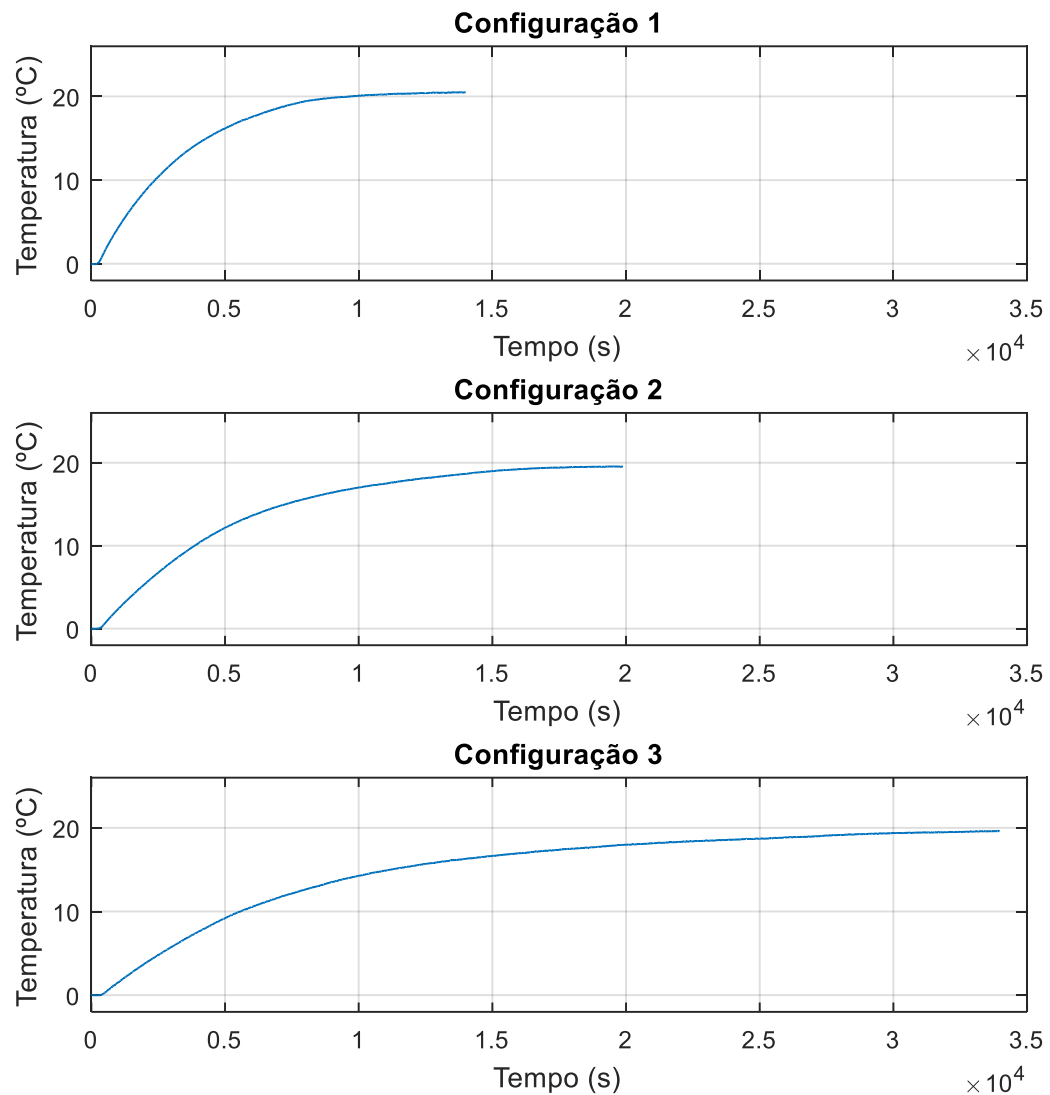


Fonte: Autoria própria

O degrau utilizado para realizar os experimentos foi de apenas 2 V pelo fato da resistência ter um sistema de proteção que desarma a resistência quando sua temperatura passa de 60 °C. Por esse motivo foi escolhido um sinal de tensão baixo para que o sistema não desarme.

Para poder encontrar a função de transferência do sistema, que é obtida considerando condições iniciais nulas (OGATA, 2003) o eixo Y foi deslocado para iniciar posição zero, o que equivale a representar a temperatura ambiente como a origem do referencial usado. A Figura 7 mostra as configurações 1, 2 e 3 com o eixo Y deslocado.

Figura 7 – Resposta do sistema ao degrau deslocado no eixo Y.



Fonte: Autoria própria

Os valores da temperatura do sistema em regime permanente para o sistema deslocado para a amostra 1 é 20,39 °C, para a amostra 2 é 19,53 °C e para a amostra 3 é 19,62 °C.

Para facilitar o acesso aos valores de regime, tempo morto e temperatura inicial, foi montada a Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de Tempo morto, valor deslocado do sistema e valor de regime do sistema deslocado.

Amostra	Tempo morto (s)	Valor deslocado (°C)	Valor de regime (°C)
Amostra 1	222	29,51	20,39
Amostra 2	269	27,72	19,53
Amostra 3	339	26,54	19,56

Autoria Própria.

A função de transferência do sistema de primeira ordem com resposta ao degrau de amplitude 2 é representado pela equação (19), cuja constantes serão identificadas na sequência.

Para determinar a constante de tempo, encontramos o valor da curva que possua 63,2% do valor de regime do sistema. Para a configuração 1 o valor correspondente a 63,2% do valor de regime é

$$63,2\% \times 20,39 = 12,86 \quad (24)$$

Para atingir a temperatura de 12,84 °C o sistema levou 3341 segundos, porém podemos subtrair deste valor o tempo morto do sistema, pois a análise está sendo feita no comportamento da curva do sistema, e posteriormente o tempo morto será incorporado na equação do sistema. O tempo morto do sistema é de aproximadamente 222 segundos, portanto a constante de tempo do sistema será

$$T = 3119 \text{ segundos}$$

Considerando que

$$2A = 20,39$$

$$A = 10,195$$

Com os valores de T e A , a função de transferência da configuração 1 representada pela equação (18) será

$$G(s) = e^{-222s} \frac{10,194}{(3119s+1)} \quad (25)$$

Para a configuração 2 o valor correspondente a 63,2 % do valor de regime é

$$63,2\% \times 19,53 = 12,34 \quad (26)$$

Para atingir a temperatura de 12,34 °C o sistema levou 5120 segundos. O tempo morto do sistema é aproximadamente 269 segundos, portanto a constante de tempo é igual à

$$T = 4851 \text{ segundos}$$

Considerando que

$$2A = 19,53$$

$$A = 9,765$$

Com os valores de T e A , a função de transferência da configuração 2 é

$$G(s) = e^{-269s} \frac{9,765}{(4851s+1)} \quad (27)$$

Para a configuração 3 o valor correspondente a 63,2% do valor de regime é

$$63,2\% \times 19,62 = 12,39 \quad (28)$$

Para atingir a temperatura de 12,30 °C o sistema levou 7746 segundos. O tempo morto do sistema é aproximadamente 339 segundos, portanto a constante de tempo é igual à

$$T = 7407 \text{ segundo}$$

Considerando que

$$2A = 19,62$$

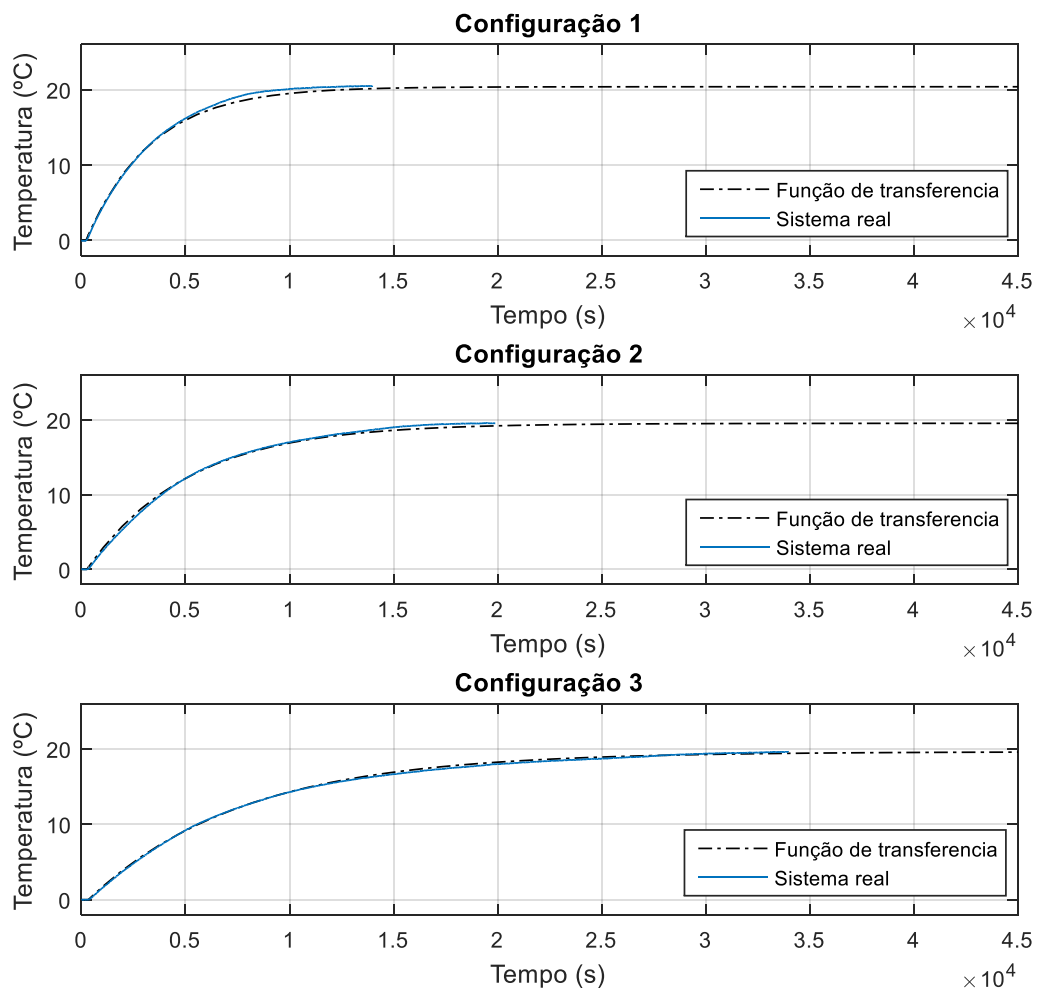
$$A = 9,81$$

Com os valores de T e A , a função de transferência da configuração 3 é

$$G(s) = e^{-339s} \frac{9,81}{(7407s+1)} \quad (29)$$

O comportamento das funções de transferência encontrado para as amostras 1, 2 e 3 à um degrau de grau 2, são mostradas na Figura 8, junto com a resposta do sistema real.

Figura 8 – Resposta do sistema real com sistema modelado.



Fonte: Autoria própria

As funções de transferência modelada para cada configuração do sistema estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 – Função de transferência para as configurações 1,2 e 3.

	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
Função de transferência	$e^{-222s} \frac{10,194}{(3119s + 1)}$	$e^{-269s} \frac{9,765}{(4851s + 1)}$	$e^{-339s} \frac{9,81}{(7407s + 1)}$

Autoria Própria.

5 SINTONIA DOS CONTROLADORES

Neste capítulo serão apresentados a sintonia do controlador PI, e do controle com Preditor de Smith que utiliza como controlador principal um PI.

5.1 Sintonia do controlador PI

O método de sintonia do controlador PI a ser utilizado será o de SIMC como citado no Capítulo 2.3.1. Foi projetado um controlador PI para cada configuração do sistema, desta forma, serão projetados 6 controladores PI. A representação do controlador PI a equação (9), os parâmetros a serem projetados são as constantes K_p e T_i .

Para a configuração 1 tendo como função de transferência a equação (25), podemos determinar os valores de K_p e T_i .

Utilizando $T_c = L$ temos

$$K_p = \frac{T}{A(T_c+L)} \quad (30)$$

$$K_p = \frac{3119}{10,194*(222+222)} \quad (31)$$

$$K_p = 0,689 \quad (32)$$

e

$$T_i = \min\{T, 4(T_c + L)\}. \quad (33)$$

$$T_i = \min\{3119, 4(222 + 222)\}. \quad (34)$$

$$T_i = \min\{3119, 1776\}. \quad (35)$$

$$T_i = 1776 \quad (36)$$

Substituindo na equação (8) temos

$$C(s) = 0,689 \left(1 + \frac{1}{1776s}\right) \quad (37)$$

Utilizando $T_c = 2L$ temos

$$K_p = \frac{T}{A(T_c+L)} \quad (38)$$

$$K_p = \frac{3119}{10,194*((2*222)+222)} \quad (39)$$

$$K_p = 0,459 \quad (40)$$

e

$$T_i = \min\{T, 4(T_c + L)\}. \quad (41)$$

$$T_i = \min\{3119, 4((2 * 222) + 222)\}. \quad (42)$$

$$T_i = \min\{3119, 2664\}. \quad (43)$$

$$T_i = 2664 \quad (44)$$

Substituindo na equação (8) temos

$$C(s) = 0,459 \left(1 + \frac{1}{2664s}\right) \quad (45)$$

Para a configuração 2 tendo como função de transferência a equação (27), podemos determinar os valores de K_p e T_i .

Utilizando $T_c = L$ temos

$$K_p = 0,923 \quad (46)$$

$$T_i = 2152 \quad (47)$$

$$C(s) = 0,923 \left(1 + \frac{1}{2152s}\right) \quad (48)$$

Utilizando $T_c = 2L$ temos

$$K_p = 0,615 \quad (49)$$

$$T_i = 3228 \quad (50)$$

$$C(s) = 0,615 \left(1 + \frac{1}{3228s}\right) \quad (51)$$

Para a configuração 3 tendo como função de transferência a equação (29), podemos determinar os valores de K_p e T_i .

