

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

RENAN LIMA SENA

**CONTROLADOR PID APLICADO A UMA MALHA DE
CONTROLE DE TEMPERATURA DE FORNO RESISTIVO**

VITÓRIA – ES
JULHO/2017

RENAN LIMA SENA

CONTROLADOR PID APLICADO A UMA MALHA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DE FORNO RESISTIVO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Renan Lima Sena**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Jose Leandro Félix Salles

CONTROLADOR PID APLICADO A UMA MALHA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DE FORNO RESISTIVO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Renan Lima Sena**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 26 de Julho de 2017

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jose Leandro Félix Salles
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Título e Nome completo
Instituição a qual pertence
Coorientador

Eng. Felipe Pereira Lobo
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. Dr. Alessandro Mattedi
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

RESUMO

A necessidade de manter as variáveis de um processo em valores especificados, demanda cada vez mais dos sistemas de controle automático com realimentação - sendo o controle PID uma parte de fundamental importância para a área de controle de processos e automação. O ensino de controle de processos industriais requer a adequada fundamentação teórica dada na sala de aula, bem como a realização de experimentos em laboratório que abordem o uso de tecnologias existentes no mercado para a solução dos problemas reais encontrados no meio industrial. Por conseguinte, este trabalho intenta apresentar o projeto de uma plataforma didática de um sistema de controle de temperatura para um forno resistivo, utilizando toda a parte de hardware software de cunho industrial, visando salientar critérios clássicos de identificação de processos e também uma análise comparativa entre métodos clássicos de sintonia de controladores PID. Para tal, será realizado a identificação do modelo da malha de temperatura, a sintonia e projeto controladores PID utilizando métodos consagrados na literatura e em aplicações práticas na indústria. Outrossim, estes controladores serão avaliados por meio de critérios no domínio do tempo para o problema de controle do tipo servo. Toda a análise será feita a partir de software de simulação por computador em conjunto com os testes no protótipo. O projeto visa, ainda, a elaboração de um sistema de supervisão para a malha de controle de temperatura do forno resistivo, tencionando explicar um pouco sobre comunicação em CLP's e sistemas de supervisão via comunicação OPC.

Palavras-chave: Controladores PID; controle; sintonia; processo; variável manipulada; variável de processo; forno resistivo; temperatura; identificação.

ABSTRACT

The need to keep the variables of a process in specified values, demands more and more of the automatic control systems with feedback - being the control PID a part of fundamental importance for the processes and automation control area. The teaching of industrial process control requires the adequate theoretical foundation given in the classroom, as well as conducting laboratory experiments that address the use of existing technologies in the market to solve the real problems encountered in the industrial area. Therefore, this work aims at presenting the design of a didactic platform of a temperature control system for a resistive furnace, using all industrial software hardware part, aiming to emphasize classic process identification criteria and also a comparative analysis between Classical PID controller tuning methods. In order to do it, the identification of the temperature mesh model, the tuning and design of PID controllers will be carried out using methods established in the literature and in practical applications in the industry. Moreover, these controllers will be evaluated by means of time-domain criteria for the control problem of the servo type. All analysis will be done from computer simulation software in conjunction with testing on the prototype. The project also aims at the elaboration of a supervision system for the temperature control mesh of the resistive furnace, intending to explain a little about communication in PLC's and supervision systems via OPC communication.

Keywords: PID controllers; control; Tuning; process; Manipulated variable; Process variable; Resistive furnace; temperature; Identification.

.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Diagrama ilustrativo do sistema de controle implementado.....	14
Figura 2-Fluxograma P&ID da malha de controle implementada.....	15
Figura 3-Fluxograma do projeto proposto.....	17
Figura 4-Estutura utilizada para confecção do protótipo.....	17
Figura 5-Prótipo do Forno de aquecimento confeccionado.....	18
Figura 6-CLP S7200 CPU 224 com os módulos de expansão EM231 e EM232	20
Figura 7-Módulo de entradas analógicas EM231	21
Figura 8-Configuração do módulo EM231	21
Figura 9-Módulo de saída analógica EM232	22
Figura 10- conjunto transmissor de temperatura TRT2432 da IFM e sensor PT100	23
Figura 11-IHM do transmissor de temperatura TRT2432 da IFM	24
Figura 12-Esquemático do circuito do controlador de potência.....	25
Figura 13-Controle de potência por ângulo de disparo em um gradador de tensão.	26
Figura 14-Controlador de potência SPC1-35	26
Figura 15-Seleção do modo de controle do SPC1-35.....	27
Figura 16-Conexão do circuito de potência com o SPC-35	27
Figura 17-Conexão do sinal de controle com o SPC-35	28
Figura 18-Característica de variação do ângulo de disparo em relação ao sinal de controle.	28
Figura 19-Característica de variação do ângulo de disparo em relação ao sinal de controle.	29
Figura 20-Tela inicial para configuração do PID no Step 7 Microwin	30
Figura 21-Escolha do número do bloco PID a ser criado no Step7 Microwin.....	30
Figura 22-Configuração da escala do setpoint e dos ganhos iniciais do bloco PID no Step7 Microwin.....	31
Figura 23-Configuração dos Ranges de entradas e saídas analógicas para o controlador PID.....	32
Figura 24-Faixa de endereços onde serão armazenados os parâmetros do bloco PID no step7 Microwin.....	32
Figura 25-Programa principal implementado no Step7 Microwin	33
Figura 26-Criação de um canal de comunicação no KepserverEx	35
Figura 27-Seleção do driver do dispositivo no KepserverEx	36
Figura 28-Parâmetros da comunicação do canal OPC	36

Figura 29-Configuração do endereço do computador na rede para comunicação OPC.....	37
Figura 30-Configuração de um novo dispositivo no Kepserver EX.....	37
Figura 31-TAG's inseridas no servidor OPC	38
Figura 32-Diagrama de blocos para identificação do sistema e aquisição de dados com o Matlab.....	39
Figura 33-Configuração do bloco de leitura OPC no simulink	39
Figura 34-Configuração do bloco de escrita OPC no simulink.....	40
Figura 35-Tela inicial do software Elipse SCADA	42
Figura 36-Software de supervisão Elipse Scada.....	42
Figura 37-Criação de um novo servidor OPC no Elipse Scada.....	43
Figura 38-Localização do servidor na rede e importação das TAG's no Elipse Scada	43
Figura 39-Associação da TAG ao objeto no Elipse Scada	44
Figura 40-Sistema de controle de temperatura do forno	47
Figura 41-Método de Ziegler & Nichols e Hägglund para identificação	50
Figura 42-Método de identificação de Smith	51
Figura 43-Método de identificação de Sundaresan e Krishnaswamy.....	52
Figura 44-Curva de reação em função de uma resposta ao degrau para um ponto de operação de 120 °C.....	53
Figura 45-Simulação dos modelos obtidos via identificação	54
Figura 46-Resposta ao degrau do modelo em malha aberta	55
Figura 47-Resposta ao degrau em malha fechada com PID em um sistema de primeira ordem com atraso	56
Figura 48-Diagrama de Blocos para a simulação dos controladores	63
Figura 49-Simulação do controlador PID sintonizado pelo método de Ziegler & Nichols..	63
Figura 50-Simulação do controlador PID sintonizado pelo método CHR.	64
Figura 51- -Simulação do controlador PID sintonizado pelo método de Cohen Conn.	64
Figura 52-Simulação do controlador PID sintonizado pelo método IAE.	65
Figura 53- Simulação do controlador PID sintonizado pelo método ITAE.	65
Figura 54-Comparação dos controladores via simulação	66
Figura 55-Resposta ao degrau obtida no protótipo com o PID sintonizado pelo método ITAE	67
Figura 56- Resposta a sucessivos degraus obtida no protótipo com o PID sintonizado pelo método ITAE	68
Figura 57-Reação ao distúrbio em malha fechada para PID de ITAE testado no protótipo ..	69

Figura 58-Resposta a rampa com patamares em SP, para o PID sintonizado pelo método ITAE	70
Figura 59-Sistema de supervisão se comunicando com CLP	71
Figura 60-Eschema de interligação dos instrumentos pertencentes a malha de controle.....	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Legenda do diagrama P&ID da figura 1	15
Quadro 2-Materias utilizados para confecção do protótipo.....	18
Quadro 3-Parametrização feita no transmissor de temperatura TRT TRT2432.....	24
Quadro 4-Descrição das entradas e saídas do bloco PID no Step7 Microwin.....	33
Quadro 5-Memórias associadas aos demais parâmetros do controlador.	34
Quadro 6-Descrição das características de resposta	57
Quadro 7-Método de Ziegler & Nichols em malha fechada.....	58
Quadro 8-Método de Ziegler & Nichols em malha aberta	58
Quadro 9-Método CHR para resposta mais rápida possível sem sobressinal.	59
Quadro 10-Método de Cohen Coon.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros de resposta em malha aberta obtidos via identificação de sistemas e FIT	53
Tabela 2-Constantes aplicadas no método IAE e ITAE	61
Tabela 3-Ganhos do controlador aplicando os métodos clássicos de sintonia	62
Tabela 4-Características de resposta em função de um degrau no setpoint na simulação	66
Tabela 5- Características de resposta em função de um degrau no setpoint.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controlador Lógico Programável
EFC	Elemento final de controle
MV	Variável Manipulada
OPC	OLE For Procces Control
P&ID	Diagrama de tubulação e instrumentação
PID	Proporcional Integral Derivativo
PV	Variável de Processo
SP	Setpoint
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

LISTA DE SÍMBOLOS

κ	Constante de proporcionalidade térmica por condução (cal/s.K)
C	Capacitância térmica (J/K)
T	Temperatura interna da estufa (K)
T_a	Temperatura externa da estufa (K)
t	Tempo (s)
ΔT	Diferença numérica entre a temperatura externa e interna da estufa (K)
R	Resistência térmica do material da estufa (W/m.K)
$q_o(t)$	Calor perdido pelo sistema (Cal)
$q_i(t)$	Calor adicionado ao sistema (Cal)
q	Fluxo de calor (Cal/s)
K	Ganho do sistema em malha aberta (°C/W ou adimensional)
τ	Constante de tempo do sistema em malha aberta (s)
θ	Tempo morto do sistema em malha aberta (s)
PV	Variável de processo, temperatura interna da estufa (°C ou %)
MV	Variável manipulada, potência entregue ao resistor de aquecimento (W ou %)
$G(s)$	Função de transferência do sistema em malha aberta
$C(s)$	Função de transferência do controlador
K_p	Ganho proporcional do controlador PID
T_i	Tempo integral do controlador PID
T_d	Tempo derivativo do controlador PID

SUMÁRIO

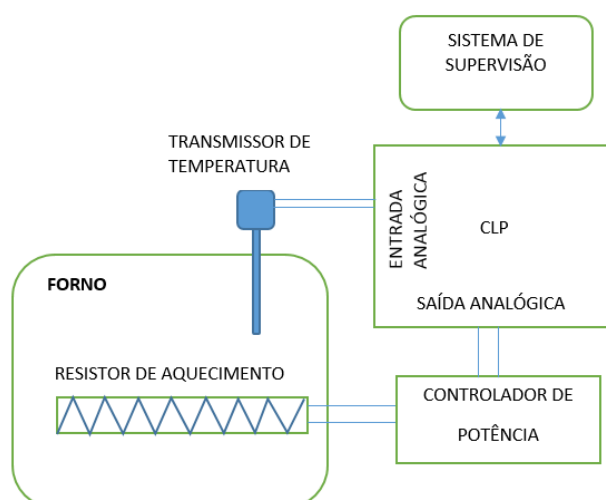
1 INTRODUÇÃO	14
2 DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA DIDÁTICA.....	17
2.1 Hardware	19
2.1.1 Controlador lógico programável CLP	19
2.1.2 Transmissor de temperatura e sensor PT100.....	22
2.1.3 Controlador de potência	25
2.2 Software.....	29
2.2.1 Programação do CLP.....	29
2.2.2 Comunicação OPC	34
2.2.3 Interface com MATLAB	38
2.2.4 Interface com o sistema supervisório	40
3 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR PID.....	45
3.1 Modelagem e identificação.....	47
3.1.1 Método de Ziegler & Nichols e Hägglund	50
3.1.2 Método de Smith	51
3.1.3 Método de Sundaresan e Krishnaswamy.....	51
3.1.4 Aplicação dos métodos de identificação na planta.....	52
3.2 Métodos clássicos de sintonia do controlador PID.....	55
3.2.1 Método heurístico de Ziegler e Nichols	57
3.2.2 Método CHR	59
3.2.3 Método Heurístico de Cohen Coon	60
3.2.4 Método baseado nos índices de desempenho ITAE e IAE	60
4 TESTES E RESULTADOS OBTIDOS.....	62
4.1 Aplicação dos métodos de sintonia na planta via simulação.....	62
4.2 Aplicação do controlador PID na planta do protótipo.....	67
5 CONCLUSÃO	72
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICE A	76
APÊNDICE B-CÓDIGO FONTE DAS ROTINAS UTILIZADAS PARA SIMULAÇÃO NO MATLAB.....	77

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de prover aulas experimentais na área de controle de processos, é proposto neste trabalho, o projeto de um sistema de controle de temperatura em uma plataforma didática, que consiste em um protótipo de um forno resistivo. O conceito de plataforma didática para ensino de controle de processos, foi abordado em projetos de controle automático anteriores realizados no DEL-CT- UFES, podendo citar como exemplo o trabalho de Kamei (2008) que trata sobre controle de nível em tanques acoplados e o trabalho de Lima (2012) que trata sobre controle de temperatura em um duto de ar. Entretanto, ambos tratam de sistemas de controle e metodologias diferentes do que é proposto neste trabalho. Este trabalho visa abordar o uso de tecnologias existentes no mercado para a solução dos problemas reais encontrados no meio industrial industrial , tanto na parte de hardware quanto de software, podendo-se citar como exemplo a utilização de controladores lógicos programáveis, transmissor de temperatura com saída 4-20mA , sistemas supervisórios e comunicação OPC. Serão citados os conceitos teóricos de controle de processos, assim como será mostrado os componentes utilizados no desenvolvimento desse projeto. Ao final serão apresentados resultados experimentais obtidos com o auxílio do software MATLAB.

Como já mencionado anteriormente, o sistema de controle implementado, consiste em uma malha de controle de temperatura para um forno de aquecimento resistivo, como ilustrado na figura 1.

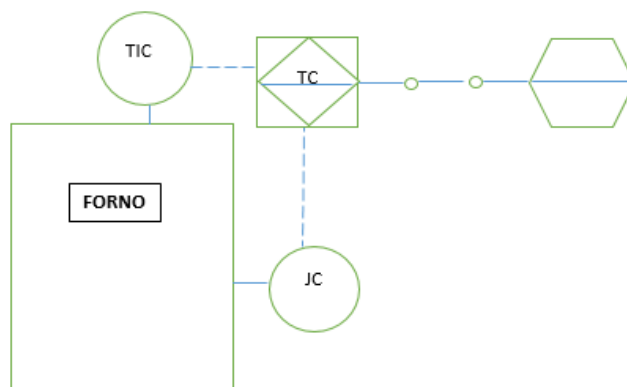
Figura 1-Diagrama ilustrativo do sistema de controle implementado



Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 1 ilustra uma visão geral do sistema, a qual mostra a interligação entre o processo e os demais instrumentos pertencentes a malha de controle. Já a figura 2 representa o fluxograma P&ID do sistema de controle implementado, seguido da legenda apresentada pelo quadro 1.

Figura 2-Fluxograma P&ID da malha de controle implementada



Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 1-Legenda do diagrama P&ID da figura 1

	Sinal elétrico de corrente 4-20 mA
	Ligação por software (rs485-cabo de programação PPI)
	Transmissor e indicador de temperatura TR-2332 IFM
	Controlador de potência SPC1-35 AUTONICS
	Controlador de temperatura (CLP Siemens s7200 CPU-224 com cartões EM231 e EM232)
	Computador do processo com o sistema de supervisão Elipse Scada

Fonte: Produção do próprio autor.

Verifica-se na figura 2, que o sistema consiste em um sistema em malha fechada, no qual os instrumentos pertencentes a malha se comunicam através de sinais elétricos de corrente 4 a 20mA. Já o sistema de supervisão utiliza do próprio protocolo e meio físico de programação do CLP para comunicar-se com o software de supervisão Elipse Scada por meio de um servidor OPC.

Para implementação da malha de controle, será utilizado a estratégia de controle *feedback* convencional, onde a variável de processo é a temperatura interna do forno e a variável manipulada é a potência fornecida ao resistor de aquecimento.

O controlador que será utilizado neste projeto, baseia-se no algoritmo de controle PID, que será implementado em um Controlador Lógico Programável SIEMENS S7-200, que será mais detalhado adiante. Como Elemento Final de Controle, será utilizado o controlador de potência por ângulo de fase SPC1-35 da AUTONICS, o qual irá receber um sinal de controle na faixa de 4 a 20mA e irá variar a potência fornecida a um resistor de aquecimento inserido na parte interna do forno. Estes instrumentos também serão detalhados mais adiante.

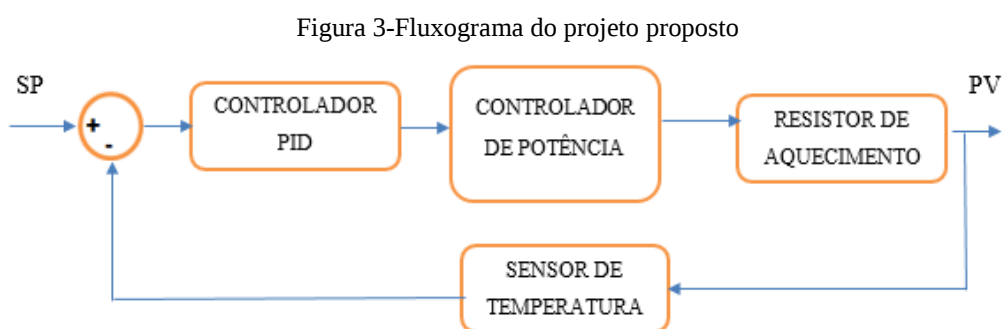
Além de projetar a plataforma didática para o controle de temperatura, este trabalho também visa explorar alguns métodos clássicos de identificação de sistemas e métodos clássicos de sintonia de controladores PID. Para tal aplicação, o trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- No Capítulo 2, será apresentado o desenvolvimento do protótipo, assim como toda parte de hardware e software utilizada;
- No Capítulo 3 será apresentado o desenvolvimento do controlador, contemplando a modelagem e identificação do sistema e apresentação dos critérios de sintonia que serão utilizados;
- No Capítulo 4 serão apresentados resultados obtidos com a sintonia do controlador via simulação e testes no protótipo;
- No Capítulo 5 será apresentado a conclusão.

2 DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA DIDÁTICA

Como já apresentado no capítulo 1, o protótipo consiste em um sistema de controle de temperatura de um forno resistivo, no qual foi utilizado um transmissor de temperatura com PT100 como elemento sensor, para medir a temperatura interna do forno. O valor de temperatura será enviado numa escala de 4-20 mA para o CLP Siemens S7-200 CPU 224, com os módulos de expansão de entradas e saídas analógicas EM 231 e EM232 respectivamente, onde nele há o algoritmo PID implementado. Foi utilizado a saída analógica deste CLP, para enviar um o sinal de controle numa faixa de 4-20 mA para o controlador de potência. O controlador de potência tem como função manipular a potência fornecida ao um resistor de aquecimento do forno de acordo com o sinal de controle recebido do CLP.

A Figura 3 representa o fluxograma do projeto, sintetizando o que foi descrito acima sobre o projeto do sistema de controle.



Produção do próprio autor.

Para construção da estrutura do protótipo, foi utilizado como base a estrutura de um forno a gás, adaptando-o para um sistema de aquecimento resistivo através da inserção de um resistor de aquecimento aletado de 1500W, como mostrado na figura 4.

Figura 4-Estutura utilizada para confecção do protótipo



Fonte: Produção do próprio autor.

Na figura 5 é mostrada a visão geral do protótipo, onde pode ser visualizado a localização dos equipamentos no protótipo.

Figura 5-Protótipo do Forno de aquecimento confeccionado



Fonte: Produção do próprio autor

O quadro 2 mostra os materiais que foram utilizados para a confecção do protótipo, assim como o custo de cada item.

Quadro 2-Materias utilizados para confecção do protótipo

Equipamento	Valor
Resistor de aquecimento aletado de 1500W 220V	R\$ 120,0
Estrutura de um forno a gás	-
Transmissor de temperatura TRT2432 da IFM com PT100	R\$ 600,0
Controlador de potência SPC1-35 da AUTONICS	R\$ 350,0
Fonte de alimentação chaveada S-120-24 da BHS	R\$ 100,0
CLP Siemens S7-200 CPU 224 com módulos de entrada e saída analógica EM231 e EM232	R\$ 2000,0
Cabo De Programação Usb-PPI Para Siemens S7-200	R\$ 100,0
DTM bipolar C10 da GE	R\$ 38,0
DTM bipolar C4 da STECK	R\$ 38,0
TOTAL	R\$ 3346,0

Fonte: Produção do próprio autor.

Vale ressaltar que, o CLP e o controlador de potência, foram fornecidos pela instituição de ensino técnico CEDTEC.

Mesmo com o custo elevado, devido aos equipamentos utilizados serem de cunho industrial, vale ressaltar também que os mesmos poderiam ser substituídos por equipamentos de menor custo, podendo citar como exemplo a utilização de um micro controlador PIC ou arduino ao invés do CLP.

Nos tópicos seguintes, serão apresentados a descrição dos principais instrumentos contidos na malha do sistema de controle proposto, bem como as configurações feitas em cada instrumento. Já os esquemas de interligação dos instrumentos estão contidos na figura do apêndice A.