Utilizando $T_c = L$ temos

$$K_p = 1,113 \quad (52)$$

$$T_i = 2712 \quad (53)$$

$$C(s) = 1,113 \left(1 + \frac{1}{2712s}\right) \quad (54)$$

Utilizando $T_c = 2L$ temos

$$K_p = 0,742 \quad (55)$$

$$T_i = 4068 \quad (56)$$

$$C(s) = 0,742 \left(1 + \frac{1}{4068s} \right) \quad (57)$$

Podemos representar as constantes dos controladores na Tabela 4

Tabela 4 – Parâmetros do controlador PI.

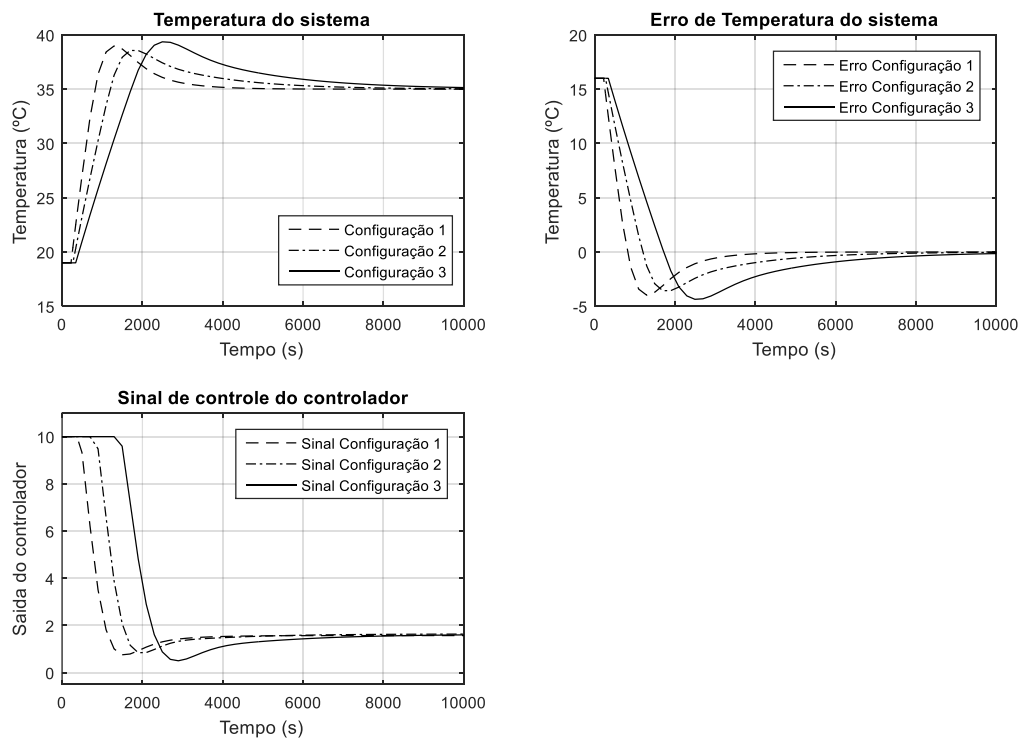
Amostras	L		2L	
	K_p	T_i	K_p	T_i
Configuração 1	0,689	1776	0,459	2664
Configuração 2	0,923	2152	0,615	3228
Configuração 3	1,113	2712	0,740	4068

Autoria Própria.

Afim de saber o comportamento do controle PI desenvolvido para controlar o sistema foi realizado a simulação utilizando as funções de transferências referente ao sistema real.

A primeira simulação foi realizado com o valor de $T_c = L$, foi utilizado como referência um valor de temperatura de 35 °C.

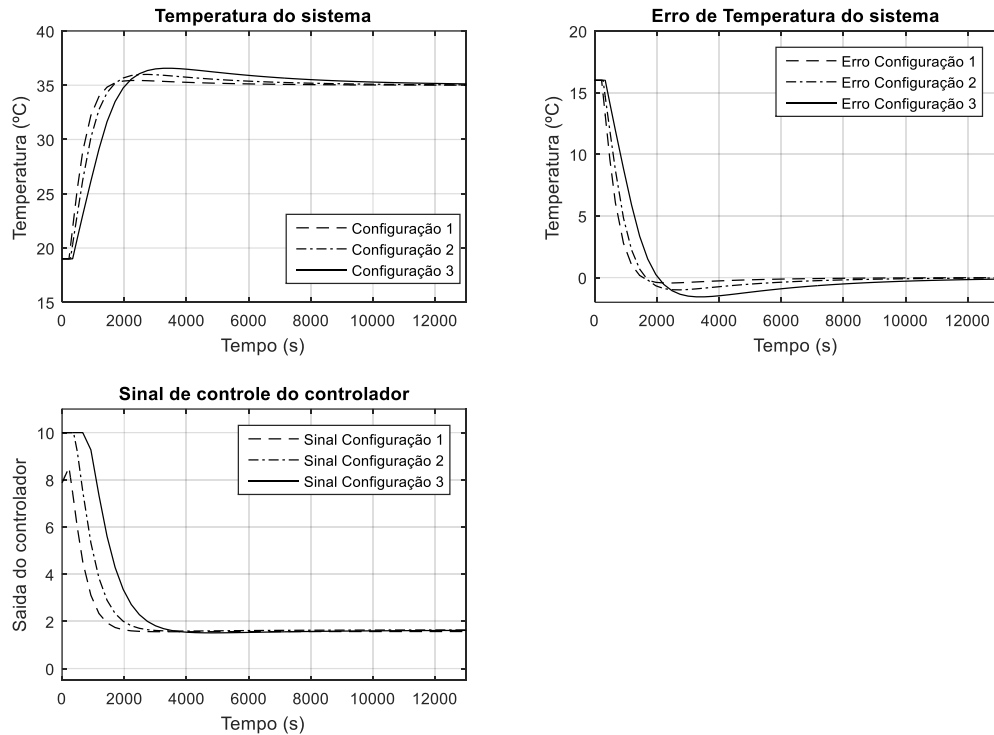
Figura 9 – Simulação do controle PI com ganho $T_c = L$.



Fonte: Autoria própria

A segunda simulação foi realizado com o valor de $T_c = 2L$.

Figura 10 – Simulação do controle PI com ganho $T_c = 2L$.



Fonte: Autoria própria

No controle com $T_c = L$ o sistema teve uma subida mais rápida porém nas 3 configurações ouve um sobressinal. No controle $T_c = 2L$ o tempo de subida foi menor que o primeiro controle utilizado porém teve um sobressinal menor. Com exceção da configuração 3 com $T_c = 2L$ atingiu o valor de referência em aproximadamente 2050 segundos, os outros controles atingiram o valor de referência antes de 2000 segundos.

O tempo de acomodação para $T_c = L$ para as configurações 1, 2 e 3, foi aproximadamente 2832, 4600, 6495 segundos. O tempo de acomodação para $T_c = 2L$ para as configurações 1, 2 e 3 foi aproximadamente 1287, 4046, 6906 segundos. Analisando o tempo de acomodação, podemos considerar o controle com valor de $T_c = 2L$ como tendo os melhores resultados. A implementação será realizada para os dois controles citados.

5.2 Sintonia do controlador do preditor de Smith

O método de sintonia do controlador a ser utilizado no preditor de Smith é baseado no método citado no Capítulo 2.3.2, sendo definido um controle PI para cada configuração.

Foi definido um polo em 0,001 para que os ganhos de K_p e T_i fossem próximos aos valores definidos para o controle PI para que possa ser realizada uma análise de desempenho com valores de ganhos próximos para ambos os controles. O segundo polo foi definido em 0,01 para poder analisar o desempenho do sistema com um valor de K_p mais elevado que para o polo em 0,001.

Para a configuração 1, o primeiro passo é anular os polos do sistema em malha aberta. Desta forma $T_i = 3119$.

Definindo um polo localizado em $(s + 0,01)$ podemos definir o valor de K_c .

$$1 + C(s)G(s) = \left[1 + \frac{10,194 * K_c}{3119s} \right]_{s = -0,01} = 0 \quad (58)$$

$$K_c = 3,05 \quad (59)$$

A equação que representa o controlador PI será

$$C(s) = 3,05 \left(1 + \frac{1}{3119s} \right) \quad (60)$$

Para a configuração 2, utilizando o mesmo método o valor temos que $T_i = 4851$.

Definindo um polo localizado em $(s + 0,01)$ podemos definir o valor de K_c .

$$1 + C(s)G(s) = \left[1 + \frac{9,7658 * K_c}{4851s} \right]_{s = -0,01} = 0 \quad (61)$$

$$K_c = 4,967 \quad (62)$$

A equação que representa o controlador PI será

$$C(s) = 4,967 \left(1 + \frac{1}{4851s} \right) \quad (63)$$

Para a configuração 3, utilizando o mesmo método o valor temos que $T_i = 7407$.

Definindo um polo localizado em $(s + 0,01)$ podemos definir o valor de K_c .

$$1 + C(s)G(s) = \left[1 + \frac{9,81 * K_c}{7407s} \right]_{s = -0,01} = 0 \quad (64)$$

$$K_c = 7,55 \quad (65)$$

A equação que representa o controlador PI será

$$C(s) = 7,55 \left(1 + \frac{1}{7407s} \right) \quad (66)$$

O mesmo procedimento foi realizado para o polo localizado em $(s + 0,001)$, os resultados são mostrados na Tabela 5.

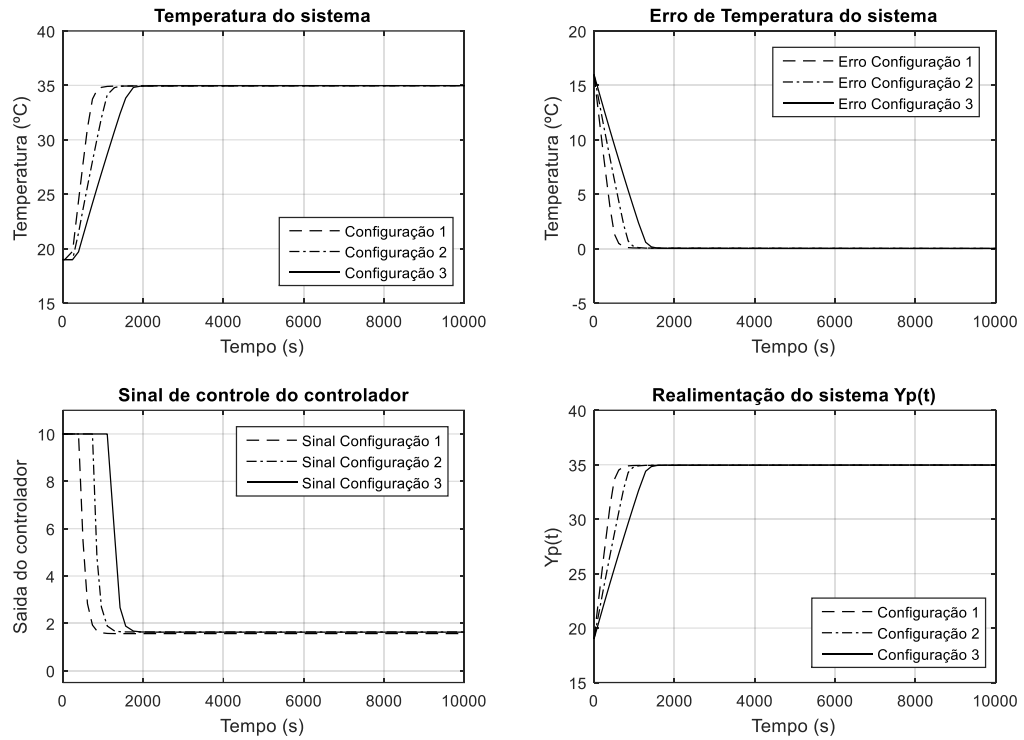
Tabela 5 – Parâmetros do controlador PI para o preditor de Smith.

Configuração	Polo em 0,01		Polos em 0,001	
	K_c	T_i	K_c	T_i
Configuração 1	3,05	3119	0,305	3119
Configuração 2	4,967	4851	0,496	4851
Configuração 3	7,55	7407	0,755	7407

Autoria Própria.

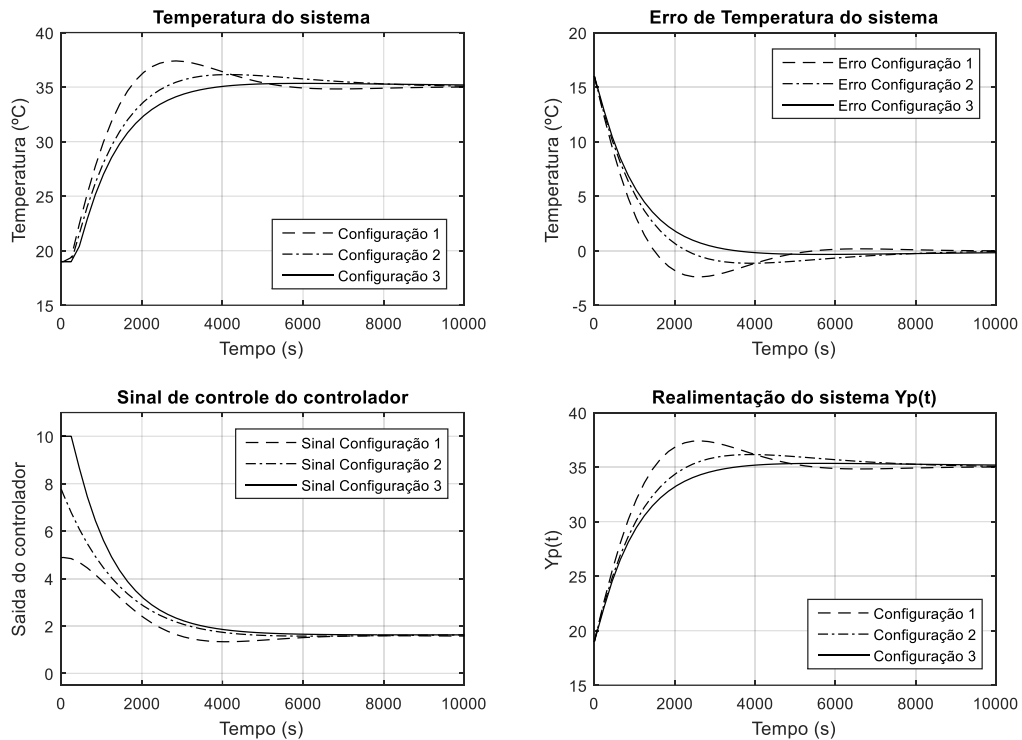
Afim de saber o comportamento do controle PI desenvolvido para o preditor de Smith, foi realizada a simulação utilizando as funções de transferências que foram modeladas para representar o sistema real.

Figura 11 – Simulação do controle baseado no preditor de Smith com polo (0,01).



Fonte: Autoria própria

Figura 12 – Simulação do controle baseado no preditor de Smith com polo (0,001).



Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos em simulação com polos em 0,01 foram melhores que os obtidos com o polo em 0,001. Com os polos em 0,01 o sistema atingiu a referência antes dos 2000 segundos e não houve sobressinal, tendo o tempo de acomodação abaixo dos 2000 segundos. No controle com polos em 0,001 o sistema foi lento, para a configuração 1 e 2 o sistema apresentou um sobressinal, influenciado no tempo de acomodação. Para a configuração 3 não apresentou um sobressinal. O tempo de acomodação para a configuração 1 foi 4645 segundos, configuração 2 foi 6045 segundos, e para a configuração 3 foi 3045 segundos.

6 IMPLEMENTAÇÃO DOS CONTROLADORES

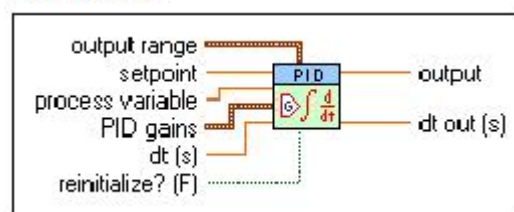
Neste capítulo será apresentada a forma de implementação do controle PI e do controle baseado no preditor de Smith no software LabVIEW.

Como dito no Capítulo 3.3 será utilizado o módulo do LabVIEW Real – Time, permitindo realizar o controle embarcado do sistema. Como citado no Capítulo 3.2 o ambiente de programação do LabVIEW é chamado de VI e é composto por duas telas de programação. A primeira é conhecida como diagrama de blocos que é responsável para realizar a lógica de controle do sistema. A segunda é conhecida como sendo o painel frontal responsável pelo monitoramento do processo em tempo real.

6.1 Implementação do controle PI

A implementação do controle PI foi realizado de maneira simples. Foi utilizado um bloco de controle fornecida pelo LabVIEW chamado de PID VI, representado pela Figura 13.

Figura 13 –Bloco PID VI.



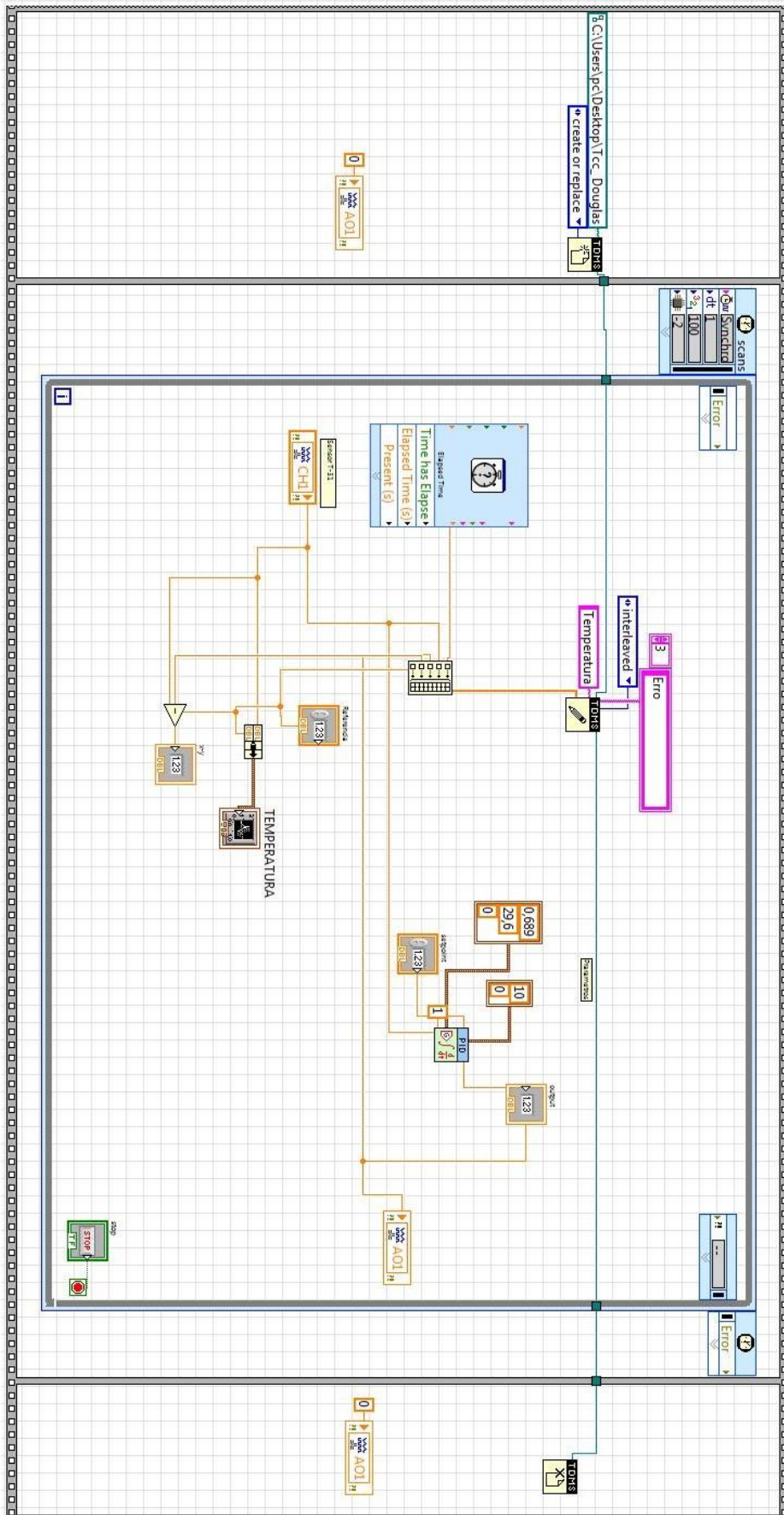
Fonte: Adaptado de National Instruments Pid vi (2018)

O PID VI é um bloco de controle que permite que o usuário especifique os ganhos proporcional, tempo integrativo e tempo derivativo (PID gains). Possui uma entrada para a variável a ser controlada (process variable), no caso a variável de temperatura, e uma entrada para referência desejado para o sistema (setpoint). Pode ser definido também a taxa de amostragem do PID VI (dt (s)) tendo uma resolução em milissegundos. O bloco PID VI possui ainda um sistema anti-windup, permitindo assim que a saída do controlador possa ser limitada em uma determinada faixa (output range). Neste trabalho foi considerado que a saída desejado para o PI estivesse na faixa de 0 a 10.

A saída do bloco PID VI foi ligada diretamente à porta que representa a entrada de controle da resistência. Foi realizada a aquisição do tempo de funcionamento do sistema, temperatura do sistema e saída do PID VI. Foi usado um tempo de amostragem de 1 segundo.

A representação do código completo está na Figura 14.

Figura 14 – Controle PI.



Fonte: Autoria própria

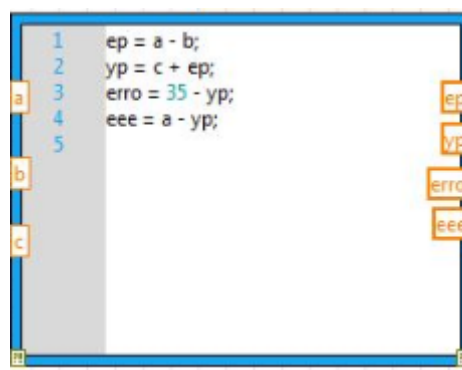
6.2 Implementação do controle baseado no preditor de Smith

Para realizar a implementação do controle baseado no preditor de Smith, foi utilizado para representar o controlador principal o mesmo bloco utilizado na implementação do controle PID, o bloco PID VI, Figura 13. Porém como a estrutura de controle para o preditor de Smith é diferente, foram utilizadas também outras ferramentas.

Como o preditor de Smith tem sua realimentação baseada na temperatura estimada com a função de transferência que representa o sistema real, foi necessário implementar a equação modelada para poder realizar o controle.

Para implementar a equação que representa o sistema real foi utilizado a ferramenta MATHScript que permite implementar linhas de código escrito. A Ferramenta Math Script está representada na Figura 15.

Figura 15 – Bloco Math Script.



Fonte: Adaptado de National Instruments Math Script (2018)

Se considerarmos a representação da função de transferência do sistema de primeira ordem sem tempo morto pela equação (67)

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{A}{Ts+1} \quad (67)$$

Podemos representa-la como:

$$Y(S)(Ts + 1) = U(s)A \quad (68)$$

Realizando a transformada inversa de Laplace temos:

$$\dot{y}(t) = -\frac{y(t)}{T} + \frac{A}{T}u(t) \quad (69)$$

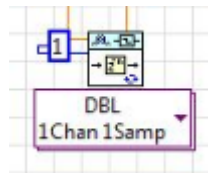
Esta foi a equação implementada.

Para calcular o valor de $y(t)$ foi realizada a integração do valor de $\dot{y}(t)$, desta forma o comportamento desta equação será igual ao simulado. Sua implementação foi realizada utilizando o bloco Math Script.

O valor desta equação é utilizado para calcular o valor da saída $y_p(t)$. Para calcular o sinal de $e_p(t)$ foi utilizado a mesma estrutura citada, porém tendo o valor de saída $y(t)$ atrasado de acordo com o tempo morto encontrado no Capítulo 4. Este atraso foi realizado utilizando o bloco Integer Delay, representado pela Figura 16, que tem a função de atrasar sua saída em uma certa quantidade de amostras pré-determinada.

Diferentemente do controle PI que a entrada da variável controlada para o bloco PID VI foi utilizada o valor obtido pelo sensor de temperatura, no controle baseado no preditor de Smith o valor a ser utilizado será $y_p(t)$, pois este é o sinal de realimentação do sistema como ilustrado na Figura 1.

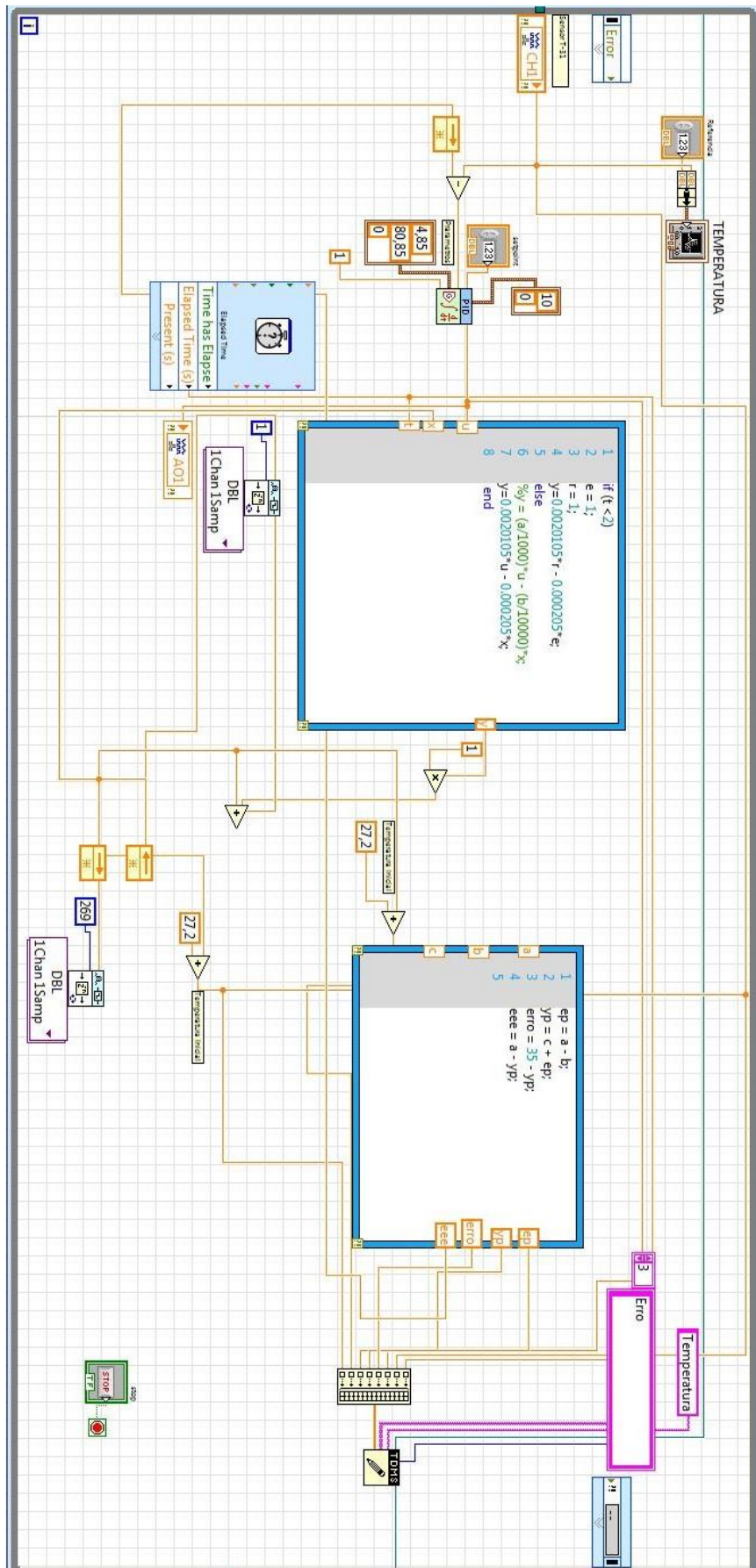
Figura 16 – Bloco Integer Delay.