2.1 Hardware

A parte de hardware deste projeto é composta pelo controlador lógico programável, controlador de potência e transmissor de temperatura, sendo que cada um destes instrumentos realiza uma função específica no sistema de controle. No caso do CLP, é necessário também programá-lo de acordo com o objetivo desejado, que será apresentado mais adiante na parte de software. Entretanto, o transmissor de temperatura e o controlador de potência, não exigem nenhuma programação, basta uma configuração dos mesmos, as quais serão apresentadas a seguir.

2.1.1 Controlador lógico programável CLP

Controladores lógicos programáveis, são amplamente utilizados no ambiente industrial em aplicações de sequenciamento de operações e no controle realimentado de processos - que será a aplicação feita neste projeto.

O CLP (Controlador Lógico Programável) é um dispositivo de entradas e saídas que faz o processamento dos sinais de entrada e gera sinais de saída de acordo com uma programação feita. De forma sucinta, podemos descrever um CLP como um computador adaptado para um ambiente industrial.

Neste projeto, o CLP irá executar o algoritmo de controle PID. O controlador lógico programável escolhido para este projeto é o CLP Siemens S7-200 CPU 224, com os módulos de expansão EM 231 e EM232, correspondentes a entradas e saídas analógicas respectivamente. Seguem abaixo, na figura 6, as imagens da CPU e dos respectivos módulos de expansão.

Figura 6-CLP S7200 CPU 224 com os módulos de expansão EM231 e EM232



Fonte: Produção do próprio autor.

O EM231 é um módulo de entrada analógica de 4 canais com 12 bits de resolução, que aceita entradas analógicas de corrente e tensão nas seguintes faixas de valores:

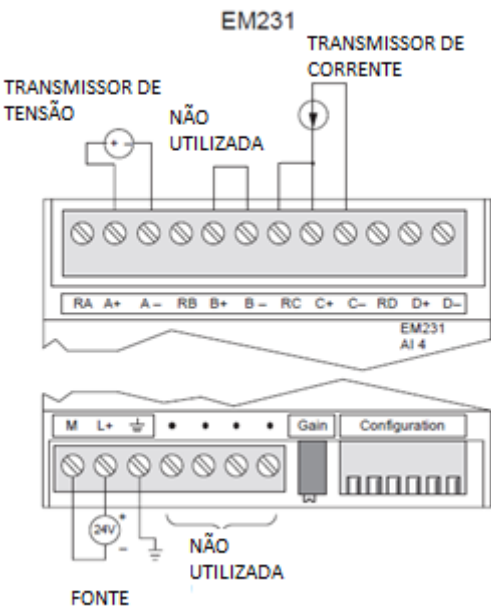
- Tensão 0 a 10 V;
- Tensão 0 a 5V;
- Tensão -5V a 5V;
- Tensão -2,5V a 2,5V;
- Corrente 0 a 20mA.

Neste CLP, as entradas analógicas são referenciadas com os endereços AIW0, AIW2, AIW4 e AIW6, sendo que para este projeto, foi utilizada a entrada AIW0, como mostrado no esquema de interligação do apêndice A. Os valores correspondentes as entradas citadas acima são armazenados nos respectivos registros do CLP após a conversão A/D, contendo valores na faixa de 0 a 32760.

A seleção do tipo de sinal de entrada é feita através de uma chave “Dip Switch”, localizada na parte lateral do módulo, e também através da conexão feita no módulo, como ilustrado na figura 7.

Este módulo irá receber do transmissor de temperatura na faixa de 4-20mA, correspondente a variável de processo, logo, a entrada analógica será utilizada como entrada de corrente, sendo necessário a configuração feita nas chaves de “Dip Switch” mostradas na figura 8.

Figura 7-Módulo de entradas analógicas EM231



Fonte: Manual Siemens S7200, (2005)

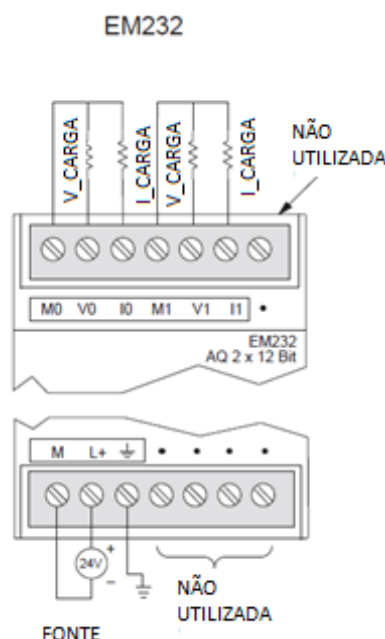
Figura 8-Configuração do módulo EM231

Unipolar			ESCALA DA ENTRADA	RESOLUÇÃO
SW1	SW2	SW3		
ON	OFF	ON	0 to 10 V	2.5 mV
	ON	OFF	0 to 5 V	1.25 mV
			0 to 20 mA	5 µA
Bipolar			ESCALA DA ENTRADA	RESOLUÇÃO
SW1	SW2	SW3		
OFF	OFF	ON	± 5 V	2.5 mV
	ON	OFF	± 2.5 V	1.25 mV

Fonte: Manual Siemens S7200, (2005)

O EM232 é um módulo de saída analógica de 2 canais com 12 bits de resolução, que pode fornecer saída de 0-20mA e tensões de 0 a 10V, sendo essas saídas selecionadas a partir da forma como se faz a conexão com o módulo, como ilustrado na figura 9.

Figura 9-Módulo de saída analógica EM232



Fonte: Manual Siemens S7200, (2005)

A figura 9 mostra que a saída de corrente é obtida através dos terminais I0 e M0, sendo M0 a referência do sinal, já a saída de tensão é obtida coletando o sinal entre os terminais V0 e M0.

O sinal de saída deste módulo será o sinal de controle enviado para o controlador de potência, que teve sua entrada configurada para 4-20mA. Como o sinal de saída do módulo EM232 possui range 0-20mA, o valor da saída foi escalonado para 4-20mA no software, como será mostrado adiante. Mais detalhes sobre a interligação dos instrumentos com o CLP, podem ser vistos no apêndice A.

2.1.2 Transmissor de temperatura e sensor PT100

O PT100 é um sensor de temperatura pertencente a classe das termo-resistências, que é amplamente utilizado no meio industrial. O princípio de funcionamento de um PT100 é a de variação de resistência elétrica em função de uma variação de temperatura, ou seja, a temperatura pode ser determinada a partir da resistência entre os terminais do PT100. O nome PT100 se deve ao fato do elemento sensor ser a platina, cujo a resistência elétrica a 0° é 100 ohms.

Para condicionar o sinal de saída para um sinal padronizado utilizado em instrumentação, faz-se necessário utilizar um transmissor, que recebe o sinal de variação de resistência elétrica do

PT100 e converte para um sinal elétrico padrão, como por exemplo, sinais de 0-10V ou 4-20mA utilizado no projeto.

Nesse projeto, foi utilizado o transmissor de temperatura TRT2432 da IFM, utilizando um PT100 como elemento sensor, que está localizado próximo ao resistor de aquecimento do forno como pode ser visto na figura 10. O conjunto transmissor e sensor, mostrado na figura 10, tem como função realizar a medição da temperatura do forno, que corresponde a variável de processo, e enviar um sinal correspondente a essa variável para a entrada analógica AIW0 do CLP.

Figura 10- conjunto transmissor de temperatura TRT2432 da IFM e sensor PT100



Fonte: Produção do próprio autor

Este transmissor possui saída de corrente 4-20mA e tensão 0-10 V, devendo ser selecionada via configuração.

A configuração deste transmissor é feita através de sua IHM, por meio dos botões “Mode/Enter” e “Set”, como mostrado na figura 11 . A configuração consiste em atribuir valores aos parâmetros correspondentes a cada aplicação desejada. As configurações dos parâmetros feitas no transmissor são mostradas no quadro 3.

Figura 11-IHM do transmissor de temperatura TRT2432 da IFM



Fonte: Produção do próprio autor

Quadro 3-Parametrização feita no transmissor de temperatura TRT TRT2432

Parâmetro	Valor Ajustado	Significado
SP1	Não configurado	Valor limite superior / inferior da temperatura do sistema, no qual OUT1 comuta.
rP1	Não configurado	Valor limite inferior da temperatura do sistema, no qual OUT1 comuta.
OU1	50.0	Função de saída para OUT1:
OU2	I	Função de saída para OUT2: Sinal analógico: 4...20 mA [I] ou 0...10 V [U].
ASP	0.0	Valor inicial analógico para temperatura.
AEP	200.0	Valor final analógico para temperatura
Mmod	4w	Método de medição (sensor de temperatura de 2 / 3 / 4 condutores).
COF	0.0	Calibração do ponto zero.
dS1	0.0	Taxa de atualização e orientação do display.
dr1	Não configurado	Retardo de desligamento para OUT1.
FOU1	Não configurado	Comportamento de saída 1 em caso de um erro interno.
FOU2	OFF	Comportamento de saída 2 em caso de um erro interno
P-n	Não configurado	Lógica de comutação para OUT1: pnp ou npn.
diS	d2	Taxa de atualização e orientação do display.
Uni	°C	Unidade de medida para a temperatura do sistema.

Fonte: Produção do próprio autor

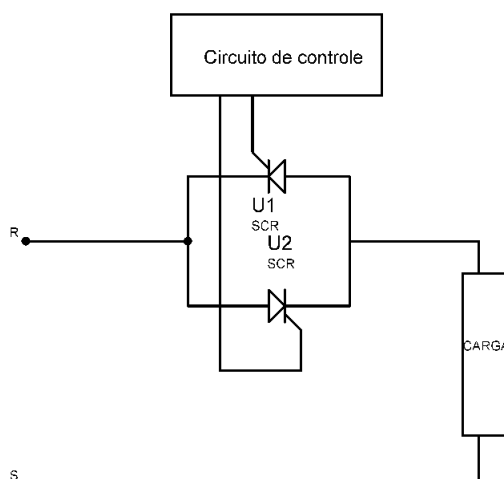
De forma sucinta, a parametrização feita no transmissor de temperatura tem como função a utilização da saída analógica denominada OUT1, como saída de corrente 4-20mA e com range de medição de 0 a 200 °C. Detalhes da interligação do transmissor de temperatura com os demais componentes podem ser vistos no apêndice A.

2.1.3 Controlador de potência

Um controlador de potência é um circuito que tem como função receber um sinal de controle e variar a potência fornecida a uma carga em função deste sinal.

Neste trabalho, o controlador de potência utilizado é composto basicamente por um conversor CA-CA conhecido como gradador de tensão, como mostrado na figura 12.

Figura 12-Esquemático do circuito do controlador de potência

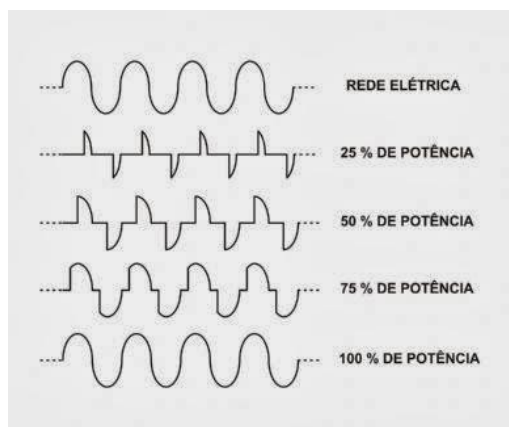


Fonte: Produção do próprio autor

Nesse circuito, a tensão RMS na carga, varia de acordo com o ângulo de disparo do SCR's. Ou seja, a potência fornecida para a carga também varia de acordo com o ângulo de disparo dos SCR's.

Este ângulo pode variar de 0 a 180°, de modo que, para 0° teremos 100% de potência fornecida para a carga, e para 180°, teremos 0% de potência. O ângulo de disparo dos SCR's é definido pelo circuito de controle, a partir de um sinal de controle, ou seja, a potência entregue a carga, será função do sinal de controle que o controlador de potência irá receber. A figura 13 mostra a forma de onda da tensão na carga neste tipo de circuito para variados ângulos de disparo, assim como a potência fornecida para a carga.

Figura 13-Controle de potência por ângulo de disparo em um gradador de tensão.



Fonte: <http://bragamarcos.blogspot.com.br/2013/12/controle-de-angulo-de-disparo.html>

O controlador de potência utilizado para este projeto, foi o SPC1-35 da AUTONICS, mostrado na figura 14.

Figura 14-Controlador de potência SPC1-35



Fonte: Produção do próprio autor

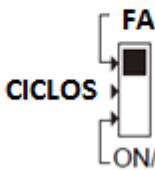
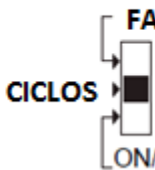
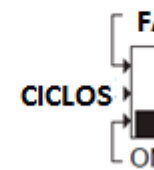
O SPC1-35 é um controlador de potência com entrada de 220V 60/50 Hz e corrente máxima de saída 35A, que satisfaz a carga deste projeto, já que consistem em um resistor de aquecimento de 1500W 220V. Este controlador possui 3 modos de controle:

- Controle por ângulo de fase;
- Controle por ciclos;

- Controle ON-OFF.

Entretanto nessa aplicação, iremos configurá-lo apenas para o controle por ângulo de fase, como explicado anteriormente. Essa configuração é feita através apenas de uma chave de seleção localizada no controlador de potência, como mostra a figura 15.

Figura 15-Seleção do modo de controle do SPC1-35

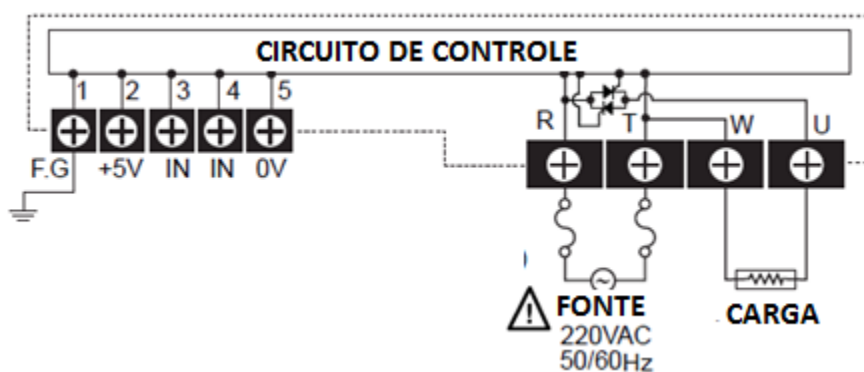
Modo de controle	Controle por ângulo de fase	Controle por ciclo	Controle ON-OFF
Posição da chave			

Fonte: Manual do SPC1-35

O sinal de controle recebido por esse controlador de potência, pode ser um sinal de 1 a 5V ou 4 a 20mA. Entretanto, como mencionado anteriormente, a saída analógica do CLP foi configurada para 4-20mA, portanto, iremos utilizar a opção de 4-20mA no controlador de potência.

A figura 16 mostra a conexão que deverá ser feita na parte de potência do SPC-35, onde os terminais R e T foram conectados na rede elétrica e os terminais U e W serão conectados ao resistor de aquecimento.

Figura 16-Conexão do circuito de potência com o SPC-35

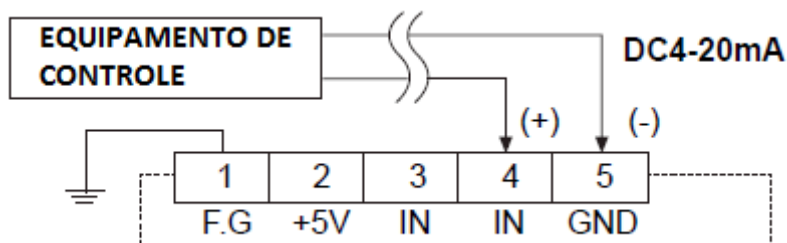


Fonte: Manual do SPC1-35

A figura 16 mostra como deve ser feita a conexão do sinal de controle no controlador de potência SPC-35. Como já citado, utilizaremos um sinal de corrente de 4 a 20 mA, portanto o

signal de controle fornecido pelo CLP será interligado aos terminais 4 e 5 do controlador de potência.

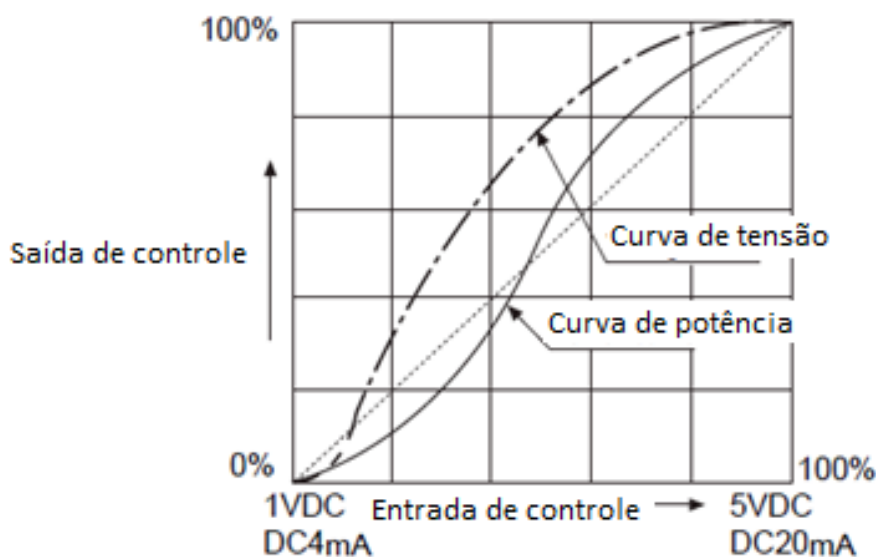
Figura 17-Conexão do sinal de controle com o SPC-35



Fonte: Manual do SPC1-35

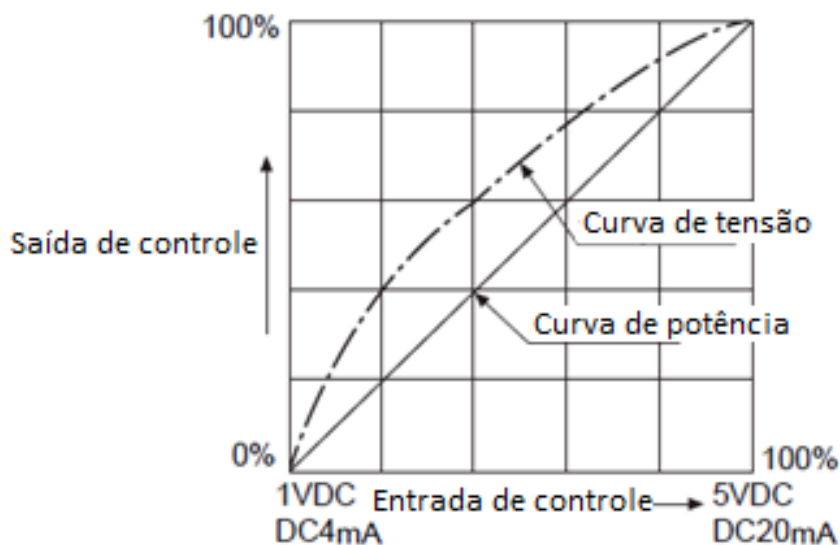
Outra configuração importante a ser feita no SPC-35, é a curva característica da potência e tensão de saída do controlador em função do sinal de controle. A figura 18 mostra a tensão e potência de saída quando o controlador é configurado para variar o ângulo de disparo dos SCR's linearmente com o sinal de controle. Já a figura 19 mostra a tensão e potência de saída quando o controlador é configurado para variar a potência de saída linearmente com o sinal de controle.

Figura 18-Característica de variação do ângulo de disparo em relação ao sinal de controle.



Fonte: Manual do SPC1-35

Figura 19-Característica de variação do ângulo de disparo em relação ao sinal de controle.



Fonte: Manual do SPC1-35

Para o sistema de controle proposto, é interessante que o controlador de potência tenha uma característica linear entre o sinal de controle e a potência de saídas logo, foi feita a configuração de acordo com o que foi mostrado na figura 19.