Fonte: Adaptado de National Instruments Integer delay (2018)

A implementação do código completo está na Figura 17.

Figura 17 – Controle baseado no preditor de Smith.



Fonte: Autoria própria

7 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos aplicando os dois controladores citados, o controle PI e o controle baseado no preditor de Smith.

7.1 Resultados obtidos com o controle PI

O primeiro controle a ser implementado na planta foi o controle PI. A sintonia dos ganhos com controlador PI foram feitas baseados no método de SIMC, como citado no capítulo 5.1.

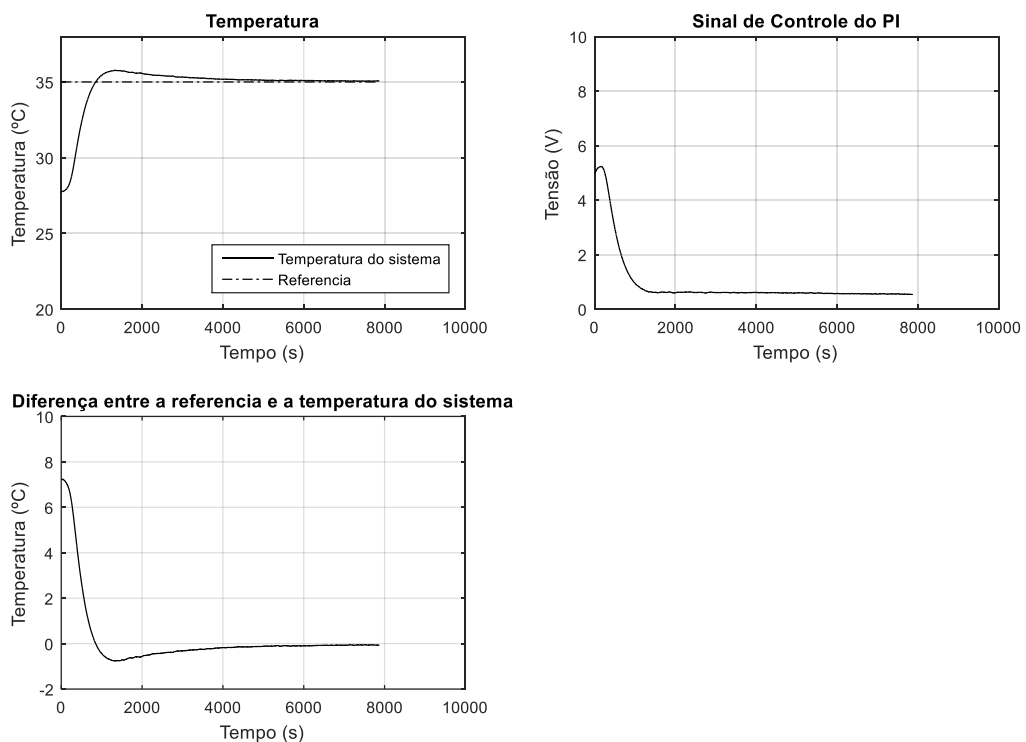
Foi utilizado um valor de referência de 35 °C, por ser um valor que o sistema não demorara muito para atingi-lo.

Foi realizado o controle das configurações 1, 2 e 3.

Para a configuração 1, foi realizada a sintonia com o valor de $T_c = L$ e $T_c = 2L$.

A Figura 18 representa os resultados obtidos para $T_c = L$.

Figura 18 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $T_c = L$, configuração 1.

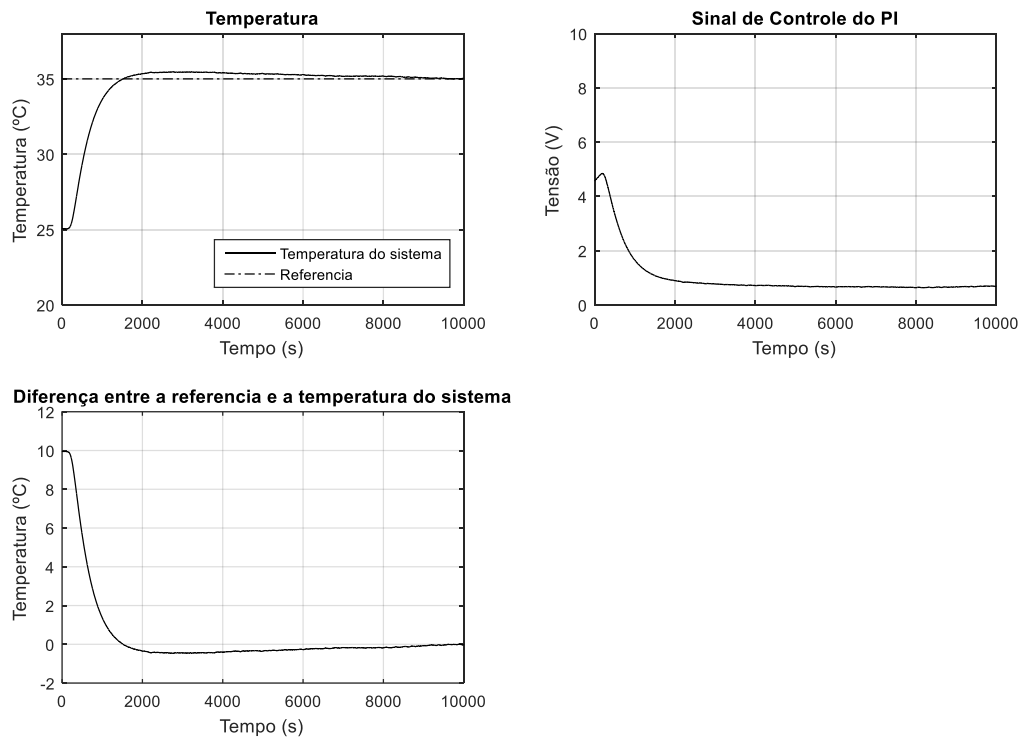


Fonte: Autoria própria

Na Figura 18 a temperatura do sistema teve um sobressinal, porem conseguiu se estabilizar atingindo um valor próximo ao desejado.

Os resultados obtidos para a sintonia com o valor de $T_c = 2L$ estão na Figura 19.

Figura 19 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $T_c = 2L$, configuração 1



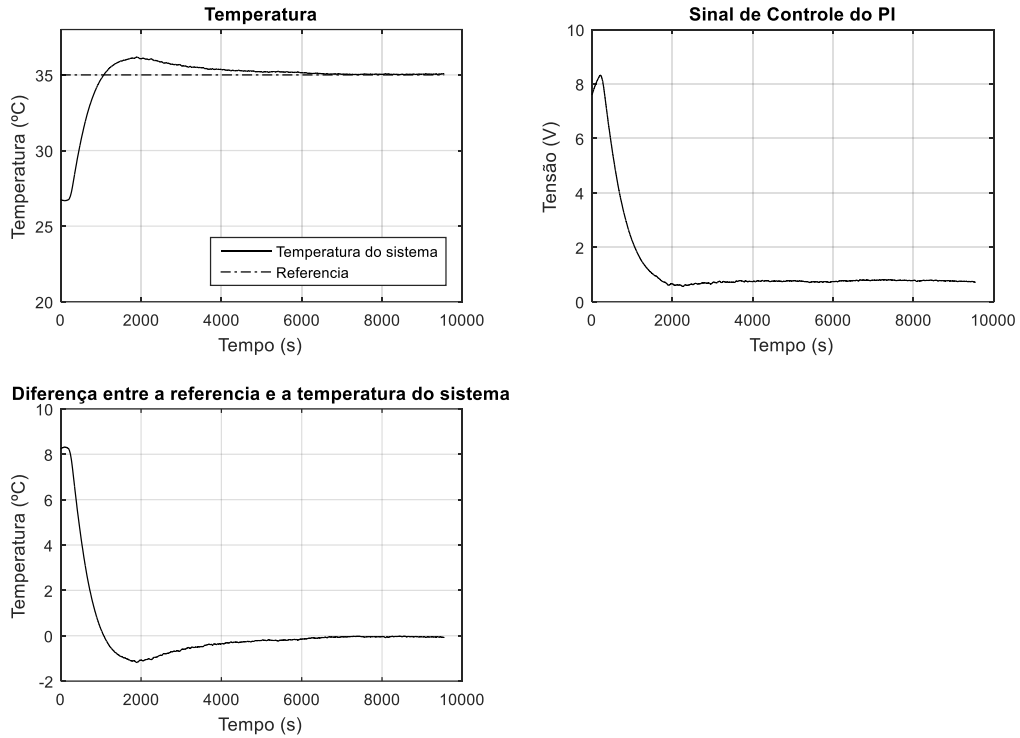
Fonte: Autoria própria

Na Figura 19 o sistema teve um sobressinal menor porem teve uma resposta mais lenta.

Para a configuração 2, foi realizada a sintonia com o valor de $T_c = L$ e $T_c = 2L$.

A Figura 20 representa os resultados obtidos para $T_c = L$.

Figura 20 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $T_c = L$, configuração 2.

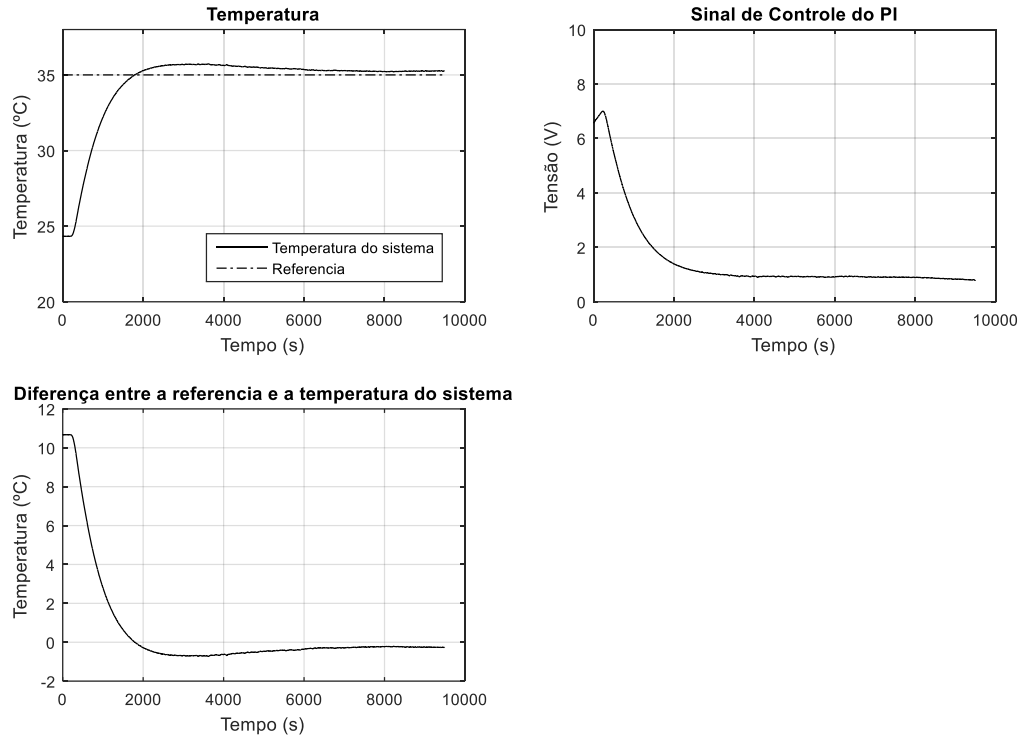


Fonte: Autoria própria

Na Figura 20 a temperatura do sistema teve um sobressinal, porem conseguiu se estabilizar atingindo um valor próximo ao desejado. A saída do controlador iniciou com um valor maior que nas Figuras 18 e 19.

Os resultados obtidos para a sintonia com o valor de $T_c = 2L$ estão na Figura 21

Figura 21 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $T_c = 2L$, configuração 2.



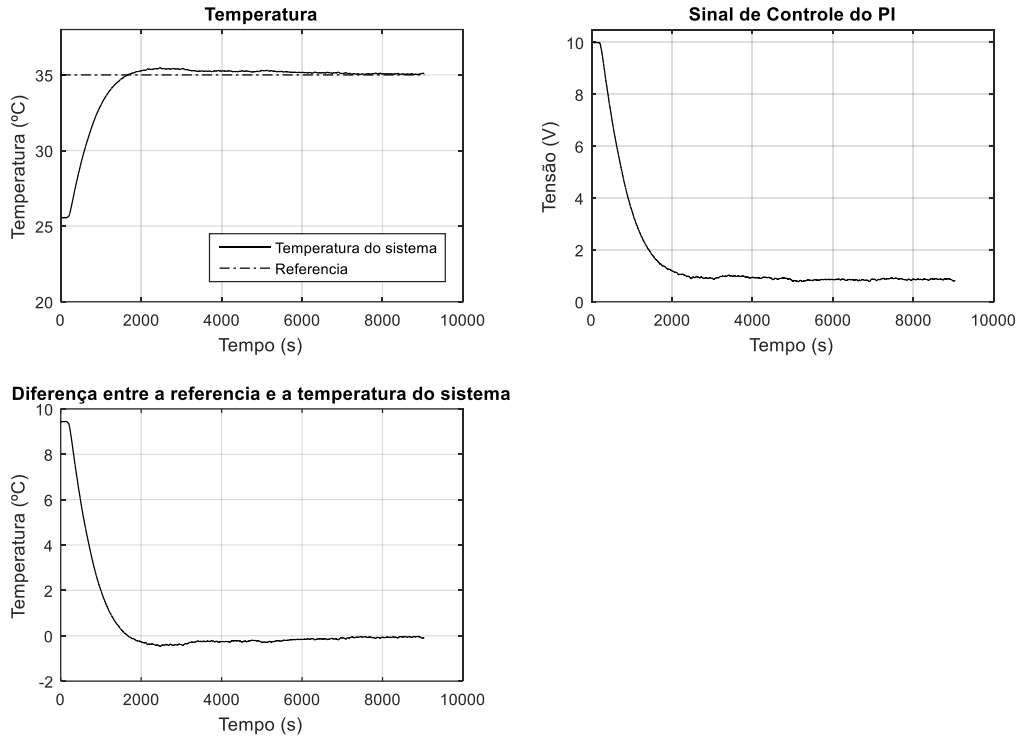
Fonte: Autoria própria

Na Figura 21 o sistema teve um sobressinal menor que o da Figura 20 porem teve uma resposta mais lenta. A saída do controlador também teve um valor menor que na Figura 20.

Para a configuração 3, foi realizada a sintonia com o valor de $T_c = L$ e $T_c = 2L$.

A Figura 22 representa os resultados obtidos para $T_c = L$.

Figura 22 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $T_c = L$, configuração 3.

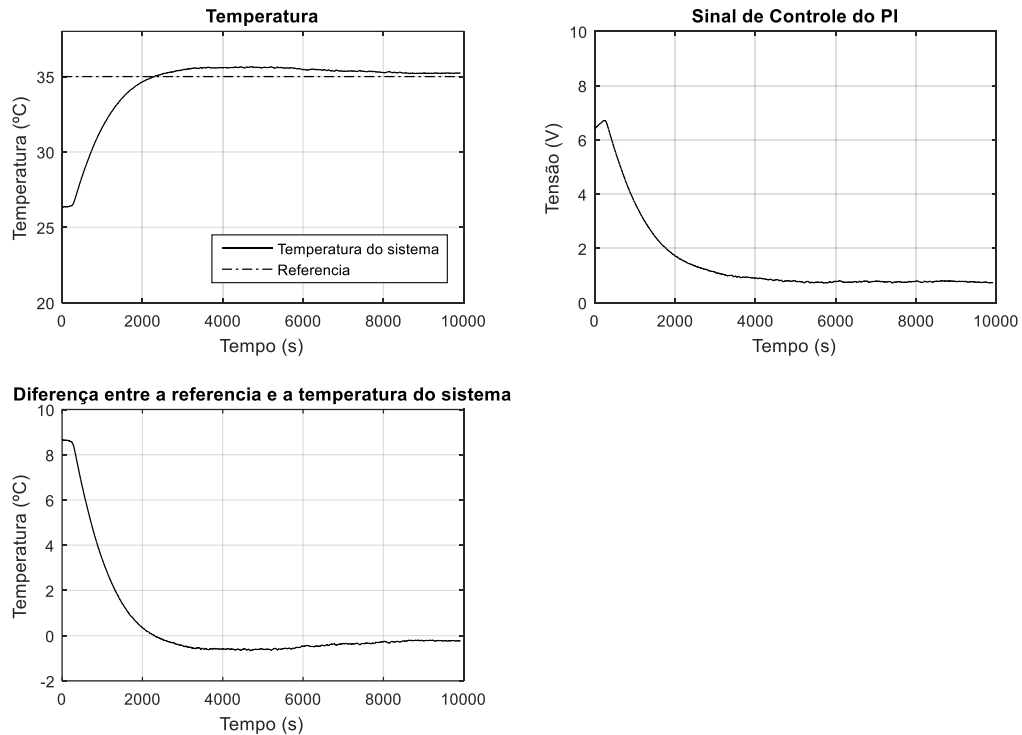


Fonte: Autoria própria

Na Figura 22 o sistema teve um baixo sobressinal, quando comparados aos resultados dos outros controles. A saída do controlador atingiu o valor máximo de 10 V no início do processo.

Os resultados obtidos para a sintonia com o valor de $T_c = 2L$ estão na Figura 23

Figura 23 – Temperatura do sistema, saída do controlador e a diferença da temperatura do sistema com sua referência para $T_c = 2L$, configuração 3.



Fonte: Autoria própria

NA Figura 23 o sistema teve um sobressinal maior, e uma resposta mais lenta que o da Figura 22. A saída do controlador também teve início com um valor menor.

Uma análise mais detalhada dos resultados será realizado no Capítulo 8.

7.2 Resultados obtidos com o controle baseado no preditor de Smith

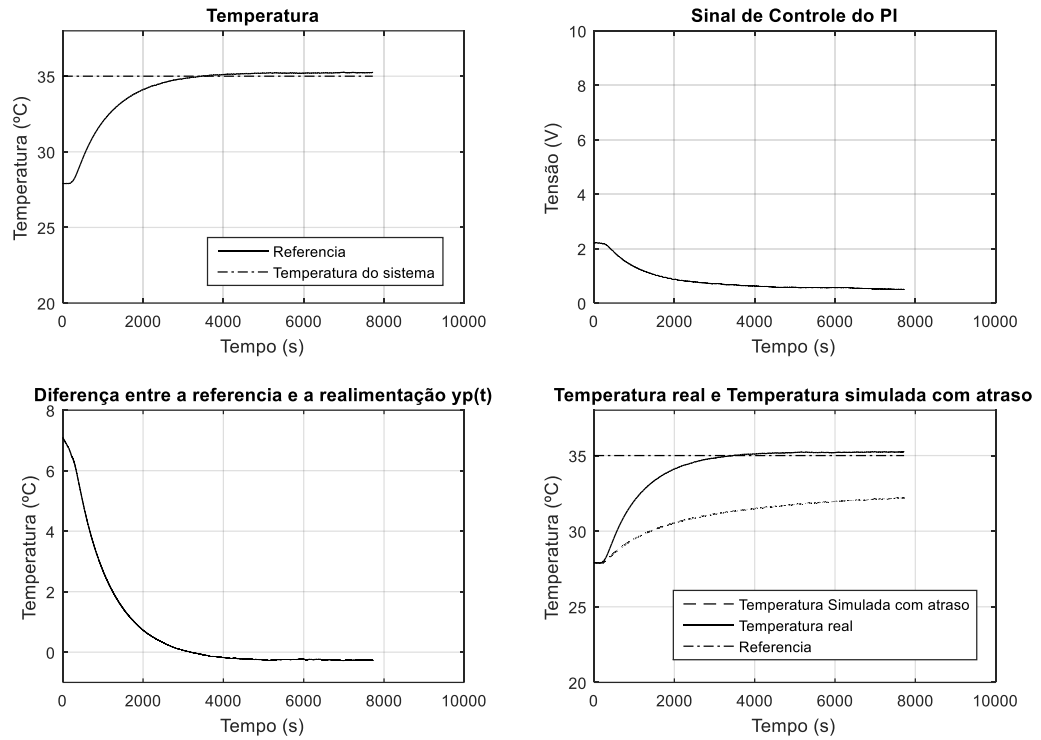
O segundo controle a ser implementado na planta foi o controle baseado no preditor de Smith, tendo o controlador principal do preditor um PI.

Os ganhos utilizando no controlador PI estão definidos no capítulo 5.2.

Para a configuração 1 do sistema, foram realizados dois ensaios, o primeiro com o $k_p = 0,305$ e o segundo ensaio com $k_p = 3,05$

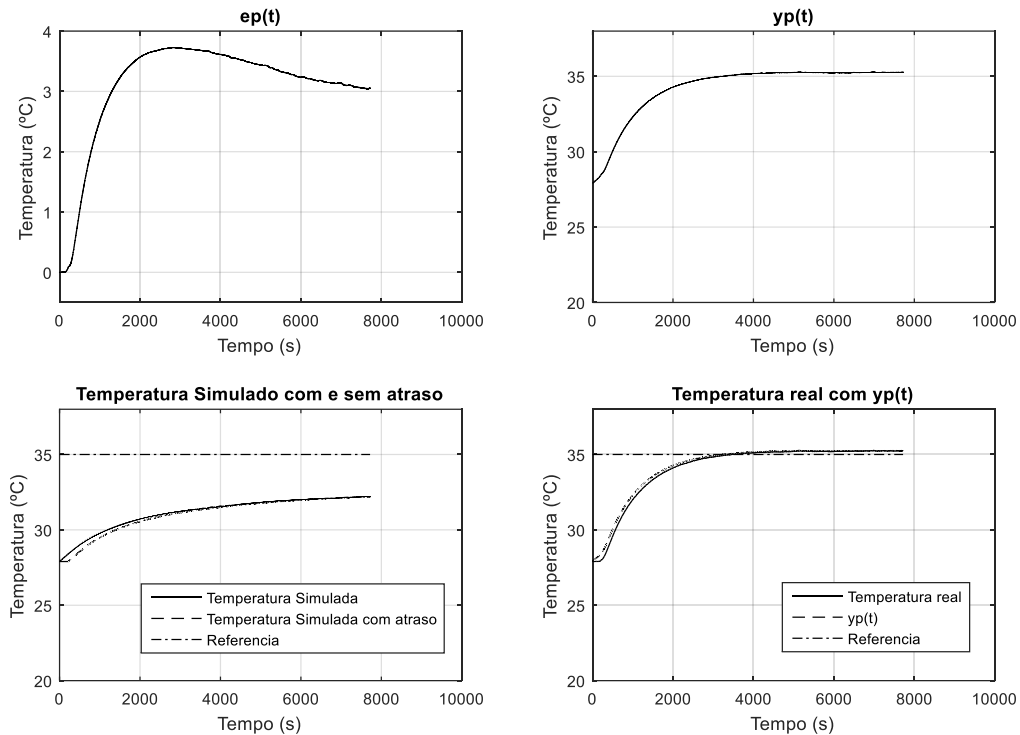
Os resultados do primeiro ensaio então na Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $k_p = 0,305$, para a configuração 1.



Fonte: Autoria própria

Figura 25 – Erro $e_p(t)$, realimentação do sistema $y_p(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de realimentação $y_p(t)$ com $k_p = 0,305$ para a configuração 1.



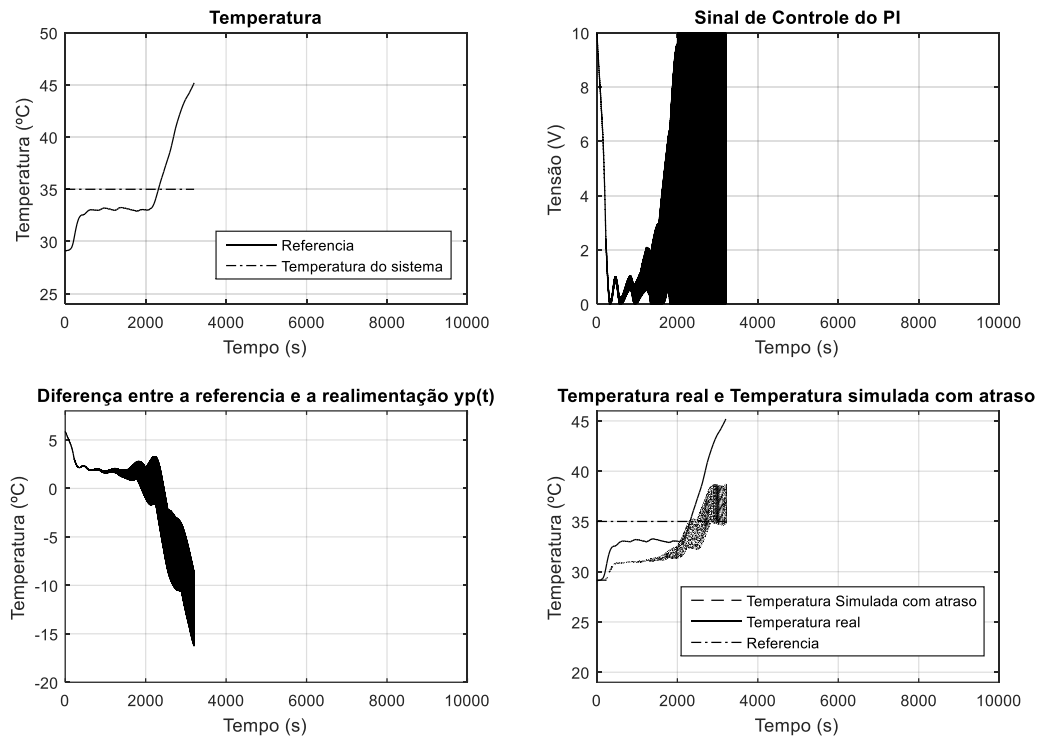
Fonte: Autoria própria

Na Figura 24 o sistema se estabilizou com uma temperatura um pouco acima da referência, podemos ainda comparar o valor da temperatura simulada com o valor da temperatura real do sistema, podendo verificar que houve um erro grande entre as duas temperaturas.

Na Figura 25 temos algumas informações relacionadas ao funcionamento do preditor de Smith. O valor de $e_p(t)$ representa o erro entre a temperatura do sistema e a temperatura com atraso do sistema. O sinal $y_p(t)$ é o sinal de realimentação do sistema, possui o valor da temperatura simulada do sistema sem o tempo morto, somando o valor do erro $e_p(t)$. O sinal $y_p(t)$ representa a temperatura do sistema real sem o tempo morto, sendo responsável pela previsão do sistema. Apesar do sistema não conseguir prever com muita antecedência a temperatura do sistema, ele conseguiu realizar uma previsão.