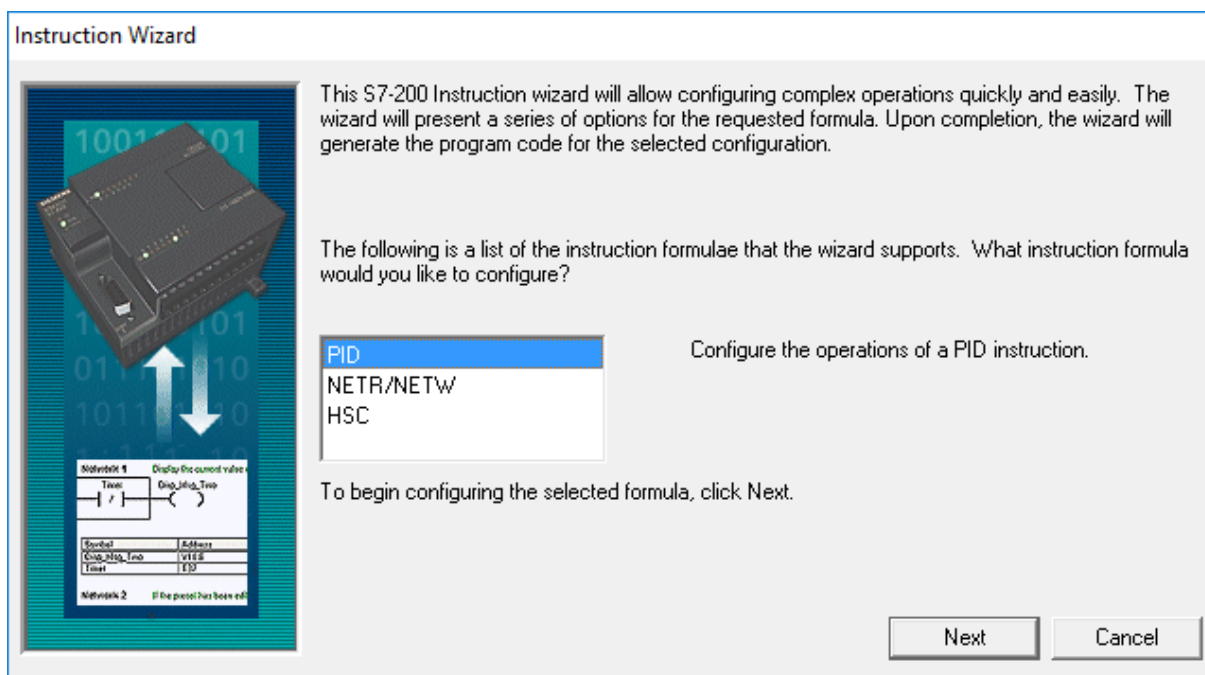
2.2 Software

2.2.1 Programação do CLP

O ambiente de programação dos CLP's da Siemens família S7-200 é o Software Step7 Microwin, sendo nele então efetuada a configuração do algoritmo PID. Logo abaixo será apresentado o passo a passo de como foi feita a configuração do algoritmo PID no software.

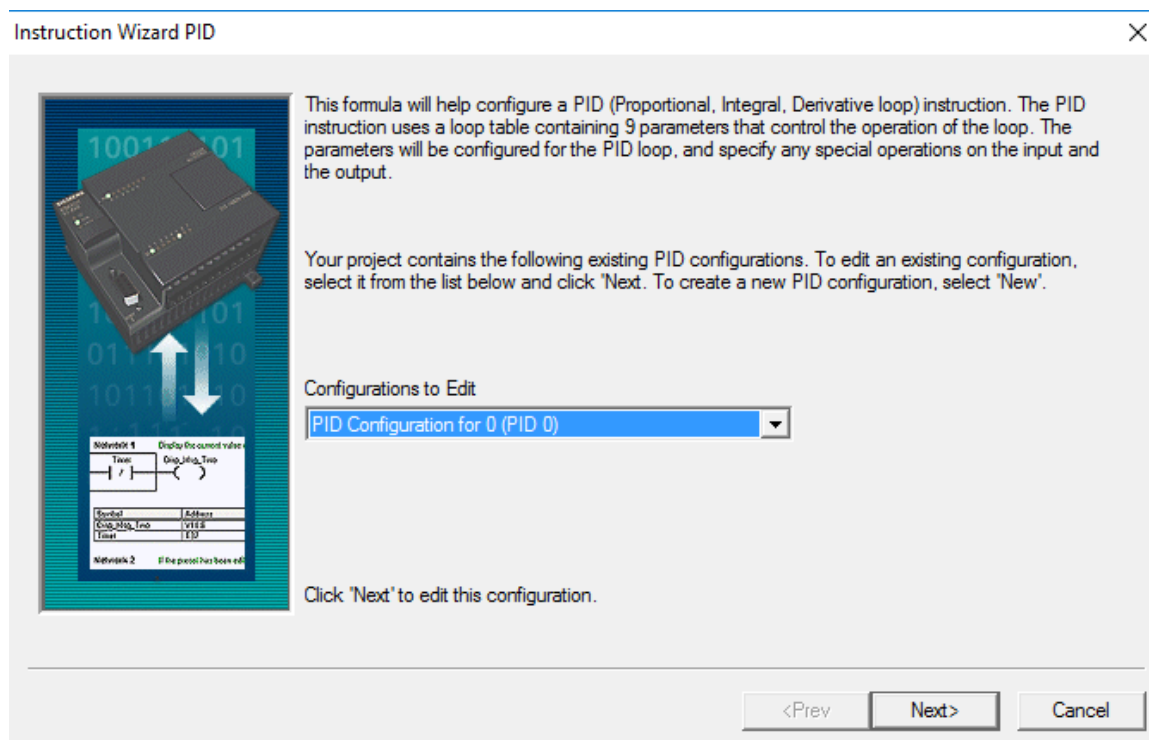
O bloco de controle PID é acessado através do menu "Instruction Wizard" contido no painel principal do ambiente de programação, como mostra a figura 20. Neste CLP é possível criar 7 blocos de PID diferentes, como mostrado na figura 21, entretanto, para a aplicação desejada será necessário somente um controlador PID.

Figura 20-Tela inicial para configuração do PID no Step 7 Microwin



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21-Escolha do número do bloco PID a ser criado no Step7 Microwin



Fonte: Produção do próprio autor.

Na figura 22, são mostradas as configurações do range do setpoint e os valores dos ganhos do controlador. Esses serão os valores “default” dos ganhos, sendo que os mesmos estão associados a registros que poderão ser alterados via comunicação OPC.

Figura 22-Configuração da escala do setpoint e dos ganhos iniciais do bloco PID no Step7 Microwin

Instruction Wizard PID (PID Configuration for 0)

Loop Setpoint Scaling

Specify how the loop Setpoint should be scaled. The loop Setpoint is a parameter that you will provide to the subroutine generated by the wizard.

Specify the Low Range for the Loop Setpoint:

Specify the High Range for the Loop Setpoint:

Loop Parameters

Gain

Integral Time min.

Sample Time sec.

Derivative Time min.

<Prev Next> Cancel

Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 23 mostra a configuração dos ranges de entrada e saída, referente aos valores armazenados no endereço de memória AIW0 para entrada analógica, e AQW0 para saída analógica. Vale ressaltar que como o transmissor de nível fornece um sinal de 4-20mA, é necessário fazer o 0% da variável de processo equivaler ao sinal de 4mA. Para isso, o limite inferior do range da entrada deve possuir valor de 6552, que corresponde a um sinal de 4mA na entrada analógica. De forma análoga, é necessário também definir o limite inferior do range de saída para 6552, ou seja, correspondente a 4mA, para que o sinal de saída tenha range de 4-20mA, já que o controlador de potência foi configurado para receber essa faixa de valores, que corresponderá a potência em percentual fornecida ao resistor de aquecimento.

Figura 23-Configuração dos Ranges de entradas e saídas analógicas para o controlador PID

Instruction Wizard PID (PID Configuration for 0)

Loop Input Options
Specify how the loop Process Variable (PV) should be scaled. The Loop PV is a parameter you specify for the subroutine generated by the wizard.

Scaling: **Unipolar**
☐ Use 20% Offset
 Low Range: 6522
 High Range: 32760

Loop Output Options
Specify how the loop Output should be scaled. The Loop Output is a parameter you specify for the subroutine generated by the wizard.

Output Type: **Analog** Scaling: **Unipolar**
☐ Use 20% Offset
 Low Range: 6552
 High Range: 32760

<Prev Next> Cancel

Fonte: Produção do próprio autor.

Feito as configurações descritas acima, a configuração é finalizada e os valores dos parâmetros do controlador PID e demais variáveis envolvidas serão armazenadas nos endereços de memória do byte de VB0 ao byte VB119, conforme mostra a figura 24.

Figura 24-Faixa de endereços onde serão armazenados os parâmetros do bloco PID no step7 Microwin

Instruction Wizard PID (PID Configuration for 0)

Allocate Memory for Configuration
The loop table stores the parameters used for controlling the loop operation. The table is 80 bytes in size. Additionally, the options you have selected require 40 bytes of data for calculation. Please specify a V-memory byte address where 120 bytes can be allocated for the PID table and calculations area.

The wizard can suggest an address that represents an unused block of V-memory of the correct size.

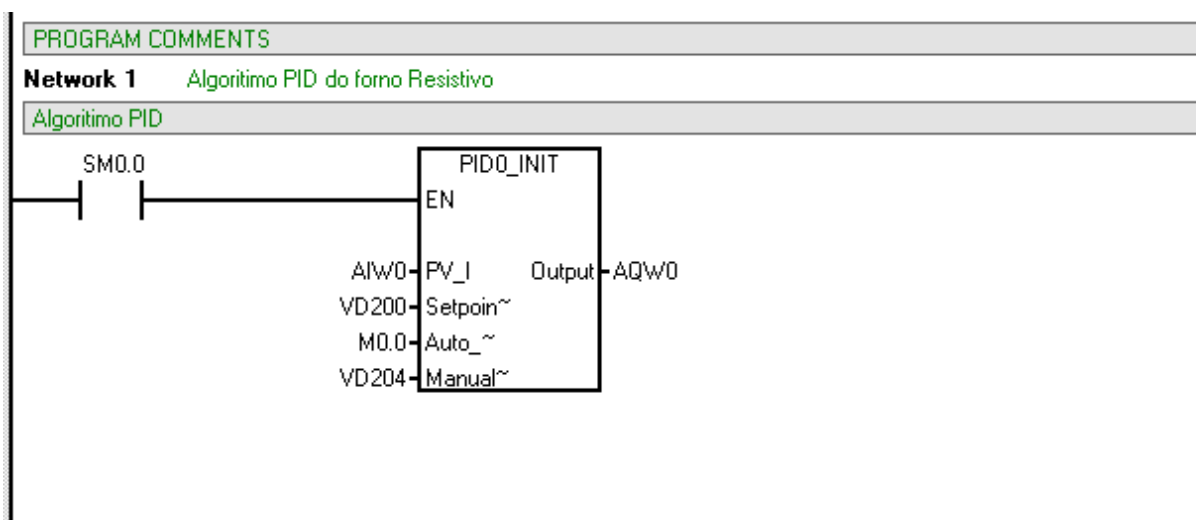
Suggest Address
 VB0 through VB119

<Prev Next> Cancel

Fonte: Produção do próprio autor.

Após a configuração do bloco PID, é necessário chamar a função referente a este bloco no programa principal. Basicamente, o programa principal consiste somente do bloco do controlador PID implementado, conforme mostrado na figura 25. O contato NA associado ao endereço de memória SM0.0, se deve ao fato do software não aceitar a ligação direta do bloco. O endereço SM0.0 consiste em uma memória especial, que segundo o manual do fabricante, este endereço permanece em nível lógico alto enquanto o programa estiver sendo executado.

Figura 25-Programa principal implementado no Step7 Microwin



Fonte: Produção do próprio autor.

O quadro 4 mostra o significado de cada campo do bloco PID apresentado na figura 25, bem como os endereços associados a cada campo.

Quadro 4-Descrição das entradas e saídas do bloco PID no Step7 Microwin

Campo	Conteúdo	Endereço Associado
PV_I	Entrada para variável de processo, com range de 6552 a 32760	AQW0
Setpoint~	Entrada para Setpoint com range de 0.0 a 100.0	VD200
Auto_~	Entrada para seleção de modo Manual ou Automático (1=Automático;0=Manual)	
Manual~	Saída de controle no modo Manual desejada com range de 0.0 a 1.0	VD204
Output	Saída de controle	AQW0

Fonte: Produção do próprio autor.

Além das variáveis visíveis no bloco, são criadas também outras memórias que armazenam os valores dos ganhos do controlador, tempo de amostragem, variável de processo em percentual, dentre outras variáveis relacionadas ao bloco PID. O quadro 5, mostra as variáveis de interesse para o projeto que estão ocultas no bloco.

Quadro 5-Memórias associadas aos demais parâmetros do controlador.

Conteúdo	Endereço Associado
Ganho proporcional Kp (Adimensional)	VD12
Tempo derivativo Td (minutos)	V24
Tempo integral Ti (minutos)	V20
Tempo de amostragem Ts (segundos)	V16
Saída de controle em percentual (0.0 a 1.0)	V8

Fonte: Produção do próprio autor.

Esses endereços são importantes, pois os mesmos foram alterados por meio do ambiente Matlab durante a identificação do sistema e teste dos controladores, e também no sistema supervisório, através da comunicação OPC que será citada mais adiante.

2.2.2 Comunicação OPC

Para se realizar a comunicação de dados entre o computador e o CLP, estariam disponíveis duas opções:

- A utilização de drivers que compatibilizam a comunicação entre o respectivo CLP e a aplicação;
- A utilização de um servidor OPC.

Optou-se por utilizar a comunicação OPC, visto que se utilizou a comunicação para a aquisição de dados para o ambiente Matlab, e também para o sistema supervisório utilizado, ou seja, se fossem utilizados drivers de comunicação, seriam necessários 2 drivers diferentes, além da maior complexidade de realizar as configurações.

O Padrão OPC surgiu da necessidade de se ter uma interface de comunicação única entre diferentes tipos de redes, protocolos e aplicações, e traz como grande vantagem a não utilização

de diversos drivers diferentes para compatibilizar a comunicação entre diversos dispositivos (NASCIMENTO FILHO, 2005).

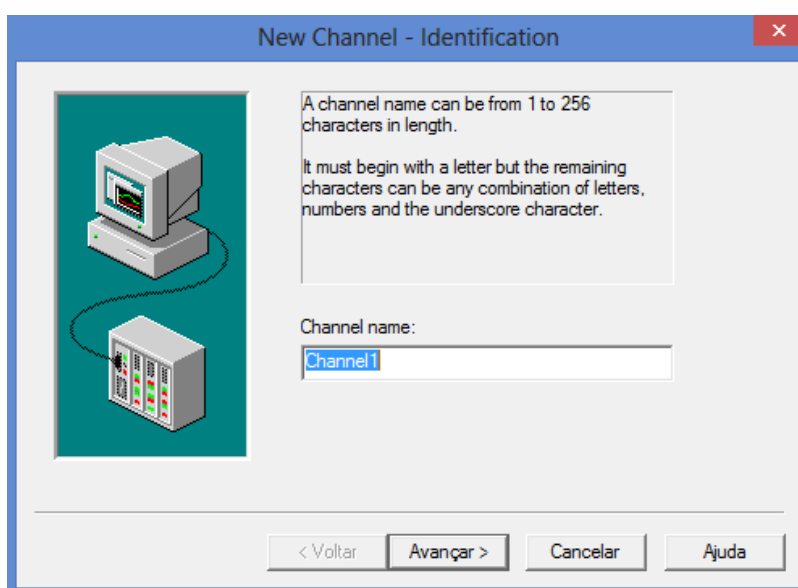
O padrão OPC é uma interface de software de conectividade aberta e normatizada, para a indústria de automação, baseada na arquitetura de rede cliente-servidor. A interoperabilidade é assegurada através da criação e manutenção de padrões com especificações abertas para que as indústrias desenvolvam equipamentos com este tipo de comunicação. Existem atualmente sete especificações de normas completas ou em desenvolvimento.

Neste projeto, para realização da comunicação via OPC tanto com o ambiente Matlab, quanto com o software de supervisão, foi utilizado o software de servidor OPC KepserverEx, da empresa Kepware. Foi utilizada a versão demo deste software, que tem como limitação uma comunicação por um período de 2 horas, na qual atingido este período, é necessário reiniciar o software.

Logo abaixo, será apresentado o passo a passo para a criação de um servidor OPC utilizando o KperserverEx.

O primeiro passo para a configuração do servidor OPC é a configuração do canal de comunicação, como é mostrado na figura 26.

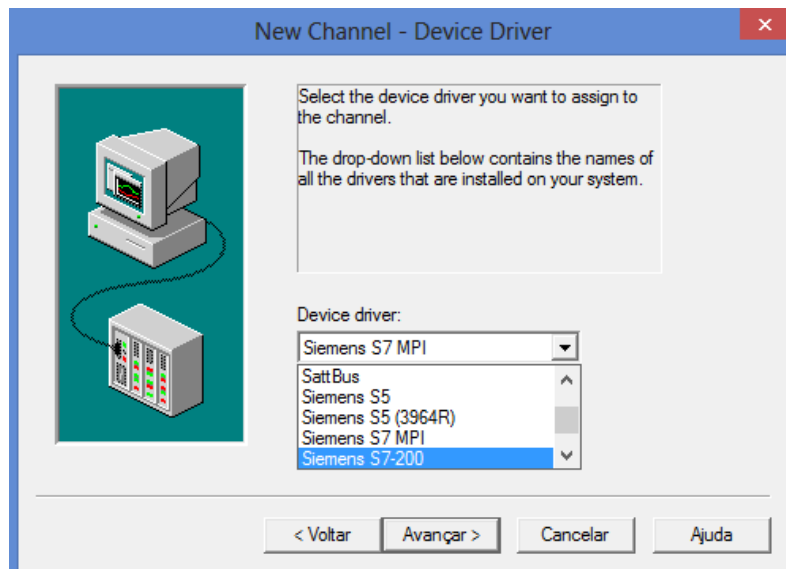
Figura 26-Criação de um canal de comunicação no KepserverEx



Fonte: Produção do próprio autor

Ao avançar, a janela mostrada na figura 27 irá solicitar o driver de comunicação correspondente ao CLP utilizado. Iremos selecionar o SIEMENS S7-200 correspondente ao CLP utilizado.

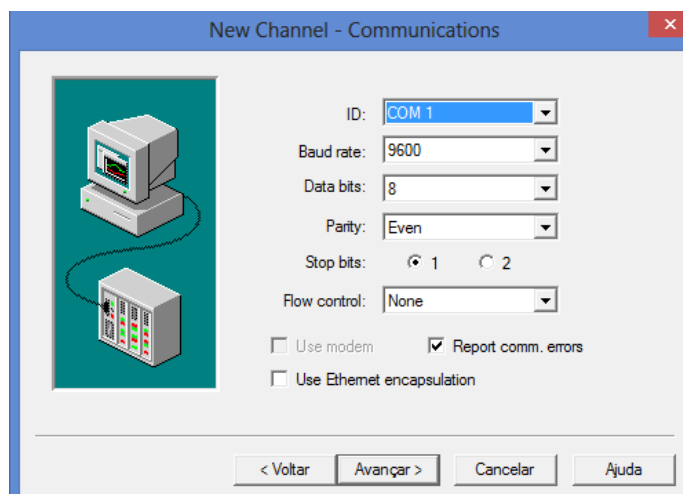
Figura 27-Seleção do driver do dispositivo no KepserverEx



Fonte: Produção do próprio autor

Na janela mostrada na figura 28, foram configurados os parâmetros correspondentes ao protocolo de comunicação utilizado. Nesse projeto, estamos utilizando o próprio cabo de programação PPI RS485 para estabelecer a comunicação, portando os parâmetros “baud rate”, “data bits” e “parity” e stop bits devem ser compatíveis aos configurados no cabo de programação. O item ID corresponde a porta de comunicação do PC que está sendo utilizado para comunicação.

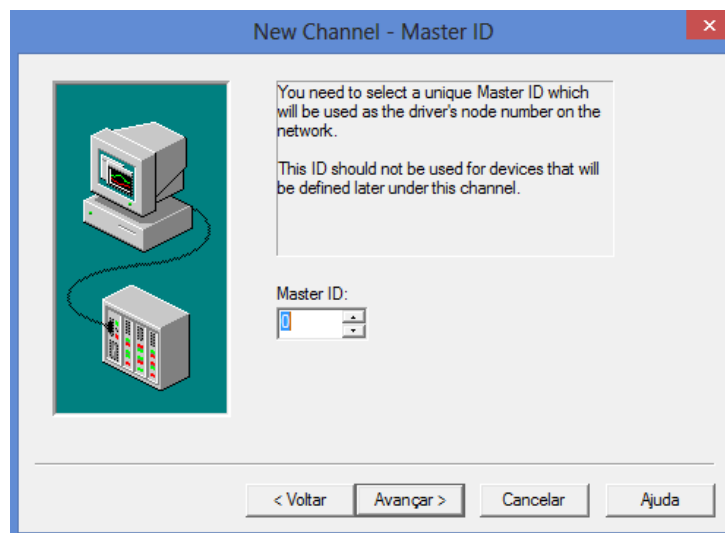
Figura 28-Parâmetros da comunicação do canal OPC



Fonte: Produção do próprio autor

Para finalizar as configurações do canal de comunicação, deve ser informado o endereço do computador que irá se comunicar com o CLP, como mostrado na figura 29. Como padrão, o computador possui endereço 0 na rede.

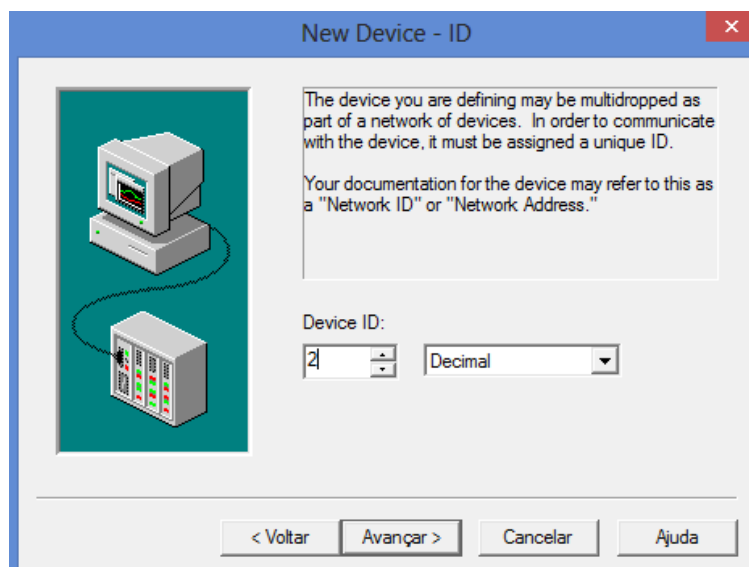
Figura 29-Configuração do endereço do computador na rede para comunicação OPC



Fonte: Produção do próprio autor

O segundo passo, consiste em configurar um dispositivo no software KepserverEx, para se realizar a comunicação OPC. Nesse projeto, o dispositivo corresponde ao CLP. A figura 30 mostra configuração do endereço do dispositivo na rede.