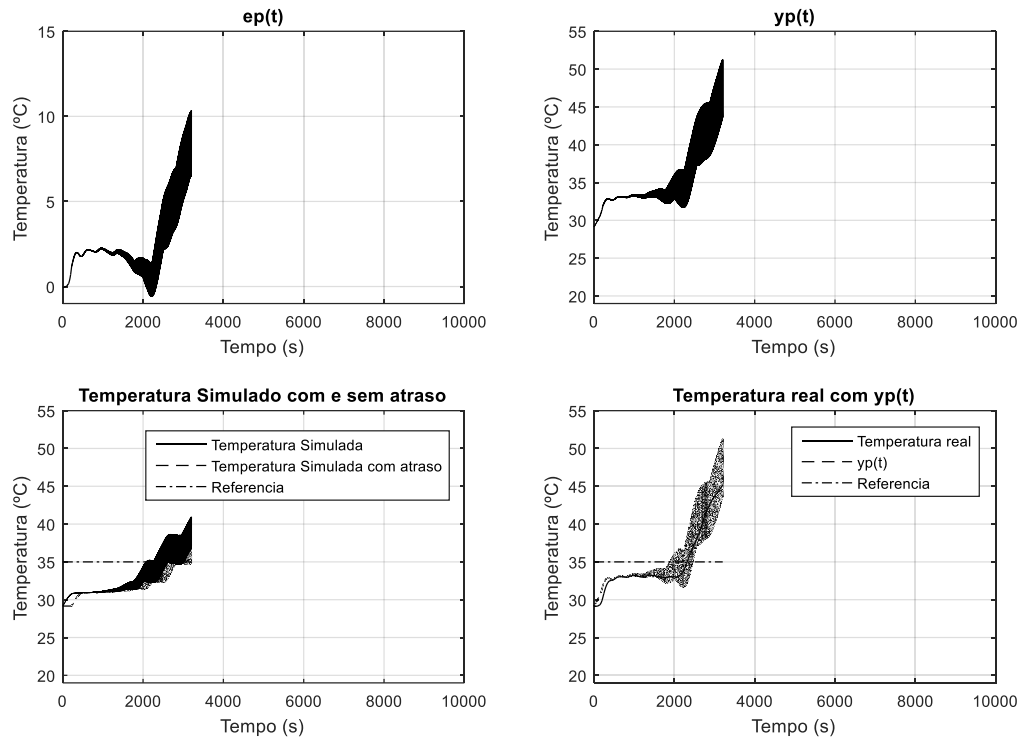
Os resultados do segundo ensaio estão na Figura 26 e 27.

Figura 26 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $k_p = 3,05$, para a configuração 1.



Fonte: Autoria própria

Figura 27 – Erro $e_p(t)$, realimentação do sistema $y_p(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de realimentação $y_p(t)$ com $k_p = 3,05$ para a configuração 1.



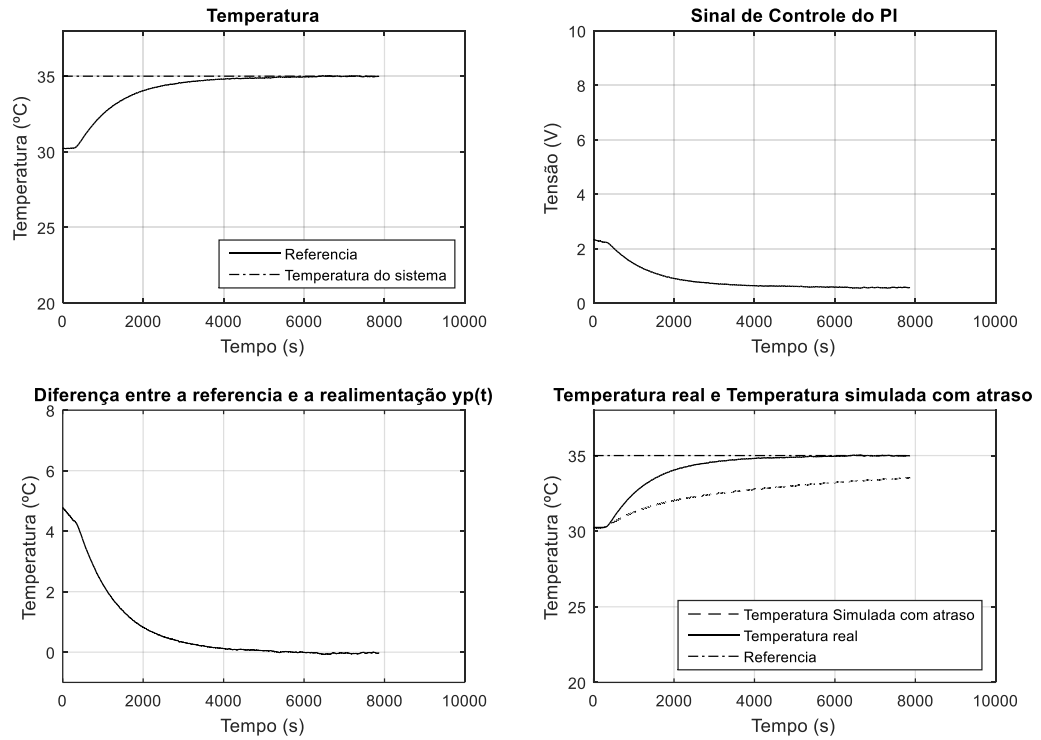
Fonte: Autoria própria

Nas figuras 25 e 26 representam o comportamento do sistema e do preditor de Smith, porem o sistema se tornou instável. O comportamento do sistema será analisado no Capítulo 8.

Para a configuração 2 do sistema, foram realizados dois ensaios, o primeiro com o $k_p = 0,4967$ e o segundo ensaio com $k_p = 4,967$

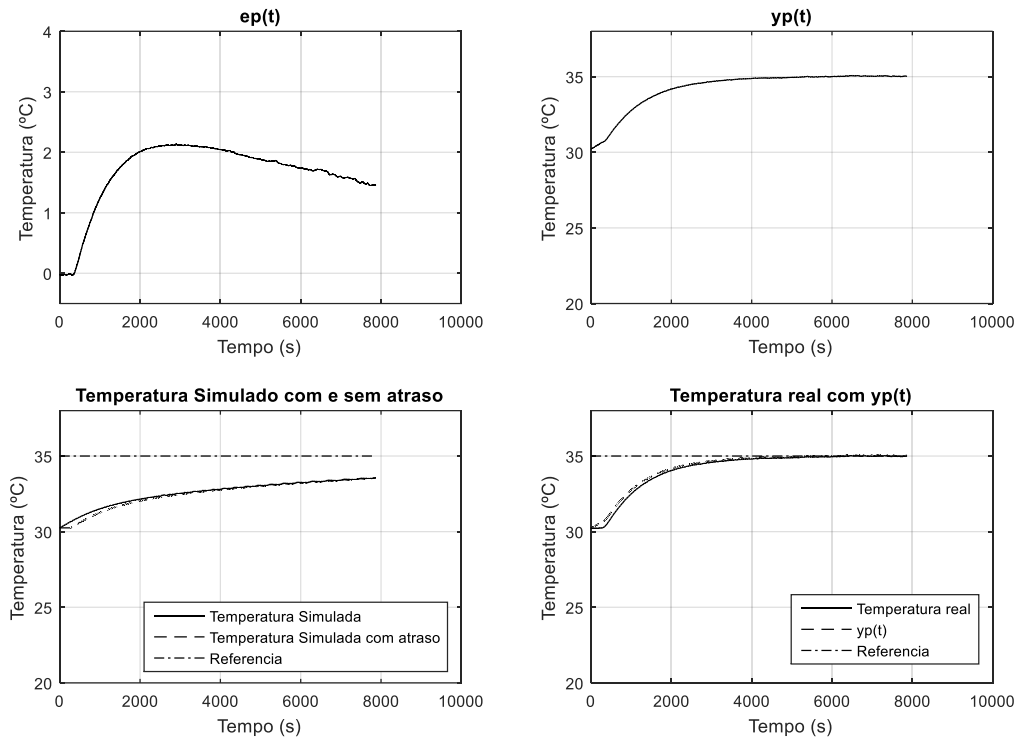
Os resultados do primeiro ensaio então na Figura 28 e 29

Figura 28 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $k_p = 0,4967$ para a configuração 2.



Fonte: Autoria própria

Figura 29 – Erro $e_p(t)$, realimentação do sistema $y_p(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de realimentação $y_p(t)$ com $k_p = 0,4967$ para a configuração 2.



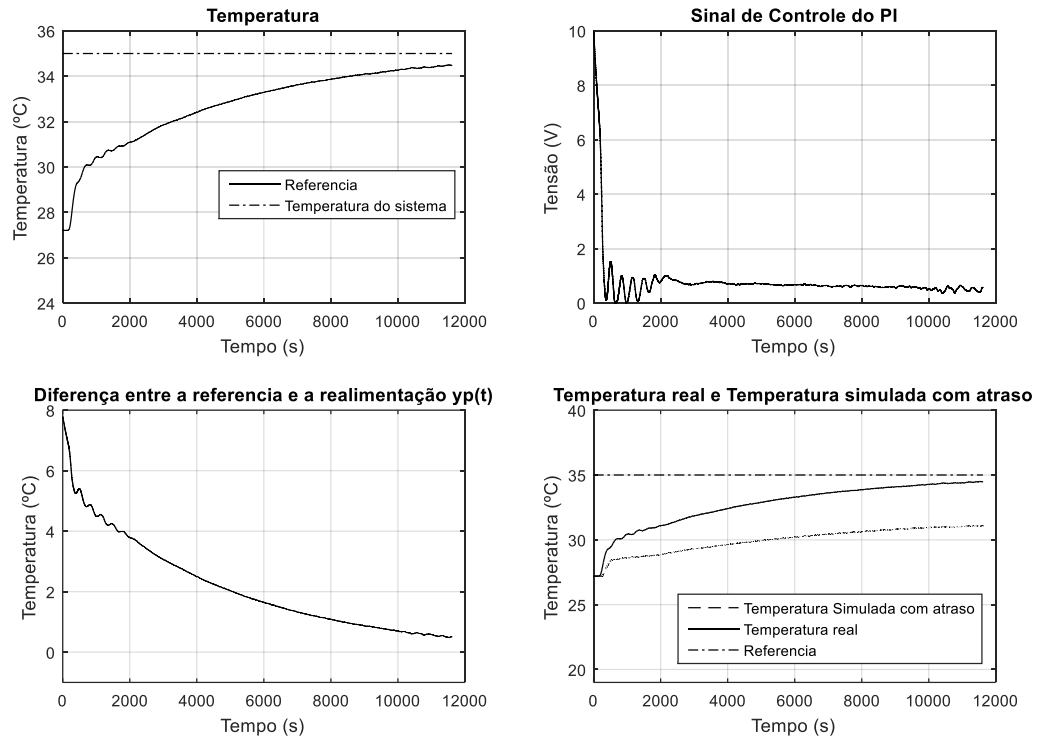
Fonte: Autoria própria

Na Figura 28 o sistema estabilizou com uma temperatura muito próxima à referência. Assim como na Figura 19 a temperatura do sistema simulado foi diferente a do sistema real.

Na Figura 29 o valor de $e_p(t)$ apesar de valor menor que o da Figura 25, pelo fato da temperatura simulada ter sido mais próximo ao valor da temperatura do sistema real. O sinal $y_p(t)$ também apresentou uma predição do sistema, porém essa predição também foi pequena.

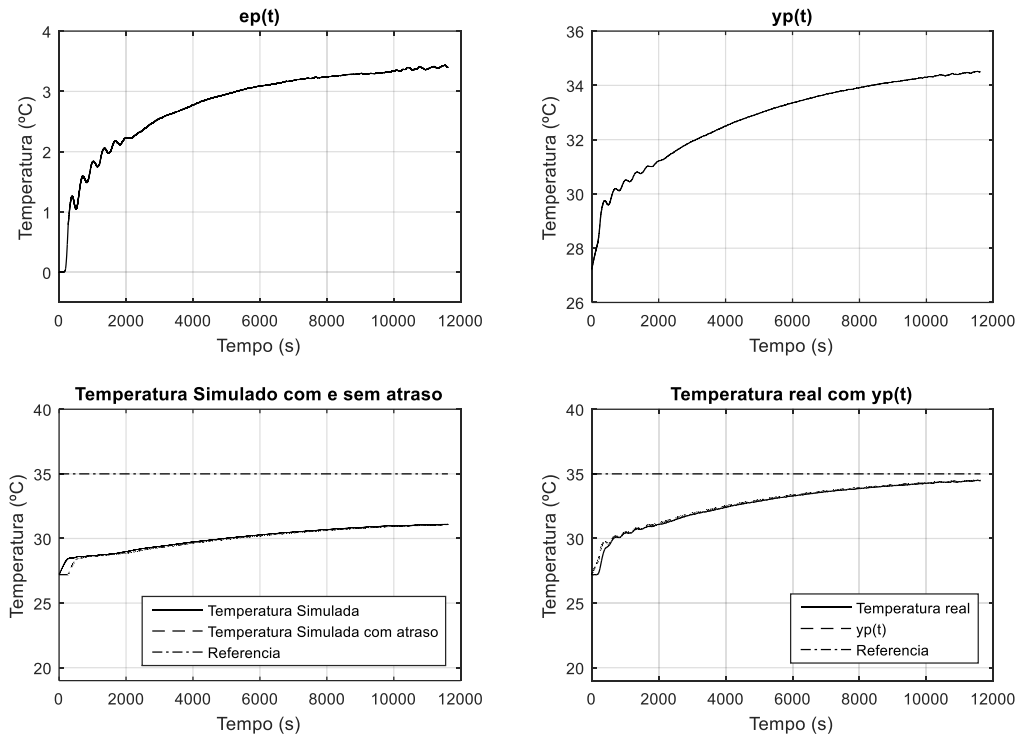
Os resultados do segundo ensaio estão na Figuras 30 e 31

Figura 30 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $k_p = 4,967$ para a configuração 2.



Fonte: Autoria própria

Figura 31 – Erro $e_p(t)$, realimentação do sistema $y_p(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de realimentação $y_p(t)$ com $k_p = 4,967$ para a configuração 2.