Figura 30-Configuração de um novo dispositivo no Kepserver EX



Fonte: Produção do próprio autor

Como default o ID configurado pelo software de programação Step7 é 2, que corresponde ao endereço do CLP na rede de comunicação.

Finalizado esses 2 passos, basta adicionar os endereços de memória que se deseja efetuar a leitura e/ou escrita. Esses endereços são associados TAG's no servidor OPC, de modo que essas TAG's possam ser acessadas na aplicação desejada. A figura 31 mostra as TAG's criadas no servidor OPC para esse projeto.

Figura 31-TAG's inseridas no servidor OPC

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
auto	m00000.00	Byte	1000	None	auto=1 (malha fechada) , auto=0 (malha aberta)
kp	v12	Float	1000	None	ganho proporcional
saida_manual	v204	Float	1000	None	saida manual
sp	v200	Float	1000	None	stepoint desejado
td	v24	Float	1000	None	tempo derivativo
temperatura	v0	Float	1000	None	Valor da temperatura em percentual (0.00 ~ 1.00)
ti	v20	Float	1000	None	tempo integral
ts	v16	Float	1000	None	tempo de amostragem
u	v8	Float	1000	None	signal de controle

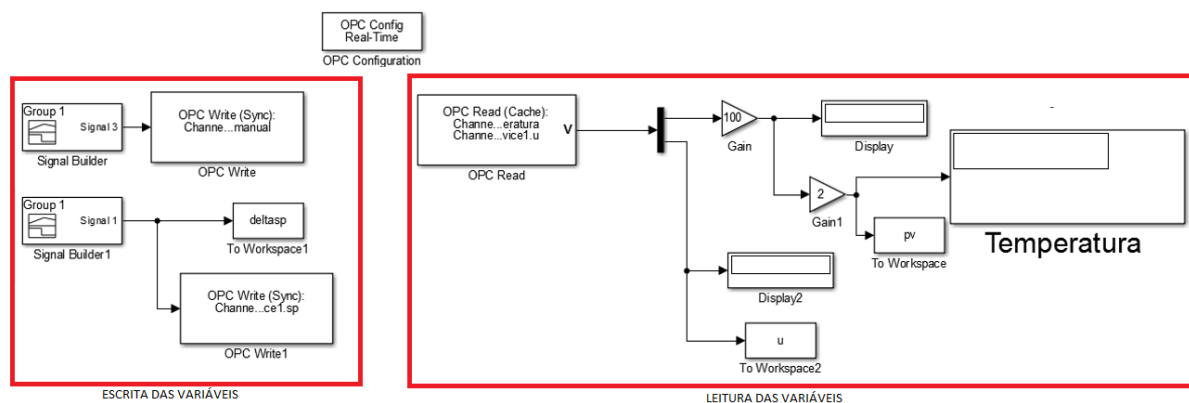
Fonte: Produção do próprio autor

2.2.3 Interface com MATLAB

Para realizar a identificação do sistema e teste do controlador, foi feita uma interface de comunicação entre o ambiente simulink do MATLAB e o CLP, utilizando para isso o servidor OPC.

As variáveis correspondentes a saída de controle manual, sinal de controle e variável de processo, foram associadas a vetores no MATLAB, a partir da comunicação OPC entre o Simulink do software MATLAB e o servidor OPC Kepserver Ex. A figura 32 mostra o diagrama feito para leitura e escrita dos dados.

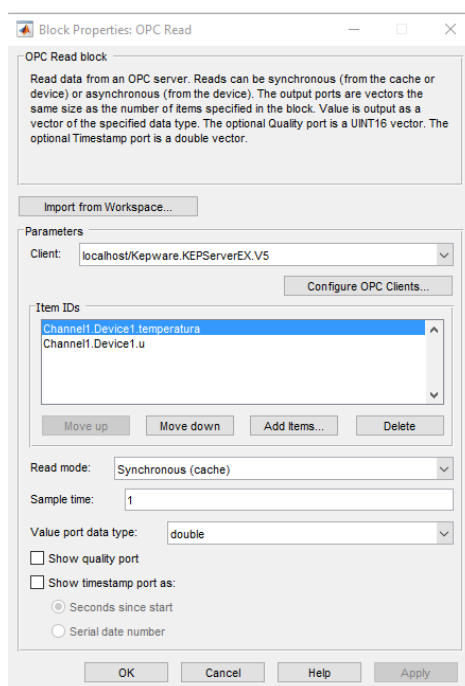
Figura 32-Diagrama de blocos para identificação do sistema e aquisição de dados com o Matlab.



Fonte: Produção do próprio autor.

O bloco “OPC Read” tem como função realizar a leitura dos dados referentes das TAG’s feitas no software Kepserver Ex. Sua saída é demultiplexada, resultando nos vetores do sinal de controle “u”, que é exibido no “Display2”, e na variável de processo na faixa de 0 a 1, sendo que este sinal é escalonado para o range de temperatura de 0 a 200 °C e armazenado no vetor “pv”, o qual é exportado para o workspace. A figura 33 mostra a configuração feita no bloco “OPC Read”, onde é possível verificar que o tempo de amostragem utilizado é de 1 segundo, e as respectivas variáveis associadas a esse bloco.

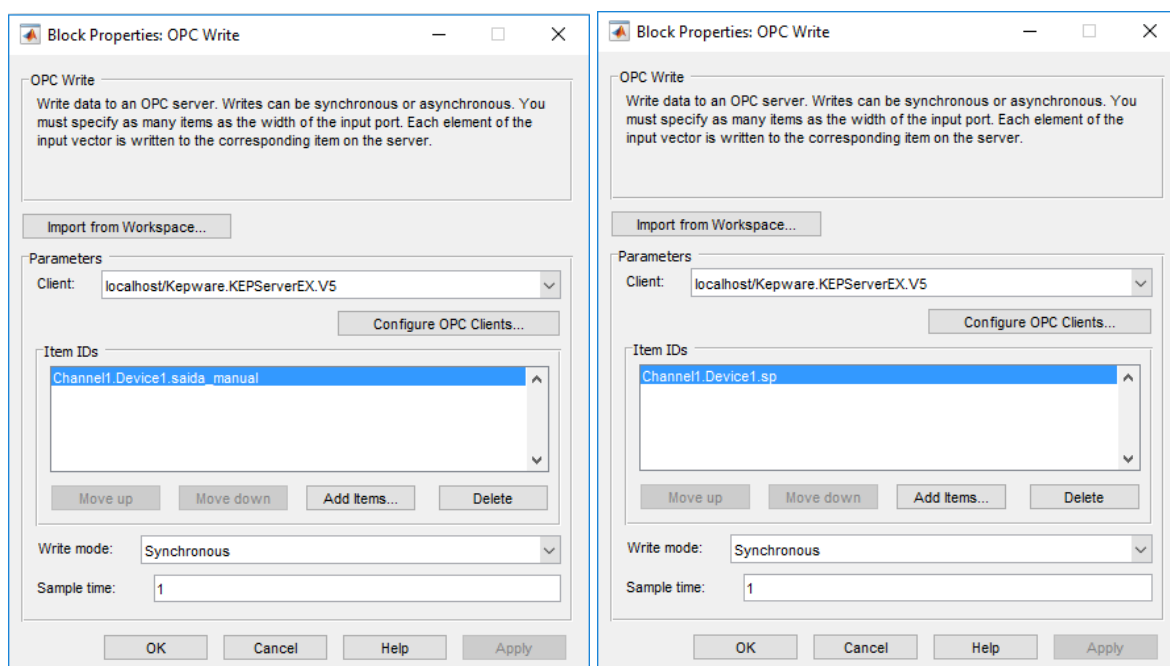
Figura 33-Configuração do bloco de leitura OPC no simulink



Fonte: Produção do próprio autor.

Para a escrita dos sinais, foi utilizado o bloco “OPC Write”, que recebe um vetor referente ao setpoint e saída manual (caso esteja em malha aberta) proveniente de um gerador de sinais ou do workspace. A figura 34 mostra a configuração feita no bloco “OPC Write”, tanto para a escrita do setpoint quando da saída manual.

Figura 34-Configuração do bloco de escrita OPC no simulink



Fonte: Produção do próprio autor.

Feitas as configurações descritas acima, basta iniciar a simulação para realizar a escrita e leitura de dados em tempo real, podendo ser feita a aquisição de dados tanto para fins de identificação do sistema quanto para teste do controlador.

2.2.4 Interface com o sistema supervisório

Os sistemas supervisórios são softwares que utilizam interfaces gráficas nas telas dos computadores e permitem com que o operador da planta industrial consiga visualizar e controlar a planta de uma forma amigável e interativa. Diversas telas gráficas são construídas para acompanhar o processo de produção, tais como:

- a) Telas Sinóticas– Visualiza-se o processo geral da planta e as malhas de controle numa única ou várias telas;

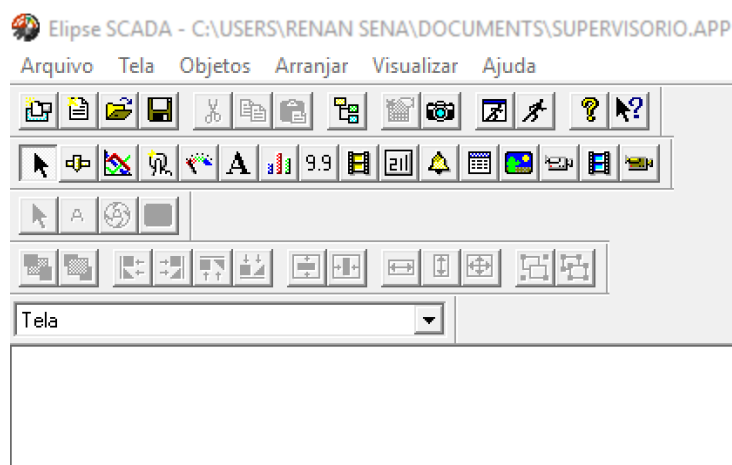
- b) Telas de Alarmes: permite a visualização dos alarmes das variáveis de processos da planta, avisando ao operador um valor de uma variável de processo que esteja fora do range ou fora dos limites toleráveis;
- c) Telas de Controle: permite manipular as variáveis do processo para ajuste ou modificações devido as necessidades reais de um processo contínuo e de batelada;
- d) Telas de Históricos: permite a visualização do histórico das variáveis de processo durante um intervalo de tempo estipulado em horas, dias, semanas, meses e anos;
- e) Telas de Gráficos: permitem a visualização de gráficos representativos das variáveis de processo em tempo real.

Os recursos apresentados pelos Supervisórios permitem com facilidade utilizar-se de ferramentas prontas que permitem construir telas das mais diversas aplicações. Ferramentas para criar as TAG de cada dispositivo da planta, ferramentas bitmaps para criar figuras estáticas, ferramentas para criar figuras animadas, ferramentas para elaborar gráficos e históricos. Dentre os softwares de sistemas supervisórios disponíveis no mercado, se destacam Elipse Scada da empresa Elipse Software, iFix da empresa GE, InTouch da empresa Wonderware, entre muitos outros existentes no mercado. Para esse projeto, foi utilizado a versão de demonstração do software Elipse Scada.

O Elipse Scada é um software para a criação de aplicativos de supervisão e controle de processos nas mais diversas áreas, oferece um alto desempenho, aliado a novos e poderosos recursos que facilitam a tarefa de desenvolvimento da sua aplicação. Para a criação de aplicativos de supervisão e controle nas mais diversas áreas.

Vários objetos de tela estão disponíveis, e pode-se enviar ou receber informações dos equipamentos de aquisição de dados, através de setpoints, sliders ou botões, como pode ser visto na figura 35.

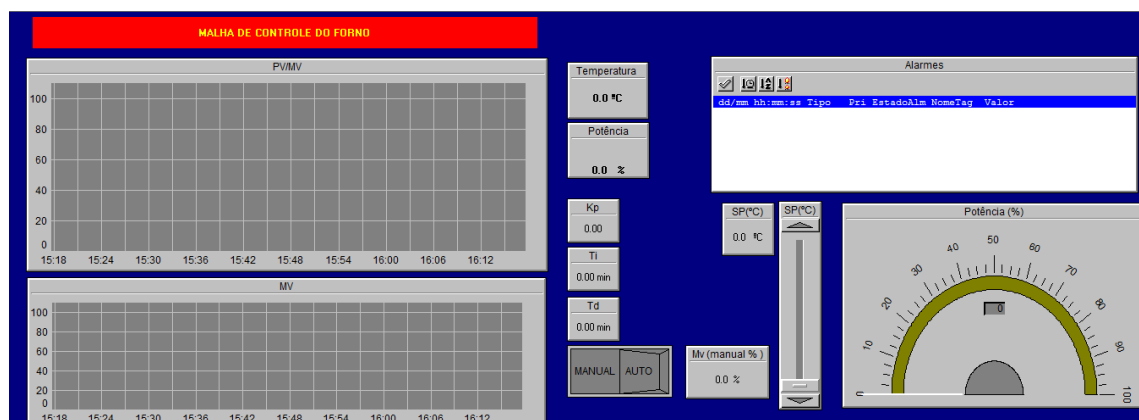
Figura 35-Tela inicial do software Elipse SCADA



Fonte: Produção do próprio autor.

Estes objetos são inseridos na tela de trabalho de acordo com o layout desejado. A figura 36 mostra a tela do sistema supervisório desenvolvida para este processo no software Elipse Scada. O sistema de supervisão desenvolvido conta gráficos de tendência para a temperatura e a potência percentual fornecida ao resistor, bem como displays para indicação das variáveis de processo, ajustes dos ganhos do controlador, entradas para setpoint e uma tela de alarmes.

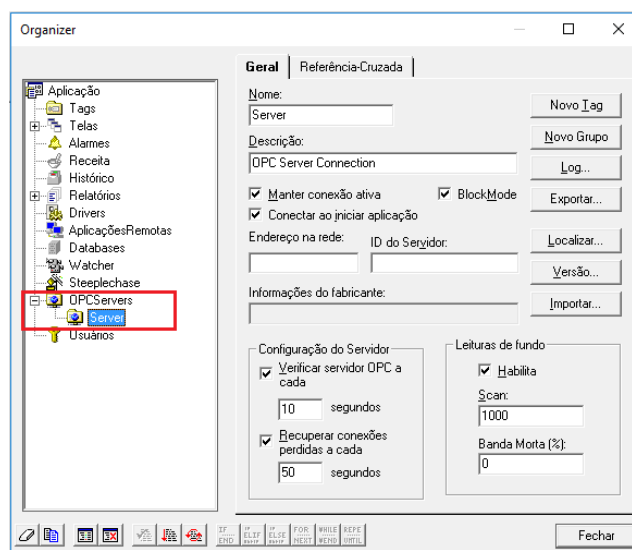
Figura 36-Software de supervisão Elipse Scada



Fonte: Produção do próprio autor.

Após a montagem do layout do sistema de supervisão, é necessário associar as variáveis aos respectivos objetos presentes na tela de trabalho. Essas variáveis correspondem as TAG's criadas no servidor OPC Kepserver Ex . Para isso, é necessário ir na janela de gerenciamento da aplicação do elipse scada, e criar um novo servidor OPC como mostra a figura 37.

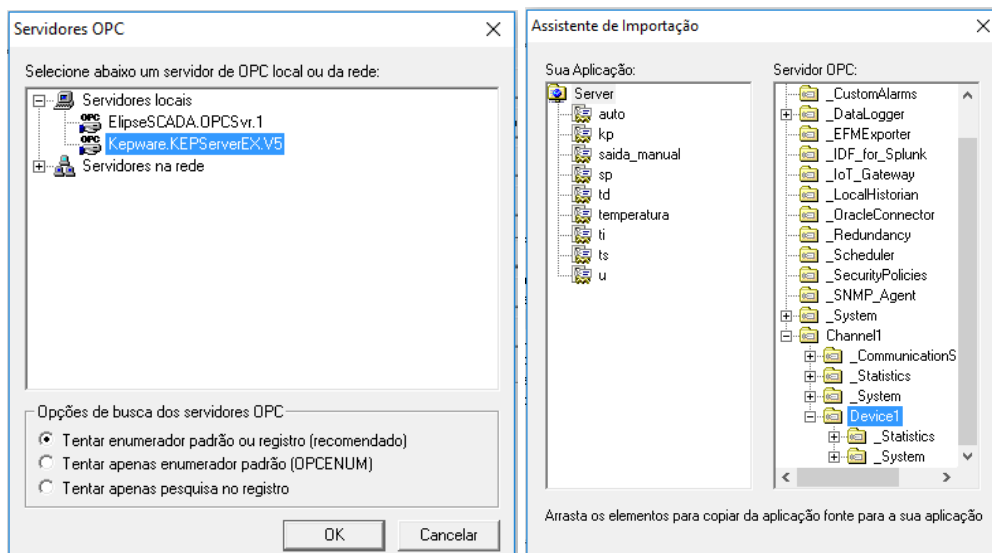
Figura 37-Criação de um novo servidor OPC no Elipse Scada



Fonte: Produção do próprio autor.

Após criar um novo servidor OPC, é necessário localizar o servidor na rede e importar as TAG para aplicação, como mostra a figura 38.

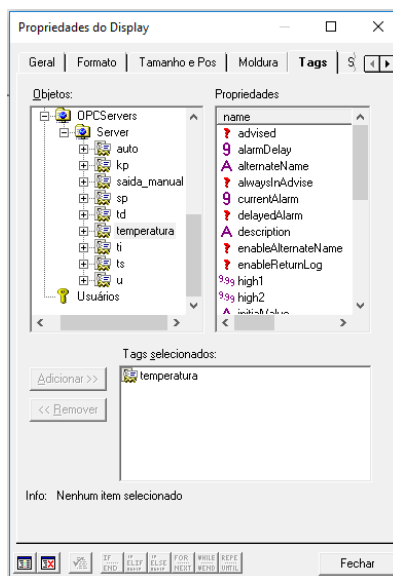
Figura 38-Localização do servidor na rede e importação das TAG's no Elipse Scada



Fonte: Produção do próprio autor.

Com as TAG já disponíveis na aplicação, basta associá-las aos respectivos objetos da tela de trabalho, para isso, deve-se acessar a janela de propriedade de cada objeto e localizar as TAG importadas para aplicação, como pode ser visto na figura 39 , que exemplifica a associação da TAG correspondente a variável de processo a um display.

Figura 39-Associação da TAG ao objeto no Elipse Scada



Fonte: Produção do próprio autor.

Feitas as configurações descritas acima, basta iniciar a simulação da aplicação e o usuário terá acesso a todas as TAG já criadas no servidor OPC, em seus respectivos objetos. Como exemplo, o usuário pode visualizar os gráficos da temperatura e saída de controle, poderá alterar os ganhos do controlador e até mesmo gerenciar alarmes para as variáveis.

Sendo este projeto de cunho didático, poderá também o usuário editar os próprios objetos a fim de se aprofundar no estudo de sistemas supervisórios.

3 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR PID

A necessidade de manter as variáveis de um processo em valores especificados, demanda cada vez mais dos sistemas de controle automático com realimentação. Basicamente esses sistemas constituem-se de sistemas de medição das variáveis de processo, controladores e elementos finais de controle. O controlador tem como função receber o sinal da variável de processo do sistema de medição, comparar com o valor especificado, também chamado de setpoint, calcular o sinal de desvio correspondente à diferença entre o valor medido e o valor especificado e gerar um sinal de controle correspondente ao algoritmo de controle utilizado, para que o elemento final de controle efetue a correção na malha de controle.

Dentre os algoritmos de controle existentes, destaca-se controlador o PID, amplamente utilizado em malhas de controle de processos industriais. Esse algoritmo de controle consiste em um controlador composto por 3 ações de controle, sendo elas a ação de controle proporcional, integral e derivativa, podendo modificar a dinâmica de um sistema através da contribuição de cada ação citada.

A ação proporcional, é representada basicamente como um amplificador de ganho ajustável, na qual a relação entre o sinal de saída do controlador $u(t)$, e o sinal de erro atuante $e(t)$ é dado pela equação 3.1, onde K_p representa o ganho proporcional.

$$u(t) = K_p.e(t) \quad (3.1)$$

Uma característica importante desta ação de controle é a existência de um erro residual permanente sempre que ocorre uma perturbação no sistema, caso este seja do tipo 0. O erro estacionário que é dependente do ganho proporcional, pode ser minimizado por um aumento de do ganho, no entanto deve-se notar que o aumento deste parâmetro pode conduzir o sistema à instabilidade.

Na ação integral, o sinal de saída do controlador $u(t)$ dado pela equação 3.2, é proporcional à área abaixo da curva do erro atuante $e(t)$, ponderado pelo tempo integral T_i .

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t).dt \quad (3.2)$$

Esta ação de controle tem como característica remover o erro estacionário em sistemas do tipo 0, mas pode conduzir à uma resposta oscilatória, e à um aumento do sobre-sinal.

Na ação de controle derivativa, o sinal de controle $u(t)$, é proporcional a taxa de variação do erro $e(t)$, sendo sua saída dada pela equação 3.3, onde T_d representa o tempo derivativo.

$$u(t) = T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.3)$$

Esta ação de controle tem como característica proporcionar uma correção antecipada do desvio, isto é, na presença de uma tendência súbita de aumento no desvio, a ação derivativa atua de forma preventiva, diminuindo o tempo de resposta. Outra característica desta ação de controle, é a de amplificar ruídos, podendo conduzir os sistemas à instabilidade. Para evitar isso, geralmente esta ação é utilizada em conjunto com um filtro passa-baixas.