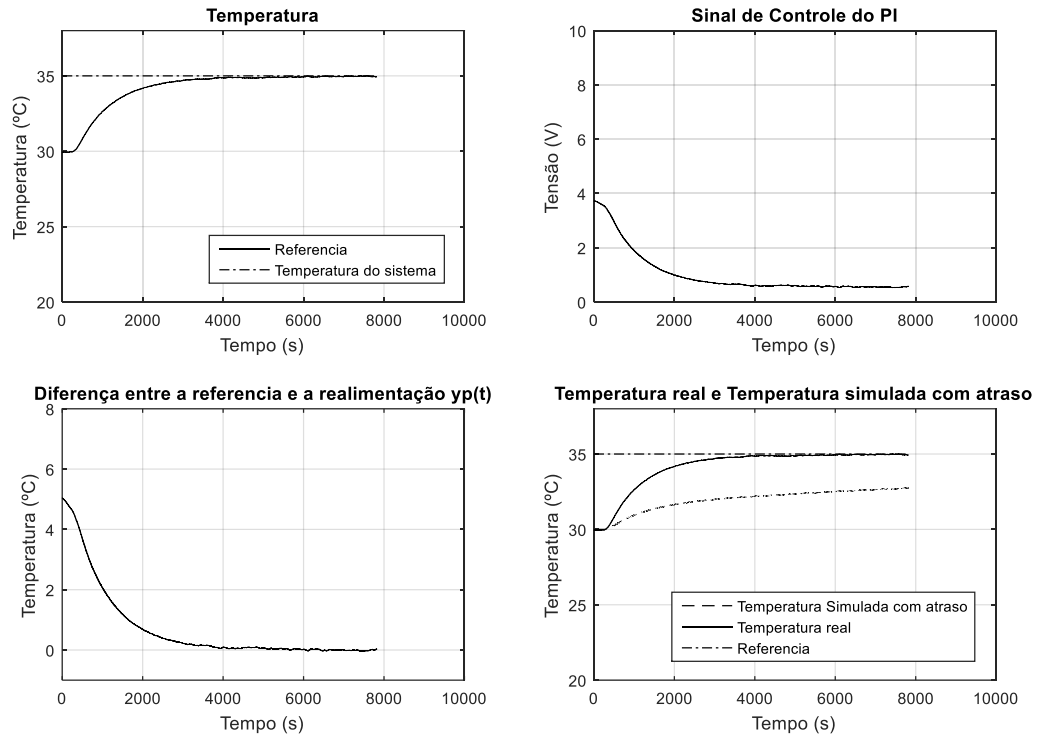
Fonte: Autoria própria

Nas Figuras 30 e 31 representam o comportamento do sistema e do preditor de Smith, porém o sistema não teve uma resposta satisfatória ao controle realizado. Uma análise dos resultados será realizada no Capítulo 8.

Para a configuração 3 do sistema, foram realizados dois ensaios, o primeiro com o $k_p = 0,755$ e o segundo ensaio com $k_p = 7,55$.

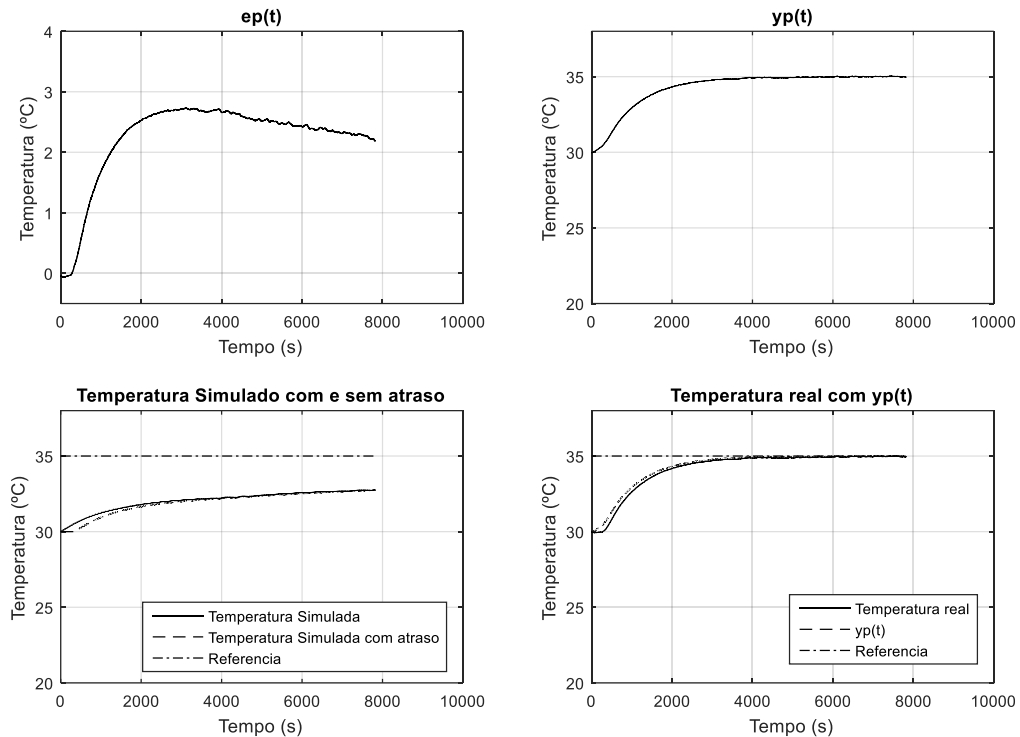
Os resultados do primeiro ensaio estão nas Figuras 32 e 33

Figura 32 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $k_p = 0,755$ para a configuração 3.



Fonte: Autoria própria

Figura 33 – Erro $e_p(t)$, realimentação do sistema $y_p(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de realimentação $y_p(t)$ com $k_p = 0,755$ para a configuração 3.



Fonte: Autoria própria

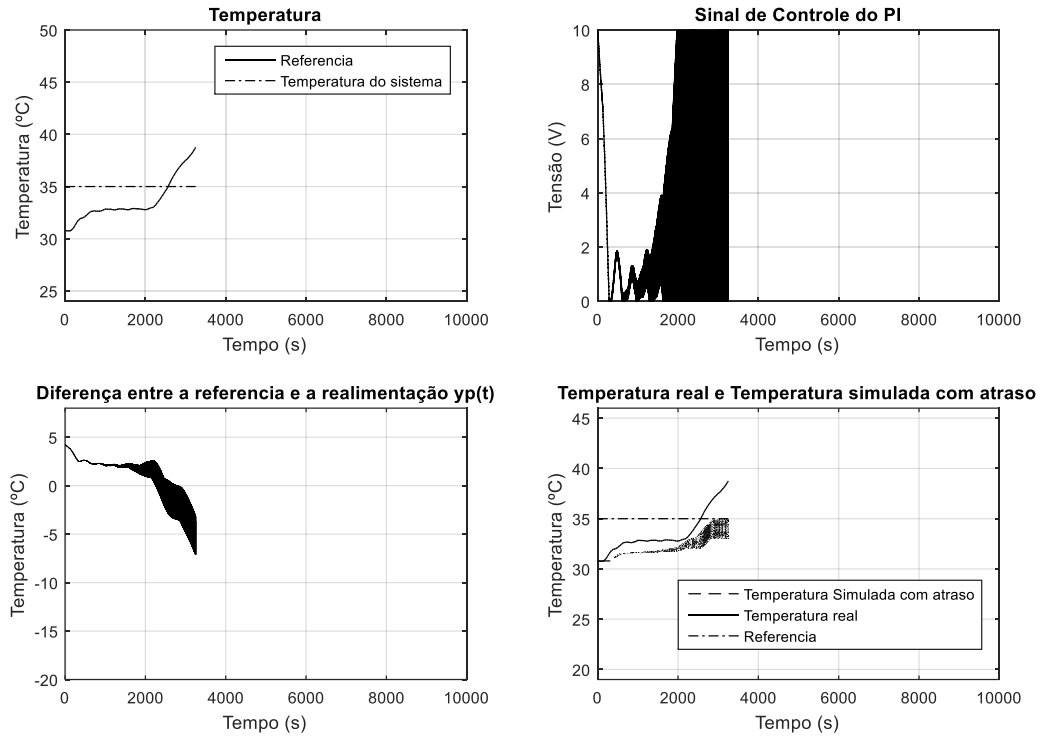
O comportamento do sistema de do preditor de Smith nas Figuras 32 e 33 foram semelhantes ao das Figuras 24, 25 e 28, 29.

Na Figura 32 o sistema estabilizou com uma temperatura muito próxima à referência. A temperatura do sistema simulado foi diferente a do sistema real.

Na Figura 33 o sinal $y_p(t)$ também apresentou uma predição do sistema, porem essa predição também foi pequena.

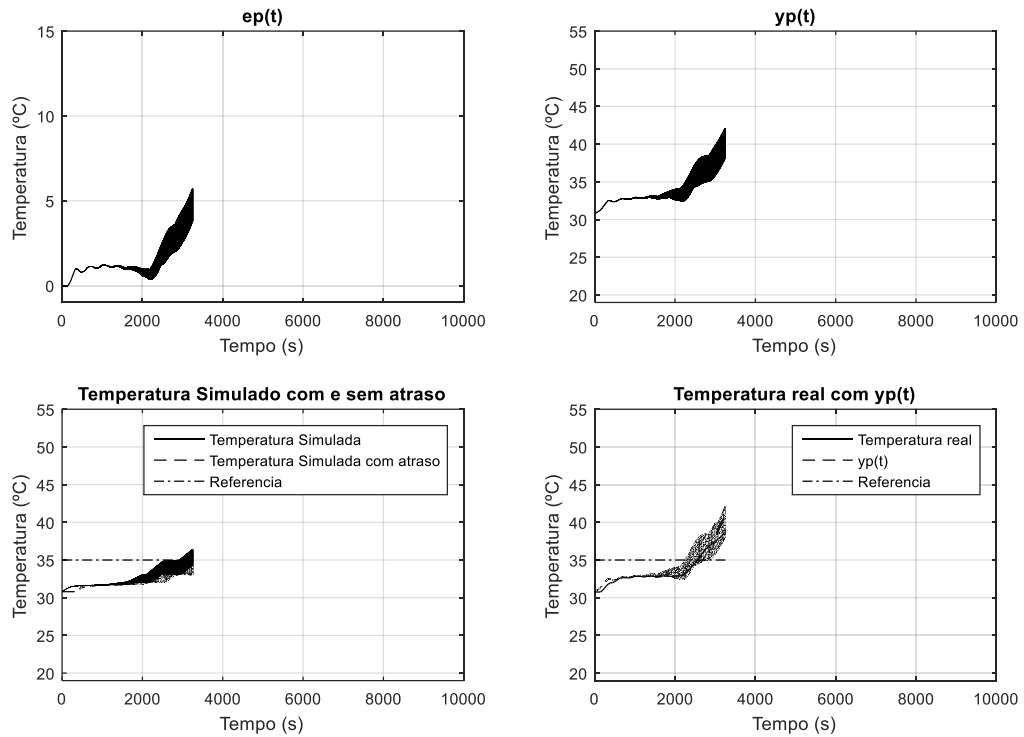
Os resultados do segundo ensaio estão na Figuras 34 e 35

Figura 34 – Temperatura do sistema, saída do controlador, diferença entre a temperatura a referência para o sistema e comparação da temperatura real com a temperatura simulada para o sistema com $k_p = 7,55$ para a configuração 3.



Fonte: Autoria própria

Figura 35 – Erro $e_p(t)$, realimentação do sistema $y_p(t)$, temperatura simulada com e sem o atraso, comparação com a temperatura do sistema e o sinal de realimentação $y_p(t)$ com $k_p = 7,55$ para a configuração 3.



Fonte: Autoria própria

Como nas Figuras 25 e 26 o sistema das Figuras 34 e 35 também se tornaram instáveis.

8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Primeiramente será realizada uma análise dos resultados obtidos aplicando o controle PI e posteriormente uma análise com os resultados obtidos com o controle baseado no preditor de Smith.

Para termos um parâmetro de comparação entre os resultados obtidos realizando os controle citados, iremos analisar os seguinte requisitos: temperatura em regime, tempo morto do sistema, temperatura inicial, sobressinal, temperatura do sistema em 3000 segundos, estado do sistema em 3000 segundos, tempo para o sistema atingir um erro na faixa de $0,1^{\circ}\text{C}$ da temperatura em regime e o tempo de acomodação.

Analisar o sistema em 3000 segundos é apenas para saber qual seu estado neste instante de tempo, analisar sua temperatura e o estado do sistema (decaimento ou crescimento da temperatura), analisar o tempo em que o sistema atinge um valor de erro na faixa de $0,1^{\circ}\text{C}$ tem o propósito de identificar o tempo que o sistema possui próxima ao valor de regime. O tempo de acomodação, como citado no Capítulo 2.4, é o período em que o sistema possui uma temperatura numa faixa de erro de 2% do valor de regime.

8.1 Análise dos resultados obtidos com o controle PI

No controle PI foi utilizado, para cada configuração do sistema, dois controles PI tendo valores de ganhos diferentes uns dos outros, o objetivo é saber o comportamento de cada configuração do sistema para diferentes valores de ganhos.

A primeira configuração do sistema possui uma coluna de água equivalente a 125 mm. Utilizando os valores para o primeiro controle igual à $K_p = 0,689$ e $T_i = 1776$ e para o segundo controle $K_p = 0,459$ e $T_i = 2664$ de acordo com a Tabela 3.

A segunda configuração do sistema possui uma coluna de água equivalente a 170 mm. Utilizando os valores para o primeiro controle igual à $K_p = 0,923$ e $T_i = 2152$ e para o segundo controle $K_p = 0,615$ e $T_i = 3228$.