Existem diversas formas de combinação dessas ações de controle para composição do controlador PID, denominadas também de estruturas de controladores PID. Quanto a isso, pode-se citar as estruturas série, paralelo clássico e paralelo alternativo. Na prática, as estruturas de controladores utilizadas nos equipamentos dependem de cada fabricante e modelo. A estrutura utilizada neste projeto é a paralela clássica, dada pela equação 3.4, nessa estrutura a saída do controlador é proporcional ao erro, proporcional a integral do erro e proporcional a derivada do erro, sendo que o ganho proporcional também multiplica o termo integral e o termo derivativo (CAMPOS, 2006).

$$u(t) = K_p.e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t).dt + K_p.T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.4)$$

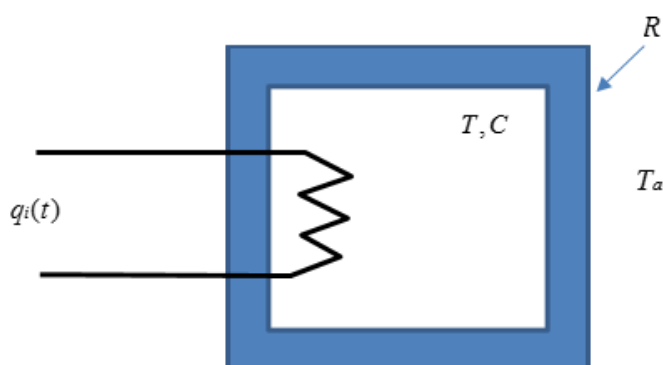
Para se determinar os ganhos do controlador PID que fornecem o melhor desempenho para o sistema de controle, antes é necessário conhecer a dinâmica do sistema, e isso é feito através da modelagem e identificação do sistema, que será apresentada adiante no item 3.1.

3.1 Modelagem e identificação

Um modelo matemático, tem como objetivo representar de forma analítica, através de equações diferenciais o comportamento de um determinado sistema (AGUIRRE, 2004). Esses modelos são utilizados frequentemente para descrever o comportamento de sistemas de controle.

A Figura 40 mostra o sistema proposto para realizar o projeto do controlador PID. A planta a ser analisada consiste em um forno resistivo que deve ter sua temperatura interna mantida constante em um dado ponto de operação, manipulando a quantidade de calor fornecida para o resistor de aquecimento.

Figura 40-Sistema de controle de temperatura do forno



Fonte: Produção do próprio autor.

Modelar este sistema é obter uma equação analiticamente que descreve o comportamento da temperatura interna do forno, que é a variável a ser controlada, em função da quantidade de calor fornecida ao resistor de aquecimento.

Na transferência de calor por condução ou convecção, o fluxo de calor é dado pela equação 3.1.1 (MUNSON; MORAN SHAPIRO, 2014).

$$q = \kappa \cdot \Delta T \quad (3.1.1)$$

Manipulando a equação 3.1.1, teremos a equação 3.1.2, que relaciona a temperatura interna da estufa com a quantidade de calor fornecida pelo resistor de aquecimento.

$$\begin{aligned}
 q_o(t) &= \frac{1}{R}(T(t) - T_a) \\
 T(t) &= \frac{1}{C} \left(q_i(t) - \frac{1}{R}(T(t) - T_a) \right) \\
 RC \frac{dT(t)}{dt} + T(t) &= R \cdot q_i(t) + T_a
 \end{aligned} \tag{3.1.2}$$

Na equação acima, “R” representa resistência térmica do material da estufa, “C” representa a capacitância térmica e “Ta” representa a temperatura externa do forno.

Em posse da equação diferencial 3.1.2, é possível determinar a função que relaciona a temperatura interna do forno $T(t)$, com a quantidade de calor fornecida pelo resistor de aquecimento $q_i(t)$. Entretanto, os parâmetros da equação diferencial que descrevem o comportamento da temperatura interna do forno, não são facilmente determinados de forma analítica, para isto, o modelo da planta foi obtido a partir da identificação do sistema por meio de sinais de teste.

O processo de identificação de sistemas consiste na construção do modelo de um sistema dinâmico baseado em dados medido. Em geral, o modelo de um sistema é utilizado para obter uma noção do comportamento do sistema (MOSCINSKI, 1995). Modelos matemáticos constituem um eficiente mecanismo para resumir o conhecimento acerca de um processo ou sistema (FURTADO; MENDES; NEPOMUCENO; SILVA, 2002).

Em termos gerais, pode-se realizar a identificação de um sistema excitando-o com um determinado sinal de entrada e observando suas saídas. O primeiro passo é escolher um modelo apropriado e então usar algum método para estimar os parâmetros desconhecidos do sistema. Na prática, a estimação da estrutura e dos parâmetros do modelo é feita de forma iterativa. O modelo obtido é testado e se não for aceito uma estrutura mais complexa é escolhida (FURTADO; MENDES; NEPOMUCENO; SILVA, 2002). Os modelos assim gerados, podem ser utilizados para inferir propriedades dinâmicas e estatísticas do sistema original (RODRIGUES, 1996).

Existem vários métodos de identificação de sistemas para estimar os parâmetros de um modelo. Alguns métodos se baseiam em uma abordagem estatística e sistemática, como exemplo pode ser citado os de estimativa por mínimos quadrados através de softwares. Outros métodos são baseados em gráficos da curva de reação de um sistema, ou seja, a resposta ao degrau de um sistema em torno de um ponto de operação. Visto que o sistema proposto pode ser bem descrito como um sistema de primeira ordem com atraso, e o controlador será projetado para um ponto de operação já definido, optou-se por técnicas clássicas de identificação baseadas na curva de reação para obter o modelo deste sistema.

Os métodos baseados na curva de reação, são realizados em malha aberta, efetuado os seguintes procedimentos:

1. Em malha aberta, efetuar um degrau na entrada do sistema, em torno do ponto de operação;
2. Coletar os dados de entrada e saída;
3. Aplicar um método para estimar os parâmetros do modelo;
4. Validação do modelo.

Para estimativa dos parâmetros do modelo de primeira ordem com atraso, serão apresentados aqui os métodos clássicos para identificação de processos, sendo eles os de Ziegler/Nichols(1942), Hägglund(1991), Smith(1985), Sundaresan(1977), Nishikawa(1984). Ambos os métodos citados acima, visam obter um modelo aproximado de primeira ordem dado pela função de transferência descrita pela equação 3.1.3.

$$G(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} e^{-\theta s} \quad (3.1.3)$$

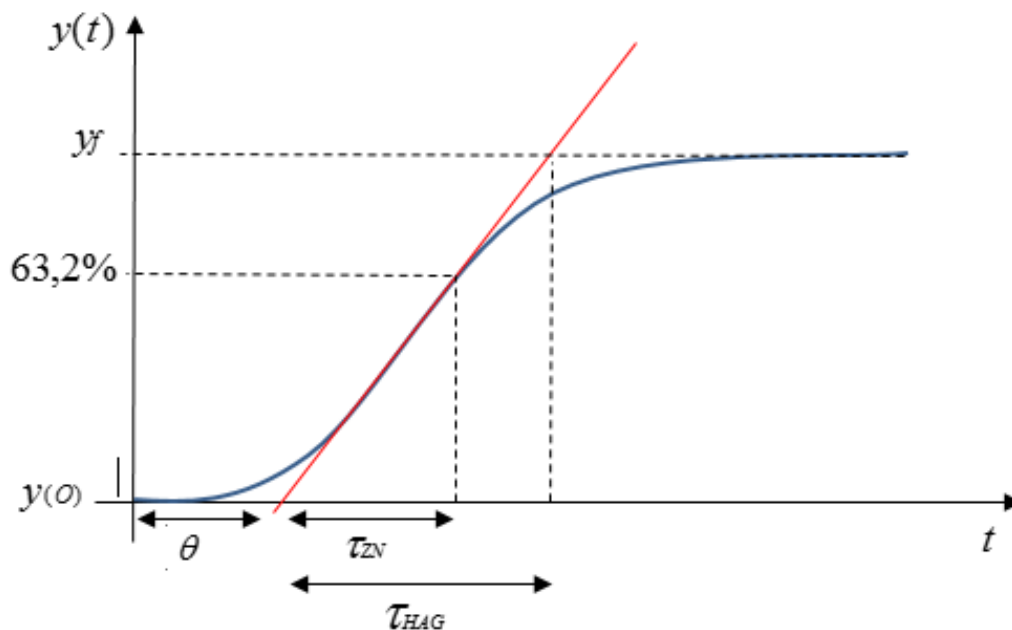
O parâmetro K representa o ganho do sistema em malha aberta, e indica o quanto a saída do sistema varia em função de uma entrada do tipo degrau. O parâmetro τ representa a constante de tempo do sistema, que carrega a informação sobre o tempo de resposta do sistema, sendo que quanto maior for este parâmetro, mais lento será o sistema. O parâmetro θ representa o tempo morto do sistema, que representa o atraso da saída em função de uma entrada aplicada.

Primeiramente serão apresentados alguns métodos de identificação baseados na curva de reação. Mais adiante, no capítulo 4, será apresentado como estes métodos foram aplicados ao sistema proposto.

3.1.1 Método de Ziegler & Nichols e Hägglund

Nestes método de identificação, os parâmetros de resposta do processo, K , τ e θ são calculados conforme ilustrado na figura 41, em que a reta traçada corresponde à tangente no ponto de máxima inclinação da curva de reação. O que diferencia o método de Ziegler e Nichols de Hägglund é a forma como se calcula a constante de tempo, de modo que no método de Hägglund a constante de tempo é calculada pela intersecção da reta tangente com o valor de regime da saída, dada por τ_{HAG} . Já no método de Ziegler e Nichols, a constante de tempo τ_{ZN} é calculada no ponto em que se atinge 63,2 % do valor de regime.

Figura 41-Método de Ziegler & Nichols e Hägglund para identificação



Fonte: Produção do próprio autor.

O ganho K do sistema, é dado pela equação 3.1.4, onde $y_f - y(0)$ corresponde a variação da saída e $u_f - u(0)$ corresponde a amplitude do degrau aplicado na entrada.

$$K = \frac{y_f - y(0)}{u_f - u(0)} \quad (3.1.4)$$

3.1.2 Método de Smith

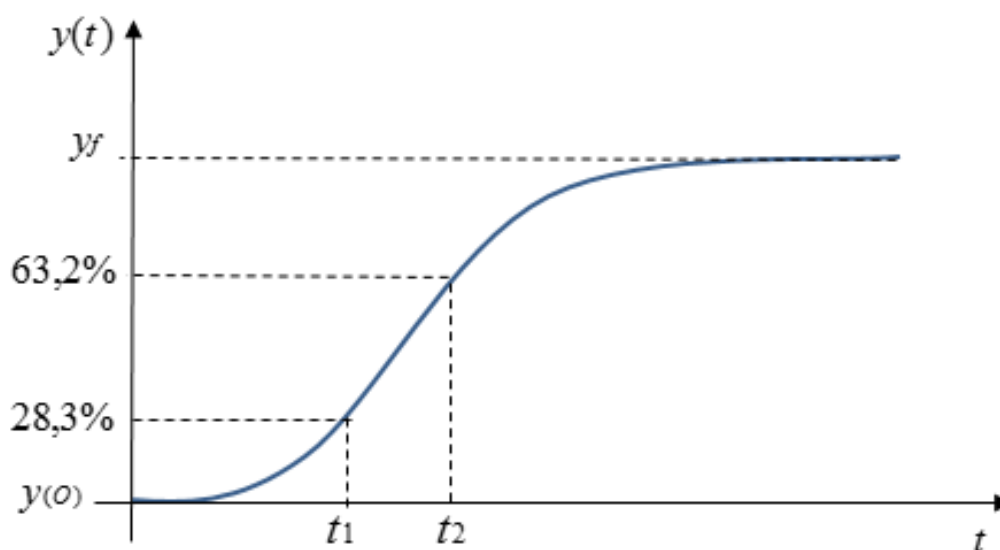
No método de Smith, o K do sistema também é dado pela equação 3.1.4, entretanto o que difere em relação ao método citado anteriormente é a forma como se calcula o tempo morto θ e a constante de tempo τ . Os cálculos destes parâmetros são dados pelas equações 3.1.5 e 3.1.6 respectivamente

$$\tau = 1,5.(t_2 - t_1) \quad (3.1.5)$$

$$\theta = t_2 - \tau \quad (3.1.6)$$

Nas equações 3.1.5 e 3.1.6, t_1 e t_2 representam os instantes onde a saída atingem os percentuais de 28,3% e 63,2% respectivamente, como ilustrado na figura 42.

Figura 42-Método de identificação de Smith



Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.3 Método de Sundaresan e Krishnaswamy

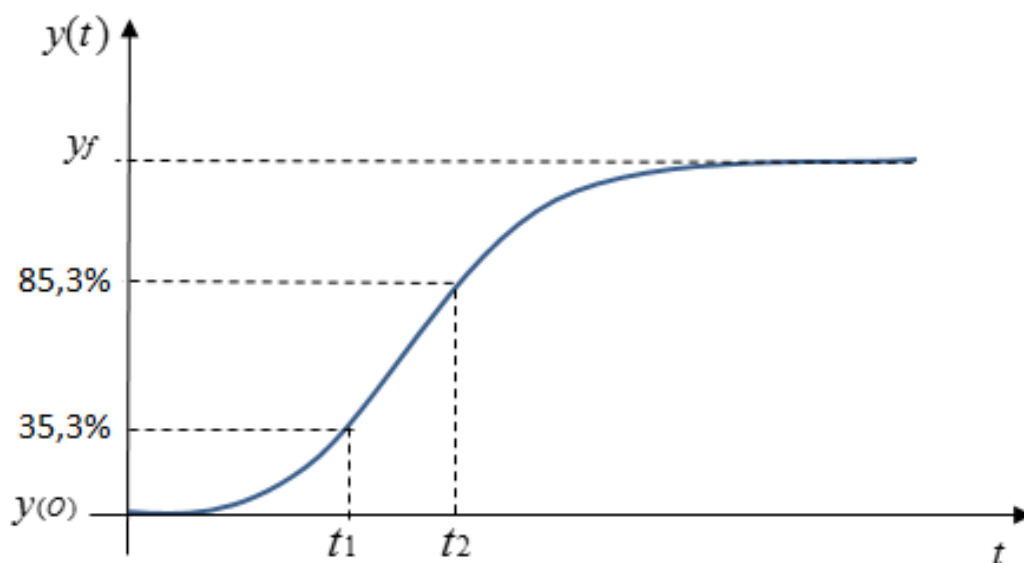
O método de Sundaresan e Krishnaswamy é semelhante ao método de Smith, sendo o ganho K também calculado pela equação 3.1.4. O que se difere em relação ao método de Smith é a fórmula de cálculo para o tempo morto e a constante de tempo, sendo estas dadas pelas equações 3.1.7 e 3.1.8.

$$\tau = 0,67.(t_2 - t_1) \quad (3.1.7)$$

$$\theta = 1,23.t_1 - 0,29.t_2 \quad (3.1.8)$$

Nas equações 3.1.7 e 3.1.8, t_1 e t_2 representam os instantes onde a saída atingem os percentuais de 35,3% e 85,3% respectivamente, como ilustrado na figura 43.

Figura 43-Método de identificação de Sundaresan e Krishnaswamy

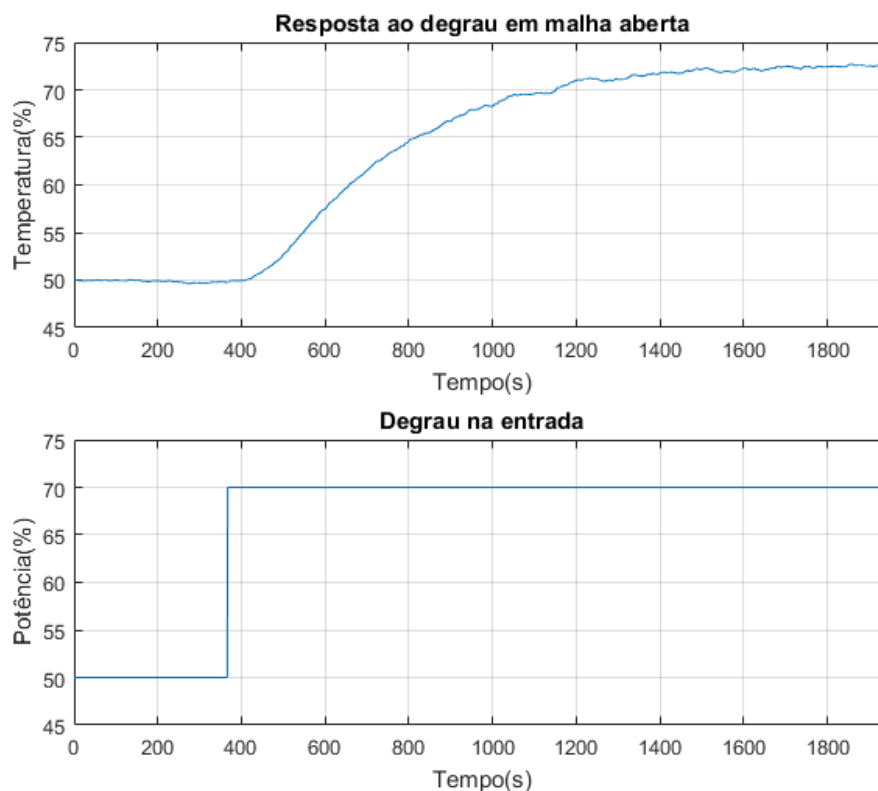


Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.4 Aplicação dos métodos de identificação na planta

Para identificação do modelo, foi definido um ponto de operação correspondente a uma temperatura 120 °C, equivalente a 60% da escala, efetuou-se um degrau na saída de controle em torno do ponto de operação e foram coletados os dados de entrada e saída, obtendo a curva de reação dada pela figura 44.

Figura 44-Curva de reação em função de uma resposta ao degrau para um ponto de operação de 120 °C



Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: A temperatura mostrada no gráfico corresponde ao percentual do range de medição.

Os dados de entrada e saída foram escalonados para 0 a 100% conforme o range de medição do sensor e o range da saída.

A partir da curva de reação da figura acima, foram aplicados os métodos de identificação citados anteriormente para obter o modelo do processo. Os parâmetros calculados de acordo com os métodos de identificação avaliados, encontram-se na tabela 1.

Tabela 1- Parâmetros de resposta em malha aberta obtidos via identificação de sistemas e FIT

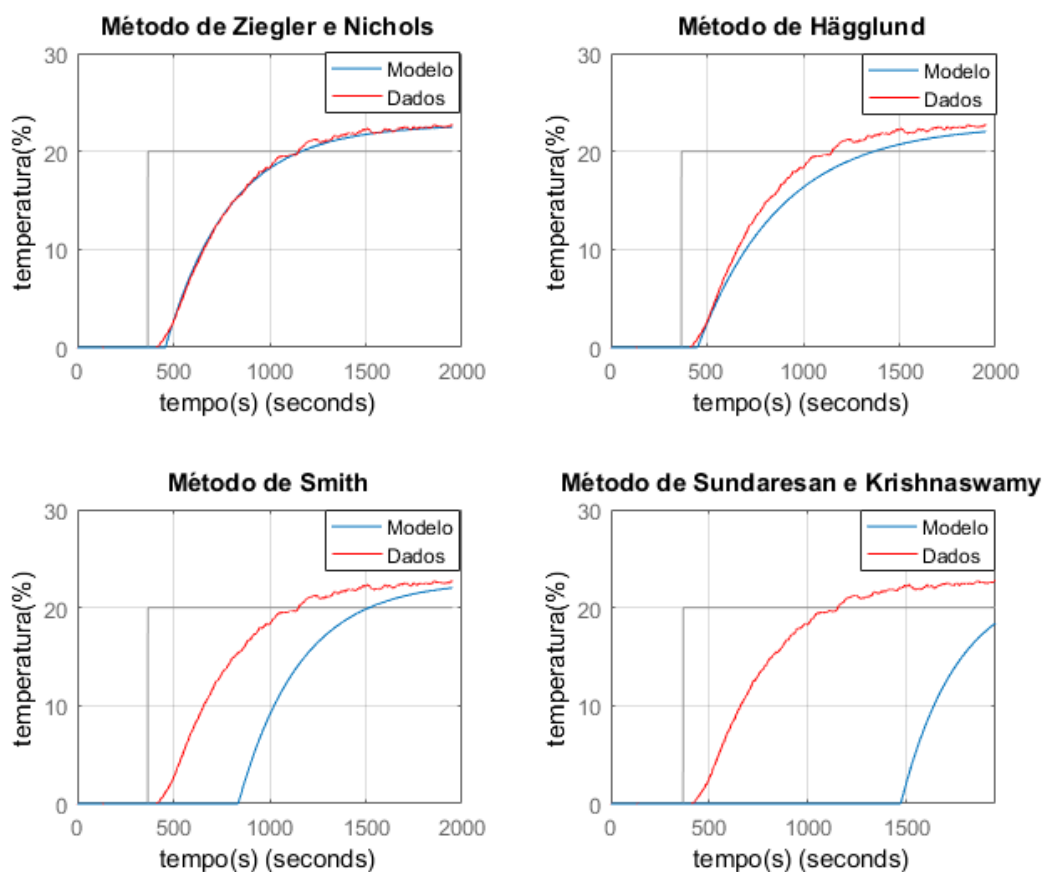
	K	τ(Segundos)	θ(Segundos)	FIT(%)
Ziegler e Nichols	1,13	333,0	84,0	93,6
Hägglund	1,13	433	84,0	79,2
Smith	1,13	321,0	470,0	58,2
Sundaresan e Krishnaswamy	1,13	288,7	1102,6	22,5

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: A fórmulas que forneceram estes resultados foram retirados de (CAMPOS,2006).

A figura 45, mostra a simulação dos modelos obtidos aplicando-se os métodos de identificação citados.

Figura 45-Simulação dos modelos obtidos via identificação

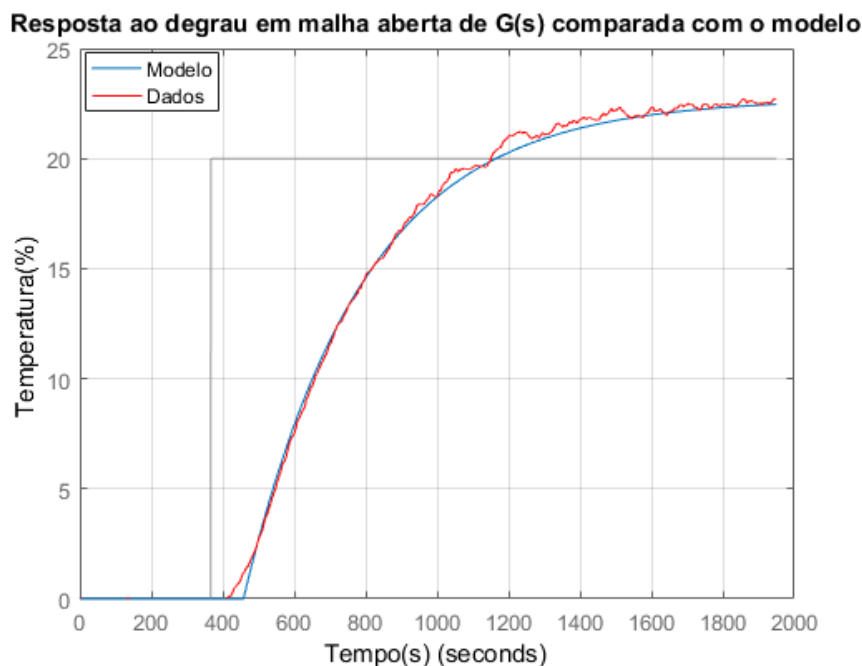


Fonte: Produção do próprio autor.

Observando a figura 45 e FIT(%) da tabela 1, nota-se que o modelo de melhor qualidade, dentre os avaliados é o do método de Ziegler e Nichols, portanto este foi o modelo escolhido. A função de transferência do sistema em malha aberta, será dada então pela equação 3.1.9, cujo a resposta ao degrau é dada pela figura 46.

$$G(s) = \frac{1.13}{333.s + 1} e^{-84s} \quad (3.1.9)$$

Figura 46-Resposta ao degrau do modelo em malha aberta



Fonte: Produção do próprio autor.

Como os métodos de identificação abordados nos fornecem o modelo em torno de um ponto de operação, não é condizente validar o modelo com dados fora do ponto de operação definido. Portanto, para validação do modelo, efetuou-se outro degrau em torno do mesmo ponto de operação, coletou-se os dados de saída e comparou-se com a resposta ao degrau de $G(s)$ obtida, como é mostrado na figura 46.

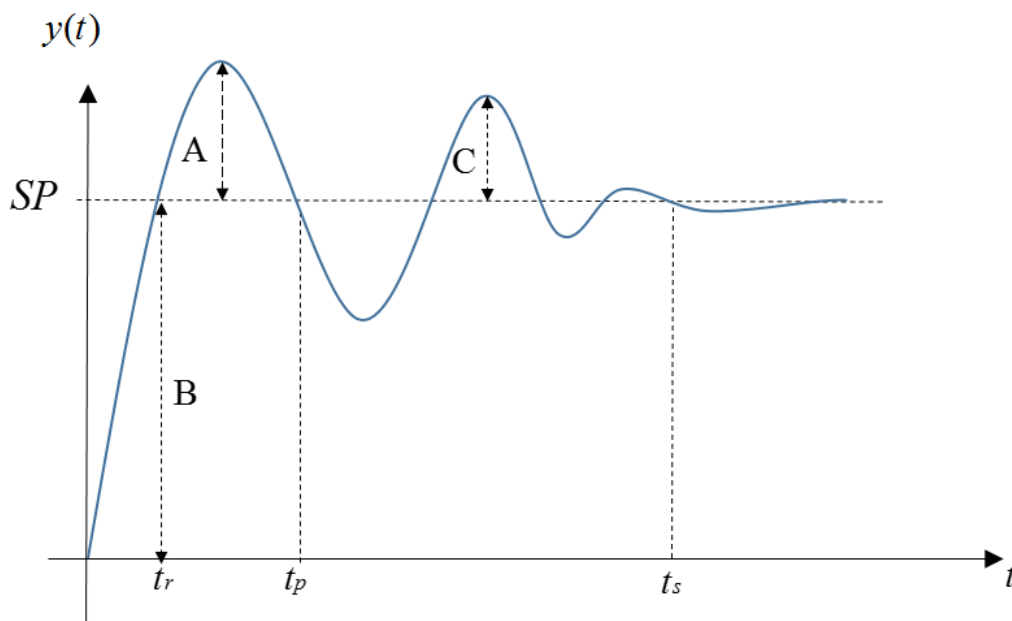
3.2 Métodos clássicos de sintonia do controlador PID

A sintonia de um controlador PID, visa obter os ganhos de um controlador (K_p, T_i, T_d) de modo que o sistema em malha fechada tenha um bom desempenho. Quando se trata do desempenho do controlador, podemos dividir em 2 tipos de problemas de controle:

- Problema servo** – Visa obter o melhor desempenho em função de um degrau no setpoint;
- Problema Regulatório** – Visa obter o melhor desempenho do controlador para rejeição de um distúrbio.

Para o problema servo, que é o problema tratado neste trabalho, a resposta a um degrau no setpoint aplicado em um sistema de primeira ordem com atraso, controlado por um controlador PID, fornece em geral uma saída dada pela figura 47, na qual os parâmetros destacados estão descritos no quadro 6.

Figura 47-Resposta ao degrau em malha fechada com PID em um sistema de primeira ordem com atraso



Fonte: Produção do próprio autor.

Os parâmetros destacados na figura 47 caracterizam a resposta do sistema de controle para o problema servo, e são comumente utilizados como critérios de desempenho, de modo que, um bom desempenho visa:

- Minimizar o sobressinal, ou seja, a razão A/B ;
- Minimizar os tempos de subida e de assentamento, isto significa deixar o sistema mais rápido.
- Fazer a razão de declínio (C/A) um certo valor

Quadro 6-Descrição das características de resposta

Parâmetro	Significado	Descrição
t_r	Tempo de subida	É o intervalo de tempo que o sistema leva para ir de zero a 100% do valor final para sistemas subamortecidos. Para sistemas sobre amortecidos, utiliza-se o intervalo de 10 a 90%
t_s	Tempo de estabelecimento	É o tempo que o sistema leva para entrar e permanecer na faixa $\pm 5\%$ do valor final
t_p	Tempo de pico:	É o tempo onde ocorre o pico
A/B	Sobre-sinal ou overshoot	É a medida da ultrapassagem do setpoint
C/A	Razão de declínio	É uma medida correspondente ao amortecimento da curva de resposta

Fonte: Produção do próprio autor.

Vale ressaltar, que a variável manipulada também nos fornece informações importantes sobre o desempenho da malha de controle, de modo que um bom desempenho também visa a mínima energia ou atuação na variável manipulada.

Para realizar a sintonia do controlador, serão abordados aqui os critérios clássicos de sintonia, que serão apresentados em maiores detalhes nos itens seguinte.

3.2.1 Método heurístico de Ziegler e Nichols

O trabalho de Ziegler e Nichols (1942) foi inovador no sentido de ter sido o primeiro a propor uma metodologia objetiva e simples para sintonia de controladores PID.

No método de sintonia de Ziegler e Nichols são propostas duas maneiras para se realizar a sintonia do controlador. A primeira forma é feita em malha fechada desativando a ação integral e aumentando o ganho proporcional gradativamente até se obter uma resposta oscilatória com amplitude constante. Neste ponto, determina-se o ganho crítico (K_u) e o período de oscilação (P_u). O ganho crítico (K_u) é o ganho mínimo que gerou a oscilação (CAMPOS, 2006).

Com os valores de P_u e K_u consulta-se o quadro 7 para determinar os parâmetros do controlador

Quadro 7-Método de Ziegler & Nichols em malha fechada

Controlador	Kp	Ti	Td
P	0,5.Ku		
PI	0,45.Ku	Pu/1,2	
PID	0,60.Ku	Pu/2	Pu/8

Fonte: CAMPOS (2006).

Nota: Este critério de sintonia usa como critério de desempenho uma razão de declínio igual a ¼.

Obviamente, na prática, este teste pode levar o processo a variar fora de uma região segura. Não há garantia de que a variável controlada estará entre os limites especificados, portanto, este teste não é muito utilizado em plantas industriais. Já no sistema proposto, este método não será aplicado também pelo fato de que o sistema é extremamente lento, inviabilizando a aplicação do mesmo (CAMPOS,2006).

O segundo critério de sintonia que Ziegler Nichols propõe, é feito a partir do modelo aproximado de primeira ordem do sistema, dado pela equação 3.2.1, ou seja, modelo obtido a partir da curva de reação do processo. Este critério toma como base os parâmetros de resposta do processo em malha aberta para se determinar os ganhos do controlador, sendo os ganhos do controlador dados pelo quadro 8 (CAMPOS, 2006).

$$G(s) = \frac{K}{\tau.s + 1} e^{-\theta s} \quad (3.2.1)$$

Quadro 8-Método de Ziegler & Nichols em malha aberta

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{\tau}{K.\theta}$		
PI	$0,9 \frac{\tau}{K.\theta}$	$3,33.\theta$	
PID	$1,2 \frac{\tau}{K.\theta}$	$2.\theta$	$0,5.\theta$

Fonte: CAMPOS (2006).

Nota: Este critério de sintonia usa como critério de desempenho uma razão de declínio igual a ¼.

Vale ressaltar que as fórmulas fornecidas pelo método proposto por Ziegler e Nichols, segundo Campos (2006), possuem as seguintes características:

- As fórmulas foram desenvolvidas para os controladores existentes na época, sendo que na literatura, nada se diz sobre a estrutura do controlador PID que era utilizada;
- A aplicabilidade do método é função do parâmetro $\left(\frac{\theta}{\tau}\right)$, também conhecido como fator incontrolabilidade. O método funciona bem para fatores de incontrolabilidade entre 0,1 e 0,3;
- As fórmulas foram elaboradas baseadas em controladores analógicos e não digitais, logo, se o período de amostragem for significativo em relação a constante de tempo do processo, deve-se fazer uma adaptação das fórmulas.

3.2.2 Método CHR

O método CHR é baseado no trabalho de Chien, Hrones e Reswick (1952), que propõe como critério de desempenho a resposta mais rápida possível sem sobressinal ou a resposta mais rápida possível com sobressinal de 20%. Este método baseia-se também em sistemas modelados como sistemas de primeira ordem com atraso, sendo os ganhos do controlados dados pelas formulas contidas no quadro 9.

Quadro 9-Método CHR para resposta mais rápida possível sem sobressinal.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$0,3 \frac{\tau}{K.\theta}$		
PI	$0,35 \frac{\tau}{K.\theta}$	$1,16.\tau$	
PID	$0,6 \frac{\tau}{K.\theta}$	τ	$0,5.\theta$

Fonte: CAMPOS (2006).

O quadro acima refere o método CHR para o problema servo, ou seja, a resposta é especificada em função de um degrau no setpoint.

3.2.3 Método Heurístico de Cohen Coon

Este método é baseado no trabalho de Cohen e Coon (1953), sendo aplicados na sintonia de sistemas com tempo morto elevado, que se traduz em fatores de incontrolabilidade elevados. Assim como nos métodos citados anteriormente, assume-se também para este método, que o sistema a ser controlado possa ser representado por um sistema de primeira ordem com atraso, sendo que os ganhos do controlador são fornecidos pelas formulas contidas no quadro 10.

Quadro 10-Método de Cohen Coon

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\left(1,03 + 0,35\left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) \frac{\tau}{K.\theta}$		
PI	$\left(0,9 + 0,083\left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) \frac{\tau}{K.\theta}$	$\left(\frac{\left(0,9 + 0,083\left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}{\left(1,27 + 0,25\left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}\right) \theta$	
PID	$\left(1,35 + 0,25\left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) \frac{\tau}{K.\theta}$	$\left(\frac{\left(1,35 + 0,25\left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}{\left(0,54 + 0,33\left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}\right) \theta$	$\frac{0,5.\theta}{\left(1,35 + 0,25\left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}$

Fonte: CAMPOS (2006).

Vale ressaltar que este método fornece bom desempenho para fatores de incontrolabilidade entre 0.6 e 4.5 e tem também como características produzir sintonias agressivas (CAMPOS, 2006).

3.2.4 Método baseado nos índices de desempenho ITAE e IAE

Os métodos de sintonia ITAE e IAE são métodos baseados na integral do erro, visando fornecer os ganhos do controlador utilizando como critério de desempenho a integral de uma função do erro em um período de tempo suficiente para eliminar o erro em regime.

No caso do método IAE, esta integral corresponde a integral do erro absoluto no horizonte de análise, dada pela equação 3.2.2, já no caso do método ITAE, corresponde a integral do erro absoluto ponderado pelo tempo do horizonte de análise, dada pela equação 3.2.3.

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (3.2.2)$$

$$ITAE = \int t |e(t)| dt \quad (3.2.3)$$

Assim como nos demais métodos citados, os métodos de sintonia IAE e ITAE, fornecem os ganhos para o controlador baseando-se que na suposição de que o processo a ser controlado possa ser modelado como um sistema de primeira ordem com atraso.

Para o problema servo, ou seja, considerando um degrau no setpoint, os ganhos do controlador são dados pelas equações 3.2.4, 3.2.5 e 3.2.6, onde as constantes A,B,C,D,E e F são dadas na tabela 2.

$$K_p = \left(A \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^B \right) \frac{1}{K} \quad (3.2.4)$$

$$T_i = \frac{\tau}{\left(C + D \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right)} \quad (3.2.5)$$

$$T_d = \left(E \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^F \right) \quad (3.2.6)$$

Tabela 2-Constantes aplicadas no método IAE e ITAE

Controlador	Critério	A	B	C	D	E	F
PI	IAE	0,758	-0,861	1,02	-0,323	-	-
PI	ITAE	0,586	-0,916	1,03	-0,165	-	-
PID	IAE	1,086	-0,869	0,740	-0,130	0,348	0,914
PID	ITAE	0,965	-0,850	0,796	-0,147	0,308	0,929

Fonte: CAMPOS (2006).

Os critérios apresentados acima serão avaliados mais adiante no capítulo 4.

4 TESTES E RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Aplicação dos métodos de sintonia na planta via simulação

Para realizar a sintonia do controlador PID, foram aplicados os métodos apresentados anteriormente, tomando como base o modelo do processo descrito pela função de transferência dada pela equação 3.1.9. A tabela 3 sintetiza os ganhos do controlador PID obtidos aplicando os métodos de clássicos de sintonia apresentados.

Tabela 3-Ganhos do controlador aplicando os métodos clássicos de sintonia

MÉTODO	Kp	Ti(segundos)	Td(segundos)
Ziegler e Nichols em Malha aberta	3,86	182,00	45,55
CHR	1,93	333,00	45,50
Cohen Coon	4,56	204,80	32,08
Método IAE	2,62	472,69	35,4
Método ITAE	2,47	440,57	30,73

Fonte: Produção do próprio autor.

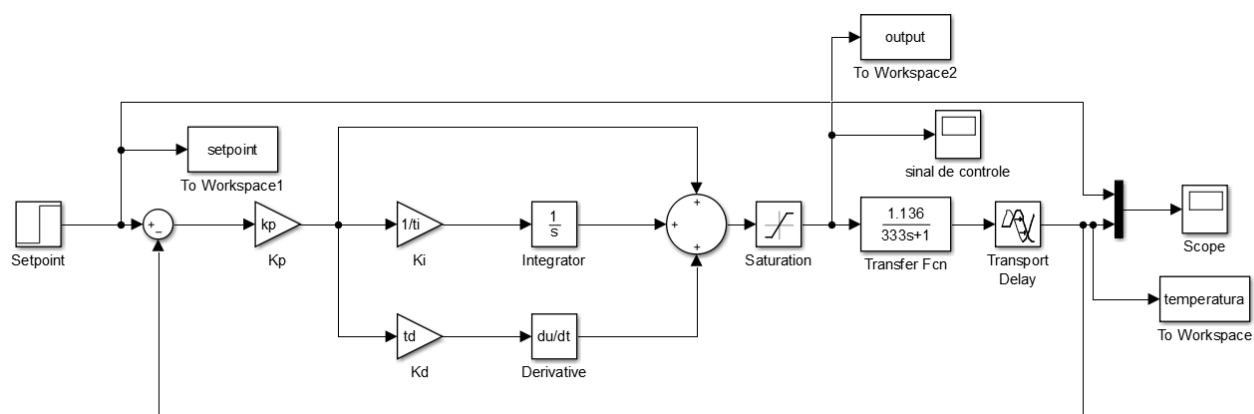
A metodologia aplicada para a seleção dos ganhos do controlador PID que foi utilizado no projeto foi:

- Simulação do sistema em malha fechada, com controladores correspondentes a cada método de sintonia aplicado;
- Avaliação dos critérios de desempenho para o problema servo, comparando os controladores obtidos pelos métodos de sintonia;
- Escolha do controlador que obteve melhor desempenho via simulação, com tempo de estabelecimento menor que 700s segundos e sobressinal menor que 5%;
- Teste no protótipo com melhor controlador obtido via simulação.

Para realizar a simulação dos controladores, foi utilizado o diagrama de blocos no *simulink* mostrado na figura 48. O controlador PID implementado na simulação é do tipo paralelo clássico, dado pela equação 4.1.1, que corresponde a mesma estrutura de controlador PID implementado pelo CLP da SIEMENS que foi utilizado no projeto.

$$PID = K_p.e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t)dt + K_p.T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1.1)$$

Figura 48-Diagrama de Blocos para a simulação dos controladores

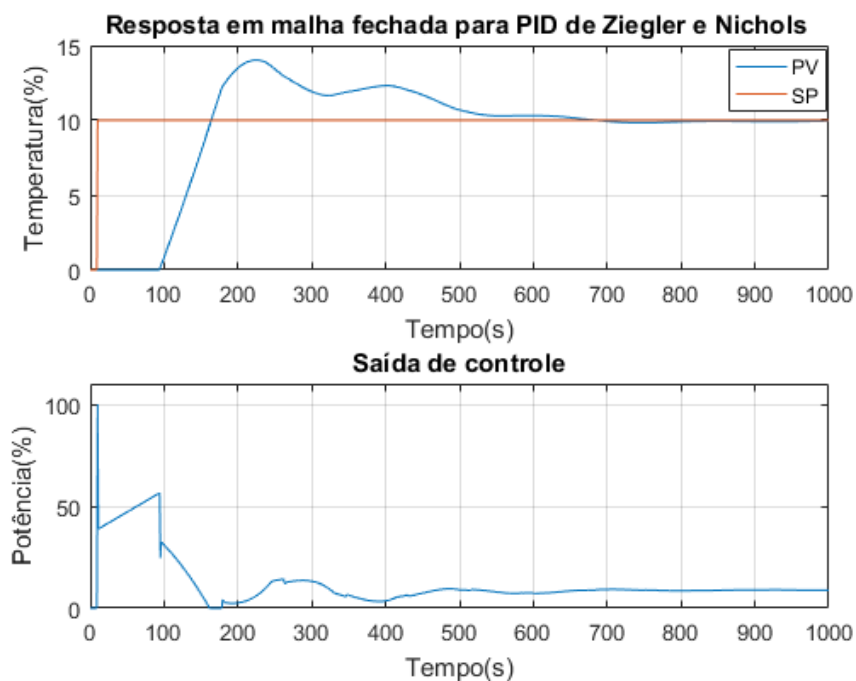


Fonte: Produção do próprio autor.

Nota :Para simulação utilizou-se um tempo de amostragem de 1 segundo, o mesmo que será utilizado no teste com o protótipo.

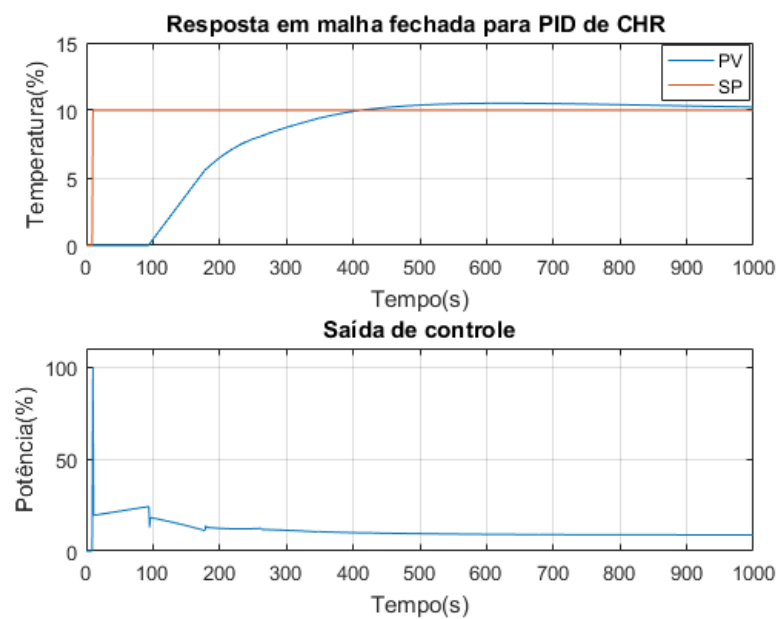
As figuras 49, 50, 51, 52 e 53 mostram a resposta a um degrau de 10% no setpoint para os controladores correspondentes a cada método de sintonia aplicado.