A terceira configuração do sistema possui uma coluna de água equivalente a 215 mm. Utilizando os valores para o primeiro controle igual à $K_p = 1,113$ e $T_i = 2712$ e para o segundo controle $K_p = 0,742$ e $T_i = 4068$.

Para facilitar a análise dos dados, os parâmetros a serem analisados estão disponíveis na Tabela 6

Tabela 6 – Resultados dos controles PI aplicados para cada configuração do sistema.

Configuração	Configuração 1		Configuração 2		Configuração 3	
	Controle 1	Controle 2	Controle 3	Controle 4	Controle 5	Controle 6
Temperatura em regime (°C)	35,06	35,02	35,05	35,23	35,04	35,22
Tempo morto(s)	72	155	200	216	166	199
Temperatura inicial (°C)	27,7	25,05	26,76	24,32	25,57	26,35
Sobressinal (°C)	0,77	0,46	1,17	0,71	0,42	0,62
Temperatura do sistema em 3000 s	35,32	35,44	35,63	35,68	35,39	35,44
Estado do sistema em 3000s	Decaimento	Decaimento	Decaimento	Pico do valor de sobressinal	Decaimento	Subida
Tempo para erro na faixa de 0,1°C (s)	4278	8571	5967	6107	6278	7799
Tempo de acomodação (s)	1362	1183	2699	1560	1330	1919

Autoria Própria.

8.2 Análise dos Resultados obtidos com o controle baseado no preditor de Smith

No controle baseado no preditor de Smith foi utilizado, para cada configuração do sistema, dois controles PI com valores de ganhos diferentes uns dos outros, o objetivo é saber o comportamento de cada configuração do sistema para diferentes valores de ganhos.

A primeira configuração do sistema possui uma coluna de água equivalente a 125 mm. Utilizando os valores para o primeiro controle igual à $K_p =$

0,305 e $T_i = 3119$ e para o segundo controle $K_p = 3,05$ e $T_i = 3119$ de acordo com a Tabela 4.

A segunda configuração do sistema possui uma coluna de água equivalente a 170 mm. Utilizando os valores para o primeiro controle igual à $K_p = 0,4967$ e $T_i = 4851$ e para o segundo controle $K_p = 4,985$ e $T_i = 4851$.

A terceira configuração do sistema possui uma coluna de água equivalente a 215 mm. Utilizando os valores para o primeiro controle igual à $K_p = 0,742$ e $T_i = 7407$ e para o segundo controle $K_p = 7,42$ e $T_i = 7407$.

Para facilitar a análise dos dados, os parâmetros a serem analisados estão disponíveis na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados dos controles baseado no preditor de Smith aplicados para cada configuração do sistema.

Configuração	Configuração 1		Configuração 2		Configuração 3	
	Controle 7	Controle 8	Controle 9	Controle 10	Controle 11	Controle 12
Temperatura em regime (°C)	35,24	--	34,98	34,47	34,93	--
Tempo morto(s)	165	--	256	181	265	--
Temperatura inicial (°C)	27,9	--	30,22	27,21	29,95	--
Sobressinal (°C)	0,24	--	0	0	0	--
Temperatura do sistema em 3000 s	34,84	--	34,58	31,86	34,69	--
Estado do sistema em 3000s	Subida	--	Subida	Subida	Subida	--
Tempo para erro na faixa de 0,1°C (s)	4148	--	4899	10700	3778	--
Tempo de acomodação (s)	2452	--	2340	7591	2053	--

Autoria Própria.

8.3 Comparação entre os controles para cada configuração

Realizaremos uma análise para cada configuração do sistema para a configuração 1

Tabela 8 – Comparação entre os controle aplicados na configuração 1.

Configuração	Configuração 1 PI		Configuração 1 Preditor de Smith	
	Controle 1	Controle 2	Controle 7	Controle 8
Temperatura em regime (°C)	35,06	35,02	35,24	--
Tempo morto(s)	72	155	165	--
Temperatura inicial (°C)	27,7	25,05	27,9	--
Sobressinal (°C)	0,77	0,46	0,24	--
Temperatura do sistema em 3000 s	35,32	35,44	34,84	--
Estado do sistema em 3000s	Decaimento	Decaimento	Subida	--
Tempo para erro na faixa de 0,1°C (s)	4278	8571	4148	--
Tempo de acomodação (s)	1362	1183	2452	--

Autoria Própria.

A temperatura inicial do sistema variou de um controle para outro pelo fato dos mesmos terem sido realizados em dias diferentes.

O controlador 8 baseado no preditor de Smith se tornou instável. Isto ocorreu pois o ganho proporcional do PI utilizado fez com que a saída do controlador oscilasse desta maneira, a saída do sistema simulado também oscilou e carregou esse erro para a temperatura simulado com atraso, fazendo com que a temperatura simulada e a saída do controlador oscilasse cada vez mais.

No período de 3000 segundos os dois controles 1 e 2 estão em um estado de decaimento, isso ocorreu pelo fato deles terem um comportamento mais rápido que o controle 7 que estava em um estado de subida. Como os controle 1 e 2 tiveram um sobressinal, demoraram mais para atingir um erro na faixa de 0,1 °C.

Porém se analisarmos o tempo de acomodação, o desempenho dos controles 1 e 2 foi melhor que o controle 7.

Os resultados para comparação da configuração 2 estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparação entre os controle aplicados na configuração 2.

Configuração	Configuração 2 PI		Configuração 2 Preditor de Smith	
	Controle 3	Controle 4	Controle 9	Controle 10
Temperatura em regime (°C)	35,05	35,23	34,98	34,47
Tempo morto(s)	200	216	256	181
Temperatura inicial (°C)	26,76	24,32	30,22	27,21
Sobressinal (°C)	1,17	0,71	0	0
Temperatura do sistema em 3000 s	35,63	35,68	34,58	31,86
Estado do sistema em 3000s	Decaimento	Pico do valor de sobressinal	Subida	Subida
Tempo para erro na faixa de 0,1°C (s)	5967	6107	4899	10700
Tempo de acomodação (s)	2699	1560	2340	7591

Autoria Própria.

O controle 10 apesar de ter o mesmo polo que o controle 8, não teve oscilação em sua saída, porém seu desempenho foi muito abaixo dos outros controladores utilizados na configuração 2.

Na configuração 2 os controle 4 e 5 que são baseados no PI, tiveram seu comportamento mais rápido que o controle 9, sendo o controle 3 mais rápido ainda que o controle 4. Como consequência desse desempenho, os dois controles tiveram um sobressinal. Da mesma forma o sobressinal fez com que o tempo para um erro na faixa de 0,1 °C seja maior que o do controle 9. Se analisarmos o tempo de acomodação, o controle 4 teve o melhor desempenho, por causa do sobressinal o controle 9 teve um tempo melhor que o controle 3.

Os resultados para comparação da configuração 3 estão na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação entre os controle aplicados na configuração 3.

Configuração	Configuração 3 PI		Configuração 3 Preditor de Smith	
	Controle 5	Controle 6	Controle 11	Controle 12
Temperatura em regime (°C)	35,04	35,22	34,93	--
Tempo morto(s)	166	199	265	--
Temperatura inicial (°C)	25,57	26,35	29,95	--
Sobressinal (°C)	0,42	0,62	0	--
Temperatura do sistema em 3000 s	35,39	35,44	34,69	--
Estado do sistema em 3000s	Decaimento	Subida	Subida	--
Tempo para erro na faixa de 0,1°C (s)	6278	7799	3778	--
Tempo de acomodação (s)	1330	1919	2053	--

Autoria Própria.

O mesmo problema ocorrido no controle 8 ocorreu no controle 12, o sistema se tornou instável, pelo mesmo motivo.

Os controles 5 e 6 foram mais rápidos que o controle 11, porem os dois tiveram um sobressinal, desta forma o tempo para atingir um valor próximo a um erro na faixa de 0,1 °C foi maior que à do controle 11. Porem se analisarmos o tempo de acomodação o controle 5 teve o melhor desempenho, seguido do controle 6 e 11.

O tempo morto encontrado em cada um dos controles realizados são diferentes do tempo morto encontrado na identificação do sistema. Quando foi realizada a identificação do sistema, foi utilizado um degrau de 2 V. Quando se aplica uma tensão maior na resistência, o tempo morto do sistema diminui.

Analisando as Figuras que representam a saída dos controladores, a tensão de entrada na resistência se estabiliza abaixo de 2 V. Se a entrada de tensão na resistência estiver próxima de 2 V, o tempo morto do sistema será próximo ao valor modelado para o tempo morto, diminuindo assim a interferência da diferença do valor atual do tempo morto com o valor modelado no desempenho do sistema.

Os resultados encontrados com os controles baseados no PI, tiveram seu comportamento semelhante ao previsto nas simulações, todos os tiveram um

sobressinal, mais conseguiram chegar a um valor próximo da referência. Os controle com $T_c = L$ teve uma resposta mais rápida, e atingiu seu valor de regime mais rápido porem seu sobre sinal foi maior que o controle com $T_c = 2L$. O controle com $T_c = 2L$ se comportou de uma forma mais lenta.

No controle baseado no preditor de Smith, em nenhum de seus controles ouve um sobressinal, em alguns casos o sistema se estabilizou em uma temperatura acima da referência. Nos controle feitos com sintonia do PI com polos em 0,01 não tiveram bons desempenhos, para as configurações 1 e 3 o sistema de tornou instável, e para a configuração 2, seu desempenho foi bem abaixo do esperado. Para os controles realizados com polo em 0,001 teve bons resultados, estando dentro do previsto, tendo seu comportamento próximo ao simulado.

Para os controladores 7,9,11 foram comparados os valores da temperatura de saída do sistema real com o valor da temperatura simulada, o comportamento da temperatura do sistema simulado não teve o mesmo desempenho do sistema real, porem a estrutura do preditor de Smith possui um método de compensação quando existe essa diferença. Podemos considerar o sinal de realimentação y_p como sento o valor da temperatura sem o tempo morto. Apesar de existir um erro significativo entra a temperatura real e a simulada, a saída y_p conseguiu em todos os controles citados uma previsão do possível comportamento da temperatura do sistema.

9 CONCLUSÃO

Sistemas com tempo morto são comuns na indústria, e abordar o tempo morto na modelagem do sistema pode melhorar seu desempenho.

O controle PI é uma das ferramentas de controle mais utilizadas na indústria e em algumas formas de sintonia levam em consideração o tempo morto presente no sistema para tentar diminuir seus efeitos na estabilização do sistema, porém existem ferramentas que foram desenvolvidas exclusivamente para tratar sistema com tempo morto, como é o caso do controle baseado no preditor de Smith.

Apesar do sistema utilizado neste trabalho possuir um grande tempo morto, a resposta do sistema não teve uma oscilação que atrapalhasse na estabilização do sistema, talvez por se tratar de um sistema lento, o tempo morto não tenha causado muita interferência na estabilização do sistema nos dois controles utilizados. Porém esse comportamento pode ser justificado pelo fato de ambos os controles utilizados tratarem em sua dinâmica de sintonia e de método de controle o tempo morto, diminuindo assim os efeitos do mesmo na estabilização do sistema.

O controle PI teve um desempenho superior ao esperado, pelo fato do sistema ter se estabilizado, conseguido em todas configurações atingir um valor próximo a referência.

Apesar de algumas resposta obtidas no controle baseado no preditor de Smith tenham se tornado instável, podemos justificar esse comportamento pela maneira que o sistema foi implementada, a oscilação que ocorreu na saída do valor simulado da temperatura tenha sido responsável pelo sistema ter se tornado instável, porém nos outros controles com o polo mais próximo de zero seu desempenho foi muito próximo ao desejado, não tendo nenhuma oscilação causada pelo tempo morto, e não tendo um sobressinal, conseguindo atingir na maioria dos casos um valor próximo ao valor desejado.

Vale ressaltar que foi utilizado neste trabalho o preditor de Smith clássico, desta forma seu desempenho pode ser melhorado se aplicar outras formas de controle baseado no preditor de Smith para que situações como as que levaram o sistema a instabilidade não ocorram, melhorando assim o desempenho dos controladores.

Apesar dos controles baseados no preditor de Smith com polos em 0,01 não terem tido um bom desempenho, o desempenho dos controles com polos em 0,001 foram bem satisfatórios juntamente com os resultados obtidos com o controle PI, podendo assim concluir que ambos os controles tiveram bons desempenhos para o sistema utilizado e suas diferentes situações.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, Luis Antonio. **Enciclopédia de Automática – Controle e Automação**. Volume 2. 1.ed. São Paulo: Editora Blucher, 2007.

ANDRADE, Lucas Henrique Salame de. **Técnicas de controle robustos misto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ aplicada a um sistema multivariável não-linear**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio. 2016.

CASTRUCCI, Plinio de Lauro; BITTAR, Anselmo; SALES, Roberto Moura. **Controle Automático**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

LARSEN, R. W. **LabVIEW for Engineers**. USA: Prentice Hall, 2011.

LI, Y.; ANG, K.H.; CHONG, G. C.Y. **PID Control System Analysis and Design**. IEEE Control Systems, fev. 2006.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Primeiros passos com CompactRIO – Realizando controle básico**. Disponível em <<http://www.ni.com/tutorial/11197/pt/>> acessado em: 2 setembro 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Pid vi**. Disponível em <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361L-01/lvpid/pid_vi/> acessado em: 10 março 2018.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Math Script**. Disponível em <<http://sine.ni.com/np/app/main/p/docid/nav-104/lang/pt/fmid/12679/>> acessado em: 10 março 2018.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Integer delay**. Disponível em <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371988F-01/lvdigfiltdestk/dfd_integer_delay/> acessado em: 10 março 2018.

NORMEY-RICO, J.E.; CAMACHO, E.F. **Control of Dead-time Processes**. Springer-Verlag, 2007.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 1.ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1985.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4.ed. Rio de Janeiro: Pearson Brasil, 2003.

SLOTINE, Jean Jacques E.; LI, Weiping. **Applied Nonlinear Control**. New Jersey Prentice – Hall, 1991.