Figura 49-Simulação do controlador PID sintonizado pelo método de Ziegler & Nichols



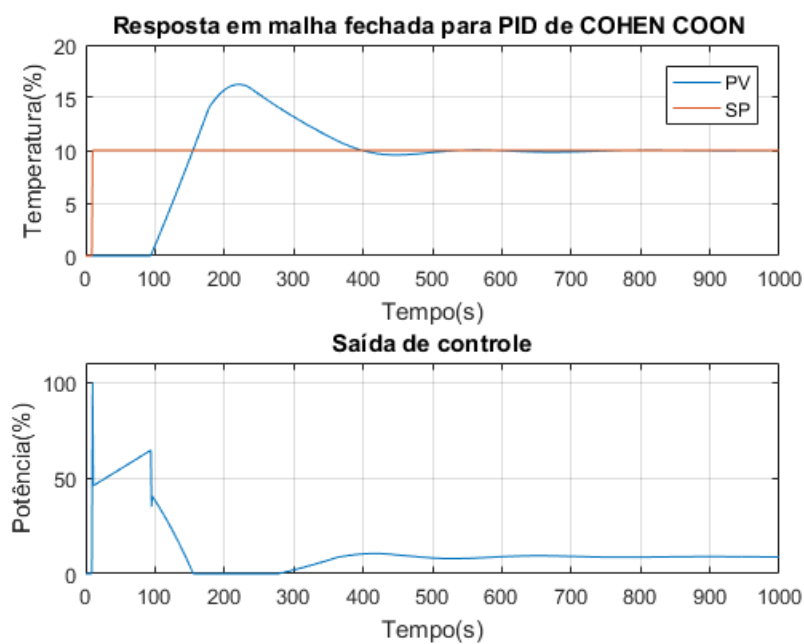
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 50-Simulação do controlador PID sintonizado pelo método CHR.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 51- -Simulação do controlador PID sintonizado pelo método de Cohen Conn..



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 52-Simulação do controlador PID sintonizado pelo método IAE.

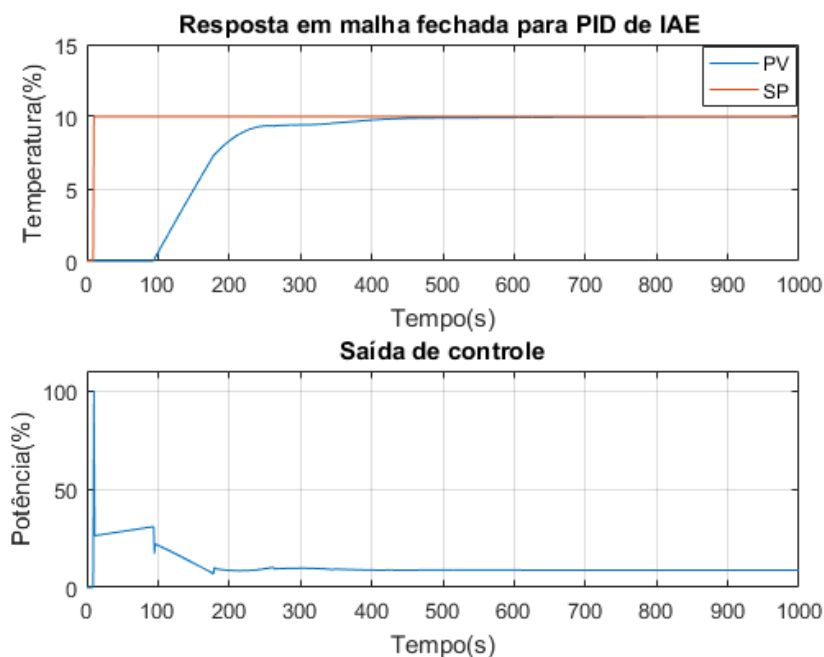
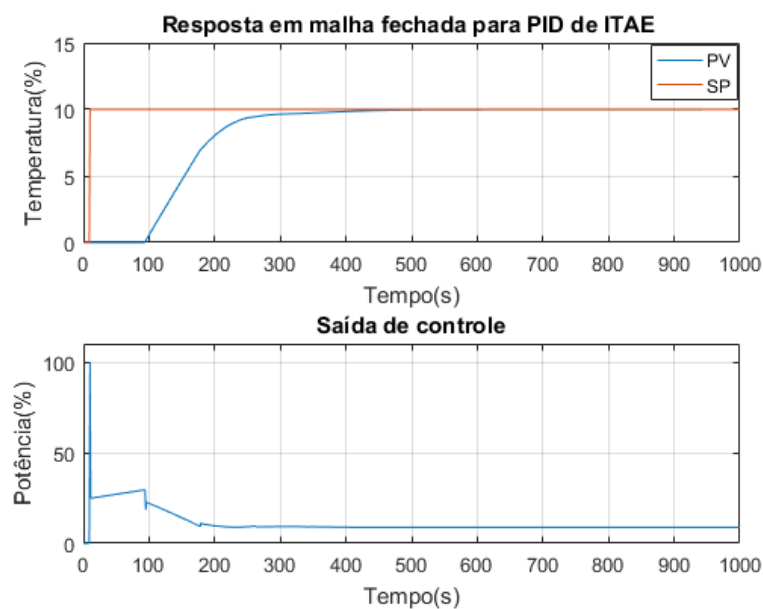


Figura 53- Simulação do controlador PID sintonizado pelo método ITAE.



Fonte: Produção do próprio autor.

A tabela 4, mostra os dados correspondentes as características de respostas para os controladores avaliados. Verifica-se que o critério que apresentou melhor desempenho, foi o critério ITAE, pois como já discutido, o desempenho visa reduzir o tempo de resposta e minimizar o sobressinal.

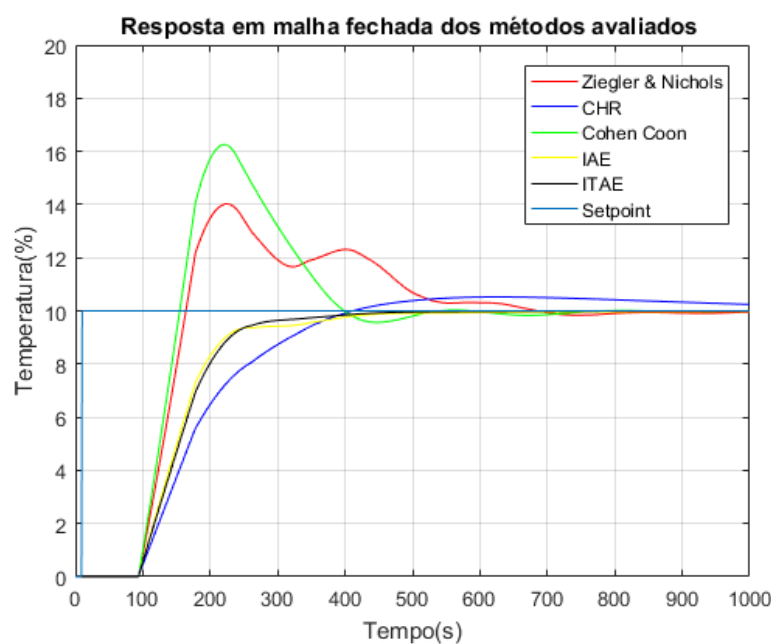
Tabela 4- Características de resposta em função de um degrau no setpoint na simulação

Método	t_r	t_s	t_p	A/B	C/A
Ziegler e Nichols em Malha aberta	56,09	646,81	225,00	40,23	-
CHR	210,35	1041	5,19	4,18	-
Cohen Coon	48,72	499,47	221	62,25	0,00
IAE	123,65	410,25	-	0,00	-
ITAE	117,88	378,74	-	0,00	-

Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 54, faz uma comparação de forma gráfica, da resposta ao degrau dos controladores PID avaliados. Confirma-se o que se concluiu observando a tabela 4, ou seja, o controlador com melhor desempenho é o obtido via o método ITAE.

Figura 54- Comparação dos controladores via simulação



Fonte: Produção do próprio autor

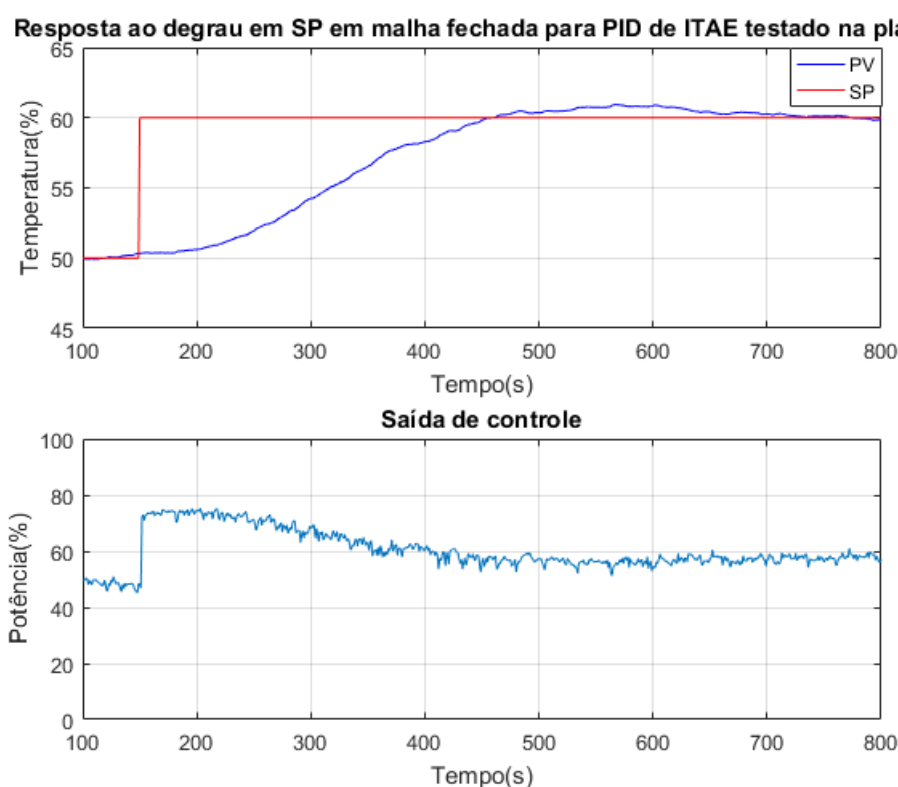
Conclui-se então o procedimento de sintonia do controlador, tendo como resultado o controlador obtido pelo método ITAE com **K_p=2,54**, **T_i=440,57** segundos, **T_d=30,47** segundos.

4.2 Aplicação do controlador PID na planta do protótipo

Após a sintonia do controlador realizado no capítulo anterior, foram feitos os testes no protótipo com o controlador PID sintonizado pelo critério ITAE com período de amostragem de 1 segundo, que foi o controlador escolhido por apresentar melhor desempenho via simulação.

Para avaliar o desempenho da malha de temperatura, primeiramente são considerados, as características de respostas a um degrau no setpoint, ou seja, para o problema de controle do tipo servo. Para isso, foi realizado um teste de degrau no setpoint no valor de 10%, que corresponde a mesma amplitude dos testes realizados na simulação. Primeiramente, o teste foi realizado em torno do ponto de operação no qual foi identificado o sistema. A figura 55 mostra o comportamento da temperatura e da saída de controle em função de uma variação de 50 a 60 % no setpoint, que corresponde a uma variação de 100 a 120 °C.

Figura 55-Resposta ao degrau obtida no protótipo com o PID sintonizado pelo método ITAE



Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se pela figura 50, que as características de respostas foram parecidas com as obtidas via simulação do modelo, com pequenas diferenças em relação ao tempo de estabelecimento e sobressinal. Essas diferenças podem ser justificadas devido ao modelo utilizado ser uma

aproximação de primeira ordem com tempo morto e também pelo fato de que o CLP utiliza um filtro para a variável de processo na entrada analógica. A tabela 5 apresenta as características de resposta ao degrau referentes a figura 50.

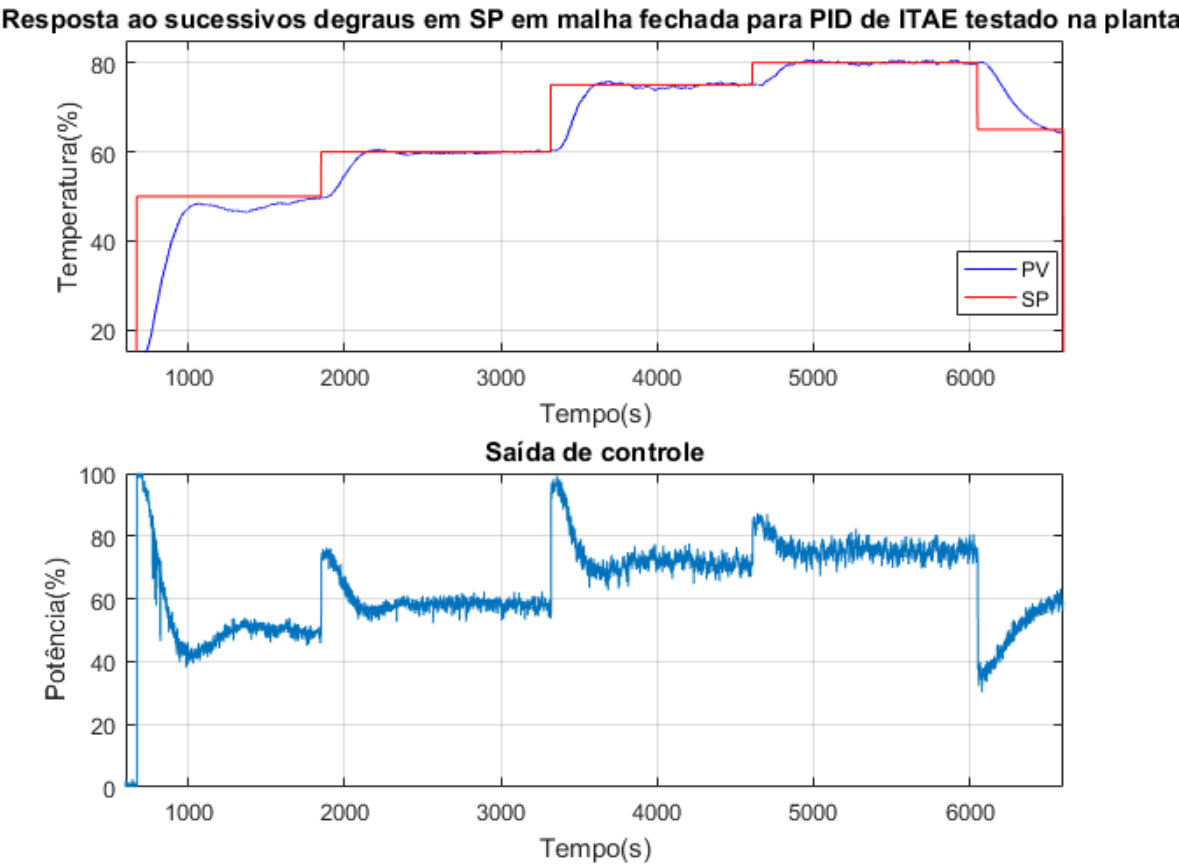
Tabela 5- Características de resposta em função de um degrau no setpoint.

Método	t_r	t_s	t_p	A/B	C/A
ITAE	200,61	640,23	472,00	1,53%	-

Fonte: Produção do próprio autor

Verifica-se da tabela 5 que o tempo de estabelecimento e o sobressinal estão dentro das especificações desejadas apresentadas no item 4.1. Foi também avaliado o desempenho do controlador em outras regiões de operação, em função também de variações em degrau no setpoint. Os resultados obtidos são mostrados na figura 56.

Figura 56- Resposta a sucessivos degraus obtida no protótipo com o PID sintonizado pelo método ITAE

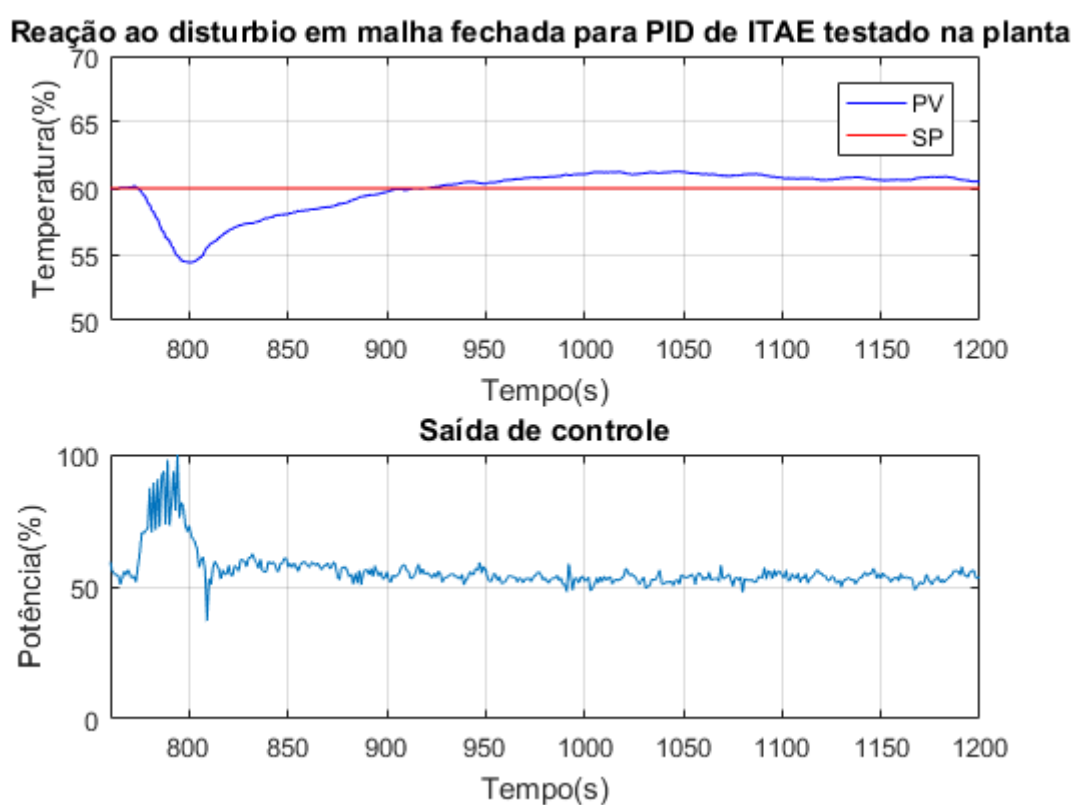


Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se, a partir da figura 56, que o controlador apresentou bom desempenho para o controle servo, mesmo em outros pontos de operação.

A fim de complementar a análise de desempenho do controlador, foi avaliado também o problema de controle regulatório, para isso foi efetuado um distúrbio na planta e coletado os dados de saída. O distúrbio foi provocado por meio de uma abertura da tampa do forno, fazendo que com haja, momentaneamente, uma redução da temperatura interna. A figura 57 mostra o teste de reação ao distúrbio que foi feito.

Figura 57-Reação ao distúrbio em malha fechada para PID de ITAE testado no protótipo



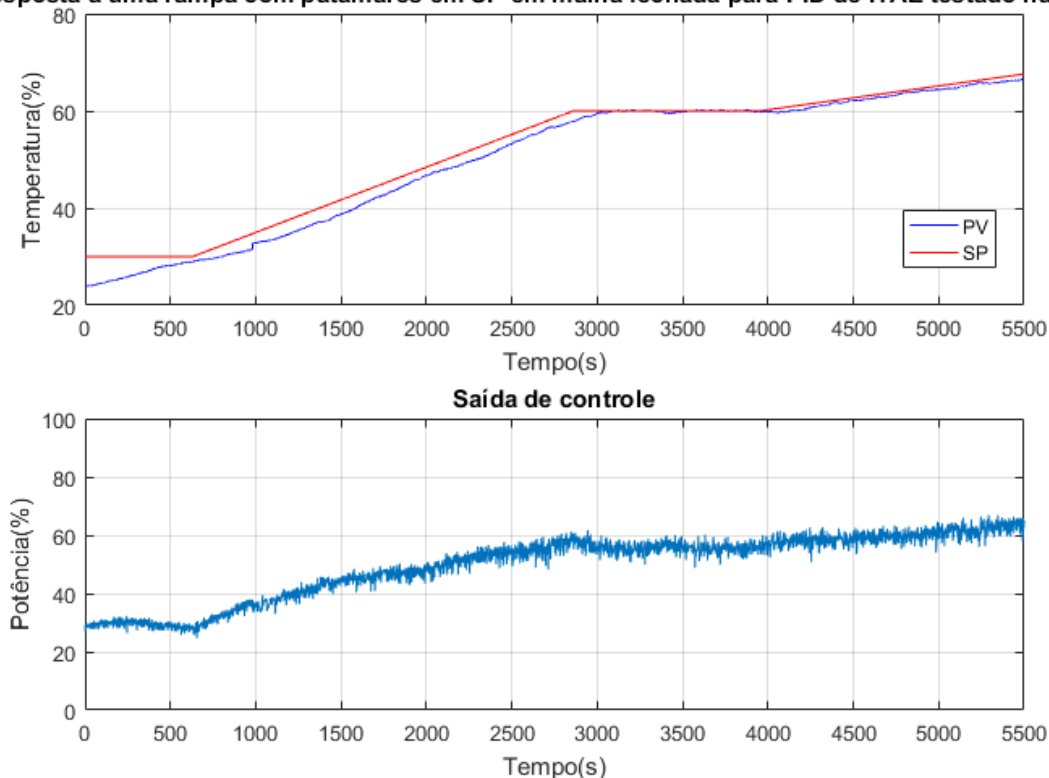
Fonte: Produção do próprio autor

Pode ser observar na figura 57, que o sistema de controle apresentou também desempenho satisfatório para o controle regulatório, apresentando boa rejeição ao distúrbio para o teste efetuado.

Foi realizado também, testes em malha fechada para setpoints descritos por rampas com patamares. Os resultados obtidos são mostrados na figura 58.

Figura 58-Resposta a rampa com patamares em SP, para o PID sintonizado pelo método ITAE

Resposta a uma rampa com patamares em SP em malha fechada para PID de ITAE testado na planta

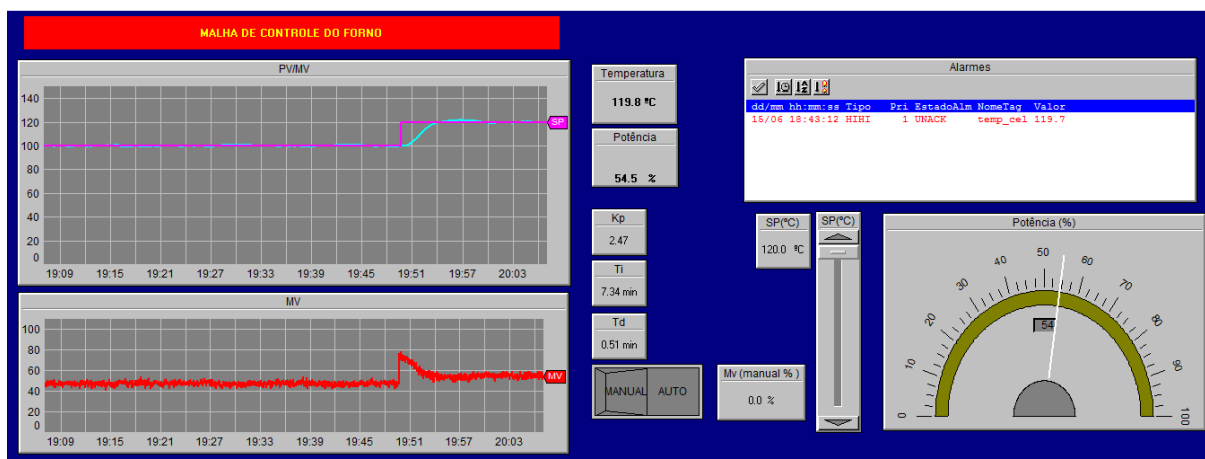


Fonte: Produção do próprio autor

Pode ser observar na figura 58, que o sistema de controle apresentou também desempenho satisfatório para seguir uma referência em rampa, apresentando apenas um pequeno erro em regime para as rampas de setpoint testadas. Isso se deve ao fato de o sistema ser do tipo 1, logo, o erro a rampa não é nulo para o controlador PID, sendo este inversamente proporcional ao ganho integral.

Por fim, o teste da malha de controle foi feito através do sistema de supervisão feito no software Elipse Scada, já citado anteriormente. A figura 54 mostra o sistema de supervisão implementado com as devidas TAG's já associadas aos objetos. Foi feito um teste de variação degrau no setpoint de 100 °C para 120 °C, os dados foram coletados e representados de forma gráfica nos objetos gráficos do sistema supervisório.

Figura 59-Sistema de supervisão se comunicando com CLP



Fonte: Produção do próprio autor

No sistema supervisório mostrado pela figura 59, podem ser visualizados os gráficos da temperatura, setpoint e saída do controlador. A saída do controlador, que corresponde a potência em percentual fornecida ao resistor de aquecimento, pode ser visualizada também por um “gauge”, mostrada no canto inferior direito da tela. O sistema permite também que o controlador seja colocado em modo manual, podendo realizar a identificação do sistema pelos próprios gráficos do sistema supervisório. Além disso, o usuário também pode alterar os ganhos do controlador e configurar alarmes para as variáveis pertinentes.

Vale ressaltar que esse layout se trata apenas de um modelo, sendo que o mesmo pode ser alterado de acordo com a preferência do usuário, tomando como base a descrição do sistema supervisório apresentado anteriormente.

5 CONCLUSÃO

Após os procedimentos de simulação e testes no protótipo, concluiu-se que a plataforma didática para controle de temperatura implementada atende aos requisitos de promover experimentos na área de controle de processos. Dentre as técnicas clássicas de identificação de sistemas, destacou-se o método do Ziegler e Nichols para obter o modelo a partir da curva de reação. Verificou-se que o modelo obtido possui uma boa qualidade para o problema de identificação proposto. Dos métodos de sintonia clássicos avaliados, destaca-se o método baseado no índice de desempenho ITAE, que produziu melhor desempenho para o problema de controle servo, produzindo o menor tempo de resposta e menor sobressinal. Constatou-se também, que o controlador PID sintonizado, produziu bom desempenho para os controles regulatórios e servo em diferentes pontos de operação. O sistema de supervisão utilizado também cumpriu com sua função, fornecendo dados das variáveis de processo de forma gráfica e demais interfaces de comunicação com a planta, sendo tudo isso, viabilizado por meio da comunicação OPC entre o CLP, e as aplicações feitas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L. A., **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. 2ª ed. rev. E ampl.– Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004.

_____. **Introdução à Identificação de Sistemas**. 2ª Edição, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004.

ASTROM, K.; HAGGLUND, T., **PID controllers: theory, design, and tuning**. North Carolina: Editora ISA, 1995.

AUTONICS. **Single phase, power controller**. SPC1 Series Manual. 2015.

BARBI, I.; **Eletrônica de potência** / Ivo Barbi. – 5ª Ed. – Florianópolis: Ed. Do Autor, 2005.

CAMARGO, V. L. A. D.; MORO, C., **Controladores Lógicos programáveis – sistemas discretos**. 1ª Ed. – São Paulo, Editora ERICA, 2008.

Campos, M. C. M., **Massa de controles típicos de equipamento e processos industriais** São Paulo, Editora Blucher, 2006.

COELHO, A. A. R., **Identificação de sistemas dinâmicos lineares** / Antonio Augusto Rodrigues Coelhos e Leandro dos Santos Coelho. 2ª Ed. rev, - Florianópolis: Ed. da UFSC, 2015.

DORF, C. R.; BISHOP, R. H., **Sistemas de Controle Modernos**. 8ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

FURTADO, E. C., MENDES, E. M. A. M., NEPOMUCENO, E.G. e SILVA, V. V. R. **Identificação de sistemas dinâmicos não-lineares contínuos utilizando modelos NARMAX: estudo de caso de um forno a arco elétrico**. XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, RN, 2 a 5 de setembro de 2002.

IFM ELETTRONIC. **Manual de instruções: Unidade de avaliação para sensores de temperatura.** TR2432, 2011.

LJUNG, L. **System Identificaton Toolbox User's Guide.** Disponível em: <http://www.mathworks.com>.

LUYBEN, M.; LUYBEN, W. **Essentials of Process Control.** New York, NY: McGraw-Hill, 1997.

MOSCINSKI, J., OGONOWSKI, Z. **Advanced control with Matlab & Simulink.** 1ª ed., Ellis Horwood, United Kingdom, 1995.

MUNSON, B. R.; MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Introdução À Engenharia de Sistemas Térmicos.** 1ed. Livros Téc. e Cient. Editora LTC, 2012.

NASCIMENTO FILHO, O. A., **Desenvolvimento de Servidores OPC DA e OPC XML DA para Sistemas de Aquisição de Dados via Telefonia Celular.** Vitória, 2005.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** 4ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

RODRIGUES, G. G. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Não Lineares Utilizando Modelos NARMAX Polinomiais - Aplicação a Sistemas Reais.** Dissertação de Mestrado do PPGE, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, junho de 1996.

ROQUE, L. A. O. L., **Automação de processos com linguagem Ladder e sistemas supervisórios/** Adalberto Oliveira Lima Roque. – 1ª Ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2014.

SIEMENS. **Programmable Controller System Manual.** S7 -200. 8ª Ed. 2005.

SIMOES, A. S. **Regressão e predição de trajetórias: um comparativo das técnicas clássicas e sua aplicação para a visão computacional no domínio do futebol de robôs.** Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais. USP. São Paulo, 1998.

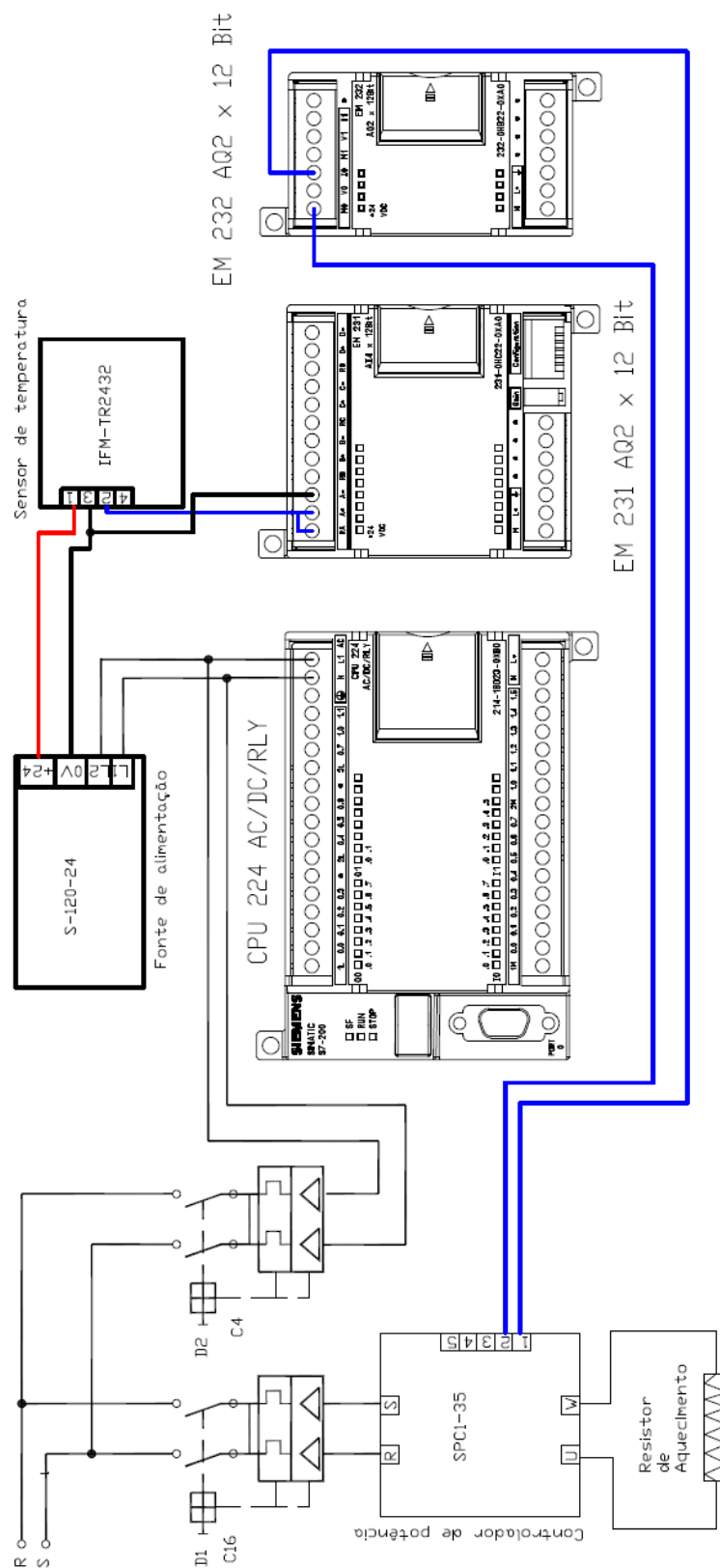
SÖDERSTRÖM, T., STOICA, P. **System Identification.** 1ª ed., Prentice Hall International,

United Kingdom, 1989.

ZIEGLER, J.; NICHOLS, N. **Optimum settings for automatic controllers.** Transactions of the ASME, [S.l.], v.64, 1942.

APÊNDICE A

Figura 60-Esquema de interligação dos instrumentos pertencentes a malha de controle



Fonte: Produção do próprio autor

APÊNDICE B-CÓDIGO FONTE DAS ROTINAS UTILIZADAS PARA SIMULAÇÃO NO MATLAB

```
%-----identifica.m-----
---%
%Métodos de identificação clássicos%

load('identifical0.mat') % abre os dados coletados da planta

figure(1); % plota a resposta ao degrau
subplot(2,1,1);
plot(t,pv2);
title('Resposta ao degrau em malha aberta')
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Temperatura(%)')
axis([0 1950 45 75])
grid on

subplot(2,1,2);
plot(t,u2);
title('Degrau na entrada')
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Potência(%)')
axis([0 1950 45 75])
grid on

figure(2); %método de ZN
K=1.136;
theta_zn=458-367;
tau_zn=791-458;
s=tf('s');
gzn=K/(tau_zn*s+1);
gzn.inputdelay=theta;
tau=tau_zn;

%comparação de zn e os dados do modelo
lsim(gzn,u2-50,t)
hold on
plot(t,pv2-50,'r');
title('Resposta ao degrau em malha aberta de G(s) comparada com o modelo')
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Temperatura(%)')
legend('Modelo','Dados');
grid on ;

%método de Haglund
K=1.136;
theta=451-367;
tau_ha=891-458;
s=tf('s');
gha=K/(tau_ha*s+1);
gha.inputdelay=theta;

%comparação de Haglund e os dados do modelo
figure(3);
```

```

lsim(gha,u2-50,t)
hold on
plot(t,pv2-50,'r');
legend('Modelo','Dados');
grid on ;

%método de smith
K=1.136;
tau_sm=1.5*(791-577);
theta_sm=791-tau_sm;
s=tf('s');
gsm=K/(tau_sm*s+1);
gsm.inputdelay=theta_sm;

%comparação de smith e os dados do modelo
figure(4);
lsim(gsm,u2-50,t)
hold on
plot(t,pv2-50,'r');
legend('Modelo','Dados');
grid on ;

%método de de Sundaresan e Krishnaswamyde
K=1.136;
tau_sk=0.67*(1040-609);
theta_sk=1.23*1040-0.29*609;
s=tf('s');
gsk=K/(tau_sk*s+1);
gsk.inputdelay=theta_sk;

%comparação de Sundaresan e Krishnaswamy e os dados do modelo
figure(5);
lsim(gsk,u2-50,t)
hold on
plot(t,pv2-50,'r');
legend('Modelo','Dados');
grid on ;

%comparação de todos os modelos
figure(6)
subplot(2,2,1);
lsim(gzn,u2-50,t)
hold on
plot(t,pv2-50,'r');
title('Método de Ziegler e Nichols');
xlabel('tempo(s)');
ylabel('temperatura(%)');
legend('Modelo','Dados');
grid on;

subplot(2,2,2);
lsim(gha,u2-50,t)
hold on
plot(t,pv2-50,'r')
title('Método de Hägglund');
xlabel('tempo(s)');
ylabel('temperatura(%)');
legend('Modelo','Dados');
grid on;

```

```

subplot(2,2,3);
lsim(gsm,u2-50,t)
hold on
plot(t,pv2-50,'r')
title('Método de Smith');
xlabel('tempo(s)');
ylabel('temperatura(%)');
legend('Modelo','Dados');
grid on;

subplot(2,2,4);
lsim(gsk,u2-50,t)
hold on
plot(t,pv2-50,'r')
axis([0 1950 0 30])
title('Método de Sundaresan e Krishnaswamy');
xlabel('tempo(s)');
ylabel('temperatura(%)');
legend('Modelo','Dados');
grid on;

% Controlador PID por Ziegler e nichols
kp=1.2*tau/(K*theta);
ti=2*theta;
td=0.5*theta;
%

%Controlador PID por CHR
kp=0.6*tau_zn/(K*theta);
ti=tau_zn;
td=0.5*theta;

% Controlador PID por CohenCoon
kp=(1.35+0.25*(theta/tau))*(tau/(K*theta));
ti=(1.35+0.25*(theta/tau))/(0.54+0.33*(theta/tau));
td=0.5*theta/(1.35+0.25*(theta/tau));

% Controlador PID por IAE
A=1.435;
B=-0.921;
C=0.878;
D=-0.738;
E=0.482;
F=1.137;
kp=(1/K)*(A*(theta/tau_zn)^B);
ti=tau_zn/(C*(theta/tau_zn)^D);
td=tau_zn*(E*(theta/tau_zn)^F);

% Controlador PID por ITAE
A=1.357;
B=-0.947;
C=0.842;
D=-0.749;
E=0.381;
F=0.995;
kp=(1/K)*(A*(theta/tau_zn)^B);
ti=tau_zn/(C*(theta/tau_zn)^D);
td=tau_zn*(E*(theta/tau_zn)^F);

```

```

%-----sintonia.m-----%

identifica; % abre os dados dos modelo e seleciona o ZN
K=1.136;
theta=theta_zn
tau=tau_zn

% Controlador PID por Ziegler e nichols
kp1=1.2*tau/(K*theta);
ti1=2*theta;
td1=0.5*theta;
%

% Controlador PID por CohenCoon
kp2=(1.35+0.25*(theta/tau))*(tau/(K*theta));
ti2=theta*(1.35+0.25*(theta/tau))/(0.54+0.33*(theta/tau));
td2=0.5*theta/(1.35+0.25*(theta/tau));

%Controlador PID por CHR
kp3=0.6*tau/(K*theta);
ti3=tau;
td3=0.5*theta;

% Controlador PID por ITAE
A=0.935;
B=-0.85;
C=0.796;
D=-0.147;
E=0.308;
F=0.929;
kp4=(1/K)*(A*(theta/tau)^B);
ti4=tau/(C+(theta/tau)*D);
td4=tau*(E*(theta/tau)^F);

% Controlador PID por IAE
A=0.965;
B=-0.869;
C=0.740;
D=-0.130;
E=0.348;
F=0.914;
kp5=(1/K)*(A*(theta/tau)^B);
ti5=tau/(C+(theta/tau)*D);
td5=tau*(E*(theta/tau)^F);

%-----comparaPID.m-----%
%Faz a simulação do sistema em malha fechada com os métodos de sintonia
%avaliados

load('PIDs.mat')

%Método de Ziegler nichols
figure(1);
subplot(2,1,1);

```

```

plot(tout,pv_zn);
hold on ;
plot(tout,setpoint);
title('Resposta em malha fechada para PID de Ziegler e Nichols ')
xlabel('Tempo(s) ');
ylabel('Temperatura(%) ');
axis([0 1000 0 15])
legend('PV','SP');
grid on

```

```

subplot(2,1,2);
plot(tout,u_zn);
title('Saída de controle')
xlabel('Tempo(s) ');
ylabel('Potência(%) ');
axis([0 1000 0 110])
grid on

```

```

%Método de CHR
figure(2);
subplot(2,1,1);
plot(tout,pv_chr);
hold on ;
plot(tout,setpoint);
title('Resposta em malha fechada para PID de CHR ')
xlabel('Tempo(s) ');
ylabel('Temperatura(%) ');
axis([0 1000 0 15])
legend('PV','SP');
grid on

```

```

subplot(2,1,2);
plot(tout,u_chr);
title('Saída de controle')
xlabel('Tempo(s) ');
ylabel('Potência(%) ');
axis([0 1000 0 110])
grid on

```

```

%Método de COHEN COON
figure(3);
subplot(2,1,1);
plot(tout,pv_coon);
hold on ;
plot(tout,setpoint);
title('Resposta em malha fechada para PID de COHEN COON ')
xlabel('Tempo(s) ');
ylabel('Temperatura(%) ');
axis([0 1000 0 20])
legend('PV','SP');
grid on

```

```

subplot(2,1,2);
plot(tout,u_coon);
title('Saída de controle')
xlabel('Tempo(s) ');
ylabel('Potência(%) ');
axis([0 1000 0 110])
grid on

```

```

%Método IAE
figure(4);
subplot(2,1,1);
plot(tout,pv_iae);
hold on ;
plot(tout,setpoint);
title('Resposta em malha fechada para PID de IAE ');
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Temperatura(%)');
axis([0 1000 0 15]);
legend('PV','SP');
grid on

subplot(2,1,2);
plot(tout,u_iae);
title('Saída de controle');
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Potência(%)');
axis([0 1000 0 110]);
grid on

%Método ITAE
figure(5);
subplot(2,1,1);
plot(tout,pv_itae);
hold on ;
plot(tout,setpoint);
title('Resposta em malha fechada para PID de ITAE ');
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Temperatura(%)');
axis([0 1000 0 15]);
legend('PV','SP');
grid on

subplot(2,1,2);
plot(tout,u_itae);
title('Saída de controle');
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Potência(%)');
axis([0 1000 0 110]);
grid on

%Compara os métodos
figure(6);
plot(tout,pv_zn,'r');
hold on ;
plot(tout,pv_chr,'b');
plot(tout,pv_conon,'g');
plot(tout,pv_iae,'y');
plot(tout,pv_itae,'black');
plot(tout,setpoint);
legend('Ziegler & Nichols','CHR','Cohen Coon','IAE','ITAE','Setpoint');
title('Resposta em malha fechada dos métodos avaliados ');
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Temperatura(%)');
axis([0 1000 0 20]);
grid on

```